



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Sebastian Kluge

Prüfstandserweiterung zur Untersuchung alternativer synthetischer Kraftstoffe für Dieselmotoren

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und
Produktion*

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

Sebastian Kluge

**Prüfstandserweiterung zur Untersuchung
alternativer synthetischer 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.-Ing. Jan Piatek

Zweitprüferin: Prof. Dr. Anika Sievers

Abgabedatum: 12.08.2021

Zusammenfassung

Sebastian Kluge

Titel der Arbeit

Prüfstandserweiterung zur Untersuchung alternativer synthetischer Kraftstoffe für Dieselmotoren

Stichworte

Prüfstandtechnik, Messtechnik, Verbrennungsmotor, Kraftstoffversorgung, FT-Synthese, Kraftstoffe, Diesel, Methanol, Dimethylether, Oxymethylenether, Schadstoffe, Emissionen

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept für die Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur eines Motorenprüfstands vorgestellt um alternative und synthetische Kraftstoffe am Dieselmotor zu untersuchen. Um die Eignung synthetischer Kraftstoffe wie Methanol, Dimethylether (DME) und Oxymethylenether (OME) für einen Prüfstandbetrieb festzustellen, werden die physikalischen Eigenschaften und die chemischen Strukturen betrachtet und mit Dieselmotorkraftstoff verglichen. Synthetische Kraftstoffe können im dieselmotorischen Betrieb die Stickstoffoxid- und Rußbildung reduzieren sowie mit nachhaltigen Energiequellen CO₂-neutral hergestellt werden. Ein Prüfstandbetrieb mit Methanol und OME als Kraftstoffzusatz zum Mineralöldiesel in ausgewählten Mischungsverhältnissen ist möglich ohne Schäden am Prüfstand oder Prüfmotor zu verursachen. Ein Testbetrieb mit OME₃₋₅ zur Untersuchung verbrennungsmotorischer Prozesse sowie der messtechnischen Analyse von Schadstoffemissionen steht bisher noch aus.

Summary

Sebastian Kluge

Title of the paper

Test bench extension for the investigation of alternative synthetic fuels for diesel engines

Keywords

Test bench technology, Measurement technology, Internal combustion engine, Fuel supply, FT Synthesis, Fuels, Diesel, Methanol, Dimethyl ether, Oxymethylene ether, Pollutants, Emissions

Abstract

In this paper, a concept for the extension of the fuel infrastructure of an engine test bench is presented in order to investigate alternative and synthetic fuels for the diesel engine. To determine the suitability of synthetic fuels such as methanol, dimethyl ether (DME), and oxymethylene ether (OME) for a test bench operation, the physical properties and chemical structures are considered and compared with diesel fuel. Synthetic fuels can reduce nitrogen oxide and soot formation in diesel engine operation, as well as reducing CO₂ emissions by using sustainable energy to enable carbon neutral production. Test bench operation with methanol and OME as fuel additives to mineral diesel in selected blend ratios is possible without causing damage to the test bench or engine. A test operation with OME₃₋₅ for the investigation of combustion engine processes as well as the metrological analysis of pollutant emissions is still pending.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Diagrammverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Prüfstandaufbau und -technik	2
2.1 Prüfstand und Prüfmotor	2
2.2 Kraftstoffversorgung Maschinenhalle	3
2.3 Kraftstoffversorgung Motorenprüfkabine	4
2.3.1 Rohrleitungssystem	4
2.3.2 Messeinrichtung	6
2.3.3 Verbrennungsmotor	7
2.4 Messtechnik zur Abgasanalyse	8
2.4.1 Trübungsmessgerät	9
2.4.2 Rauchwertmessgerät	9
3 Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur	10
3.1 Konzeptionelle Anlagenerweiterung	10
3.1.1 Anlagenerweiterung	10
3.1.2 Rohrleitungssystem	10
3.1.3 Kraftstoffbehälter	11
3.2 Auslegung und Berechnung	13
3.2.1 Massenstrom	13
3.2.2 Zeiträume	14
3.2.3 Behältervolumen	16
3.3 Ausgeführte Anlagenerweiterung	17

4 Synthetische Dieselkraftstoffe	19
4.1 Herstellung und CO ₂ -Bilanz	19
4.2 Struktur und Aufbau	22
4.3 Eigenschaften im Vergleich	24
4.3.1 Zündwilligkeit	24
4.3.2 Massendichte	24
4.3.3 Energiedichte	26
4.4 Eigenschaft der Schmierfähigkeit	27
4.4.1 Verfahren und Bedingungen	27
4.4.2 Auswertung und Ergebnisse	28
4.5 Eigenschaft der Materialverträglichkeit	32
4.6 Analyse nach Reaktionsgleichung	33
4.6.1 Kraftstoffzusammensetzung	34
4.6.2 Abgaszusammensetzung	36
4.6.3 Sauerstoff- und Luftbedarf	38
5 Versuchsdurchführung und -auswertung	40
5.1 Testkraftstoff OME ₃₋₅	40
5.1.1 Zusammensetzung und Einordnung	40
5.1.2 Berechnung der Energiedichte	42
5.1.3 Analyse nach Reaktionsgleichung	44
5.2 Zylinderdruckverlauf	46
5.3 Summenheizverlauf	47
6 Fazit und Ausblick	50
Literaturverzeichnis	51
Anhangsverzeichnis	53
Erklärung zur Arbeit	58

Abbildungsverzeichnis

2.1	Motorenprüfstand in der Maschinenhalle	2
2.2	Verbrennungsmotor in der Prüfkabine	2
2.3	Behälter für Dieselkraftstoff	3
2.4	Behälter für Ottokraftstoff	3
2.5	Leitungsverlauf in der Prüfkabine	3
2.6	Rohrleitungssystem in der Prüfkabine	5
2.7	Absperrarmatur für Dieselkraftstoff	5
2.8	Messeinrichtung in der Prüfkabine	6
2.9	Anschlüsse in der Messeinrichtung	6
2.10	Messgerät für die Abgastrübung	8
2.11	Messgerät für die Abgasschwärzung	8
2.12	Prinzipskizze des Abgasrohrs	8
3.1	Schaltstellungen für die Umschaltarmatur	11
3.2	Kraftstoffbehälter vor dem Umbau	12
3.3	Kraftstoffbehälter nach dem Umbau (1 von 3)	12
3.4	Kraftstoffbehälter nach dem Umbau (2 von 3)	12
3.5	Kraftstoffbehälter nach dem Umbau (3 von 3)	12
3.6	Prinzipskizze der Anlagenerweiterung	17
3.7	Ausgeführte Anlagenerweiterung (1 von 2)	18
3.8	Ausgeführte Anlagenerweiterung (2 von 2)	18
4.1	Verfahrensschritte zur Kraftstoffherstellung	20
4.2	Prozesskette der CO ₂ -Emissionen	21
4.3	Strukturformeln synthetischer Kraftstoffe	23
4.4	Verschleißbereiche einer Abriebkalotte	29
4.5	Prinzipskizze eines Schwingungverschleiß-Prüfgeräts	30
4.6	Abriebkalotten von Diesel-Ethanol-Gemischen	31
4.7	Kennzeichnung von Kraftstoffleitungen	33

Tabellenverzeichnis

2.1	Armaturenbezeichnung im Motorenprüfstand	5
2.2	Bezeichnungen in der Messeinrichtung	7
3.1	Komponenten für die Anlagenerweiterung	11
3.2	Dimensionen der Kraftstoffleitungen	15
3.3	Dauer für Inhaltsaustausch und Prüfstandbetrieb	16
4.1	Cetanzahl von Kraftstoffen	24
4.2	Massendichte von Kraftstoffen	25
4.3	Mischungsverhältnis zum Dieselmotorkraftstoff	25
4.4	Energiedichte von Kraftstoffen	27
4.5	Bedingungen für das HFRR-Prüfverfahren	28
4.6	Schmierfähigkeit von Kraftstoffen	29
5.1	Prozentuale Zusammensetzung von OME ₃₋₅	40
5.2	Elementare Zusammensetzung von OME ₃₋₅	42
5.3	Vergleich der Eigenschaften von OME ₃₋₅	42
5.4	Berechnungs- und Messwerte von Energiedichten	43

Diagrammverzeichnis

4.1	Sauerstoffgehalt und Energiedichte von OME	26
4.2	Verschleißwerte von Diesel-Ethanol-Gemisch	32
4.3	Kraftstoffzusammensetzung	35
4.4	Kraftstoffzusammensetzung von OME	36
4.5	Abgaszusammensetzung	37
4.6	Abgaszusammensetzung von OME	38
4.7	Sauerstoff- und Luftbedarf	39
4.8	Luftüberschuss und Luftzahl	39
5.1	Sauerstoffgehalt und Energiedichte von Diesel-OME ₃₋₅ -Gemisch	44

5.2	Kraftstoffzusammensetzung von Diesel-OME ₃₋₅ -Gemisch	45
5.3	Abgaszusammensetzung von Diesel-OME ₃₋₅ -Gemisch	45
5.4	Sauerstoff- und Luftbedarf von Diesel-OME ₃₋₅ -Gemisch	45
5.5	Zylinderdruckverlauf für Diesel- und Mischkraftstoff	46
5.6	Heizverlauf für Diesel- und Mischkraftstoff	49
5.7	Summenheizverlauf für Diesel- und Mischkraftstoff	49

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung	GtL	Gas-to-Liquid
BHKW	Blockheizkraftwerk	HFRR	High Frequency Reciprocating Rig
BtL	Biomass-to-Liquid	LKW	Lastkraftwagen
CCU	Carbon Capture and Usage	MeOH	Methanol
CCS	Carbon Capture and Storage	NFZ	Nutzfahrzeuge
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	NO _x	Stickstoffoxide
CtL	Coal-to-Liquid	OME	Oxymethylenether
CZ	Cetanzahl	PKW	Personenkraftwagen
DAC	Direct Air Capturing	PtL	Power-to-Liquid
DME	Dimethylether	TtW	Tank-to-Wheel
DOC	Dieseloxydationskatalysator	VTG	Variable Turbinengeometrie
DPF	Dieselpartikelfilter	WSD	Wear Scar Diameter
FKM	Fluorkarbonkautschuk	WtT	Well-to-Tank
FT	Fischer-Tropsch	WtW	Well-to-Wheel

Symbolverzeichnis

A_S	Querschnittsfläche Kraftstoffleitung	m^2
A_K	Querschnittsfläche Kolben	m^2
b_e	Kraftstoffverbrauch (effektiv)	$\text{kg W}^{-1} \text{s}^{-1}$
b_r	Kraftstoffrückflussrate	–
c_v	Wärmekapazität Luft (isochor)	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$D_{\text{eq,g}}$	Dieseläquivalent (gravimetrisch)	–
$D_{\text{eq,v}}$	Dieseläquivalent (volumetrisch)	–
d_a	Außendurchmesser Kraftstoffleitung	m
d_i	Innendurchmesser Kraftstoffleitung	m
φ	Kurbelwinkel	$^\circ\text{KW}$
g	Beschleunigung Erdschwerefeld	m s^{-2}
h	Höhe Flüssigkeitsspiegel	m
H_u	Heizwert (Energiedichte)	MJ kg^{-1}
κ	Isentropenexponent	–
l	Pleuellänge	m
λ	Verbrennungsluftverhältnis (Luftzahl)	–
\dot{m}_K	Kraftstoffmassenstrom	kg s^{-1}
P_M	Motorleistung	W
p_z	Zylinderdruck	Pa
Q_B	Brennverlauf	$\text{J }^\circ\text{KW}^{-1}$
Q_H	Heizverlauf	$\text{J }^\circ\text{KW}^{-1}$
Q_W	Wärmeverluste (Zylinderwand)	$\text{J }^\circ\text{KW}^{-1}$
R_L	Gaskonstante Luft	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
r	Kurbelradius	m
ρ_D	Dichte Dieseldieselkraftstoff	kg m^{-3}
s	Wandstärke Kraftstoffleitung	m
s_K	Kolbenweg	m

t_A	Dauer Inthaltstausch	s
t_B	Dauer Prüfstandbetrieb	s
V_B	Volumen Kraftstoffbehälter	m ³
V_K	Volumen Kraftstoffleitung	m ³
V_h	Zylinderhubvolumen	m ³
V_c	Zylinderkompressionsvolumen	m ³
V_z	Zylindergesamtvolumen	m ³
w_S	Strömungsgeschwindigkeit Kraftstoffleitung	m s ⁻¹
ζ	Massenanteil	kg kg ⁻¹

1 Einleitung

„Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und diese Kohle-Teer-Produkte von heute.“

RUDOLF CHRISTIAN KARL DIESEL (1858 - 1913)

Schon dem Erfinder des Dieselmotors war bewusst, dass alternative Kraftstoffe an Bedeutung gewinnen werden. Bereits zehn Jahre nach seinem Tod wurde ein großtechnisches Verfahren zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe entwickelt und patentiert - die Fischer-Tropsch-Synthese. Dieses Verfahren kann für die CO₂-Neutralität im Verkehrs- und Transportsektor sorgen, sofern die Energie für die gesamte Prozesskette nachhaltig bereitgestellt wird. Zudem sind synthetische Kraftstoffe in der Lage die Stickstoffoxid- und die Rußbildung zu reduzieren und den bisherigen Konflikt zu lösen. Ein besserer Verbrennungsprozess kann eine komplexe Abgasnachbehandlung ersetzen. Ebenso ergibt sich die Möglichkeit überschüssige elektrische Energie aus volatilen Erzeugern langfristig als chemische Energie zu speichern. Der in Verruf geratene Dieselmotor könnte somit zum Klima- und Umweltschutz beitragen und den politischen Entscheidungen sowie den gesellschaftlichen Diskussionen entgegenkommen. Um die Auswirkung synthetischer Kraftstoffe auf den Verbrennungsprozess und die Schadstoffemissionen festzustellen, wird die Kraftstoffversorgung eines Motorenprüfstands erweitert.

In den ersten zwei Kapiteln werden der Aufbau und die Technik des Motorenprüfstands betrachtet sowie die konzeptionelle und ausgeführte Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur beschrieben. Zudem wird die bestehende Kraftstoffversorgung in der Maschinenhalle und in der Prüfkabine anhand einer Lagebeschreibung sowie eines Anlagenschemas erläutert. Des Weiteren werden die Funktion und die Integration der Messtechnik zur Abgasanalyse betrachtet sowie Berechnungen für die Kraftstoffversorgung vorgenommen. Im nachfolgenden Kapitel werden die synthetischen Kraftstoffe *Methanol*, *DME* und *OME* bezüglich ihrer Eigenschaften mit mineralischem Dieselkraftstoff verglichen. Die Eigenschaft der Schmierfähigkeit und der Materialverträglichkeit wird dabei genauer betrachtet. Darüber hinaus wird die Herstellung synthetischer Kraftstoffe mit Bezug zur Umweltverträglichkeit anhand ihrer chemischen Struktur verdeutlicht und die Kraftstoff- und Abgaszusammensetzung mittels der Reaktionsgleichung für technische Verbrennungsprozesse ermittelt und in Diagrammen veranschaulicht. Im letzten Kapitel wird der bereits zur Verfügung stehende Testkraftstoff vorgestellt und hinsichtlich seiner Zusammensetzung eingeordnet. Darauf aufbauend erfolgt eine Berechnung der Energiedichte mit einer empirischen Formel und wiederum eine Analyse mittels der Reaktionsgleichung. Da ein Testbetrieb noch aussteht, werden die Änderungen im Verbrennungsprozess anhand eines Zylinderdruck- und Summenheizverlaufs prognostiziert und ebenso in Diagrammen dargestellt.

2 Prüfstandaufbau und -technik

2.1 Prüfstand und Prüfmotor

Der dieser Arbeit zugrundeliegende Prüfstand ist einer von fünf Motorenprüfkabinen in der Maschinenhalle des Zentrums für Energietechnik im Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen des Departments für Maschinenbau und Produktion. Dieser Motorenprüfstand dient der Untersuchung verbrennungsmotorischer Prozesse sowie der messtechnischen Analyse von Schadstoffemissionen. Als Prüfmotor steht ein wassergekühlter und turboaufgeladener Reihenvierzylinder-Dieselmotor des Automobilherstellers *Volkswagen* in Form eines Industriemotors zur Verfügung. Industriemotoren in dieser Leistungsklasse sind vollwertige Fahrzeugmotoren wie sie auch in Personenkraftwagen oder leichten Nutzfahrzeugen zu finden sind. Der Dieselmotor schöpft aus 1968 cm^3 Hubraum eine maximale Leistung von 75 kW bei einer Drehzahl von 3000 min^{-1} . Das maximale Drehmoment von 285 N m liegt bei einer Drehzahl von 1750 min^{-1} an. Die Zufuhr der Ladeluft erfolgt über einen Abgasturbolader (VTG-Lader) mit variabler Turbinengeometrie, der aufgrund seiner Bauweise den Ladedruck begrenzen kann. Aufgrund der Temperaturerhöhung nach dem Verdichtungsprozess ist dem VTG-Lader ein Ladeluftkühler nachgeschaltet. Der Kraftstoff wird mittels einer Common-Rail-Direkteinspritzung mit Piezo-Injektoren dem Brennraum zugeführt. Die Kraftstoffzufuhr erfolgt dabei über eine Vor- und Haupteinspritzung für einen kontrollierten Verbrennungsprozess. Für den Ladungsaustausch besitzt jeder Zylinder vier Ventile, die über zwei obenliegenden Nockenwellen gesteuert werden. Die Abgasnachbehandlung wird mit einer gekühlten Abgasrückführung (AGR) im Hochdruckbereich und einem Dieselpartikelfilter (DPF) mit vorgeschaltetem Dieseloxydationskatalysator (DOC) realisiert. Mit diesen Maßnahmen erfüllt der Dieselmotor die Emissionsgrenzwerte der Schadstoffklasse 5 der EU-Abgasnorm. Der Prüfstand und der Prüfmotor werden in den Abbildungen 2.1 und 2.2 dargestellt.



Abbildung 2.1: Prüfstand

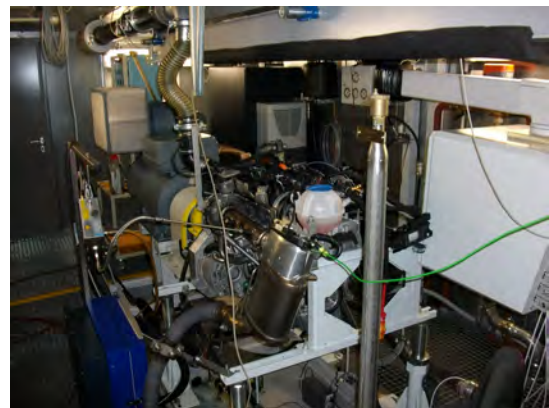


Abbildung 2.2: Prüfmotor

2.2 Kraftstoffversorgung Maschinenhalle

Die Versorgung der Motorenprüfkabinen mit Diesel- und Ottokraftstoff erfolgt über mehrere Kraftstoffbehälter, die sich in der Maschinenhalle befinden. Die Behälter werden wiederum von größeren Lagertanks im Außenbereich über Förderpumpen befüllt. Zudem befinden sich die Kraftstoffbehälter gegenüber den Prüfkabinen in einer erhöhten Lage, sodass mit dem Prinzip der Hydrostatik ein ausreichender Vordruck gewährleistet wird. Die Behälter für die zentrale Kraftstoffversorgung der Maschinenhalle sind in den Abbildungen 2.3 und 2.4 dargestellt. Über Rohrleitungen in Unterflurkanälen werden die Motorenprüfkabinen jeweils mit Diesel- und Ottokraftstoff versorgt. Mittels stationärer Schnellkupplungen in den Prüfkabinen können verbrennungsmotorische Versuchsaufbauten an die Kraftstoffinfrastruktur angeschlossen werden.



Abbildung 2.3: Kraftstoffbehälter Diesel



Abbildung 2.4: Kraftstoffbehälter Benzin

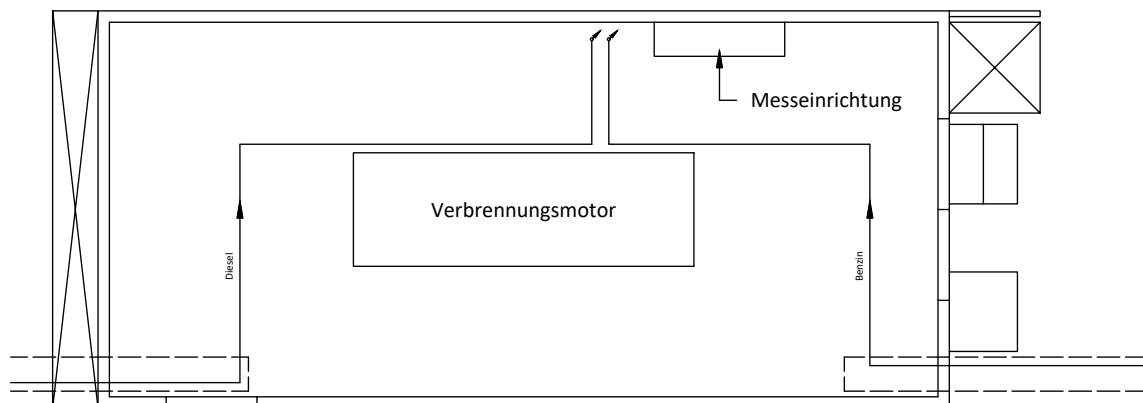


Abbildung 2.5: Leitungsverlauf in der Prüfkabine (siehe auch Anhang [A])

Im Anhang [A] wird in einem Teilgrundriss die Maschinenhalle dargestellt und die Lage sämtlicher Rohrleitung für die Kraftstoffversorgung beschrieben. Je nach Kraftstoffart sind die Leitungen farblich hervorgehoben. Die Fließrichtungen der horizontalen und vertikalen (Steig- und Fall-) Leitungen sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die Beschriftung *Zulauf* gibt die genaue Lage oder die ungefähre Richtung der Kraftstoffbehälter an. Die Motorenprüfkabinen sind nummeriert und nach ihrem Raumvolumen mit der Bezeichnung *Typ A* oder

Typ B aufgeschlüsselt. Dem Zweck nach idealisiert, sind die Prüfkabinen in Größe und Lage im Gebäudegrundriss korrekt dargestellt. Der Leitungsverlauf in der Motorenprüfkabine wird in der Abbildung 2.5 dargestellt. Die Rohrleitungen für Diesel und Benzin verlaufen in der Prüfkabine weiterhin horizontal unter Gitterroste. An der Außenwand werden die Leitungen vertikal durch die Roste geführt. Im Anhang [B] wird an den Steigleitungen angeknüpft und in den Kapiteln 2.3.1 bis 2.3.3 wird der weitere Leitungsverlauf in der Motorenprüfkabine anhand eines Anlagenschemas beschrieben.

2.3 Kraftstoffversorgung Motorenprüfkabine

Die Kraftstoffversorgung in der Prüfkabine setzt sich grundlegend aus dem Rohrleitungssystem, der Messeinrichtung und dem Verbrennungsmotor zusammen. Da die Messeinrichtung Wärmetauscher besitzt, wird sie auch Konditionierungsanlage genannt. Kraftstoffe können somit gekühlt oder erwärmt werden bevor sie den Verbrennungsmotor erreichen. Die Änderung der Kraftstofftemperatur dient beispielsweise der Simulation von Außentemperaturen zu unterschiedlicher Jahreszeiten. Die Bezeichnung *Messeinrichtung* trifft dennoch eher zu, da überwiegend Mess- und Steuerungstechnik für Durchfluss, Druck und Temperatur verbaut sind. Im Anhang [B] wird der weitere Leitungsverlauf sowie der funktionelle Aufbau der Messeinrichtung und des Verbrennungsmotors beschrieben. Das Anlagenschema ist eine vollständige Darstellung der Kraftstoffversorgung in der Motorenprüfkabine. Die Wege der Kraftstoffe können vom Zulauf in den Steigleitungen bis zur Einspritzung im Dieselmotor nachvollzogen werden. Die farblich hervorgehobene Anlagenerweiterung wird im Kapitel 3.1.1 genauer erläutert.

2.3.1 Rohrleitungssystem

In der Tabelle 2.1 werden die Absperr- und Umschaltarmaturen in der Motorenprüfkabine nach Bauart, Funktion und Medium aufgeschlüsselt. Die Spalte *Medium* benennt dabei die Kraftstoffart, die von der Armatur umgeschaltet oder abgesperrt wird. Die Kraftstoffe mit der Bezeichnung *Diesel (rein)* und *Benzin (rein)* sind unverschnittene Mineralölkraftstoffe. Die Bezeichnung *Diesel (mix)* sind Mischkraftstoffe wie beispielsweise Diesel-OME-Gemische oder Diesel-Methanol-Gemische. Bei der Bezeichnung *Kraftstoff* kann das Medium nicht mehr differenziert werden. Ob Armaturen von der konzeptionellen Anlagenerweiterung betroffen sind und wie diese in der Motorenprüfkabine beschriftet sind, kann der Spalte *Bezeichnung* entnommen werden.

