



Tobias Mink

Analyse der Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen am Ottomotor mit Direkteinspritzung

λογος

Antriebe in der Fahrzeugtechnik

Band 3

Antriebe in der Fahrzeugtechnik

Band 3

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik

Tobias Mink

Analyse der Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen am Ottomotor mit Direkteinspritzung

Logos Verlag Berlin



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>). Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z.B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.



Logos Verlag Berlin GmbH 2024
ISBN 978-3-8325-5796-6
ISSN 2941-4326

Logos Verlag Berlin GmbH
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10,
12681 Berlin
Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90
Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92
<https://www.logos-verlag.de>

Analyse der Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen am Ottomotor mit Direkteinspritzung

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. Tobias Mink

aus Schwetzingen

D 386

Kaiserslautern 2023

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Roland Ulber
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Eingereicht am:	24.02.2023
Mündliche Prüfung:	17.07.2023

Vorwort des Herausgebers

Zukünftige Technologien für Fahrzeugantriebe sind heute vielfach Gegenstand von Diskussionen, die oft mit großer Leidenschaft geführt werden. Die vorliegende Schriftenreihe des Lehrstuhls für Antriebe in der Fahrzeugtechnik der RPTU Kaiserslautern-Landau möchte objektive, wissenschaftlich fundierte Einblicke in den aktuellen Stand der Forschung und Ausblicke auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugantriebe bieten. Für die schnelle Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnis in praktische Anwendungen sind der Austausch mit anderen Forschern und Entwicklern sowie der erfolgreiche Transfer in die Industrie von besonderer Bedeutung. Neben Vorträgen auf Fachtagungen und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften soll hierzu auch diese Schriftenreihe einen Beitrag leisten.

Im Mittelpunkt aktueller Antriebsforschung stehen einerseits besonders schadstoffarme bzw. emissionsfreie Antriebstechnologien und andererseits die Minimierung des CO₂-Ausstoßes über den Produktlebenszyklus. Zukunftsfähige Antriebe müssen beiden Anforderungen gerecht werden. Mit dieser Zielsetzung ergibt sich ein äußerst weiter Lösungsraum für zukünftige Antriebe, der von den gegenwärtig vieldiskutierten batterieelektrischen Antrieben über Brennstoffzellen-elektrische Konzepte bis hin zu verbrennungsmotorischen Lösungen mit regenerativen Kraftstoffen reicht. Noch weiter gehende Gestaltungsmöglichkeiten bieten hybride Antriebskonzepte, beispielsweise durch die Kombination des Hauptantriebs mit weiteren elektrischen, hydraulischen oder pneumatischen Speichern und Antriebskomponenten, ggf. auch für Nebenantriebe.

Im Bereich der Antriebsforschung ist sich die Wissenschaft mittlerweile einig, dass es absehbar nicht „die“ eine einzige und universell anwendbare, ideale Antriebslösung für alle Anwendungen geben wird. Vielmehr ist es wichtig, für jede Antriebsaufgabe die jeweils optimale Lösung zu finden, welche einerseits die technischen Anforderungen des anzutreibenden Fahrzeugs bzw. Arbeitsgeräts zufriedenstellend erfüllt und andererseits den minimal möglichen Einfluss auf die Umgebung nimmt – sowohl im Hinblick auf die Schadstoffemissionen als auch hinsichtlich des Ausstoßes klimaschädlicher Gase. Erklärtes Ziel ist hierbei „zero impact“ – die Konzentrationen der potenziell kritischen Spezies im Abgas sollen auf dem Niveau des Hintergrunds bzw. darunter liegen. Bei Verbrennungsmotoren ist hierfür neben einer hochwirksamen Abgasnachbehandlung insbesondere die Vermeidung der Emissionsbildung bereits an der Quelle, also beim Verbrennungsprozess, von zentraler Bedeutung.

In diesem Kontext beschäftigt sich Herr Mink im Rahmen seiner vorliegenden Dissertation detailliert mit der Partikelbildung bei der Verbrennung in modernen Ottomotoren mit Turboaufladung und Direkteinspritzung sowie deren Wechselwirkung mit Ölemissionen, die durch den ungewollten Eintrag von Schmieröl in den motorischen Prozess entstehen. Zur detaillierten Analyse der Zusammenhänge zwischen den beiden Emissionsarten war zunächst eine neue, an die Fragestellung angepasste Methodik zu entwickeln, die in der vorliegenden Arbeit eingeführt wird. Die Untersuchungen wurden sowohl mit konventionellen als auch mit synthetischen Kraftstoffen durchgeführt, die stellvertretend für mögliche zukünftige Ottokraftstoffe stehen. Neben stationären Betriebspunkten werden auch repräsentative dynamische Manöver aus Realfahrten am Prüfstand nachgestellt, die hinsichtlich der Partikelemission Auffälligkeiten zeigten. Durch die systematische Anwendung der entwickelten Methodik gelingt es Herrn Mink, die Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen in Wechselwirkung mit dem Kraftstoff nachzuweisen sowie kritische Betriebssituationen zu identifizieren und zu charakterisieren. Mithilfe der neuen Analysemethodik und der erweiterten Kenntnis der Zusammenhänge wird somit für zukünftige Entwicklungen eine gezielte Optimierung der Partikelrohmission im Sinne des übergeordneten Ziels „zero impact“ ermöglicht.

Kaiserslautern, im Dezember 2023

Michael Günthner

Vorwort

Während meiner Tätigkeit bei der Firma Automobil-Prüftechnik Landau (APL) GmbH durfte ich viele verschiedene Motortypen hinsichtlich Partikel- und Ölemissionen untersuchen und optimieren. Die vorliegende Arbeit entstand als Extrakt der beobachteten Phänomene und Zusammenhänge bezüglich Partikel- und Ölemissionsverhalten der unterschiedlichen Motoren.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Günthner für die Betreuung meiner Dissertation sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Spicher für die Übernahme des Korreferats. Die Diskussionen und Anmerkungen haben mich fachlich mit neuen Denkansätzen unterstützt und die wissenschaftliche Ausarbeitung präzisiert. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Gesellschaftern und der Geschäftsführung der Firma APL GmbH danke ich für die Bereitstellung der Ressourcen zur Durchführung der Untersuchungen. Hierbei möchte ich mich insbesondere bei Herrn Dr. Hermann Josef Scholl und Herrn Christian Lensch-Franzen bedanken.

Weiterhin möchte ich meinen Kollegen bei der APL GmbH Danke sagen. Herr Dr.-Ing. Marcus Gohl hat mich mit vielen fachlichen Diskussionen und Fragestellungen gefordert und unterstützt. Martin Schäfer und Alexander Ebel haben mir im täglichen Austausch viele Hinweise gegeben und mögliche Lösungswege aufgezeigt. Außerdem danke ich allen Mitarbeitern, die mich am Prüfstand und bei der Anwendung der Messtechnik unterstützt haben, insbesondere Mathias Braun.

Zuletzt möchte ich meine tiefste Dankbarkeit meiner Familie ausdrücken. Meinen Eltern danke ich, dass sie mich auf meinem Weg unterstützt und gefördert haben. Meiner Frau Fabienne danke ich von ganzem Herzen für die kontinuierliche Motivation, den zeitlichen Verzicht und den bedingungslosen Rückhalt.

Offenbach an der Queich, im Dezember 2023

Tobias Mink

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht die Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Dabei werden die Entstehungsmechanismen der Partikelemission bezüglich mechanischer Einflüsse aus der Kolben-Gruppe und auch der Gemischbildungsparameter wie Kraftstoff und Einspritzung analysiert, um die Ursachen der Partikelemission zu identifizieren und daraus Optimierungsmaßnahmen an Motoren ableiten zu können. Der methodische Ansatz beinhaltet eine Versuchsführung mit stationären und dynamischen Messungen, insbesondere auch Ausschnitte aus Realfahrzyklen zur Abbildung zukünftiger Emissionsanforderungen an den Verbrennungsmotor. Für die zeitlich aufgelöste Messung zur Analyse der Dynamikvorgänge wird eine Kombination aus einem Kondensationspartikelzähler und einem Elektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung sowie einem Time-of-Flight-Massenspektrometer zur Messung der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe aus dem Öl eingesetzt. Die zusätzliche Information der Massenzusammensetzung im Rohabgas wird für verschiedene Kurbelgehäuse- und Saugrohrdrücke bei Schub-Last-Wechseln und Einspritzvariationen im stationären Motorbetrieb genutzt und detailliert analysiert. Hierfür wird eine Auswertemethodik entwickelt, um Einflüsse des Motoröls und der Gemischbildung auf die Partikelemission zu bewerten.

Abstract

This work examines the correlation between oil and particle emissions on a turbo-charged gasoline engine with direct injection. The formation mechanisms of particle emission with regard to mechanical influences from the piston group and also mixture formation parameters such as fuel and injection timing are analysed in order to identify the root cause of the particle emission and to be able to define optimization measures for engines to reduce particle emissions. The methodological approach includes investigations based on steady state and dynamic measurements, in particular also segments from real driving cycles in order to meet future emission requirements for the internal combustion engine. The time-resolved measurement is used to analyse the dynamic processes, a combination of a condensation particle counter, an electrometer to determine the particle size distribution and a time-of-flight mass spectrometer to measure the low-volatility hydrocarbons from the oil are used. The additional information of the mass composition in the raw exhaust gas is used for several crankcase and intake air pressure variations in coasting-load-cycles and start of injection variations in steady state engine operation, and further analysed in detail. For this purpose, an evaluation methodology is developed to identify the effects of engine oil and the mixture formation on the particle emission.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	III
Vorwort	V
Kurzfassung	VI
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	VIII
Formelzeichen und Abkürzungen.....	X
Formelzeichen.....	X
Abkürzungen.....	XII
1 Einleitung – Problemstellung und Motivation.....	1
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Grundlagen zu Partikelemissionen	5
2.1.1 Charakterisierung und Beschaffenheit von Partikeln	5
2.1.2 Rußbildung.....	7
2.1.3 Partikeldynamik und Transformation.....	9
2.1.4 Motorische Einflussparameter auf Partikelemissionen	11
2.2 Grundlagen zu Ölemissionen.....	15
2.2.1 Definition der Begriffe Schmiermittelbilanz, Ölverbrauch und Ölemission.....	15
2.2.2 Ölverbrauchs- und Öltransportmechanismen.....	16
2.2.3 Motorische Einflussparameter auf die Ölemissionen	23
2.3 Chemische und physikalische Eigenschaften der Betriebsstoffe	25
2.3.1 Motoröl	25
2.3.2 Kraftstoff	26
2.4 Wesentliche bekannte Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen...29	
3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen.....	34
3.1 Wirkmechanismen und Einflussparameter auf die Öl- und Partikelemissionen..34	
3.1.1 Zusammenfassung und Strukturierung der Einflussparameter	34

3.1.2 Kohlenwasserstoffeintrag in den Brennraum und Partikelentstehung.....	34
3.2 Messtechnikkombination zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen	37
3.2.1 Ölemission mittels Time-of-Flight-Massenspektrometer	37
3.2.2 Partikelanzahlmessung mittels Kondensationspartikelzähler.....	39
3.2.3 Messung der Partikelgrößenverteilung mittels Elektrometer	41
3.2.4 Diskussion der Messtechnikkombination.....	42
3.3 Konzeption der Versuchsführung.....	43
3.4 Zielsetzung und Anwendungsmöglichkeiten.....	44
4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen	46
4.1 Versuchsrandbedingungen.....	46
4.2 Betrachtung des quasistationären Verhaltens im unbefeuerten Schubbetrieb	47
4.3 Analyse der dynamischen Emissionen bei Schub-Last-Wechseln	53
4.4 Einfluss der Gemischbildung im stationären Motorbetrieb.....	65
4.5 Kraftstoffvariation im hochdynamischen RDE-Ausschnitt	70
5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen.....	77
5.1 Vergleich der Massenspektren	77
5.2 Definition von Massenspektren des Motoröls und der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe	81
5.3 Korrelation der massenbandgeschnittenen Spektren und der Partikelemissionen	82
5.3.1 Bewertung des Einflusses der Gemischbildung (Variation des Einspritzbeginns) im stationären Motorbetrieb	87
5.3.2 Variation des Kurbelgehäuse- und Saugrohrdrucks bei Schub-Last-Wechseln	89
6 Gesamthafte Diskussion der Ergebnisse und Bewertung	93
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	98
A Abbildungsverzeichnis	100
B Tabellenverzeichnis.....	103
C Literaturverzeichnis.....	104
D Lebenslauf.....	117

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
r_{XY}	-	Korrelationskoeffizient
$EW_{(norm)}$	1/cm ³ , Counts	(Normierter) Emissionswert bezogen auf den Referenzsaugrohrdruck
LM	kg/h	Luftmassenstrom
\dot{n}	min ⁻¹ /s	Drehzahlgradient
\dot{ped}	%/s	Pedalwertgradient
s_X	-	Standardabweichung von X
s_{XY}	-	Kovarianz von X und Y
s_Y	-	Standardabweichung von Y
θ	-	PAK-zu-Öl-Massenverhältnis
λ	-	Luft-Kraftstoff-Verhältnis, Luftverhältnis
ρ	kg/m ³	Dichte
ESB	°KWvZOT	Einspritzbeginn
Ölemission	Counts	Signal aus dem Time-of-Flight-Massenspektrometer mit Hochpassfilterung im Massenbereich 170-550 m/z
Ölemission _{kum,max}	Counts	Maximaler kumulierter Wert des Signals aus dem Time-of-Flight-Massenspektrometer mit Hochpassfilterung im Massenbereich 170-550 m/z
MS	Counts	Signal aus dem Time-of-Flight-Massenspektrometer
Md	Nm	Drehmoment

PN_{CPC}	$1/cm^3$	Partikelanzahlkonzentration aus dem Kondensationspartikelzähler
$PN_{CPC,kum,max}$	$1/cm^3$	maximaler kumulierter Wert der Partikelanzahlkonzentration aus dem Kondensationspartikelzähler
PN_{DMS}	$dN/dLogDp/cm^3$	Partikelkonzentration aus dem Cambustion DMS500
$PN_{DMS,Akku}$	$1/cm^3$	Partikelanzahlkonzentration des Akkumulationsmodus aus dem Cambustion DMS500
$PN_{DMS,Akku,kum,max}$	$1/cm^3$	maximaler kumulierter Wert der Partikelanzahlkonzentration des Akkumulationsmodus aus dem Cambustion DMS500
$PN_{DMS,Nukl}$	$1/cm^3$	Partikelanzahlkonzentration des Nukleationsmodus aus dem Cambustion DMS500
$PN_{DMS,Nukl,kum,max}$	$1/cm^3$	maximaler kumulierter Wert der Partikelanzahlkonzentration des Nukleationsmodus aus dem Cambustion DMS500
$PN_{DMS,Total}$	$1/cm^3$	Partikelanzahlkonzentration aus dem Cambustion DMS500
$PN_{DMS,Total,kum,max}$	$1/cm^3$	maximaler kumulierter Wert der Partikelanzahlkonzentration aus dem Cambustion DMS500
ROZ	-	Research Oktan Zahl
n	min^{-1}	Drehzahl
p_{KGH}	mbar	Kurbelgehäusedruck, relativ
p_{Saug}	mbar	Saugrohrdruck, absolut
ped	%	Pedalwert
p_{mi}	bar	innerer Mitteldruck

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CVS	Constant Volume Sampling; Probenahme für konstantes Volumen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMC	Dimethylcarbonat
DMS	Differential Mobility Spectrometer; Spektrometer zur Analyse der Teilchenmobilität
DMS500	Differential Mobility Spectrometer von Cambustion
D _p	Äquivalentdurchmesser
E10	Kraftstoff mit 10 Volumen-% Ethanol-Anteil
E70	verdampfte Kraftstoffmenge in % bei der Temperatur 70 °C aus dem Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405
E100	verdampfte Kraftstoffmenge in % bei der Temperatur 100 °C aus dem Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405
E150	verdampfte Kraftstoffmenge in % bei der Temperatur 150 °C aus dem Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405
EN	Europäische Norm
ET	Evaporation Tube; Verdampfungsröhre
EU5	Abgasnorm EU5
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.
HEPA	High Efficiency Particulate Air Filter
HOM1	Einfacheinspritzung, homogen

HOM2	Zweifacheinspritzung, homogen
HSP2	Zweifacheinspritzung, homogen-split
HTHS	High Temperature High Shear
INSOL	insoluble organic fractions; nicht-lösliche, organische Bestandteile
ISO	International Organisation for Standardization; Internationale Organisation für Normung
KV100	kinematische Viskosität bei 100°C
KW	Kurbelwinkel
KWvZOT	Kurbelwinkel vor Zünd-OT (oberer Totpunkt)
LIF	laserinduzierte Fluoreszenz
LOT	Ladungswechsel-OT (oberer Totpunkt)
MeFo	Methylformiat
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OH	Hydroxyl
OPF	Otto-Partikelfilter
OT	oberer Totpunkt
PAK	polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasseemission
PM _{2,5}	feine Partikel, Durchmesser $D_p < 2,5 \text{ }\mu\text{m}$
PM ₁₀	grobe Partikel, Durchmesserbereich $2,5 < D_p < 10 \text{ }\mu\text{m}$
PN	Partikelanzahlemission
PNC	Particle Number Counter; Partikelzähler
PND ₁	erste Verdünnungsstufe im AVL Particle Counter 489 Advanced

Formelzeichen und Abkürzungen

PND ₂	zweite Verdünnungsstufe im AVL Particle Counter 489 Advanced
RDE	Real Driving Emissions; Realfahrtemissionen
SOF	soluble organic fractions; lösliche organische Bestandteile
TOF-MS	Time-of-Flight-Massenspektrometer; Flugzeit-Massenspektrometer
UT	Unterer Totpunkt
VOF	volatile organic fractions; flüchtige organische Bestandteile
VPR	Volatile Particle Remover; Abscheider für flüchtige Anteile
WLTC	Worldwide-harmonized Light-Duty Test Cycle
ZOT	Zünd-OT

1 Einleitung – Problemstellung und Motivation

Die gesteigerte gesellschaftliche und mediale Fokussierung auf das Thema Emissionen im Mobilitätsbereich - insbesondere im Zusammenhang mit Verbrennungsmotoren - zeigt, dass die Sensibilität diesbezüglich deutlich zunimmt. Der rein verbrennungsmotorische Antrieb muss sich zukünftig gegen weitere Konzepte wie hybride, rein batterieelektrische oder Brennstoffzellen-elektrische Antriebe behaupten [1]. Parallel schränken die Gesetzgeber weltweit die Abgasemissionen, wie Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Partikelmasse und Partikelanzahl weiter ein und erweitern den Prüfbereich [2]. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Abgasschadstoffemissionen wurden in verschiedenen Studien nachgewiesen [3, 4]. In Bezug auf den Ottomotor haben sich die Partikelanzahlemissionen als besonders kritisch herausgestellt [5]. Abbildung 1.1 zeigt die Eindringtiefe unterschiedlicher Partikelgrößen in die Atemwege. Feinstaub (PM_{10}) kann bis zum Kehlkopf beziehungsweise bis zur Luftröhre eingeatmet werden. Lungengängiger Feinstaub ($PM_{2,5}$) erreicht die Bronchiolen in der Lunge, Partikel $< 1 \mu m$ gelangen bis in die Lungenbläschen oder zum Teil in die Blutbahn. Eine Feinstaubexposition kann je nach Dauer zu Atemwegserkrankungen wie Bronchitis führen oder Asthma verstärken. Zusätzlich kann eine erhöhte Belastung des Herz-Kreislaufsystems auftreten, was zu erhöhtem Herzinfarktrisiko führen kann. Außerdem können sich an Rußpartikel polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) anlagern, die toxische Wirkung haben und Krebs verursachen können [6 bis 14].

Seit September 2017 werden die Emissionen zusätzlich auf der Straße unter realen Fahrbedingungen [15, 16] ermittelt, nicht wie bisher ausschließlich im Profil des „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) auf dem Rollenprüfstand. Weiterhin wurde der neue Zyklus „Worldwide harmonized Light-Duty Test Cycle“ (WLTC) eingeführt, der den NEFZ weitestgehend ersetzt. Der WLTC besitzt nicht mehr die ausgeprägte synthetische Charakteristik eines NEFZ mit relativ geringen Gradienten bezüglich Last und Drehzahl. Die Fahrprofile unter Realfahrtbedingungen (Real Driving Emissions, RDE) weisen eine gesteigerte Dynamik auf, da diese im Vergleich zum NEFZ und WLTC nochmals bezüglich Last- und Drehzahlgradienten verschärft sind [17, 18]. Blei et al. [19] beobachteten durch eine gesteigerte Fahrdynamik im WLTC einen signifikanten Einfluss auf das Emissionsniveau sowie einen starken Anstieg der Partikelanzahlemission. Zinola et al. [20] und Heinz et al. [21] identifizieren ebenso starke Beschleunigungen als Quelle für hohe Partikelemissionen. Beim Vergleich des NEFZ mit einem RDE-Zyklus wurde festgestellt, dass mit der Fahrdynamik der Partikelanzahlstoß ansteigt [19]. In den von Blei et al. [19] untersuchten Zyklen liegt zwischen NEFZ und RDE-Zyklus ein Faktor 3 in der Partikelanzahlemission. Hierdurch entstehen für die

1 Einleitung – Problemstellung und Motivation

Motorenentwickler neue Herausforderungen, da die Einhaltung der Emissionsvorgaben unter allen möglicherweise vorkommenden dynamischen Randbedingungen gewährleistet werden muss.

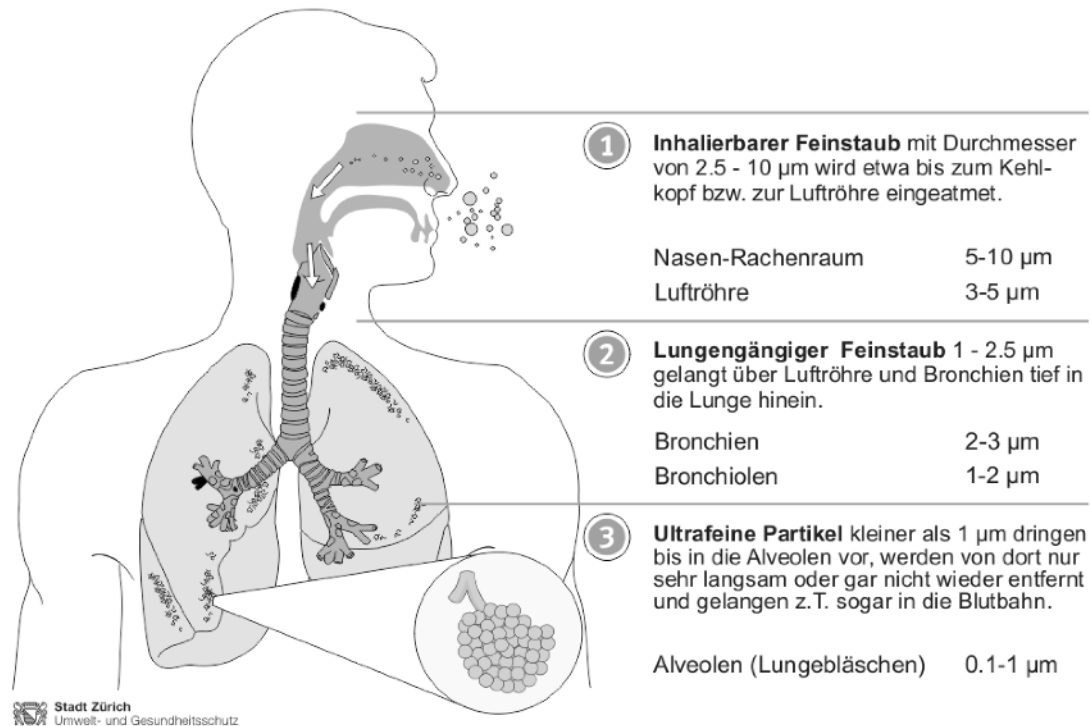


Abbildung 1.1: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikel in den menschlichen Organismus [11]

Die europäische Kommission hat in ihrem Arbeitsprogramm Horizon 2020 die weitere Reduktion der Partikelemissionen aufgegriffen und über Förderprogramme die Entwicklung von RDE-fähiger Partikelmesstechnik sowie für Nanopartikel bis zu 10 nm angestoßen, im Unterschied zur bisherigen Limitierung der Partikelanzahl, die eine untere Grenze von 23 nm vorsieht [22 bis 27]. Durch Optimierungsmaßnahmen am Brennverfahren wurden bereits bei der Umstellung von Euro 5- auf Euro 6-Konzepte die Partikelemissionen deutlich reduziert [28]. Grundlegend entstehen an den Gemischbildungskomponenten Probleme durch unterschiedliche Systemträgheiten. Der mit hohen Drücken arbeitende Kraftstoffpfad kann eine hohe Dynamik abbilden, jedoch zeigt sich gerade bei Downsizing-Motoren mit Turbo-Aufladung eine höhere Trägheit der Luftbeimessung. Ziel der Auslegung und Bedatung der Gemischbildungskomponenten bei Ottomotoren ist es, den stöchiometrischen Motorbetrieb auch unter hochdynamischen Betriebspunktwechseln sicherzustellen [29, 30]. Beispielsweise wurden von Tan et al. Untersuchungen bei Lastsprüngen von 5 % auf 15 % Last bei 1500 min^{-1} durchgeführt, wobei der Lambda-regler kein stöchiometrisches Gemisch im transienten Betrieb halten konnte [31]. Transiente Phasen und deren applikative Bedatung, wie Einspritzzeiten

und Ladungsbewegung, haben nach Bertsch einen großen Einfluss auf die Partikelemissionen [32]. Das gesteigerte Dynamikprofil im WLTC und unter RDE-Randbedingungen erfordert somit weitere Arbeit an der Systemabstimmung. Etliche Automobilhersteller haben zusätzlich Partikelfilter als Abgasnachbehandlungssystem bereits im Serienproduktionsprozess etabliert oder planen deren flächendeckende Einführung für einen Großteil der ottomotorischen Antriebe [33 bis 35]. Generell zeigen die Untersuchungen von Giechaskiel et al. [36], dass Fahrzeuge mit Partikelfilter die gesetzlichen Vorgaben einhalten können. Die Filtrationsraten der Ottopartikelfilter (OPF) weisen je nach Laufzeit relativ hohe Abscheidegrade von bis zu 99 % auf [37]. Es ergibt sich jedoch ein Zielkonflikt - insbesondere bei neuen Bauteilen - aus Filtrationsrate (im neuen Zustand) und Abgasgedruck [38 bis 40]. Eine Steigerung des Abgasgedrucks ist aufgrund des daraus folgenden Kraftstoffverbrauchsanstiegs unter dem seit 2022 geltenden Ziel von 95 g CO₂/km für die Neuwagenflotte nicht erwünscht [41]. Hieraus lässt sich die Anforderung einer maximal möglichen Reduzierung der Partikelanzahl-Rohemissionen ableiten [42, 43].

Bisherige Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte legen in Bezug auf Partikelemissionen hauptsächlich den Fokus auf Gemischbildungsmaßnahmen, wie die Anpassung der Einspritzdrücke, der Einspritzstrategie oder der Optimierung der Injektoren [32, 44 bis 47]. Einflüsse und Zusammenhänge zwischen Partikel- und Ölemissionen werden in einigen Arbeiten bei Dieselmotoren in Bezug auf die Partikelmasse untersucht und nachgewiesen. Zu Ottomotoren und dem Einfluss des Motoröls auf die Partikelanzahlmissionen gibt es in bisherigen Untersuchungen erste Vermutungen und Hinweise [44, 48 bis 50]. Mechanische Komponenten, wie Kurbelgehäuseentlüftung und das System „Kolben-Kolbenringe-Zylinderlaufbahn“ können somit einen weiteren Stellhebel zur Emissionsminderung darstellen. Untersuchungen an einem Motor mit Wasserstoffbetrieb zeigen teilweise hohe Partikelemissionen, die auf das Motoröl zurückzuführen sind [51]. Während des Entwicklungsprozesses und der Systemoptimierung stellt sich die Frage, welche Bauteile oder Maßnahmen am ehesten zu einer Emissionsreduzierung führen. Unter dem Zeit- und Kostendruck heutiger Entwicklungen im Automobilssektor sind Laboranalysen von beladenen Filtern zur Identifikation von Bestandteilen der Partikel nicht für einen optimalen Entwicklungsablauf geeignet, da hier insbesondere keine zeitliche Zuordnung über die Beladungshöhe erfolgen kann, sondern nur eine integrale Betrachtung über den Beladungszeitraum. Wie zuvor beschrieben sind hochdynamische Betriebsweisen bezüglich Gemischbildung [29, 30, 52], aber auch der Abdichtwirkung der Kolbengruppe bei Schub-Last-Wechseln in dynamischen Zyklen kritisch [52, 53]. Zur Systemoptimierung braucht der Entwickler einen Indikator, um festzustellen, ob

1 Einleitung – Problemstellung und Motivation

eher ein mechanisches Problem vorliegt oder ein Problem rein aus der Gemischbildung beziehungsweise eine Wechselwirkung von Öl und Kraftstoff am Motor in gewissen Betriebszuständen oder Betriebszustandswechseln. Die Fragestellung der ölunduzierten Partikelemissionen gilt als ein wichtiges noch zu lösendes Problem auf dem Weg zur weiteren Emissionsreduzierung des Verbrennungsmotors [51].

In der vorliegenden Arbeit sollen die Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung untersucht werden. Ziel ist es, eine Auswerte- und Versuchsmethodik zu finden, um die Haupteinflussparameter für die Partikelanzahlemissionen zu ermitteln und geeignete Optimierungsmaßnahmen am mechanischen System und den Gemischbildungsparametern abzuleiten. Durch die Betrachtung der Rohemissionen nach Turbolader und vor Katalysator soll eine Ursachenfindung ermöglicht werden, ohne dass diese durch Einflüsse aus der Abgasnachbehandlung wie zum Beispiel durch den Partikelfilter verfälscht werden. Hierbei soll eine messtechnische Kombination zur Analyse insbesondere von dynamischen Vorgängen im Hinblick auf die RDE-Herausforderungen bei der Motorenentwicklung erprobt und validiert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Grundlagen zu Partikelemissionen

2.1.1 Charakterisierung und Beschaffenheit von Partikeln

Die gesetzlich limitierte Abgasemission von Partikeln leitet sich aus den beschriebenen Gesundheitsbeeinträchtigungen ab, wobei sich das Abgas als Aerosol und somit als ein „Gemisch aus Partikeln und dem suspendierenden Medium Luft“ [54] in der Atmosphäre ausbreitet und vom Menschen eingeatmet werden kann. Der Gesetzgeber definiert Partikel als „Abgasbestandteile, die bei einer Temperatur von maximal 325 K (52 °C) aus dem unverdünnten Abgas auf Filtern“ [27] abgeschieden werden. Die Partikelanzahl wird als die „Gesamtzahl der Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 23 nm im verdünnten Abgas“ [27] charakterisiert, wobei flüchtige Bestandteile entfernt werden.

Der Sammelbegriff „Partikel“ umfasst jedoch je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Definitionen. Allgemein kann eine Differenzierung von Partikeln nach Morphologie, Größe, chemischer Zusammensetzung, Aggregatzustand, Beschaffenheit, Messverfahren oder auch deren Wirkung erfolgen. Im Folgenden werden die in Bezug auf die verbrennungsmotorischen Partikel verwendeten Definitionen und Klassifizierungen erläutert.

2.1.1.1 Partikelgröße

Ein Partikel liegt häufig nicht in sphärischer Form vor, wodurch die Angabe eines Durchmessers zur Bestimmung der Partikelgröße je nach Definition oder Messprinzip unterschiedlich erfolgt. Beim Äquivalentdurchmesser D_p entspricht das Volumen des amorphen Partikels dem Durchmesser einer Kugel mit dem gleichen Volumen [54]. Im Bereich der Partikelmesstechnik zur Charakterisierung der Partikelgröße sind unter anderem der elektrische Mobilitätsdurchmesser und der optische Durchmesser relevant. Der elektrische Mobilitätsdurchmesser entspricht dem Durchmesser eines sphärischen Partikels mit der gleichen elektrischen Mobilität. Bei optischen Messtechniken wird durch die Interaktion des Partikels mit Licht ein optischer Durchmesser durch Vergleich mit Referenzpartikeln bestimmt, die zur Kalibrierung verwendet werden [55].

Die in Abbildung 2.1 dargestellte Partikelgrößenverteilung ist nach Kittelson [56] und Willeke et al. [57] klassifiziert. Grobe Partikel (PM_{10}) liegen im Durchmesserbereich

$2,5 < D_p < 10 \text{ m}$, alle Partikel mit $D_p < 2,5 \text{ m}$ werden als feine Partikel ($PM_{2,5}$) bezeichnet. Partikel mit $D_p < 0,1 \text{ m}$ sind ultrafeine Partikel und mit $D_p < 0,05 \text{ m}$ Nanopartikel. Für die verbrennungsmotorische Partikelemission sind insbesondere der Nukleationsmodus mit Äquivalenzdurchmesser $D_p < 0,05 \text{ m}$ und der Akkumulationsmodus mit $0,05 < D_p < 1 \text{ m}$ von Interesse [58 bis 60].

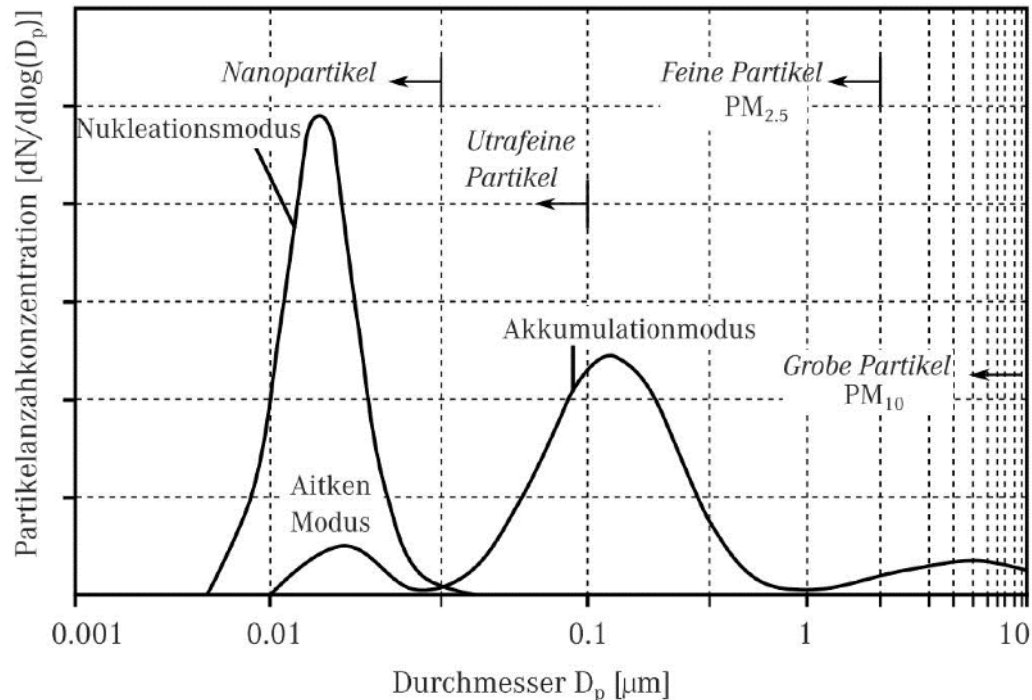


Abbildung 2.1: Typische Partikelgrößenverteilung aus dem Abgas von Verbrennungsmotoren [61]

2.1.1.2 Zusammensetzung von Partikeln

Die verbrennungsmotorischen Partikel können Bestandteile von unverbranntem Öl und Kraftstoff, reinem Kohlenstoff, Sulfaten, Wasser und Asche enthalten [56]. Generell können nach Merkisz et al. [62] und Sargenti et al. [63] die Partikel in lösliche organische Anteile (soluble organic fraction – SOF), in flüchtige organische Anteile (volatile organic fraction – VOF) und in nicht-lösliche organische Bestandteile (insoluble organic fraction – INSOL) eingeteilt werden. Abbildung 2.2 zeigt die Klassifizierung der motorischen Partikel nach deren physikalischem Trennungverhalten in Laboranalysen.

Eastwood [64] unterteilt die volatilen oder löslichen Anteile in Sulphate, Nitrate und organische Anteile. Die nicht-löslichen, nicht-volatilen Komponenten werden in kohlenstoffhaltige Anteile beziehungsweise Ruß und Asche unterteilt, wozu auch der metallische Abrieb gezählt wird. Die prozentualen Anteile und Morphologie der verschiedenen

Komponenten variieren je nach Brennverfahren, Motor, Betriebsstoff, Betriebspunkt und Betriebsrandbedingungen [65 bis 69].

Nukleationspartikel entstehen bei Verdünnung und Abkühlung des Abgases aus volatilen Vorläufern von organischen Verbindungen, wie Kraftstoff- und Ölbestandteilen oder Schwefelkomponenten. Weitere Bestandteile von Nukleationspartikeln können elementarer, fester Kohlenstoff oder metallische Anteile sein. Die Akkumulationspartikel bestehen aus kohlenstoffhaltigen Agglomeraten und weiterem angelagerten Material [56].

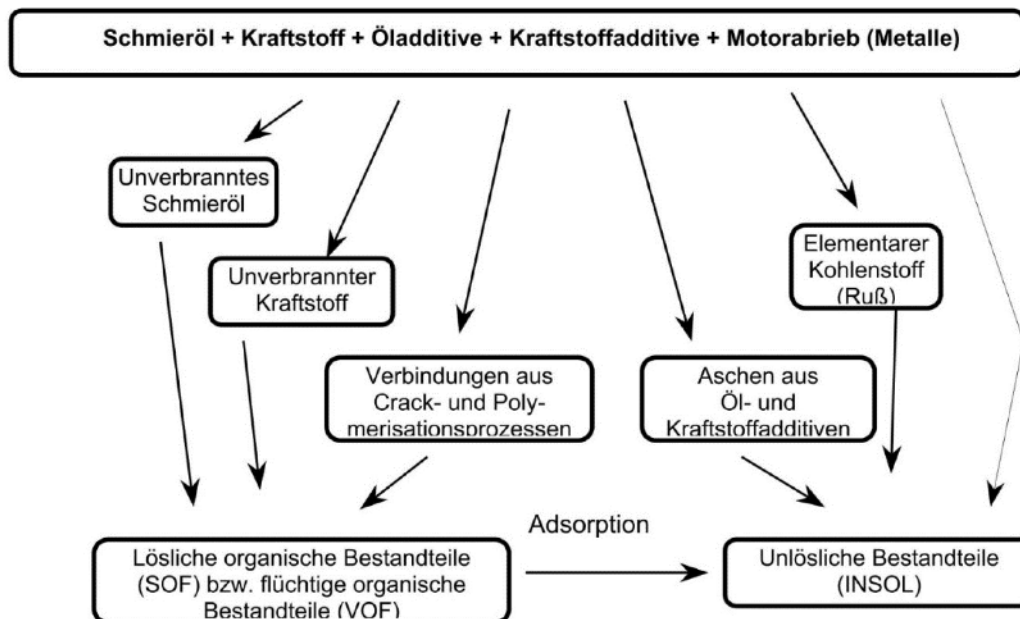


Abbildung 2.2: Klassifizierung von Partikeln nach deren physikalischem Verhalten [63]

2.1.2 Rußbildung

Nach Dageförde [44] werden derzeit unterschiedliche Rußbildungshypothesen - wie die Elementarkohlenstoffhypothese und die Polyzyklenhypothese - angewendet, wobei nach aktuellem Forschungsstand kein ganzheitliches Erklärungsmodell zur Rußbildung vorliegt.

In Abbildung 2.3 sind die einzelnen Phasen der Rußbildung nach Bockhorn [70] und Mayer [71] dargestellt. Bei der Umsetzung des Brennstoffs (Pyrolyse) kommt es zur Bildung von Benzolringen, die weiterwachsen und molekulare Rußvorläufer in Form von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen bilden. Die Nukleation (Partikelbildung aus gasförmigen Reaktanden) dieser Rußkeime führt zur Bildung von Rußprimärpartikeln, die durch Oberflächenwachstum und Koagulationsprozesse zu größeren

2 Stand der Technik

Partikeln werden und agglomerieren, wodurch die Partikelanzahl sinkt und die Partikelmasse steigt.

Ein während der unterschiedlichen Phasen parallellaufender Prozess ist die Oxidation. Durch die Nachoxidation im Brennraum unter den Randbedingungen aus hinreichend hoher Temperatur und vorhandenem molekularem Sauerstoff oder Hydroxylradikalen (OH-Radikalen) wird eine signifikante Reduktion der Partikel erreicht [72]. Nach Merker et al. [73] gelangt nur circa 1 bis 10 % der maximal im Brennraum gebildeten Rußmenge in den Abgastrakt.

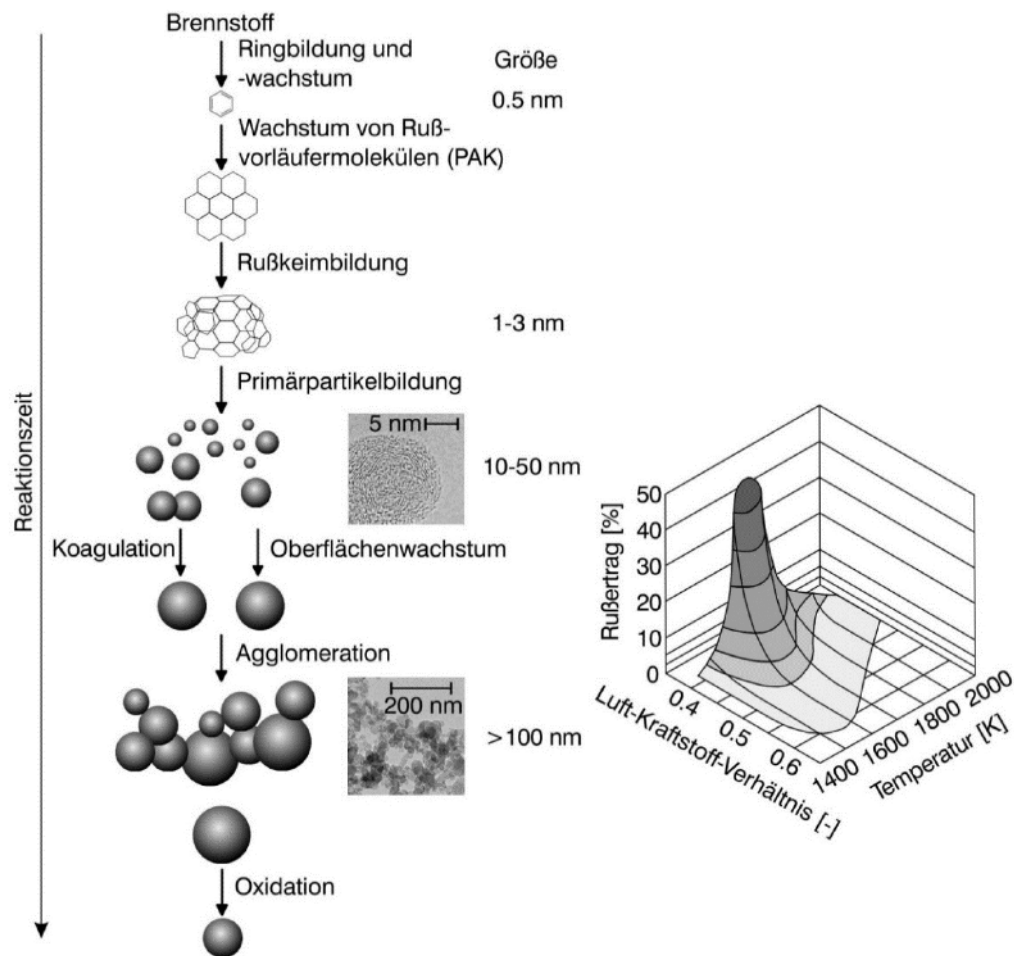


Abbildung 2.3: Phasen der Rußentstehung nach Bockhorn [70] und Mayer [71], Abbildung aus [44]

Der Rußertrag ist abhängig von den im Brennraum vorliegenden Randbedingungen. Im Temperaturbereich zwischen 1600 und 1800 K mit fettem Gemisch bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis um 0,4 ergibt sich der höchste Rußertrag. Bei einer diffusionskontrollierten Verbrennung im Zylinder liegen lokal sehr unterschiedliche Luft-Kraftstoff-

Verhältnisse und Temperaturen vor, die durch eine inhomogene Gemischbildung, wie Kraftstoffanreicherung an der Zylinderwand, am Injektor oder durch Herausdiffundieren von Kraftstoff aus dem Feuersteg zu erhöhter Rußbildung führen können [45, 74, 75].

2.1.3 Partikeldynamik und Transformation

Die Partikel unterliegen von ihrem Entstehungsort lokal im Brennraum über den Abgastrakt bis zum Auspuff sowie folgend der Freisetzung in die Atmosphäre (und ebenso während der Messung) unterschiedlichen physikalischen und chemischen Prozessen. Nach Kittelson et al. [76] erfolgt eine Einteilung der Prozesse in Partikel-zu-Partikel-Prozesse und die Umwandlung gasförmiger Stoffe in Partikel.

2.1.3.1 Partikel-zu-Partikel-Prozesse

Partikelverluste im Abgassystem und durch die Partikelprobenahme werden durch folgende Partikel-zu-Partikel-Prozesse hervorgerufen:

- Thermophorese
- Diffusionsverluste
- Koagulation
- Massenträgheitseffekte
- Elektrostatische Abscheidung
- Chemische Reaktionen

Bei der Thermophorese werden durch einen Temperaturgradienten Partikelbewegungen aufgrund eines molekularen Impulsaustauschs zwischen den Gasmolekülen hervorgerufen. Im Bereich der höheren Temperatur herrscht eine größere Molekularbewegung und somit ein höherer Impuls vor als in kälteren Bereichen, wodurch sich ein Partikel in Richtung der kälteren Bereiche bewegt. Bei kleineren, hochmobilen Partikeln wirken sich die thermophoretischen Kräfte stärker aus. Hierdurch kommt es insbesondere im Abgassystem und den Probenahmeleitungen bei zu geringen Temperaturen zu Partikelablagerungen, die sich unvorhersehbar wieder loslösen und die Partikelmessung beeinflussen können [76 bis 78].

Diffusionsverluste entstehen durch Konzentrationsunterschiede, die von den Partikeln ausgeglichen werden und in die dünne Grenzschicht mit hohen Stoffübergangskoeffizienten an den Wänden diffundieren. Dieser Effekt ist ebenso wie die Thermophorese bei kleinen Partikeln stärker ausgeprägt [76].

Als Koagulation bezeichnet man die Kollision von Partikeln, bei der die Gesamtmasse der Partikel erhalten bleibt, aber die Partikelanzahl reduziert wird, wodurch sich folglich auch die Partikelgrößenverteilung ändert [61]. In Bezug auf die Partikelprobenahme zeigt sich eine Abhängigkeit des Verdünnungsverhältnisses, da bei höheren Verdünnungsraten eine geringere Kollisionswahrscheinlichkeit zwischen den Partikeln vorliegt [76].

Durch die Massenträgheit können die Partikel dem Abgasstrom zum Beispiel bei einer Abgasführung in engen Radien oder abrupten Durchmesseränderungen (Blenden) nicht folgen. Hierbei können Partikelablagerungen im Abgasstrang entstehen, die sich zu unbestimmten Zeitpunkten unter anderem durch Erschütterungen oder Gasstöße lösen können. Weiterhin kann insbesondere bei größeren Partikeln die Massenträgheit zu Falschmessungen durch eine nicht vorhandene isokinetische Probenahme führen [76]. Bei Entnahme eines Teilstroms aus dem Abgas liegt eine isokinetische Probenahme vor, wenn die Entnahmegeschwindigkeit der Abgasgeschwindigkeit entspricht.

Die elektrostatische Abscheidung von Partikeln kann in elektrisch aufladbaren Probenahmeleitungen vorkommen. Da Abgaspartikel aus der Verbrennung größtenteils (bis zu 85 %) elektrostatisch geladen sind, werden diese in Probenahmeleitungen durch das elektrische Feld und die daraus resultierende Kraft abgelenkt. Die elektrische Mobilität geladener Partikel nimmt mit größeren Partikeln zu, wodurch die elektrostatischen Verluste bei diesen Partikeln am größten sind [76, 77].

Photochemische Reaktionen der Partikel in der Atmosphäre sind für die Partikelmessung am Verbrennungsmotor nicht relevant und werden daher nicht weiter betrachtet.

2.1.3.2 Umwandlung gasförmiger Stoffe zu Partikeln

Die Umwandlung gasförmiger Stoffe, insbesondere von flüchtigen, organischen Bestandteilen (SOF) erfolgt nach Kittelson et al. [76] durch Adsorption an bereits bestehenden Partikeln oder durch Keimbildung (Nukleation).

Für Kondensationsvorgänge muss eine gewisse Übersättigung vorliegen. Adsorptionsprozesse können hingegen schon ohne eine Übersättigung auftreten. Die Adsorptions- und Kondensationsprozesse sind abhängig von den Sättigungsverhältnissen der verschiedenen organischen Spezies, der zur Adsorption verfügbaren Oberfläche der Partikel, der Adsorptionsenergie und der verfügbaren Zeit für die Adsorption.

Die Adsorption von löslichen, organischen Bestandteilen erhöht die Größe und Masse der Partikel, wobei gleichzeitig die gasförmige Kohlenwasserstoffkonzentration

abnimmt. Beim Verdünnen von Abgas kann auch eine Desorption der SOF von den Partikeloberflächen zurück in den gasförmigen Zustand auftreten. Unter hinreichend hohen Sättigungsverhältnissen werden neue Partikel aus gasförmigen organischen Spezies gebildet. Diese Nukleation tritt häufig auf, wenn nicht ausreichend Oberfläche für die Adsorption zur Verfügung steht. Bei ausreichender Partikelgröße erfolgt ein weiteres Partikelwachstum über Kondensation. Durch hohe Abgasverdünnungsraten kommt es zu geringeren Sättigungsverhältnissen und somit zum Verdunsten der zuvor kondensierten Spezies, was zu einer Größenreduktion oder zum Verschwinden der Partikel führt.

2.1.3.3 Auswirkungen der Partikeldynamik und Transformation auf die Partikelmessung

Aus den zuvor beschriebenen Prozessen der Partikeldynamik und Transformation lassen sich nach Kittelson et al. [70, 76] die Randbedingungen für die Messung von Partikeln ableiten. Die Verdünnung der Abgasprobe ist bezüglich Verdünnungsverhältnis und dem daraus folgenden Sättigungsverhältnis kritisch, ebenso die Verweildauer der Partikel während der Probenahme. Weitere Einflussfaktoren sind Feuchtigkeit und Temperatur der Abgasprobe. Die Partikeleigenschaften haben Einfluss auf die Partikelmessung, wobei Partikelgröße, Partikelanzahl und Zusammensetzung ausschlaggebend sind. Volatile organische Anteile im Abgas erweisen sich als besonders kritisch aufgrund von deren Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung und das Sättigungsverhalten während der Abgasverdünnung im Messsystem.

2.1.4 Motorische Einflussparameter auf Partikelemissionen

Die Komplexität der Partikelbildung führt zu vielerlei Komponenten und unterschiedlichen Phänomenen, die im Verbrennungsmotor Einfluss auf die Partikelemission haben. Dageförde [44] identifiziert Spray-Bauteil-Interaktion, Qualität der Homogenisierung, Injektorverkokung, Diffusionsverbrennung und chemische Zusammensetzung beziehungsweise physikalische Eigenschaften des Kraftstoffs aus der Literatur als häufigste mögliche Partikelquellen.

Im Folgenden werden Zusammenhänge und bisherige Erkenntnisse zusammengefasst, wobei in diesem Kapitel die Fokussierung auf die bisher bekannten Phänomene der Gemischbildung gelegt wird.

2.1.4.1 Ladungsbewegung

Dageförde [44] stellt fest, dass eine ausgeprägte Ladungsbewegung hilft, um eine diffusive Verbrennung aufgrund schlechter Homogenisierung und Kraftstoffanreicherungen

an den Brennraumwänden (Zylinderwand und Kolbenboden) oder eine Benetzung der Einlassventile zu vermeiden. Auch Untersuchungen von Bertsch [32] zeigen, dass eine erhöhte Zylinderinnenströmung durch Tumble oder Drall eine signifikante Reduzierung der Partikelemissionen durch die verbesserte Gemischbildung ermöglicht. Hierbei müssen jedoch auch negative Effekte zum Beispiel durch eine Wechselwirkung von Ladungsbewegung und Einspritzzeitpunkt beachtet werden, die eine Erhöhung der Partikelemission bewirken können. Die Rußoxidation in der Expansionsphase kann durch die Ladungsbewegung verbessert werden. Hierzu ist eine gute Durchmischung mit örtlich hinreichend Sauerstoff zur Nachoxidation und ausreichend hohen Temperaturrandbedingungen notwendig [79].

2.1.4.2 Einspritzung

Durch Erhöhung des Einspritzdrucks, insbesondere in Kombination mit einem reduzierten hydraulischen Durchfluss des Injektors, weist Bertsch [32, 80] eine Partikelemissionsreduktion nach. Dieser Effekt lässt sich durch eine geringere Tropfengröße mit einem besseren Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis erklären, die zu einem optimierten Verdampfungsprozess des Kraftstoffsprays und zu höherer Turbulenz durch den Einspritzimpuls führt [81 bis 83]. Die Einspritzdruckerhöhung ermöglicht zusätzlich die Einbringung der gleichen Kraftstoffmasse in einer kürzeren Zeit, wodurch mehr Zeit für die Homogenisierung des Gemischs zur Verfügung steht [84]. Untersuchungen von Disch [46] zeigen, dass die Vorteile der Einspritzdruckerhöhung in Bezug auf Partikelemissionen auch im transienten Motorbetrieb zutreffen. Eitel et al. [85] ermitteln eine Partikelanzahlreduzierung in einzelnen Kennfeldbereichen von bis zu 60 % durch die Einspritzdruckerhöhung von 20 auf 50 MPa.

Für die Einspritzstrahlgeometrie ist die axiale und radiale Eindringtiefe des ausgebildeten Kraftstoffsprays ausschlaggebend. Ziel ist dabei eine maximale radiale Penetration, um die Durchmischung mit der Luft zu verbessern und eine schnellere Homogenisierung zu realisieren. Bei zu großen Strahlwinkeln und mehr einzubringender Kraftstoffmasse kann eine Kraftstoffbenetzung der Zylinder- und Brennraumwände beziehungsweise auch von anderen Bauteilen (wie Einlassventilen oder Zündkerzen) auftreten [61, 81, 86 bis 89].

Die Einspritzstrategie beeinflusst die Partikelemission signifikant und kann über unterschiedliche Ansteuerung der Injektoren und verschiedene Strömungsverhältnisse zu einem robusteren Emissionsniveau beitragen. Der Einspritzbeginn muss je nach Betriebspunkt angepasst werden. Generell hilft eine frühere Einspritzung, da mehr Zeit zur Homogenisierung des Luft-Kraftstoff-Gemischs zur Verfügung steht. Wird der

Einspritzbeginn allerdings zu früh an den Ladungswechsel-OT (OT: oberer Totpunkt) gelegt, ist die freie Strahllänge des Kraftstoffs nicht ausreichend und es kommt zur Benetzung des Kolbenbodens. Liegt der Beginn der Kraftstoffeinspritzung hingegen zu spät, kann die Zeitdauer zur optimalen Durchmischung zu kurz sein. Untersuchungen von Disch [46] zeigen, dass der Einspritzbeginn auch im transienten Motorbetrieb signifikanten Einfluss auf die Partikelemissionen hat [32, 45, 52, 89, 90]. In Abbildung 2.4 sind die Einspritzarten homogen, einfach und zweifach (HOM1 und HOM2) sowie homogen-split, zweifach (HSP2) und deren Einfluss auf die Partikelemissionen - genauer Rußmasse und Partikelanzahl - dargestellt.

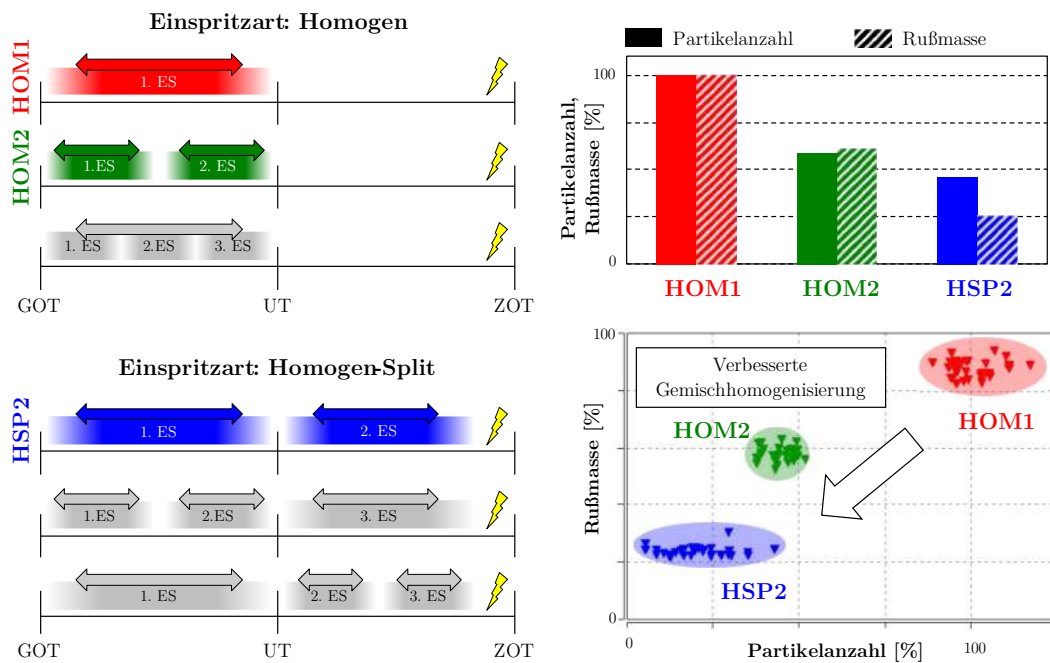


Abbildung 2.4: Einspritzarten und deren Einfluss auf Partikelemissionen; mit Anpassungen übernommen aus [52]

Die Mehrfacheinspritzung zeigt sich als zielführend, da hierdurch eine bessere Homogenisierung des Luft-Kraftstoff-Gemischs erreicht wird. Beim Homogenverfahren wird der Kraftstoff in den Saughub eingebracht. Eine Teileinspritzung in den Kompressionshub (homogen-split Verfahren) unterstützt den Aufbruch des Kraftstoffstrahls und dessen Verdampfung durch den höheren Zylinderdruck und die höheren Gastemperaturen während der Kompressionsphase [42, 52, 61, 91, 92]. Generell sollte ein Motorbetrieb mit fettem Gemisch vermieden werden. Bei Luftmangel erhöht sich die Partikelemission signifikant. Die Wahrscheinlichkeit von lokal sehr fetten Gemischzonen, die die Partikelbildung fördern, steigt unterhalb des stöchiometrischen Luftverhältnisses ($\lambda < 1$) deutlich an. Kann das Luft-Kraftstoff-Verhältnis nicht bei $\lambda = 1$ gehalten werden, wie

beispielsweise im dynamischen Motorbetrieb, sind erhöhte Partikelemissionen die Folge. Aus den RDE-Randbedingungen lässt sich die Forderung nach einem stöchiometrischen Motorbetrieb ableiten. Die bisherige Anfettung zum Bauteilschutz muss zwingend vermieden und durch andere Maßnahmen ersetzt werden, hierbei kann sich beispielsweise der Einsatz einer Wassereinspritzung für Hochleistungsmotoren als zielführend erweisen [29 bis 31, 45, 52, 90, 93, 94].

2.1.4.3 Betriebstemperaturen

Bei niedrigen Kühlwassertemperaturen zeigt sich eine signifikant erhöhte Partikelemission [90]. Die Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffs kann nicht ausreichend aus dem Brennraum zugeführt werden, wodurch die Verdampfung des eingespritzten Kraftstoffs langsamer erfolgt [61]. Folglich muss insbesondere beim Kaltstart der Motor mittels Thermomanagement schnell auf Betriebstemperatur gebracht werden. Diese Anforderung wird zum Beispiel über integrierte Abgaskrümmen in unterschiedlichen Motorkonzepten realisiert [95 bis 98]. Durch die Kolbenkühlung mittels Kolbenspritzdüse kann die Brennraumtemperatur und somit auch die Gemischbildung bezüglich Partikelbildung beeinflusst werden. Dies zeigt sich nach Kapus et al. [91] insbesondere im Kaltstart, wobei auch bei warmem Motorbetrieb Einflüsse auf die Partikelemission festgestellt werden können. Weiterhin wurden Einflüsse der Motoröltemperatur und Kraftstofftemperatur auf die Partikelanzahlemission von Bertsch [32] nachgewiesen.

2.1.4.4 Ablagerungen

Aus Rückständen des unverdampften Kraftstoffs an der Injektorspitze bilden sich Verkokungen, die zum Anstieg der Partikelemissionen führen [47, 89, 91, 92, 99, 100]. Die poröse Oberfläche der Ablagerungen wirkt wie ein Schwamm und nimmt Kraftstoffbestandteile auf, welche dann ausdampfen und diffusiv verbrennen [45]. Bertsch bestätigt dieses Verhalten: Durch Anheben der Kraftstofftemperatur konnte der Verkokungseffekt und der Partikelemissionsanstieg zeitlich verzögert werden [32]. Der Einfluss von verschiedenen Kraftstoffen auf die Ablagerungsneigung am Injektor über einen Dauerlauf wurde von Wiese et al. [101] untersucht. Für Kraftstoffe, die weniger Ablagerungen am Injektor bilden, konnte eine Partikelreduktion nachgewiesen werden. Sonstige weitere kohlenstoffhaltige Ablagerungen aus einer Abgasrückführung oder aus der Ansaugstrecke können zu erhöhten Partikelemissionen beitragen [45].

2.1.4.5 Wechselwirkungen

Die einzelnen Vorteile der Parameteränderungen können nach Bertsch [32] nicht bei der Optimierung summiert werden, da häufig Wechselwirkungen vorliegen und somit eine

explizite Analyse aller zu beeinflussenden Parameter in Kombination erfolgen muss. Weiterhin müssen das Spray-Targeting, der Einspritzdruck und der Einspritzzeitpunkt für jeden Betriebspunkt angepasst und optimiert werden. Dageförde erwähnt ebenso, dass die „Gemischbildung als Summe aus Ladungsbewegung, Kraftstoffeinbringung (Gemischbildner und Einspritzstrategie) sowie Kraftstoffbeschaffenheit (Verdampfungsenthalpie und Siedelinie)“ [44] zur Partikelreduktion sinnvoll ist. Die Mehrfacheinspritzung kann die Eindringtiefe des Kraftstoffs in Abhängigkeit der Pausenzeit zwischen den Einspritzungen bei vorhandener Ladungsbewegung verringern. Bei zu langer Pausenzeit kann das Ende der letzten Einspritzung zu spät liegen, wodurch Gemisch-Inhomogenitäten und zyklische Verbrennungsschwankungen auftreten, die die Partikelemissionen erhöhen. Abhilfe kann hier wiederum eine Einspritzdruckerhöhung schaffen [44, 52, 81].

Eine Reduktion der Kraftstoffbenetzung der Bauteile kann „durch die räumliche Anordnung der Einspritzdüse und der Zündkerze, die Brennraumform, die Einspritzstrahlgeometrie sowie durch die Richtung und Intensität der Ladungsbewegung verwirklicht werden“ [61].

2.2 Grundlagen zu Ölemissionen

2.2.1 Definition der Begriffe Schmiermittelbilanz, Ölverbrauch und Ölemission

„Der Begriff Ölverbrauch wird im Alltag oft verwendet. Landläufig ist damit das Phänomen gemeint, das den Autofahrer zwingt, Öl nachzufüllen. Tatsächlich findet jedoch ein permanenter Austausch von Kohlenwasserstoffen zwischen der Brennkammer und dem Kurbelgehäuse statt“ [102]. Die allgemeine Bezeichnung „Ölverbrauch“ wird als Schmiermittelbilanz definiert. Die Schmiermittelbilanz (siehe Abbildung 2.5) besteht aus dem Ölverbrauch sowie dem Eintrag von Verbrennungsrückständen oder Verbrennungsprodukten und von Kraftstoff in das Motoröl. Die Schmiermittelbilanz in der Ölwanne wird am Motor gravimetrisch oder volumetrisch ermittelt, wobei die Gewichts- oder Volumendifferenz unter exakt gleichen Randbedingungen vor und nach einem definierten Zyklus erfolgt. Die intermittierende Wägung oder Abtropfmethode zählt zu den gravimetrischen Messmethoden zur Ermittlung der Schmiermittelbilanz und ist am weitesten verbreitet. Hierbei kann der Eintrag des Kraftstoffs beispielsweise im Labor ermittelt und aus der Schmiermittelbilanz herausgerechnet werden, um eine genauere Angabe zum Ölverbrauch zu erhalten. Der Ölverbrauch ist die Summe des Öls, das dem Motor pro Zeiteinheit verloren geht und nicht mehr in der Ölwanne verbleibt. Der Ölverbrauch besteht aus Ablagerungen im Motor, Ölverlust durch Leckagen und Öl, das

sich im Abgas befindet. Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe aus dem Öl werden als Ölemission definiert; nach Püffel et al. [103] verlassen circa 90 % des Öls den Motor im unverbrannten Zustand. Weitere Anteile des Schmieröls im Abgas lagern sich an Rußpartikel an oder bilden diese [102, 104 bis 107].

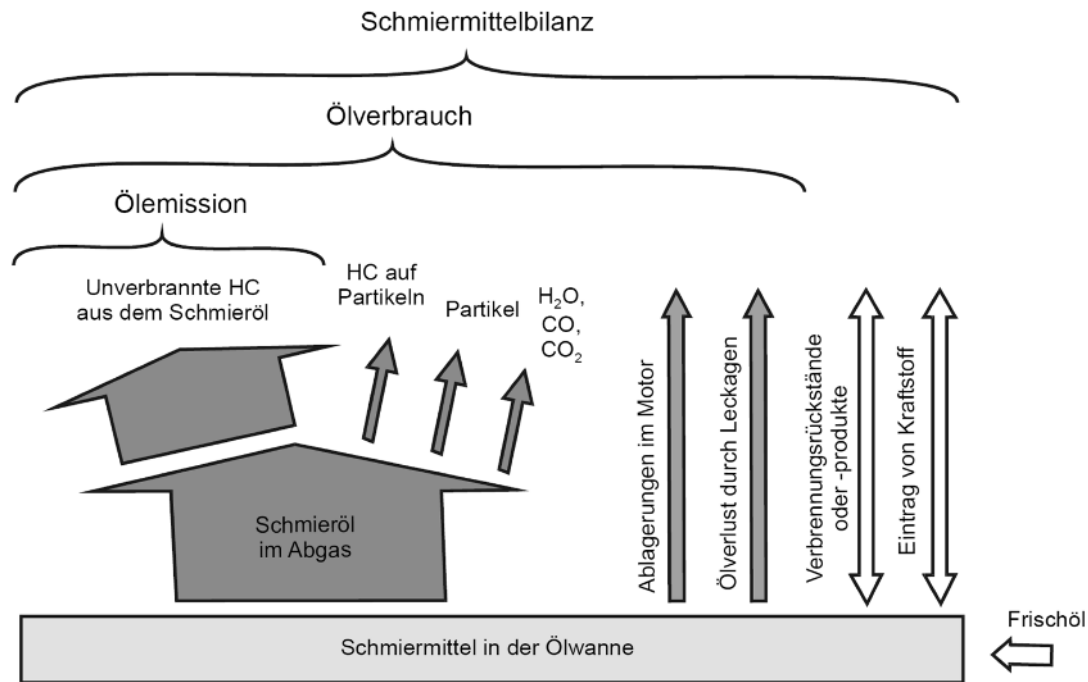


Abbildung 2.5: Zusammensetzung der Schmiermittelbilanz [104]

2.2.2 Ölverbrauchs- und Öltransportmechanismen

Durch Leckageströme an unterschiedlichen Stellen im Verbrennungsmotor gelangt das Öl in den Zylinder sowie in den Ansaug- und Abgastrakt. In Abbildung 2.6 sind die Ölverbrauchsquellen im Verbrennungsmotor dargestellt. Der Hauptanteil am Gesamtölverbrauch kommt mit einem Anteil von bis zu 95 % meistens aus dem System „Kolben-Kolbenring-Zylinderlaufbahn“, weitere Ölverbrauchsanteile mit bis zu 18 % entstehen durch den ölgeschmierten Abgasturbolader und Leckagen an der Verdichter- oder der Turbinenlagerung und mit einem Anteil von 4 - 7 % durch die Kurbelgehäuseentlüftung [108, 109]. Weitere Ölverluste können an den Ventilschäften der Einlass- und Auslassventile oder durch Undichtigkeiten des Motors auftreten [53, 110 bis 112].

Die Ölfreisetzung und damit potenzielle Ölverbrauchsquellen lassen sich somit in zwei Bereiche unterteilen. Die Ölfreisetzung findet vor oder nach dem Brennraum aus Ventilschaftdichtungen an Einlass- und Auslassventilen, aus Turboladerdichtungen [113] auf der heißen und kalten Seite und aus der Rückführung der Kurbelgehäuseentlüftung in

den Ansaugtrakt statt. Die Ölfreisetzung aus dem System „Kolben-Kolbenringe-Zylinderlaufbahn“ wird im Folgenden aufgrund ihres hohen Anteils am Gesamtölverbrauch genauer betrachtet. Die ausschlaggebenden physikalischen Öltransportmechanismen sind Massenträgheitskräfte, Gaskräfte, Wärmeeintrag und mechanischer Öltransport durch den bewegten Kolben und die Kolbenringe. Im Brennraum erfolgt eine Ölfreisetzung über das Abdampfen des Motoröls von Oberflächen, dabei hauptsächlich von der Zylinderwand und über Abwaschen des Öls durch auftreffenden Kraftstoff bei erhöhter Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion.

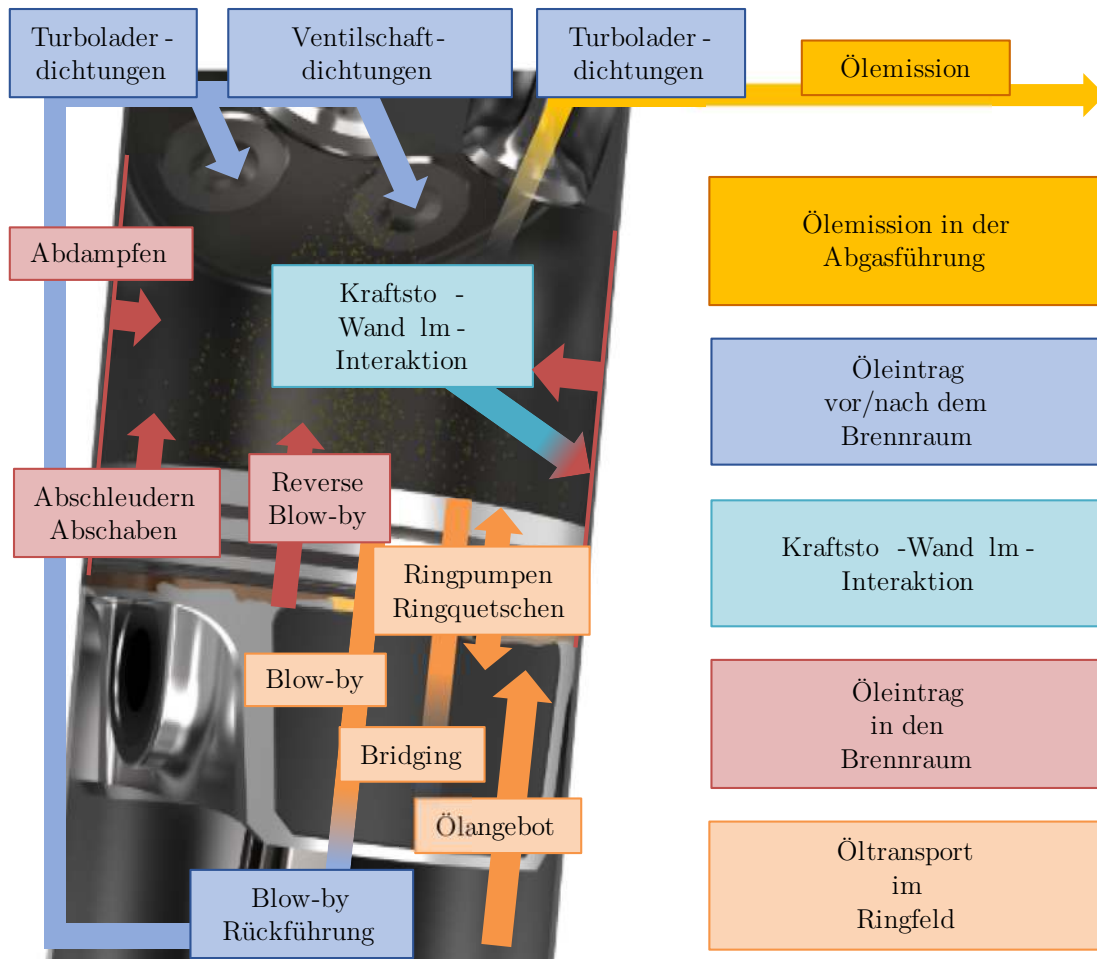


Abbildung 2.6: Übersicht der Ölverbrauchs- und Öltransportmechanismen

Die Öltransportmechanismen der Kolbengruppe werden durch Yilmaz [114] ausführlich beschrieben. Das Ölangebot im Bereich des Ölabbstreifings und Kolbenhemds wird vom Laufspiel des Kolbenhemds und der an der Zylinderwand befindlichen Ölmenge bestimmt, die dem Ringfeld zugeführt wird. Außerdem wird hier das Öl über das Blow-by in das Kurbelgehäuse ab, und anschließend der Kurbelgehäuseentlüftung zugeführt.

Das Öangebot an der Zylinderwand unterhalb des Kolbenhemds kann beispielsweise durch Kolbenkühlöfen beeinflusst werden, was wiederum zu erhöhten Öleinträgen in den Brennraum führen kann. Hierbei stellt sich der nicht vollständig ausgebildete Ölstrahl als besonders kritisch dar. Durch die Hysterese des Kugel-Feder-Ventils kann es bei Motorbetrieb mit unterschiedlichen Öldrücken zu einem Auftreffen des Ölstrahls auf die Zylinderwand kommen, in Folge dessen sich das Öangebot erhöht [115 bis 118].

Der Bereich des 2. Kompressionsrings reguliert die Ölfilmstärke auf der Zylinderwand und die Ölzufuhr zum Bereich des 1. Kompressionsrings. Dieser Bereich hat direkten Einfluss auf den Öltransport in den Brennraum und somit den Ölverbrauch. Hier kommt es durch die oszillierenden Massenkräfte zum Abschleudern des Öls aus dem Feuersteg oder vom Topring.

2.2.2.1 Öleintrag in den Brennraum durch Reverse Blow-by

Durch unterschiedliche Drücke im Zwischenringbereich des ersten und zweiten Kompressionsrings und dem Brennraum kann Ölaerosol mittels Gasströmung in Form von Reverse Blow-by durch die Spaltdichtung des Feuerstegs in den Brennraum gelangen. Nach Yilmaz [114] und Henaux et al. [119] kann am Ende des Expansionstaktes und im frühen Ausschietakt der Zylinderdruck unter den Zwischenringdruck fallen. Bei erhöhtem Zwischenringdruck im Bereich zwischen 1. Kompressionsring (Topring) und 2. Kompressionsring wird Öl durch Reverse Blow-by über den Topringstoß und die Topringnut in Richtung Brennraum transportiert. Ringflattern kann ebenso durch erhöhte Zwischenringdrücke hervorgerufen werden. Wigger et al. [120] wiesen nach einer Schubeinleitung und somit Änderung der Druckdifferenz zwischen Brennraum und Zwischenringbereich mittels laserinduzierter Fluoreszenz-Messtechnik Öltröpfchentransport in den Brennraum nach. Simulationsrechnungen von Schmalzbauer [121] zeigten eine erhöhte Sensitivität des Reverse Blow-by im Zusammenhang mit einer Änderung der Verbrennungsschwerpunktlage (Zündzeitpunkt).

2.2.2.2 Ölverbrauchsmechanismus Abdampfen

Der an der Zylinderlaufbahn oder auf dem Kolben verbleibende Ölfilm kann teilweise aufgrund des Wärmeeintrags abdampfen [114]. Audette et al. [122] beschreiben, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Zylinderwandtemperatur und dem Abdampfverhalten des Öls besteht. Die Brennraumtemperatur ergab keine direkte Korrelation. Weiterhin hat die Ölzusammensetzung einen Einfluss auf das Abdampfen des Öls, die volatilen Anteile des Öls zeigen dabei ein erhöhtes Abdampfverhalten. Folglich ändert sich durch das Abdampfen der leichtflüchtigen Anteile des Öls auch die lokale

Zusammensetzung des Ölfilms. Yilmaz et al. [123] weisen den linearen Zusammenhang zwischen Zylinderwandtemperatur und Kühlwasserausgangstemperatur nach, wobei höhere Kühlwasser- und Zylinderwandtemperaturen zu höheren Ölverbräuchen führen. Nach Yilmaz et al. [124] erhöht sich die Abdampftrate mit zunehmender Motorlast und höherer Motordrehzahl aufgrund der steigenden thermischen Belastung des Öls an der Zylinderwand, jedoch steht bei höherer Drehzahl auch weniger Zeit für das Abdampfen zur Verfügung. Der höhere Turbulenzgrad bei höheren Drehzahlen ermöglicht einen besseren Masse-transport in die Gasphase. Cho et al. [125] beschreiben, dass die Oberflächentemperaturen am Kolben in Kombination mit der an den heißen Oberflächen zur Verfügung stehenden Ölmenge ausschlaggebend sind. Die hierbei relevanten Oberflächen sind der Feuersteg und insbesondere die Topringnut. Lechtape-Grüter [126] hat bei Modellrechnungen des Abdampfens höhere Abdampftraten bei höheren Kühlwassertemperaturen und höheren Brennraumtemperaturen ermittelt. Ebenfalls Lechtape-Grüter [126] sowie Lübbling et al. [127] zeigen in ihren Simulationsrechnungen, dass der größte Anteil des Abdampfens über den Ausschietakt erfolgt, und führen dies auf den druck- und temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten zurück. Hingegen berechneten Audette et al. [122], dass das Abdampfen des Öls hauptsächlich im Ansaug- und Verdichtungstakt stattfindet. Messungen von Hollen et al. [128] und Krause [129], mit der Probenahme im Brennraum unter Einsatz eines Massenspektrometers, bestätigen jedoch eher die Berechnungen von Lechtape-Grüter und Lübbling, da hier mehr Ölemission (unverbrannte Kohlenwasserstoffe) nach dem Zünd-OT gemessen wird.

2.2.2.3 Abschaben des Ölfilms

Ein weiterer Öleintragsmechanismus in den Brennraum kann das Abschaben des Ölfilms sein. Durch die Kombination von Ölkohlebildung im Bereich des Feuerstegs und der Kolbensekundärbewegung mit großen Kippwinkeln kann das Öl von der Zylinderlaufbahn während der Aufwärtsbewegung des Kolbens abgeschabt werden [53, 110, 129]. Mechanisches Abschaben durch den Kolbenring kann bei höherer Motordrehzahl und mit Ölvollfüllung der Anströmkante bei Verlust des hydrodynamischen Spalts durch Ringtwisten oder durch Kolbensekundärbewegung auftreten [130]. Abschaben des Öls durch den Topring kommt meist nur bei stark verschlissenen Topringen vor [131].

2.2.2.4 Öltransportmechanismen im Kolbenringfeld

Die Kolbenringdynamik und das Abstreifverhalten der Kolbenringe bestimmen nach Yilmaz [114] den Öltransport innerhalb des Kolbenringfelds. Thirouard et al. [130, 132] und Vokac et al. [133] haben den Öltransport im Ringfeld des Kolbens durch Kolbenringnuten und Kolbenringstöße detailliert untersucht und beschrieben. Ein axialer

Öltransport in Hubrichtung des Kolbens erfolgt durch die oszillierende Kolbenbewegung und die resultierenden Trägheitskräfte. Der radiale Öltransport wird durch ein Mitreißen des Öls durch Blow-by Gas getrieben. Für den Öltransport verantwortliche Kräfte sind mechanische Kräfte durch bewegte Teile, wie Kolben oder Kolbenringe, Trägheitskräfte durch die oszillierende Kolbenbewegung, Druckgradienten zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse und Scherkräfte an der Oberfläche des Öls durch die Blow-by-Strömung.

Thirouard [134] beschreibt die laterale Kolbenbewegung relativ zu den Kolbenringen, welche zu Scherkräften am Öl und damit zu radialem Öltransport führt. Zusätzlich kann es zu mechanischem Ringpumpen aus der axialen Kolbenringbewegung kommen.

Der Öltransport von den Kolbenringnuten ins Ringfeld wird wie folgt beschrieben: Öl muss vom einen Kolbenringfeld am Kolben in einen Ringspalt und von einer Kolbenringpalte hinter dem Kolbenring vorbei auf eine andere Seite des Kolbenrings gelangen. Das Volumen hinter dem Kolbenring dient als Ölspeicher, der wiederum den Ölvolu-menstrom durch die Kolbenringnut beeinflusst. Das Öl kann durch den Ring aus der Kolbenringnut in das Ringfeld gequetscht werden. Ein Mitreißen des Öls durch das Blow-by infolge axialer Spiele der Kolbenringe ist nur beim sogenannten Ringflattern relevant [130].

Der Öltransport über den Kolbenringstoß erfolgt nach Thirouard et al. [130] hauptsächlich über die Blow-by-Strömung. Bei Austritt des Öls aus dem Ringstoß mit ausreichender Gasströmung entsteht ein Ölnebel. Dieser Effekt tritt hauptsächlich an den zwei Kompressionsringen auf. Massenträgheitsgetriebener Öltransport kann an den Stößen des Ölabstreifrings unter gewissen Umständen entstehen.

Öltransport kann vom Kolben zur Zylinderwand und von der Zylinderwand zum Kolben auftreten und wird von Przesmitzki [135] als Bridging bezeichnet. Bridging tritt meistens im Bereich des Ölabstreifrings auf, da sich hier viel Öl ansammeln kann. Höhere Drehzahlen führen zu einer Anreicherung des Öls im Ringfeld des Ölabstreifrings, jedoch reduziert eine höhere Last aufgrund der größeren Blow-by-Menge die Ölmenge. Der Effekt des reduzierten Ölverbrauchs deckt sich auch mit Untersuchungen von Gunkel et al. [136], hier wurde durch ein stark vergrößertes Stoßspiel des Toprings eine Blow-by-Erhöhung um den Faktor 3 und eine Ölverbrauchsreduktion auf circa 50 % erreicht.

Im Ringfeld zwischen Topring und 2. Kompressionsring beeinflusst die Ölmenge an der Topringnut den Abtransport des Öls durch Blow-by und somit den Öltransport in den

Brennraum. Dieser wird meist durch den Öltransport im Ringfeld und durch das Spiel zwischen Kolbenring und Kolbenringnut bestimmt. Das Ölangebot an der Topringnut ist abhängig vom Ölangebot aus dem Bereich des 2. Kompressionsrings, welches sich mit der Motordrehzahl erhöht. Die Ölmenge, die durch die Blow-by-Strömung wieder in Richtung Ölabbstreifring transportiert wird, nimmt mit steigender Motorlast zu. Die Ölleckage an der Topringnut durch Massenträgheit oder Ringpumpen erhöht sich mit steigender Motordrehzahl. Dieser drehzahlabhängige Öltransport wurde auch von Schäffer [118] beobachtet. Die Ölfreisetzung erfolgt meistens im späten Ausschietakt des Motors. Durch eine Oxidation des Motoröls kann es zu Ölkohleablagerungen an der Kolbenoberfläche kommen [131].

2.2.2.5 Ölverbrauch durch Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion

Krause [129] fasst die Ölverbrauchsmechanismen, die aus der Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion resultieren, in drei Hauptmechanismen zusammen: Der eingespritzte Kraftstoff kann den Ölfilm abwaschen, der in den Ölfilm eingetragene Kraftstoff führt zu erhöhtem Ölabdampfen, und durch Absorption können lokal höhere Ölfilmstärken auftreten, die wiederum den Öltransport beeinflussen.

Der in Abbildung 2.7 dargestellte Grundlagenversuch im Rahmen des FVV-Forschungsvorhabens „Schmierölemission und Gemischbildung“ [137 bis 139] zeigt, dass ein Eintrag von Kraftstoff (hier: Isooktan) in den Ölfilm von ca. 10 % das Ölsignal im für den motorischen Betrieb relevanten Temperaturbereich bei 120 °C verdoppelt. Bei 60 % Kraftstoffeintrag wird eine Erhöhung des Ölsignals um den Faktor 7 ermittelt. Der Motorbetrieb mit fettem Gemisch ($\lambda = 0,8$) zeigt aus Simulationsdaten und Kraftstofffilmstärkenmessungen einen erhöhten Kraftstoffeintrag an der Zylinderwand, welcher zu geänderten Ölviskositäten und erhöhten Ölemissionen in Messung und Simulation führt. Weiterhin zeigen sich Strömungsoptimierungen wie beispielsweise Tumbleklappen als Potenzial zur Reduzierung der Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion. Ein ähnliches Verhalten mit ansteigender Ölemission hin zu fetterem Gemisch wurde von Rehr [140] beobachtet.

Die Visualisierung der Kraftstoffwandbenetzung und des Kraftstofftransports im Ringfeld wurde durch Füßer et al. [141] mittels laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass eine optimierte Einspritzstrategie den Kraftstoffeintrag in den Wandfilm und in das Öl im Ringfeld des Kolbens reduziert und damit die Ölverdünnung verringert. Ein Anstieg des Kraftstoffgehalts in der Ölwanne korreliert nach Behn et al. [142] mit höheren Ölemissionen.