Bezeichnung	Bauart	Funktion	Medium
H41-1	umgerüstet	3/2-Wege-Hahn	Diesel (rein) Diesel (mix)
H42-1	umgerüstet	Durchgangshahn	Diesel (mix)
H51-1	vorhanden	Durchgangshahn	Benzin (rein)
H61-1	vorhanden	3/2-Wege-Hahn	Diesel (alle) Benzin (rein)
H62-1	vorhanden	3/2-Wege-Hahn	Kraftstoff
H63-1	vorhanden	Durchgangshahn	Kraftstoff
H64-1	vorhanden	Durchgangshahn	Kraftstoff
H65-1	vorhanden	Durchgangshahn	Kraftstoff
R61-1	vorhanden	Rückschlagklappe	Kraftstoff

Tabelle 2.1: Armaturenbezeichnung im Motorenprüfstand (siehe auch Anhang [B])



Abbildung 2.6: Rohrleitungssystem

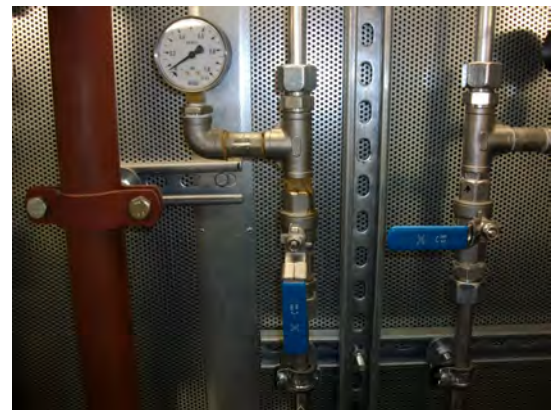


Abbildung 2.7: Absperrarmatur H41-1

Der reguläre Zulauf aus den Kraftstoffbehältern in der Maschinenhalle erfolgt über die in Kapitel 2.2 erwähnten Steigleitungen, die jeweils mit den Armaturen H41-1¹ und H51-1 abgesperrt werden können. Die Armatur H61-1 erlaubt den Kraftstoffwechsel von Diesel auf Benzin und umgekehrt. Da die Prüfkabine mit einem Dieselmotor ausgerüstet ist, erübrigt sich die Funktion dieser Umschaltarmatur. Nachfolgend kann mit der Armatur H62-1 die Bypass-Funktion für die Messeinrichtung gewählt werden. Damit wird die Messeinrichtung umgangen und der Verbrennungsmotor direkt und ohne Umwege mit Kraftstoff versorgt. Die Armatur R61-1 verhindert dabei etwaige Rückströmungen zur Messeinrichtung. Der Kraftstoffvorlauf zum Dieselmotor kann mit der Armatur H63-1 abgesperrt werden. Für das Entleeren und Spülen der Rohrleitungen müssen die Armaturen H64-1 und H65-1 in

¹Armatur ausgeführt als Durchgangshahn

Kombination mit den zuvor genannten Armaturen H62-1 und H63-1 geschaltet werden. Der abgelassene Kraftstoff wird in einem Auffangbehälter gesammelt und dem Ablauf zugeführt. In den Abbildungen 2.6 und 2.7 wird das Rohrleitungssystem und der Durchgangshahn *H41-1* für die Absperrung des Dieselmotorkraftstoffs dargestellt.

2.3.2 Messeinrichtung

In der Tabelle 2.2 werden die einzelnen Anschlüsse der Messeinrichtung nach ihrer alphabetischen Bezeichnung aufgelistet. Die Fließrichtung des jeweiligen Mediums kann mittels der Spalten *Funktion* und *Apparatur* abgelesen werden. Die Messeinrichtung und ihre Anschlüsse sind in den Abbildungen 2.8 und 2.9 dargestellt.



Abbildung 2.8: Messeinrichtung



Abbildung 2.9: Anschlüsse

Die Messeinrichtung ist mit den Anschlüssen E bis I an die Kraftstoffversorgung angebunden. Über die Kupplung I erfolgt der mit einem elektromagnetischen Absperrventil gesicherte Kraftstoffzulauf. Die integrierte Systempumpe mit einem Bypass für die Eigenkühlung und die Druckregelung erhöht den Systemdruck. Die Pumpenkühlung erfolgt über einen Wärmetauscher mit vorgeschalteter Temperaturregelung. Anschließend wird kontinuierlich der Massenstrom mit einem Coriolis-Durchflussmesser bestimmt. Die gemessene Kraftstoffmenge ergibt sich dabei aus dem Verbrauch des Verbrennungsmotors. Zwei nachfolgende Regelventile stellen sukzessive einen optimalen Vordruck ein. Üblicherweise gleicht dieser dem Vordruck, den eine fahrzeugeigene Kraftstoffpumpe erzeugt. Danach durchläuft der Kraftstoff zwei serielle Wärmetauscher für die Kühlung oder Erwärmung. Über die Kupplung H verlässt der konditionierte Kraftstoff die Messeinrichtung und wird dem Dieselmotor zugeführt. Nicht umgesetzter Kraftstoff wird über die Kupplung G zurück in die Messeinrichtung geleitet. Je nach Stellung des manuellen Umschaltventils kann der Kraftstoff erneut dem Vorlauf zurückgeführt oder über die Kupplung E in den Auffangbehälter abgelassen werden. Somit kann entweder ein Brutto- (mit Rücklauf) oder ein Nettokraftstoffverbrauch (ohne Rücklauf) ermittelt werden. Gerade bei einer Rückführung des Kraftstoffs wird der Gasblasenabscheider benötigt um einen unruhigen Motorlauf zu verhindern. Der Abscheider ist zudem mit einer Überlaufüberwachung gesichert. Eine Ent-

leerung kann mit dem manuellen Ablassventil über die Kupplung F vorgenommen werden. Die Anschlüsse A bis D versorgen die in der Messeinrichtung verbauten Wärmetauscher. An den Kupplungen A und B ist der Vor- und Rücklauf für den Kaltwasserkreislauf angeschlossen. Die Kupplungen C und D sind derzeit nicht besetzt, da der Warmwasserkreislauf nicht installiert ist.

Bezeichnung	Funktion	Medium	Apparatur
Kupplung A	Vorlauf	Kaltwasser	Wärmetauscher
Kupplung B	Rücklauf	Kaltwasser	Wärmetauscher
Kupplung C	Vorlauf	Warmwasser	Wärmetauscher
Kupplung D	Rücklauf	Warmwasser	Wärmetauscher
Kupplung E	Ablauf	Kraftstoff	Messeinrichtung
Kupplung F	Entlüftung	Kraftstoff	Messeinrichtung
Kupplung G	Rücklauf	Kraftstoff	Verbrennungsmotor
Kupplung H	Vorlauf	Kraftstoff	Verbrennungsmotor
Kupplung I	Zulauf	Kraftstoff	Messeinrichtung

Tabelle 2.2: Bezeichnungen in der Messeinrichtung (siehe auch Anhang [B])

2.3.3 Verbrennungsmotor

Die Kupplung H der Messeinrichtung ist zugleich der Kraftstoffvorlauf für den Verbrennungsmotor. Die motoreigene Zusatzpumpe sorgt für ausreichende Kraftstoffmengen im Leitungssystem. Das nachfolgende Regelventil dosiert den Kraftstoffdurchfluss für jeden Lastfall bedarfsgerecht. Bei einer geringen Motorlast wird überschüssiger Kraftstoff in den Rücklauf geleitet. Die Hochdruckpumpe erzeugt den erforderlichen Kraftstoffhochdruck von 230 bis 1800 bar. Anschließend folgt der Hochdruckspeicher, der die Einspritzventile für alle Zylinder versorgt. Die nachgeschaltete Druckregelung des Speichers stellt den Kraftstoffdruck für den Einspritzprozess ein. Der Kraftstoffrücklauf ist demnach vom Kraftstoffdruck abhängig und variiert mit dem Lastfall bzw. der Motorleistung. Für die Funktion der Einspritzventile muss eine Druckhaltung von 10 bar im Rücklauf gewährleistet werden. Die Temperaturregelung im Rücklauf dient der Kraftstofferwärmung im Vorlauf bei niedrigen Außentemperaturen. Somit wird das Auskristallisieren des Dieselmotorkraftstoffs unterbunden und das Filtersystem geschützt. Über die Kupplung G erfolgt der Kraftstoffrücklauf zur Messeinrichtung.

2.4 Messtechnik zur Abgasanalyse

Neben der Messtechnik für die Kraftstoffversorgung befinden sich zudem Messgeräte für die Abgasanalyse in der Motorenprüfkabine. Die Abgastrübung wird mit dem Messgerät *AVL Opacimeter* und die Abgasschwärzung mit dem Messgerät *AVL Smoke Meter* untersucht. Bei der Analyse sind sowohl die Trübung als auch die Schwärzung des Abgases durch die hohe Rußkonzentration im dieselmotorischen Betrieb ausschlaggebend. Gerade die Abgasanalyse soll zeigen, dass Kraftstoffzusätze wie OME oder Methanol die Rußbildung verringern. In den Abbildungen 2.10 und 2.11 sind die Analysegeräte dargestellt.



Abbildung 2.10: Opazimeter

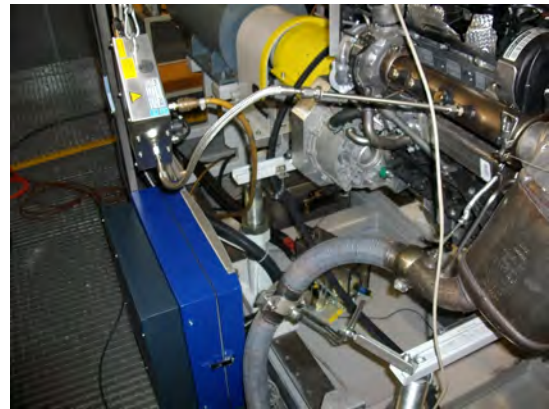


Abbildung 2.11: Smoke Meter

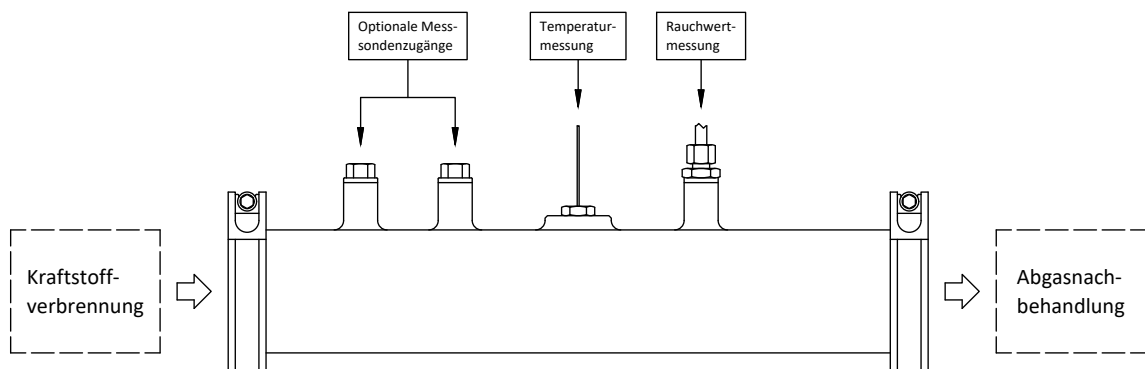


Abbildung 2.12: Prinzipskizze des Abgasrohrs

Die Integration der Messgeräte für die Abgasanalyse erfolgt direkt nach dem VTG-Lader und der AGR. In einem zwischengeschalteten Abgasrohr mit Gewindebohrungen werden die Messsonden eingeschraubt. Nach der Erfassung der Messwerte findet die Abgasnachbehandlung mit dem DOC und DPF statt. Um eine Reduzierung der Schadstoffemissionen bzw. eine Wirkung synthetischer Kraftstoffe festzustellen, muss das unbehandelte Rohabgas untersucht werden. Der Abgasstrom wird abschließend durch einen Mittel- und Endschalldämpfer in die Absaugung geleitet. Eine Prinzipskizze des Abgasrohrs mit den Messsondenzugängen wird in der Abbildung 2.12 dargestellt. Derzeit ist eine Temperatur- und Rauchwertmessung installiert. Die Sonde für die Trübungsmessung kann an den optionalen Zugängen montiert werden. Aufgrund der geringen Länge des Abgasrohrs und der linearen

Anordnung der Zugänge, müssen die Einschraubtiefen der Messsonden verschieden sein, sodass sich keine Sonde im Strömungsschatten einer anderen Sonde befindet.

2.4.1 Trübungsmessgerät

Das Trübungsmessgerät nutzt für die Messung der Abgastrübung das Prinzip der Photometrie. Die Trübung wird durch Partikel hervorgerufen. Partikel sind flüssige und feste Bestandteile des Abgases, die durch unvollständige Verbrennung entstehen. Partikel können in Masse oder Anzahl angegeben werden. Zur Untersuchung wird eine Kammer, die definierte Abmaße und eine lichtabsorbierende Oberfläche besitzt, mit Abgas gefüllt. Eine Fotozelle erfasst dabei die Abnahme der Strahlungsintensität, die von einer Lichtquelle ausgeht. Die Intensität sinkt, da das partikelhaltige Abgas das ausgesendete Licht teilweise absorbiert. Eine Partikelanzahl oder -masse wird mit einem Opazimeter nicht ermittelt. Der Messwert ist deshalb die spezifische Absorption. Diese beschreibt die Massenkonzentration in einer Schichtdicke von 1 cm bei einer definierten Wellenlänge. Zudem können Fremdstoffe, wie beispielsweise im Abgas befindlicher Wasserdampf, den Messwert verfälschen. Dennoch findet die Opazimetrie vor allem in der Abgasuntersuchung für Dieselfahrzeuge Anwendung.

2.4.2 Rauchwertmessgerät

Das Rauchwertmessgerät nutzt für die Visualisierung der Abgasschwärzung die Filterpapiermethode. Die Schwärzung wird hauptsächlich durch Ruß verursacht. Ruß ist unverbrannter elementarer Kohlenstoff und entsteht durch Luftmangel bei der Verbrennung. Er ist zudem ein Hauptbestandteil der Partikel. Zur Untersuchung wird eine Abgasprobe entnommen und durch ein laufendes Papierfilterband geleitet. Das Filterbandverfahren erlaubt somit das Messen in Abhängigkeit der Zeit. Nachdem das Filterband vom Abgas durchströmt wurde, wird der Schwärzungsgrad mit einem fotoelektrischen Messverfahren erfasst und ausgewertet. Der Messwert kann als Massenkonzentration oder als dimensionslose Schwärzungszahl *Filter Smoke Number* ausgegeben werden. Die Rauchwertmessung besitzt zudem eine hohe Reproduzierbarkeit. Dennoch können Undichtigkeiten bei der Probenentnahme und Kondensation auf dem Papierfilterband Messungen verfälschen.

3 Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur

3.1 Konzeptionelle Anlagenerweiterung

Das erste Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept auszuarbeiten um die bestehende Kraftstoffinfrastruktur mit kostengünstigen und einfachen Umbaumaßnahmen zu erweitern, so dass der Motorenprüfstand auch mit anderen Kraftstoffen betrieben werden kann. Ein Betrieb mit synthetischen Kraftstoffen wie beispielsweise Methanol und OME als Kraftstoffgemische steht dabei im Vordergrund. Nicht zuletzt muss die Erweiterung auch den konventionellen Betrieb mit mineralischem Dieseldieselkraftstoff aus den Kraftstoffbehältern in der Maschinenhalle ermöglichen.

3.1.1 Anlagenerweiterung

Wie in Kapitel 2.3 erwähnt, ist die konzeptionelle Anlagenerweiterung im Anhang [B] farblich hervorgehoben. Die Modifizierung der Kraftstoffinfrastruktur wird mit einem geeigneten Kraftstoffbehälter und einer zusätzlichen Umschaltarmatur realisiert. Der Zulauf des Testkraftstoffs erfolgt über den Behälter, der eine Absperrarmatur und eine Schnellkupplung am Auslauf besitzt. Die Armatur H41-1² erlaubt den Wechsel von Dieseldieselkraftstoff auf Testkraftstoff und umgekehrt. Eine Absperrung kann mit der Armatur H42-1 vorgenommen werden. Die Montage sämtlicher Komponenten für die Erweiterung erfolgt direkt in der Motorenprüfkabine nahe der Messeinrichtung. Geringe Leitungslängen und -querschnitte bedeuten in diesem Zusammenhang einen zügigen Austausch bei einem Kraftstoffwechsel. Zudem verbleiben kleinere Mengen eines kostenintensiven Testkraftstoffs in den Leitungen.

3.1.2 Rohrleitungssystem

Grundsätzlich kann eine Einbindung in das Rohrleitungssystem vor der Messeinrichtung an jeder Position im Kraftstoffzulauf erfolgen. Dafür muss die betroffene Rohrleitung vollständig entleert, demontiert und ein Teilstück herausgetrennt werden. Die Länge des Teilstücks entspricht dabei den Abmaßen der neuen Umschaltarmatur mit montierten Gewindefittings und Schneidringverschraubungen. Die Montage erfolgt mit Dichtungsflachs und -paste um Leckagen auszuschließen.

Jedoch ist es sinnvoller den Durchgangshahn 41-1 für die Absperrung gegen eine passende Umschaltarmatur auszutauschen. Somit werden aufwändige Umbau- und Montagearbeiten vermieden. Die neue Umschaltarmatur in Form eines 3/2-Wege-Kugelhahns muss eine Einbaulänge von 76 mm besitzen. Abweichende Abmaße würden wiederum Umbauarbeiten

²Armatur ausgeführt als 3/2-Wege-Hahn

nach sich ziehen. Ebenso muss für die passgenaue Verschraubung ein 1/2-Zoll-Innengewinde vorhanden sein. Des Weiteren ist die voreingestellte Kugelposition für die Umschaltfunktion ausschlaggebend. Alle möglichen Schaltstellungen werden in der Abbildung 3.1 aufgelistet. Die Stellung *T3* ist für die Anlagenerweiterung zweckmäßig.

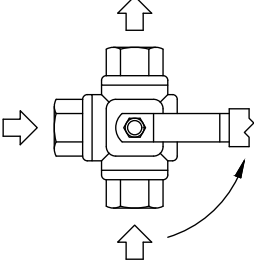
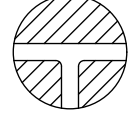
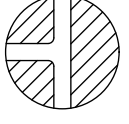
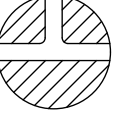
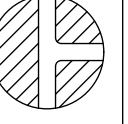
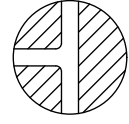
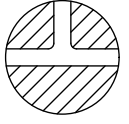
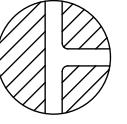
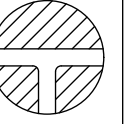
Position		betätigt				
		unbetätigt				
Schaltstellung			T1	T2	T3	T4

Abbildung 3.1: Schaltstellungen für die Umschaltarmatur

Da Umschaltarmaturen keine Absperrfunktion besitzen, muss diese Funktion anderweitig wiederhergestellt werden. Um dieses Problem zu lösen, wird die ausgetauschte Absperrarmatur direkt mit einem Gewindefitting an die neue Umschaltarmatur montiert. Mit einer passenden Gewindetülle wird die Kraftstoffleitung an die Absperrarmatur angeschlossen. Somit kann das Rohrleitungssystem wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben vom Kraftstoffzulauf getrennt werden. Das Unternehmen *Landefeld Druckluft und Hydraulik GmbH* bietet die passenden Komponenten für die Anlagenerweiterung an - auch eine Umschaltarmatur in passender Einbaulänge. In der Tabelle 3.1 werden die Komponenten deklariert.

Bezeichnung	Artikel	Ausführung	Menge
3/2-Wege-Kugelhahn	KH 3/12 T ES E	PN 63 / 12,5	1 Stück
Gwindefitting	DN 1212 ES	PN 40	1 Stück
GwinDETülle	GT 128 ES	PN 40 / 8,0	1 Stück

Tabelle 3.1: Komponenten für die Anlagenerweiterung

3.1.3 Kraftstoffbehälter

Der Kraftstoffbehälter für die Anlagenerweiterung musste vor der Inbetriebnahme umgebaut werden. Ursprünglich war der Behälter für die Kühlung der Zylinderdruckindizierung ausgelegt. Eine am Behälterdeckel befestigte Umwälzpumpe förderte dazu kontinuierlich Wasser in einem Kühlkreislauf zu den Drucksensoren. Der Umbau begann mit der Demontage und der anschließenden Reinigung des Behälters sowie sämtlicher Komponenten. Verunreinigungen an den Behälterinnenwänden wurden mittels abrasivem Druckluftstrahlen beseitigt. Für den Auslauf wurde der Behälterboden mit einer Bohrung und einem

Vorschweißflansch³ versehen. Der Flansch besitzt ein 3/8-Zoll-Innengewinde und wurde im Metall-Inert-Gas-Schweißverfahren gefügt. Ein Durchgangskugelhahn mit einer angeschlossenen Schnellkupplung komplettiert den Behälterauslauf. Somit kann der Kraftstoffvorlauf abgesperrt und der Behälter für die Befüllung außerhalb der Prüfkabine von der Anlagenerweiterung getrennt werden. Die Öffnung für die Umwälzpumpe wurde mit einer Kunststoffplatte³ verschlossen. Um zwei weitere Gewindebohrungen im Behälterdeckel zu verschließen, wurden ein Blindverschluss und eine Schnellkupplung montiert. Die Kupplung dient als optionaler Kraftstoffrücklauf für anderweitige Versuchsaufbauten. Einzig die Einfüllöffnung und die Füllstandanzeige blieben erhalten und werden weiterhin genutzt. Ein baugleicher unveränderter Behälter wird in der Abbildung 3.2 dargestellt. In den Abbildungen 3.3 bis 3.5 wird der umgebaute Behälter in verschiedenen Ansichten dargestellt.



Abbildung 3.2: Behälter vor Umbau



Abbildung 3.3: Behälter nach Umbau (1/3)



Abbildung 3.4: Behälter nach Umbau (2/3)



Abbildung 3.5: Behälter nach Umbau (3/3)

Für die Integration des Behälters in die Motorenprüfkabine wurden zwei Schienenkonsolen an der Außenwand montiert und mit einer Aluminiumplatte verschraubt. Die Platte besitzt vorderseitig eine Aussparung für den Auslauf, sodass der Behälterboden vollflächig aufliegt. Ein Riegel mit Zylinderstiften³ dient der Sicherung und verhindert einen Absturz des Kraftstoffbehälters.

³Bauteil angefertigt in Laborwerkstatt

3.2 Auslegung und Berechnung

Um Nachzuweisen, dass die Anlagenerweiterung ihren Zweck erfüllt, müssen Berechnungen für die Kraftstoffnachspeisung erfolgen. Dabei gilt es zu zeigen, dass ein ausreichender Massen- bzw. Volumenstrom in der Kraftstoffleitung vorherrscht. Zudem müssen die Zeiträume für eine Versuchsdurchführung in Abhängigkeit des nutzbaren Behälterinhalts ermittelt werden.

3.2.1 Massenstrom

Um den minimalen Massenstrom für die Nachspeisung zu ermitteln, muss der maximale Verbrauch des Verbrennungsmotors bei einem Vollastbetrieb berechnet werden. Um einen spezifischen Kraftstoffverbrauch zu ermitteln, kann das Motor- bzw. Verbrauchskennfeld herangezogen werden. Für einen Verbrauch von $230 \text{ g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ bei einer maximalen Motorleistung von 75 kW kann mit der Gleichung

$$\dot{m}_{K,\min} = b_e \cdot P_{M,\max} \quad (1)$$

der minimale Kraftstoffmassenstrom berechnet werden. Dieser Wert beruht auf der Annahme, dass sämtlicher Kraftstoff im Dieselmotor umgesetzt wird. Nachfolgend kann über den Massenstrom der minimale Innendurchmesser der Kraftstoffleitung ermittelt werden. Als Ansatz wird das Gesetz von BERNOULLI, das die Energieerhaltung für Stromröhren beschreibt, herangezogen. Die idealisierte Gleichung

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_1^2 + p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_2^2 + p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (2)$$

gilt dabei für eine adiabate und inkompressible sowie reibungs- und antriebsfreie Strömung. Mit der Bedingungen, dass der Kraftstoffbehälter atmosphärisch betrieben wird und der Flüssigkeitsspiegel nahezu unverändert bleibt, kann die Strömungsgeschwindigkeit im Behälter vernachlässigt werden. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass zwischen dem Kraftstoffbehälter und dem Rohrleitungssystem keine Druckdifferenz vorliegt. Aus der Gleichung 2 geht das Gesetz von TORRICELLI hervor und ergibt die Gleichung

$$w_S = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (3)$$

für die Strömungsgeschwindigkeit am Behälteraustausch als quasistationären Vorgang. Die Dichte von mineralölbasiertem Dieselmotorkraftstoff entspricht ungefähr 835 kg m^{-3} . Mit der Kontinuitätsgleichung

$$\dot{m}_1 = \rho \cdot w_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

für inkompressible Strömungen in Kombination mit dem Zusammenhang von Volumen- und Massenstrom über die Dichte kann die Gleichung

$$A_S = \frac{\dot{m}_{K,\min}}{\rho_D \cdot w_S} \quad (5)$$

aufgestellt und die innere Querschnittsfläche der Kraftstoffleitung berechnet werden. Wird die Gleichung für die Berechnung einer Kreisfläche umgestellt, ergibt sich die Gleichung

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{\pi}} \quad (6)$$

für den inneren Durchmesser. Steht der Flüssigkeitsspiegel im Kraftstoffbehälter nur 10 mm über dem höchsten Punkt im Rohrleitungssystem ergibt sich ein minimaler Innendurchmesser für die Kraftstoffleitung von ungefähr 4 mm. Für die Anlagenerweiterung wurden Kraftstoffleitungen mit einem Innendurchmesser von 8 mm verwendet. Somit kann ein maximaler Massenstrom von $66,93 \text{ kg h}^{-1}$ realisiert werden. Die Bedingung

$$17,25 \text{ kg h}^{-1} = \dot{m}_{K,\min} < \dot{m}_{K,\max} = 66,93 \text{ kg h}^{-1} \quad (7)$$

für die Nachspeisung mit Dieselkraftstoff ist somit erfüllt. Auch synthetische Kraftstoffe sind geeignet, da sie in dieser Betrachtung hinsichtlich ihrer Dichte dem Dieselkraftstoff ähnlich sind.

3.2.2 Zeiträume

Neben der Berechnung des Massenstroms für die Nachspeisung ist eine Berechnung der Zeiträume für den Austausch des Leitungsinhalts bei einem Kraftstoffwechsel erforderlich. Somit kann eine Abschätzung für den Zeitpunkt der Wirkung eines anderen Testkraftstoffs getroffen werden. Der Zeitpunkt hängt dabei maßgeblich vom Lastbereich des Verbrennungsmotors und von der Kraftstoffmenge im Rücklauf ab. Bei einem Vollastbetrieb mit einem hohen Kraftstoffverbrauch wird der Leitungsinhalt zügiger ausgetauscht als bei einem Betrieb im Teillastbereich. Zudem hängen die Kraftstoffmengen im Rücklauf wiederum vom Verbrauch ab und schwanken je nach Lastbereich. Des Weiteren wird die maximale Dauer für die Versuchsdurchführung ermittelt um ein unkontrolliertes Leerlaufen des Rohrleitungssystems zu vermeiden. Die Ausgangswerte für die Berechnung und die Einzelvolumina als Ergebnis werden in der Tabelle 3.2 aufgelistet. Die Leitungslängen wurden aufgrund von Unzugänglichkeiten in der Prüfkabine überschlägig ermittelt.

Bezeichnung	Rohrleitung	Schlauchleitung	
		vom Behälter	zum Motor
Durchmesser	16,0 mm	12,0 mm	12,0 mm
Wandstärke	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm
Länge	≈ 8 m	≈ 2 m	≈ 4 m
Volumen	≈ 0,91	≈ 0,11	≈ 0,21

Tabelle 3.2: Dimensionen der Kraftstoffleitungen

Das Gesamtvolumen in den Leitungen setzt sich aus den Einzelvolumina der Kraftstoffrohre und -schläuche zusammen. Über den Außendurchmesser und die Wandstärke sowie die Leitungslänge kann die Gleichung

$$V_{K,ges} = \sum \frac{\pi}{4} \cdot (d_a - 2 \cdot s)^2 \cdot l \quad (8)$$

für die Summe aller Einzelvolumina aufgestellt werden. In den Leitungen befinden sich somit ungefähr 1,21 Dieselkraftstoff. Dieser Wert berücksichtigt den Kraftstofffluss vom Behälter über die Messeinrichtung bis zum Verbrennungsmotor. Das Volumen verschiedener Anlagenkomponenten wie beispielsweise Pumpen und Wärmetauscher werden nicht berücksichtigt. Die Dauer wird über den Quotienten aus Masse und Massenstrom unter Berücksichtigung der Motorleistung und der Rückflussrate berechnet. Mit der Gleichung

$$t_A = \frac{V_{K,ges} \cdot \rho_D}{b_e \cdot P_M \cdot (1 - b_r)} \quad \text{bzw.} \quad t_M = \frac{V_{B,max} \cdot \rho_D}{b_e \cdot P_M \cdot (1 - b_r)} \quad (9)$$

werden die Zeiträume ermittelt. Das Fassungsvermögen des Kraftstoffbehälters wird hierbei mit 10l angesetzt. Der Kraftstoffmassenstrom aus der Gleichung 1 beschreibt den Lastfall über die jeweilige Motorleistung. Der prozentuale Kraftstoffrückfluss ist eine Annahme und kann nur mittels einer Messung präzise festgestellt werden. In der Tabelle 3.3 werden die Zeiträume in Abhängigkeit der Kraftstoffrückflussrate aufgeschlüsselt. Alle berechneten Werte sind dem Zweck nach auf volle Minuten gerundet. Die Spalte *Lastfall* differenziert zudem die abgerufene Motorleistung in vier Stufen. Die Bezeichnungen *Austausch* und *Betrieb* beschreiben die Dauer für den Austausch des Leitungsinhalts bzw. die Dauer für den Betrieb des Prüfstands. Ein motorschonender Betrieb liegt bei einem Lastfall von 50 % vor. Mit einer geschätzten Rückflussrate von 20 % ergibt sich ein Zeitraum von ungefähr 9 min bis die Wirkung eines anderen Kraftstoffs eintritt. Bei gleichem Lastfall und gleicher Rückflussrate kann mit 10l Kraftstoff eine Betriebsdauer von ungefähr 73 min erreicht werden.

Bezeichnung	Lastfall	Dauer		
		$b_r =$ 10 %	$b_r =$ 20 %	$b_r =$ 30 %
Austausch	100 %	4 min	4 min	5 min
	75 %	5 min	6 min	7 min
	50 %	8 min	9 min	10 min
	25 %	16 min	18 min	20 min
Betrieb	100 %	32 min	36 min	41 min
	75 %	43 min	48 min	55 min
	50 %	65 min	73 min	83 min
	25 %	129 min	145 min	166 min

Tabelle 3.3: Dauer für Inhaltsaustausch und Prüfstandbetrieb

3.2.3 Behältervolumen

Der umgebaute Kraftstoffbehälter besitzt ein Fassungsvermögen von ungefähr 12 l. Wie im Kapitel 3.2.2 gezeigt, sind 10 l Kraftstoff für einen Prüfstandbetrieb ausreichend. Die Kraftstoffversorgung soll mit dem Prinzip der Hydrostatik erfolgen, sodass auf die Integration einer Kraftstoffpumpe verzichtet werden kann. Jedoch ist die derzeitige geodätische Höhe des Behälters in der Motorenprüfkabine für die Nutzung des gesamten Inhalts ungünstig. Im Anhang [C] wird das Problem bezüglich der Höhenlage des Kraftstoffbehälters mit Bezug zum Rohrleitungssystem dargestellt. Der Kraftstoffbehälter wird in Relation zum Rohrleitungssystem maßstäblich abgebildet. Somit wird gezeigt, dass das Fassungsvermögen nicht vollständig genutzt werden kann und mehr als 8 l Kraftstoff im Behälter verbleiben. Der Behälterauslauf liegt ungefähr 15,5 cm tiefer als die Linie mit der Bezeichnung *Nullniveau*, die den höchsten Punkt im Rohrleitungssystem beschreibt. In der Abbildung 3.6 werden zwei Lösungen für das Problem der Kraftstoffnachspeisung aufgezeigt.

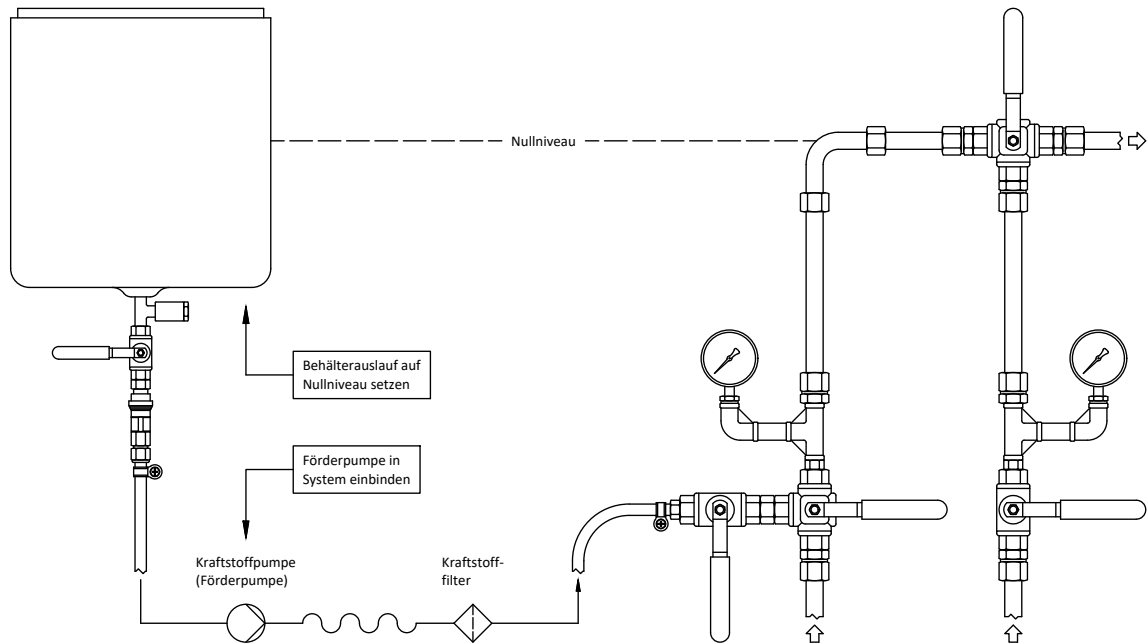


Abbildung 3.6: Prinzipskizze der Anlagenerweiterung (siehe auch Anhang [C])

Eine einfache Problemlösung besteht im Anheben des Behälterauslaufs auf Höhe des Nullniveaus. Zwischen der Oberkante des Behälterdeckels und der Unterkante der Kabinendecke stehen dafür 37 cm zur Verfügung. Einzig der Tragegriff am Deckel muss dafür gekürzt oder vollständig demontiert und die Schienenkonsolen mit der Aluminiumplatte neu positioniert werden. Somit kann weiterhin das Prinzip der Hydrostatik für die Kraftstoffversorgung genutzt werden. Wie in der Gleichung 7 gezeigt, kann sich der Behälterauslauf auf dem Nullniveau befinden um einen ausreichenden Kraftstoffmassenstrom bereitzustellen.

Ein weiterer Lösungsansatz ist das Einbinden einer Kraftstoffpumpe für die Vorförderung. Die Pumpe kann zwischen dem Kraftstoffbehälter und dem Rohrleitungssystem platziert werden. Die regelbare Kenngröße ist hierbei der Kraftstoffmassenstrom. Eine einfache Anpassung der Kraftstoffmengen kann mit einer Drosselung oder einer Bypass-Regelung erfolgen. Auf eine Druckregelung kann verzichtet werden, da der System- und Vordruck wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben in der Messeinrichtung eingestellt wird. Einzig die Verträglichkeit der Dichtungsmaterialien mit OME-Kraftstoffen muss sichergestellt werden um Schäden an der Kraftstoffpumpe zu vermeiden. Im Kapitel 4.5 wird auf die Materialverträglichkeit von FKM und OME genauer eingegangen.

3.3 Ausgeführte Anlagenerweiterung

Da bisher keine vollständige Umsetzung des in Kapitel 3.1 vorgestellten Konzepts für die Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur erfolgen konnte, wurde eine alternative Kraftstoffversorgung für einen Testbetrieb realisiert. Die ausgeführte Anlagenerweiterung soll zeigen, dass der umgebaute Kraftstoffbehälter für eine Versuchsdurchführung zweckmäßig

und funktionstüchtig ist. Etwaige Fehler in der Planung oder Ausführung sollen somit aufgedeckt und behoben werden bevor eine dauerhafte Einbindung in das Rohrleitungssystem erfolgt. Ebenso soll die in Kapitel 2.4 erwähnte Messtechnik zur Abgasanalyse auf ihre Funktion getestet werden.

Grundlegend basiert die Kraftstoffversorgung für einen Testbetrieb auf die bisherige Teilmontage der konzeptionellen Anlagenerweiterung. Im Anhang [D] wird der funktionelle Aufbau der ausgeführten Anlagenerweiterung beschrieben. Der Kraftstoffbehälter mit dem integrierten Durchgangskugelhahn verbleibt an seiner derzeitigen Position in der Motorenprüfkabine. Das Messgerät *AVL Dynamic Fuel Meter* ist eine Kraftstoffwaage und wurde zwischen Behälter und Dieselmotor integriert. Die Waage nutzt zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs ein gravimetrisches Messprinzip. Das Kraftstoffgewicht verringert sich sukzessive über den Ausfluss und wird mit einem kapazitiven Wegsensor, der über einen Biegebalken mit dem Messgefäß verbunden ist, ermittelt.

Da sich die Kraftstoffwaage gegenüber dem Behälter in einer erhöhten Lage befindet, muss die Beschickung des Messgefäßes mit einer Pumpe erfolgen. Dafür sind der Waage eine Kraftstoffpumpe sowie ein separater Kraftstofffilter vorgeschaltet. Anders als der Coriolis-Durchflussmesser in der Messeinrichtung ist das Messverfahren der Kraftstoffwaage diskontinuierlich und erfolgt über einen längeren Zeitraum. Somit kann das Messgefäß über die Pumpe in zeitlichen Abständen manuell befüllt werden. Ein Dauerbetrieb der Kraftstoffpumpe ist somit nicht erforderlich. Der Kraftstoffvorlauf zum Verbrennungsmotor besitzt einen Schlauchverbinder in Form eines T-Stücks, der als Ablauf dient. Somit kann der Kraftstoff in der Waage bei einem Kraftstoffwechsel abgelassen werden. Zudem dient der Ablauf auch als Entlüftung der Kraftstoffleitung bei einer Neubefüllung. Der Kraftstoffrücklauf vom Verbrennungsmotor wird direkt zur Waage geführt, da nicht umgesetzter Kraftstoff gemessen und bilanziert wird. Die Komponenten der ausgeführten Anlagenerweiterung werden in den Abbildungen 3.7 und 3.8 dargestellt.



Abbildung 3.7: Anlagenerweiterung (1/2)



Abbildung 3.8: Anlagenerweiterung (2/2)

4 Synthetische Dieselkraftstoffe

Der dieser Arbeit zugrundeliegende Prüfmotor mit der Motorenkennung *CJDA* der Baureihe *VW EA189* sorgte ab dem Jahr 2014 für zahlreiche Negativschlagzeilen. Aufgrund einer illegalen Manipulation der Motorsteuerung löste dieser Motorentyp einen Skandal mit der umgangssprachlichen Bezeichnung *Dieseldgate* aus, der weitreichende Auswirkungen auf die Politik und die Wirtschaft hatte. Zunehmend strengere Regularien an die europäischen und weltweiten Abgasgrenzwerte verlangen von den Automobilherstellern stets neue Innovationen um die Schadstoffemissionen zu reduzieren. Zudem muss die Effizienz bei jeder Weiter- oder Neuentwicklung eines Verbrennungsmotors gesteigert werden, sodass ein Fahrzeug attraktiv und wettbewerbsfähig bleibt. Eine innermotorische Prozessoptimierung zur Senkung der Schadstoffe wie beispielsweise Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxide sowie Kohlenwasserstoffe reicht allein nicht aus. Nur mit weiteren außermotorischen Maßnahmen in Form von katalytischen und geregelten Abgasnachbehandlungssystemen können die Anforderungen an die geltenden Abgasnormen erfüllt werden. Gerade für die Automobilhersteller waren die Vorgaben von hoher Motorleistung in Verbindung mit niedrigem Kraftverbrauch und gleichzeitig geringen NO_x -Werten nicht realisierbar. Daher waren Motorsteuerungen dermaßen manipuliert, dass der Betriebsmodus des Fahrzeugs erkannt und die Abgasreinigung abgeschaltet wurde. Im Straßenverkehr war die Abgasnachbehandlung der geforderten Mehrleistung und des damit einhergehenden Mehrverbrauchs wegen deaktiviert, sodass Grenzwerte um ein vielfaches überschritten wurden. Im Prüfstandbetrieb mit einem anzunehmenden Abgastest wurde die Abgasreinigung aktiviert um die Grenzwerte einzuhalten und den gesetzlichen Vorgaben gerecht zu werden. Gerade wenn technische Maßnahmen an ihre Grenzen stoßen, können synthetische Kraftstoffe die Schadstoffemissionen weiter senken. Somit können Verbrennungsmotoren zunehmend zum Klima- und Umweltschutz beitragen.

4.1 Herstellung und CO_2 -Bilanz

Das Bergius-Pier-Verfahren für die direkte Kohleverflüssigung (Coal-to-Liquid) existiert bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts und wurde von Friedrich Bergius und Matthias Pier entwickelt. Einige Jahre später wurde ein weiteres Verfahren zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Kohle von Franz Fischer und Hans Tropsch erarbeitet. Die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) ist ein Verfahren, das Synthesegase in flüssige Kohlenwasserstoffe umwandelt. Diese indirekte Kohleverflüssigung findet bis heute in der großtechnischen Kraftstoff- und Ölproduktion Anwendung, da sie im Vergleich zum Bergius-Pier-Verfahren wirtschaftlicher ist. Eine neue Herausforderung ist die Bereitstellung von Synthesegasen aus Erdgas (Gas-to-Liquid) und Biomasse (Biomass-to-Liquid) für die Kraftstoffproduktion. Bereits vor über zwei Jahrzehnten begannen die Mineralölkonzerne und die Auto-

mobilitätsindustrie mit der Entwicklung von Versuchsanlagen. Mittlerweile wurden weltweit Prozessanlagen errichtet um synthetische Dieselkraftstoffe in größere Mengen aus Erdgas und Biomasse mit der FT-Synthese herzustellen. In der Abbildung 4.1 werden die Verfahrensschritte zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aufgezeigt.

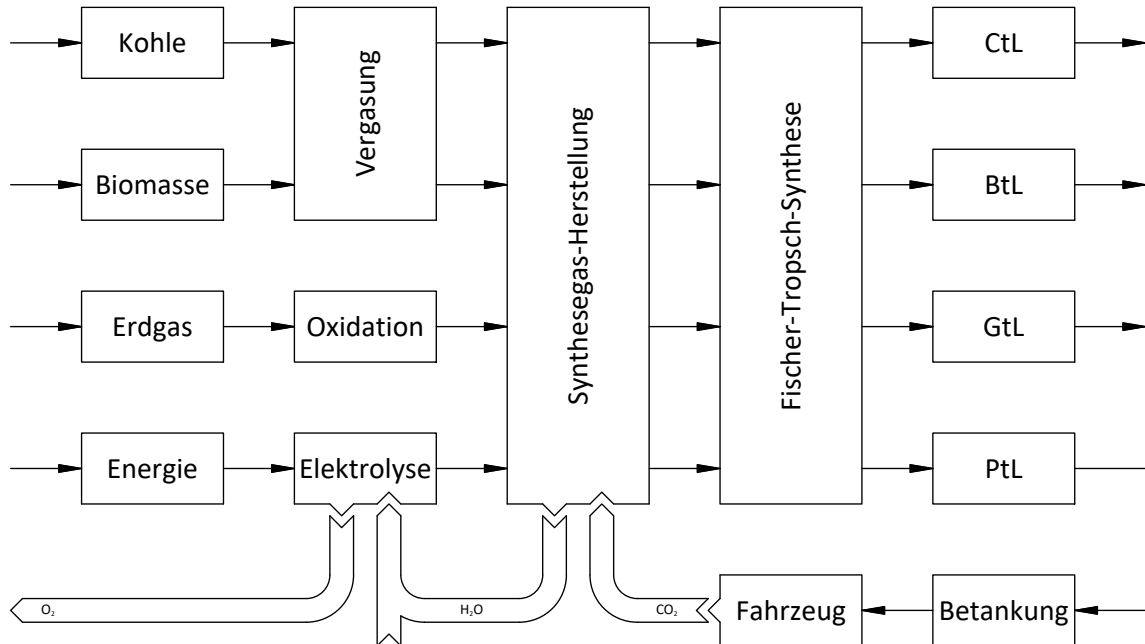


Abbildung 4.1: Verfahrensschritte zur Kraftstoffherstellung

Je nach Rohstoff wird mittels der Feststoffvergasung oder der katalytischen Oxidation ein Synthesegas in Form von Kohlenstoffmonoxid hergestellt und zusammen mit Wasserstoff der FT-Synthese zugeführt. Als Zwischenprodukt entsteht Methanol, das weiter zu OME synthetisiert wird. Bevor die Kohlenwasserstoffe vollwertige Kraftstoffe sind und in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können, müssen sie weiter aufbereitet werden. Synthetische Kraftstoffe werden ausgehend vom Rohstoff mit den Bezeichnungen *CtL*, *BtL* oder *GtL* spezifiziert. Die Kraftstoffe entstammen zwar unterschiedlichen Rohstoffen, unterscheiden sich aber nicht in der Qualität oder der chemischen Struktur. Daher wird oft die allgemeine Bezeichnung *XtL* für synthetische Kraftstoffe verwendet, die mit der FT-Synthese hergestellt werden. Ein weiterer Vertreter der synthetischen Kraftstoffe trägt die Bezeichnung *PtL* und nutzt elektrische Energie (Power-to-Liquid) als Rohstoff. Dabei wird aus Wasser mittels der Elektrolyse Wasserstoff gewonnen. Durch die Reduktion von Kohlenstoffdioxid entsteht das reaktive Kohlenstoffmonoxid. Beide Gase sind die Edukte für die FT-Synthese und werden für die Herstellung von Methanol als Grundstoff für synthetische Kraftstoffe bereitgestellt. Fahrzeuge, die mit reinem *PtL*-Kraftstoff betrieben werden, erzeugen gerade die Menge an Kohlenstoffdioxid, die für die Herstellung des Synthesegases benötigt wird. Zudem entsteht bei der FT-Synthese als Nebenprodukt Wasser, das wiederum der Elektrolyse zugeführt werden kann. Auch der Sauerstoff aus der Elektrolyse ist in dieser Betrachtung ein Nebenprodukt und kann beispielsweise für die Feststoffvergasung von Kohle oder Biomasse verwendet werden. Häufig wird auch die Bezeichnung *E-Fuels*

für PtL-Kraftstoffe verwendet, da elektrische Energie in chemische Energie gewandelt bzw. gespeichert wird. Werden für diesen Prozess nachhaltige und CO₂-freie Energiequellen genutzt, kann die Aussage getroffen werden, dass PtL-Kraftstoffe in ihrer CO₂-Bilanz neutral sind. Eine Übersicht der Prozesskette im Zusammenhang mit den CO₂-Emissionen ist in der Abbildung 4.2 dargestellt.

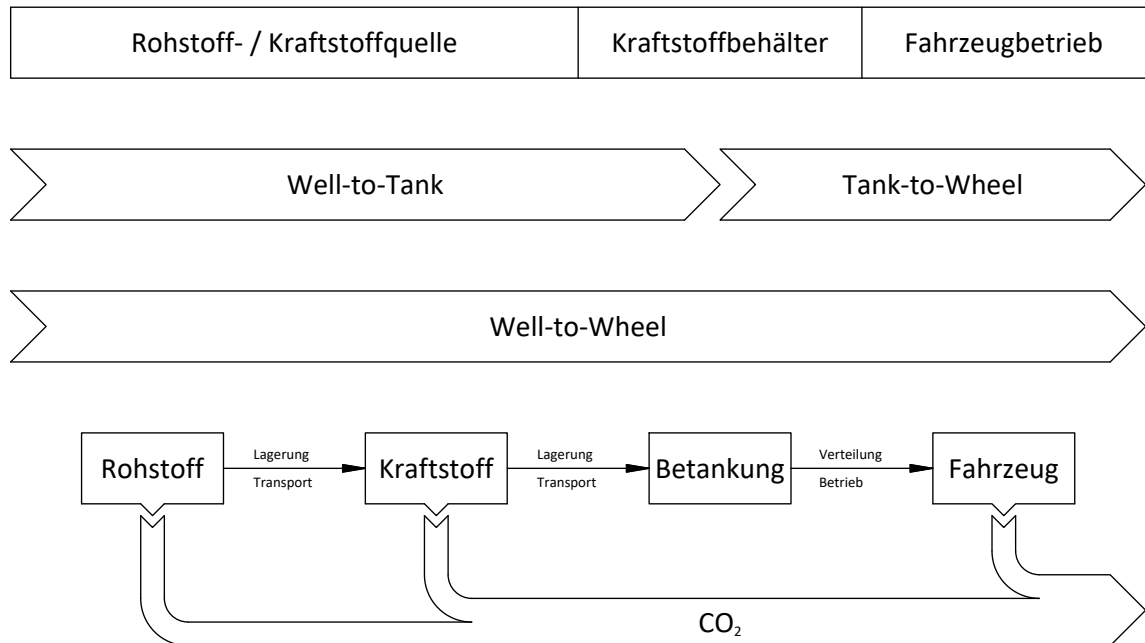


Abbildung 4.2: Prozesskette der CO₂-Emissionen

Mit dem Begriff *Well-to-Tank (WtT)* werden die Schadstoffemissionen bezeichnet, die bei der Herstellung von Antriebsenergie für Fahrzeuge entstehen. Die Prozesskette beginnt bei der Rohstoff- bzw. Kraftstoffquelle und endet bei der Zapfsäule der Tankstelle bzw. dem Kraftstoffbehälter des Fahrzeugs. Da die Energieumsetzung für den Antrieb in Fahrzeugen nicht berücksichtigt wird, werden diese Emissionen als indirekte Emissionen bezeichnet. Mit dem Begriff *Tank-to-Wheel (TtW)* werden die Schadstoffemissionen bezeichnet, die beim Fahrzeugbetrieb im Straßenverkehr entstehen. In diesem Bilanzsystem steht die Effizienz von Verbrennungsmotor und Antriebssystem bzw. des gesamten Fahrzeugs im Vordergrund. Diese Emissionen werden auch als direkte Emissionen bezeichnet, da im Fahrzeug die Energieumsetzung für den Antrieb erfolgt. Um Kraftstoffe auf ihre Umweltverträglichkeit umfassend bewerten zu können, muss die Gesamtbilanzierung mit der Bezeichnung *Well-to-Wheel (WtW)* herangezogen werden.