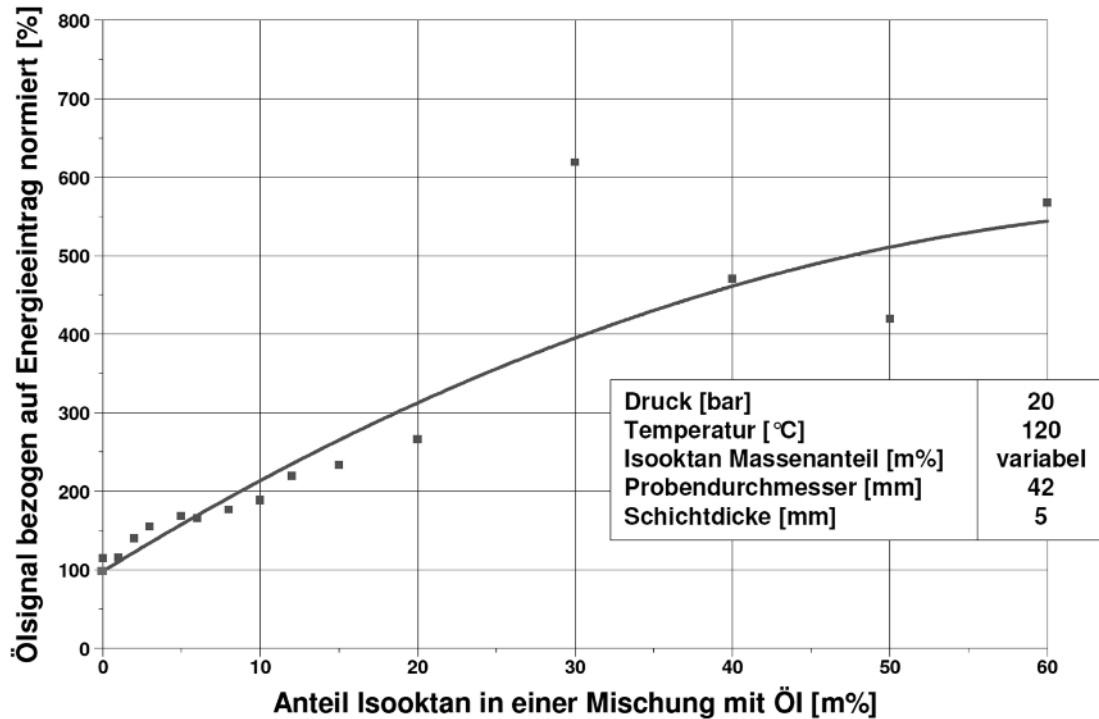


Abbildung 2.7: Kraftstoffeinfluss auf die Ölverdampfung bei 120°C [137]

2.2.2.6 Ölverbrauch im transienten Motorbetrieb

Im transienten Motorbetrieb aus niedrigeren Lasten in höhere Motorlast kann es zu erhöhtem Ölverbrauch wie in Abbildung 2.8 dargestellt kommen. Untersuchungen von Kittelson et al. [143] und Apple et al. [144] zeigen, dass sich die Ascheemissionen bei Lastwechseln ähnlich verhalten. Ein Erklärungsmodell von Yilmaz et al. [114, 145], basierend auf Simulationsdaten und LIF-Messungen, ist eine Ölsammlung im Ringfeldbereich bei niedriger Motorlast, da nicht genügend Blow-by zum Abtransport des Öls in das Kurbelgehäuse vorliegt. Der anschließende Lastwechsel in die höhere Last führt durch einen erhöhten Zwischenringdruck zu einem Ringflattern des Toprings und somit zu einer Freisetzung des Öls. Przesmitzki et al. [146] haben mittels LIF-Messtechnik insbesondere den transienten Motorbetrieb von der Volllast in den Schub und vom Schub in die Volllast untersucht und dabei die Analysen von Yilmaz et al. [114, 145] bestätigt. Das Öl sammelt sich beim Übergang aus der Volllast in den Schub zunächst im Bereich des Ölabstreifrings und wird dann weiter Richtung Topring transportiert. Während der Schubphase wurde als Öltransportmechanismus Ringpumpen und Reverse Blow-by beobachtet, was zu einer Ölfüllung der Topringnut führt. Hieraus resultiert ein Kollabieren des Toprings, was eine verminderte Abdichtwirkung des Toprings beim Übergang in die Volllast zur Folge hat. Aus der entsprechenden Kolbenringsimulation konnte nachvollzogen werden, dass das Ringflattern bis zu 15 Sekunden

anhält und anschließend nach weiteren 10 Sekunden wieder ein stationärer Zustand erreicht wird.

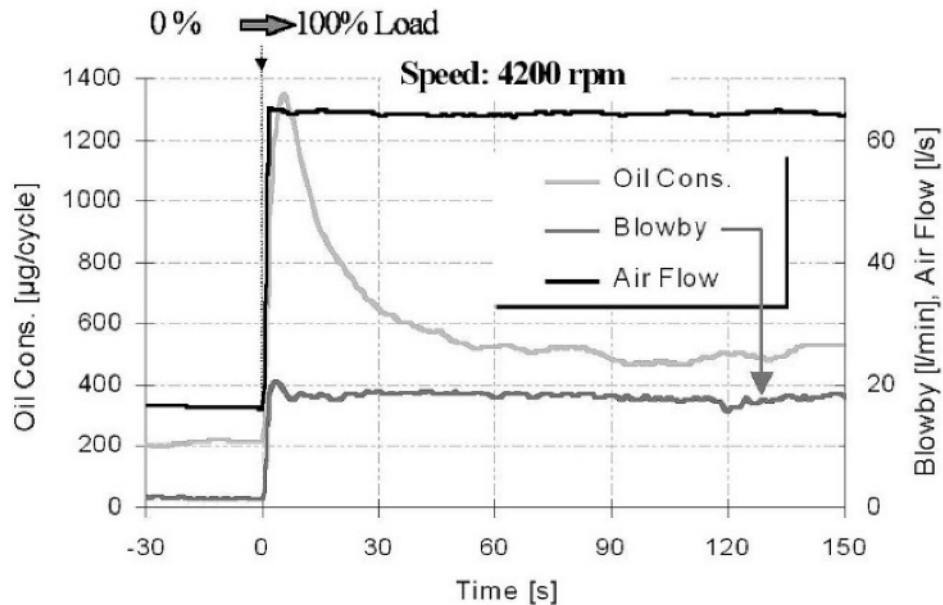


Abbildung 2.8: Ölverbrauch und Blow-by im transienten Lastwechsel von 0 % in 100% Last [145]

2.2.3 Motorische Einflussparameter auf die Ölemissionen

Die nachfolgend beschriebenen motorischen Einflussparameter auf die Ölemission stellen eine Zusammenfassung aus verschiedenen Veröffentlichungen dar. Hierbei gilt es zu betonen, dass die Parametervariationen aufgrund des hochkomplexen Systems „Kolben-Kolbenringe-Zylinderlaufbahn“ nicht zwangsläufig auf andere Motoren übertragbar sein müssen und von den untersuchten Betriebspunkten und Prüfzyklen (stationär oder transient) abhängen.

Beim Kolben ergeben sich Haupteinflussparameter auf die Ölemission durch die Gestaltung des Kolbenringfeldes, hierbei insbesondere die Zwischenringvolumina und die Ölrücklaufbohrungen. Durch Variation der Anzahl und Position der Ölrücklaufbohrungen beziehungsweise des Volumens unterhalb des Ölabstreifrings wurde von Papadopoulos et al. [147] ein signifikanter Zusammenhang zwischen dynamisch emittiertem Öl und Blow-by festgestellt. Die Volumenänderung im Ringfeld zwischen erstem und zweitem Kompressionsring und unter dem zweiten Kompressionsring kann zu einer betriebspunktabhängigen Änderung des Ölverbrauchs führen [148].

Bei den Kolbenringen liegen die Haupteinflussparameter in der Höhe der Tangentialkraft des Ölabstreifrings und der Größe des Stoßspiels des Toprings. Eine Tangential-

kraftabsenkung am Ölabstreifring bewirkt nach Frommer et al. [149] eine erhöhte Ölemission. Untersuchungen bezüglich Ölverbrauchsverhalten mit zwei- und dreiteiligen Ölabstreifringen mit Variation der Ölabstreifringhöhe und Geometrie (U-Flex-Ölabstreifring) wurden von Esser [150] und Senzer [148] durchgeführt. Eine Vergrößerung des Kolbenringstoßspiels von 0,25 mm auf 0,45 mm am Topring reduziert nach Dhoble et al. [151] den Ölverbrauch, je nach Betriebspunkt, um 20 - 24 %. Yamada et al. [152] können hingegen einen geringeren Ölverbrauch aus einem verkleinerten Topring-Stoßspiel ableiten.

Der Saugrohrdruck bestimmt die Druckverhältnisse zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse und ist damit ein Parameter, der die Ölemission beeinflusst. Durch die Änderung des Druckverhältnisses zwischen Brennraumdruck und Kurbelgehäusedruck hat der Saugrohrdruck insbesondere im unbefeuerten Schubbetrieb einen großen Einfluss auf die in den Brennraum transportierte Ölmenge. Abbildung 2.9 ist zu entnehmen, dass der Saugrohrdruck bei Unterschreitung eines Relativdrucks von circa -850 mbar den Ölverbrauch näherungsweise exponentiell steigert [157].

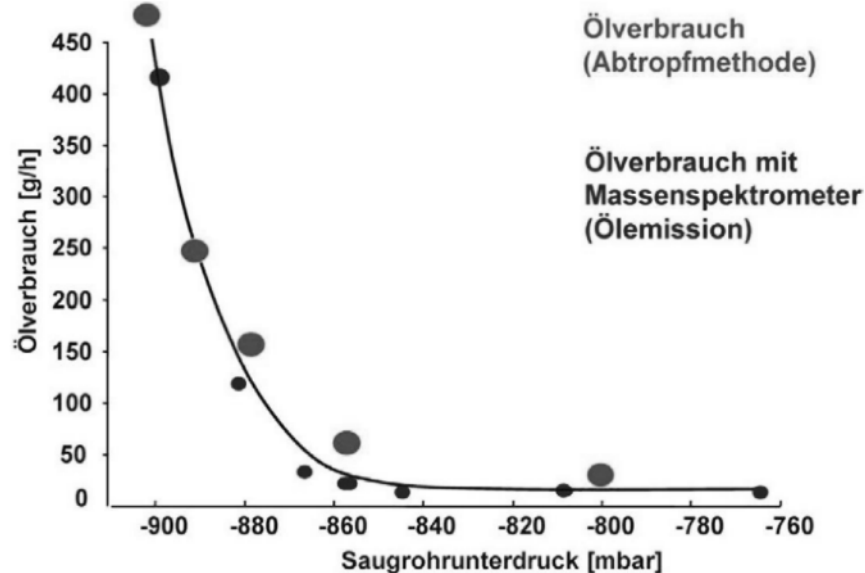


Abbildung 2.9: Einfluss des Saugrohrunterdrucks im Schub auf den Ölverbrauch und die Ölemission in einem transienten Schub-Last-Zyklus [157]

Die Zylinderverzüge und die Beschaffenheit der Oberfläche durch die Art der Honung bilden beim Kurbelgehäuse die Haupteinflussparameter auf die Ölemission. Eine Spiralgleithonung zeigt im Vergleich zu einer Plateauhonung bei Untersuchungen am Dieselmotor von Hoen et al. [153] durch die reduzierten Kernrautiefen und Riefenbreiten

über die Laufzeit geringere Ölverbräuche. Robota et al. [154] haben bei Untersuchungen von verschiedenen Honvarianten (Plateau-, Spiralgleit-, Lasertaschen- sowie glatter, unstrukturierter Normal-Honung) einen unterschiedlichen Einlaufeffekt in Bezug auf den Ölverbrauch festgestellt. Die Spiralgleit-, Lasertaschen- und die unstrukturierte glatte Normal-Honung zeigen fast kein Einlaufverhalten und einen gleichbleibend sehr geringen Ölverbrauch, das heißt circa 70 bis 80 % Ölverbrauchsreduktion. Gohl et al. [155] konnten ein vergleichbares Verhalten der Ölemissionsreduktion mit glatteren Laufbahnoberflächen messen, die sich auch über die Motorlaufzeit mit einem verbesserten Einlaufverhalten zeigt. Der Einfluss der Zylinderverzüge auf die Ölemission wurde von Rehr [140] untersucht und dabei eine Ölemissionsminderung durch geringere Zylinderverzüge ermittelt. Bei erhöhtem Verschleiß im Zwickelbereich des Zylinderrohrs kann es zu einer Erhöhung des Blow-by-Stroms und des Ölverbrauchs kommen [156].

2.3 Chemische und physikalische Eigenschaften der Betriebsstoffe

2.3.1 Motoröl

Die physikalischen Eigenschaften des Öls wie Volatilität und Viskosität stehen über den Ölverbrauchsmechanismus Abdampfen (siehe Kapitel 2.2.2.2) in direktem Zusammenhang mit dem Ölverbrauch. Die Charakterisierung des Öls anhand der Volatilität und der Viskosität wird im Folgenden genauer betrachtet.

Die Volatilität des Öls kann durch eine simulierte Destillation (ASTM D6417) beschrieben werden, wobei allgemein das verdampfte Volumen bei 371 °C zur Bewertung der Ölvolatilität verwendet wird. Die Methode nach Noack (ASTM D5800) wird ebenfalls im Labor eingesetzt, um die Ölvolatilität zu beschreiben. Im Zusammenhang mit Ölverbrauch wird die Eignung der Methode nach Noack diskutiert, da die Ölfilmstärken in dem Noack-Versuch mit circa 3 cm deutlich über denen im Motor liegen (1 - 10 μ m) [123]. Untersuchungen mit niedrigviskosen Ölen (0W-12) von Paoloni et al. [158] haben eine lineare Korrelation zwischen der Ölemission und der Volatilität nach Noack im mittleren Leistungsbereich eines Motors ergeben. Die leichtflüchtigen Anteile (die ersten 40 % des verdampften Volumens) haben nach Simulationsrechnungen von Yilmaz et al. [123] einen Ölverbrauchsanteil durch Abdampfen von circa 95 % und damit einen großen Einfluss auf das Abdampfverhalten des Motoröls.

Die Viskosität des Öls ist nach Yilmaz [114] ausschlaggebend für den Öltransport im oberen Ringfeldbereich und somit für den Öltransport in den Brennraum. Die kinematische Viskosität wird als Größe für den Öltransport resultierend aus Massenträgheit, Gaskräften und der Kolbenringbewegung herangezogen. Untersuchungen von Hadler et

al. [159] (unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit) zeigen im Schubbetrieb des Motors erhöhte Partikelkonzentrationen beim Betrieb mit einem Öl der Viskositätsklasse SAE 20 (kinematische Viskosität bei 100 °C: $KV_{100} = 8,1 \text{ mm}^2/\text{s}$) im Vergleich zu SAE 40 (kinematische Viskosität bei 100 °C: $KV_{100} = 14,0 \text{ mm}^2/\text{s}$) mit steigender Tendenz zu höheren Drehzahlen. Die Beurteilung des Öltransports im Kolbenring-Zylinderwand-Kontakt beziehungsweise auf der Zylinderwand wird anhand der HTHS-Viskosität durchgeführt (High Temperature High Shear). Beim Vergleich von zwei Ölen zeigt sich, dass das Abdampfverhalten eines synthetischen Öls mit geringerer Volatilität niedriger ist als bei einem mineralbasierten Öl [123]. Bei Untersuchungen von Froelund et al. [112, 160] wird durch Verwendung von synthetischem Öl im Vergleich zu mineralischem Öl eine Partikelreduktion von 18 % ermittelt. Dabei wird auch festgestellt, dass eine Erhöhung der Ölviskosität eine größere Partikelreduktion ermöglicht als eine Reduzierung der Volatilität des Öls. Eine Partikelreduzierung am Dieselmotor durch Verwendung von synthetischem Öl wird auch von Gligorijevic et al. [161] gemessen. Wang et al. [162] untersuchen den Öleinfluss auf das Partikelspektrum durch Abdampfen von verschiedenen Flüchtigkeitsbereichen des Öls. Je nach Betriebspunkt können leichtflüchtige Ölanteile einen erheblichen Einfluss auf die Partikelemission haben, wobei der Einfluss von Öladditiven nicht weiter betrachtet wird. Weitere Untersuchungen durch Premnath et al. [163] bezüglich Aschegehalt und Volatilität verschiedener Öle zeigen einen Einfluss auf die Partikelemissionen. Die Additivierung des Öls kann ebenfalls Einflüsse auf die Partikelemissionen haben, meist in Form von metallischer Asche, wobei insbesondere Kalzium als Partikelbildner vermutet wird [63].

2.3.2 Kraftstoff

Price et al. [164] führen einen Kraftstoffvergleich mit Iso-Oktan (C_8H_{18}) und Toluol ($C_6H_5CH_3$) durch. Der Motorbetrieb mit dem Aromaten Toluol zeigt stark erhöhte Partikelemissionen und eine höhere Sensitivität bezüglich der Verstellung des Einspritzbeginns beziehungsweise des Zündzeitpunkts und der Gemischanfettung. Die Auswirkung von Aromaten in Form erhöhter Partikelemissionen weisen Dageförde et al. [165] im Katalysatorheizen mit Alkylatkraftstoff und Toluol sowie Zhu et al. [166] auf dem Rollenprüfstand im WLTC nach. In den Untersuchungen von Dageförde [167] und Bertsch [32] werden Alkylatkraftstoffe verwendet. Der Kraftstoff mit mehr schwersiedenden Kraftstoffkomponenten emittiert hier leicht erhöhte Partikelemissionen. Kraftstoffe mit biogenen Anteilen (Oxygenate) wie Ethanol und Butanol lassen durch den im Kraftstoff gebundenen Sauerstoff und geringeren Kohlenstoffanteil eigentlich auf eine geringere Partikelemission [168 bis 170] schließen, jedoch können bestimmte Betriebspunkte durch Kraftstoffeigenschaften wie geringerer Heizwert, höhere Siedelinie, Oberflächenspan-

nung und Viskosität negative Effekte durch Zylinderwandbenetzung im Katalysatorheizbetrieb hervorrufen. Stalp et al. [171] untersuchen Kraftstoffe mit einem Ethanolgehalt zwischen 5 und 75 %, wobei eine signifikante Partikelreduktion durch einen höheren Ethanolgehalt beobachtet wird.

Leach et al. [172] variieren den Aromatenanteil im Kraftstoff von 0 bis 100 % und stellen einen linearen Zusammenhang zu den Partikelemissionen fest. Die Kraftstoffspezifikationen DIN EN 228 [173] lässt einen Aromatenanteil von maximal 35 Volumen-% zu und ermöglicht damit eine große Varianz in Bezug auf die Partikelemission. Ein spezieller EU5 Referenzkraftstoff (CEC RF-02-08 Spezifikation) für Emissionsuntersuchungen engt beispielsweise den Aromatenanteil auf 29 bis 35 % ein. Bei zwei untersuchten EU5 Referenzkraftstoffen liegt in den Partikelanzahlemissionen ein Unterschied von bis zu einem Faktor 2 [174, 175]. Schwerflüchtigere Aromaten stellen sich dabei als partikelemissionskritischer dar als leichtflüchtigere Aromaten [101]. Steimle et al. [176] messen im NEFZ mit EU5 ROZ 95 Referenzkraftstoff mit schlechterem Verdampfungsverhalten im Vergleich zu ROZ 98 um einen Faktor 3 höhere Partikelanzahlemissionen.

Ein hoher Olefingehalt im Kraftstoff kann Verkokung von Injektoren und Ventilen hervorrufen, deren Ablagerungen dann zu höheren Partikelemissionen führen [168]. Der Olefingehalt zeigt ansonsten generell eine geringere Sensitivität hinsichtlich Partikelemissionen als der Aromatengehalt; hierbei bilden Aromaten schneller polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe als Olefine [177].

Oxygenate wie Dimethylcarbonat (DMC) oder Methylformiat (MeFo) bieten als alternative Kraftstoffe interessante Eigenschaften bezüglich der Partikelanzahlemissionen, die extrem gering ausfallen können. Mit Methylformiat wurden sogar Partikelemissionen unterhalb der Umgebungskonzentration gemessen. Hierbei spielt der hohe Sauerstoffgehalt eine Rolle, der die Oxidation unterstützt, ebenso wie die fehlenden direkten C-C-Bindungen, die eine rußarme Verbrennung ermöglichen. Die sehr niedrige Siedetemperatur von MeFo bei 31,5 °C ist eine gute Voraussetzung für eine optimale, schnelle Verdampfung im Brennraum nach dem Einspritzen. Der untere Heizwert von MeFo (ca. 16 MJ/kg) ist durch den gebundenen Sauerstoff deutlich geringer als bei handelsüblichem Ottokraftstoff (ca. 42 MJ/kg). Dies würde eine Anpassung der Einspritzsysteme und Bedatung erfordern, wenn MeFo als Reinstoff in bisherigen Serienfahrzeugen eingesetzt werden sollte [178, 179].

Generell ist ein hoher Dampfdruck beziehungsweise eine niedrige Siedelinie des Kraftstoffs in Kombination mit geringem Aromatenanteil als vorteilhaft für eine Partikelemissionsreduktion zu bewerten [32, 166, 177, 180]. Die Untersuchung durch Tanaka et

al. [177] von drei Kraftstoffen zeigt, wie in Abbildung 2.10 dargestellt, sehr deutlich den Zusammenhang zwischen geänderter Kraftstoffcharakteristik und Partikelemissionsverhalten für Partikel ≥ 23 nm.

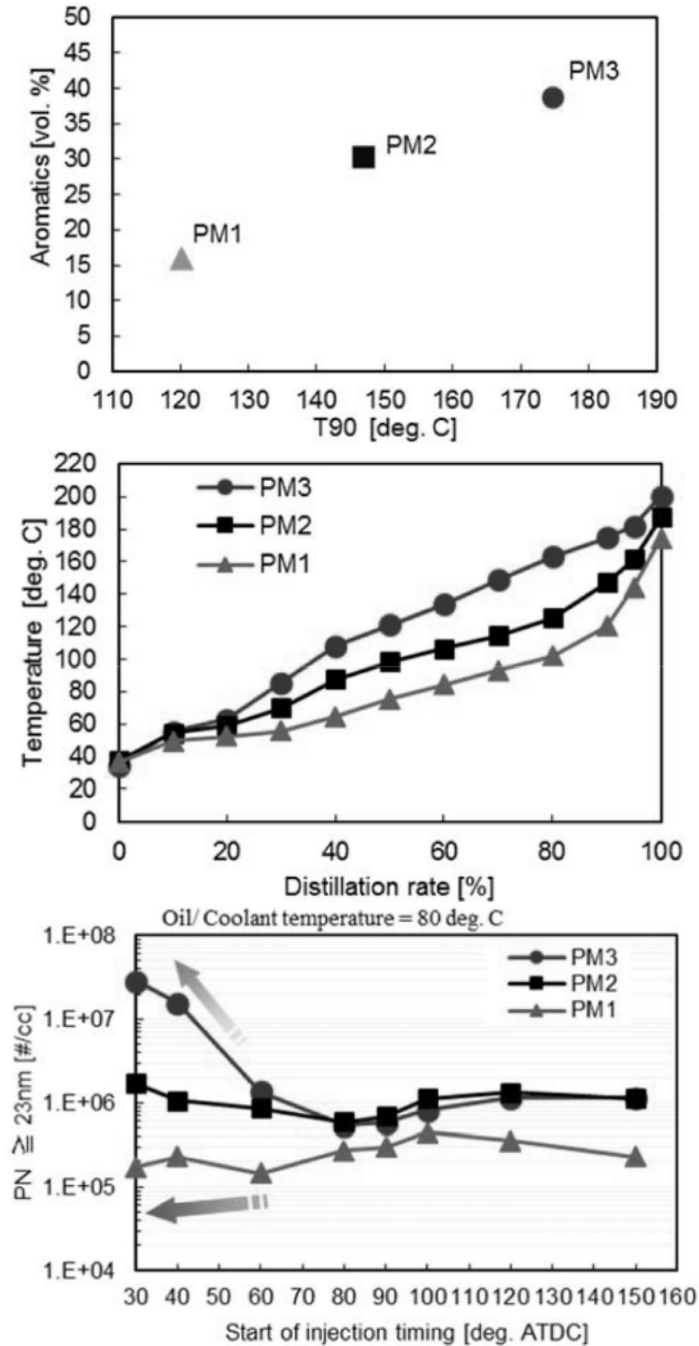


Abbildung 2.10: Vergleich von drei Kraftstoffen (PM1, PM2 und PM3) bezüglich Kraftstoffeigenschaften und deren Partikelemissionsverhalten [177]

Die drei Kraftstoffe werden im Diagramm als PM1, PM2 und PM3 bezeichnet und haben jeweils unterschiedliche Aromatenanteile (Aromatics) von 15 (PM1), 30 (PM2) und 40 Volumen-% (PM3). Daraus ergeben sich unterschiedliche Siedelinien (Distillation rate), hier mit der Temperatur T90 aufgetragen, bei der 90 % des Kraftstoffs verdampft sind. Aus der Siedelinie ist ersichtlich, dass der Kraftstoff PM1 leichtflüchtiger als der Kraftstoff PM2 beziehungsweise der Kraftstoff PM3 ist. Der geringere Aromatenanteil sowie die leichtflüchtigere Charakteristik des Kraftstoffs PM1 führt zu einer signifikant geringeren Partikelemission bei Variation des Einspritzbeginns im Vergleich zu den schwerflüchtigeren Kraftstoffen PM2 beziehungsweise PM3.

2.4 Wesentliche bekannte Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Bisherige Untersuchungen der Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen waren auf den Dieselmotor und dabei meist auf die beim Dieselmotor kritische Partikelmassemission fokussiert [63, 108, 181, 182]. Bereits Untersuchungen von Maurer [183] am Dieselmotor brachten erhöhte Partikelmassemission mit erhöhtem Ölverbrauch in Verbindung. Die im Folgenden beschriebenen Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen beziehen sich, wenn nicht gesondert erwähnt, auf Erkenntnisse aus dem Bereich des Ottomotors.

Wulff [184] ermittelt durch Öleinbringung mit einer kolbenseitig angebrachten Kapillare in den Zwischenringbereich des ersten und zweiten Kompressionsrings im Schubbetrieb eine Erhöhung der Öl-, Kohlenwasserstoff- und Partikelemissionen in Abhängigkeit des Saugrohrdrucks. Untersuchungen von Lensch-Franzen et al. [185] (unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit) zeigen im befeuerten Motorbetrieb eine signifikante Erhöhung der Öl- und Partikelemissionen durch die Öleinbringung in den Zwischenringbereich von erstem und zweitem Kompressionsring („during oil injection“) im Vergleich zum Emissionsniveau vor („pre oil injection“) und nach („post oil injection“) der Öleinbringung (vergleiche Abbildung 2.11). Die Partikelgrößenverteilung weist im Bereich der Nukleationspartikel eine Erhöhung der Partikelkonzentration auf, die sich auf das eingebrachte Öl zurückführen lässt. Den Einfluss des Öls aus der Kurbelgehäuseentlüftung durch Ölzuführung in das Saugrohr untersucht Knissel [186] und zeigt ebenfalls stark erhöhte Öl-, Kohlenwasserstoff-, Partikelmasse- sowie Partikelanzahlemissionen. Den Zusammenhang von Öl- und Partikelemissionen im stationären und dynamischen Motorbetrieb untersuchten Gunkel et al. [136] an zwei Motoren, wobei sich bei der dynamischen Bewertung der Partikel- und Ölemissionen eine starke Korrelation zeigte. Der Ölverbrauchsmechanismus „Abdampfen“ zeigt dabei keinen erkennbaren Beitrag zur

Partikelemissionsänderung. Bei der Betrachtung von verschiedenen Motorbauteilen haben Robota et al. [154] je nach Honung signifikante Einflüsse der Zylinderhonung auf den Ölverbrauch ermittelt, mit 70 - 80 % Reduktion und verbunden mit einer Reduzierung der Partikelmasse (betriebspunktabhängig im Bereich von 20 - 50 %). Ein Turbo-lader mit Ölleckage kann nach Kapus et al. [91] zu einer deutlichen Erhöhung der Partikelanzahl beitragen. Selbst beim Betrieb eines Motors mit Wasserstoff, der eigentlich partikelfrei verbrennen sollte, können weiterhin Partikelemissionen gemessen werden, die auf das Motoröl zurückzuführen sind [51].

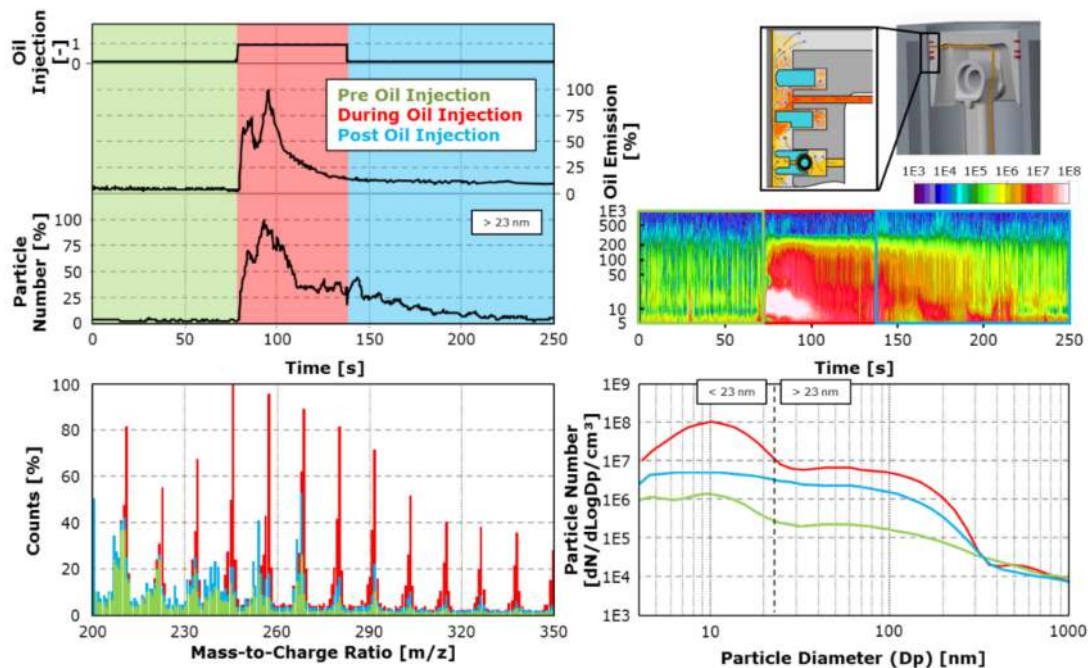


Abbildung 2.11: Emissionseinfluss der Öleindosierung im Zwischenringbereich [185]

Bei Untersuchungen eines Dieselmotors im NEFZ durch Bergmann [188] unterscheidet sich die Partikelgrößenverteilung von Schub- und Beschleunigungsphasen im Nukleations- und Akkumulationsmodus, wie in Abbildung 2.12 dargestellt. Im Schub ohne Verbrennung überwiegen die Nukleationspartikel, hingegen zeigen die Lastphasen hauptsächlich Partikel im Akkumulationsmodus. Karjalainen [48] konnte dieses Verhalten auch beim Ottomotor mit Direkteinspritzung nachweisen. Zusätzlich zur Partikelgrößenverteilung wurden Analysen mittels Transmissionselektronenmikroskopie an Partikeln aus Filtermessungen im NEFZ sowie in einem stationären Hochlastpunkt durchgeführt. Dabei wurden Aschebildner aus den Öladditiven (Zink, Phosphor und Calcium) für die NEFZ-Messungen nachgewiesen; im Stationärpunkt hingegen konnten keine dieser Elemente ermittelt werden. Straßenmessungen von Karjalainen et al. [50] und Rönkkö et al. [49] weisen ebenso auf Öleinflüsse in den Schubphasen hin und bestätigen

damit die Rollenprüfstandsuntersuchungen im NEFZ. Dageförde [44] beobachtete eine Änderung in der Partikelgrößenverteilung im Nukleationsbereich der Partikel beim Vergleich eines Mehrlochinjektors mit einer A-Düse (vergleiche Abbildung 2.13), die sich mittels optischer Messtechnik auf eine Wandbenetzung und eventuell auf eine Kraftstoffbenetzung des Einlassventils zurückführen lässt. Auf Grundlage von Filtermessungen und einer folgenden Analyse mittels Gaschromatograph mit höheren löslichen organischen Anteilen (SOF) wird ein Öleintrag in den Brennraum durch Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion als Ursache vermutet.

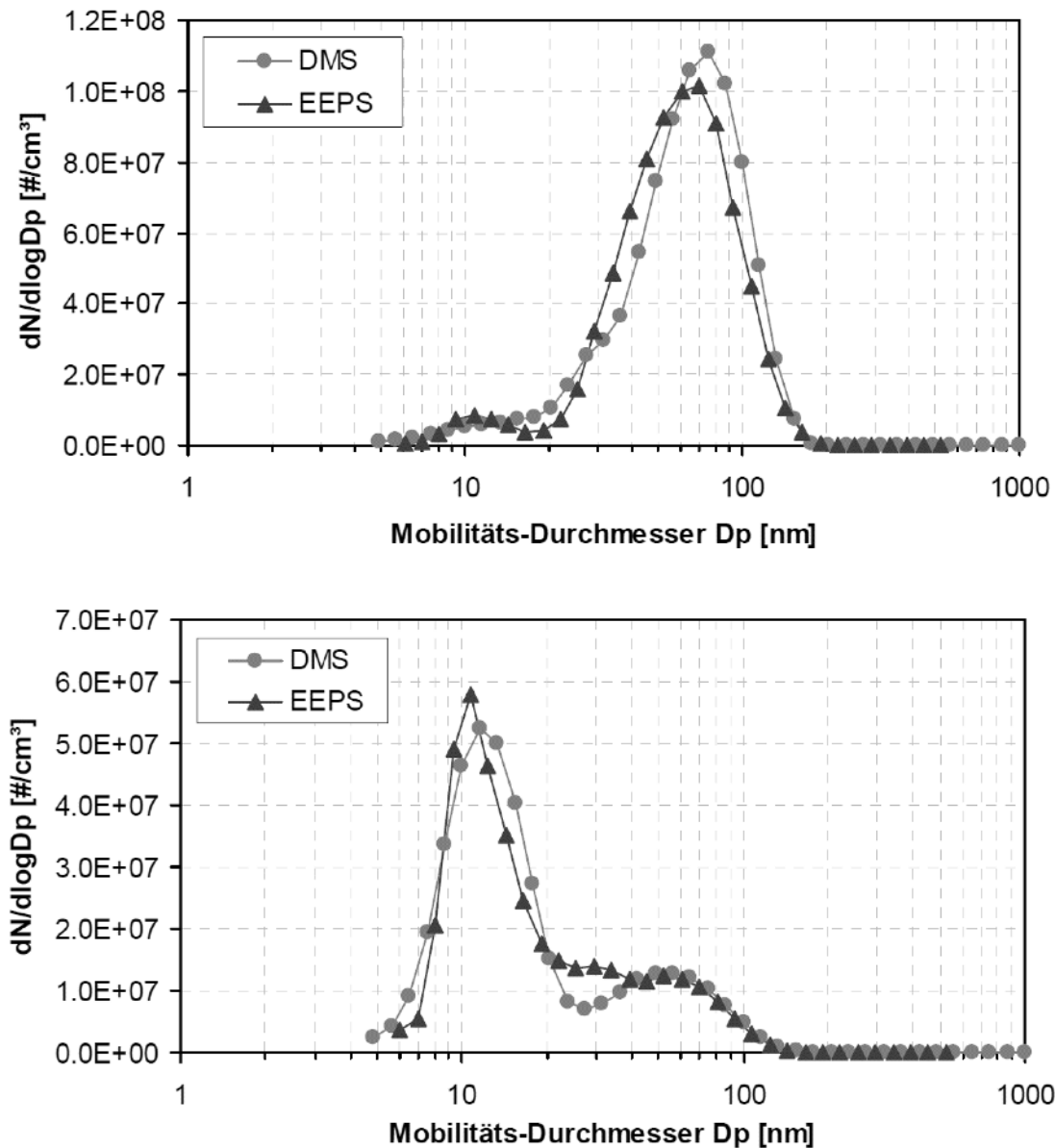


Abbildung 2.12: Vergleich der mittleren Partikelgrößenverteilung im NEFZ in Beschleunigungs- (oben) und Schubphasen (unten) am Dieselmotor [188]

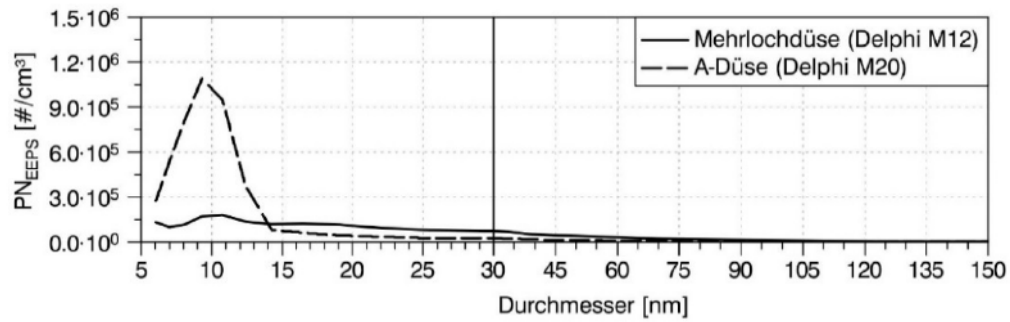


Abbildung 2.13: Partikelgrößenverteilung für Mehrloch- und A-Düse im Katalysatorheizen [44]

Abbildung 2.14 zeigt die Ergebnisse von Messungen mit Ölinjektion in einem mit Diesel betriebenen Brenner und Messung der Aschebelastung in Verbindung mit der Partikelgrößenverteilung. Dabei konnte ein Anstieg der Partikelkonzentration, insbesondere im Bereich 2 - 5 nm ermittelt werden, der sich mit den Aschebildnern wie Magnesium, Schwefel, Phosphor, Kalzium, Bor und Zink aus dem Öl korrelieren lässt [189].

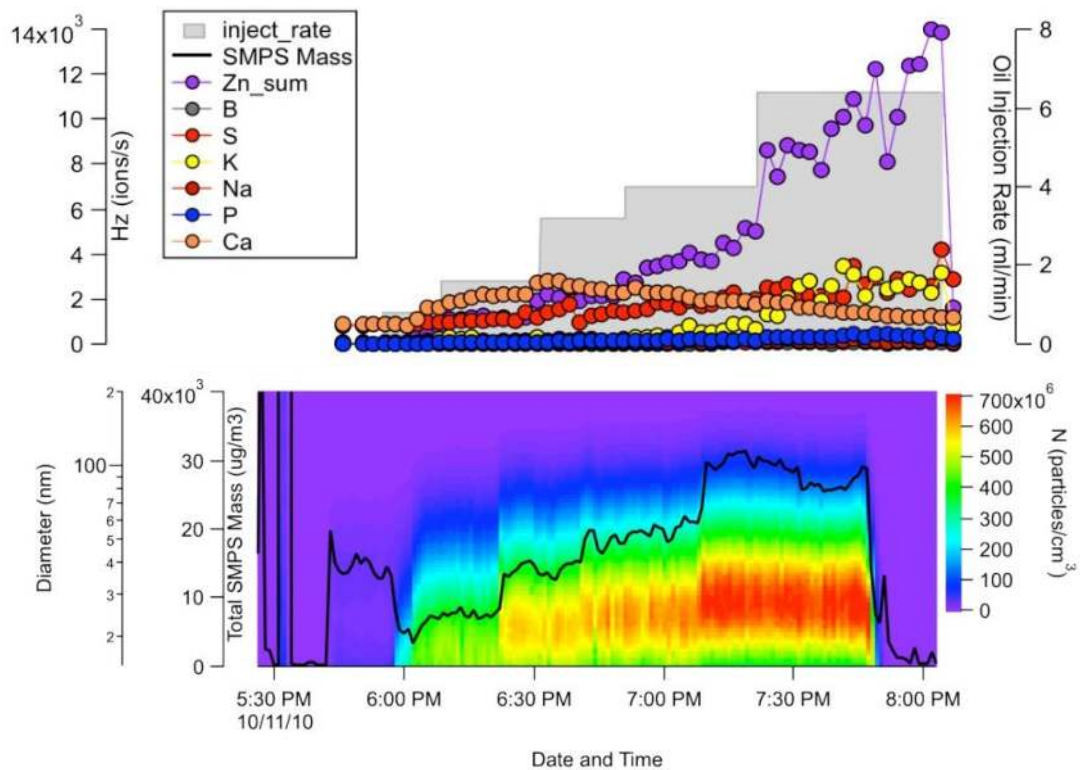


Abbildung 2.14: Öleindosierung, Aschebelastung und Partikelgrößenverteilung in einem Grundlagenversuch bei einem mit Diesel betriebenen Verbrenner [189]

Bei Rollenprüfstandsuntersuchungen wurde von Czerwinski et al. [190] dem Kraftstoff 2 % Öl mit vergleichbarer Viskosität, aber einmal mit hohem Anteil an Aschebildnern

und einmal mit niedrigem Anteil an Aschebildnern zugesetzt, um einen erhöhten Ölverbrauch zu simulieren. Die Vorgehensweise, Öl dem Kraftstoff zuzusetzen und dies als repräsentativ für einen erhöhten Ölverbrauch zu werten, muss unter dem Gesichtspunkt der verschiedenen Ölverbrauchsmechanismen allerdings in Frage gestellt werden. Durch die Zugabe von Öl ändert sich die Verdampfungskurve des Kraftstoffs und hierdurch die Gemischbildung; mit den im Motor bekannten Ölverbrauchsmechanismen ist dies nicht gleichzusetzen. Die gemessenen Partikelanzahlemissionen lagen bei den mit Öl versetzten Kraftstoffen um den Faktor 100 höher als beim Kraftstoff ohne Öl. Im Partikelspektrum zeigt sich eine signifikante Erhöhung der Nukleationspartikel bei den Kraftstoffen mit Öl. Die gleiche Beobachtung machen Jung et al. [191, 192] an einem Dieselmotor. Die Bildung von Nukleationspartikeln wurde ebenso durch Dieselkraftstoff mit 2 % Öl und damit durch Zugabe von metallischer Asche enorm verstärkt, wobei ein ähnlicher Effekt durch Zugabe von 100 ppm Cerium erreicht wird. Untersuchungen von Spencer et al. [193] lassen auf einen signifikanten Anteil unverbrannten Öls an den Partikelemissionen schließen.

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

3.1 Wirkmechanismen und Einflussparameter auf die Öl- und Partikelemissionen

3.1.1 Zusammenfassung und Strukturierung der Einflussparameter

Aus Kapitel 2 lassen sich zusammenfassend die in Tabelle 3.1 dargestellten Einflussparameter auf die Öl- und Partikelemissionen ableiten. Eine grobe Klassifizierung der beschriebenen Einflussgrößen kann dabei in motorische Betriebsrandbedingungen, Betriebsstoffe, Motormechanik und Applikation erfolgen. Weiterhin wird die Tabelle um eine Zuordnung zu bekannten Einflüssen auf die Partikelemission (PN/PM) und den Ölverbrauch beziehungsweise die Ölemission (Öl) auf Basis der in Kapitel 2 genannten Literatur ergänzt. Dabei ist anzumerken, dass ein Großteil der Untersuchungen sich nur mit einem Themenkomplex, also entweder Ölverbrauch und Ölemission oder Partikelemission, befasst. Aus der Zuordnung zu Partikelanzahlemissionen und Öl ist ersichtlich, dass von den 46 gelisteten Einflussparametern 31 Parameter Zusammenhänge mit Partikelemissionen und 27 Parameter Zusammenhänge mit Ölverbrauch und Ölemission zeigen, wobei 12 Einflussparameter und damit circa 25 % sowohl für Partikelemissionen als auch Ölverbrauch und Ölemission in den verschiedenen Veröffentlichungen zuzuordnen sind.

3.1.2 Kohlenwasserstoffeintrag in den Brennraum und Partikelentstehung

In Abbildung 3.1 sind die Mechanismen des Kohlenwasserstoffeintrags in den Brennraum durch das Öl und den Kraftstoff über den Kurbelwinkel nach Hadler et al. [52] (unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit) und Hopp [79] schematisch dargestellt, wobei die zeitliche Zuordnung als qualitativ zu betrachten ist; diese orientiert sich an den in Kapitel 2 erläuterten Mechanismen. Die Kraftstoffeinbringung in den Brennraum kann in der Ansaugphase über zurückgeführtes Blow-by sowie über die Kraftstoffeinspritzung in den Einspritzarten „homogen“ und „homogen-split“ erfolgen. Bei der homogen-split Einspritzung erfolgt eine Kraftstoffeinbringung auch in der Kompressionsphase. Darüber hinaus kann es zu Adsorptionsvorgängen des Kraftstoffs in das Motoröl am Zylinder durch Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion kommen.