Werden nur die WtT-Emissionen betrachtet, kann geschlussfolgert werden, dass derzeit kein Kraftstoff vollständig CO₂-neutral sein kann. Allein die Bereitstellung des Rohstoffs und die Verarbeitung zu Kraftstoffen verlangt Energie, die größtenteils von konventionellen Kohle- oder Ölkraftwerken erzeugt wird. Dabei ist es unerheblich ob die Energie aus fossilen Brennstoffen zur Förderung von Erdöl oder für die Elektrolyse genutzt wird. Ebenso muss der Energiebedarf für die Logistik in Form von Lagerung und Transport deckt werden.

Eine Verbesserung der CO₂-Bilanz kann mit synthetischen Kraftstoffen im Bereich der TtW-Emissionen erzielt werden. Das Potenzial von XtL-Kraftstoffen zur CO₂-Einsparung wird aber nur ausgeschöpft, wenn die Edukte für die FT-Synthese nachhaltig bereitgestellt werden. Am Beispiel von PtL-Kraftstoff muss die Energie für die Elektrolyse zur Erzeugung des Wasserstoffs aus regenerativen Quellen stammen. Als nachhaltige und CO₂-freie Energiequellen zählen zum Beispiel Wind- und Wasserkraftwerke sowie Anlagen für die Nutzung der Sonnenenergie. Nur so können auch die Schadstoffemissionen in der WtT-Bilanz reduziert werden. Ebenso muss die CO₂-Gewinnung nachhaltig erfolgen. Beim Verfahren *Carbon Capture and Usage (CCU)* wird konzentriertes Kohlenstoffdioxid direkt von lokalen Emissionsquellen abgeschieden und weiterverarbeitet. Als Quellen bieten sich beispielsweise Stahl- und Zementwerke an, da bei ihren industriellen Prozessen große Mengen Kohlenstoffdioxid als unerwünschtes Nebenprodukt anfallen. Als Orientierung dient das Verfahren *Carbon Capture and Storage (CCS)* für die CO₂-Endlagerung im Erdboden. Somit kann für das CCU-Verfahren auf bestehende Technologie zurückgegriffen werden. Einzig die räumliche Gebundenheit an die CO₂-produzierende Industrie ist nachteilig, sodass auf Transportwege nicht verzichtet werden kann. Beim Verfahren *Direct Air Capturing (DAC)* wird über Filteranlagen Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre entzogen und in Gasspeichern konzentriert. Ursprünglich wurde diese Technologie für das CCS-Verfahren entwickelt. Statt der Einlagerung in unterirdischen Lagerstätten kann das Kohlenstoffdioxid auch für die Herstellung von Kraftstoffen verwendet werden. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass Filteranlagen ortsungebunden aufgestellt und betrieben werden können, da Kohlenstoffdioxid weltweit in der Atmosphäre vorhanden ist.

Es besteht heutzutage die Möglichkeit CO₂-freie Kraftstoffe bzw. CO₂-reduzierende Kraftstoffgemische herzustellen. Jedoch wäre damit nur der Fahrzeugbetrieb für Klima und Umwelt nachhaltig. Vielmehr müssen auch die WtT-Emissionen bei der Herstellung und Verteilung von Kraftstoffen reduziert werden. Daher ist immer eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette im Zusammenhang mit den Schadstoffemissionen notwendig.

4.2 Struktur und Aufbau

Mineralische Dieselkraftstoffe bestehen aus vielen unterschiedlichen Verbindungen. Als besonders unerwünschte Bestandteile gelten Aromaten und Schwefel. Aromaten sind zyklische Kohlenwasserstoffe und neigen bei der Verbrennung zu starker Rußbildung. Da Erdöle natürliche Produkte sind, variiert auch die Zusammensetzung und die Qualität der Dieselkraftstoffe je nach Herkunft. Somit können Mineralöldiesel in ihrer chemischen Struktur nur annähernd beschrieben werden. Synthetische Dieselkraftstoffe sind alternative Kraftstoffe der zweiten Generation, da bei der FT-Synthese aktiv in die chemische Struktur eingegriffen wird. Alternative Kraftstoffe der ersten Generation bleiben dahingehend unverändert und werden zum Beispiel durch Umesterung oder Fermentation von Biomasse hergestellt.

Somit lassen sich über den Zwischenschritt der FT-Synthese Kraftstoffe herstellen, die nahezu frei von aromatischen und schwefligen Verbindungen sind.

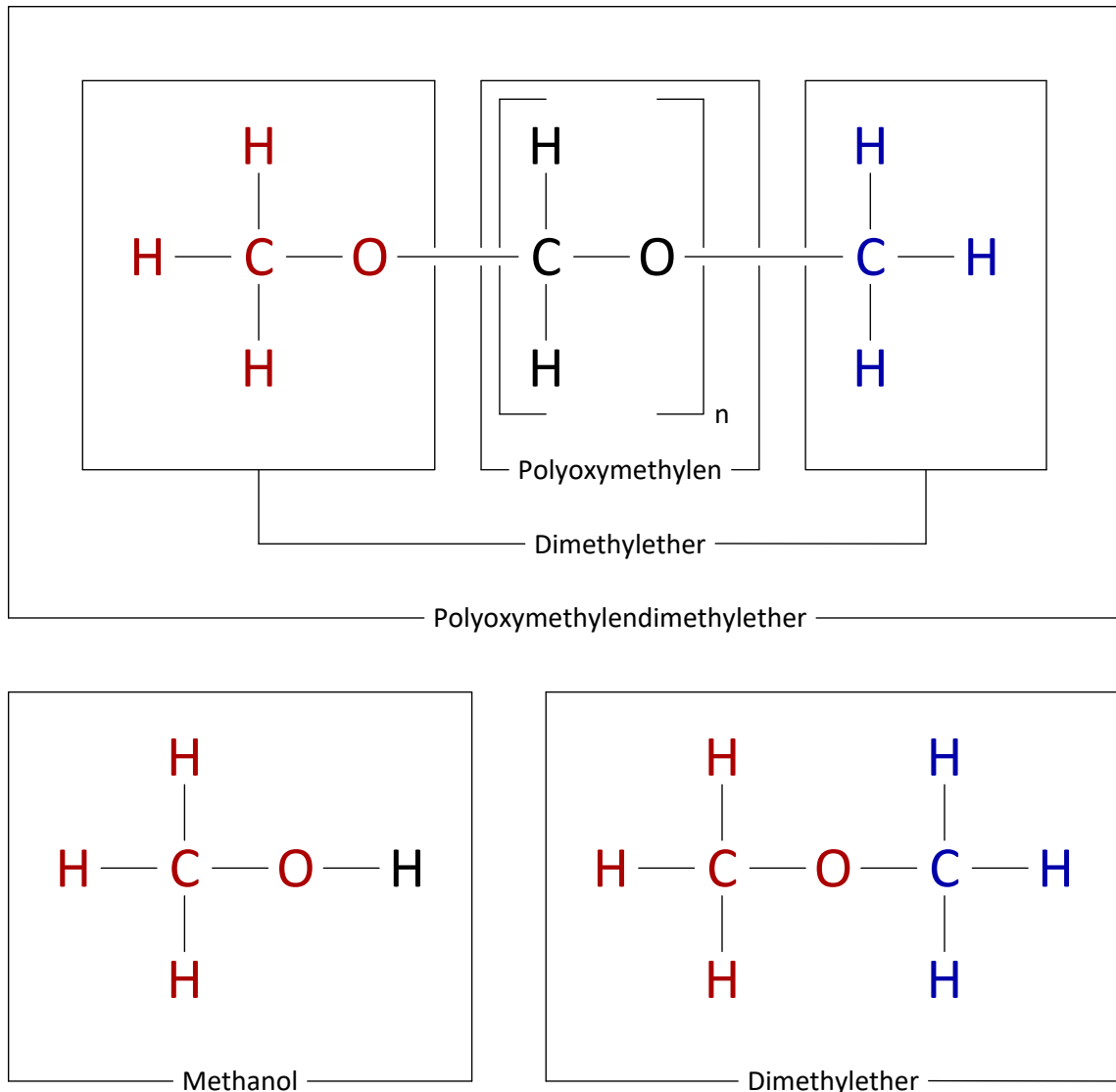


Abbildung 4.3: Strukturformeln synthetischer Kraftstoffe

Die einfachste Stufe der synthetischen Kraftstoffe ist Methanol ($\text{CH}_3\text{-OH}$), das aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften in Reinform für den dieselmotorischen Betrieb ungeeignet ist. Besonders die Zündwilligkeit und Schmierfähigkeit sind unzureichend. Zudem besitzt Methanol eine toxische Wirkung und erschwert somit die Handhabung für den Endverbraucher. Daher wird Methanol zu OME ($\text{CH}_3\text{O}[\text{CH}_2\text{O}]_n\text{CH}_3$) weiterverarbeitet um die Eigenschaften mineralischer Dieselkraftstoffe zu erreichen. In der Abbildung 4.3 wird der Zusammenhang anhand der Strukturformeln zwischen den synthetischen Kraftstoffen deutlich. Die OME, fachlich korrekt Polyoxymethylendimethylether genannt, sind stark sauerstoffhaltige Kraftstoffe für den dieselmotorischen Betrieb. Sie besitzen lineare C-O-Bindungen und werden nach ihrer Kettenlänge bzw. Ordnungszahl differenziert. Die Vorstufe der OME-Kraftstoffe ist DME ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), das völlig ohne die Baugruppe *Po-*

lyoxymethylen (CH_2O) auskommt. DME ist bei atmosphärischem Druck gasförmig und kann somit nur als Flüssiggas in Dieselmotoren zum Einsatz kommen. Bei weiterführender Synthese wird DME zu flüssigen OME-Kraftstoffen umgewandelt. Mit zunehmender Kettenlänge bzw. steigender Ordnungszahl ändern sich auch die Eigenschaften, die möglichst denen von Dieselkraftstoffen entsprechen sollen. In der Norm *DIN EN 590:2017-10* als allgemeine Vorschrift werden diesbezüglich Anforderungen mit minimalen und maximalen Grenzwerten sowie entsprechende Prüfverfahren formuliert.

4.3 Eigenschaften im Vergleich

4.3.1 Zündwilligkeit

Ein wichtiges Kriterium für Kraftstoffe im dieselmotorischen Betrieb ist die Fähigkeit der Selbstentzündung bei hoher Temperatur und hohem Druck. Beschrieben wird diese Fähigkeit mit der Cetanzahl (CZ), die eine dimensionslose Kennzahl für die Zündwilligkeit eines Dieselkraftstoffs ist. Um das Brennverfahren im Dieselmotor kontrolliert steuern zu können, muss der Kraftstoff eine ausreichend hohe Cetanzahl aufweisen, sodass sich ein möglichst geringer Zündverzug einstellt. Die Vorschrift verlangt dabei einen Minimalwert von 51. Ein Maximalwert ist nicht definiert. Die CZ-Werte der Kraftstoffe werden in der Tabelle 4.1 aufgelistet. Als Kraftstoffersatz sind Methanol und OME_1 ihrer geringen Cetanzahl wegen ungeeignet. DME, OME_2 und höhere Vertreter weisen hingegen eine bessere bis hervorragende Zündwilligkeit auf. Besonders OME_5 mit einem CZ-Wert von 90 kommt annähernd dem sehr zündwilligen Hexadecan ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$) gleich. Reines Hexadecan, auch einfach Cetan genannt, wird in der technischen Dieselverbrennung der größte CZ-Wert von 100 zugeordnet.

Diesel	MeOH	DME	OME_1	OME_2	OME_3	OME_4	OME_5	OME_6
> 55	≈ 5	55	29	63	67	76	90	–

Tabelle 4.1: Cetanzahl von Kraftstoffen⁴

4.3.2 Massendichte

Eine weitere Anforderung für Dieselkraftstoffe ist die Massendichte, auch einfach Dichte genannt, die bei 15 °C vorliegt. Demnach muss die Dichte laut Vorschrift einen Wert von 820 bis 845 kg m^{-3} aufweisen. Wie in Kapitel 4.2 erwähnt, ändern sich die Eigenschaften

⁴Werte entnommen aus Fachartikel [2] und [3]

der OME-Kraftstoffe mit ihrer Kettenlänge. Somit erhöht sich auch die Dichte mit jeder weiteren Synthesestufe, da der Sauerstoffgehalt sukzessive zunimmt. In der Tabelle 4.2 wird anhand der Werte deutlich, dass alle synthetischen Kraftstoffe in ihrer Reinform den oberen oder unteren Grenzwert verletzen und somit nur als Kraftstoffzusatz Anwendung finden können. Die maximalen Mischungsverhältnisse von synthetischem zu mineralischem Dieselkraftstoff werden in der Tabelle 4.3 aufgeführt. Die Dichten von Methanol und OME₁ entsprechen am ehesten der Dichte von Dieselkraftstoff und erlauben eine maximale Zugabe von 35 Gew.% bzw. 40 Gew.% ohne die Grenzwerte zu über- oder unterschreiten. DME hat als Flüssiggas die geringste Dichte der synthetischen Kraftstoffe, sodass die Minstdichte bereits bei 9 Gew.% erreicht wird. Die hohen Massendichten von OME₂ bis OME₆ reduzieren die Zugabemenge erheblich.

Diesel	MeOH	DME	OME ₁	OME ₂	OME ₃	OME ₄	OME ₅	OME ₆
835	792	670	860	980	1030	1070	1110	1140

Tabelle 4.2: Massendichte von Kraftstoffen⁵ in kg m⁻³

Diesel	MeOH	DME	OME ₁	OME ₂	OME ₃	OME ₄	OME ₅	OME ₆
–	35	9	40	7	5	4	4	3

Tabelle 4.3: Mischungsverhältnis zum Dieselkraftstoff in Gew.%

Das Potenzial synthetischer Kraftstoffe zur Schadstoffreduzierung kann nur ausgeschöpft werden, wenn sie im ausreichenden Maße den mineralischen Dieselkraftstoffen zugegeben werden können. Für paraffinische Kraftstoffe, die auch zu den synthetischen Kraftstoffen zählen und der Definition nach aromaten- und schwefelfreie Dieselkraftstoffe sind, wurde eine neue Normung erarbeitet. Auf Grundlage der Norm *DIN EN 590:2017-10* wurden demzufolge die Anforderungen angepasst und als Norm *DIN EN 15940:2019-10* veröffentlicht. Demnach werden die Grenzwerte in zwei Klassen gegliedert, die sich einzig in der Zündwilligkeit und der Massendichte unterscheiden. Somit ist es erlaubt, dass paraffinische Kraftstoffe eine geringere Dichte als mineralische Kraftstoffe aufweisen. Besitzen sie zudem einen hohen CZ-Wert darf die Dichte nochmals geringen sein. Des Weiteren wurde der obere Grenzwert für die Massenanteile von Schwefel halbiert und die Eigenschaft *Gesamtaromatengehalt* hinzugefügt. Eine Anpassung der existierenden Vorschrift oder das Erarbeiten einer neuen Normung muss auch für OME-Kraftstoffe in Betracht gezogen werden um eine Erhöhung der Zugabemenge zum Dieselkraftstoff zu ermöglichen.

⁵Werte entnommen aus Fachartikel [2] und [3]

4.3.3 Energiedichte

Die Energiedichte für Kraftstoffe muss sich an keiner Vorgabe orientieren. Dennoch muss sie als wichtige Eigenschaft genauer betrachtet werden. Die Energiedichte, für Brennstoffe unterer Heizwert genannt, hängt maßgeblich von der chemischen Zusammensetzung der Kraftstoffe ab. Bei der Verbrennung liefern Kohlenstoff und Wasserstoff die chemische Energie, die in thermische Energie umgewandelt wird. Mineralische Dieselkraftstoffe weisen eine hohen Heizwert auf, da sie überwiegend aus Kohlenwasserstoffen in Form von Alkane und Aromaten bestehen. Da in synthetischen Kraftstoffen zum Großteil Sauerstoff gebunden ist, haben sie einen wesentlich geringeren Heizwert. Dass der Sauerstoffgehalt und die Energiedichte von synthetischen Kraftstoffen im direkten Zusammenhang stehen, wird im Diagramm 4.1 gezeigt. Mit steigender Ordnungszahl nimmt der Sauerstoffgehalt progressiv zu und die Energiedichte regressiv ab.

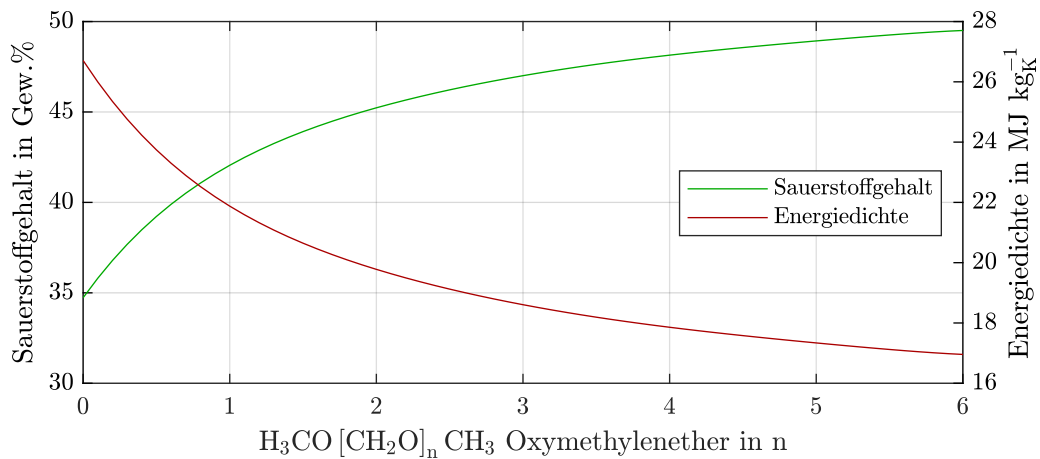


Diagramm 4.1: Sauerstoffgehalt und Energiedichte von OME

In der Tabelle 4.4 werden die gravimetrischen und volumetrischen Heizwerte zusammen mit den jeweiligen Dieseläquivalenten aufgelistet. Das Dieseläquivalent vergleicht die synthetischen Kraftstoffe mit Dieselkraftstoff über deren Quotienten. Demnach besitzt DME als Flüssiggas ein gravimetrisches Dieseläquivalent von 1,5 und ist somit der energiereichste Kraftstoff. Aufgrund des hohen Sauerstoffgehalts sind OME₅ und OME₆ die energieärmsten Kraftstoffe. Ihre Energiedichte ist gegenüber Dieselkraftstoff um etwa 60 % geringer. Vergleicht man jedoch das volumetrische Dieseläquivalent, stellt sich heraus, dass die OME-Kraftstoffe ein gemeinsames Niveau von 1,8 bis 1,9 erreichen. Wie im Kapitel 4.3.2 erwähnt, erhöht sich die Dichte der OME-Kraftstoffe mit steigender Ordnungszahl. Daher stellt sich der vorteilhafte Effekt ein, dass die geringere Energiedichte über die höhere Massendichte kompensiert wird. Gerade für mobile Anwendungen auf Langstrecken müssen Kraftstoffe eine ausreichende Energiedichte besitzen um große Reichweiten zu ermöglichen. Darüber hinaus benötigen Kraftstoffe mit einer geringen spezifischen Energie mehr Tankvolumen und erhöhen somit das Fahrzeuggewicht. Ein geringerer Heizwert erhöht zudem den Kraft-

stoffverbrauch.

Bezeichnung		Energiedichte			
Kurzform	Formel	H_u in MJ kg^{-1}	$D_{\text{eq,g}}$	H_u in MJ l^{-1}	$D_{\text{eq,v}}$
Diesel	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}$	42,8	1,0	35,7	1,0
MeOH	CH_4O	19,9	2,2	15,8	2,3
DME	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	28,4	1,5	19,0	1,9
OME ₁	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$	22,4	1,9	19,3	1,9
OME ₂	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$	20,6	2,1	20,2	1,8
OME ₃	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_4$	19,4	2,2	20,0	1,8
OME ₄	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_5$	18,7	2,3	20,0	1,8
OME ₅	$\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}_6$	18,1	2,4	20,1	1,8
OME ₆	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}_7$	17,7	2,4	20,2	1,8

Tabelle 4.4: Energiedichte von Kraftstoffen⁶

4.4 Eigenschaft der Schmierfähigkeit

Neben den in Kapitel 4.3 erläuterten Eigenschaften hat die Schmierfähigkeit mit der Einführung schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraftstoffe eine besondere Bedeutung als Anforderung erlangt. Bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Kraftstoffen entstehen Schwefeloxide, die sich negativ auf das Abgasverhalten und die Korrosionsbeständigkeit von kraftstoff- und abgasführenden Komponenten auswirken. Auch für die Entwicklung neuer und effizienter Abgassysteme für die Nachbehandlung entstanden die Maßnahmen zur Entschwefelung von Kraftstoffen. Doch die Begrenzung des Schwefelgehalts mindert auch die Schmierwirkung der Kraftstoffe und erhöht somit die tribologische Beanspruchung der kraftstoffgeschmierten Einspritzausrüstung wie beispielsweise die Hochdruckpumpe und die Einspritzventile.

4.4.1 Verfahren und Bedingungen

Das Prüfverfahren zur Ermittlung der Schmierfähigkeit wird in der Norm *DIN EN ISO 12156-1:2019-09* beschrieben. Um die Schmierwirkung von Kraftstoffen bestimmen und untereinander vergleichen zu können, wird mit einem Schwingungsverschleiß-Prüfgerät ein

⁶Werte entnommen aus Fachartikel [2] und [3]

Verschleißwert mit der Bezeichnung *Wear Scar Diameter (WSD)* ermittelt. In der Abbildung 4.5 wird das Prüfgerät und die Funktionsweise als Prinzipskizze dargestellt und in einer Vergrößerung einzelne Komponenten bezeichnet. Bei dem Prüfverfahren mit der Bezeichnung *High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)* wird eine Prüfkugel in Schwingungen versetzt und über eine Anpresskraft mit einer Prüfplatte in Kontakt gebracht. Die translatorischen Schwingungen werden dabei mit einer Frequenz von 50 Hz und einer Hublänge von 1 mm ausgeführt. Die konstante Kraft entspricht dabei der Gewichtskraft einer Prüfmasse von 200 g einschließlich der Befestigungselemente. Die Prüfkugel ist besonders hart und beträgt im Durchmesser 6 mm. Die Prüfplatte hingegen besitzt eine geringe Härte und hat eine polierte Oberfläche. Im Prüfverfahren befinden sich die Kugel und die Platte in einem Behälter, der von einem Wärmebad temperiert wird. Im Behälter befindet sich Kraftstoff mit einem Volumen von 2 ml und einer Temperatur von 60 °C. Die Luftbedingungen werden in einer Höhe von 10 bis 25 cm gegenüber dem Behälter kontrolliert. Demnach muss eine Temperatur von 23 °C und eine relative Feuchtigkeit von 53 % während der Prüfdauer von 75 min vorherrschen. Alle Werte mit den zulässigen Toleranzen und Einheiten hinsichtlich der Parameter für das HFRR-Verfahren werden in der Tabelle 4.5 zusammengefasst. Für die Wiederholbarkeit und die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse müssen die Bedingungen zwingend eingehalten werden.

Parameter	Wert	Toleranz	Einheit
Flüssigkeitsvolumen	2,0	±0,2	ml
Hublänge	1,00	±0,02	mm
Frequenz	50	±1	Hz
Luftfeuchtigkeit	53	±5	%
Lufttemperatur	23	±3	°C
Flüssigkeitstemperatur	60	±2	°C
Prüfmasse	200	±1	g
Prüfdauer	75,0	±0,1	min
Behälteroberfläche	600	±100	mm ²

Tabelle 4.5: Bedingungen für das HFRR-Prüfverfahren⁷

4.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Der konstante Druck und die linearen Bewegungen der Prüfkugel hinterlassen auf der Prüfplatte eine Abriebkalotte. Die Kalotte ist entsprechend der Kugelbewegung elliptisch

⁷Tabelle angelehnt an Regelwerk [5]

geformt und weist dabei markante und weniger markante Grenzen auf. In der Abbildung 4.4 wird eine Abriebkalotte skizziert und die Verschleißbereiche in drei Zonen unterteilt. Die Abstände zwischen den äußersten Abriebgrenzen werden rechtwinklig (x) und parallel (y) zur Schwingungsrichtung mit dem Mikroskop in 100-facher Vergrößerung auf $10\mu\text{m}$ genau ermittelt. Das Prüfergebn ist der arithmetische Mittelwert der Durchmesser in x - und y -Richtung und wird mit der Gleichung

$$\text{WSD} = \frac{1}{2} \cdot (x + y) \tag{10}$$

ermittelt. Dabei gilt, je kleiner der WSD-Wert, desto besser ist die Schmierfähigkeit des Kraftstoffs. In der Norm *DIN EN 590:2017-10* wird für die Schmierfähigkeit von Dieselkraftstoffen ein maximaler Grenzwert von $460\mu\text{m}$ angegeben. Auch die synthetischen Kraftstoffe müssen diese Anforderung zum Schutz der kraftstoffgeschmierten Einspritzaus-rüstung erfüllen. In der Tabelle 4.6 wird deutlich, dass sich eine Verbesserung der Schmier-wirkung von OME-Kraftstoffen mit zunehmender Kettenlänge einstellt. Einzig OME₅ in seiner Reinform unterschreitet den Grenzwert und erfüllt somit die Vorgabe.

Diesel	MeOH	DME	OME ₁	OME ₂	OME ₃	OME ₄	OME ₅	OME ₆
< 460	1100	–	759	–	534	465	437	–

Tabelle 4.6: Schmierfähigkeit von Kraftstoffen⁸ in μm

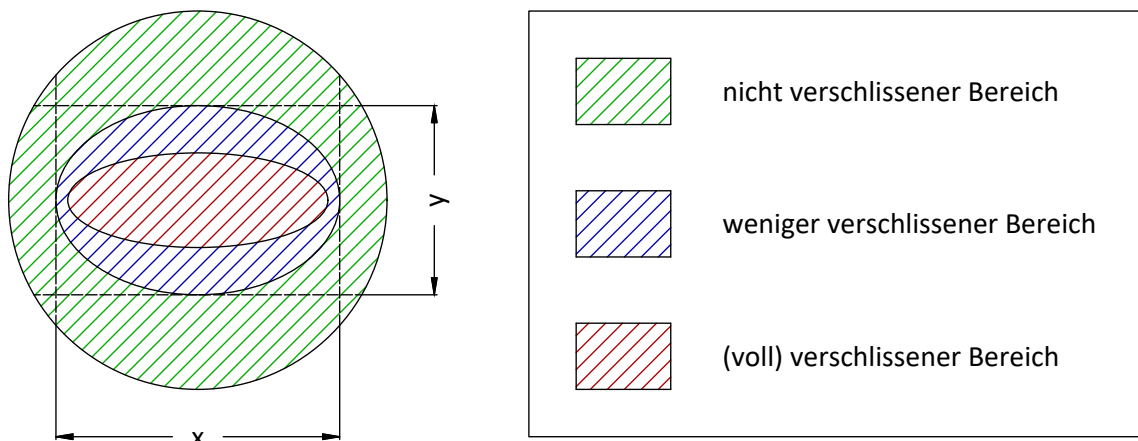


Abbildung 4.4: Verschleißbereiche einer Abriebkalotte⁹

⁸Werte entnommen aus Fachartikel [3]

⁹Abbildung angelehnt an Regelwerk [5]

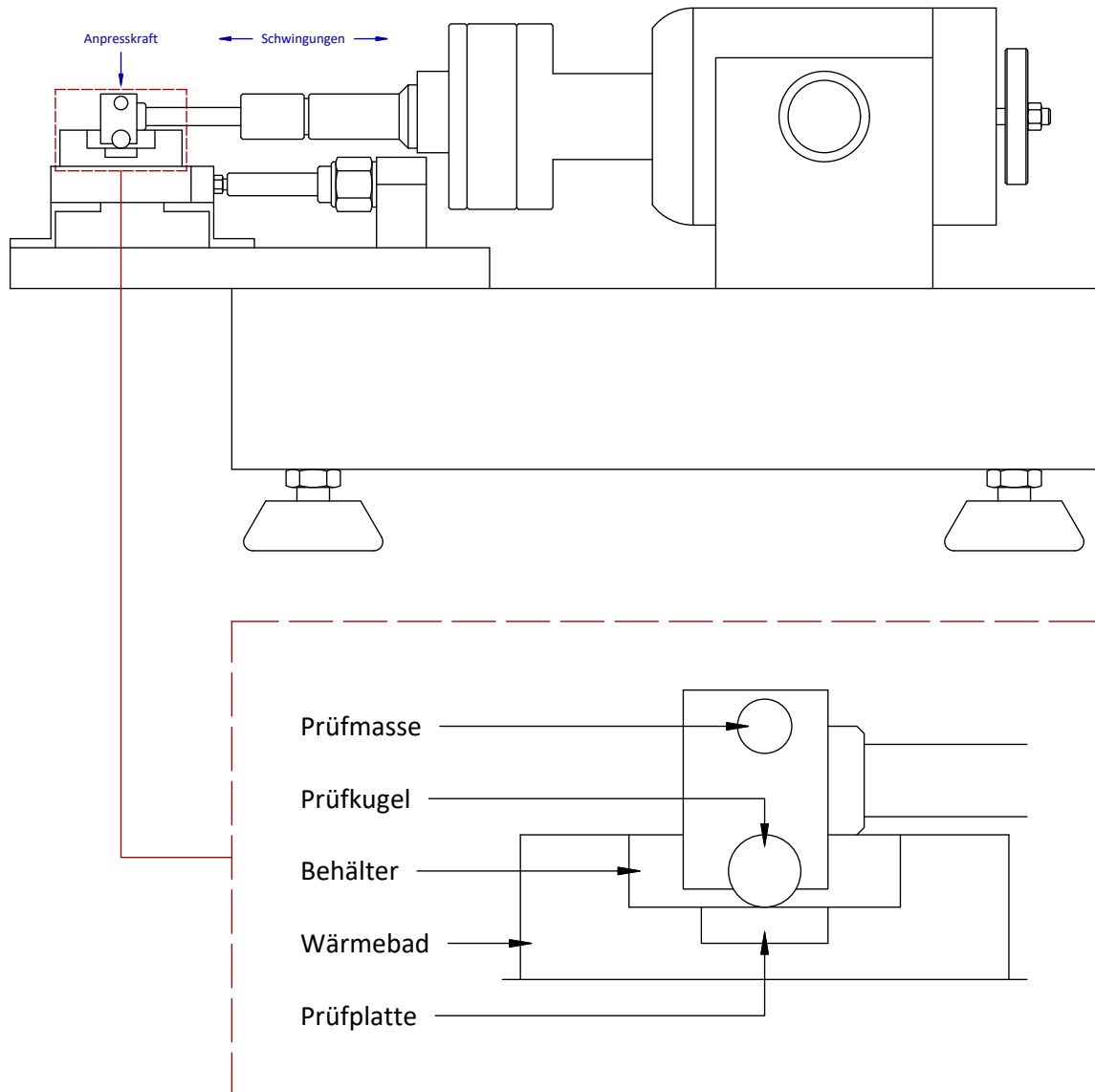


Abbildung 4.5: Prinzipskizze eines Schwingungsverschleiß-Prüfgeräts¹⁰

Dennoch sind synthetische Kraftstoffe ihrer geringeren Schmierfähigkeit wegen als Kraftstoffzusatz nicht kategorisch ausgeschlossen. Anders als die maximalen Mischungsverhältnisse hinsichtlich der Massendichte aus Kapitel 4.3.2 verhält sich die Schmierwirkung von Kraftstoffgemischen nicht proportional. Im Jahr 2017 wurde an der Hochschule *Rzeszow University of Technology* in Polen eine Studie zur Schmierfähigkeit von Diesel-Ethanol-Gemischen mit dem HFRR-Verfahren durchgeführt und im Fachartikel [6] publiziert. Ausgehend von reinem Dieselkraftstoff als Referenz wurde schrittweise das Mischungsverhältnis bis auf 14 Vol.% Ethanol angehoben. Zudem wurden weitere Messungen zur Bestimmung der kinematischen und dynamischen Viskosität, der Dichte und des Wassergehalts für einzelne Kraftstoffproben durchgeführt. Die Prüfplatten mit den Abriebkalotten aus der Untersuchung werden in der Abbildung 4.6 dargestellt. Grundsätzlich unterscheiden sich die

¹⁰Abbildung angelehnt an Regelwerk [5]

Kalotten in ihren Außenkonturen, die für den WSD-Wert ausschlaggebend sind, nur geringfügig voneinander. Für einen deutlicheren Unterschied sorgen die dunklen Verfärbungen und die länglichen Vertiefungen. Die Verfärbungen entstehen durch tribochemische Reaktionen, die durch Sauerstoff- oder Wasserkonzentrationen im Kraftstoff verursacht werden. Dieser Effekt muss sich aber nicht nachteilig auswirken, da sich bei einer geringen Konzentration eine schützende Oxidschicht bilden kann. Andernfalls führt eine hohe Konzentration zu übermäßiger Oxidation und verursacht demzufolge einen erhöhten Verschleiß. Die Vertiefungen entstehen durch abrasive Prozesse, die durch Sedimente im Kraftstoff verursacht werden. Dabei wird die Sedimentbildung durch die Oxidationsvorgänge begünstigt. Die Ergebnisse zur Schmierwirkung werden im Diagramm 4.2 aufgeführt. Werden einzig die Werte betrachtet, kann nur bedingt eine Aussage über die Schmierfähigkeit getroffen werden. Unter der Annahme, dass mit einem Anstieg der Ethanolkonzentration die Schmierwirkung des Kraftstoffgemisches herabgesetzt wird, müssten die WSD-Werte kontinuierlich ansteigen. Erst mit Hinzunahme einer linearen Approximation über die Einzelwerte wird deutlich, dass die WSD-Werte mit steigender Ethanolkonzentration sinken und demzufolge eine bessere Schmierwirkung eintritt. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die HFRR-Messungen nur einmalig vorgenommen wurden und daher schwankende Prüfergebnisse eintreten. Mit steigender Häufigkeit kann eher davon ausgegangen werden, dass die Schmierfähigkeit bis zu einem Mischungsverhältnis von 14 Vol.% Ethanol konstant bleibt. Selbst bei einem Anstieg der WSD-Werte wäre der maximale Grenzwert lange nicht erreicht.

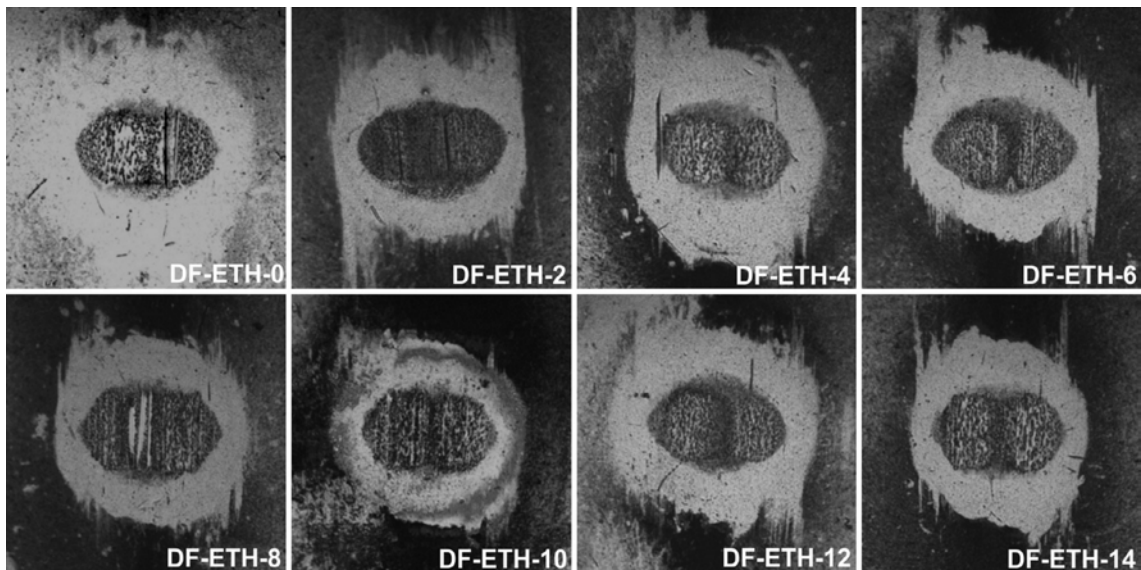


Abbildung 4.6: Abriebkalotten von Diesel-Ethanol-Gemischen¹¹

Nach Auswertung der Prüfergebnisse zur Studie wurde geschlussfolgert, dass Ethanol im Dieselkraftstoff nur einen geringen Einfluss auf die Abmessungen der durchschnittlichen Abriebkalotten hat. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Abnahme der kinematischen

¹¹Abbildung entnommen aus Fachartikel [6]

und dynamischen Viskosität sowie der Anstieg der Wasserkonzentration durch die erhöhte Ethanolkonzentration nicht für die Änderungen der WSD-Werte verantwortlich sind. Abschließend wurde bestätigt, dass selbst die höchste Ethanolkonzentration von 14 Vol.% zum Dieselkraftstoff die Anforderung der Norm *DIN EN 590:2017-10* hinsichtlich der Schmierfähigkeit erfüllt. Die Ergebnisse aus der Studie mit Diesel-Ethanol-Gemische können auch auf Diesel-Methanol-Gemische übertragen werden. Ethanol (C_2H_5-OH) unterscheidet sich einzig durch eine zusätzliche CH_2 -Verbindung von Methanol. Zudem besitzen beide Kraftstoffe die Hydroxygruppe ($-OH$) und sind aufgrund ihrer Synthetik schwefelfrei. Die Annahme, dass Ethanol eine ähnliche Schmierwirkung wie Methanol besitzt, ist realistisch. Daher kann auch ein Kraftstoffgemisch mit einem Anteil von maximal 14 Vol.% Methanol zum Dieselkraftstoff ohne Bedenken im dieselmotorischen Betrieb eingesetzt werden.

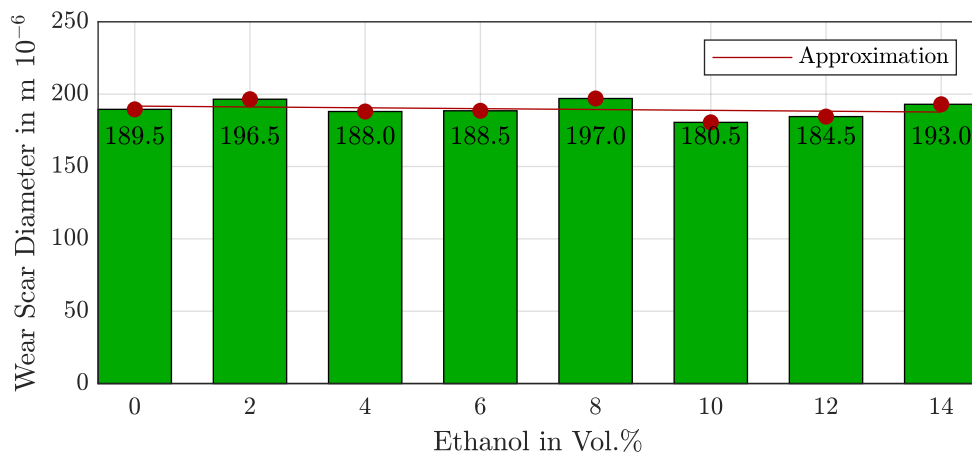


Diagramm 4.2: Verschleißwerte von Diesel-Ethanol-Gemisch¹²

4.5 Eigenschaft der Materialverträglichkeit

In den Fachartikeln [2], [3] und [7] wurde im Rahmen von Kraftstoffuntersuchungen die Unverträglichkeit von OME-Kraftstoffen und Dichtungsmaterialien erwähnt. Es wurde darauf hingewiesen, dass selbst geringe Mengen OME in Kraftstoffgemischen für konventionelle Dichtungsmaterialien kritisch sein kann. Insbesondere die Eigenschaft der übermäßigen Volumenänderung, auch Quellung genannt, wurde für übliche Polymerwerkstoffe in Untersuchungen zur Materialverträglichkeit nachgewiesen. Die Unverträglichkeit wurde explizit für Elastomerdichtungen aus Fluorkarbonkautschuk (FKM) in Kontakt mit OME₁ beobachtet. Als Ursache der Quellung wurde der Vorgang der chemischen Lösung für niedermolekulare OME-Kraftstoffe ausgemacht. In weiteren Untersuchungen konnte aber eine Verträglichkeit zwischen Perfluorkautschuk (FFKM) und OME-Kraftstoffen festgestellt werden.

¹²Werte entnommen aus Fachartikel [6]

Ebenso wie Dichtungsmaterialien können auch Kraftstoffleitungen aus FKM hergestellt sein. Die Leitungen sind dabei in drei oder vier Schichten aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut. In der Norm *DIN 73379:2014-07* wird auch FKM als Material für die Leitungsinnenschicht genannt. Um etwaige Undichtigkeiten aufgrund von Quellungen vorzubeugen, müssen die montierten Kraftstoffleitungen der ausgeführten Anlagenerweiterung nochmals kontrolliert und eventuell ausgetauscht werden. Welche Materialien in einer Leitung verwendet wurden, kann der aufgedruckten Kennzeichnung entnommen werden. In der Abbildung 4.7 wird als Beispiel eine Kennzeichnung für eine Kraftstoffleitung mit vier Schichten dargestellt.

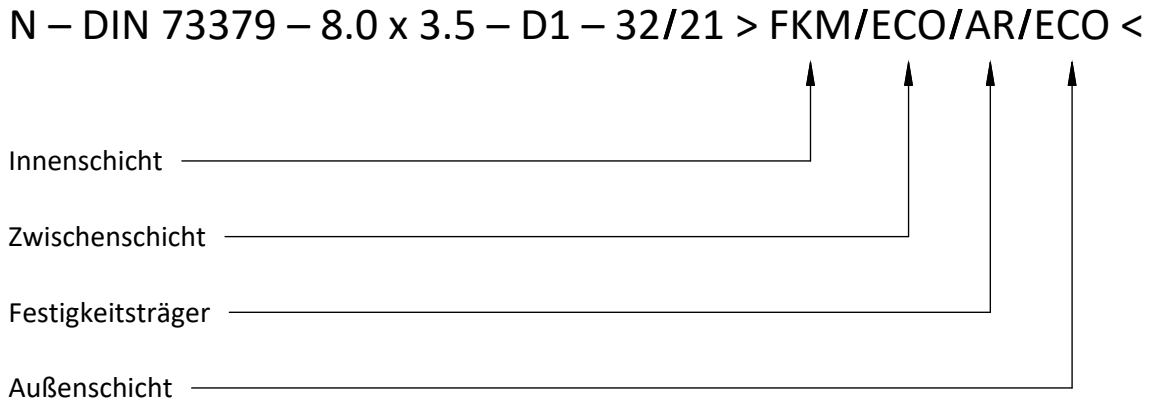
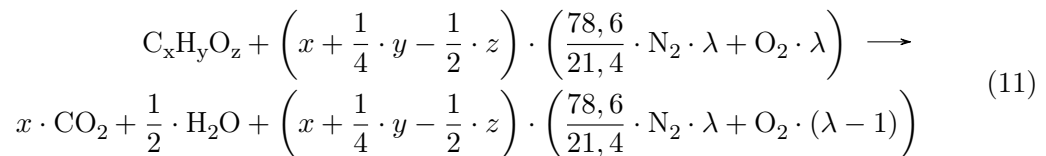


Abbildung 4.7: Kennzeichnung von Kraftstoffleitungen¹³

4.6 Analyse nach Reaktionsgleichung

Um synthetische Kraftstoffe im Vergleich zu mineralischen Kraftstoffen genauer bewerten zu können, wird eine rechnerische Analyse vorgenommen. Gerade die Auswirkungen des Sauerstoffgehalts auf das Verhalten der Schadstoffemissionen kann somit genauer betrachtet werden. Mit Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der Kraftstoffe hinsichtlich der Elemente und der Stoffmengen kann eine Berechnung mit der Reaktionsgleichung



für technische Verbrennungsprozesse erfolgen. Reaktionsgleichungen werden korrekterweise in einem stöchiometrischen Verhältnis geschrieben. Da Dieselmotoren über die Einspritzmenge geregelt und mit Luftüberschuss betrieben werden, wird die Gleichung um das Verbrennungsluftverhältnis λ erweitert. Die stöchiometrische Gleichung stellt sich für das

¹³Abbildung angelehnt an Regelwerk [8]

Verhältnis $\lambda = 1$ ein. Die Reaktionsgleichung ist eine idealisierte Betrachtung der Reaktanten und der Produkte und kann nur als Näherung verstanden werden. Somit wird die Annahme getroffen, dass die zugeführte Luft für den Verbrennungsprozess einzig aus Sauerstoff und Stickstoff in einem festen Verhältnis besteht. Anders als bei synthetischen Kraftstoffen, deren Zusammensetzung bekannt ist, müssen für mineralische Kraftstoffe Vereinfachungen getroffen werden, da ihre Zusammensetzung nur analytisch bestimmt werden kann. Im Fall von Dieselkraftstoffen wird davon ausgegangen, dass sie stickstoff- und schwefelfrei sind sowie keine Sauerstoff- und Wasserkonzentrationen enthalten. Nachfolgend wird Dieselkraftstoff aus Verbindungen von reinen Kohlenwasserstoffen mit der Summenformel $C_{14}H_{28}$ betrachtet.

Werden zudem die Stoffmengen der Elemente mit den jeweiligen molaren Massen multipliziert, kann auch eine Aussage über die Massenverhältnisse der Reaktanten und der Produkte getroffen werden. Somit lässt sich mittels einer Normierung der Einzelmassen der Kraftstoffkomponenten auf die Gesamtmasse die Kraftstoffzusammensetzung bestimmen. Gerade im Hinblick auf die Entwicklung des Sauerstoffgehalts von OME-Kraftstoffen ist die Zusammensetzung interessant. Ebenso können die Massenanteile der Abgaskomponenten unter Hinzunahme der Dichten für die jeweiligen Elemente berechnet werden. Die Entwicklung der Abgaszusammensetzung für synthetische Kraftstoffe kann somit eingeschätzt werden. Ebenso wichtig wie die Betrachtung der Kraftstoff- und Abgaszusammensetzung ist der Sauerstoff- und Luftbedarf für die Stoffumwandlung im Verbrennungsprozess. Der Mindestsauerstoffbedarf entspricht dabei dem Quotienten aus Sauerstoff- und Kraftstoffmasse und wird mit der Gleichung

$$\lambda \cdot \frac{100}{21,4} \cdot \underbrace{\frac{\left(x + \frac{1}{4} \cdot y - \frac{1}{2} \cdot z\right) \cdot O_2}{C_x H_y O_z}}_{=O_{\min}} \quad (12)$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{=L_{\min}}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{=L_{\lambda}}$$

ermittelt. Werden in der Gleichung zusätzlich die Massenanteile des Sauerstoffs in der Luft berücksichtigt, ergibt sich daraus der Mindestluftbedarf, der ein stöchiometrisches Gemisch beschreibt. Um ein überstöchiometrisches Gemisch zu betrachten, muss die Gleichung wiederum um das Verbrennungsluftverhältnis λ für den Luftüberschuss erweitert werden. Nachfolgend wird für Dieselmotoren der Luftüberschuss $\lambda = 1,4$ angesetzt.

4.6.1 Kraftstoffzusammensetzung

Im Diagramm 4.3 werden die Zusammensetzungen der Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Massenanteile für Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff dargestellt. In idealisierter Form setzt sich Dieselkraftstoff etwa aus 85 Gew.% Kohlenstoff und 15 Gew.% Wasserstoff zusammen.

Grundsätzlich haben auch mineralische Kraftstoffe einen Sauerstoffanteil, der jedoch nur eine unwesentliche Änderung in der Zusammensetzung bewirkt. Als Grundstoff für die synthetischen Kraftstoffe besitzt Methanol mit annähernd 50 Gew.% den größten Sauerstoffanteil. Die erste Synthesestufe zu DME verringert zunächst den Anteil um 15 Gew.% bevor der Sauerstoffanteil bei den OME-Kraftstoffen mit weiteren Synthesestufen zunimmt. Die Zunahme der Massenanteile für Sauerstoff bzw. die Abnahme für Wasserstoff und Kohlenstoff werden nochmals nach Ordnungszahlen im Diagramm 4.4 abgebildet. Die OME-Kraftstoffe können bei fortlaufender Synthese einen größeren Sauerstoffanteil erreichen als Methanol. Dennoch ergibt sich rechnerisch ein asymptotischer Grenzwert von 53,3 Gew.% für beliebig viele Synthesestufen. Daher sind synthetische Kraftstoffe über OME₆ hinaus unwirtschaftlich, da der Massenanteil für Sauerstoff nicht mehr nennenswert zunimmt. Zudem werden auch die physikalischen Eigenschaften unbrauchbar. Die Massenanteile für Kohlenstoff und Wasserstoff sinken mit zunehmender Kettenlänge und werden auf lange Sicht die Grenzen von 40,0 Gew.% bzw. 6,7 Gew.% erreichen.