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

Tabelle 3.1: Klassifizierung der bekannten Einflussparameter auf Öl- und Partikelemissionen aus der in Kapitel 2 zusammengefassten Literatur

Parameter		PN/PM	Öl	
Betriebsrandbedingungen	Ablagerungen	Injektor	x	
		Kolben	x	
		Saugstrecke	x	
		Abgasrückführung	x	
	Motorbetrieb	stationär	x	x
		dynamisch/transient	x	x
	Temperaturen	Ansauglufttemperatur	x	
		Kraftstofftemperatur	x	
		Kühlwassertemperatur	x	x
		Öltemperatur	x	x
Bauteiltemperatur		x	x	
Betriebsstoff	Öl	Basisöl	x	x
		Additivierung	x	x
		Viskosität		x
		Volatilität	x	x
	Kraftstoff	Siedeverlauf	x	
		Aromatengehalt	x	
		Olefingehalt	x	
		Oxygenatgehalt	x	
Applikation	Einspritzung	Einspritzzeitpunkt	x	
		Einspritzdruck	x	
		Einspritzstrahlgeometrie	x	
		Luft-Kraftstoff-Verhältnis	x	x
		Anzahl der Einspritzungen	x	
		Einspritzart	x	x
	Steuerzeiten	x		
	Zündzeitpunkt	x		
	Ladungsbewegung	x	x	
	Saugrohrdruck im Schub		x	
Öldruck		x		
Mechanik	Verschleißzustand			x
	Kurbelgehäuseentlüftung			x
	Ventilschaftdichtungen			x
	Turboladerdichtungen			x
	Kurbelgehäuse	Honstruktur	x	
		Steifigkeit	x	
		Zylinderverzüge	x	
	Kolbenringe	Ringhöhe		x
		Stoßspiel		x
		Laufflächengeometrie		x
		Tangentialkraft		x
	Kolben	Ölrücklaufbohrungen		x
		Ölrückhaltevolumen		x
		Gasdämpfungsvolumen		x
Kolbenspritzdüsen	Spritzbild		x	
	Öffnungsverhalten	x	x	

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

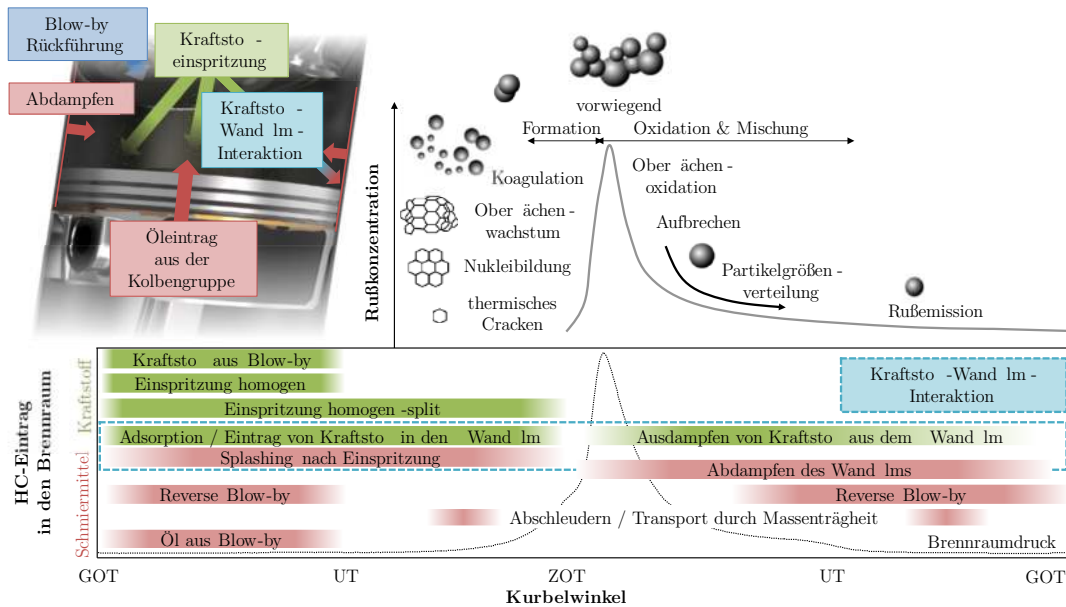


Abbildung 3.1: Kohlenwasserstoffeintrag in den Brennraum und Mechanismen der Rußentstehung; mit Anpassungen übernommen von Hadler et al. [52] und Hopp [79]

Je nach Brennraumdruck und Brennraumtemperatur liegt ein Abdampfen des Kraftstoffs aus dem Wandfilm nach dem Zünd-OT vor, was sich bis in die Ausschiebephase ziehen kann. Das Kraftstoffspray kann auch zur Bildung von Sekundärtropfen („Splashing“) des Motoröls in der Ansaug- und Kompressionsphase führen [194]. Weiterhin kann das Motoröl aus dem Blow-by in den Brennraum zugeführt werden. Je nach Druckverhältnis zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse tritt in der Ansaugphase oder auch der Ausschiebephase Reverse Blow-by auf. Ein Kohlenwasserstoffeintrag durch Abschleudern des Öls oder ein Transport des Öls in den Brennraum durch Massenkräfte zeigt sich hauptsächlich in Phasen der Beschleunigungsumkehr bei Aufwärtsbewegung des Kolbens. Ein Abdampfen des Ölfilms entsteht hauptsächlich nach Zünd-OT.

Die in den Brennraum eingebrachten Kohlenwasserstoffe können durch die Verbrennung zu Ruß- und sonstigen Verbrennungsprodukten umgewandelt werden oder auch als flüchtige Partikel den Brennraum in Richtung Abgastrakt verlassen. Die Rußentstehung (vergleiche Kapitel 2.1.2) wird in die beiden Bereiche vorwiegender Bildung sowie der Oxidation und Mischung unterschieden. Werden Kohlenwasserstoffe in einer späten Phase nach Zünd-OT in den Brennraum zugeführt, können diese gegebenenfalls nicht mehr vollständig oxidiert werden und werden folglich nur teiloxidiert oder gar nicht mehr oxidiert und ausgeschoben. Aus den dargestellten Zusammenhängen lässt sich ableiten, dass der Zeitpunkt der Einbringung des Kraftstoffs und des Öls in den Brennraum ausschlaggebend für die entstehende Abgasemission verantwortlich ist.

3.2 Messtechnikkombination zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

3.2.1 Ölemission mittels Time-of-Flight-Massenspektrometer

Durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) wurde eine Messtechnik auf Basis eines Quadrupol-Massenspektrometers zur zeitlich hochaufgelösten Messung von unverbrannten Ölbestandteilen (Ölemission, siehe Kapitel 2.2.1) im Abgas ohne zusätzliche Tracer entwickelt [104, 105, 128, 129, 195]. Aus der schematischen Darstellung in Abbildung 3.2 können die Hauptkomponenten des Massenspektrometers entnommen werden. Über ein beheiztes Direkteinlasssystem wird das Messgas in ein Hochvakuum überführt. Dort erfolgt zunächst eine Ionisierung. Das Hochvakuum dient dabei zur Verhinderung von Kollisionen der ionisierten Teilchen. Anschließend werden die Ionen dem Massenanalysator zugeführt. Dort wird das Analysegas durch einen Quadrupol in seine Massenbestandteile gefiltert. Dies ermöglicht eine Aufteilung der Gesamt-Kohlenwasserstoffe im Abgas in Kraftstoff- und Ölanteile. Das Time-of-Flight-Massenspektrometer (TOF-MS) LUB360 der Firma Lubrisense GmbH [196] ist eine Weiterentwicklung mit höherer Nachweisgrenze, basierend auf dem mit FVV-Förderung entwickelten Messverfahren zur Detektion der Ölemission. Dabei wird die Messtechnik als Tandem-Massenspektrometer betrieben, das heißt hinter dem Quadrupol-Massenfilter wird noch eine Kollisionszelle und ein Flugzeit-Massenfilter (Time-of-Flight; TOF) zur Trennung genutzt. Die TOF-Trennung nutzt die unterschiedliche Flugzeit der Ionen verschiedener Masse, wobei die leichteren Teilchen schneller fliegen als die schwereren [197, 198] und dabei „die Masse eines Ions proportional dem Quadrat ihrer Flugzeit“ [199] ist. Nach der Trennung der ionisierten Teilchen erreichen diese den Detektor.

Zur Darstellung des Massenspektrums werden die Massen auf der Abszisse aufgetragen und mit einer als dimensionslos definierten Größe m/z versehen [200]. Der Abbildung 3.3 sind die Massenbereiche und deren Zuordnung zu entnehmen. Im Bereich $< 65 m/z$ (Masse-zu-Ladungsverhältnis) liegen anorganische Komponenten aus der Luft (Stickstoff $N_2 = 28 m/z$ und Sauerstoff $O_2 = 32 m/z$) und Verbrennungsprodukte (Kohlendioxid $CO_2 = 44 m/z$), darüber Ottokraftstoff sowie dessen Komponenten Pentan ($C_5H_{12} = 72 m/z$) bis Dodekan ($C_{12}H_{26} = 170 m/z$). Für Ottomotoren wird üblicherweise der Hochpassmassenfilter zur Messung der Ölemission auf $> 170 m/z$ eingestellt [104]. In den Untersuchungen dieser Arbeit wurde der Hochpassmassenfilter auf den Massenbereich 170 bis 550 m/z angewendet.

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

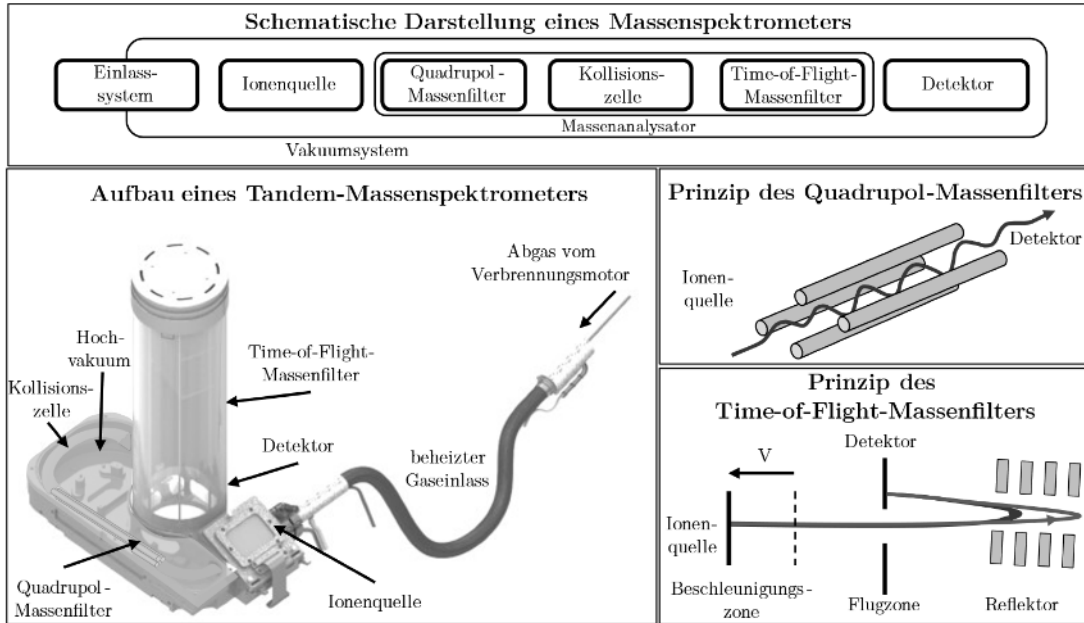


Abbildung 3.2: Messprinzip und Aufbau eines TOF-MS zur Abgasanalyse; mit Anpassungen übernommen aus [201]

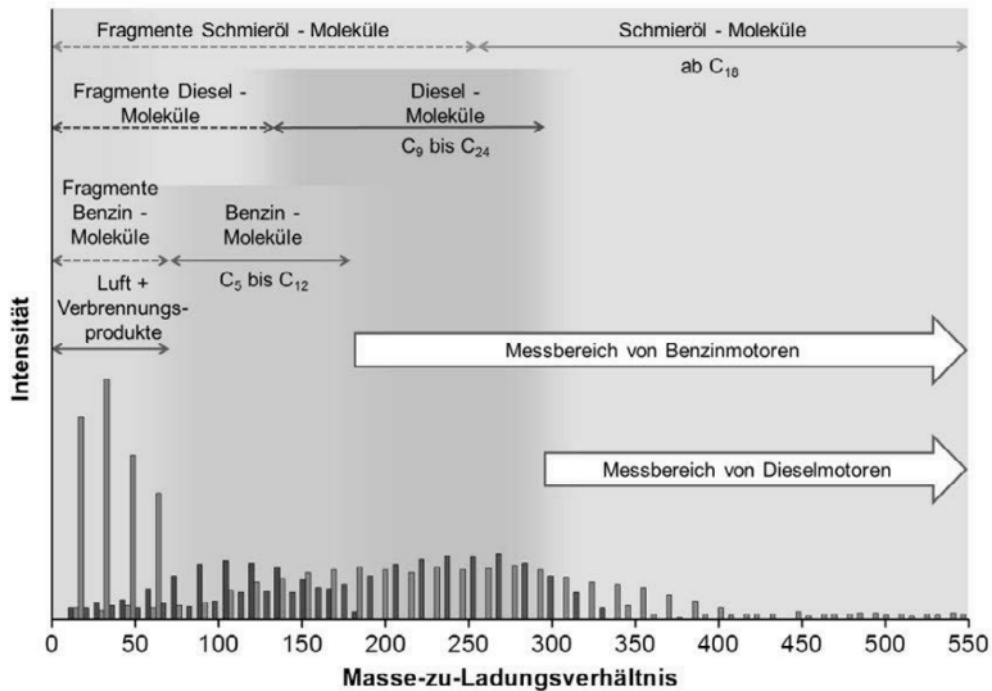


Abbildung 3.3: Massenspektrum und Messbereiche für Otto- und Dieselmotoren [106]

Durch die Ionisierung mit 70 eV im Massenspektrometer werden die Moleküle in ihre Fragmente aufgeteilt. Bei Zugabe eines Reinstoffes wie zum Beispiel Tetrakontan ($C_{40}H_{82} = 562 \text{ m/z}$) zerfällt dieser in seine Bestandteile, wobei das in Abbildung 3.4

dargestellte charakteristische Massenspektrum entsteht. Gleiches gilt für das Abgas, wobei die Zusammensetzung im Abgas wesentlich inhomogener ist und keine Reinstoffe einzeln dem Messsystem zugeführt werden. In Abbildung 3.4 ist erkennbar, dass die eigentlich dem Tetrakontan zugeordnete Masse 562 m/z nur einen geringen Signalanteil generiert, und das Molekül in kleine Fragmente im Bereich < 170 m/z zerfällt. Diese Fragmente können aufgrund des Überschneidungsbereichs mit den Kraftstoffkomponenten nicht als Messsignal genutzt werden. Die einzelnen Signalpeaks sind immer im Abstand von 14 m/z, dies entspricht der Masse eines CH_2 -Radikals und bildet somit das Alkanraaster der Fragmente des Tetrakontan ab. Tetrakontan wird, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, bei Partikelzählern zur Überprüfung der Abscheidung von volatilen Anteilen genutzt und ist somit repräsentativ für schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe, wie sie zum Beispiel aus dem schwerflüchtigen Bereich des Motoröls vorliegen können.

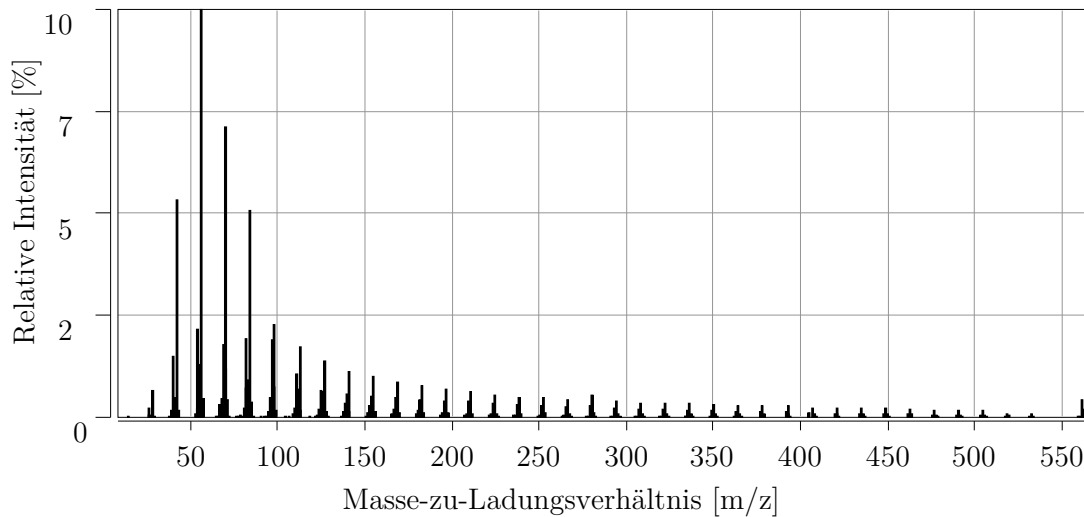


Abbildung 3.4: Massenspektrum mit einer Ionisierungsenergie von 70 eV von Tetrakontan, Daten aus [201]

Die Messtechnik zur Bestimmung der unverbrannten, langkettigen Kohlenwasserstoffe mittels Quadrupol- beziehungsweise Time-of-Flight-Massenspektrometer wurde bereits in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen als Analyseinstrument eingesetzt [53, 106, 115, 128, 129, 139, 147, 149, 155, 187, 201 bis 204].

3.2.2 Partikelanzahlmessung mittels Kondensationspartikelzähler

Zur Rohemissionsmessung der Partikelanzahl nach Turbolader und vor Katalysator wird ein Kondensationspartikelzähler des Typs AVL 489 Particle Counter Advanced eingesetzt. In Abbildung 3.5 ist der schematische Aufbau der Probenahme und Verdünnung aus einem CVS-Tunnel (constant volume sampling) nach UNECE-R83 dargestellt; der CVS-Tunnel kommt bei der Rohemissionsmessung jedoch nicht zu Einsatz. Das

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

Messgas wird zunächst einem Zyklonabscheider (cyclone) zugeführt. Dort werden Partikel mit über 2,5 μm abgeschieden und anschließend in die erste Verdünnungsstufe (PND₁) und den Abscheider für flüchtige Anteile (VPR; Volatile Particle Remover) geleitet. Der VPR muss dabei 99 % der Tetrakontan-Partikel ($\geq 30 \text{ nm}$) bei einer Konzentration $> 10.000 \text{ Partikel/cm}^3$ abscheiden. Beim AVL Partikelzähler ist der VPR als Verdampfer (Evaporation Tube / ET) mit einer Wandtemperatur von 350 °C ausgeführt und muss laut UNECE-R83 im Temperaturbereich 300 - 400 °C betrieben werden. Über die zweite Verdünnungsstufe (PND₂) gelangen die Partikel in den Partikelzähler (PNC; Particle Number Counter).

Das Messprinzip des Kondensationspartikelzählers in Abbildung 3.6 basiert auf einer Streulichtzählung der Partikel. Das Aerosol wird in einen Saturator mit Butanol übersättigt und im Kondensator abgekühlt, hierbei kondensiert das Butanol an den Partikeln und bringt diese somit auf eine durch den Streulichtzähler detektierbare Größe. Der Kondensationspartikelzähler erfasst die Partikel verschiedener Größe mit einer unterschiedlichen Zähleffizienz (vergleiche Abbildung 3.6, rechts). Nach UNECE-R83 ist für $23 \pm 1 \text{ nm}$ eine Zähleffizienz von $50 \pm 12 \%$ und für $41 \pm 1 \text{ nm}$ eine Zähleffizienz von $> 90 \%$ vorgeschrieben. Das bedeutet, dass insbesondere auch kleine Partikel um die 10 nm gegebenenfalls mit detektiert werden können, wie der gestrichelte Verlauf der gesetzlich möglichen Zähleffizienz in Abbildung 3.6 zeigt [206 bis 208].

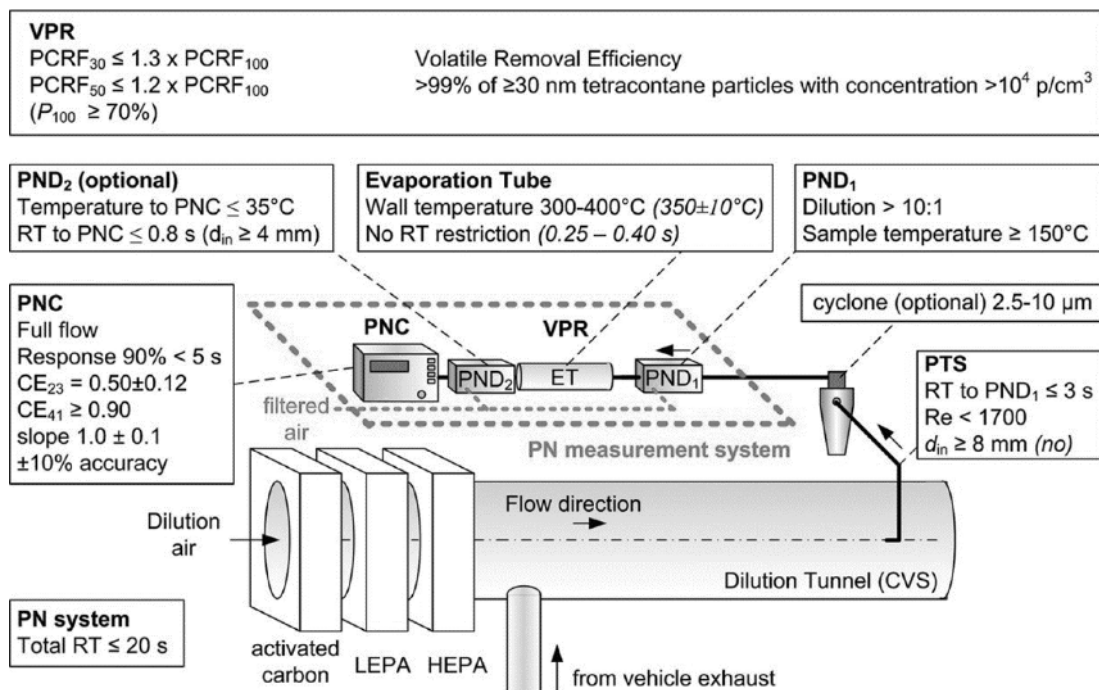


Abbildung 3.5: Partikelanzahlmessung konform nach UNECE-R83 [205]

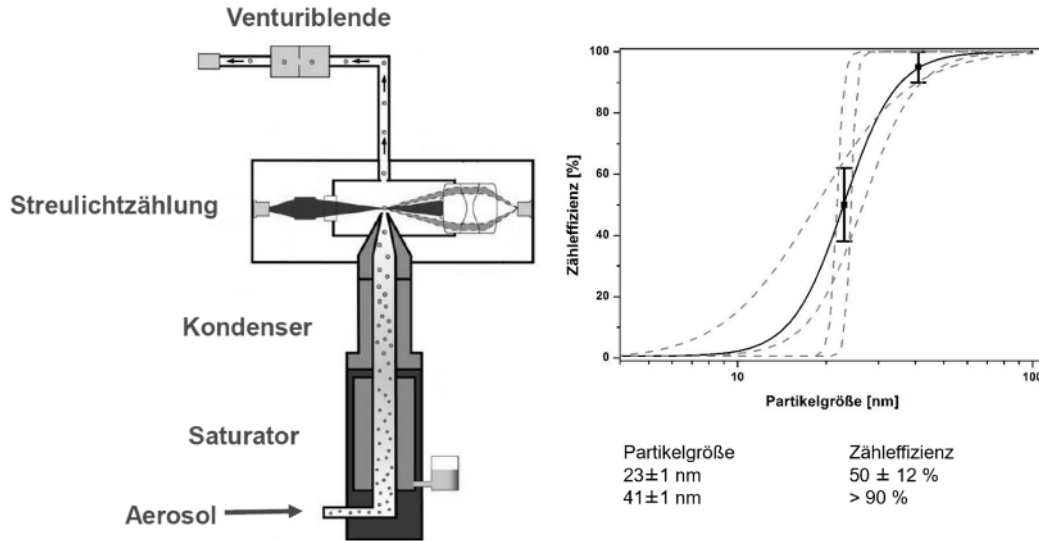


Abbildung 3.6: Schematische Messprinzip-Darstellung eines Kondensationspartikelzählers [209] und die Zähleffizienz über die Partikelgröße [206]

3.2.3 Messung der Partikelgrößenverteilung mittels Elektrometer

Zur Messung der Partikelgrößenverteilung wird ein Partikelspektrometer DMS500 MKII (DMS: Differential Mobility Spectrometer) der Firma Cambustion eingesetzt. Das DMS500 hat wie der AVL Particle Counter Advanced einen Zyklon, um Grobpartikel > 1000 nm abzuschneiden, und darüber hinaus zwei Verdünnungsstufen. Allerdings besitzt das DMS500 keine Vorrichtung, um volatile Partikel abzuschneiden und ermöglicht so auch die Detektion flüchtiger Partikel.

Das zugrunde liegende Messprinzip ist ein Elektrometer. Das Messgas wird, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, über einen unipolaren Hochvolt-Corona-Lader geleitet. Hierbei werden positiv geladene Ionen generiert. Diese werden mit HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter)-gefilterter Druckluft dem Elektrometer zugeführt und anhand ihrer elektrischen Mobilität (siehe Kapitel 2.1.1.1) in Partikelgrößen auf den 22 Elektrometern klassifiziert. Partikel mit einer hohen Ladung gelangen gegen Ende der Messstrecke an den Detektor, kleinere Partikel mit einer geringeren Ladung am Anfang. Der Messbereich für die Partikelgröße beträgt dabei 5 - 1000 nm. Beim Auftreffen auf den Detektor entsteht ein messbarer Strom, der durch die Auswertesoftware entsprechend auf eine gesamte Partikelkonzentration beziehungsweise auf eine logarithmische Normalverteilung [210] im Nukleations- und Akkumulationsmodus umgerechnet wird. Die maximale Aufnahmefrequenz liegt bei 10 Hz [211, 212].

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

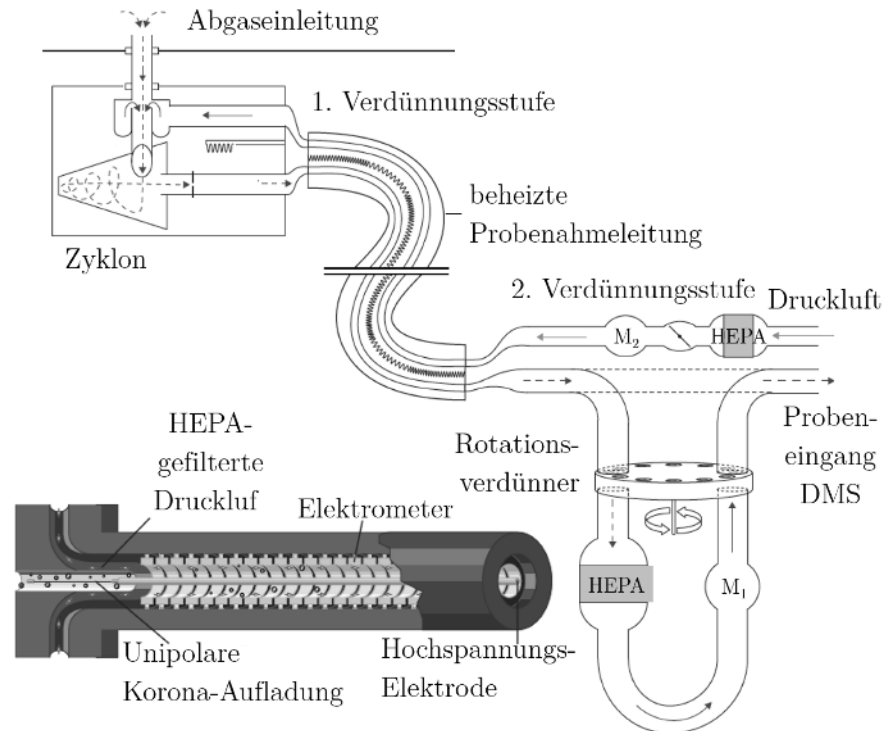


Abbildung 3.7: Probenahme und Messprinzip des Partikelspektrometers Cambustion DMS500 mit Änderungen übernommen aus [186, 211]

3.2.4 Diskussion der Messtechnikkombination

Zur Analyse der Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen wird die Kombination der zuvor vorgestellten Messtechniken im Rohabgas nach Turbolader (vor Katalysator) erprobt, um Einflüsse aus der Motormechnik, der Applikation der Einspritzparameter und der Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion zeitlich aufgelöst zu identifizieren. Würde eine Messung nach Katalysator erfolgen, wäre ein Großteil der Kohlenwasserstoffemissionen aus Kraftstoff und Öl bereits umgesetzt; das würde die Messdateninterpretation und damit Ursachenermittlung deutlich erschweren. Die Partikelanzahlmessung mit dem Kondensationspartikelzähler dient dazu, ein vergleichbares Messprinzip zu den für die Zulassung von Fahrzeugen nötigen Messungen auf dem Rollenprüfstand zur Partikelanzahlbestimmung zu nutzen, da das erfolgreiche Durchlaufen eines solchen Zulassungsverfahrens in den meisten Fällen das Entwicklungsziel darstellt. Mit dem Partikelspektrometer erfolgt eine Charakterisierung der Abgaspartikel bezüglich ihrer Größenverteilung, was Rückschlüsse auf deren Zusammensetzung ziehen lässt. Beispielsweise können Nukleationspartikel eher entstehen, wenn sich volatile Anteile im Probegas befinden. Das TOF-MS wird standardmäßig auf einen Hochpassmassenfilter > 170 m/z eingestellt und misst somit nur die langkettigen, schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe. Das TOF-MS ermöglicht zusätzlich die Analyse der Massenspektren der langkettigen

Kohlenwasserstoffe und kann hierüber Rückschlüsse auf die Ölverbrauchsmechanismen zulassen [201] sowie wichtige Informationen über die Massenverteilung im Abgas liefern.

3.3 Konzeption der Versuchsführung

Bei der Konzeptionierung der Versuchsführung stand eine gezielte Koppelung und Entkoppelung der mechanischen Effekte und der Gemischbildungseffekte im Mittelpunkt, wodurch eine Differenzierung der unterschiedlichen Ursachen und Wechselwirkungen der Öl- und Partikelemissionsentstehung grundsätzlich ermöglicht werden soll. Hierbei werden bewusst motorische Extrema untersucht, um die Entstehungsmechanismen eindeutig identifizieren zu können. Diese Vorgehensweise kann beispielsweise an Motoren im frühen Entwicklungsstadium genutzt werden, um gezielt Emissionsauffälligkeiten zu reduzieren. Tabelle 3.2 enthält eine Übersicht der variierten Versuchsparameter und die daraus abgeleiteten Untersuchungsziele, welche im Folgenden genauer beschrieben werden. Für den Bereich der Motormechanik soll das Öltransportverhalten über die Kolbengruppe geändert werden. Der Öltransport in den Brennraum (siehe Kapitel 2.2.2) wird dabei maßgeblich durch die Massenkräfte und Druckverhältnisse (Variation der Kurbelgehäusebe- und -entlüftung und des Saugrohrdrucks) und das verwendete Motoröl (Viskositätsänderung) bestimmt. Die Auswirkungen der Gemischbildung werden durch geändertes Verdampfungsverhalten des Kraftstoffs und eine Variation des Einspritzbeginns untersucht. Diese Einflüsse aus der Motormechanik und der Applikation werden in vier Motorbetriebszuständen (quasistationär, dynamisch 1, stationär und dynamisch 2) analysiert. Durch eine quasistationäre Drehzahlrampe im unbefeuerten Schubbetrieb des Motors wird die Abdichtwirkung der Kolbengruppe und der Einfluss des Öltransports in den Brennraum untersucht, um eine eventuell vorhandene kritische Drehzahl zu ermitteln. Im nächsten Untersuchungsschwerpunkt werden die Öl- und Partikelemissionen im dynamischen, synthetischen Schub-Last-Wechselzyklus analysiert. Hier folgen auf unbefeuerte, unterschiedlich lange Schubphasen mit Öleintrag in den Brennraum befeuerte Lastphasen mit hoher Kraftstoffeinbringung. Hierdurch soll eine Wechselwirkung aus Kraftstoffinteraktion mit dem Öl in der Wiederaanbrennphase und mit einem geänderten Öltransportverhalten im Schub des Motors untersucht werden soll. Der Einfluss der Gemischbildung wird im stationären Betriebspunkt bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} und einem Drehmoment von 90 Nm untersucht. Ein unterschiedliches Verdampfungsverhalten des Kraftstoffs wird mit einer Einfacheinspritzung bei unterschiedlichem Einspritzbeginn variiert. Durch diese Vorgehensweise soll der Einfluss einer Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion untersucht werden. Um eine erste Bewertung bezüglich Öl- und Partikelemissionsverhalten unter realen Fahrbedingungen zu erhalten, wird ein kurzer und hochdynamischer RDE-Ausschnitt (dynamisch 2)

untersucht. Dabei werden insbesondere 5 verschiedene Kraftstoffe mit geändertem Verdampfungsverhalten und Additivkomponenten (10 Volumen-% Ethanol oder Dimethylcarbonat) dem handelsüblichen Tankstellenkraftstoff nach DIN EN 228 oder dem aromatenfreien und leichtsiedenden Kraftstoff beigemischt.

3.4 Zielsetzung und Anwendungsmöglichkeiten

Der methodische Ansatz zur gesamtheitlichen Analyse der Öl- und Partikelemissionen besteht aus der strukturierten Systemanalyse (siehe Kapitel 3.1) der Einflussparameter und der Entstehungsmechanismen von Öl- und Partikelemissionen aus der Kolbengruppe und Gemischbildung beziehungsweise deren Wechselwirkungen. Damit sind theoretische Vorüberlegungen zur Versuchsführung möglich, da im Hinblick auf eine angespannte Kostensituation und die oftmals eng getakteten Entwicklungsschritte in der Motorenentwicklung eine hohe Anzahl an aufwendigen Versuchen mit Umbauten an der Kolbengruppe vermieden werden sollte. Die in Kapitel 3.2 beschriebene Messtechnikkombination ermöglicht eine zeitliche Auflösung der Emissionsschriebe. Es können durch die Online-Messung der Öl- und Partikelemission langwierige Ölverbrauchsläufe beziehungsweise Filterbeladungsläufe zur Bewertung von Optimierungsmaßnahmen stark reduziert oder vollständig vermieden werden. Die Konzeption der Versuchsführung lässt sich auf vielfältige Entwicklungsaufgaben zur Emissionsreduzierung übertragen. Darüber hinaus ist mit den in dieser Arbeit ausgeführten Messprogrammen eine schnelle Identifikation der Haupteinflussparameter des zu untersuchenden Systems möglich. Beispiele für konkrete Anwendungsfälle für diesen methodischen Ansatz werden in diversen Veröffentlichungen mit unterschiedlichen Entwicklungs- und Themenschwerpunkten beschrieben. Generell lässt sich diese Methodik dabei zu jedem Zeitpunkt in der Motorenentwicklung anwenden: Über erste konzeptionelle Untersuchungen zur grundlegenden mechanischen Auslegung der Kolbengruppe [213] sowie entwicklungsbegleitend bis zur Serienproduktion [187] oder zur Analyse und Emissionsabsicherung unter Realfahrtbedingungen [214]. Auch Phänomene wie Emissionsänderungen mit erhöhter Motorlaufzeit und zunehmenden Verschleißeffekten können damit untersucht und gegebenenfalls abgestellt werden [215]. Zur Optimierung des Gesamtsystems Motor hinsichtlich Öl- und Partikelemissionen gehören damit die methodische Untersuchung unterschiedlicher Bauteil- und Applikationsparameter am befeuerten (zum Beispiel Einfluss des Luftverhältnisses, Öleintrag über Abdampfen von der Zylinderwand) und am geschleppten Motor (Schubbetrieb mit Ölen unterschiedlicher Viskosität mit Variation der Schubdauer), sowie Untersuchungen geometrischer Parameter wie beispielsweise die Beeinflussung des Zwischenringdrucks der Kolbenringe und der Eigenschaften des Schmieröls (zum Beispiel Abdampfens unterschiedlicher Ölformulierungen [187]).

3 Methodischer Ansatz zur Analyse der Öl- und Partikelemissionen

Tabelle 3.2: Versuchparameterübersicht und Untersuchungsschwerpunkte

Parameter	Variantenbeschreibung	Untersuchungsschwerpunkt	
Betriebszustand	Quasistationär	Drehzahlrampe im Schub Verhalten ohne Verbrennung (Öltransport)	
	Dynamisch 1	Schub-Last-Wechsel Dynamisches Verhalten Schub-Last-Wechsel (Öltransport)	
	Stationär	Stationärer Motorbetrieb Stationäres Verhalten (Gemischbildung)	
	Dynamisch 2	Hochdynamischer RDE-Ausschnitt Hochdynamischer RDE-Ausschnitt (Gemischbildung)	
Betriebsstoff	Öl A	Hochviskoses Öl (HTHS = 5,6 mPas)	
	Öl B	Niedrigviskoses Öl (HTHS = 2,6 mPas)	
	Kraftstoff A	Basiskraftstoff 1	
	Kraftstoff B	Kraftstoff mit erhöhter Verdampfungsneigung	
	Kraftstoff C	Basiskraftstoff 2	
	Kraftstoff C-E10	Basiskraftstoff 2 + 10 Volumen-% Ethanol	
	Kraftstoff C-DMC10	Basiskraftstoff 2 + 10 Volumen-% Dimethylcarbonat	
	Kraftstoff D	Basiskraftstoff 3 (aromatenfrei)	
Betriebsstoff	Kraftstoff D-DMC10	Basiskraftstoff 3 + 10 Volumen-% Dimethylcarbonat	
	Applikation	Einspritzbeginn, früh	Früher Einspritzbeginn
		Einspritzbeginn, spät	Später Einspritzbeginn
	Mechanik	Schubluft 1	Reduzierte Schubluft, niedriger Saugrohrdruck
Schubluft 2		mittlere Schubluft, mittlerer Saugrohrdruck	
Schubluft 3		Erhöhte Schubluft, höherer Saugrohrdruck	
Kurbelgehäuse-druckvariante 1		Kurbelgehäuseentlüftung im Serienzustand	
Kurbelgehäuse-druckvariante 2		Kurbelgehäusebelüftung androsselt	
Kurbelgehäuse-druckvariante 3		Kurbelgehäuseentlüftung "ins Freie"; Umgebungsdruck; ohne Rückführung ins Saugrohr	

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

4.1 Versuchsrandbedingungen

Zur grundlegenden Untersuchung der Zusammenhänge von Öl- und Partikelanzahlemissionen wurde ein 4-Zylinder-Ottomotor mit Direkteinspritzung und seitlicher Injektorlage sowie Abgasturboaufladung im Serienzustand mit Serienbedatung (Euro 6c-Abgasnorm) verwendet. Der Kühlwasserkreislauf des Motors wurde mit offen blockiertem Thermostat betrieben. Der Motor wies zu Beginn der Untersuchungen eine Laufzeit von mehr als 200 Betriebsstunden auf, womit sichergestellt war, dass sich der Motor nicht mehr in einer Einlaufphase befindet und sich somit während der Untersuchungen bezüglich des Emissionsverhaltens nicht mehr signifikant ändert. In Abbildung 4.1 sind die Messpositionen der Emissionsmesstechnik schematisch dargestellt. Die Messung erfolgte im Rohabgas nach dem Abgasturbolader und vor Katalysator. Um eine Beeinflussung der Probenahme zwischen den drei Messsystemen zu reduzieren, wurde das Abgasrohr vor dem Katalysator verlängert, um so einen erforderlichen Mindestabstand von circa 8 cm zwischen den einzelnen Probenahmestellen zu ermöglichen. Weiterhin wurden die Messstellen um je 45° verdreht zueinander positioniert. Die Messungen der Partikelanzahl und der Partikelgrößenverteilung wurden jeweils mit einer Mehrlochsonde durchgeführt. Bei der Rohemissionsmessung wurde die Hochdruckoption beim Kondensationspartikelzähler verwendet, um dabei Druckeinflüsse des Abgasgegenstands auf den Kondensationspartikelzähler zu vermeiden. Der Motor wurde bei den Untersuchungen, wenn nicht gesondert angegeben, in betriebswarmem Zustand (Kühlwassertemperatur bei 90°C) betrieben.

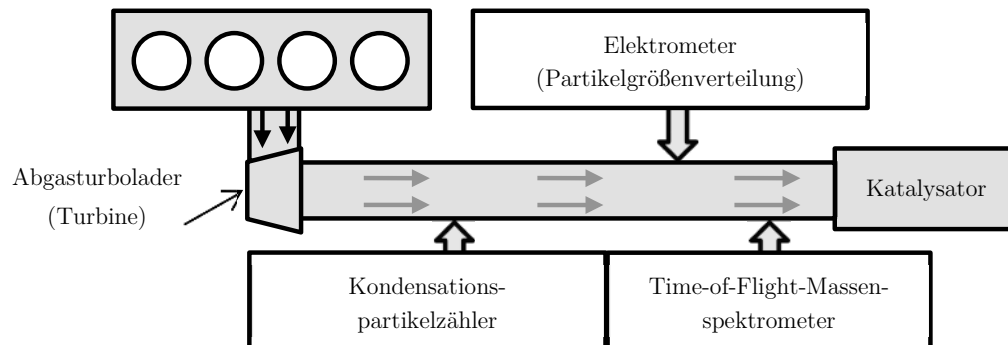


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Messpositionen im Rohabgas

Für die Untersuchungen wurden teilweise unterschiedliche Öle verwendet (siehe Tabelle 4.1). Öl A entsprach im Basisöl der Viskositätsklasse 5W-30 und wurde zusätzlich noch mit 10 % Viscoplex versetzt, um ein sehr hochviskoses Motoröl mit einer HTHS-Viskosität von 5,57 mPas zu generieren. Das Öl B wurde ohne zusätzliche nachträgliche Additivierung verwendet und lag in der Viskositätsklasse 0W-20 mit einem gemessenen HTHS-Wert von 2,57 mPas.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der untersuchten Öle

Parameter	Öl A	Öl B
SAE Viskositätsklasse Basisöl	5W-30	0W-20
Zusätzliche Additivierung	10% Viscoplex® (massenbezogen)	ohne
Kinematische Viskosität KV40 bei 40°C nach ASTM D445/446 [mm ² /s]	115,10 mit zusätzlicher Additivierung	41,46
Kinematische Viskosität KV100 bei 100°C nach ASTM D445/446 [mm ² /s]	18,84 mit zusätzlicher Additivierung	7,96
High Temperature High Sheer (HTHS) Viskosität bei 150°C nach ASTM D4683 [mPas]	5,57 mit zusätzlicher Additivierung	2,57

4.2 Betrachtung des quasistationären Verhaltens im unbefeuerten Schubetrieb

Als erste Untersuchung wurde der unbefeuerte Schub betrachtet. Die Änderung der Massenträgheit erfolgte über eine quasistationäre Drehzahlrampe bei reduziertem Saugrohrdruck und dadurch mit reduziertem Brennraumdruck in einer Schubphase des Motors (ohne befeuerten Motorbetrieb und ohne Einflüsse aus der Verbrennung des Motors). Die Drehzahlrampe wurde von $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ auf $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ in 200 Sekunden durchfahren, was einem Drehzahlgradienten $\dot{n} = 20 \text{ min}^{-1}/\text{s}$ entspricht. Das Druckverhältnis über die Kolbengruppe, das heißt die Differenz von Brennraumdruck zu Kurbelgehäusedruck, wurde über verschiedene Saugrohrdrücke und Änderungen an der Kurbelgehäusebe- und -entlüftung in der Schubphase variiert. Vor der Drehzahlrampe im Schub erfolgte eine definierte Warmfahrprozedur des Motors zur Erreichung der gewünschten Kühlwasser- und Öltemperatur. Nach der Drehzahlrampe wurden der Motor und die Abgasanlage bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1} und 75 % Last konditioniert, um eventuelle Ölbenetzungen der abgasführenden Bauteile zu entfernen. Dabei wurde

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

die Abgastemperatur an einer Messposition ca. 30 cm nach Katalysator auf > 550 °C gebracht und dann für 10 Minuten im Stationärpunkt gehalten. Ziel dieser Untersuchung war es, das drehzahlabhängige Schubölemissionsverhalten des Motors zu analysieren und die kritische Drehzahlschwelle zu ermitteln. Die Bilanz zwischen Massenkräften und dem Druckverhältnis über die Kolbengruppe führt bis zu dieser kritischen Drehzahl dazu, dass der Öltransport vom Brennraum in das Kurbelgehäuse erfolgt. Oberhalb der kritischen Drehzahl überwiegen die Massenkräfte und fördern den Öltransport in den Brennraum, was sich durch einen starken Signalanstieg der Öl- und Partikelemissionen zeigt. Aus dieser kritischen Drehzahlschwelle lässt sich ein Schublast-Zyklus ableiten, der Schubphasen oberhalb der kritischen Drehzahlschwelle enthält, wodurch die Betriebsbereiche des Motors mit erhöhtem Schubölemissionsverhalten untersucht werden können.