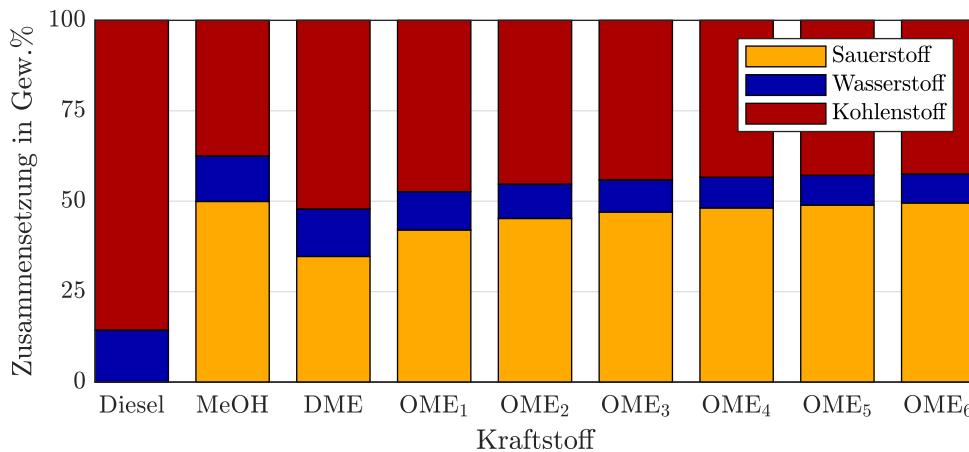


Diagramm 4.3: Kraftstoffzusammensetzung

Die Zusammensetzung der Kraftstoffe hat maßgeblichen Einfluss auf die Schadstoffemissionen. Im dieselmotorischen Betrieb unterliegt der Kraftstoff einer inhomogenen Verbrennung, da eine diffusive Gemischbildung im Brennraum erfolgt. Somit kann der Kraftstoff bei niedrigen Verbrennungstemperaturen nicht vollständig umgesetzt werden und neigt daher zur Rußbildung. Im Grunde lässt sich das Problem über höhere Temperaturen einfach lösen. Bei hohen Verbrennungstemperaturen wird der Kraftstoff vollständig umgesetzt und Rußpartikel größtenteils vermieden. Jedoch wird dadurch die Entstehung von Stickstoffoxide begünstigt, da Stickstoff unter diesen Bedingungen eine hohe Reaktivität besitzt. Dieses Problem wird auch mit dem Begriff *Ruß-NO_x-Zielkonflikt* bezeichnet. Die Rußbildung als eines der zentralen Probleme im dieselmotorischen Betrieb kann mit sauerstoffhaltigen Kraftstoffen gelöst werden. Mit synthetischen Kraftstoffen kann eine homogene Verbrennung erreicht werden, da OME-Kraftstoffe aufgrund ihres Sauerstoffanteils dem Sinn nach als vorgemischt betrachtet werden können. Eine Vormischung der Kraftstoffe gewährleis-

tet eine schnellere und rußfreie Verbrennung. Ein weiterer Vorteil liegt in den fehlenden C-C-Bindung, wodurch die Entstehung rußbildender Komponenten gehemmt wird. Ebenso fehlen aromatische Verbindungen, die ebenso zu starker Rußbildung neigen.

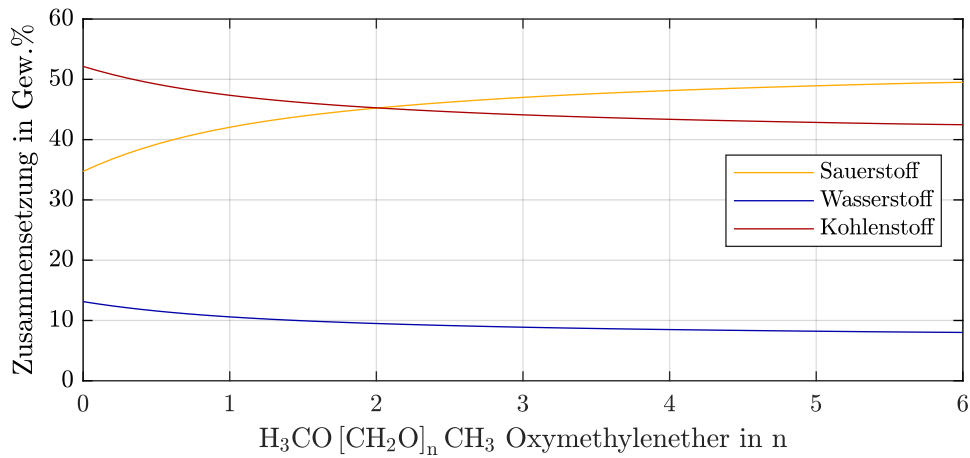


Diagramm 4.4: Kraftstoffzusammensetzung von OME

4.6.2 Abgaszusammensetzung

In der Theorie entstehen bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit reinem Sauerstoff in einem stöchiometrischen Verhältnis ausschließlich Kohlenstoffdioxid und Wasser. Wird Luft als Lieferant von Sauerstoff herangezogen und das Verhältnis beibehalten, erweitern sich die Produkte lediglich um Stickstoff. In einem überstöchiometrischen Verhältnis durch Luftüberschuss verbleibt auch Sauerstoff nach der Reaktion. Im Diagramm 4.5 werden die Zusammensetzungen der Abgase für einen idealisierten Verbrennungsprozess nach Gleichung 11 mit einem Luftüberschuss abgebildet. Die Abgasbestandteile sind demnach Sauerstoff, Wasser, Kohlenstoffdioxid sowie Stickstoff und werden als Massenverhältnisse für 1 kg Kraftstoff angegeben. Dieselkraftstoff weist für alle Abgasbestandteile die höchsten Werte auf und erzeugt bei seiner Verbrennung etwa 15 kg Stickstoff und 3 kg Kohlenstoffdioxid als Schadstoffemissionen. Die mit Abstand niedrigsten Werte besitzt OME₆, die ungefähr 40 bis 60 % unter dem Niveau von Dieselkraftstoff liegen. Die Entwicklung der Abgasbestandteile für OME-Kraftstoffe wird wiederum nach Ordnungszahlen im Diagramm 4.6 dargestellt. Demnach sinken die Werte für Sauerstoff, Wasser und Kohlenstoffdioxid leicht. Der Stickstoffanteil hingegen nimmt innerhalb der OME-Kraftstoffe nochmals signifikant ab und erreicht mit der Ordnungszahl $n = 6$ einen Wert von etwa 6 kg. Eine weitere nennenswerte Abnahme ist für große Ordnungszahlen nicht zu erwarten, da sich ein theoretischer Grenzwert von 4,8 kg einstellt. Die Werte für Sauerstoff, Wasser und Kohlenstoffdioxid sinken auf lange Sicht nur noch um jeweils 100 g, sodass bereits OME₆ nahezu die Grenzwerte erreicht.

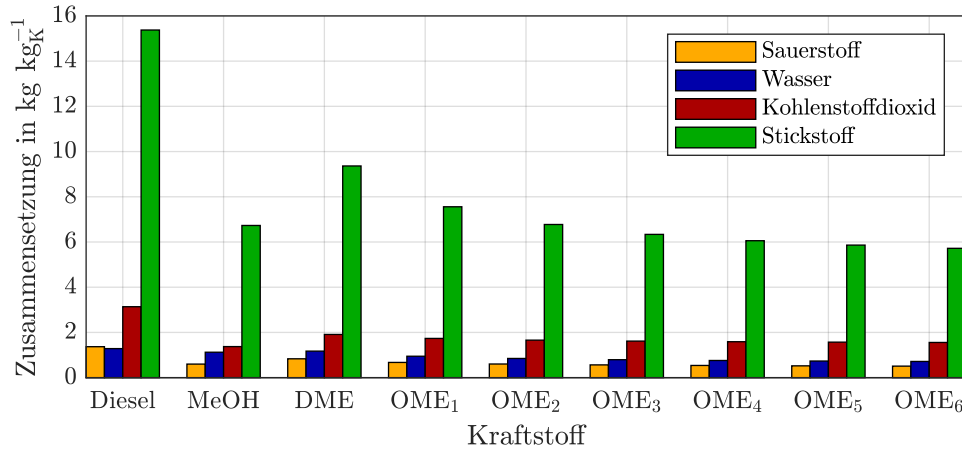


Diagramm 4.5: Abgaszusammensetzung

In der Realität trifft die zuvor beschriebene Idealisierung nicht zu, da die Reaktionen bei der Verbrennung sehr komplex sind und dadurch viele Zwischen- und Nebenprodukte entstehen. Gerade die hohen Temperaturen sorgen dafür, dass vermeintlich inerte Elemente reaktiv werden. Daher müssen für Kohlenstoffdioxid und Stickstoff korrekterweise die Bezeichnungen *Kohlenstoffoxide* und *Stickstoffoxide* eingeführt werden. Wie in Kapitel 4.6.1 erwähnt, hat die Zusammensetzung der Kraftstoffe maßgeblichen Einfluss auf die Schadstoffemissionen. Es kann vereinfacht die Annahmen getroffen werden, dass Kohlenstoffoxide aus dem Kraftstoff und Stickstoffoxide aus der Luft entstammen. Im Grunde lässt sich eine Reduzierung beider Abgasbestandteile mit synthetischen Kraftstoffen erreichen. Anhand des geringeren Kohlenstoffgehalts im Kraftstoff entstehen auch proportional weniger Kohlenstoffoxide. Im Vergleich dazu besteht aber ein erhöhter Kraftstoffverbrauch aufgrund der geringeren Energiedichte, wodurch dieser Vorteil wieder kompensiert wird. Zudem kann der Luftbedarf bzw. -überschuss gesenkt werden, da in synthetischen Kraftstoffen bereits ein höherer Sauerstoffgehalt vorherrscht. Weniger Luft als Lieferant von Sauerstoff bedeutet in diesen Zusammenhängen weniger Stickstoffoxide als Folge der Verbrennung. Eine weitere NO_x -Reduzierung kann über eine erhöhte AGR-Rate erzielt werden. Mit Erhöhung der Rate werden die Verbrennungstemperaturen gesenkt und somit der Entstehung von Stickstoffoxiden entgegengewirkt. Die vermehrte Bildung von Ruß bei geringen Temperaturen wird ohnehin mit sauerstoffhaltigen Kraftstoffen unterdrückt. Synthetische Kraftstoffe haben daher das Potenzial die Schadstoffemissionen zu senken und zugleich die Lösung des Ruß- NO_x -Zielkonflikts zu sein.

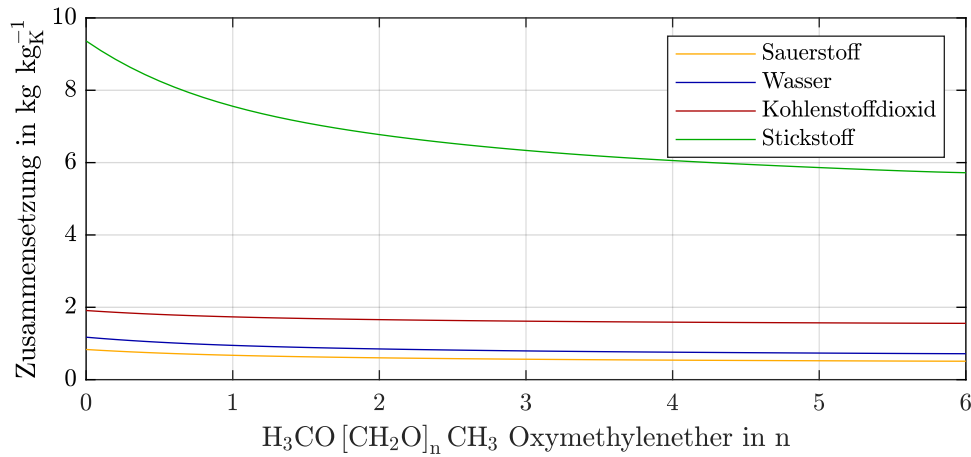


Diagramm 4.6: Abgaszusammensetzung von OME

4.6.3 Sauerstoff- und Luftbedarf

Im Diagramm 4.7 werden die Anteile von Sauerstoff und Luft für den Verbrennungsprozess dargestellt und als Massenverhältnisse zum Kraftstoff angegeben. Über den Vergleich der Werte wird nochmals die Auswirkung des Sauerstoffgehalts in OME-Kraftstoffen deutlich. Demnach benötigt OME_6 für einen Luftüberschuss nur etwa 8 kg zusätzliche Luftmasse um vollständig umgesetzt zu werden. Dieselkraftstoff hingegen braucht eine Luftmasse von ungefähr 22 kg und damit etwa 60 % mehr für seine Umsetzung. Im Luftmassenbedarf von mineralischen Kraftstoffen spiegeln sich auch die hohen NO_x -Werte wieder. Mehr Luft im Brennraum verursacht in diesem Zusammenhang mehr Schadstoffe im Abgas. Der Luftmassenbedarf der Kraftstoffe kann auch über das Verbrennungsluftverhältnis, auch Luftzahl genannt, beschrieben werden. Im Diagramm 4.8 wird die proportionale Beziehung zwischen dem Mindestluftbedarf und dem Luftüberschuss deutlich. Mit Anstieg des Sauerstoffgehalts wird der Gradient der Graphen kleiner. Demzufolge wird auch eine geringere Luftmasse für eine erhöhte Luftzahl benötigt. Für den mineralischen Kraftstoff *Diesel* und für den synthetischen Kraftstoff OME_6 sind exemplarisch die stöchiometrischen Luftmassen als Horizontale eingetragen. Somit wird gezeigt, dass sauerstoffhaltige Kraftstoffe für einen dieselmotorischen Betrieb einem stöchiometrischen Verhältnis weniger weit entfernt sind als Dieselkraftstoffe. Ohnehin muss das Vorbild der Ottomotor und das Ziel der Dieselmotor mit Mindestluftbedarf sein. Wenn Dieselmotoren in einem stöchiometrischen Verhältnis betrieben werden, erzeugen sie aufgrund der inneren und inhomogenen Gemischbildung hohe Rußkonzentrationen. Als Konsequenz dessen wird im dieselmotorischen Betrieb ein überstöchiometrischen Verhältnis eingesetzt. Da OME-Kraftstoffe bereits rußfreie Verbrennungsprozesse ermöglichen, kann auch ein ottomotorischer Betrieb realisiert werden. Dahingehend könnte ein geregelter Drei-Wege-Katalysator für die Abgasnachbehandlung eingesetzt werden. Somit werden Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxide sowie Kohlenwasserstoffe durch Reduktion oder Oxidation größtenteils in Wasser, Koh-

lenstoffdioxid und Stickstoff umgewandelt. Demnach müsste auch eine Analyse nach der Reaktionsgleichung nicht nur als Näherung verstanden werden.

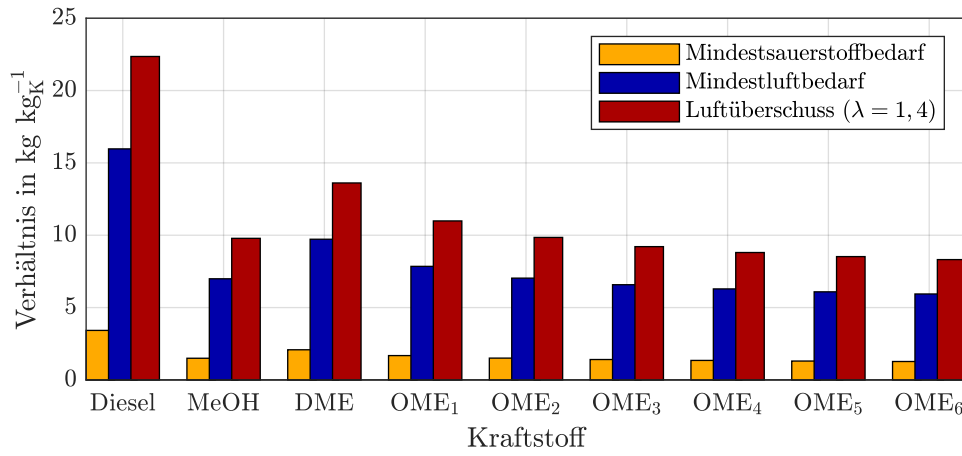


Diagramm 4.7: Sauerstoff- und Luftbedarf

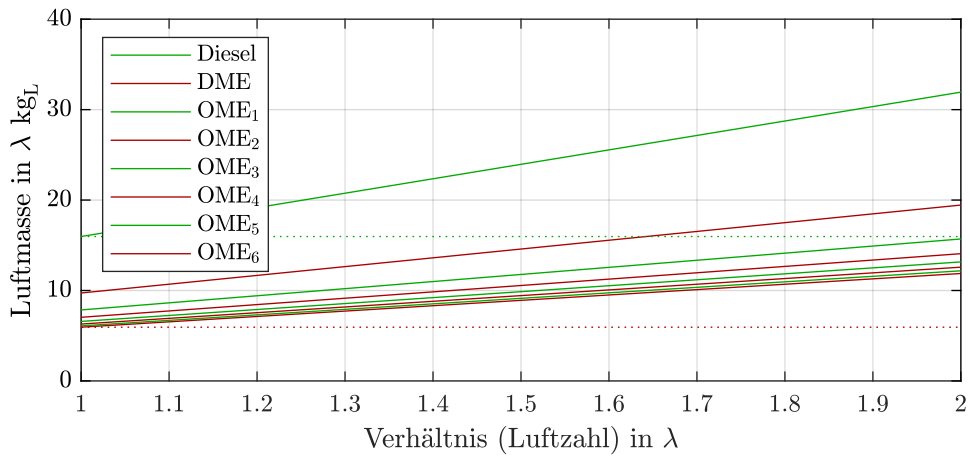


Diagramm 4.8: Luftüberschuss und Luftzahl

5 Versuchsdurchführung und -auswertung

Das letzte Ziel dieser Arbeit ist es, die ausgeführte Anlagenerweiterung in Betrieb zu nehmen und erste Messungen und Auswertungen mit einem Mischkraftstoff durchzuführen. Um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, gilt es Referenzmessungen mit Dieselkraftstoff für einen konstanten Motorbetriebspunkt vorzunehmen. Betriebspunkte beschreiben Lastfälle über die Drehzahl sowie das Drehmoment und können zusammen mit dem spezifischen Kraftstoffverbrauch in Motor- bzw. Verbrauchskennfelder dargestellt werden. Nach den Referenzmessungen erfolgt eine Versuchsdurchführung mit dem Testkraftstoff OME_{3-5} in einem definierten Mischungsverhältnis zum Dieselkraftstoff. In einem Testbetrieb werden Messungen bezüglich des Kraftstoffverbrauchs, Zylinderdrucks und Rauchwerts sowie der Abgastemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse aus Messungen und Berechnungen werden abschließend ausgewertet und einem Vergleich sowie einer Beurteilung unterzogen.

Bedingt durch Wartungsarbeiten am Motorenprüfstand und dem daraus resultierenden Zeitverzug konnte kein Testbetrieb durchgeführt werden. Daher soll nachfolgend der Testkraftstoff sowie der Zylinderdruck- und Summenheizverlauf für eine Bewertung des Verbrennungsprozesses thematisiert werden.

5.1 Testkraftstoff OME_{3-5}

5.1.1 Zusammensetzung und Einordnung

Der Testkraftstoff für eine Versuchsdurchführung ist ein OME-Kraftstoff vom Unternehmen *ASG Analytik-Service AG*, der als Gemisch aus OME_3 bis OME_5 bereitsteht. Im mitgelieferten Prüfbericht werden alle relevanten Eigenschaften des Testkraftstoffs in Form des Parameters mit der angewandten Methode sowie das Ergebnis mit zugehöriger Einheit aufgeführt. Die genaue Zusammensetzung des Kraftstoffs wird in der Tabelle 5.1 aufgelistet.

OME_1	OME_2	OME_3	OME_4	OME_5	OME_6
0,01 %	< 0,01 %	57,90 %	28,87 %	10,07 %	1,91 %

Tabelle 5.1: Prozentuale Zusammensetzung von OME_{3-5}

Anhand der bekannten chemischen Strukturen von OME_1 bis OME_6 können die Stoffmengen mit dem jeweiligen prozentualen Anteil multipliziert und über die Elemente *Kohlenstoff*, *Wasserstoff* und *Sauerstoff* addiert werden. Somit kann der Testkraftstoff näherungsweise mit der Summenformel $C_6H_{13}O_5$ beschrieben werden. Mit der Vorgehensweise zur Ermittlung der Massenverhältnisse, die im Kapitel 4.6 beschrieben wurde, kann

die Summenformel aus der Kraftstoffzusammensetzung kontrolliert werden. In der Tabelle 5.2 werden die analysierten und die berechneten Werte für die elementare Zusammensetzung gegenübergestellt. Die Berechnungswerte unterscheiden sich demnach maximal um 1,3 Gew.% gegenüber den Analysewerten. Somit ist die idealisierte Summenformel bestätigt. Ausgehend von der Summenformel ordnet sich der Testkraftstoff demzufolge zwischen OME₃ und OME₄ ein. Die physikalischen Eigenschaften von OME₃₋₅ bestätigen die Einordnung und werden in der Tabelle 5.3 aufgelistet.

Als hervorragend zeichnet sich die Schmierfähigkeit des Testkraftstoffs aus, die den maximalen Grenzwert von 460 µm deutlich unterschreitet. Der WSD-Wert von OME₃₋₅ übertrifft zudem die Schmierwirkung von OME₅, das eine zusätzliche Baugruppe des Polyoxymethylen besitzt. Die Tatsache, dass die Schmierfähigkeit einzig mit steigender Ordnungszahl zunimmt, kann für den Testkraftstoff nicht bestätigt werden. Es kann die Annahme getroffen werden, dass sich OME-Gemische in ihrer Schmierwirkung anders verhalten als OME-Kraftstoff in Reinform. Auch die Ergebnisse des Diesel-Ethanol-Gemisches, die im Kapitel 4.4.2 vorgestellt wurden, wichen von den Erwartungen ab. Statt erhöhter WSD-Werte und demzufolge geringerer Schmierfähigkeit blieb die Eigenschaft weitestgehend konstant. Es kann demnach als Vorteil betrachtet werden, dass die Schmierwirkung größer als angenommen ist und auch kaum beeinflusst wird.

Ohnehin entsprechen viele physikalische Eigenschaften von OME₃₋₅ auch den Anforderungen, die an Mineralöldiesel gestellt wird. Einzig die kinematische Viskosität bei einer Temperatur von 40 °C wird mit einem Wert von 1,082 mm² s⁻¹ gegenüber dem minimalen Grenzwert von 2,000 mm² s⁻¹ unterschritten. Dennoch ist diese Verletzung der Vorschrift kein Nachteil für einen Prüfstandbetrieb. Kraftstoffe mit hoher Viskosität besitzt zwar eine gute Schmierfähigkeit, unterliegen aber auch einem erhöhten Strömungswiderstand in den Kraftstoffleitungen. Zudem werden sie während des Einspritzvorgangs weniger fein zerstäubt und erzeugen beim Verbrennungsvorgang vermehrt rußbildende Komponenten. Da OME-Kraftstoffe allgemein eine gute Schmierwirkung besitzen, kann auch eine geringere Viskosität akzeptiert werden. Auch eine Viskosität bei Tieftemperaturen, die den maximalen Grenzwert von 4,000 mm² s⁻¹ überschreitet, kann bei einem Prüfstandbetrieb ausgeschlossen werden. Somit wird eine gute Schmierfähigkeit für die Einspritzrüstung mit einer guten Zerstäubung für die Gemischbildung von OME-Kraftstoffen vereint.

Bezeichnung		Zusammensetzung	
Element	Symbol	Analyse	Berechnung
Kohlenstoff	C	43,0 Gew.%	43,7 Gew.%
Wasserstoff	H	8,5 Gew.%	8,6 Gew.%
Sauerstoff	O	46,4 Gew.%	47,7 Gew.%

Tabelle 5.2: Elementare Zusammensetzung von OME₃₋₅

Bezeichnung	OME ₃	OME ₃₋₅	OME ₄	Einheit
Summenformel	C ₅ H ₁₂ O ₄	≈ C ₆ H ₁₃ O ₅	C ₆ H ₁₄ O ₅	–
Zündwilligkeit	CZ 67	CZ 69	CZ 76	–
Massendichte	1030	1057	1070	kg m ⁻³
Energiedichte	19,4	19,3	18,7	MJ kg ⁻¹
Schmierfähigkeit	534	320	465	µm

Tabelle 5.3: Vergleich der Eigenschaften von OME₃₋₅

5.1.2 Berechnung der Energiedichte

Die Energiedichte des Testkraftstoffs entspricht einem gravimetrischen Dieseläquivalenten von 2,2 und ist demnach um etwa 55 % geringer als der Heizwert von Dieselkraftstoff. Ebenso wie im Kapitel 4.3.3 erläutert und im Diagramm 4.1 dargestellt, kann auch die Entwicklung der Energiedichte für Kraftstoffgemische in verschiedenen Verhältnissen abgebildet werden.

Da für Diesel-OME₃₋₅-Gemische keine Heizwerte vorliegen, wird auf eine empirische Formel für die Berechnung zurückgegriffen. Ausgehend von der Annahme, dass sich Diesel- und OME₃₋₅-Kraftstoff in einem Mischungsverhältnis hinsichtlich ihrer Stoffmengen proportional verhalten, kann somit die chemische Zusammensetzung bzw. die Summenformel bestimmt werden. Für die Berechnung der Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff im Kraftstoffgemisch wird die Vorgehensweise aus Kapitel 4.6 angewandt. Für die Berechnung der Energiedichten wird die Formel von BOIE, die als Modifikation der Verbandsformel von DULONG gilt, herangezogen. Mit Kenntnis aller Massenanteile im Kraftstoff kann der Heizwert mit der Gleichung

$$H_u = 34,8 \cdot \xi_C + 93,8 \cdot \xi_H + \underbrace{6,3 \cdot \xi_N}_{=0} + \underbrace{10,5 \cdot \xi_S}_{=0} - 10,8 \cdot \xi_O - \underbrace{2,5 \cdot \xi_{H_2O}}_{=0} \quad (13)$$

für unterschiedliche Mischungsverhältnisse berechnet werden. Die Koeffizienten für jede

Kraftstoffkomponente wurden dabei auf Grundlage experimentell ermittelter Heizwerte für unterschiedliche Festbrennstoffe entwickelt. Obwohl für OME₃₋₅-Kraftstoff die spezifischen Anteile für Stickstoff (0,5 Gew.%), Schwefel (0,0005 Gew.%) und Wasser (0,0146 Gew.%) aufgrund des Prüfberichts bekannt sind, wird auf ihre Berücksichtigung bewusst verzichtet, da auch Dieselkraftstoff idealisiert betrachtet wird. Ohnehin sind die Massenanteile dieser Komponenten sehr gering, sodass etwaige Auswirkungen auf die Ergebnisse unerkannt bleiben. Um zu zeigen, dass auch die vereinfachte Gleichung eine hinreichend genaue Energiedichte für Flüssigbrennstoffe wiedergibt, werden in der Tabelle 5.4 die Berechnungs- und Messwerte für OME-Kraftstoffe in Reinform verglichen. Demnach sind die berechneten Werte tendenziell niedriger und weisen mit einer maximalen Differenz von 800 kJ kg⁻¹ gegenüber den gemessenen Werten eine vertretbare Abweichung auf.