Um das Öltransportverhalten in der Drehzahlrampe zu ändern, wurden drei unterschiedliche Kurbelgehäusedrücke ($p_{\text{KGH,min}} = -125$ mbar, $p_{\text{KGH,mittel}} = -84$ mbar und $p_{\text{KGH,max}} = -2$ mbar) eingestellt. Die Variation des Kurbelgehäusedrucks wurde über eine geänderte Drossel in der Kurbelgehäusebelüftung realisiert. Um einen Kurbelgehäusedruck von -2 mbar einzustellen, wurde die Kurbelgehäuseentlüftung ins Freie gegen Umgebungsdruck geführt. Der Saugrohrdruck wurde dabei über die Drosselklappe, wenn nicht gesondert angegeben, auf $p_{\text{Saug}} = 169$ mbar (absolut) eingestellt.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Partikelanzahl und Ölemission in Abbildung 4.2 ist ersichtlich, dass das Öl- und Partikelsignal bei einem Kurbelgehäusedruck von $p_{\text{KGH,mittel}} = -84$ mbar sowie mit einem weiter abgesenktem Kurbelgehäusedruck $p_{\text{KGH,min}} = -125$ mbar unterhalb einer Drehzahl von 5400 min^{-1} vergleichbar verlaufen. Erst ab einer Drehzahl von 5400 min^{-1} zeigt der mittlere Kurbelgehäusedruck mit $p_{\text{KGH,mittel}} = -84$ mbar einen Signalanstieg bei den Öl- und den Partikelemissionen. Bei reduziertem Kurbelgehäusedruck $p_{\text{KGH,min}} = -125$ mbar zeigen sich keine auffälligen Signalanstiege der Öl- und Partikelemissionen bis zur maximalen untersuchten Drehzahl von 6000 min^{-1} . Die kritische Drehzahl verschiebt sich über die Kurbelgehäusedruck-erhöhung $p_{\text{KGH,mittel}} = -84$ mbar hin zu niedrigeren Drehzahlen, der Signalanstieg beginnt bei 5400 min^{-1} . Durch den erhöhten Kurbelgehäusedruck wird der Gas- und Öltransport über das Kolbenringfeld in den Brennraum gefördert. Wird die Kurbelgehäuseentlüftung ins Freie geführt, das heißt gegen Umgebungsdruck, reduziert sich die Druckdifferenz zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse weiter, wodurch der Öltransport in Richtung des Brennraums noch mehr in den Vordergrund tritt. Dies zeigt sich in Abbildung 4.2 durch ein minimal erhöhtes Ölsignal bereits zu Beginn der Drehzahlrampe. Im Drehzahlbereich 3200 bis 4000 min^{-1} steigen die Ölemissionen

deutlich an, gleiches gilt für die Partikelanzahl. Ursache dafür könnte zum Beispiel ein Ringflattern sein. Beim Ringflattern kommt es aufgrund eines ungünstigen Kräftegleichgewichts aus Massen- und Gaskräften zum Abheben des Kolbenrings von der Ringnut, wodurch die Abdichtfunktion des Kolbenrings nicht mehr richtig erfüllt werden kann. Zur abschließenden Klärung dieses Phänomens wären weitergehende Messungen der Kolbenringbewegung und der Zwischenringdrücke notwendig, die am Versuchsträger jedoch nicht möglich waren. Ein weiterer Anstieg der Öl- und Partikelemissionen ist ab einer Drehzahl von 5200 min^{-1} zu beobachten und damit bei der niedrigsten kritischen Drehzahl dieser Untersuchung. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im unbefeuerten Schubetrieb Öl- und Partikelemissionen ein ähnliches Verhalten zeigen. Dabei sind Auffälligkeiten bei Signalanstiegen, trotz fehlender Verbrennung, sowohl in den Ölemissionen als auch in den Partikelemissionen messbar. Hieraus kann abgeleitet werden, dass der Partikelzähler auch schwerflüchtige Komponenten aus dem Motoröl als Partikel detektiert. Durch eine Absenkung des Kurbelgehäusedrucks kann die kritische Drehzahl hin zu höheren Drehzahlen verschoben werden. Im Idealfall eines gut abgestimmten Gesamtsystems des Motors liegt die kritische Drehzahl außerhalb der üblichen Betriebsrandbedingungen, um ein robustes Emissionsverhalten sicherzustellen.

Für eine weitere Bewertung werden die kumulierten Emissionswerte herangezogen. Dabei definiert sich der kumulierte Emissionswert ($EW_{kum,max}$) wie folgt:

$$EW_{kum,max} = \int_{Anfang}^{Ende} EW(Logpunkt) dLogpunkt \quad (4.1)$$

mit

EW: Emissionswert je nach Messsignal (siehe Tabelle 4.2)

Anfang: Zyklusanfang

Ende: Zyklusende

Logpunkt: gemessener Datenpunkt

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

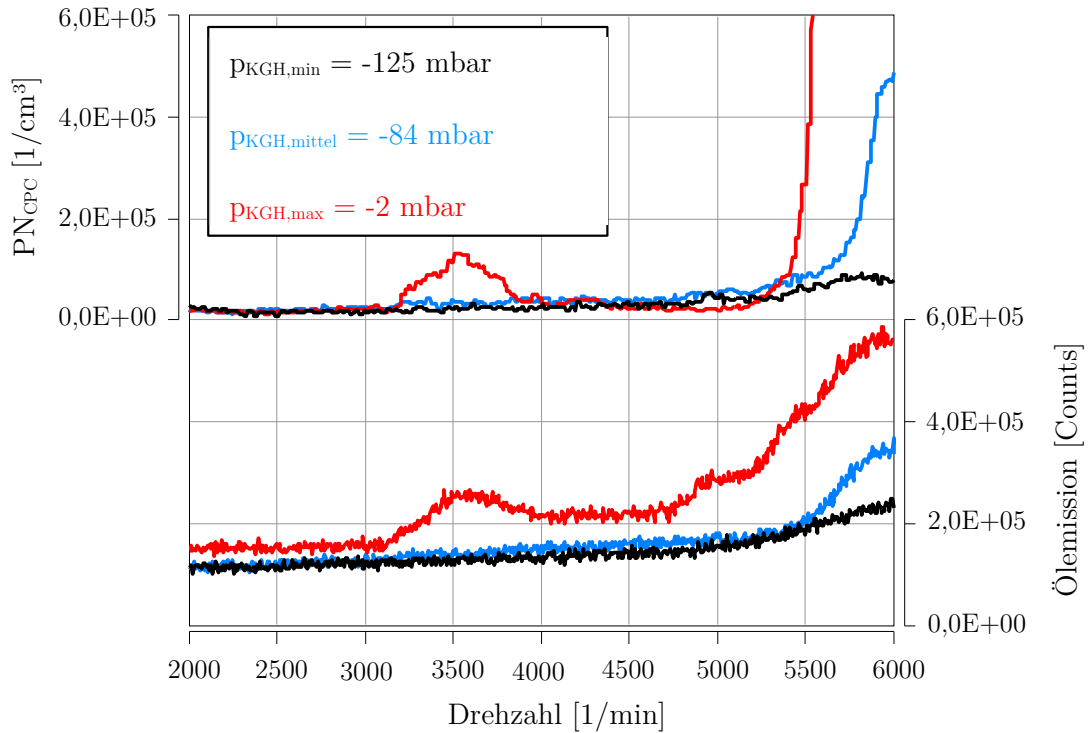


Abbildung 4.2: Partikel- und Ölemissionen in der quasistationären Drehzahlrampe im unbefeuerten Schubetrieb mit Öl A und Variation des Kurbelgehäusedrucks

Tabelle 4.2: Übersicht und Beschreibung der Emissionswerte und kumulierten Emissionswerte je nach Messsignal

Emissionswert und kumulierter Emissionswert	Beschreibung
PN_{CPC} bzw. $PN_{CPC,kum,max}$	Partikelanzahl aus dem Kondensationspartikelzähler
$PN_{DMS,Total}$ bzw. $PN_{DMS,Total,kum,max}$	Partikelanzahl aus dem Elektrometer DMS500, Gesamtanzahl
$PN_{DMS,Nukl}$ bzw. $PN_{DMS,Nukl,kum,max}$	Partikelanzahl aus dem Elektrometer DMS500, Anzahl im Nukleationsmodus
$PN_{DMS,Akku}$ bzw. $PN_{DMS,Akku,kum,max}$	Partikelanzahl aus dem Elektrometer DMS500, Anzahl im Akkumulationsmodus
Ölemission bzw. $Ölemission_{kum,max}$	Ölemission aus dem Time-of-Flight-Massenspektrometer

Aus Abbildung 4.3 geht der Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf die Partikelanzahlmissionen (aus Kondensationspartikelzähler beziehungsweise DMS500) und Ölemissionen hervor. Die Kurbelgehäusedruckvariante mit abgesenktem Druck $p_{\text{KGH,min}} = -125$ mbar zeigt integral bei Partikel- und Ölemissionen die geringsten Werte, und die Kurbelgehäusedruckvariante bei Umgebungsdruck die höchsten Emissionen. Das Signal aus dem Kondensationspartikelzähler ($\text{PN}_{\text{CPC,kum,max}} = 3,3\text{E}+08$ $1/\text{cm}^3$ bei $p_{\text{KGH,max}} = -2$ mbar) liegt verglichen mit dem Signal aus dem DMS500 ($\text{PN}_{\text{DMS,Total,kum,max}} = 1,0\text{E}+10$ $1/\text{cm}^3$ bei $p_{\text{KGH,max}} = -2$ mbar) auf einem vergleichsweise geringen Niveau. Der größte Anteil der Partikel lässt sich dabei dem Nukleationsmodus zuordnen und deutet auf die flüchtigen Kohlenwasserstoffe aus dem Motoröl hin. Bei geringen Kurbelgehäusedrücken ($p_{\text{KGH,min}}$ und $p_{\text{KGH,mittel}}$) liegt der Anteil der Partikel im Nukleationsmodus bei > 92 %. Durch den verstärkten Öltransport in den Brennraum bei höheren Kurbelgehäusedrücken ($p_{\text{KGH,max}}$) entstehen vermehrt größere Partikel, die dem Akkumulationsmodus zuzuordnen sind, wodurch der Anteil der Partikel im Nukleationsmodus auf 74 % sinkt.

Die Korrelationsanalyse der Öl- und Partikelemissionen erfolgt anhand der gesamten, integralen Emissionen während der Drehzahlrampe. Für die weiteren Korrelationsanalysen zur Betrachtung der Zusammenhänge wird der Korrelationskoeffizient r_{XY} verwendet [216]:

$$r_{XY} = \frac{s_{XY}}{s_X \cdot s_Y} \quad (4.2)$$

mit

s_{XY} : Kovarianz von X und Y

s_X : Standardabweichung von X

s_Y : Standardabweichung von Y

Zusammenfassend zeigt der untersuchte Motor im unbefeuerten Schubbetrieb eine Korrelation von Öl- und Partikelemissionen sowie eine Abhängigkeit dieser Emissionen vom Kurbelgehäusedruck. Ein abgesenkter Kurbelgehäusedruck bewirkt verringerte Öl- und Partikelemissionen, insbesondere bei höheren Drehzahlen, wenn die Massenkräfte die Förderrichtung des Öls in den Brennraum bestimmen. Die in der Untersuchung ermittelte kritische Drehzahlschwelle bei $n = 5400$ min^{-1} lässt sich durch Absenkung des Kurbelgehäusedrucks hin zu höheren Drehzahlen verschieben. Der Korrelationskoeffizient

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

zwischen der Partikelanzahlemission und der Ölemission liegt bei den untersuchten Kurbelgehäusedrücken mit 0,99 auf einem sehr hohen Niveau und bestätigt damit die Zusammenhänge zwischen dem Öleintrag im unbefeuerten Schub und der Partikelanzahlemission.

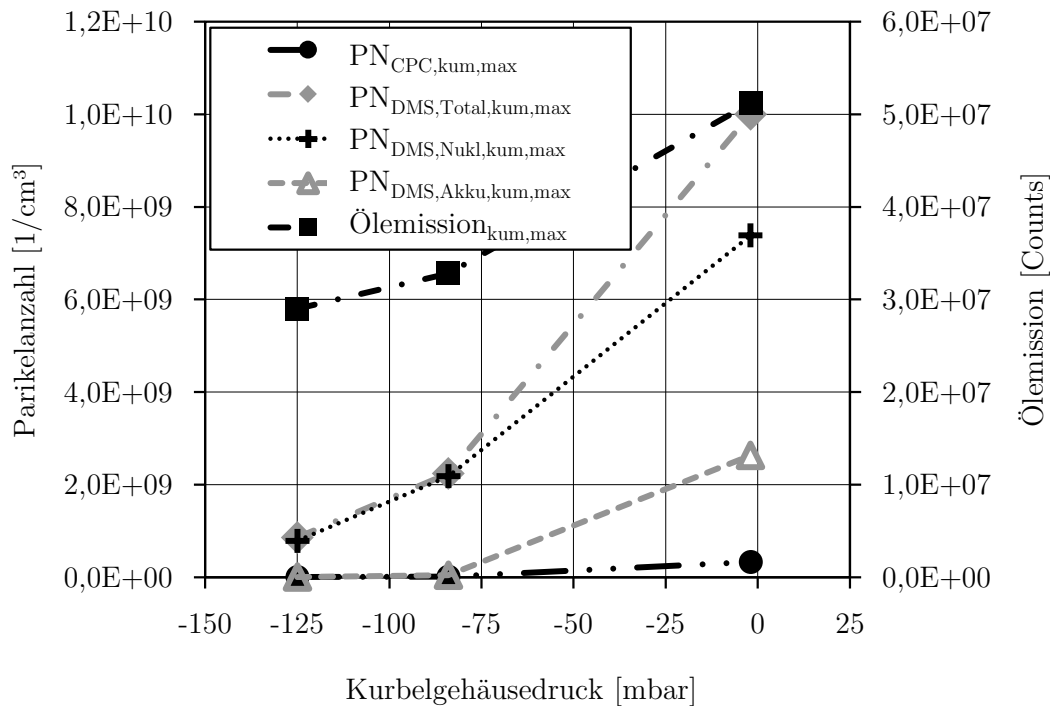


Abbildung 4.3: Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf die kumulierten Öl- und Partikelemissionen in der quasistationären Drehzahlrampe im unbefeuerten Schub mit Öl A

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich für eine Motorenentwicklung Folgendes ableiten: Die kritische Drehzahlschwelle ist so auszulegen, dass diese außerhalb des normalen Betriebsbereiches liegt. Um den Öltransport in Richtung des Kurbelgehäuses zu fördern, sollten möglichst geringe Kurbelgehäusedrücke beziehungsweise eine möglichst große Druckdifferenz zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse eingestellt werden. Im unbefeuerten Betrieb erweisen sich normalerweise Partikelemissionen im Rohabgas vor dem Katalysator als unkritisch, da die unverbrannten, langkettigen Kohlenwasserstoffe aus dem Öl umgesetzt werden. Voraussetzung dafür sind im Katalysator hinreichend hohe Temperaturen zur Oxidation der Kohlenwasserstoffe. Bei Unterschreiten der Light-off Temperatur könnte zum Beispiel insbesondere in langen Schubphasen durch Auskühlen des Abgastrakts in Verbindung mit einem erhöhten Kohlenwasserstoffeintrag durch Motoröl zu Problemen führen.

4.3 Analyse der dynamischen Emissionen bei Schub-Last-Wechseln

Aus der quasistationären Drehzahlrampe im Schub konnten bei dem untersuchten Motor bei Drehzahlen $n > 5400 \text{ min}^{-1}$ erhöhte Schuböl- und Partikelemissionen festgestellt werden. In frühen Entwicklungsphasen, bei noch nicht optimal abgestimmter Kolben-Gruppe und Kolbenringpaketen, können sich diese erhöhten Schubölemissionen auch in niedrigen Drehzahlbereichen zeigen. Um das dynamische Verhalten des Motors zu untersuchen, wurde ein synthetischer Zyklus herangezogen. Nach einer Schubphase, in der sich der Motor in der Schubabschaltung befindet, folgt eine Phase mit Lastaufschaltung des Motors. Dieser Übergang vom unbefeuerten Schubbetrieb in die befeuerte Ziellast des Motors wird im Folgenden als „Wiederanbrennen“ beziehungsweise „Wiederanbrennphase“ bezeichnet. Um den Einfluss der Schubphase und anschließendem Wiederanbrennen zu bewerten, wurde unter Berücksichtigung der kritischen Drehzahl dieser synthetische Schub-Last-Zyklus mit unterschiedlich langen Schubphasen abgeleitet. Damit kann gezielt das Öltransportverhalten und die Wechselwirkung mit dem Kraftstoff analysiert werden. Der in Abbildung 4.4 dargestellte synthetische Schub-Last-Zyklus beinhaltet zwei unterschiedlich lange unbefeuerte Schubphasen mit einer Dauer von 10 und 30 Sekunden, welche jeweils drei Mal in Folge wiederholt werden.

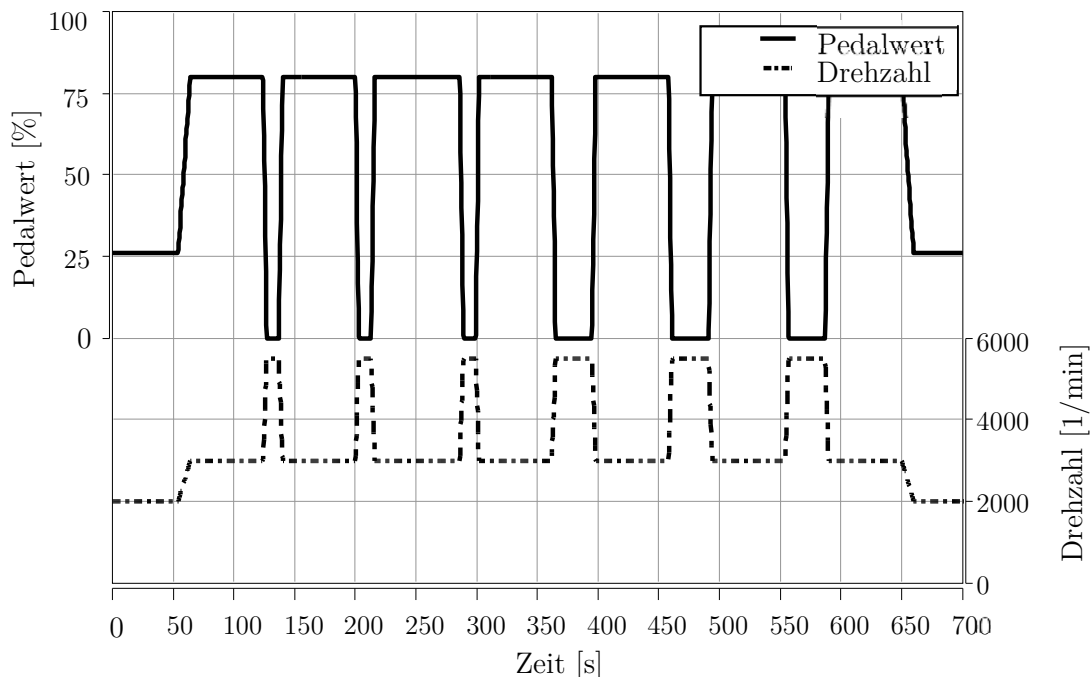


Abbildung 4.4: Betriebsprofil des synthetischen Dynamikzyklus mit Schub-Last-Wechsel

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Der stationären Lastphase bei einem Pedalwert (entspricht der Last- beziehungsweise Momentenanforderung, Volllast = 100 %) von $\text{ped} = 80 \%$ und einer Drehzahl $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ folgt eine Schubphase bei $n = 5400 \text{ min}^{-1}$. Der Pedalwertgradient beträgt in der Übergangsphase in den Schub $\dot{\text{ped}} = 26,7 \%$ pro Sekunde und der Drehzahlgradient $\dot{n} = 833,3 \text{ min}^{-1}/\text{s}$. Mit den gleichen Gradienten erfolgt die Lastaufschaltung nach der Schubphase. Die Schubphase mit der hohen Drehzahl ist repräsentativ für den Betrieb des Motors als Motorbremse bei einer Bergabfahrt. Insbesondere die nach der Schubphase folgenden Wiederanbrennphasen mit hoher Last können zu Einflüssen aus Gemischbildung und Öltransport führen.

In Abbildung 4.5 ist ein Ausschnitt des Schub-Last-Dynamikzyklus mit den 10 und 30 Sekunden-Schubphasen und jeweils anschließender Lastphase über die Zeit für eine Variation des Saugrohrdrucks (und hierdurch resultierend auch Kurbelgehäusedrucks) dargestellt. Die Dauer der Schubphase hat einen signifikanten Einfluss auf die nachfolgende Lastphase und das Emissionsniveau bezüglich der Partikelanzahlmission (PN_{CPC}) und der Emission schwerflüchtiger Kohlenwasserstoffe (Ölemission). Die 30 Sekunden-Schubphase liegt bei den Emissionspeaks beim Wiederanbrennen bei allen drei untersuchten Saugrohr- und Kurbelgehäusedruckvarianten über den Emissionspeaks nach der 10 Sekunden-Schubphase. Dabei kommt es zur Überlagerung von zwei Effekten. Einerseits führt eine längere Schubdauer beim unbefeuerten Schub zum Auskühlen des Brennraums. Dies hat bei der beginnenden Einspritzung am Anfang der Lastphase zur Folge, dass der eingespritzte Kraftstoff im kühleren Brennraum nicht so gut verdampft und gegebenenfalls die an den Brennraum angrenzenden Bauteile wie Zylinderwand oder Kolben benetzen kann. Dabei können sich lokal fettere Gemischzonen ausbilden, die zu erhöhten Partikelemissionen beitragen. Andererseits kann sich in Abhängigkeit des Druckverhältnisses zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse die bevorzugte Öltransportrichtung ändern und je nach Dauer der Schubphase dann mehr Öl über das Kolbenringfeld in den Brennraum gelangen oder in die Kurbelgehäuse abtransportiert werden. Letztgenannter Einfluss wird anhand einer Variation des Saugrohrdrucks im Schub und des sich daraus ergebenden Kurbelgehäusedrucks untersucht. Die Kurbelgehäuseentlüftung wird in das Saugrohr zurückgeführt, was eine Abhängigkeit des Kurbelgehäusedrucks vom Saugrohrdruck bedingt. Zusätzlich zur Änderung des Kurbelgehäusedrucks ändert sich auch der Kompressionsdruck in der Schubphase. Wird der Saugrohrdruck reduziert, liegt im Brennraum ein geringerer Druck vor, wodurch es zum Öltransport in den Brennraum kommen kann.

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

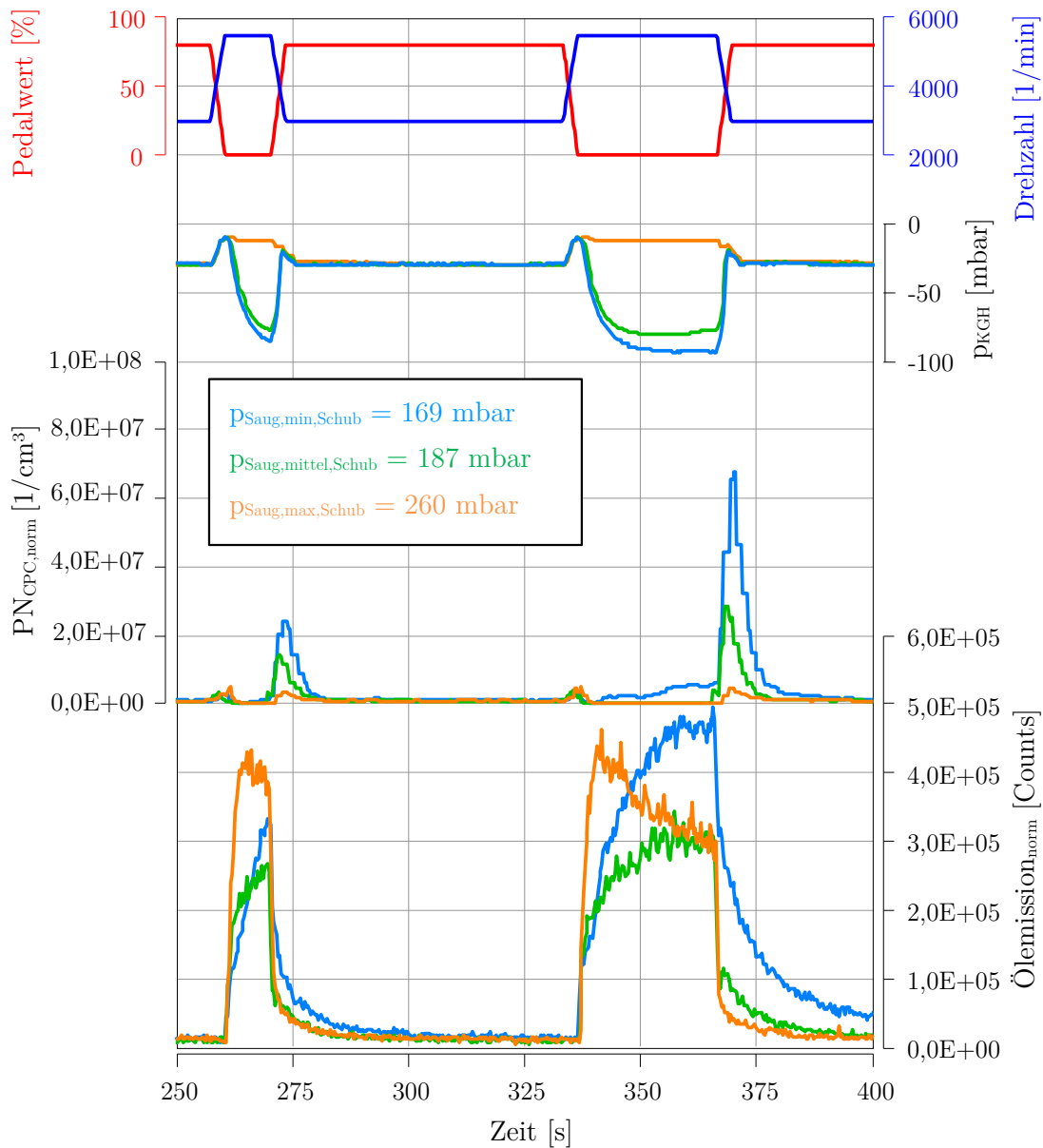


Abbildung 4.5: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs des Kurbelgehäusedrucks, der Partikel- und Ölemissionen bei Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks im Schub bei Schub-Last-Wechseln mit Kraftstoff B und hochviskosem Öl A in einer 10 und 30 Sekunden Schubphase

Durch Änderung des Saugrohrdrucks werden auch die durchgesetzten Luftmassen in den Schubphasen geändert. Die Emissionswerte EW werden dabei entsprechend dem Verhältnis der Luftmassen nach normiert, um diese direkt miteinander vergleichen zu können. Die Bezugsbasis ist jeweils der Wert bei 169 mbar Saugrohrdruck.

$$EW_{p_{\text{Saug},169 \text{ mbar}}} = EW_{p_{\text{Saug},169 \text{ mbar,gemessen}}} \quad (4.3)$$

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

$$EW_{norm, p_{Saug,187\text{ mbar}}} = EW_{p_{Saug,187\text{ mbar,gemessen}}} \cdot \frac{\dot{LM}_{p_{Saug,187\text{ mbar}}}}{\dot{LM}_{p_{Saug,169\text{ mbar}}}} \quad (4.4)$$

$$EW_{norm, p_{Saug,260\text{ mbar}}} = EW_{p_{Saug,260\text{ mbar,gemessen}}} \cdot \frac{\dot{LM}_{p_{Saug,260\text{ mbar}}}}{\dot{LM}_{p_{Saug,169\text{ mbar}}}} \quad (4.5)$$

mit

EW : Emissionswert je nach Messsignal (PN_{CPC} , $PN_{DMS,Total}$, $PN_{DMS,Nukl}$, $PN_{DMS,Akku}$, Ölemission)

EW_{norm} : auf den Referenzsaugrohrdruck normierter Emissionswert

\dot{LM} : Luftmassenstrom in kg/h

In der 10 Sekunden-Schubphase zeigt sich bei den Ölemissionen bei einem eingestellten Saugrohrdruck $p_{Saug} = 260$ mbar im Schub ein stärkerer Signalanstieg und ein höherer Maximalwert als bei den beiden anderen Saugrohrdrücken. Die Partikelanzahlemissionen aus dem Kondensationspartikelzähler ($PN_{CPC,norm}$) zeigen in der Schubphase keine signifikanten Auffälligkeiten. In der darauffolgenden Lastphase lassen sich durch Absenkung des Saugrohrdrucks erhöhte Partikelanzahlemissionen nachweisen. Die Ölemissionen zeigen beim Wiederanbrennen bei $p_{Saug} = 187$ mbar und $p_{Saug} = 260$ mbar ein vergleichbares Verhalten. Der geringe Saugrohrdruck von 169 mbar weist langsames Abklingen des Signals auf. Die während der 10 Sekunden-Schubphase bei einem Saugrohrdruck von 260 mbar emittierten Ölemissionen führen beim Wiederanbrennen nicht zu einem stark ausgeprägten Partikelemissionspeak. Ein möglicher Erklärungsansatz für dieses beobachtete Phänomen ist, dass sich das Kolbenringfeld durch das Druckverhältnis von Brennraum zum Kurbelgehäuse in der Schubphase entleert und beim Wiederanbrennen kein zusätzliches Öl mehr in den Brennraum beziehungsweise in den Abgasstrakt befördert. Für eine genaue Klärung des Phänomens wären Messungen an diesem Versuchsträger mittels laserinduzierter Fluoreszenz notwendig (vergleiche Przesmitzki et al. [146] oder Wigger [117]). Die 30 Sekunden-Schubphase führt schon während des Schubs bei einem Saugrohrdruck von 169 mbar zu einem deutlichen Anstieg im Partikelanzahlsignal. Das in der 10 Sekunden-Schubphase beobachtete Verhalten zeigt sich wiederum durch die Verlängerung der Schubdauer in der 30 Sekunden-Schubphase: Beim Saugrohrdruck $p_{Saug} = 260$ mbar entsteht zunächst ein steiler Anstieg der Ölemissionen mit einem nachfolgenden Abklingen des Signals. Hingegen zeigen die Saugrohrdrücke $p_{Saug} = 187$ mbar und $p_{Saug} = 169$ mbar erst im Verlauf der Schubphase einen deutlichen Signalanstieg. In den Lastphasen nach der 30 Sekunden-Schubphase hat die Reduzierung des Saugrohrdrucks eine Erhöhung der Partikel- und Ölemissionen zur

Folge. Hadler et al. berichten in [187] (unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit) von der Beobachtung eines vergleichbaren charakteristischen Öl- und Partikelemissionsverhaltens anhand von zwei Varianten der Kolbengruppe an einem anderen Motor. Die kritische Drehzahl im Schub bei den Schub-Last-Wechseln ist dabei im Bereich um 3000 min^{-1} , was sich durch erhöhte Öl- und Partikelemissionen zeigt (siehe Abbildung 4.6). Durch eine bessere Abstimmung des Kolbenringpakets konnte eine signifikante Reduzierung der Öl- und Partikelemissionspeaks erreicht werden.

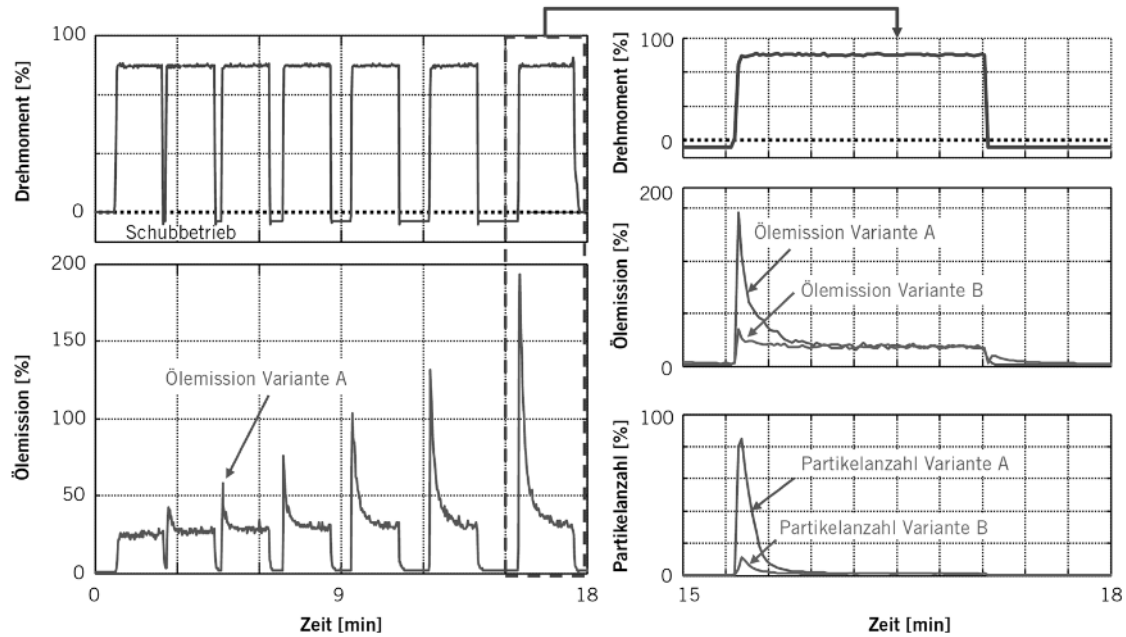


Abbildung 4.6: Öl- und Partikelemissionen bei Schub-Last-Wechseln für zwei Hardwarevarianten [187]

Die Effekte der höheren Öl- und Partikelemissionen in Abhängigkeit der Länge der Schubphase wurden auch von Hadler et al. [159] (unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit) an einem weiteren Aggregat mit zwei Ölen unterschiedlicher Viskositätsklasse festgestellt (vergleiche Abbildung 4.7), wobei eine längere Schubphase analog den in diesem Kapitel gezeigten Ergebnissen zu höheren Emissionsereignissen führt.

In Abbildung 4.8 sind die maximalen kumulierten Emissionsergebnisse der Ölemissionen aus dem Time-of-Flight-Massenspektrometer ($\text{Ölemission}_{\text{kum,max}}$), der Partikelanzahl aus dem Kondensationspartikelzähler ($\text{PN}_{\text{CPC,kum,max}}$) und der gesamten Partikelanzahl aus dem DMS500 ($\text{PN}_{\text{DMS,Total,kum,max}}$) dargestellt. Das Messsignal aus dem DMS500 wird noch weiter unterteilt in die Partikelanzahl im Akkumulationsmodus ($\text{PN}_{\text{DMS,Akku,kum,max}}$) und die Partikelanzahl im Nukleationsmodus ($\text{PN}_{\text{DMS,Nukl,kum,max}}$). Für die Ermittlung der Partikelanzahl im Akkumulations- und Nukleationsmodus des DMS500 wird an dieser Stelle auf die Literatur von Cambustion [211, 212] verwiesen. Die Partikelemissionen

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

sind auf der linken y-Achse aufgetragen und nehmen mit steigendem Saugrohrdruck im Schub ab. Die größte Reduktion wird von $p_{\text{Saug}} = 169 \text{ mbar}$ auf $p_{\text{Saug}} = 187 \text{ mbar}$ bei $\text{PN}_{\text{DMS,Total,kum,max}}$ von $2,58\text{E}+10 \text{ cm}^{-3}$ auf $1,22\text{E}+10 \text{ cm}^{-3}$ erreicht. Vom Kondensationspartikelzähler werden im Vergleich zum DMS500 nur circa 10 % der Partikel gemessen. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die unterschiedlichen Messtechniken und Probenaufbereitungen (vergleiche Kapitel 3.2.2 und 3.2.3) erklären. Der hohe Anteil an Nukleationspartikeln von circa 75 % lässt auf flüchtige Komponenten im Abgas schließen (siehe Kapitel 2.1.1 und 3.2.4). Diese flüchtigen Anteile werden beim Kondensationspartikelzähler durch den Volatile Particle Remover (VPR, siehe Kapitel 3.2.2) abgetrennt und somit nicht als Partikel detektiert. Die Ölemissionen ($\text{Ölemission}_{\text{kum,max}}$) zeigen bei $p_{\text{Saug}} = 169 \text{ mbar}$ und $p_{\text{Saug}} = 187 \text{ mbar}$ Saugrohrdruck ein ähnliches Verhalten wie die Partikelemissionen, allerdings steigen die Ölemissionen bei $p_{\text{Saug}} = 260 \text{ mbar}$ wieder an. Aus dem zeitlichen Verlauf in Abbildung 4.5 ist erkennbar, dass in den Schubphasen das Signal aus dem Massenspektrometer bei 260 mbar erhöht ist, dort aber ohne Verbrennung nur geringe Partikelemissionen gemessen werden, was im kumulierten Maximalwert dann zu einem Anstieg der Ölemissionen führt, im Gegensatz zur Reduktion bei den Partikelemissionen.

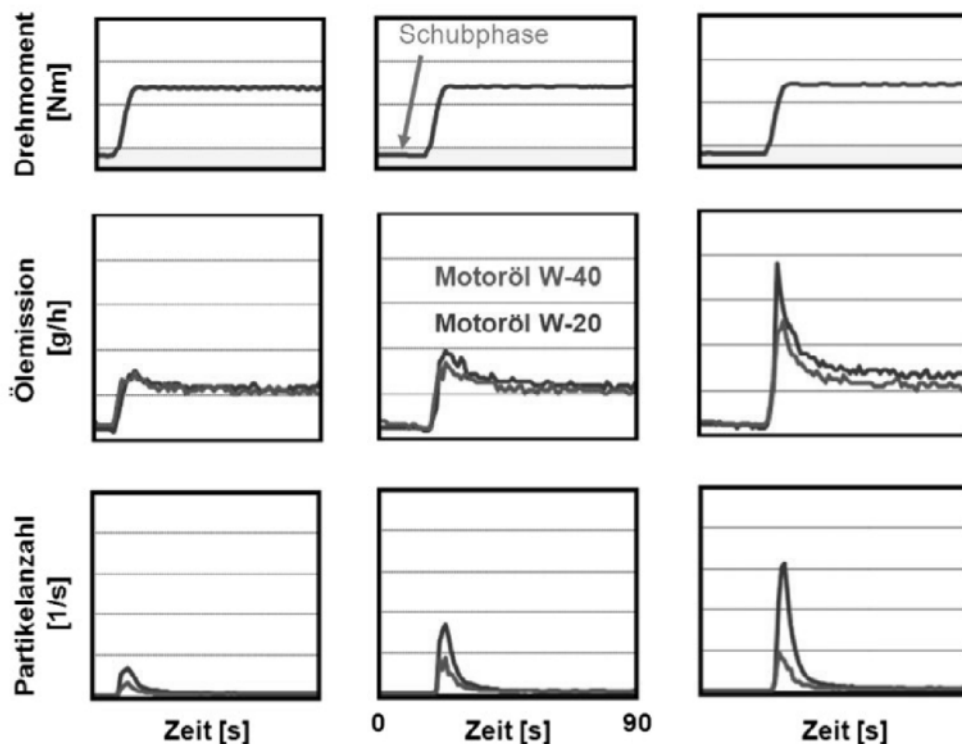


Abbildung 4.7: Öl- und Partikelemissionen für zwei Öle unterschiedlicher Viskosität [159]

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

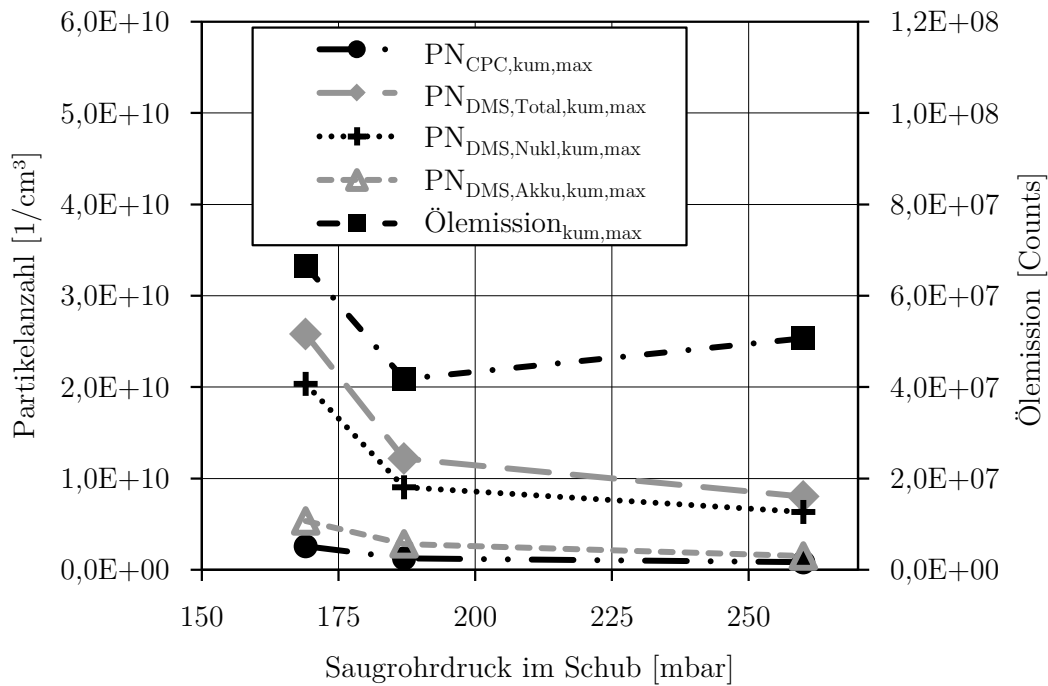


Abbildung 4.8: Einfluss des Saugrohrdrucks auf Partikelemissionen und die schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe bei Schub-Last-Wechsel mit hochviskosem Öl A

Durch die Variation des Saugrohrdrucks wurden eine Änderung des Brennraumdrucks und des Kurbelgehäusedrucks untersucht. Den Einfluss einer Änderung des Kurbelgehäusedrucks bei konstantem Saugrohrdruck ($p_{Saug} = 169$ mbar) zeigt der zeitliche Verlauf der Partikelanzahlemissionen aus dem Kondensationspartikelzähler und den Ölemissionen in Abbildung 4.9. Die Dauer der Schubphasen mit 10 und 30 Sekunden ist gleich lang wie bei der Saugrohrdruckvariation. Hier führt die 30 Sekunden-Schubphase zu höheren Partikel- und Ölemissionen. Der mittlere Kurbelgehäusedruck im Schub $p_{KGH,mittel,Schub} = -80$ mbar stellt die Ausgangsbasis der Variation dar und entspricht der Messung aus der Saugrohrdruckvariation. Die Absenkung des Kurbelgehäusedrucks auf $p_{KGH,min,Schub} = -111$ mbar durch Androsselung der Kurbelgehäusebelüftung reduziert das Emissionsniveau in Schub- und Lastphasen. Das Druckgefälle vom Brennraum in das Kurbelgehäuse wird erhöht und folglich daraus der Öltransport durch Änderung des Kräftegleichgewichts aus Massen- und Druckkräften hin zu den Druckkräften auf die Förderrichtung in das Kurbelgehäuse verschoben. Wird der Kurbelgehäusedruck durch Freilegen der Kurbelgehäuseentlüftung (somit ohne Rückführung des Blow-by-Gases) auf nahezu Umgebungsdruck ($p_{KGH,max,Schub} = 0$ mbar) erhöht, werden steigende Emissionswerte festgestellt. Der bereits beobachtete Effekt des Druckverhältnisses zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse bestätigt sich damit auch hier.