Bezeichnung		Energiedichte		
Kurzform	Formel	Berechnung	Messung	Differenz
OME ₁	C ₃ H ₈ O ₂	21,9	22,4	0,5
OME ₂	C ₄ H ₁₀ O ₃	19,8	20,6	0,8
OME ₃	C ₅ H ₁₂ O ₄	18,6	19,4	0,8
OME ₄	C ₆ H ₁₄ O ₅	17,9	18,7	0,8
OME ₅	C ₇ H ₁₆ O ₆	17,3	18,1	0,8
OME ₆	C ₈ H ₁₈ O ₇	17,0	17,7	0,7

Tabelle 5.4: Berechnungs- und Messwerte von Energiedichten in MJ kg⁻¹

Die Ergebnisse der Berechnungen für die Energiedichte und den Sauerstoffgehalt über die Mischungsverhältnisse werden im Diagramm 5.1 abgebildet. Die Graphen bestätigen ihrem Verlauf nach die Erwartungen und erreichen ihre maximalen und minimalen Werte bei Mischungsverhältnissen von 0 Gew.% und 100 Gew.%, da dort Diesel- bzw. OME₃₋₅-Kraftstoff in Reinform vorliegt. Der Schnittpunkt markiert das Mischungsverhältnis bei dem der Sauerstoffgehalt und die Energiedichte arithmetisch gemittelt werden. Für ein Verhältnis von 15 Gew.% OME₃₋₅ und 85 Gew.% Diesel nimmt der Heizwert um etwa 3 MJ kg⁻¹ ab und der Sauerstoffanteil ungefähr um 6 Gew.% zu. Es kann angenommen werden, dass sich für dieses Mischungsverhältnis Änderungen in der Abgaszusammensetzung und im Verbrennungsprozess ergeben und diese mit Messungen des Rauchwerts und des Zylinderdrucks bestätigt werden können. Eine weiterführende Untersuchung kann in der Kalorimetrie des Diesel-OME₃₋₅-Gemisches liegen um einen exakten Heizwert zu bestimmen. Somit können die Berechnungen anhand von Messungen bestätigt oder widerlegt werden.

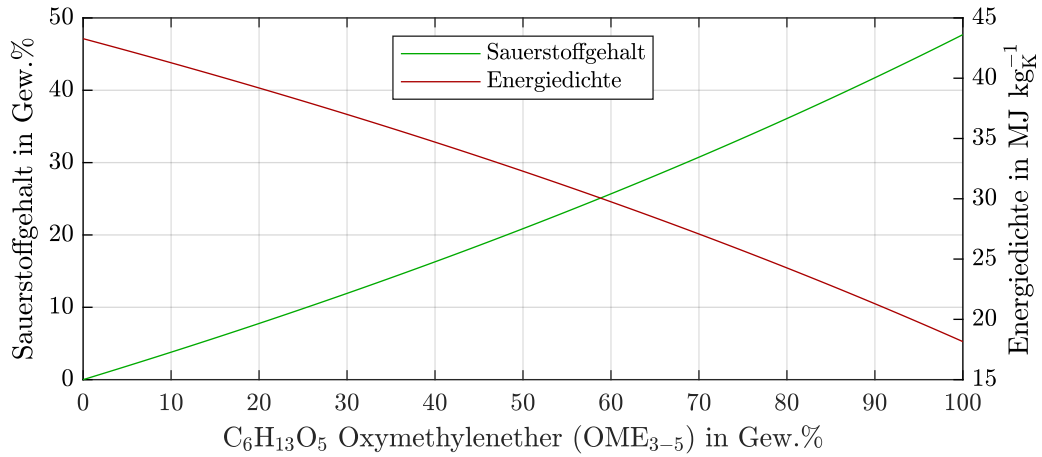


Diagramm 5.1: Sauerstoffgehalt und Energiedichte von Diesel-OME₃₋₅-Gemisch

5.1.3 Analyse nach Reaktionsgleichung

Wie in Kapitel 4.6 durchgeführt, können Kraftstoffe unter Annahme einer Idealisierung nach Gleichung 11 analysiert werden. Um die Auswirkungen des Testkraftstoffs auf ein Diesel-OME₃₋₅-Gemisch abschätzen zu können, wurden die Massenanteile der Kraftstoff- und Abgaskomponenten anhand der Mischungsverhältnisse berechnet und in den Diagrammen 5.1 bis 5.3 dargestellt. Auch diesbezüglich wurde die weitere Annahme getroffen, dass sich die Stoffmengen und somit die chemische Zusammensetzungen proportional verhalten. Bei Betrachtung der Diagramme werden alle Erwartungen bezüglich der Entwicklung über die Zusammensetzungen und Verhältnisse bestätigt. Ebenso erreichen die Graphen ihre maximalen und minimalen Werte bei Mischungsverhältnisse von 0 Gew.% und 100 Gew.%, da dort wiederum die Kraftstoffe in Reinform vorliegen. Mit einer sukzessiven Zunahme des OME₃₋₅-Kraftstoffs und der gleichzeitigen Abnahme des Dieselmkraftstoffs nimmt der Sauerstoffanteil bis etwa 48 Gew.% stetig zu. Ebenso nimmt der Kohlenstoff- und Wasserstoffanteil ungefähr um 49 Gew.% bzw. 40 Gew.% stetig ab. Gerade diese beiden Werte entsprechen auch der Reduzierung der Massenanteile von Kohlenstoffdioxid und Wasser im Abgas, da sie über die Reaktionsgleichung in Korrelation stehen. Auch die Massenanteile von Stickstoff und Sauerstoff nehmen im gleichen Maße um etwa 60 Gew.% ab und entsprechen gerade den Werten um die der Sauerstoff- und Luftbedarf sowie der Luftüberschuss reduziert wird. Über die Zusammenhänge wird nochmals gezeigt, dass im Verbrennungsprozess Kohlestoffoxide einzig aus dem Kohlenstoff der Kraftstoffe sowie Stickstoffoxide größtenteils aus der Luft entstammen. Zudem wird abermals gezeigt, dass der Sauerstoffanteil im Kraftstoff alle Abgasbestandteile ungefähr um 55 Gew.% im Mittelwert reduziert.

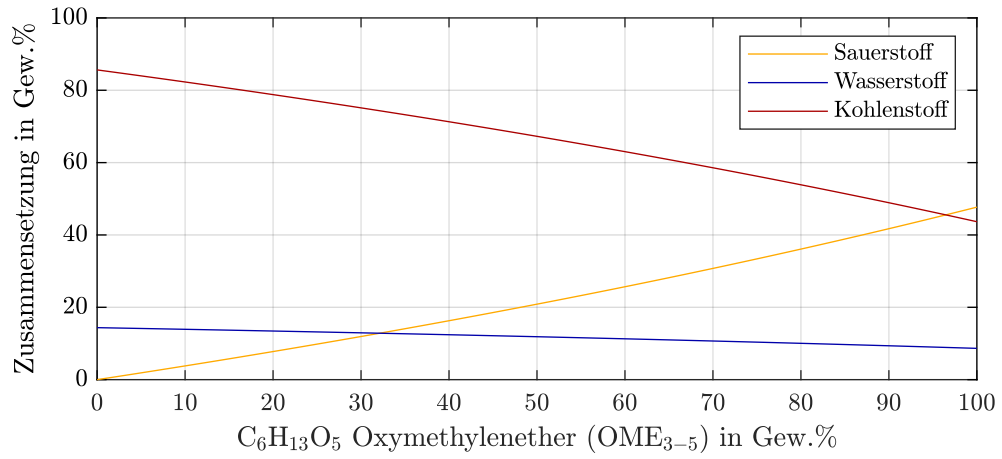


Diagramm 5.2: Kraftstoffzusammensetzung von Diesel-OME₃₋₅-Gemisch

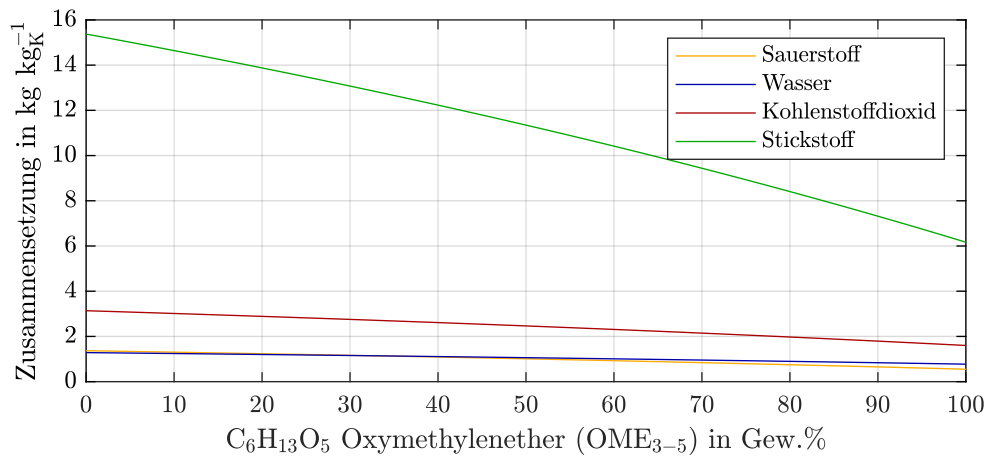


Diagramm 5.3: Abgaszusammensetzung von Diesel-OME₃₋₅-Gemisch

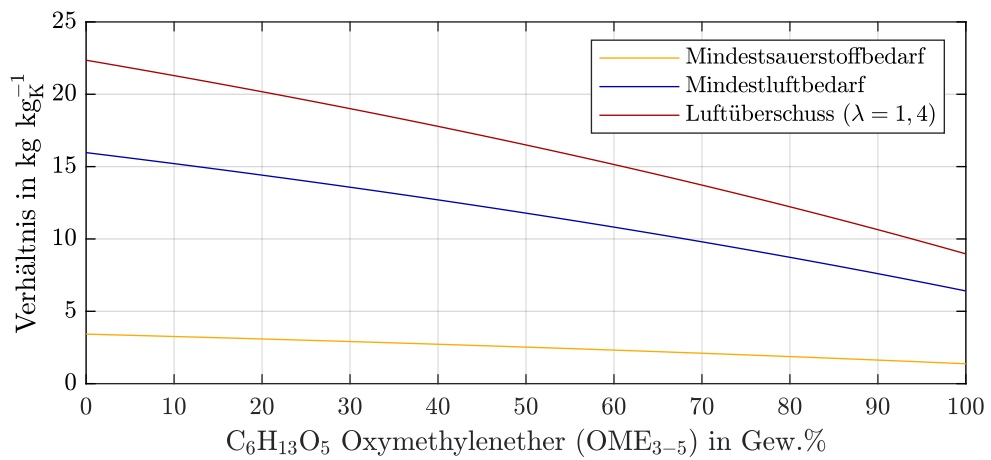


Diagramm 5.4: Sauerstoff- und Luftbedarf von Diesel-OME₃₋₅-Gemisch

5.2 Zylinderdruckverlauf

Für Untersuchungen und Analysen von Verbrennungsprozessen ist die Messung von Druckverläufen im Brennraum unabdingbar. Als Messverfahren steht dafür die Zylinderdruckindizierung mit Drucksensoren zur Verfügung. Die Zylinderdrucksensoren werden entweder über einen Glühkerzenadapter oder eine Zylinderkopfbohrung integriert und können optional mit einer Wasserkühlung ausgestattet sein. Da sich der Zylinderdruck aufgrund der Brennraumgeometrie zyklisch ändert, muss auch die Kolbenposition mittels eines Winkellagegebers an der Kurbelwelle bestimmt werden. Anhand des gemessenen Zylinderdrucks und der dazugehörigen Winkellage kann der Zylinderdruckverlauf über den Kurbelwinkel dargestellt werden. Im Diagramm 5.5 wird ein gemessener Verlauf für Dieselkraftstoff und ein erwarteter Verlauf für ein Diesel-OME-Gemisch abgebildet. Die Messwerte für den Druckverlauf bezüglich des Dieselkraftstoffs wurden in Versuchsdurchführungen aus dem Jahr 2019 ermittelt. Der Motorbetriebspunkt entspricht dabei einem Drehmoment von 211 N m bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} und liegt damit ungefähr 20 % unter dem Volllastbetrieb. Der maximale Zylinderdruck von etwa 150 bar wird nach dem oberen Totpunkt bei ungefähr 377°KW erreicht.

Der Druckverlauf für ein Diesel-OME-Gemisch soll nachfolgend als Prognose verstanden werden. Aufgrund der geringeren Energiedichte wird der Zylinderdruck über den Verlauf abnehmen. Im Hochdruckbereich zwischen dem Ende der Verdichtung und dem Beginn der Expansion im Volllastbetrieb werden die Veränderungen sichtbar werden. Zudem wird die Schwerpunktlage der Verbrennung in Richtung des oberen Totpunkts verschoben, da der Verbrennungsprozess aufgrund der besseren Zündwilligkeit früher beginnt. Die geringere Energiedichte im Vergleich zum Dieselkraftstoff kann beispielsweise mit einer erhöhten Einspritzmenge über eine verlängerte Einspritzdauer kompensiert werden.

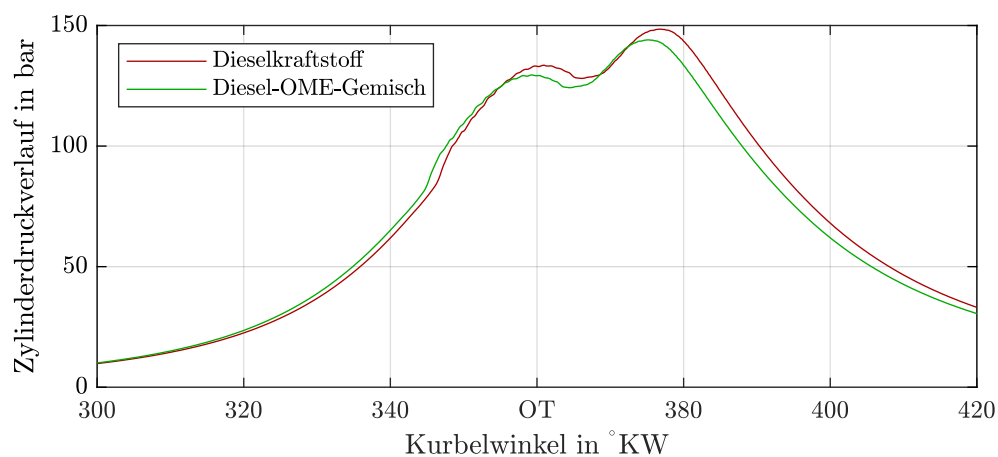


Diagramm 5.5: Zylinderdruckverlauf für Diesel- und Mischkraftstoff

5.3 Summenheizverlauf

Für weitere Untersuchungen und Analysen von Verbrennungsprozessen ist die Berechnung von Wärmeverläufen im Brennraum zielführend. Der Brennverlauf beschreibt dabei die Umsetzung der Kraftstoffenergie in Wärmeenergie über den Kurbelwinkel und setzt sich vereinfacht aus dem Heizverlauf abzüglich der Wärmeverluste zusammen. Der differentielle Brennverlauf wird demnach mit der Gleichung

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = \frac{dQ_H}{d\varphi} - \underbrace{\frac{dQ_W}{d\varphi}}_{\approx 0} \quad (14)$$

beschrieben. Für eine einfache Auswertung und eine erste Näherung wird auf die Berücksichtigung der Wandwärmeströme bewusst verzichtet und der Heizverlauf als Brennverlauf betrachtet. Ohnehin ist die Modellierung und Berechnung von Wärmeströmen über die Zylinderwand für instationäre Vorgänge eine Herausforderung. Eine weiterführende Untersuchung kann in der Berechnung der Wärmeverluste über empirische Ansätze liegen um einen hinreichend genauen Brennverlauf zu bestimmen. Der Heizverlauf kann hinsichtlich der Genauigkeit mittels verschiedener Ansätze berechnet werden. Als Berechnungsverfahren anhand des Zylinderdruckverlaufs hat sich dafür das Gesetz von HOHENBERG etabliert. Unter der Annahme, dass der Verbrennungsprozess über eine adiabate Volumenänderung und einer isochoren Wärmezufuhr erfolgt, kann der inkrementelle Heizverlauf mit der Gleichung

$$\Delta Q_H = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot V_z(\varphi_E) \cdot \left(p_z(\varphi_E) - p_z(\varphi_A) \cdot \left(\frac{V_z(\varphi_A)}{V_z(\varphi_E)} \right)^\kappa \right) \quad (15)$$

beschrieben werden. Der Isentropenexponent wird dabei mit den Stoffwerten für Luft in Form der spezifischen Gaskonstante sowie der spezifischen Wärmekapazität für ein konstantes Volumen über die Gleichungen

$$\kappa = 1 + \frac{R_L}{c_v} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{\kappa - 1} = \frac{R_L}{c_v} \quad (16)$$

definiert. Für eine weitere Vereinfachung der Berechnung wird die Annahme getroffen, dass die Stoffwerte konstant bleiben. Für die Berechnung des Heizverlaufs wird zudem das Zylindervolumen in Abhängigkeit der Kolbenposition benötigt. Das Zylindergesamtvolumen entspricht der Gleichung

$$V_z = V_c + V_h = V_c + A_K \cdot s_K(\varphi) \quad (17)$$

und setzt sich demnach aus dem konstanten Kompressions- und dem variablen Hubvolumen zusammen. Das Zylinderhubvolumen kann dabei als Produkt aus Querschnittsfläche des Kolbens und Position der Kurbelwelle über den Kolbenweg beschrieben werden. Der

kinematische Zusammenhang zwischen Kolben und Kurbelwelle wird über die Pleuelstange in Verbindung mit dem Kurbelzapfen hergestellt. Somit wird die translatorische Bewegung des Kolbens in eine rotatorische Bewegung der Kurbelwelle umgewandelt. Der Kolbenweg wird in Abhängigkeit des Kurbelwinkels mit der Gleichung

$$s_K(\varphi) = r \cdot (1 - \cos(\varphi)) + l \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \cdot \sin^2(\varphi)} \right) \quad (18)$$

unter Berücksichtigung des Kurbelradius und der Pleuellänge berechnet. Der Quotient aus Kurbelradius und Pleuellänge wird auch als Pleuelstangenverhältnis bezeichnet. Die numerische Integration des Heizverlaufs über den Kurbelwinkel mit der Gleichung

$$Q_H(\varphi) = \sum \Delta Q_H(\varphi) \cdot \Delta\varphi \quad (19)$$

ergibt schließlich den Summenheizverlauf. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, basiert der Verlauf für Dieselkraftstoff auf Messungen und der Verlauf für ein Diesel-OME-Gemisch auf Erwartungen. Ebenso bleibt der zuvor erwähnte Motorbetriebspunkt unverändert. Der Heizverlauf wird im Diagramm 5.6 und der Summenheizverlauf im Diagramm 5.7 dargestellt. Zudem sind beide Verläufe normiert um das Verhältnis und den Fortschritt der Energiefreisetzung hinsichtlich des Kurbelwinkels abzubilden. Als Normierung wird dabei der maximale und minimale Wert des Heizverlaufs herangezogen und die Differenz gebildet.

Anhand des Heizverlaufs wird deutlich, dass der Verbrennungsprozess mit einer Vor- und Haupteinspritzung stattfindet. Ebenso wie beim Zylinderdruckverlauf im Diagramm 5.5 tritt die Schwerpunktlage bei ungefähr 17°KW nach dem oberen Totpunkt auf. Somit wird die Korrelation von Energiefreisetzung und Zylinderdruck deutlich. Für maximale Werte um die Schwerpunktlage werden für 1°KW durchschnittlich etwa 5% der Kraftstoffenergie in Wärmeenergie umgesetzt. Anhand des Summenheizverlaufs wird die Umsatz- und Schwerpunktlage des Verbrennungsprozesses deutlich. Umsatzlagen von 5% oder 95% markieren schätzungsweise den Heizbeginn bzw. das Heizende. Eine Verbrennung gilt als abgeschlossen, wenn ungefähr 90% des Kraftstoffs in Wärme umgesetzt sind. Die Schwerpunktlage entspricht einem Umsatz von 50% und beschreibt gerade den Bereich mit der größten Energieumsetzung. Für Dieselkraftstoff stellt sich demnach eine Heizdauer von etwa 350°KW bis ungefähr 400°KW ein.

Der Summenheizverlauf für ein Diesel-OME-Gemisch soll wieder als eine Prognose verstanden werden. Aufgrund des hohen Sauerstoffgehalts und der damit einhergehenden besseren Verbrennung wird die Heizdauer verkürzt und die Umsatzlage für das Heizende früher erreicht. Mit einem früheren Heizbeginn und einer kürzeren Heizdauer kann eventuell auch der Wirkungsgrad des Verbrennungsprozesses verbessert werden. Zudem kann mit einer kurzen Heizdauer der Kraftstoff nahezu vollständig umgesetzt werden und somit die Schadstoffemissionen hinsichtlich der Kohlenwasserstoffe reduziert werden.

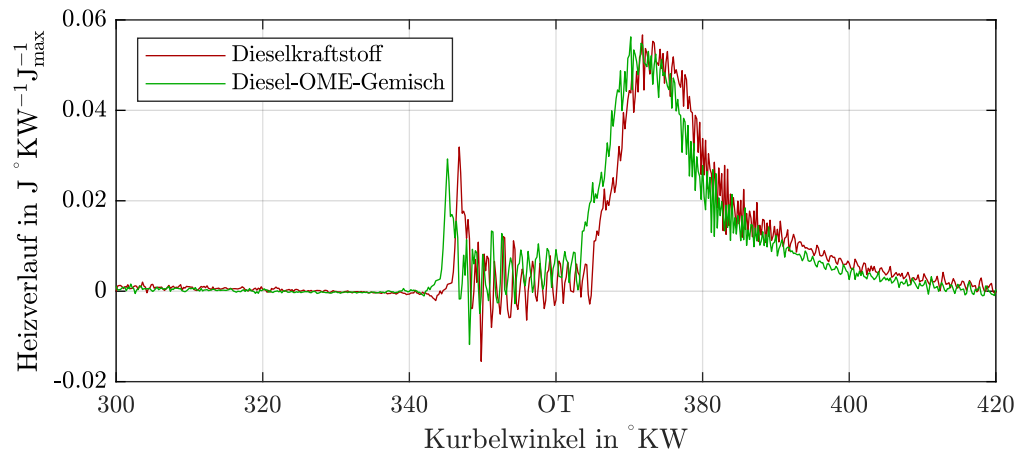


Diagramm 5.6: Heizverlauf für Diesel- und Mischkraftstoff

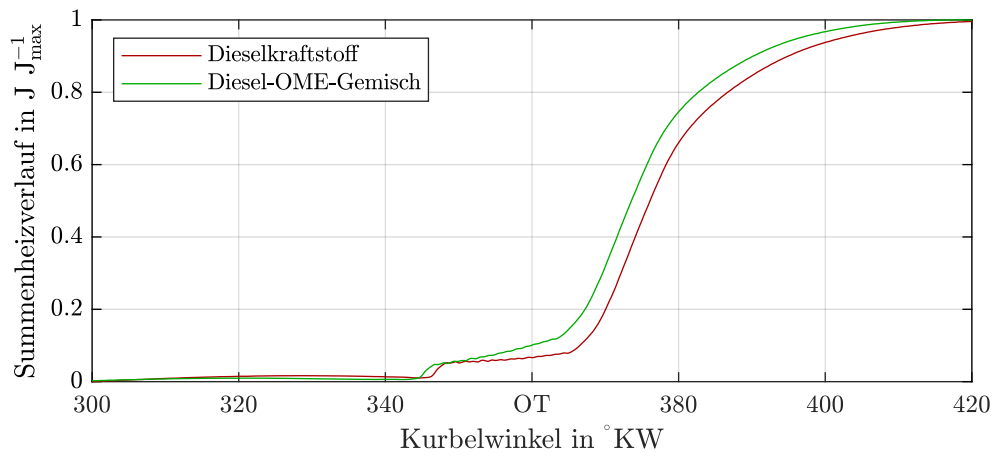


Diagramm 5.7: Summenheizverlauf für Diesel- und Mischkraftstoff

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kraftstoffinfrastruktur eines Motorenprüfstands für die Untersuchung alternativer synthetischer Kraftstoffe für Dieselmotoren erweitert. Dafür wurde der vollständige Leitungsverlauf vom Kraftstoffbehälter in der Maschinenhalle über die Messeinrichtung in der Prüfkabine bis zur Kraftstoffeinspritzung im Prüfmotor analysiert. Auf dieser Grundlage wurde ein Konzept zur Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur vorgestellt und mittels Berechnungen gezeigt, dass die Auslegung und die Funktion zweckmäßig sind. Für einen vorläufigen Testbetrieb zur Untersuchung eines OME-Kraftstoffs wurde vom Konzept abweichend eine Kraftstoffversorgung ausgeführt.