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

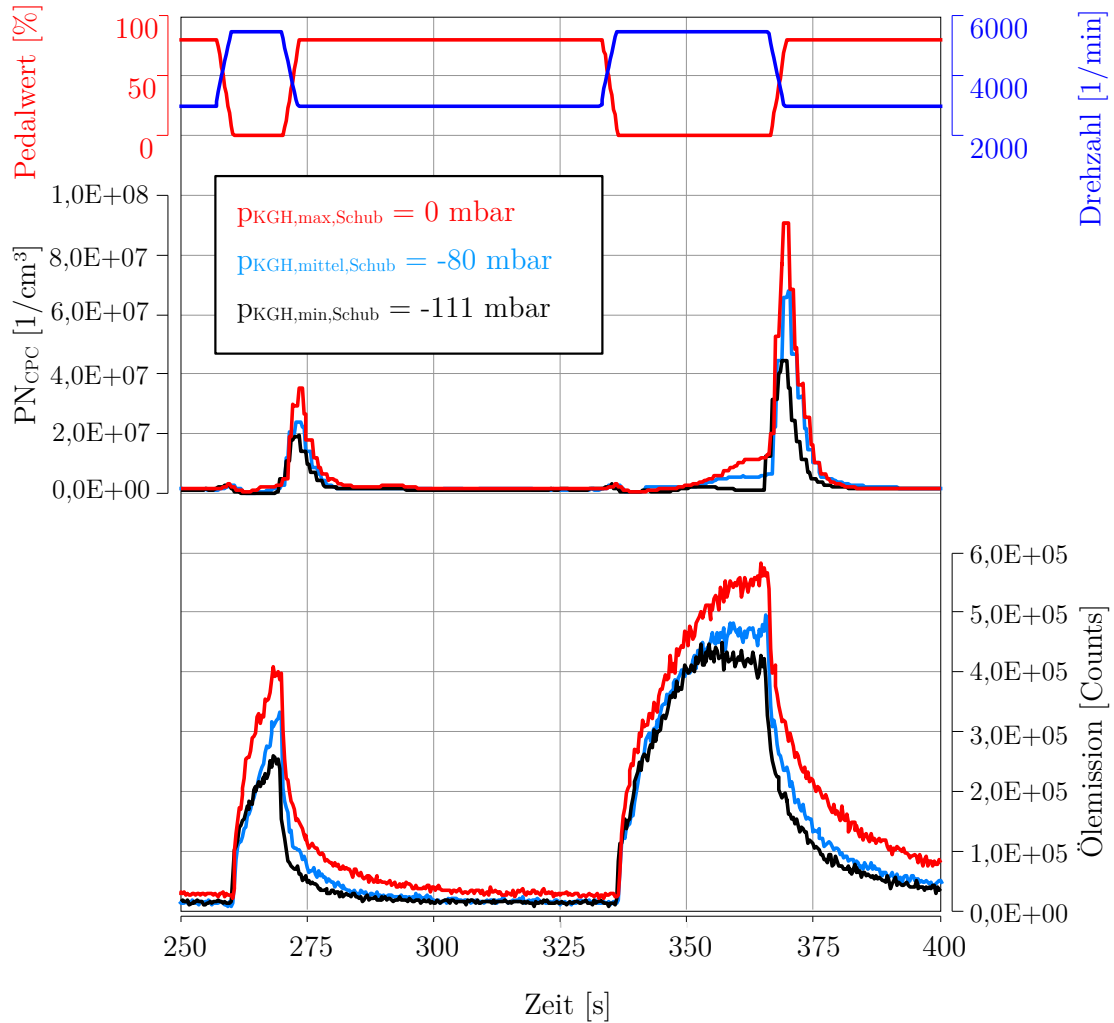


Abbildung 4.9: Zeitlicher Verlauf der Partikel- und Ölemissionen bei Schub-Last-Wechseln mit 10 und 30 Sekunden Schub und Variation des Kurbelgehäusedrucks im Schub mit hochviskosem Öl A bei einem Saugrohrdruck von 169 mbar im Schub

Damit lässt sich ableiten, dass die genaue Auslegung der Kurbelgehäusebe- und Kurbelgehäuseentlüftung in Kombination mit dem Saugrohrdruck im Schub erfolgen muss. Das Ziel sollte sein, die Transportrichtung des Öls in das Kurbelgehäuse zu fördern, da hierdurch die Öl- und Partikelemissionen im Schub positiv beeinflusst werden. Eine reduzierte Drosselung (höhere Saugrohrdrücke) ist bezüglich Emissionsreduzierung zielführend. Gegebenenfalls sprechen Fahrbarkeitsanforderungen gegen diese Anpassung auf einen höheren Saugrohrdruck, da damit die erwartete Verzögerung des Fahrzeugs im Schubbetrieb ebenfalls reduziert wird. In zukünftigen hybridisierten Antrieben kann über eine geschickt gewählte Ladestrategie beziehungsweise Rekuperation und der daraus hervorgerufenen Verzögerung eine Kompensation der Fahrbarkeitsanforderungen erfolgen. Durch diese Vorgehensweise kann somit eine Reduzierung bezüglich Öl- und

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Partikelemissionen umgesetzt werden, ohne Kompromisse bei der Fahrbarkeit einzugehen.

Die in Abbildung 4.10 dargestellten kumulierten Maximalwerte zeigen bei allen betrachteten Partikel- und Ölemissionen einen Anstieg mit zunehmendem Kurbelgehäusedruck im Schub. Der Nukleationsanteil an den Gesamtpartikeln liegt bei circa 80 % und damit bei der Kurbelgehäusedruckvariation vergleichbar mit dem Nukleationsanteil der Saugrohrdruckvariation. Der Signalanteil aus dem Kondensationspartikelzähler im Vergleich zum Gesamtsignal des DMS500 bleibt auch auf ähnlichem Niveau von circa 10 %.

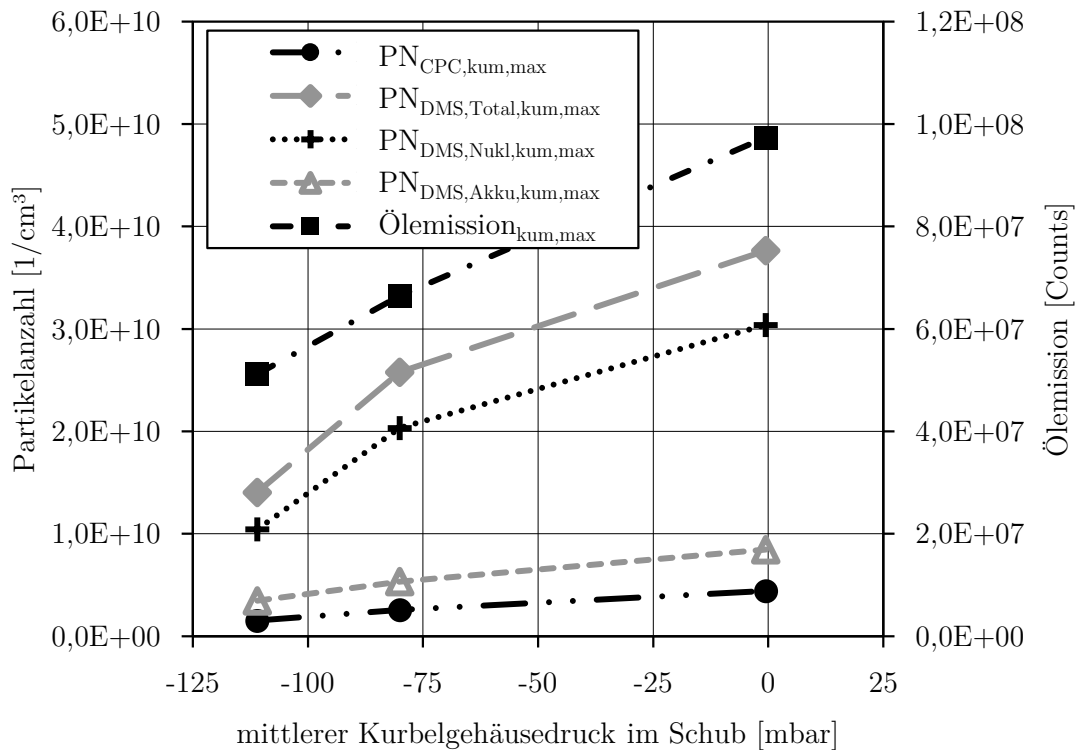


Abbildung 4.10: Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf Partikel- und Ölemissionen bei Schub-Last-Wechseln mit hochviskosem Öl A und konstantem Saugrohrdruck von 169 mbar im Schub

Beim Wechsel auf ein anderes, niedrigviskoses Motoröl (Öl B; siehe Kapitel 4.1) zeigt sich bei abgesenktem Kurbelgehäusedruck ($p_{KGH,min,Schub} = -113$ mbar) und mittlerem Kurbelgehäusedruck ($p_{KGH,mittel,Schub} = -80$ mbar) ein vergleichbares Verhalten wie mit dem höherviskosem Öl A und damit ein Emissionsanstieg mit steigendem Kurbelgehäusedruck (Abbildung 4.11). Dabei liegt das Emissionsniveau bei den betrachteten Größen Partikelanzahl aus dem Kondensationspartikelzähler und dem DMS500 sowie den Ölemissionen im Bereich von 20 - 30 % unter dem Emissionsniveau von Öl A. Jedoch kann

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

beim niedrigviskosen Öl B bei erhöhtem Kurbelgehäusedruck ($p_{\text{KGH,max,Schub}} = -1$ mbar) eine Emissionsreduzierung von 72 - 88 % festgestellt werden. Beim erhöhten Kurbelgehäusedruck verursacht das Öl A hingegen nochmals eine Emissionssteigerung (vergleiche Abbildung 4.10).

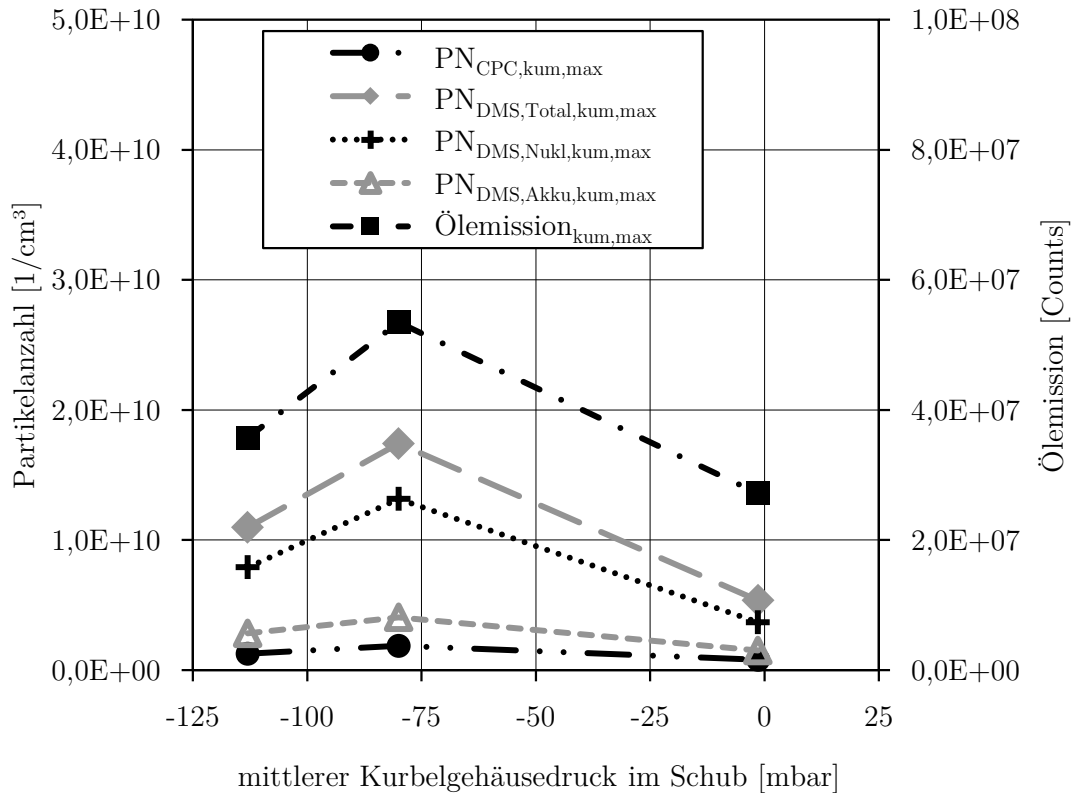


Abbildung 4.11: Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf Öl- und Partikelemissionen bei Schub-Last-Wechseln mit niedrigviskosem Öl B und konstantem Saugrohrdruck von 169 mbar im Schub

Die Betrachtung von zwei Ölen unterschiedlicher Viskosität zeigt deutlich unterschiedliches Öl- und Partikelemissionsverhalten. Die genauen chemischen Zusammensetzungen der Basisöle oder der Additivpakete wurden hierbei nicht im Detail untersucht, sollten aber über Analysen mit gezielter Variation von Basisölen und Additivkomponenten in weiterführenden Arbeiten in Betracht gezogen werden. Die allgemein angestrebte CO_2 -Reduzierung und damit verbundene Tendenz zu niedrigviskoserem Ölen kann hier zu einem veränderten Öltransport und damit Emissionsverhalten führen. Daraus ergibt sich die Forderung für zukünftige Öle, nicht nur eine Absicherung, zum Beispiel bezüglich Verschleißverhalten, Dauerhaltbarkeit und Ablagerungsverhalten, sondern auch bezüglich der Emissionsneutralität nachzuweisen.

In Abbildung 4.12 ist für alle Emissionswerte der Saugrohrdruck-, der Kurbelgehäuse- druck- und der Ölvariation eine Korrelation der kumulierten Maximalwerte der Emissionen bei Schub-Last-Wechseln zur Partikelanzahl des Kondensationspartikelzählers dargestellt. Dabei liegen die Korrelationskoeffizienten bei $r > 0,987$ und zeigen somit eine sehr gute Korrelation. Hierdurch lässt sich nachweisen, dass eine Änderung des Öltransportverhaltens durch Variation des Druckverhältnisses über die Kolben- gruppe (Saugrohrdruck- und Kurbelgehäusedruckvariation) und des verwendeten Öls eine sig- nifikante Änderung des Emissionsverhaltens der Ölemission hervorruft. Diese Änderung hat direkte Auswirkungen auf das Partikelemissionsverhalten, was sowohl mit dem Kon- densationspartikelzähler als auch mit dem DMS500 ermittelt wurde. Zur Identifikation der Haupteinflussfaktoren für eine Emissionsreduzierung (bezüglich Öl- und Partikele- missionen) ist eine gesamtheitliche Abstimmung und Absicherung des Systems „Kolben- Kolbenringe-Zylinderlaufbahn“ hinsichtlich Saugrohr- und Kurbelgehäusedrücken erfor- derlich.

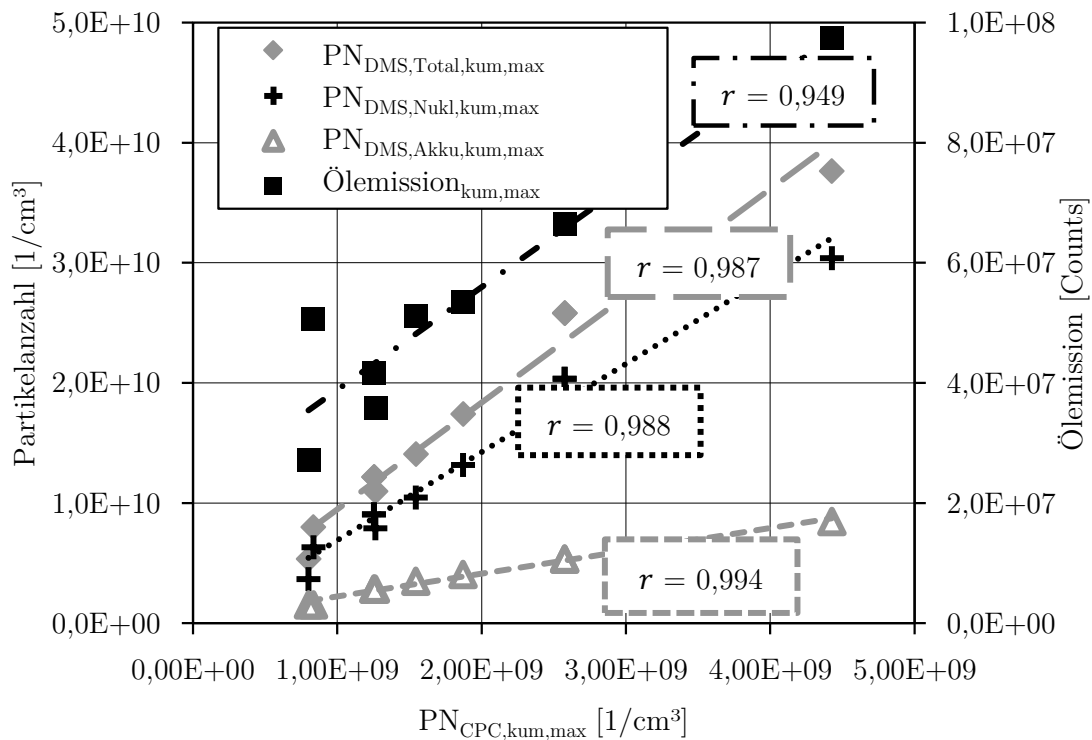


Abbildung 4.12: Korrelation der kumulierten Öl- und Partikelemissionen bei Variation des Kurbelgehäuse- und Saugrohrdrucks sowie des Öls bei Schub-Last-Wechseln

Durch die Betrachtung der kumulierten Emissionsmaximalwerte über den Schub-Last- Zyklus wurde die Korrelation der Ölemission und der Partikelanzahlemission nachge- wiesen. Im Folgenden wird am Beispiel von Öl A und Öl B in Abbildung 4.13 der

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Einfluss aus der Schubphase und der Lastphase untersucht. Dabei wird für jede einzelne Schubphase und jede einzelne Lastphase ein Emissionswert dargestellt. Auf der y-Achse sind die Ölemissionen in den jeweiligen Schub- und Last-Phasen und auf der x-Achse die mit dem Kondensationspartikelzähler gemessenen Partikelanzahlmissionen aufgetragen. Für die in blau dargestellten Schubphasen liegt der Korrelationskoeffizient r mit 0,604 auf einem niedrigen Wert. Hieraus lässt sich schließen, dass nur durch die Betrachtung der Schubphase keine direkten Rückschlüsse auf das Emissionsniveau der nachfolgenden Lastphase gezogen werden kann. Für die Ölemission der Lastphasen liegt hingegen ein relativ hoher Korrelationskoeffizient r von 0,943 vor, somit ist insbesondere die Lastphase ausschlaggebend für die Emissionsänderung. Damit lässt sich postulieren, dass eine Systemabstimmung insbesondere in den Lastsprüngen beziehungsweise Lastphasen erfolgen muss, um eine bestmögliche Reduzierung der Öl- und Partikelemissionen zu erreichen.

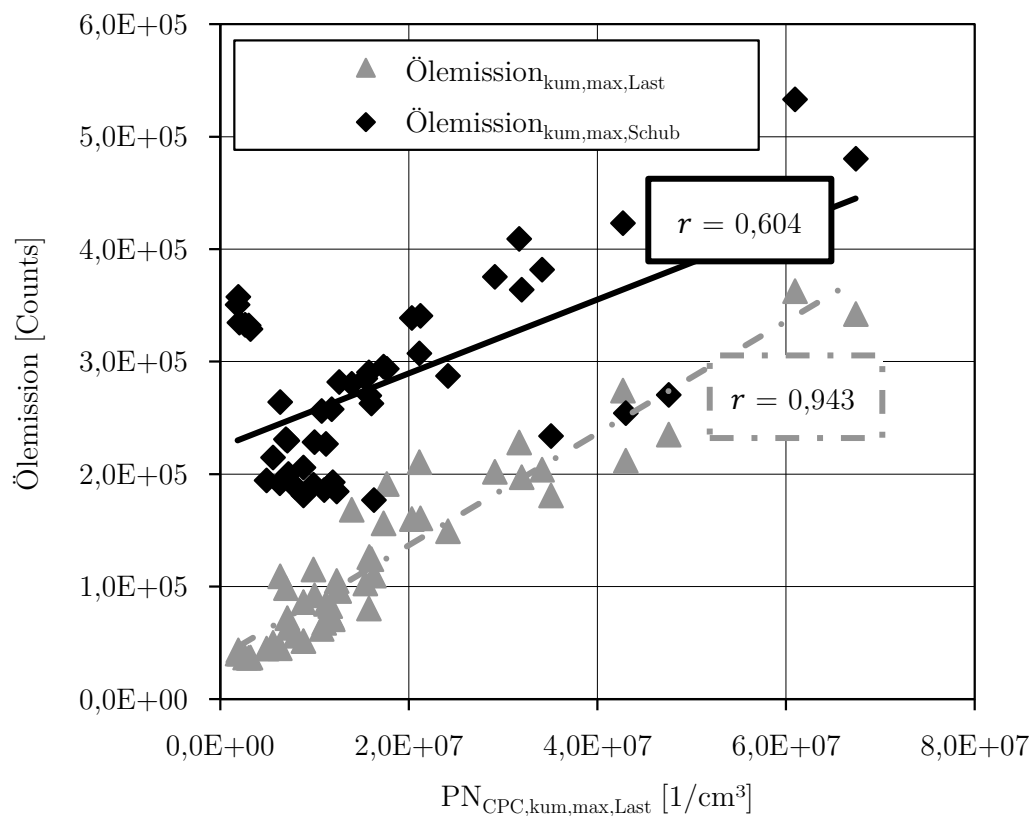


Abbildung 4.13: Korrelation der Ölemission in der Schubphase und der nachfolgenden Lastphase mit der Partikelemission in der nachfolgenden Lastphase für jeden Lastwechsel mit Öl A und B

4.4 Einfluss der Gemischbildung im stationären Motorbetrieb

Die Betrachtung des stationären Motorbetriebs wurde bei einer Drehzahl von $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und einem Drehmoment von $M_d = 90 \text{ Nm}$ durchgeführt. Dieser Betriebspunkt liegt im Bereich mittlerer Last bei niedrigen Drehzahlen und tritt typischerweise in Zyklen wie dem NEFZ und dem WLTC oder auch bei Realfahrten (Real Driving Emissions) auf. Der Motor wurde mit einer Kühlwassertemperatur von 72 °C und einem stöchiometrischen Gemisch ($\lambda = 1$) betrieben. Mit dieser Kühlwassertemperatur soll das Verhalten des Motors im Warmlauf betrachtet werden. Geringere Kühlwassertemperaturen hatten in vorangehenden Stichversuchen zu einem sehr hohen Emissionsniveau geführt und damit eine Verschmutzung der Messsysteme verursacht; daher werden im Folgenden keine geringeren Kühlwassertemperaturen betrachtet. Im Stationärpunkt wurde der Einspritzbeginn (ESB) in 5 °KW -Schritten beginnend bei 295 °KWvZOT nach früh bis zu einem Einspritzbeginn von 330 °KWvZOT verstellt. Die Variation des Einspritzzeitpunkts erfolgte mit zwei Kraftstoffen (Kraftstoff A und Kraftstoff B), um den Einfluss unterschiedlicher Kraftstoffzusammensetzung und insbesondere der geänderten Siedelinie des Kraftstoffs auf die Öl- und Partikelemissionen zu ermitteln.

Kraftstoff B hat im Vergleich zu Kraftstoff A $3,0 \text{ %}$ weniger p-Xylol, $5,5 \text{ %}$ weniger Ethylbenzol und $1,0 \text{ %}$ weniger n-Propylbenzol. Die Destillationsverläufe nach DIN EN ISO 3405 der zwei Kraftstoffe sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Für die Verdampfung von 50 % des Volumens benötigt Kraftstoff A eine Temperatur von 94 °C , der Kraftstoff B hingegen nur 74 °C . Die größten Unterschiede beim Verdampfungsverhalten von Kraftstoff A und B liegen im Temperaturbereich $50 - 150 \text{ °C}$ und im Bereich $40 - 80 \text{ %}$ des verdampften Volumens. Kraftstoff A besitzt somit eine schlechtere Verdampfungscharakteristik als Kraftstoff B.

In Tabelle 4.3 sind weitere ausgewählte Eigenschaften der drei Komponenten p-Xylol, Ethylbenzol und n-Propylbenzol aufgeführt, die in Kraftstoff A in höherem Anteil enthalten sind als in Kraftstoff B. Anhand der Molekülstruktur ist ersichtlich, dass alle drei Komponenten einen Benzolring besitzen. Die Siedepunkte der drei Komponenten liegen bei $136 - 159 \text{ °C}$ und damit im mittelflüchtigen bis schwerflüchtigen Bereich des Ottokraftstoffs. Das Vorhandensein des Benzolrings fördert weiterhin das PAK-Wachstum und dadurch die Rußentstehung (vergleiche Kapitel 2.1.2). Aufgrund der schlechteren Verdampfungseigenschaften und dem höheren Anteil an Molekülen mit Benzolringen in Kraftstoff A ist ein höheres Partikelemissionsniveau als bei Kraftstoff B zu erwarten.

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

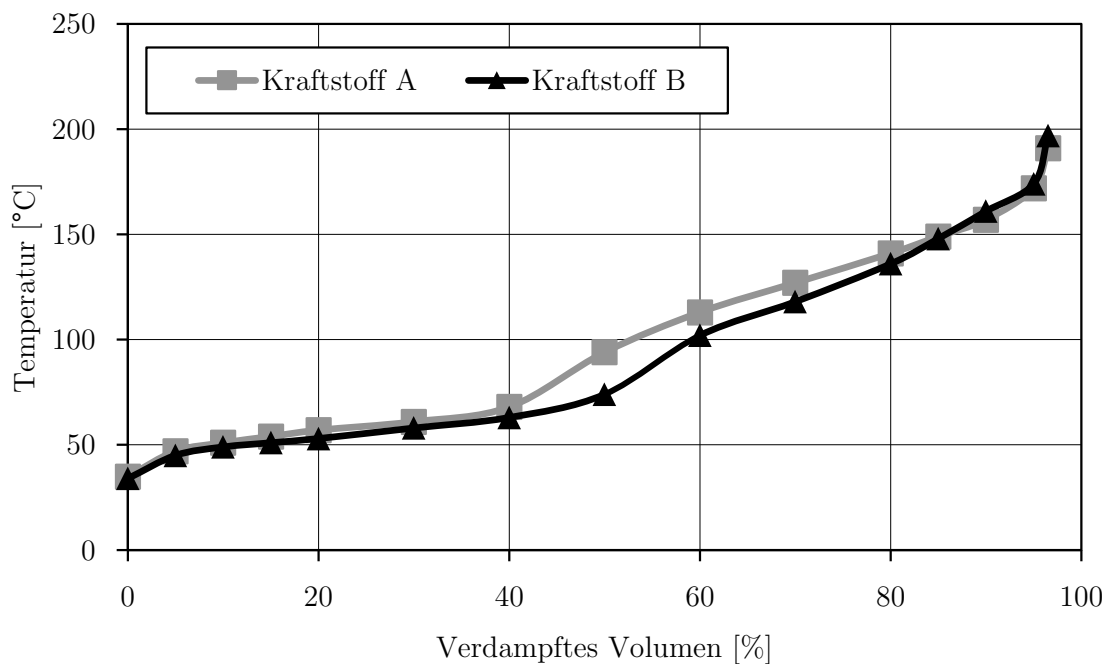


Abbildung 4.14: Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405 des Kraftstoffs A und des Kraftstoffs B mit erhöhtem verdampften Volumen im Temperaturbereich 50 - 150 °C

Tabelle 4.3: Vergleich ausgewählter Eigenschaften von p-Xylol, Ethylbenzol und n-Propylbenzol (Daten und Molekülstruktur aus [217 bis 219])

Parameter	p-Xylol	Ethylbenzol	n-Propylbenzol	Einheit
Molare Masse	106	106	120	g/mol
Siedepunkt	138	136	159	°C
Chemische Formel	C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₀	C ₉ H ₁₂	-
Molekülstruktur				-

Die Ergebnisse der Stationärpunkt Betrachtung der Partikelanzahlemissionen, gemessen mit dem DMS500 und dem Kondensationspartikelzähler, sind in Abbildung 4.15 über den Einspritzbeginn für die beiden Kraftstoffe A und B dargestellt. Im Bereich 295 °KWvZOT bis 310 °KWvZOT zeigen weder der Kondensationspartikelzähler noch

das DMS500 eine Signaländerung. Erst ab 315 °KWvZOT und mit noch früherem Einspritzbeginn steigt die Partikelanzahlmission an. Dabei liegen die Werte für den Kraftstoff A beim Einspritzbeginn 330 °KWvZOT bei den Partikelemissionen aus dem Kondensationspartikelzähler 20 % oberhalb der Werte für den Kraftstoff B. Bei den Messungen, die in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert wurden, wurde mit dem DMS500 durchgehend ein höherer Emissionswert ermittelt als mit dem Kondensationspartikelzähler. Auch bei den hier dargestellten Messungen zeigt sich beim Kraftstoff A bei 330 °KWvZOT ein Maximalwert beim DMS500 von $6,39E+09$ $1/cm^3$; beim Kondensationspartikelzähler liegt der Messwert dagegen nur bei $1,75E+09$ $1/cm^3$. Hieraus lässt sich ein hoher Anteil an flüchtigen Partikeln im Abgas ableiten. Der Kondensationspartikelzähler detektiert aufgrund der dort verbauten Evaporation Tube (siehe Kapitel 3.2.2) weniger flüchtige Partikel, da diese in der Evaporation Tube verdampft werden. Der Kraftstoff A liegt beim Einspritzbeginn von 330 °KWvZOT bezüglich des DMS500-Emissionswerts 84 % über den Werten von Kraftstoff B. Das durchgängig höhere Partikelemissionsniveau des Kraftstoffs A im Vergleich zum Kraftstoff B bestätigt damit die eingangs erwähnten Erwartungen aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften wie schlechterem Verdampfungsverhalten und höherem Aromatenanteil. Weiterhin weist die Partikelemissionsmessung des DMS500 für einen Einspritzbeginn von > 310 °KWvZOT einen exponentiellen Anstieg auf.

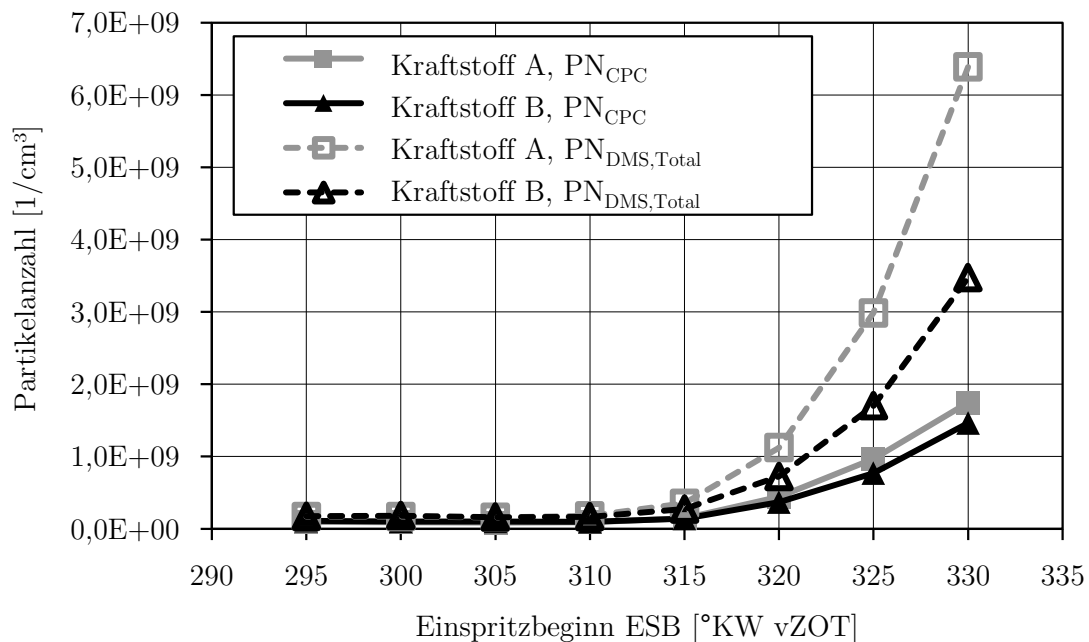


Abbildung 4.15: Einfluss des Einspritzbeginns auf die Partikelemissionen mit Kraftstoff A und B

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Die Ölemissionen in Abbildung 4.16 zeigen qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie die Partikelemissionen in Abbildung 4.15 bei der Variation des Einspritzbeginns mit den zwei Kraftstoffen A und B. Von dem spätesten untersuchten Einspritzbeginn bei 295 °KWvZOT bis zu 310 °KWvZOT zeigt sich keine signifikante Signaländerung. Die Ölemissionen mit dem Kraftstoff A liegen dabei um circa 30 % über den Ölemissionen beim Kraftstoff B. Die Ölemissionen steigen bei früherem Einspritzbeginn an und erreichen beim frühesten untersuchten Einspritzzeitpunkt von 330 °KWvZOT ihren Maximalwert. In diesem Maximalpunkt liegen die Ölemissionen des Kraftstoffs A 77 % über denen des Kraftstoffs B. Dieser Unterschied ist damit in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei den Partikelemissionen, gemessen mit dem DMS500 (88 %).

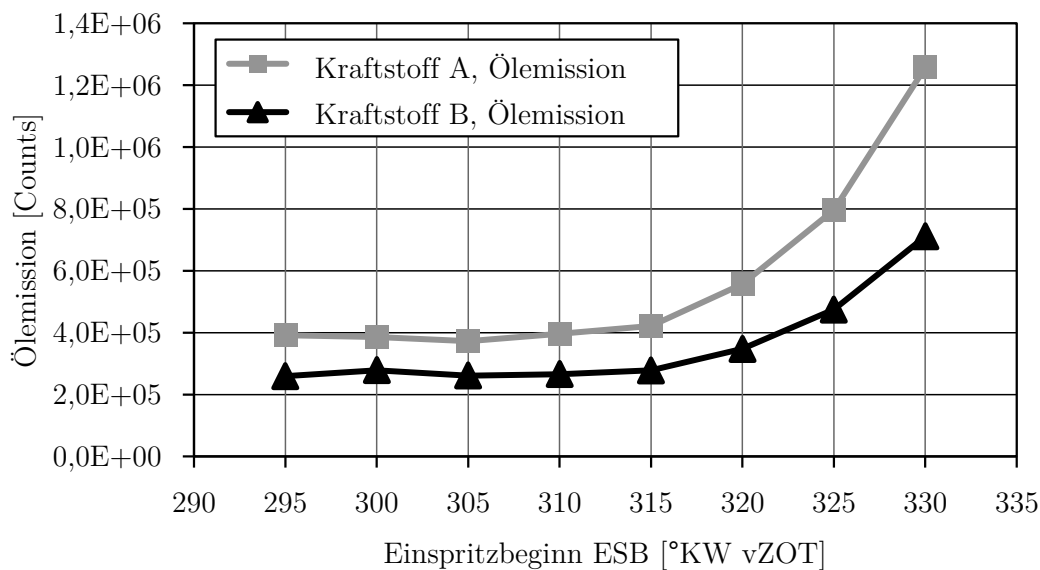


Abbildung 4.16: Einfluss des Einspritzbeginns auf die Ölemissionen mit Kraftstoff A und B

In Abbildung 4.17 sind für die beiden Kraftstoffe A und B auf der linken Seite die Partikelgrößenverteilungen, gemessen mit dem DMS500, für einen Einspritzbeginn von 315, 320 und 330 °KWvZOT exemplarisch dargestellt. Die Partikelemission des Kraftstoffs A liegt bei allen Partikeldurchmessern über denen des Kraftstoffs B. Dabei ist wie zuvor beschrieben ein Partikelanstieg bei Verstellung der Einspritzung in Richtung früh (330 °KWvZOT) zu erkennen. Der Unterschied zwischen den Kraftstoffen wird bei früherer Einspritzung größer. In der weiteren Analyse wird eine Klassifizierung in zwei Partikelgrößenbereiche < 10 nm und > 10 nm vorgenommen. Zunächst wird der Bereich der kleinen Nukleationspartikel bei < 10 nm betrachtet. Bei 315 °KWvZOT werden durch Kraftstoff A bereits signifikant höhere Partikelwerte generiert als dies bei Kraftstoff B der Fall ist. Beim nächsten Einspritzbeginn bei 320 °KWvZOT weist

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Kraftstoff B immer noch ein abfallendes Partikelsignal hin zu kleineren Partikeln analog zum Verhalten bei 315 °KWvZOT auf, ebenso bei Kraftstoff A mit den schlechteren Verdampfungseigenschaften den zuvor beobachteten Partikelanstieg. Beim Einspritzbeginn von 330 °KWvZOT zeigen Kraftstoff A und B qualitativ den gleichen Verlauf der Partikelemission über die Partikelgrößenverteilung, das heißt einen Signalanstieg im Größenbereich < 10 nm, wobei Kraftstoff A weiterhin über Kraftstoff B liegt. Im Partikelgrößenbereich > 10 nm hat die frühe Einspritzung bei Partikelgrößen von 100 - 200 nm einen signifikanten Anstieg.

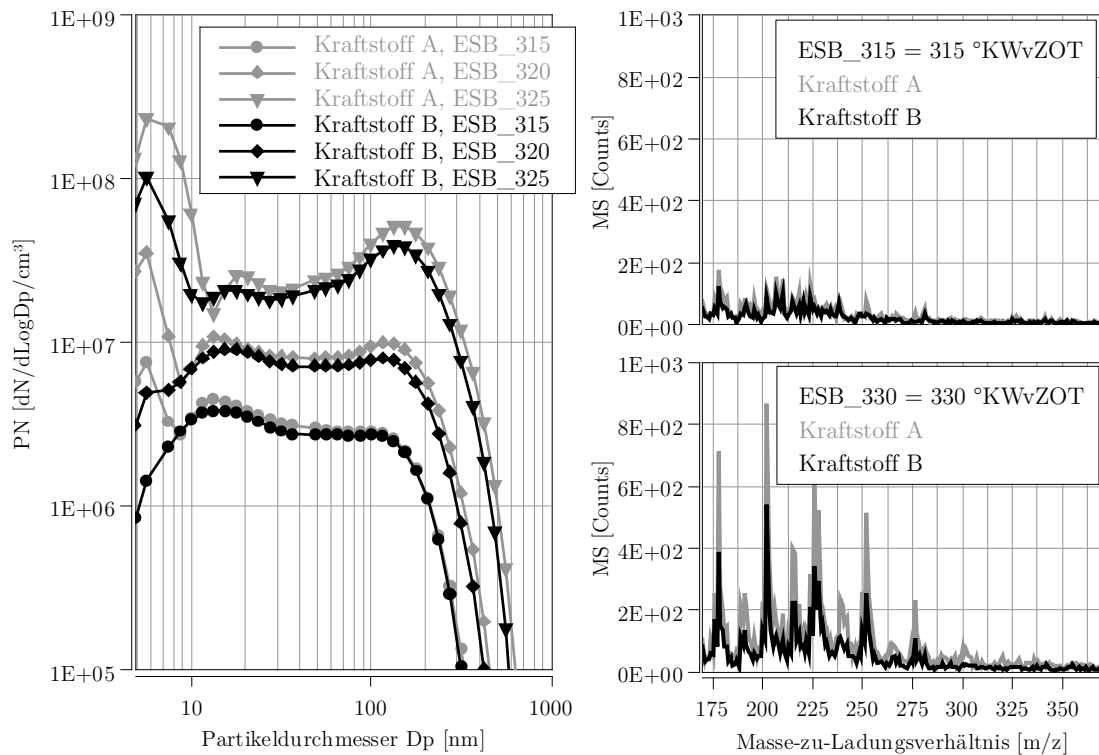


Abbildung 4.17: Kraftstoffvergleich für Kraftstoff A und B bezüglich Partikelgrößenverteilung und Massenspektrum bei unterschiedlichem Einspritzbeginn bei $\lambda = 1$ und 72 °C Kühlwassertemperatur im Stationärpunkt 2000 min^{-1} , 90 Nm

Die Diagramme auf der rechten Seite in Abbildung 4.17 zeigen beispielhaft das Massenspektrum bei 315 °KWvZOT (oben) und 330 °KWvZOT (unten). Hier kann auch wie beim Partikelsignal aus dem DMS500 ein höheres Emissionsniveau von Kraftstoff A festgestellt werden. Die Unterschiede im Massenspektrum werden insbesondere beim frühen Einspritzbeginn von 330 °KWvZOT deutlich. Es liegen mehrere Massenpeaks bis hin zu schwerflüchtigen Bereichen mit einem Masse-zu-Ladungsverhältnis von 300 m/z vor.

Die unterschiedliche Verdampfungscharakteristik der zwei untersuchten Kraftstoffe in Kombination mit Variation des Einspritzbeginns weist somit eindrücklich einen signifikanten Einfluss der Gemischbildung auf die Partikelanzahlemission und die Ölemission nach. Als Hypothese zur Erklärung des Anstiegs der Öl- und Partikelemissionen kann angeführt werden, dass es durch die Frühverstellung der Einspritzung zu einem Bauteilkontakt des eingespritzten Kraftstoffs (mit dem Kolbenboden) kommt, wodurch fettere Gemischzonen auch in Zylinderwandnähe entstehen können. Durch das Einbringen des Kraftstoffs in den Ölfilm und die folgende Druck- und Temperaturänderung nach der Zündung sowie bei der Umsetzung des Luft-Kraftstoff-Gemischs können schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe mit in das Gemisch im Brennraum gelangen und zu erhöhten Partikelemissionen beitragen.

Aus den diskutierten Ergebnissen lässt sich festhalten, dass die Gemischbildung beziehungsweise Einspritzstrategie unter Berücksichtigung der Kraftstoffeigenschaften optimiert werden muss, wobei sich dabei für die Absicherung ein möglichst schlechtes Verdampfungsverhalten (innerhalb der DIN EN 228 Spezifikation) empfiehlt. Um eine Optimierung der Einspritzstrategie in der Entwicklungsphase des Motors umzusetzen, kann insbesondere ein Fokus auf die Nukleationspartikel < 10 nm (gemessen mit Combustion DMS500) herangezogen werden. Diese Nukleationspartikelentstehung gilt es so gut wie möglich zu vermeiden. Durch das Time-of-Flight-Massenspektrometer lässt sich zur Optimierung der Einspritzstrategie mit dem Ziel Öl- und Partikelemissionsreduzierung allgemein eine möglichst geringe Signalstärke ohne Ausprägung eines Alkanrasters in der Spektraldarstellung oder sonstiger signifikant auftretender Massenpeaks ableiten.

4.5 Kraftstoffvariation im hochdynamischen RDE-Ausschnitt

Im vorherigen Kapitel 4.4 wurde der Einfluss einer geänderten Gemischbildung durch Variation des Einspritzbeginns in Kombination mit einer geänderten Verdampfungscharakteristik des Kraftstoffs und dessen chemischer Zusammensetzung im stationären Motorbetrieb betrachtet. Im Folgenden werden fünf weitere Kraftstoffe im hochdynamischen Motorbetrieb aus einer Realfahrtsequenz untersucht. Die Abbildung 4.18 zeigt den zeitlichen Verlauf des Pedalwertes und der Motordrehzahl in einem hochdynamischen RDE-Ausschnitt. Der vorliegende RDE-Ausschnitt besitzt einige Beschleunigungssequenzen mit hohen Lastanforderungen (Pedalwert bis zu 100 %) und einer Kombination mit Drehzahlen in diesen Beschleunigungsphasen bis zu 5800 min^{-1} . Durch die hohen Lasten und Drehzahlen soll insbesondere eine größere Interaktion des Kraftstoffsprays mit den brennraumangrenzenden Bauteilen wie Kolben und

Zylinderlaufbahn hervorgerufen werden, um die geänderten Kraftstoffeigenschaften und deren Auswirkung auf das Emissionsverhalten zu untersuchen.

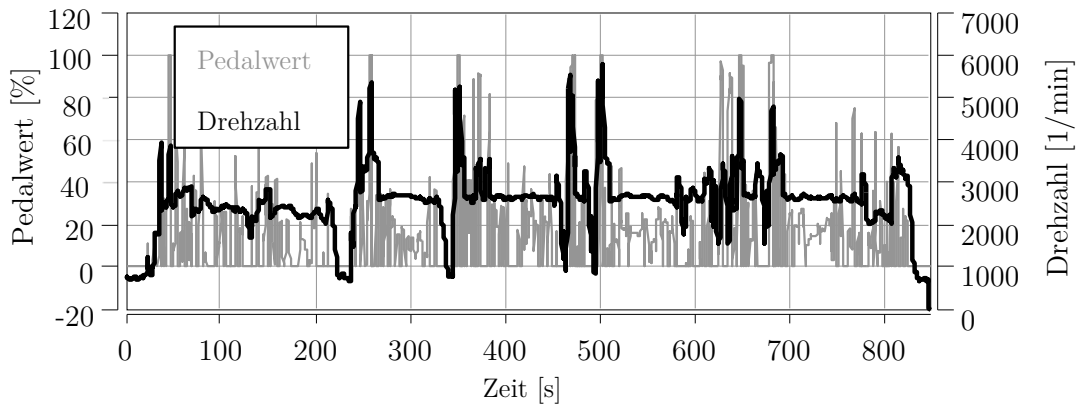


Abbildung 4.18: Zeitlicher Verlauf der Motordrehzahl und des Pedalwertes im hochdynamischen RDE-Ausschnitt

Für die Untersuchung im hochdynamischen RDE-Ausschnitt wurde das Öl B (siehe Kapitel 4.1) in Kombination mit zwei unterschiedlichen Basiskraftstoffen Kraftstoff C und D verwendet, die jeweils mit 10 Volumen-% Ethanol oder Dimethylcarbonat (DMC) additiviert wurden (vergleiche Tabelle 4.4). Die Kraftstoffe C und D ohne Additivierung haben mindestens eine Research Oktan Zahl (ROZ) von 95. Der handelsübliche Superkraftstoff C entspricht dabei der DIN EN 228 Spezifikation. Tabelle 4.5 ist zu entnehmen, dass Kraftstoff D sehr geringe Aromatenanteile (0,6 Volumen-%) sowie Ethanol- und Benzolanteile ($< 0,1$ Volumen-%) besitzt. Aufgrund der geringen Dichte von $\rho = 692 \text{ kg/m}^3$ entspricht der Kraftstoff D nicht der DIN EN 228 Spezifikation ($\rho = 720 - 775 \text{ kg/m}^3$, [220]).

Ethanol wurde für die Untersuchung als Additiv genutzt, da dieser Bestandteil als regenerativ hergestelltes Kraftstoffadditiv mit Beimischungen von 5 oder 10 Volumen-% bereits länger eingesetzt wird. Ethanol hat einen vergleichsweise niedrigen Siedepunkt von 78 °C [220] und einen geringeren unteren Heizwert (27 MJ/kg , [223]) als Superkraftstoff (41 MJ/kg , [220]), da im Molekül Sauerstoff gebunden ist. Ethanol als Reinstoff besitzt gute Eigenschaften bezüglich der Klopfestigkeit mit einer hohen ROZ von 114 [220]. Das Additiv Dimethylcarbonat (DMC, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) ist ein C1-Oxygenatkraftstoff und gilt als ein synthetischer Kraftstoff, der sich potenziell aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff nachhaltig herstellen lässt. DMC besitzt eine gute Klopfestigkeit ($\text{ROZ} \geq 109$) und hat seinen Siedepunkt bei 90 °C . Der untere Heizwert ($15,8 \text{ MJ/kg}$) ist aufgrund des gebundenen Sauerstoffs im Vergleich zu Superkraftstoff nach der DIN EN 228 Spezifikation relativ niedrig. Durch die nicht vorhandene direkte C-C-Bindung

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

und den hohen Sauerstoffgehalt kann eine partikelarme Verbrennung mit diesem Kraftstoff realisiert werden. Untersuchungen von Härtl et al. [179] zeigen bei stationärer Betrachtung in einem mittleren Lastpunkt ($p_{mi} = 6$ bar) eine Partikelemissionsreduktion um den Faktor 10 [178, 179, 224].

Tabelle 4.4: Bezeichnungen der fünf untersuchten Kraftstoffe im RDE-Ausschnitt

Kraftstoff	Beschreibung
C	Haltermann Gasoline EN 228 E0, ROZ95
C-E10	Haltermann Gasoline EN 228 E0, ROZ95 + 10 Vol.-% Ethanol
C-DMC10	Haltermann Gasoline EN 228 E0, ROZ95 + 10 Vol.-% Dimethylcarbonat (DMC)
D	Aral Special Fuel (ASF), ROZ95
D-DMC10	Aral Special Fuel (ASF), ROZ95 + 10 Vol.-% Dimethylcarbonat (DMC)

Tabelle 4.5: Ausgewählte Spezifikationen der Kraftstoffe C und D (Daten aus [221] und [222])

Parameter	Methode	Kraftstoff C	Kraftstoff D	Einheit
Dichte bei 15°C	EN ISO 12185	740	692	kg/m ³
ROZ	EN ISO 5164	95,6	95,3	-
MOZ	EN ISO 5163	86,4	90,1	-
Schwefelgehalt	EN ISO 20846	6	3	mg/kg
Olefingehalt	EN ISO 22854	7,7	0,5	Volumen-%
Aromatengehalt	EN ISO 22854	31,0	0,6	Volumen-%
Benzolgehalt	EN ISO 22854	0,4	< 0,1	Volumen-%
Ethanolgehalt	EN ISO 22854	< 0,2	< 0,1	Volumen-%
Sauerstoffgehalt	EN ISO 22854	< 0,1	2,4	Massen-%

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Der Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405 in Abbildung 4.19 stellt die Temperatur in °C über dem verdampften Volumen in % für die untersuchten Kraftstoffe dar. Kraftstoff C benötigt im Bereich des verdampften Volumens von 20 bis über 90 % die höchsten Temperaturen zum Verdampfen und zeigt damit in Bezug auf die Gemischbildung die schlechteste Verdampfungscharakteristik. Durch die Additivierung des Kraftstoffs C mit 10 Volumen-% Ethanol wird die benötigte Temperatur im Bereich 20 bis 60 % des verdampften Volumens abgesenkt, wie anhand des Siedepunktes von Ethanol bei 78 °C erwartet. Beim Kraftstoff C mit 10 Volumen-% DMC liegt der Destillationsverlauf bei 30 bis 50 % des verdampften Volumens oberhalb von Kraftstoff C-E10. Dies lässt sich ebenso über den Siedepunkt von DMC bei 90 °C erklären. Die sehr gute Verdampfungscharakteristik des Kraftstoffs D lässt sich beispielsweise an der Temperatur bei 80 % des verdampften Volumens ablesen, diese beträgt 101 °C im Vergleich zu 145 °C bei Kraftstoff C. Analog zu Kraftstoff C-DMC10 lässt sich auch das Verdampfungsverhalten von Kraftstoff D nochmals durch Additivierung mit 10 Volumen-% DMC weiter verbessern. Für die nachfolgend diskutierten Untersuchungen ist anzumerken, dass die Einspritzstrategie für die Untersuchungen der Kraftstoffvariation im Serienzustand belassen und nicht auf die einzelnen Kraftstoffe angepasst wurde.

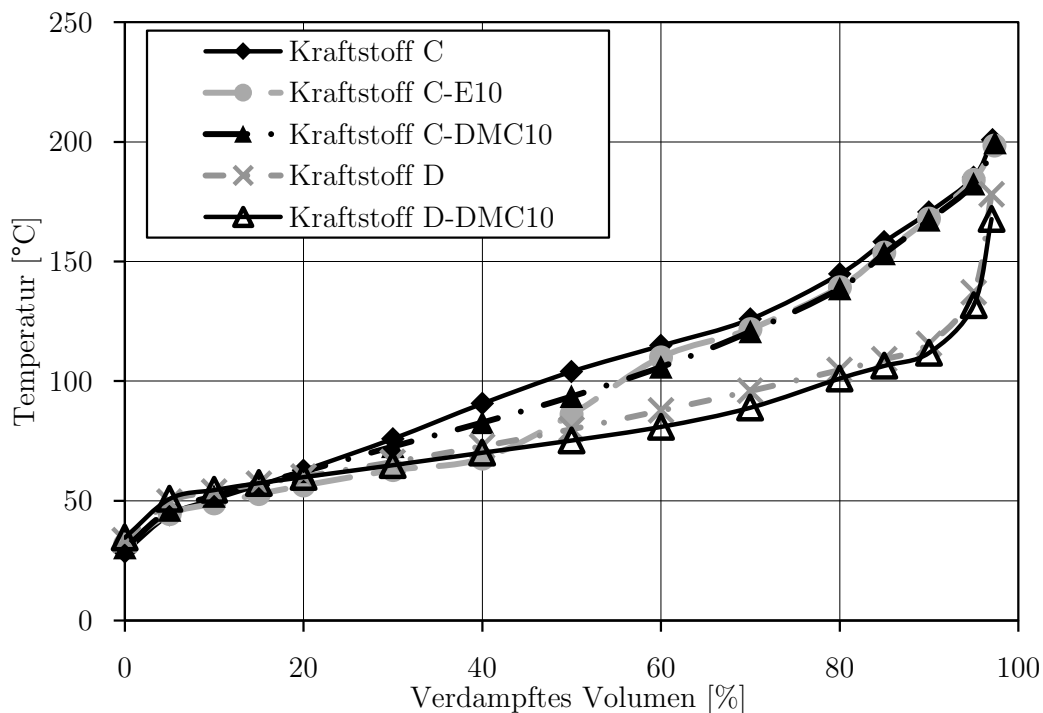


Abbildung 4.19: Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405 der Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Die aus der Kraftstoffvariation resultierenden Partikel- und Ölemissionen im hochdynamischen RDE-Ausschnitt sind in Abbildung 4.20 als maximaler, kumulierter Emissionswert dargestellt.

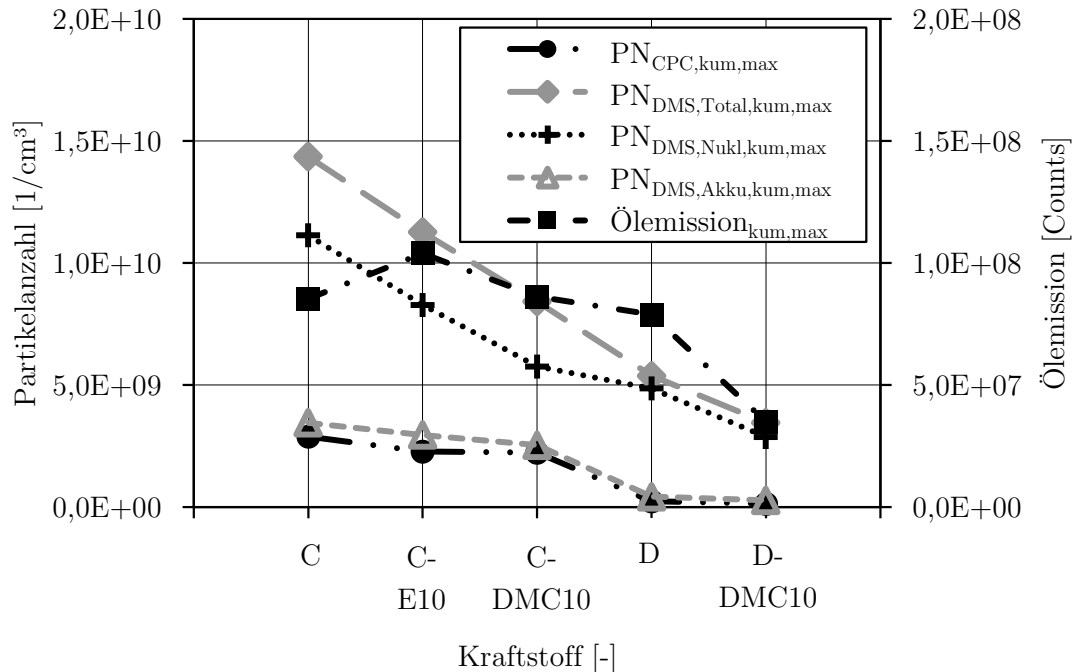


Abbildung 4.20: Einfluss des Kraftstoffs auf die maximalen kumulierten Partikel- und schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffemissionen im hochdynamischen RDE-Ausschnitt

Hierbei zeigt sich das höchste Partikelemissionsniveau bei $1,44E+10$ $1/\text{cm}^3$ (gemessen mit dem DMS500) beziehungsweise $2,89E+09$ $1/\text{cm}^3$ (gemessen mit dem Kondensationspartikelzähler) für Kraftstoff C. Durch die Additivierung mit Ethanol werden die Partikelanzahlemissionen um 21 % beim Kondensationspartikelzähler und um 22 % beim DMS500 reduziert. Eine ähnliche Partikelemissionsreduktion wird durch die Beimischung von DMC mit 23 % beim Kondensationspartikelzähler und 41 % beim DMS500 erreicht. Der Kraftstoff D liegt bei dem Wert des Kondensationspartikelzähler um 92 % unter dem maximalen kumulierten Wert des Kraftstoffs C. Auch beim Kraftstoff D kann eine weitere Partikelemissionsminderung um 95 % im Vergleich zu Kraftstoff C mit einer Additivierung durch DMC erfolgen. Damit bestätigt sich die von Härtl et al. [179] getroffene Aussage einer Partikelemissionsreduktion durch die Verwendung von DMC. Ethanol führt ebenfalls zu einer Partikelemissionsreduktion, die jedoch nicht in vergleichbar starker Ausprägung wie bei der Additivierung mit DMC beobachtet werden konnte. Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) hat im Vergleich zu DMC ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) eine direkte C-C-Bindung sowie auch weniger im Molekül gebundenen Sauerstoff und damit ein

geringeres Reduktionspotenzial bezüglich Partikelemissionen als DMC. Die Ölemissionen zeigen bei Kraftstoff C einen leichten Anstieg von $8,53E+07$ Counts auf $1,04E+08$ Counts bei Additivierung mit Ethanol sowie $8,63E+07$ Counts bei Additivierung mit DMC. Ein Erklärungsansatz für diesen Anstieg sind die hochlastigen Beschleunigungsphasen, bei denen aufgrund des geringeren unteren Heizwertes und des im Kraftstoff gebundenen Sauerstoffs von Ethanol und DMC mehr Kraftstoff eingespritzt wird. Durch die serienmäßige Einspritzbedatung ohne Anpassungen an diese Kraftstoffblends ist hier nicht das volle Reduktionspotenzial bei den Ölemissionen ermittelbar. Wenn man die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Kraftstoffe ausblendet und nur die physikalische Eigenschaft der Verdampfung betrachtet, ergibt sich die in Abbildung 4.21 dargestellte Korrelation der maximalen kumulierten Partikelanzahlmission (aus dem Kondensationspartikelzähler) mit dem verdampften Volumen des Kraftstoffs bei den Temperaturen 70 °C (E70), 100 °C (E100) und 150 °C (E150) aus dem Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405 (vergleiche Abbildung 4.19). Im E70-Punkt liegt ein sehr geringer Korrelationskoeffizient mit $r = 0,468$ vor. Bei den höheren Temperaturpunkten E100 und E150 kann für die 5 untersuchten Kraftstoffe im hochdynamischen RDE-Ausschnitt eine sehr gute Korrelation ermittelt werden, der Korrelationskoeffizient liegt bei $r \geq 0,995$. Daraus lässt sich ableiten, dass insbesondere die höher siedenden Bereiche des Kraftstoffs ($> 100\text{ °C}$) einen Einfluss auf die Höhe der Partikelemission haben.

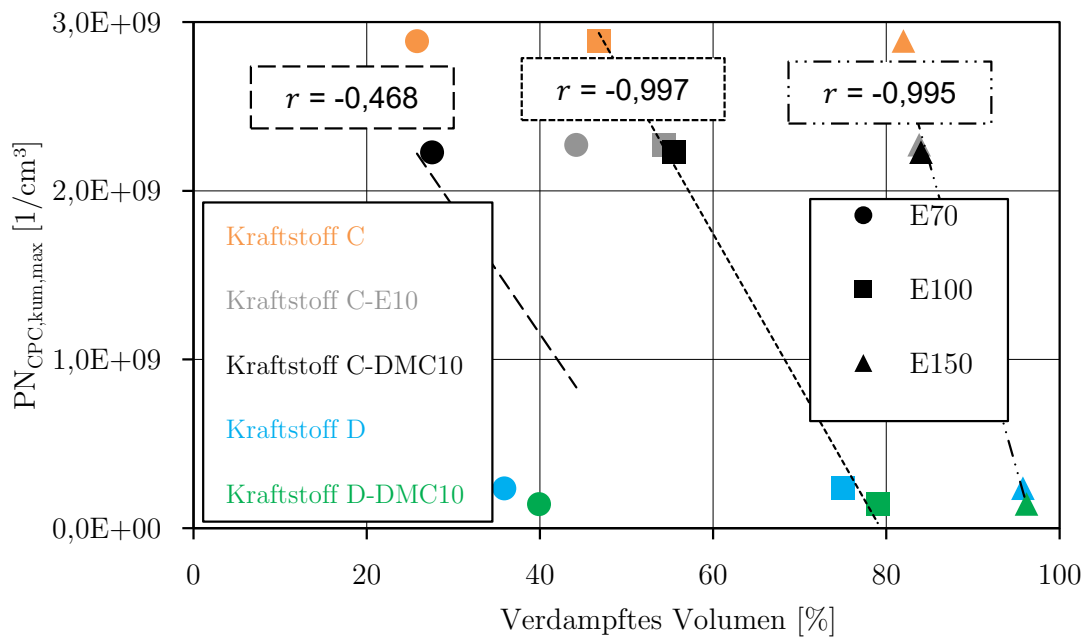


Abbildung 4.21: Korrelation der Partikelanzahl aus dem Kondensationspartikelzähler mit dem verdampften Volumen der Destillation nach DIN EN ISO 3405 bei 70 °C , 100 °C und 150 °C

4 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen

Aus den Untersuchungen lässt sich zusammenfassen, dass es ein erhebliches Potenzial durch alternative Kraftstoffe oder Kraftstoffblends gibt, um die Emissionen zu reduzieren. Diese alternativen Kraftstoffe liegen zum Teil auch außerhalb der definierten Spezifikation der DIN EN 228 und damit sollte auch eine Aufweitung der aktuellen Kraftstoffspezifikationen diskutiert werden, um das vollständige Emissionsreduzierungspotenzial zu nutzen.

5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen

5.1 Vergleich der Massenspektren

In einem Laborversuch wurden im Einzelnen nur der Kraftstoff und nur das Öl bezüglich der Massenspektren analysiert und somit ohne sonstige Einflüsse aus der motorischen Verbrennung betrachtet (siehe Abbildung 5.1). Für die Analyse des Öls wurde eine Hexanmischung mit 10 % Motoröl mit dem Kalibriersystem PiKal X der Firma Lubrisense GmbH über ein Piezoventil auf eine beheizte Platte in einen Gasstrom eindosiert [225] und mit dem Time-of-Flight-Massenspektrometer vermessen. Abbildung 5.1 zeigt den Vergleich der Massenspektren des Kraftstoffs C-E10 und des Öls B im Bereich 170 - 250 m/z. Beim Kraftstoff C-E10 liegt bei 182 m/z ein minimaler Massenpeak vor, dieser entspricht einem Kohlenwasserstoffmolekül mit C_{13} . Durch die Fragmentierung aufgrund der verwendeten Messtechnik des Massenspektrometers könnte die Masse 182 m/z auch aus langkettigen Molekülen $> C_{13}$ stammen (siehe Kapitel 3.2.1); da aber normalerweise im Ottokraftstoff übliche langkettige Moleküle nur bis zu C_{12} (vergleiche Kapitel 3.2.1) vorkommen, kann angenommen werden, dass hier tatsächlich nur ein C_{13} -Kohlenwasserstoffmolekül vorliegt.

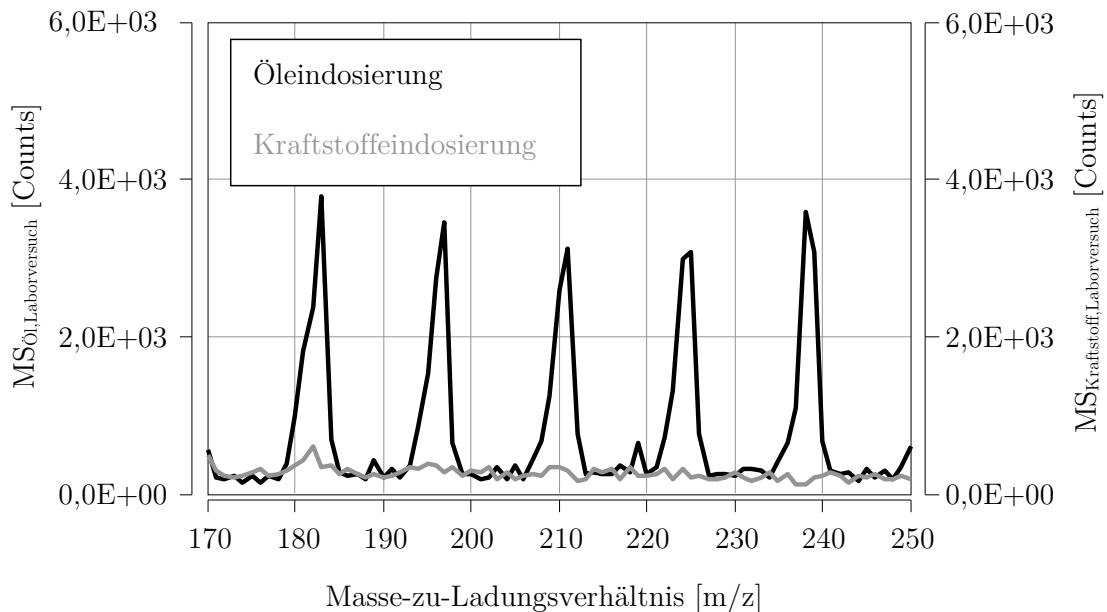


Abbildung 5.1: Massenspektren des Kraftstoff C-E10 und des Öls B im Laborversuch ohne motorische Einflüsse

5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen

Beim Ölspektrum ist ebenfalls ein Massenpeak im gleichen Bereich zu erkennen, wodurch ein Überschneidungsbereich von Öl und Kraftstoff entstehen kann. Bei den Massen > 182 m/z liegen keine eindeutigen Massenpeaks mehr im Kraftstoff C-E10 vor. Daraus kann abgeleitet werden, dass dem Bereich > 182 m/z keine signifikanten Signalanteile mehr dem Kraftstoff zuzuordnen sind. Die beim Öl weiterhin vorliegenden Massenpeaks kommen regelmäßig im Abstand von 14 m/z vor. Diese stellen die durch die Ionisierung zerfallenen langkettigen Kohlenwasserstoffe des Motoröls (C-H₂) dar (vergleiche Abbildung 3.4).

Abbildung 5.2 zeigt den Vergleich des Massenspektrums des Motoröls aus dem Laborversuch mit dem Massenspektrum des Motoröls aus dem Abgas in der unbefeuerten Schubphase, gemittelt aus der motorischen Untersuchung in einem hochdynamischen RDE-Ausschnitt. Die Signalpeaks bei unterschiedlichen Massen liegen in der Schubphase ebenfalls wie bei der Öleindosierung im Laborversuch mit einem Abstand von 14 m/z vor. In der motorischen Messung sind im Massenbereich < 225 m/z die größten Signalanteile ersichtlich, aber auch im Massenbereich > 300 m/z sind noch Massenpeaks mit einem Abstand von 14 m/z erkennbar. Somit können auch mittel- bis schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe aus dem Motoröl, beispielsweise beim Masse-zu-Ladungsverhältnis von 308 m/z (entspricht C₂₂H₄₆), in der vorliegenden motorischen Messung im Abgas nachgewiesen werden. Dabei ist zu beachten, dass auch noch schwerflüchtigere Komponenten aus dem Motoröl je nach Transport- und Emissionsmechanismus sowie je nach untersuchtem Betriebspunkt vorliegen können.

Die Lastphasen aus dem hochdynamischen RDE-Ausschnitt werden ab dem Beginn einer Beschleunigungsphase und damit dem Wechsel des Pedalwerts von ped = 0 % auf ped = 100 % definiert. Das Ende dieser Lastphase wird ab dem Zeitpunkt der Lastwegnahme – das heißt, wenn der Pedalwert ped < 100 % entspricht – zuzüglich 1 Sekunde festgelegt. Daraus ergeben sich 7 Lastphasen im hochdynamischen RDE-Ausschnitt. Insgesamt wird in den 7 Lastphasen über insgesamt 46 Sekunden gemittelt. Die Schubphasen werden mit Schubabschaltung (unbefeuert) und einer Dauer zwischen 7 und 12 Sekunden betrachtet. Entsprechend den Lastphasen werden im RDE-Ausschnitt 7 Schubphasen über insgesamt 45 Sekunden gemittelt, wodurch die gemittelten Bereiche zwischen Schub und Last hinsichtlich der Dauer vergleichbar bleiben.

Das in Abbildung 5.3 dargestellte gemittelte Massenspektrum aus den Lastphasen eines hochdynamischen RDE-Ausschnitts weist die gleichen Massenpeaks wie beim Eindosieren des Öls im Labor auf (vergleiche Abbildung 5.2). Die Massenpeaks haben einen Abstand von 14 m/z und zeigen damit ein fragmentiertes Alkanraster, welches durch

die Ionisierung der Kohlenwasserstoffmoleküle entsteht (siehe Kapitel 3.2.1 und Abbildung 3.4). In den Lastphasen lassen sich jedoch drei zusätzliche auffällige Massenpeaks bei 178, 202 und 216 m/z feststellen. Diese Massenpeaks sind nicht direkt dem Ölspektrum zuzuordnen.

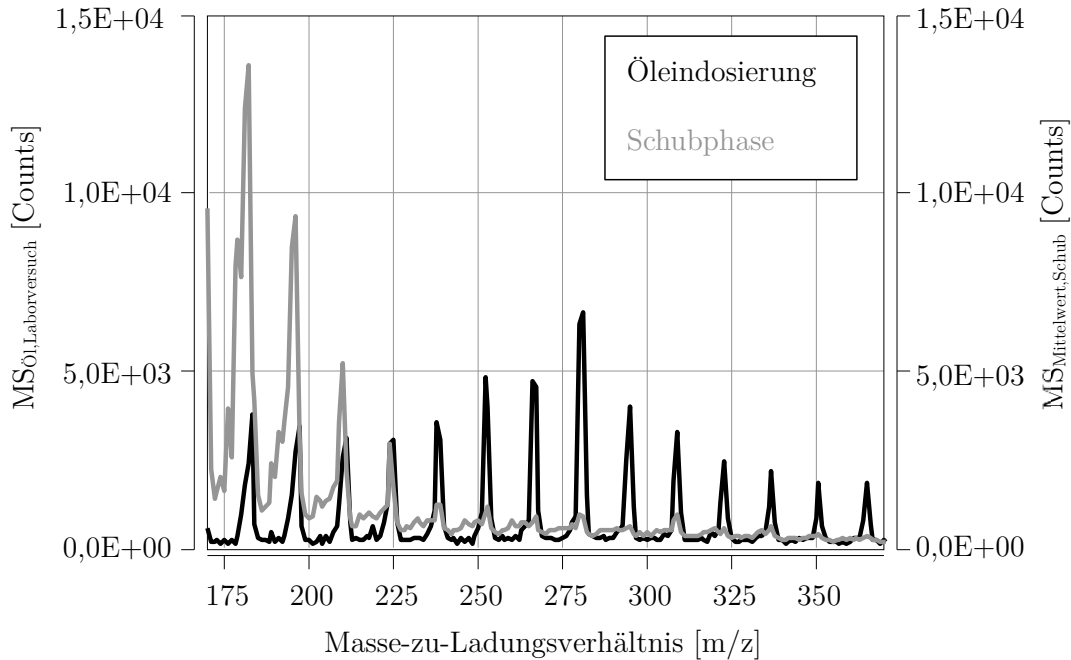


Abbildung 5.2: Massenspektren in Schubphasen mit dem Kraftstoff C-E10 im hochdynamischen RDE-Ausschnitt und des Öls B im Laborversuch

Eine eindeutige Zuordnung dieser Massenpeaks kann aufgrund der Fragmentierung durch die Ionisierung sowie des Vorliegens vieler verschiedener Kohlenwasserstoffe im motorischen Abgas mit der eingesetzten Messtechnik nicht durchgeführt werden und bedarf weiterer detaillierter Analysemöglichkeiten. Dabei könnte beispielsweise mit einem Time-of-Flight Aerosol Massenspektrometer [226, 227] oder mit einer Kombination der thermischen Desorption, der Gaschromatographie sowie eines Time-of-Flight-Massenspektrometers nach dem Verfahren von Rezaei et al. [182] (TD-GCxGC-TOF-MS; TD: thermische Desorption, GC: Gaschromatographie, TOF: Time-of-Flight, MS: Massenspektrometer) eine weitere Untersuchung der emittierten Kohlenwasserstoffe beziehungsweise PAKs erfolgen und diese eindeutiger identifiziert werden. Valle-Hernández et al. [228] und Vieira de Souza et al. [229] führen diese Massen als polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im Zusammenhang mit dieselmotorischer Verbrennung und Partikelemissionen auf. Beim Masse-zu-Ladungsverhältnis von 178 m/z kann es sich um Phenanthren oder Anthracen handeln, bei 202 m/z um Fluoranthen oder

Pyren. Weiterhin wird die Masse 216 m/z als 1,2-Benzofluoren (die Zahlen geben die Positionen der Doppelbindungen an) geführt. Diese polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe finden sich ebenfalls in der Liste der Environmental Protection Agency [230] und einem Factsheet der Europäischen Kommission [231]. Weitere kleinere Unterschiede lassen sich bei Massenpeaks bei 228 m/z (Chrysen, Triphenylen oder Naphthacen [228]) und 276 m/z (2,3-Phenylenpyren oder 1,12-Benzoperylen [228]) erkennen.

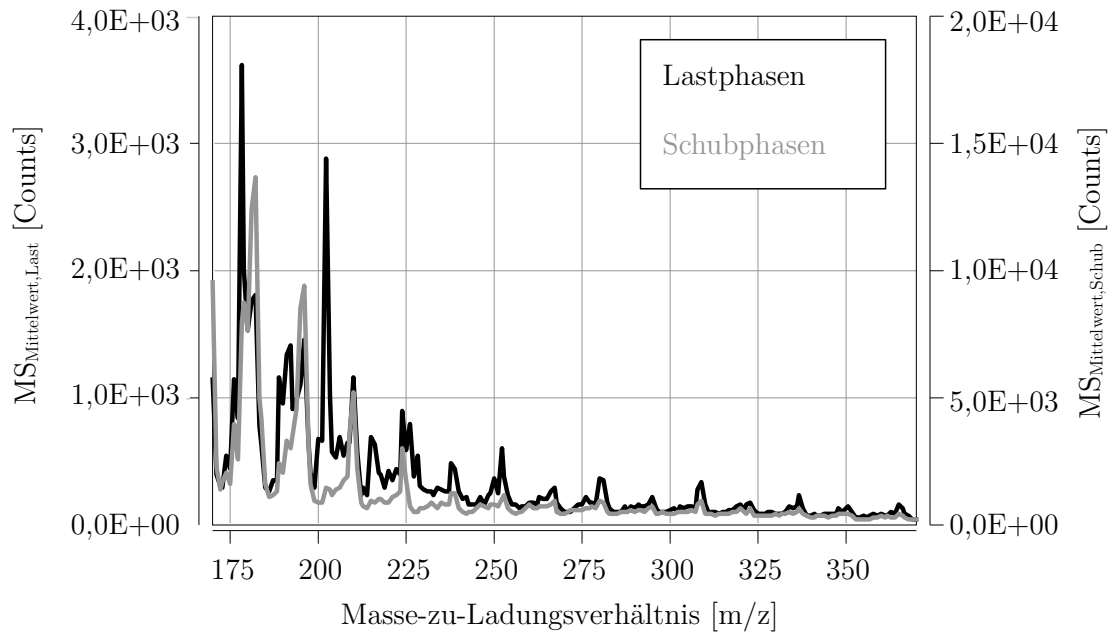


Abbildung 5.3: Massenspektren in Last- und Schubphasen mit Kraftstoff C-E10 und Öl B im hochdynamischen RDE-Ausschnitt

Fanick et al. [232] weisen Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen und Pyren sowohl als Festpartikel als auch als semi-volatile Partikel im dieselmotorischen Abgas nach. Die aus der Verbrennung entstehenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) gelangen nach Vieira de Souza et al. [229] ebenso in das Motoröl und können dort nachgewiesen werden. Da jedoch in Abbildung 5.3 beim gemittelten Massenspektrum im Schub bei den zuvor genannten PAK-Massen keine signifikanten Massenpeaks zu erkennen sind, kann davon ausgegangen werden, dass im Motoröl keine hohe Grundkonzentration dieser PAKs vorliegt und die in der Lastphase emittierten PAKs somit auch nur in der Lastphase vorhanden sind. Die Schub- und Lastphasen werden dabei im hochdynamischen RDE-Ausschnitt entsprechend der zu Beginn von Kapitel 5.1 beschriebenen Definition ermittelt. In der Yield Sooting Index Database [233] werden verschiedene Kraftstoffkomponenten und deren Rußneigung aufgeführt. Die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bei den Masse-zu-Ladungsverhältnissen von 178 m/z (Phenanthren oder Anthracen) und 202 m/z (Fluoranthen oder Pyren) werden

dort mit einem sehr hohen Yield Sooting Index von > 900 angegeben. Aus Abbildung 5.1 sind jedoch bei 178 m/z und 202 m/z keine signifikanten Signalpeaks zu erkennen und im Kraftstoff selbst mit dem Time-of-Flight-Massenspektrometer in dieser Messkonfiguration nicht nachweisbar.

5.2 Definition von Massenspektren des Motoröls und der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe

Aus dem Vergleich der Massenspektren in Kapitel 5.1 lassen sich zwei charakteristische Bereiche identifizieren: Zum einen die Massenpeaks, die dem Alkanraaster des Motoröls zuzuordnen sind, und zum anderen die Massenpeaks von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. Weiterhin ergeben sich die Massenbereiche mit Überschneidungen des Kraftstoffs mit dem Motoröl. Die Massenbereiche werden mit dem betreffenden Massen-zu-Ladungsverhältnis des Moleküls definiert, beispielsweise mit 202 m/z für Fluoranthren oder Pyren. Um ein zu geringes Nutzsignal zu vermeiden, wird ein Massenband für die betreffende Masse ± 1 m/z definiert und das Signal entsprechend gefiltert. Für die Masse 252 m/z bedeutet dies ein Massenband von 251 - 253 m/z. Bei Betrachtung des Öl- und Kraftstoffmassenspektrums (siehe Abbildung 5.1) ergibt sich ein Überschneidungsbereich von 181 - 183 m/z. Weiterhin liegen Überschneidungsbereiche vom Motoröl und den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen vor, dies betrifft die Massenbereiche 251 - 253 m/z und 277 - 279 m/z. Bei Betrachtung des Öls wird dieser Bereich ausgeblendet und in diesem Fall bis maximal zum Masse-zu-Ladungsverhältnis 394 m/z definiert; dies entspricht einem schwerflüchtigen $C_{28}H_{58}$ -Molekül. Im Folgenden werden die massenbandgeschnittenen Spektren des Motoröls (195 - 197, 209 - 211, 223 - 225, 237 - 239, 266 - 268, 280 - 282, 294 - 296, 308 - 310, 321 - 323, 336 - 338, 350 - 352, 364 - 366, 375 - 380, 390 - 394 m/z) in Abbildung 5.4 als „Öl-Massen“ und die der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe als „PAK-Massen“ (177 - 179, 201 - 203, 215 - 217, 227 - 229, 275 - 277 m/z) bezeichnet.

Um die Änderung verschiedener Betriebsrandbedingungen und Variationsparameter einer Versuchsreihe bezüglich des Öl- und PAK-Emissionsverhaltens zu beurteilen, wird die dimensionslose Größe PAK-zu-Öl-Massenverhältnis θ eingeführt:

$$\theta = \frac{\text{PAK - Massen [Counts]}}{\text{Öl - Massen [Counts]}} \quad (5.1)$$

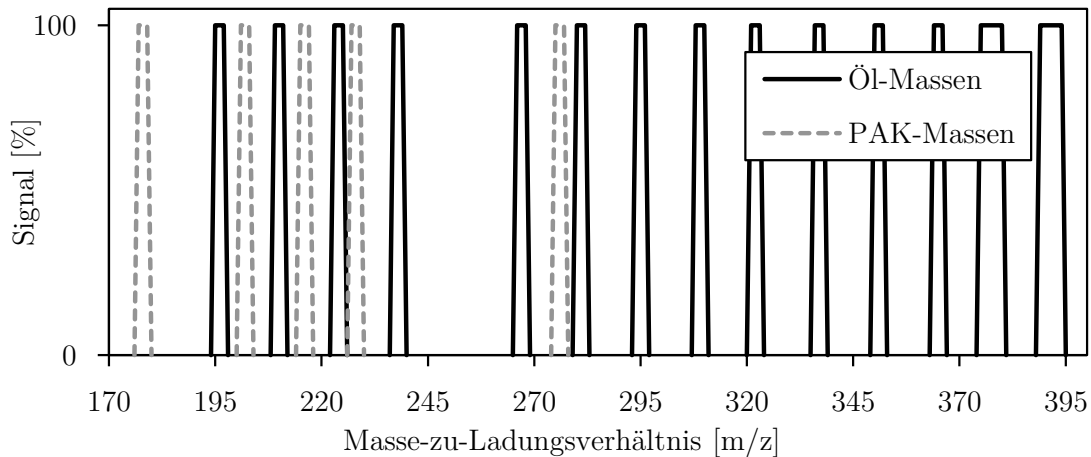


Abbildung 5.4: Zuordnung der Massen aus dem Motoröl und aus den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) ohne Überschneidungsbereiche

5.3 Korrelation der massenbandgeschnittenen Spektren und der Partikelemissionen

Zur weiteren Analyse der Zusammenhänge von Massen aus dem Motoröl und Massen aus den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, insbesondere im Hinblick auf Partikelemissionen, wird der Korrelationskoeffizient analog der Definition in Kapitel 4.2 verwendet.

Die in Kapitel 4.5 diskutierten Ergebnisse aus der erweiterten Kraftstoffvariation werden bezüglich der Korrelation der PAK- und Öl-Massen, des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses und der Partikelemission betrachtet. Die insgesamt 7 Lastphasen im hochdynamischen RDE-Ausschnitt weisen jeweils eine unterschiedliche Charakteristik bezüglich Last- und Drehzahlgradienten auf und besitzen dadurch auch nicht das gleiche Emissionsverhalten. Dieser Sachverhalt stellt sich in Abbildung 5.5 mit einer Streuung im Diagramm dar. Dort sind alle 7 Lastphasen als Mittelwerte der PAK-Counts über die Counts der Öl-Massen für 5 verschiedene Kraftstoffe aus jeweils 2 RDE-Ausschnitten aufgetragen.

Um die unterschiedlichen Lastphasen und Emissionscharakteristika zu separieren, wird nur eine einzelne Lastphase in Abbildung 5.6 betrachtet. Hierdurch ergibt sich eine geringere Streuung als bei der Betrachtung aller Lastphasen, weiterhin werden dort nochmals die einzelnen Kraftstoffe separat dargestellt. In dieser Lastphase liegt der Korrelationskoeffizient bei 0,995.