Als Kraftstoff ist besonders OME für einen dieselmotorischen Betrieb geeignet und für Versuchsdurchführungen zu empfehlen. Hinsichtlich der Schmierfähigkeit kann OME in Reinform ab der Ordnungszahl $n = 4$ eingesetzt werden. Einzig die Unverträglichkeit von OME-Kraftstoffen mit FKM-Materialien muss berücksichtigt werden. Methanol kann aufgrund seiner geringen Zündwilligkeit und ungenügenden Schmierwirkung nur als Kraftstoffzusatz genutzt werden. Mischungsverhältnisse mit Anteilen bis 14 Gew.% Methanol zum Mineralöldiesel sind vertretbar ohne Schäden an der Einspritzpumpe oder den -ventilen zu verursachen. OME₃₋₅ als bereits zur Verfügung stehender Testkraftstoff kann für einen Prüfstandbetrieb uneingeschränkte Anwendung finden, da besonders die Schmierfähigkeit die Anforderung an Dieselmotorkraftstoff übertrifft. Schäden an der kraftstoffgeschmierten Einspritzanlage können ausgeschlossen werden.

Der Zweck der Anlagenerweiterung sollte nicht einzig der Untersuchung von Methanol oder OME als Kraftstoffgemische hinsichtlich verbrennungsmotorischer Prozesse sowie der messtechnischen Analyse von Schadstoffemissionen dienen. Das Teilprojekt *READi-PtL* der Projektpartnerschaft *X-Energy* des hiesigen Departments für Verfahrenstechnik entwickelt derzeit ein eigenes Verfahren zur Herstellung nachhaltiger Kraftstoffe aus biologischen Abfällen wie beispielsweise Altöle oder -fette. Auch dieser PtL-Kraftstoff kann, sofern er in ausreichender Menge verfügbar ist, nach Prüfung seiner Eigenschaften untersucht werden. Um das Potenzial des Motorenprüfstands für die Untersuchung unterschiedlicher Kraftstoffe bzw. Kraftstoffgemische auszuschöpfen, ist eine Zusammenarbeit mit dem Labor für Kraftstoffanalytik des Departments für Verfahrenstechnik denkbar.

Der Inhalt dieser Arbeit soll nicht nur als Dokumentation zur Erweiterung der Kraftstoffinfrastruktur eines Motorenprüfstands verstanden werden. Vielmehr soll der Anreiz gegeben werden, Kraftstoffe auf ihre verbrennungsmotorische Effizienz und ökologische Verträglichkeit zu untersuchen und einem Vergleich zu unterziehen. Gerade die Suche nach umweltverträglichen Kraftstoffen muss das Ziel sein, sodass Verbrennungsmotoren zum Klima- und Umweltschutz beitragen können.

Literaturverzeichnis

Regelwerke

- [1] DIN EN 590:2017-10, *Kraftstoffe, Dieseldieselkraftstoff*, Anforderungen und Prüfverfahren.
- [4] DIN EN 15940:2019-10, *Kraftstoffe, Paraffinischer Dieseldieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren*, Anforderungen und Prüfverfahren.
- [5] DIN EN ISO 12156-1:2019-09, *Dieseldieselkraftstoff, Bestimmung der Schmierfähigkeit unter Verwendung eines Schwingungsverschleiß-Prüfgerätes (HFRR)*, Teil 1: Prüfverfahren (ISO 12156-1:2018).
- [8] DIN 73379:2014-07, *Straßenfahrzeuge, Kraftstoffschläuche*.

Fachbücher

- [9] WOLFGANG MAUS, Hrsg., *Zukünftige Kraftstoffe, Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel*, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, 2019.
- [10] FRANZ JOOS, *Technische Verbrennung, Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*, Springer, 2006.
- [11] GÜNTER P. MERKER u. a., Hrsg., *Grundlagen Verbrennungsmotoren, Funktionsweise und alternative Antriebssysteme, Verbrennung, Messtechnik und Simulation*, 9. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, 2019.
- [12] KAI BORGEEST, *Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren, Messungen am Motor, Abgasanalytik, Prüfstände und Medienversorgung*, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2020.
- [13] NIKOLAUS HELD, *Zylinderdruckbasierte Regelkonzepte für Sonderbrennverfahren bei Pkw-Dieselmotoren*, Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, Springer Vieweg, 2017.
- [14] KONRAD REIF, Hrsg., *Abgastechnik für Verbrennungsmotoren*, Bosch Fachinformation Automobil, Springer Vieweg, 2015.
- [15] KONRAD REIF, Hrsg., *Grundlagen Fahrzeug- und Motorentchnik*, Bosch Fachinformation Automobil, Springer Vieweg, 2017.

Fachartikel

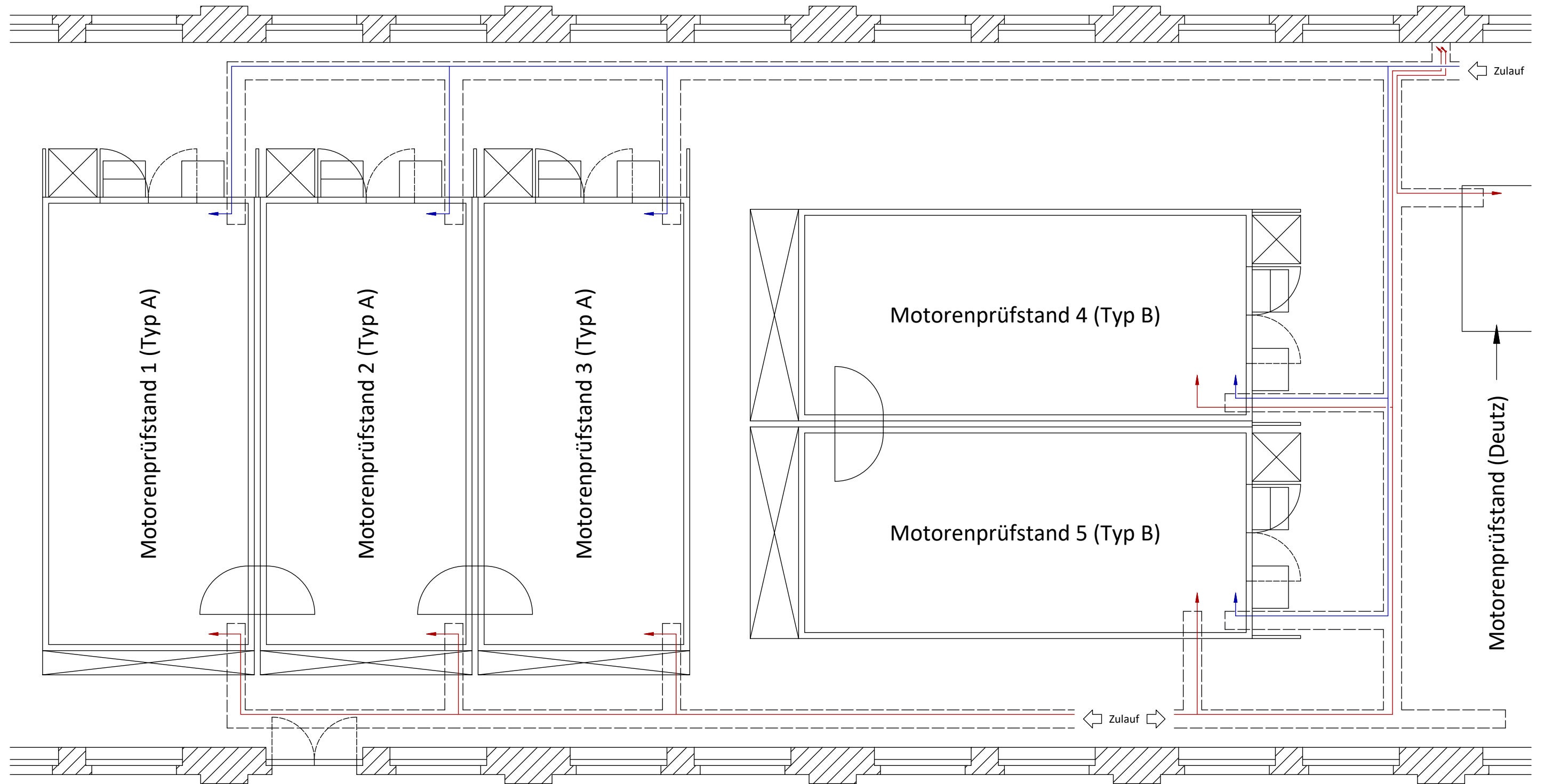
- [2] MARTIN HÄRTL u. a., „Oxymethylenether als potenziell CO₂-neutraler Kraftstoff für saubere Dieselmotoren, Teil 1: Motorenuntersuchungen“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78 (2017), S. 52–59.
- [3] AHMAD OMARI u. a., „Stromgenerierte Kraftstoffe für mobile Maschinen“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 79 (2018), S. 64–71.
- [6] HUBERT KUSZEWSKI u. a., „Lubricity of ethanol-diesel blends, Study with the HFRR method“, in: *FUEL - The Science and Technology of Fuel and Energy* 208 (2017), S. 491–498.
- [7] MARTIN HÄRTL u. a., „Synthetischer Dieseldieselkraftstoff OME1, Lösungsansatz für den Zielkonflikt NO_x-/Partikel-Emission“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 75 (2014), S. 68–73.
- [16] CHRISTIAN BARTSCH, „Synthetischer Dieseldieselkraftstoff als Weg in die Zukunft“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 65 (2004), S. 278–281.
- [17] NILS STEINBACH u. a., „Motorisches Potenzial von synthetischen Dieseldieselkraftstoffen“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 67 (2006), S. 96–102.
- [18] RICHARD BACKHAUS, „Alternative Kraftstoffe, CO₂-neutral in die Zukunft“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78 (2017), S. 8–15.
- [19] GUNNAR RICHTER u. a., „OME als Kraftstoffersatz im Pkw-Dieselmotor“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78 (2017), S. 66–73.
- [20] MARKUS MÜNZ u. a., „OME, Partikelbewertung unter Realfahrbedingungen“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 79 (2018), S. 16–21.
- [21] ALEKSANDAR DAMYANOV u. a., „Biogene Ether, Herstellung und Einsatz im dieselmotorischen Betrieb“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 80 (2019), S. 72–77.
- [22] OLIVER KASTNER u. a., „Einsatz von Dieselmischkraftstoffen zur Senkung der CO₂-Emissionen“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 80 (2019), S. 136–141.
- [23] FRANK URBANSKY, „Potenziale synthetischer Kraftstoffe“, in: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 81 (2020), S. 8–13.

Fachberichte

- [24] FORSCHUNG und TECHNIK ARAL AG, *Dieselmotoren, Anforderungen, Qualität, Perspektiven*, Aral AG, 2010.
- [25] SERVICE TRAINING VOLKSWAGEN AG, *Der 2,0l-TDI-Motor mit Common-Rail-Einspritzsystem, Konstruktion und Funktion*, Volkswagen AG, 2007.

Anhangsverzeichnis

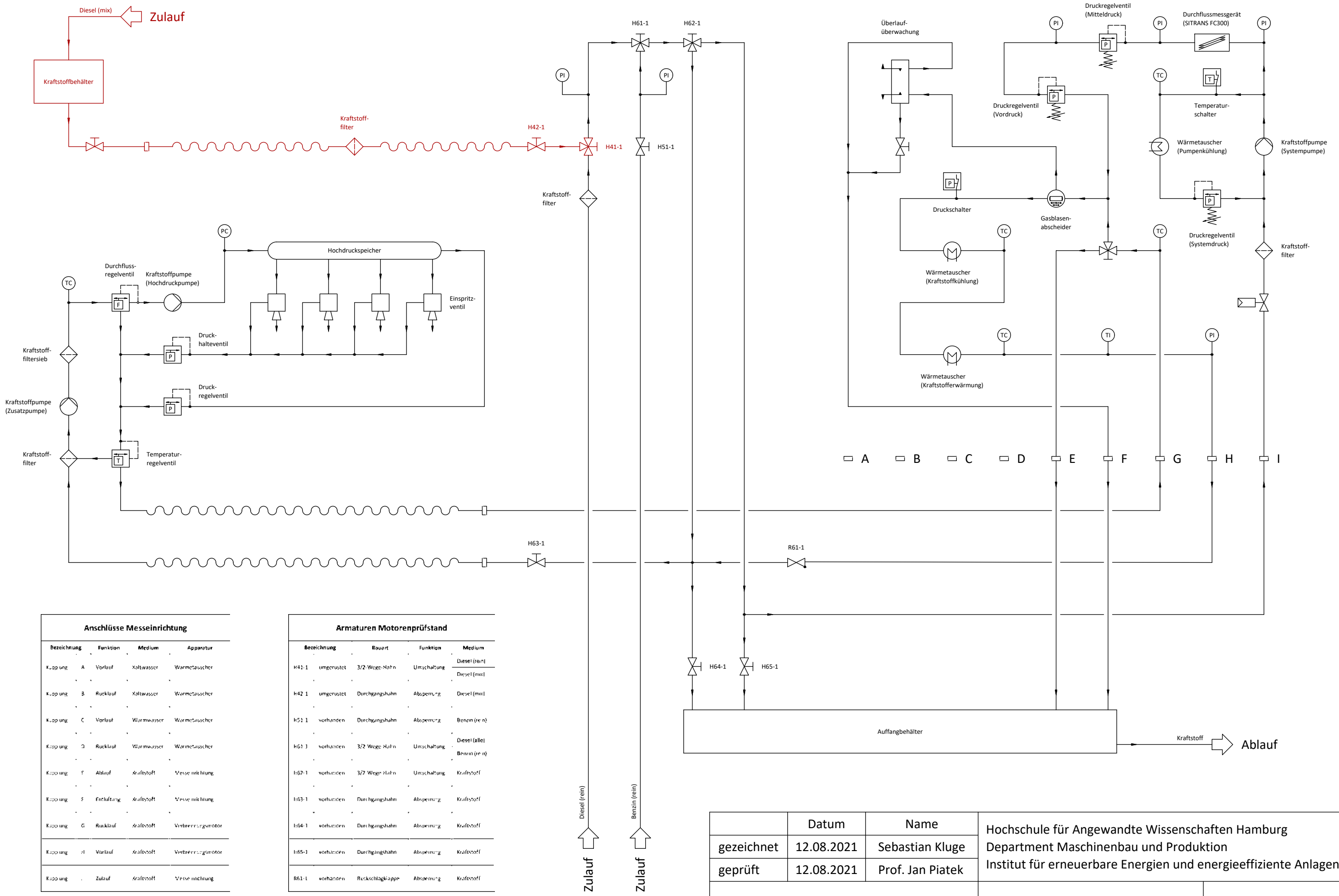
- | | | |
|-----|--------------------------------------|----------------------------------|
| [A] | Lagebeschreibung Kraftstoffleitungen | Kraftstoffversorgung Blatt 1 / 4 |
| [B] | Anlagenschema 1 Motorenprüfstand | Kraftstoffversorgung Blatt 2 / 4 |
| [C] | Prinzipskizze Anlagenerweiterung | Kraftstoffversorgung Blatt 3 / 4 |
| [D] | Anlagenschema 2 Motorenprüfstand | Kraftstoffversorgung Blatt 4 / 4 |



Diesel	—
Benzin	—

Typ A	Motoren PKW / NFZ
Typ B	Motoren LKW / BHKW

	Datum	Name	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Department Maschinenbau und Produktion Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen	
gezeichnet	12.08.2021	Sebastian Kluge		
geprüft	12.08.2021	Prof. Jan Piatek		
Kraftstoffversorgung			Lagebeschreibung Kraftstoffleitungen	Blatt 1 / 4



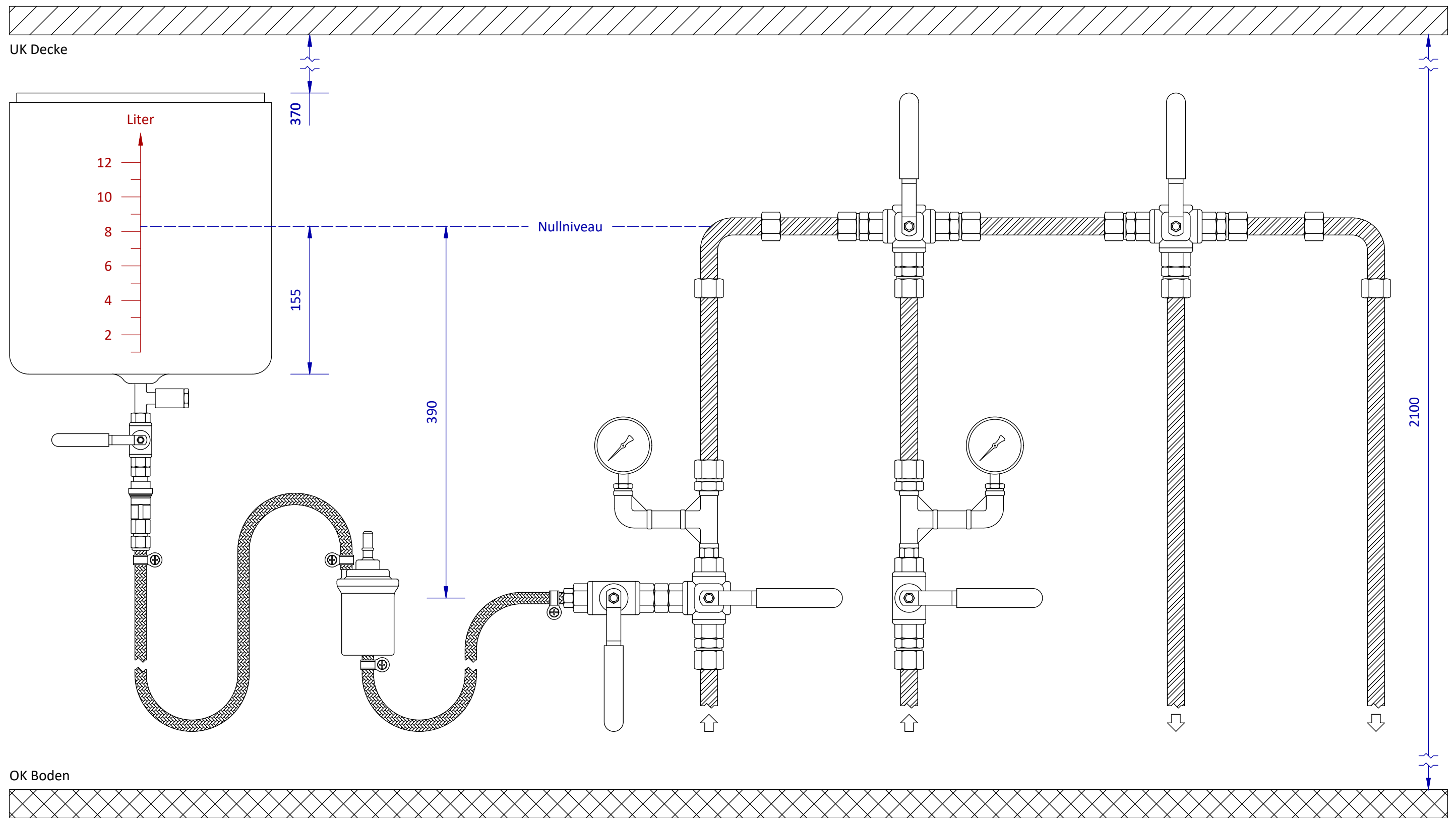
Anschlüsse Messeinrichtung			
Bezeichnung	Funktion	Medium	Apparatur
Kopplung A	Vorlauf	Kaltwasser	Wärmetauscher
Kopplung B	Rücklauf	Kaltwasser	Wärmetauscher
Kopplung C	Vorlauf	Warmwasser	Wärmetauscher
Kopplung D	Rücklauf	Warmwasser	Wärmetauscher
Kopplung E	Ablauf	Kraftstoff	Messeinrichtung
Kopplung F	Entlüftung	Kraftstoff	Messeinrichtung
Kopplung G	Rücklauf	Kraftstoff	Verbrennungsmotor
Kopplung H	Vorlauf	Kraftstoff	Verbrennungsmotor
Kopplung I	Zulauf	Kraftstoff	Messeinrichtung



Armaturen Motorenprüfstand			
Bezeichnung	Bauart	Funktion	Medium
H41-1	umgerüstet	3/2-Wege-Hahn	Umschaltung Diesel (rein) Diesel (mix)
H42-1	umgerüstet	Durchgangshahn	Absperrung Diesel (mix)
H51-1	vorhanden	Durchgangshahn	Absperrung Benzin (rein) Diesel (alle) Benzin (rein)
H61-1	vorhanden	3/2-Wege-Hahn	Umschaltung Kraftstoff
H63-1	vorhanden	Durchgangshahn	Absperrung Kraftstoff
H64-1	vorhanden	Durchgangshahn	Absperrung Kraftstoff
H65-1	vorhanden	Durchgangshahn	Absperrung Kraftstoff
R61-1	vorhanden	Reschlagklappe	Absperrung Kraftstoff

	Datum	Name	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Department Maschinenbau und Produktion Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen
gezeichnet	12.08.2021	Sebastian Kluge	
geprüft	12.08.2021	Prof. Jan Piatek	

Kraftstoffversorgung

Anlagenschema 1 Motorenprüfstand



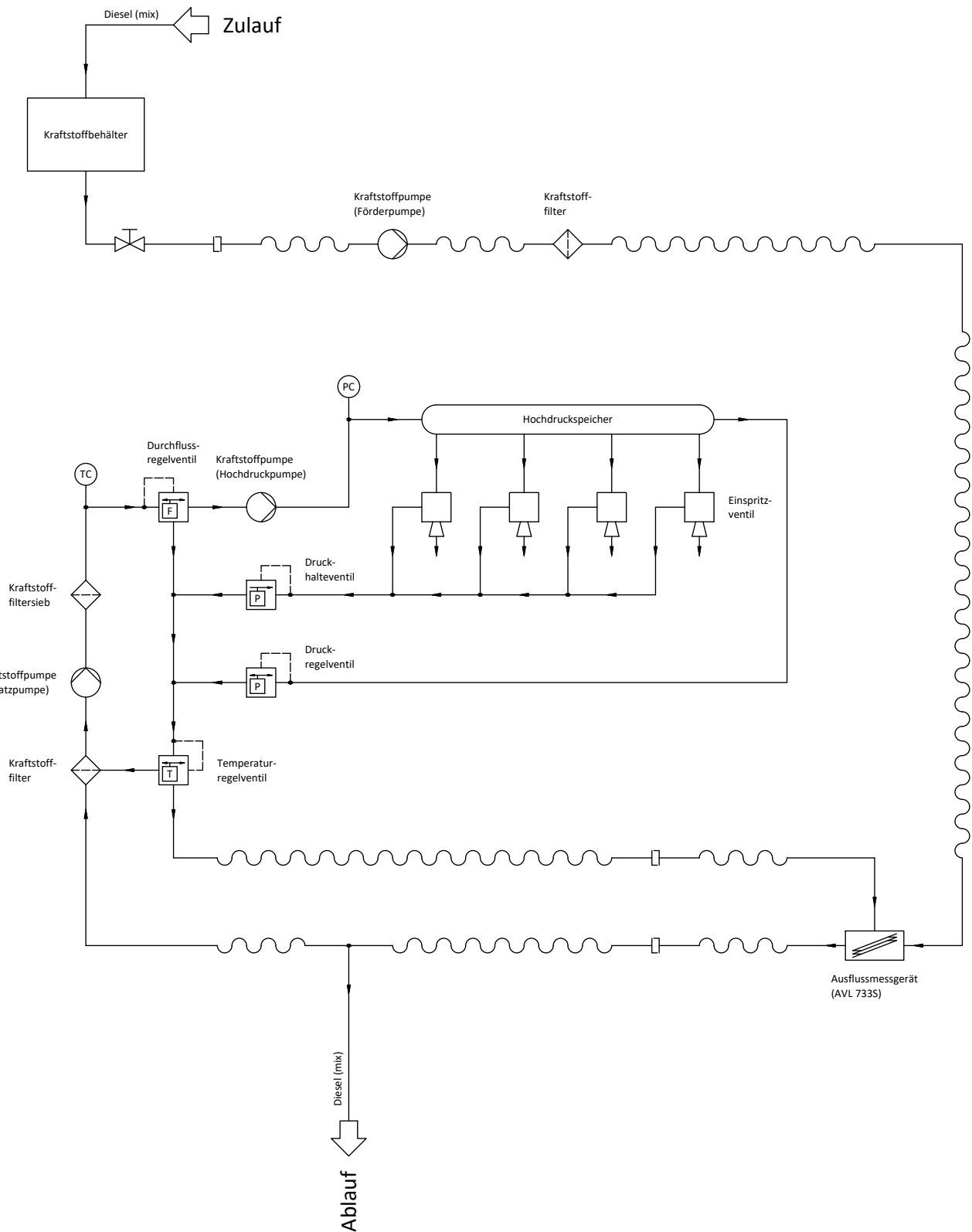
Rohrleitung	
Schlauchleitung	

	Datum	Name	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Department Maschinenbau und Produktion Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen
gezeichnet	12.08.2021	Sebastian Kluge	
geprüft	12.08.2021	Prof. Jan Piatek	

Kraftstoffversorgung

Prinzipskizze
Anlagenerweiterung

Blatt 3 / 4



	Datum	Name	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Department Maschinenbau und Produktion Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen	
gezeichnet	12.08.2021	Sebastian Kluge		
geprüft	12.08.2021	Prof. Jan Platek		
Kraftstoffversorgung			Anlagenschema 2 Motorenprüfstand	Blatt 4 / 4



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden. Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann – auch nachträglich – zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Kluge

Vorname: Sebastian

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Prüfstandserweiterung zur Untersuchung alternativer synthetischer Kraftstoffe für Dieselmotoren

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original