5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen

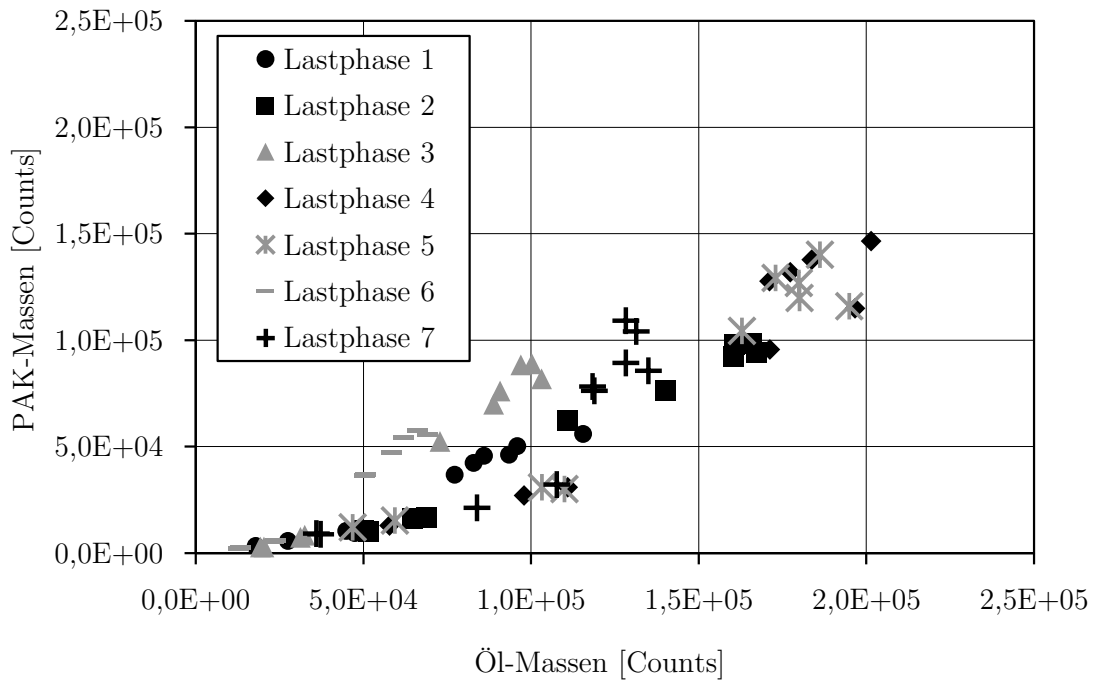


Abbildung 5.5: Korrelation der Öl- und PAK-Massen (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (alle Lastphasen)

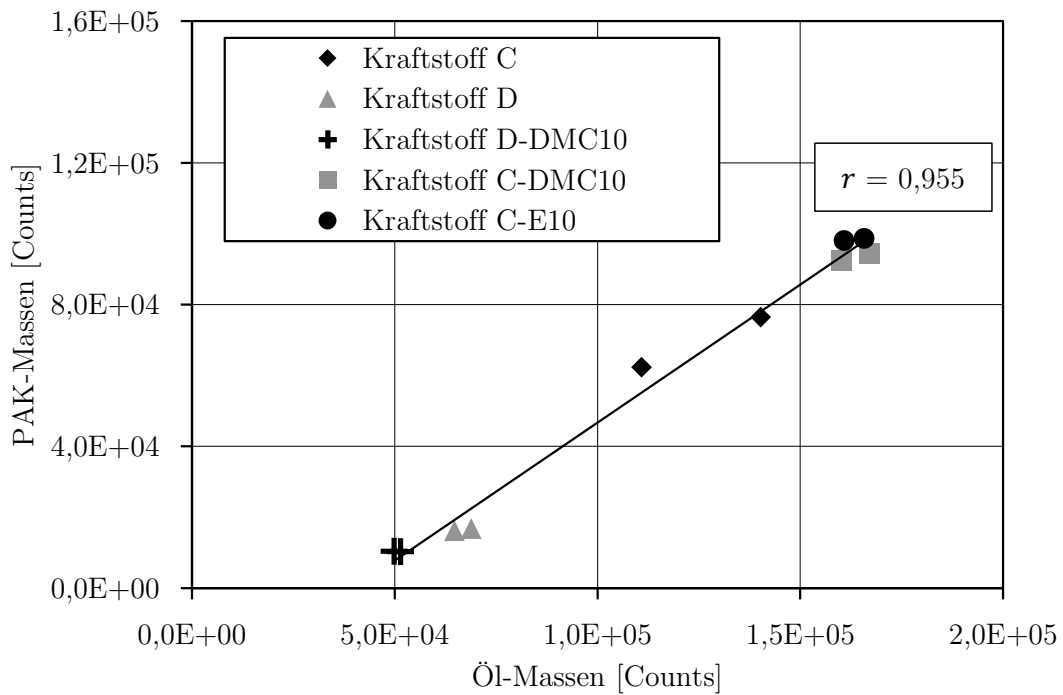


Abbildung 5.6: Korrelation der Öl- und PAK-Massen (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (nur Lastphase 2)

5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen

Das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis liegt in der in Abbildung 5.7 dargestellten Lastphase 2 des hochdynamischen RDE-Ausschnitts zwischen 0,21 und 0,59. Bei den Kraftstoffen C, C-E10 und C-DMC10 ist das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis erkennbar größer als bei den Kraftstoffen D und D-DMC10. Der Basiskraftstoff C emittiert somit mehr PAK-Massen als der quasi aromatenfreie Basiskraftstoff D. Der Korrelationskoeffizient des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses zur Partikelanzahl liegt bei 0,971.

In Tabelle 5.1 sind die Korrelationskoeffizienten der Lastphasen 1-7 einzeln und als Mittelwert aufgelistet. Die Korrelationskoeffizienten für Öl- mit PAK-Massen liegen zwischen 0,898 in Lastphase 7 und $> 0,99$ in Lastphase 2, 3 und 6. Aus der Korrelation des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses mit den Partikelemissionen ergeben sich Korrelationskoeffizienten von 0,809 in Lastphase 7 bis zu 0,985 in Lastphase 1.

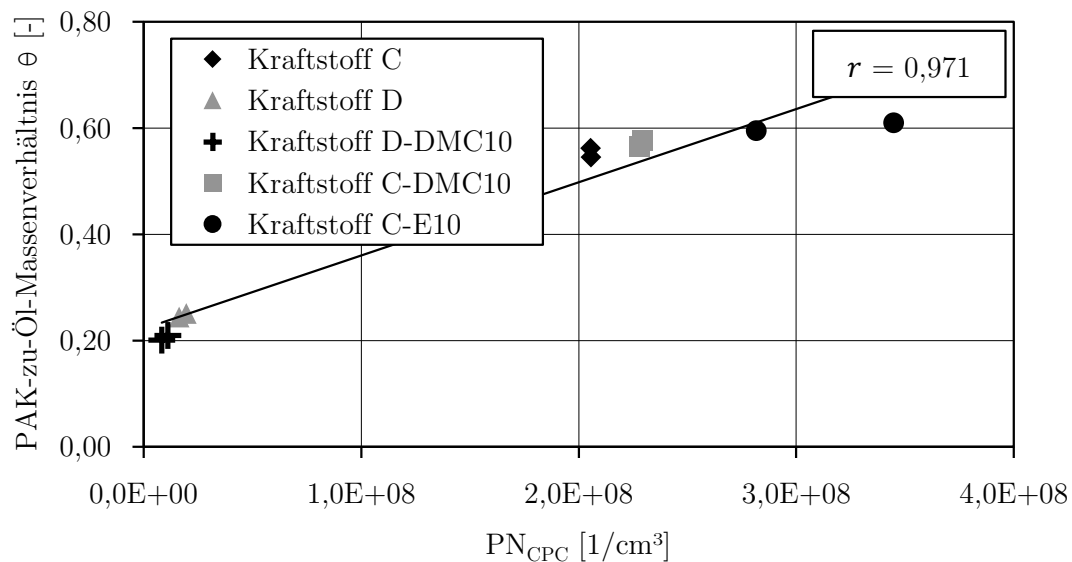


Abbildung 5.7: Korrelation des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses und der Partikelanzahl (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (nur Lastphase 2)

Werden für den hochdynamischen RDE-Ausschnitt alle 7 Lastphasen als Mittelwerte betrachtet, ergibt sich der in Abbildung 5.8 dargestellte Zusammenhang zwischen den PAK- und Öl-Massen. Der Korrelationskoeffizient für PAK- und Öl-Massen liegt bei einem sehr hohen Wert von 0,977, wodurch sich ein Zusammenhang von PAK- und Öl-Massen nachweisen lässt. Ein Erklärungsansatz hierbei ist, dass durch die geänderten Verdampfungseigenschaften des Kraftstoffs, insbesondere beim Wechsel vom aromatenfreien, leichtflüchtigen Basiskraftstoff D zum Basiskraftstoff C mit mehr hochsiedenden Anteilen und Aromaten die Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion zunimmt. Durch die schlechtere Verdampfung des Kraftstoffs gelangt mehr Spray in Zylinderwandnähe und

somit auch in den Ölfilm, was wiederum zu erhöhten Ölemissionen führt. Da in der Auswertung nur hochlastige Beschleunigungen betrachtet werden, ist der Interaktionseffekt zwischen Kraftstoff und Öl durch die hohen Mengen des in den Brennraum eingebrachten Kraftstoffs deutlich ausgeprägt. Diese Betrachtung zeigt, dass eine Kraftstoffänderung das Ölemissionsverhalten im untersuchten Bereich signifikant beeinflusst.

Tabelle 5.1: Korrelationskoeffizienten der Öl- und der PAK-Massen und PAK-zu-Öl-Massenverhältnis mit Partikelemissionen der einzelnen Lastphasen

Lastphase	Korrelationskoeffizient [-] Öl-Massen mit PAK-Massen	Korrelationskoeffizient [-] PAK- zu-Öl-Massenverhältnis mit Parti- kelemissionen
1	0,979	0,985
2	0,995	0,971
3	0,993	0,825
4	0,955	0,894
5	0,959	0,831
6	0,991	0,923
7	0,898	0,809
Mittelwert 1-7	0,967	0,891

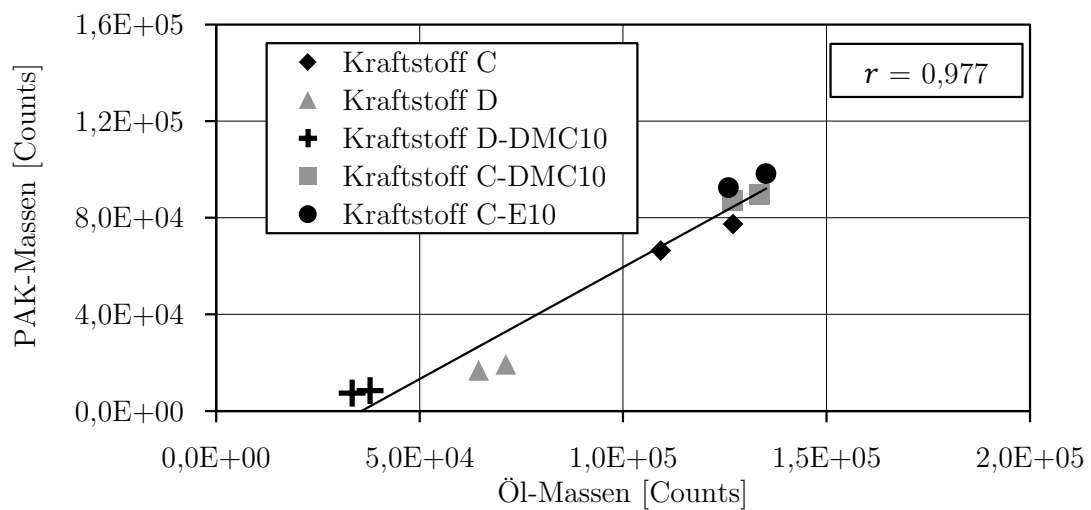


Abbildung 5.8: Korrelation der Öl- und PAK-Massen (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D, D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (Lastphasen 1-7 gemittelt)

5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen

Das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis ist in Abbildung 5.9 über der Partikelanzahlkonzentration aufgetragen. Der Anteil der PAK-Massen steigt von 0,21 beim Kraftstoff D-DMC10 auf bis zu 0,75 beim Kraftstoff C-E10.

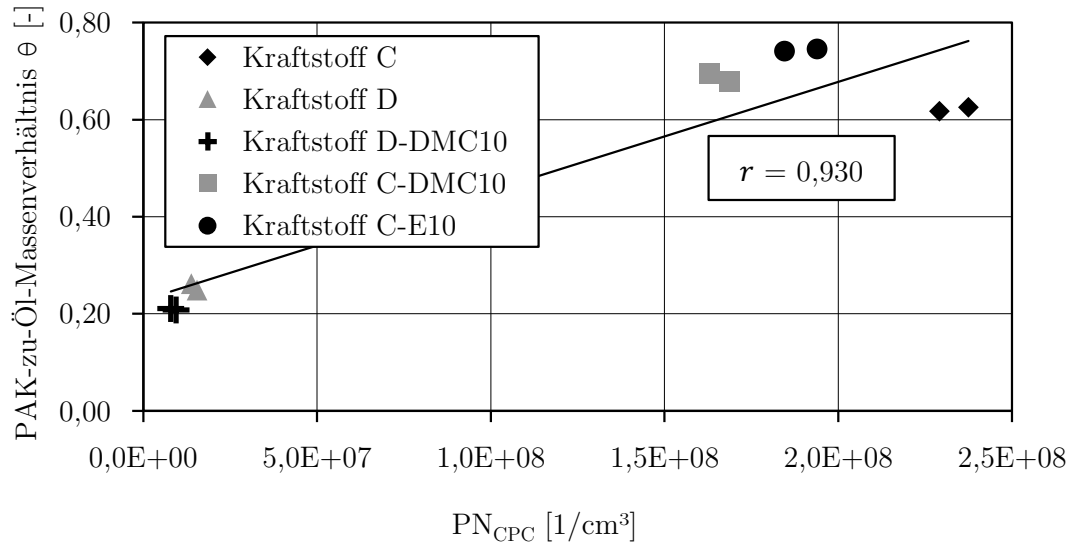


Abbildung 5.9: Korrelation der Partikelanzahlemission mit dem PAK-zu-Öl-Massenverhältnis (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D, D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (Lastphasen 1-7 gemittelt)

Daraus lässt sich ein Anstieg der Gemischbildungseffekte aus der schlechteren Verdampfung ableiten, die zu erhöhten PAK-Emissionen aufgrund der unvollständigen Verbrennung führen. Der in Abbildung 5.8 dargestellte Anstieg der PAK-Massen sowie der Öl-Massen beim Wechsel vom Basiskraftstoff D auf den Basiskraftstoff C zeigt, dass die schlechtere Verdampfung des Kraftstoffs Einfluss auf die Gemischbildung hat. Die Gemischbildungseffekte wirken sich jedoch auch indirekt auf das Ölemissionsverhalten durch eine geänderte Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion aus. Die Additivierung des Kraftstoffs C mit Ethanol (Kraftstoff C-E10) und Dimethylcarbonat (Kraftstoff C-DMC10) führt zu höheren PAK-zu-Öl-Massenverhältnissen und wie Abbildung 5.8 zu entnehmen ist auch zu höheren Signalen der PAK-Massen im Vergleich zum Basiskraftstoff C. Die hier ausgewerteten Lastphasen aus dem RDE-Ausschnitt entsprechen Vollastbeschleunigungen, bei denen hohe Kraftstoffmengen in den Brennraum eingespritzt werden. Durch die Additivierung mit Ethanol oder Dimethylcarbonat nimmt durch den dort gebundenen Sauerstoff der Heizwert ab (vergleiche Kapitel 4.5). Der Motor wird mit Serienbedatung ohne zusätzliche applikative Anpassungen an der Einspritzung bezüglich der Kraftstoffe betrieben, was dazu führt, dass die Motorsteuerung die Einspritzmenge erhöht. Diese Tendenz kann anhand der längeren Einspritzdauer bei den

Kraftstoffen mit Additivierung nachvollzogen werden. Es können mehr lokal fette Gemischzonen entstehen, die durch unvollständige Verbrennung zu einer vermehrten PAK-Bildung führen. Für eine weitere applikative Optimierung könnte beispielsweise der Raildruck angehoben werden, um bei den Kraftstoffen mit Additivierung wieder auf die gleiche Einspritzdauer zu kommen, um damit eine bessere Homogenisierung des Gemischs zu realisieren und die lokal fetteren Gemischzonen zu vermeiden. Als Entwicklungsziel sollte ein möglichst geringes PAK-zu-Öl-Massenverhältnis angestrebt werden. Die Bewertung von verschiedenen Kraftstoffen ist dabei anhand dieser Betrachtung möglich und sinnvoll.

5.3.1 Bewertung des Einflusses der Gemischbildung (Variation des Einspritzbeginns) im stationären Motorbetrieb

Die Ergebnisse der Kraftstoffvariation im hochdynamischen RDE-Ausschnitt lassen darauf schließen, dass infolge von Kraftstoff-Wandfilm-Interaktion die Signale sowohl bei den PAK-Massen als auch bei den Öl-Massen ansteigen. Der dynamische Motorbetrieb mit hohen Drehzahl- und Lastgradienten kann zu einem erhöhten Öltransport in den Brennraum und auch zu weiteren Gemischbildungseffekten durch die unterschiedlichen Trägheiten des Luft- und des Kraftstoffpfades führen. Um diese Phänomene auszublenden, wird im Folgenden der stationäre Motorbetrieb bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} , einem Drehmoment von 90 Nm , 72 °C Kühlwassertemperatur und einem stöchiometrischen Gemisch ($\lambda = 1$) betrachtet. Unter diesen Betriebsrandbedingungen wird mit den Kraftstoffen A und B (vergleiche Kapitel 4.4) der Einfluss des Einspritzbeginns auf die PAK- und Öl-Massen sowie auf das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis in Bezug auf die resultierende Partikelanzahl untersucht.

In Abbildung 5.10 ist die Wechselbeziehung zwischen PAK- und Öl-Massen im stationären Motorbetrieb für die Kraftstoffe A und B dargestellt. Hier zeigt die Frühverstellung des Einspritzbeginns für beide Kraftstoffe ab einem Einspritzbeginn von $> 315 \text{ °KWvZOT}$ einen linearen Anstieg der PAK-Massen. Beim Kraftstoff A liegt zwischen dem Minimum bei einem Einspritzbeginn von 295 °KWvZOT und dem Maximum bei 330 °KWvZOT ein Faktor von circa 6,5. Durch die höhere Verdampfungsneigung und die dadurch bessere Gemischbildung beim Kraftstoff B liegt der Faktor zwischen Minimum und Maximum bezüglich der PAK-Massen bei 5,9 und damit unter dem Faktor von Kraftstoff A. Die Öl-Massen zeigen ebenfalls einen linearen Anstieg um den Faktor 2 bei Kraftstoff A und den Faktor 1,9 bei Kraftstoff B. Im stationären Motorbetrieb ohne Schubphasen oder beim Betrieb mit hochdynamischen Lastwechseln ist davon auszugehen, dass sich der Öltransport in den Brennraum unter vergleichbaren

Bedingungen nicht ändert. Die hier vorliegenden Unterschiede der PAK- und Öl-Massen sind auf die unterschiedlichen Verdampfungscharakteristiken der Kraftstoffe A und B (und die daraus resultierende Gemischbildung) und die geänderte Gemischbildung durch die Frühverstellung des Einspritzbeginns zurückzuführen. Die unterschiedlichen Faktoren der PAK-Massen im Vergleich zu den Öl-Massen lassen auf einen überwiegen- den Gemischbildungseffekt schließen, wobei das Ölemissionsverhalten ebenfalls durch den geänderten Einspritzbeginn und die Kraftstoffverdampfung beeinflusst wird. Die unterschiedliche Kraftstoffverdampfungsneigung lässt sich in diesem Zusammenhang auch im abweichenden PAK- beziehungsweise Öl-Massensignal bereits im Bereich des Einspritzbeginns bei 295 - 315 °KWvZOT erkennen. Der Korrelationskoeffizient zwischen den PAK- und den Öl-Massen (Definition gemäß Kapitel 5.2) erreicht sowohl für Kraftstoff A als auch für Kraftstoff B einen sehr hohen Wert von 0,993, was den be- schriebenen Zusammenhang von Gemischbildung und Ölemissionsverhalten bestätigt.

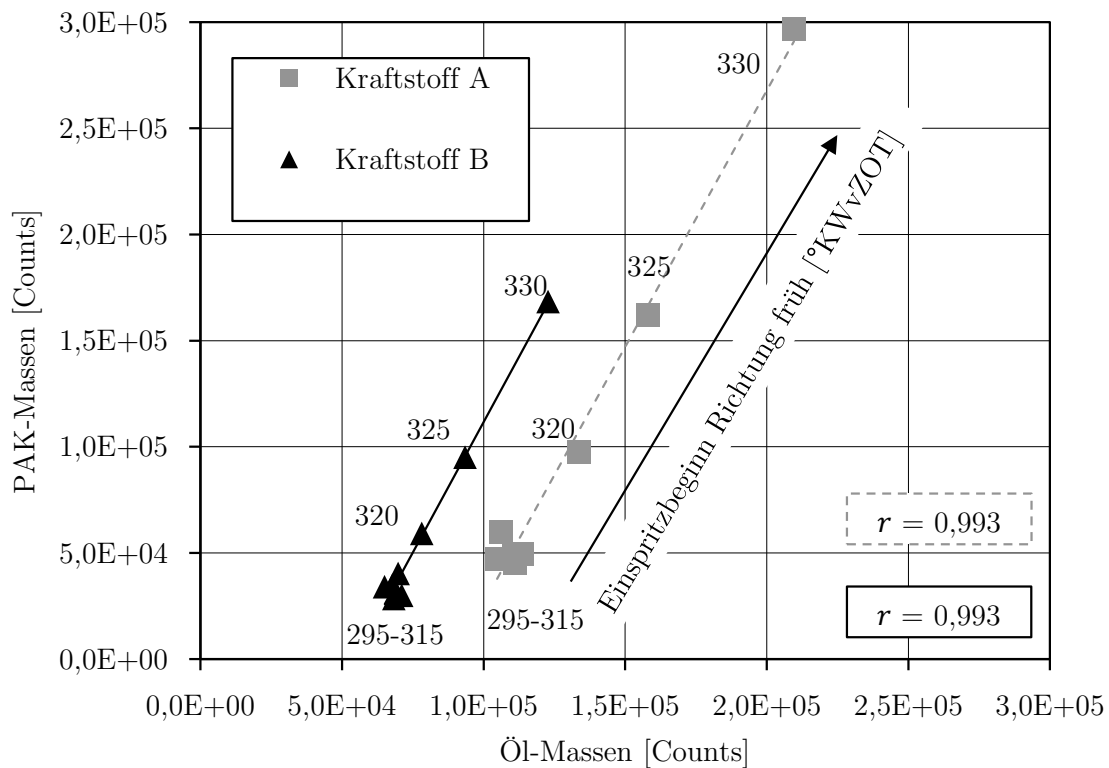


Abbildung 5.10: Korrelation zwischen PAK- und Öl-Massen im stationären Motorbetrieb bei 2000 min⁻¹, 90 Nm mit Variation des Einspritzbeginns (ESB) mit Öl B und den zwei Kraftstoffen A und B

In Abbildung 5.11 ist das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis über die Partikelanzahl für die Kraftstoffe A und B im Stationärpunkt 2000 min⁻¹ bei 90 Nm Drehmoment dargestellt. Das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis steigt linear von 0,41 (Kraftstoff A) beziehungsweise

0,42 (Kraftstoff B) auf bis zu 1,42 (Kraftstoff A) beziehungsweise 1,37 (Kraftstoff B) an. Der sich daraus ergebende Korrelationskoeffizient beträgt 0,992 beim Kraftstoff A und 0,981 beim Kraftstoff B. Damit wird ein Zusammenhang zwischen dem PAK-zu-Öl-Massenverhältnis und der Partikelemission nachgewiesen.

Diese Betrachtung zeigt, dass eine Optimierung der Einspritzbedatung, beziehungsweise wie hier untersucht des Einspritzbeginns, mit dem Ziel der Partikelemissionsreduzierung durch ein möglichst geringes PAK-zu-Öl-Massenverhältnis anzustreben ist.

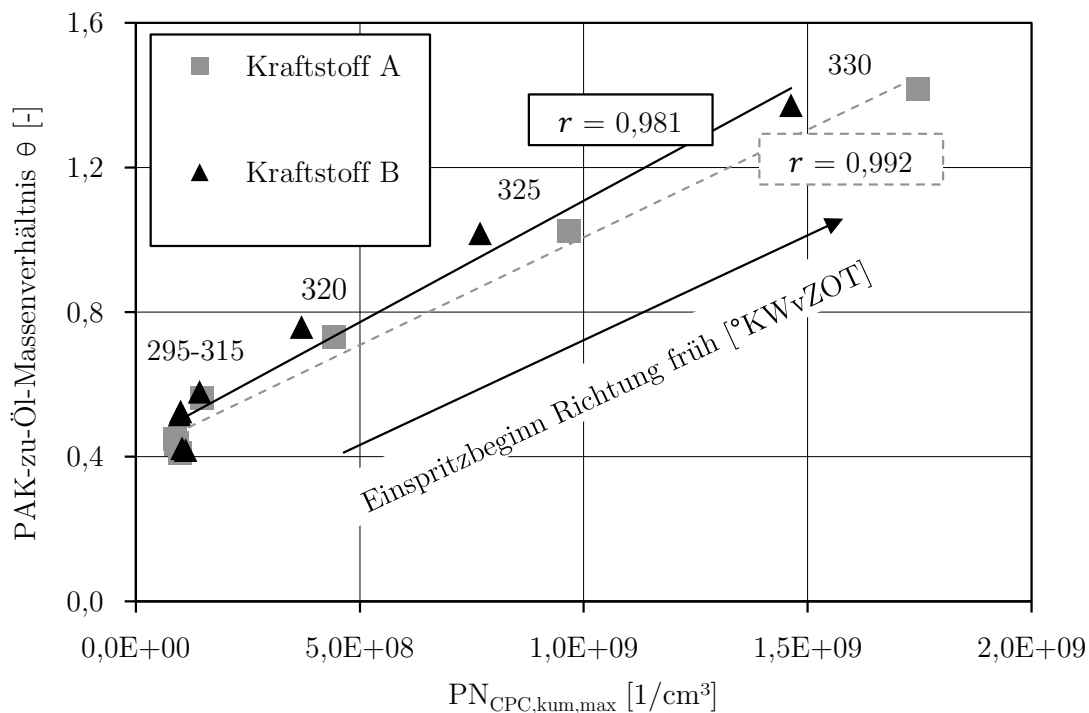


Abbildung 5.11: Korrelationen der PAK-zu-Öl-Massenverhältnisse und der Partikelanzahl der beiden Kraftstoffe A und B mit Öl B im stationären Motorbetrieb bei 2000 min⁻¹, 90 Nm mit Variation des Einspritzbeginns (ESB, 295 - 330 °KWvZOT)

5.3.2 Variation des Kurbelgehäuse- und Saugrohrdrucks bei Schub-Last-Wechseln

Abbildung 5.12 zeigt die Auswirkungen eines geänderten Öltransportes in den Brennraum im unbefeuerten Schubbetrieb in Prüfzyklen mit Schub-Last-Wechseln auf die PAK- und die Öl-Massen für eine Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks (vergleiche Kapitel 4.3). Beginnend bei dem geringsten zu erwartenden Öleintrag in der Schubphase bei einem Saugrohrdruck von 260 mbar steigen die Signale sowohl bei den PAK-Massen als auch bei den Öl-Massen linear durch die Absenkung des Saugrohrdrucks auf 187 mbar und weiter auf 169 mbar an. Der geringere Saugrohrdruck führt in

5 Analyse der Massenspektren und Korrelationsbetrachtungen

der Schubphase zu einen geringeren Brennraumdruck und hierdurch zu einer geringeren Druckdifferenz über die Kolbenringe zum Kurbelgehäuse, wodurch ein höherer Öltransport in den Brennraum hervorgerufen wird. Zwischen dem geringsten Saugrohrdruck mit 169 mbar und dem höchsten Saugrohrdruck von 260 mbar liegt bei den PAK-Massen ein Faktor von circa 2,5 beziehungsweise bei den Öl-Massen ein Faktor von circa 2,9 vor.

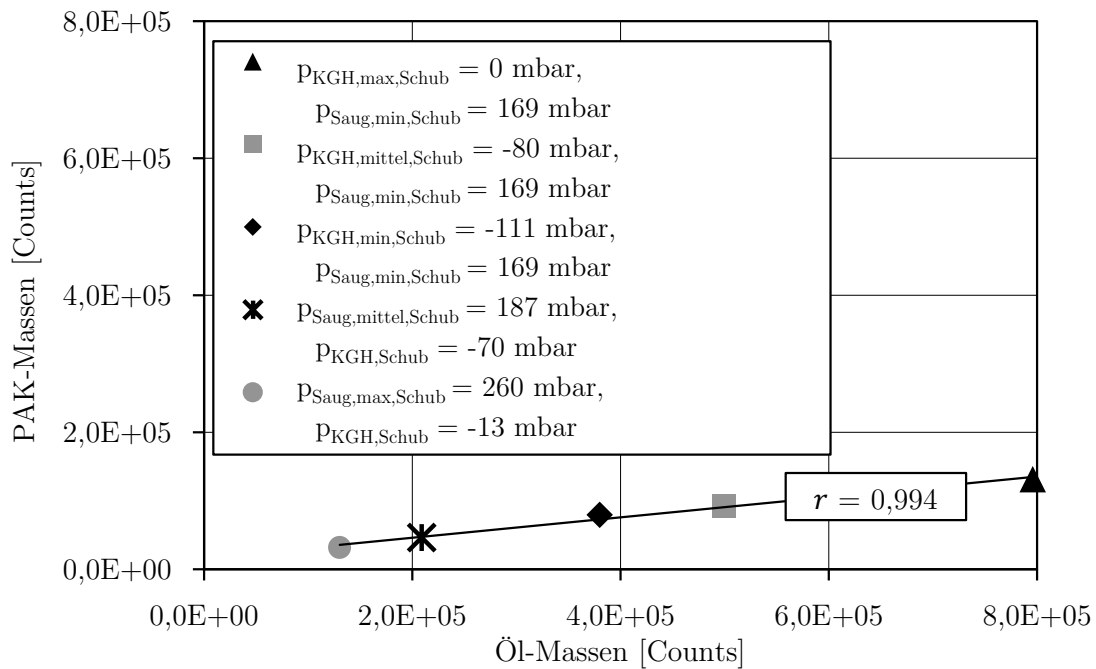


Abbildung 5.12: Korrelation der PAK- und Öl-Massen bei Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäuse- drucks in Schub-Last-Wechsel mit hochviskosem Öl A und Kraftstoff B

Der sich einstellende Differenzdruck zum Kurbelgehäuse von -80 mbar bei einem Saugrohrdruck von 169 mbar wird als Basis für die weitere Variation des Kurbelgehäuse- drucks bei konstantem Saugrohrdruck verwendet. Eine Absenkung des Kurbelgehäuse- relativdrucks von -80 mbar auf -111 mbar im Schub reduziert die Signale bei den PAK- und Öl-Massen. Eine Erhöhung des Kurbelgehäusedrucks auf Umgebungsdruck (0 mbar) durch Freilegung der Entlüftungsleitung und damit weiterer Reduzierung des Differenzdrucks über die Kolbengruppe bewirkt einen Emissionsanstieg der PAK- und Öl-Massen. Zwischen dem geringsten und dem höchsten Kurbelgehäusedruck ergibt sich ein Faktor von 2,2 bei den PAK-Massen und ein Faktor 3 bei den Öl-Massen. Insgesamt liegt der Korrelationskoeffizient für PAK- und Öl-Massen bei der Saugrohr- und Kur- belgehäusedruckvariation bei 0,994 und zeigt damit einen deutlichen Zusammenhang der Öl- und PAK-Massen. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Änderung des Öltransports in der Schubphase in der darauffolgenden Lastphase das Ölemissions-

verhalten ändert und in etwas geringerem Maße auch das PAK-Emissionsverhalten beeinflusst.

Die in Abbildung 5.13 dargestellte Korrelation des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses und der Partikelanzahl im dynamischen Motorbetrieb mit Schub-Last-Wechseln zeigt einen linearen Zusammenhang. Dabei führt eine Reduktion des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses zu einem Anstieg der Partikelanzahl. Diese Reduzierung bedeutet, dass der Anteil der Counts der Öl-Massen stärker zunimmt als die Anteile der Counts der PAK-Massen. Es lässt sich im Rohabgas ein erhöhter Anteil unverbrannter Kohlenwasserstoffe aus dem Öl feststellen. Die Änderung der Druckverhältnisse über die Kolbengruppe bewirkt damit ein geändertes Öltransportverhalten. Eine weitere Beeinflussung des Öltransports in Richtung Brennraum wird über die Anhebung des Kurbelgehäusedrucks von -111 mbar auf 0 mbar bei gleichem Saugrohrdruck von 169 mbar gemessen. Die höchsten Partikelemissionswerte werden bei 0 mbar Kurbelgehäusedruck und 169 mbar Saugrohrdruck erreicht, korrelierend mit dem niedrigsten PAK-zu-Öl-Massenverhältnis von 0,17. Der Korrelationskoeffizient dieser Saugrohrdruck- und Kurbelgehäusedruckvariation liegt bei einem sehr hohen Wert von 0,993 und weist den Zusammenhang der erhöhten Öleinträge in den Brennraum beziehungsweise in das Rohabgas mit der erhöhten Partikelanzahlemission nach.

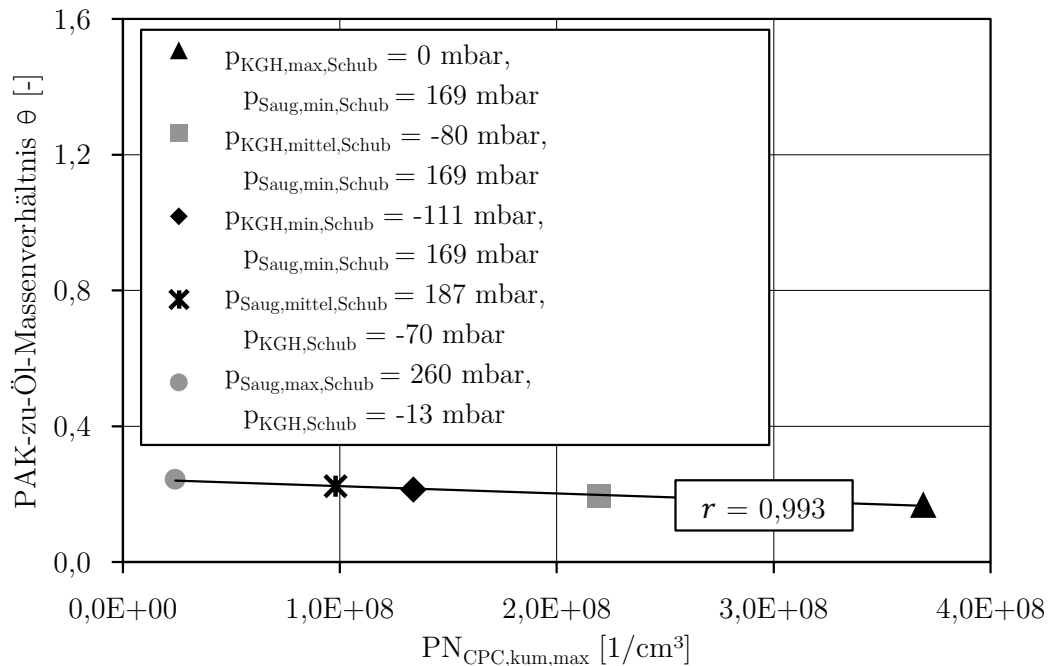


Abbildung 5.13: Korrelation von PAK-zu-Öl-Massenverhältnis und Partikelanzahl bei Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks im Prüfprogramm mit Schub-Last-Wechseln mit hochviskosem Öl A und Kraftstoff B

Bei Einflüssen aus der Motormechnik, wie hier betrachtet des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks und des daraus resultierenden Öltransports, ist es das Ziel, einen möglichst hohen Wert des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses anzustreben, um eine größtmögliche Partikelemissionsreduzierung zu erreichen. Die Transportrichtung des Öls muss in Richtung des Kurbelgehäuses erfolgen. Dabei sollte ein möglichst niedriger Druck im Kurbelgehäuse und ein möglichst hoher Saugrohrdruck im Fokus stehen, um die Druckdifferenz über die Kolbengruppe mit der Transportrichtung zum Kurbelgehäuse einzustellen.

Aus der Korrelation zwischen den Massenspektren (PAK- und Öl-Massen) und der Partikelanzahlemission lassen sich zwei zentrale Aussagen im untersuchten Betriebsbereich ableiten. Diese Aussagen konnten sowohl im stationären Motorbetrieb, im hochdynamischen RDE-Ausschnitt als auch im Betrieb bei Schub-Last-Wechseln bestätigt werden. Eine Änderung der Gemischbildung durch Kraftstoffvariation oder Variation des Einspritzbeginns führt zu geänderten PAK- und Öl-Signalen. Dabei zeigt sich ein Zusammenhang zwischen erhöhten PAK- und Öl-Signalen durch sehr hohe Korrelationskoeffizienten von $> 0,98$. Abgeleitet daraus kann festgestellt werden, dass die Gemischbildung einen signifikanten Einfluss auf die freigesetzten Ölsignale hat. Weiterhin zeigt sich bei den Partikelanzahlemissionen ebenfalls ein sehr hoher Korrelationskoeffizient von $> 0,98$ mit dem PAK-zu-Öl-Massenverhältnis. Anhand der Steigung kann auch der Haupteinfluss des variierten Parameters auf die Partikelanzahlemission abgeleitet werden. Eine positive Steigung bei der linearen Approximation über die Parametervariation zeigt für die untersuchten Parameter einen überwiegenden Einfluss der Gemischbildung, eine negative Steigung einen überwiegenden Einfluss des Öls beziehungsweise Öltransports. Zu beachten ist jedoch, dass der Einfluss der Gemischbildung sich wie zuvor beschrieben auch auf das emittierte Öl auswirkt. Dabei sollte die Einspritzung so gewählt werden, dass ein möglichst geringes PAK-zu-Öl-Massenverhältnis erreicht wird. Bei Kraftstoffen mit einem schlechteren Verdampfungsverhalten beziehungsweise mit mehr schwerflüchtigen Komponenten muss mehr Zeit zur Homogenisierung zur Verfügung stehen und damit der Einspritzbeginn früher liegen. Weitere Maßnahmen zur besseren Homogenisierung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, jedoch sollte ein höherer Einspritzdruck einen vergleichbaren Effekt zur Partikelemissionsreduzierung bewirken.

6 Gesamthafte Diskussion der Ergebnisse und Bewertung

Die Entstehungsmechanismen der Partikelemission sowie die Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen werden in dieser Arbeit mit Fokus auf Einflüsse des Motoröls durch ein geändertes Öltransportverhalten in der Kolbengruppe, auf Gemischbildungseffekte durch applikative Änderung des Einspritzbeginns sowie auf ein unterschiedliches Verdampfungsverhalten des Kraftstoffs hin analysiert. Die Untersuchung des Emissionsverhaltens wurde dabei durch Messgasentnahme vor dem Katalysator durchgeführt, um gezielt Optimierungsmaßnahmen anhand des Rohemissionsverhaltens ableiten zu können, die direkte Ursache zu identifizieren sowie zukünftig einen methodischen Ansatz zu erhalten, um die Schadstoffemissionen des Verbrennungsmotors noch weiter zu reduzieren. Zur Analyse der Zusammenhänge zwischen Öl- und Partikelemissionen wurde eine Kombination verschiedener zeitlich hochauflösender Messtechniken eingesetzt, um insbesondere den dynamischen Motorbetrieb im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Antriebs zur RDE-Fähigkeit zu bewerten. Dabei wurden ein Kondensationspartikelzähler (AVL 489 Advanced), ein Elektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung (Cambustion DMS500) und ein Time-of-Flight-Massenspektrometer zur Messung der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffemissionen (Ölemissionen) verwendet. Die Versuchsführung beinhaltete Drehzahlrampen im unbefeuerten Schub sowie stationärer Motorbetrieb im mittleren Lastbereich (90 Nm) bei niedrigen Drehzahlen (2000 min^{-1}) ebenso wie hochdynamische Schub-Last-Wechsel und einen hochdynamischen RDE-Ausschnitt. In diesen Messprogrammen wurden verschiedene Parameter variiert, die den Öltransport in den Brennraum und die Gemischbildung beeinflussen. Zur Beeinflussung des mechanischen Systems der Kolbengruppe wurden der Kurbelgehäusedruck und der Saugrohrdruck variiert. Weiterhin wurden Untersuchungen mit hoch- und niedrigviskosem Öl durchgeführt. Die Gemischbildung wurde durch unterschiedliche Kraftstoffe mit geändertem Verdampfungsverhalten in Kombination mit einer Variation des Einspritzbeginns analysiert. Zusätzlich kamen weitere nahezu aromatenfreie Kraftstoffe zum Einsatz, um deren Einfluss auf die Partikel- und Ölemission zu untersuchen.

Bei der Vermessung der Drehzahlrampe im unbefeuerten Schub waren bei einem Anstieg des Kurbelgehäusedrucks höhere Partikelanzahl- und Ölemissionen festzustellen. Durch eine Absenkung des Kurbelgehäusedrucks konnte hingegen die kritische Drehzahl

des Systems erhöht werden, oberhalb derer der zunächst lineare Anstieg der Emissionen mit der Drehzahl in einen stark progressiven Verlauf übergeht. Dies lässt sich durch geänderte Kräftegleichgewichte am Kolbenring beziehungsweise resultierend daraus die geänderte Transportrichtung des Öls im Ringfeldbereich erklären: Die Reduzierung des Kurbelgehäusedrucks führt zu einem höheren Druckgefälle vom Brennraum zum Kurbelgehäuse. Wird die Drehzahl während des Versuchs erhöht, steigen die Massenkräfte ebenfalls entsprechend an. Die geänderten Druckverhältnisse verschieben das Kräftegleichgewicht und eine höhere Drehzahl kann ohne vermehrten Transport von Öl in den Brennraum eingestellt werden. Die Untersuchung des unbefeuerten Schubs zeigte, dass ein sehr hoher Anteil (74 - 97 %) an Nukleationspartikeln im Rohabgas vorliegt, was sich wiederum durch die volatilen Anteile aus dem Motoröl und die fehlende Verbrennung erklären lässt. Für die eingesetzten Messsysteme Kondensationspartikelzähler (Partikelemission) und Time-of-Flight-Massenspektrometer (Ölemission) ergibt sich ein sehr hoher Korrelationskoeffizient von 0,99, wodurch ein Zusammenhang zwischen der Partikelanzahl und dem Öleintrag in den Brennraum im unbefeuerten Schub bei den untersuchten Kurbelgehäusedrücken nachgewiesen wird.

Im hochdynamischen Schub-Last-Wechsel-Zyklus folgte der unbefeuerten Schubphase eine Lastphase mit Verbrennung. Dabei ließen sich ebenfalls sehr hohe Korrelationskoeffizienten zwischen Partikel- und Ölemission sowohl beim hochviskosen Öl A ($> 0,99$) als auch beim niedrigviskosen Öl B ($> 0,97$) ermitteln. Als Variationsparameter zur Beeinflussung des Öltransports in den Brennraum wurden im Schub-Last-Wechsel Saugrohrdruck und Kurbelgehäusedruck variiert. Eine Reduzierung des Öltransports in den Brennraum durch höhere Saugrohr- und damit auch Brennraumdrücke sowie eine Absenkung des Kurbelgehäusedrucks führt zu einer signifikanten Reduktion der Partikelemission in der nachfolgenden Lastphase. Werden die Öl- und Partikelemissionen in die Schub- und Lastphasen aufgeteilt, kann für die Korrelation der Ölemission im Schub mit der Partikelemission in der Last ein Koeffizient von 0,60 ermittelt werden. Damit kann beim untersuchten Motor nicht auf einen direkten Zusammenhang der Ölemission in der Schubphase mit der Partikelemission in der darauffolgenden Lastphase geschlossen werden. Die Korrelation der Öl- mit der Partikelemission in der Lastphase ergibt jedoch einen hohen Koeffizienten von 0,94 und weist damit einen Zusammenhang zwischen den beiden Emissionsarten in der Lastphase nach. Daraus lässt sich ableiten, dass das in den Brennraum transportierte Öl beide Emissionen erhöht und ein solcher Eintrag folglich im Sinne der Emissionsreduzierung vermieden werden sollte.

Die Auswirkung einer geänderten Gemischbildung wurde durch Variation des Einspritzbeginns in Kombination mit zwei Kraftstoffen, die sich hauptsächlich im

mittelflüchtigen Verdampfungsbereich unterscheiden, im stationären Motorbetrieb bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} und einem Drehmoment von 90 Nm betrachtet. Dabei führte eine Frühverstellung des Einspritzbeginns zu einem deutlichen Anstieg der Partikel- und Ölemission; insbesondere stiegen dabei die kleinen Nukleationspartikel $< 23 \text{ nm}$ durch die höheren volatilen Anteile im Abgas an. Durch die Frühverstellung zu einem sehr frühen Einspritzbeginn (330 °KWvZOT) kann es zu einem Bauteilkontakt des Kraftstoffsprays kommen, was die Partikelentstehung begünstigt. Die Verwendung des Kraftstoffs mit verbesserten Verdampfungseigenschaften kann diesen Einfluss reduzieren, was zu geringeren Partikel- und Ölemissionen führt. Die Korrelationskoeffizienten für beide untersuchten Kraftstoffe liegen für die Korrelation der Partikel- zu den Ölemissionen bei $> 0,99$ und bestätigen damit den bereits zuvor festgestellten Zusammenhang. Hieraus lässt sich auch ableiten, dass Anpassungen an der Gemischbildung direkten Einfluss auf die Emission von schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffen haben und damit eine Wechselwirkung vorliegt. Ziel muss es sein, eine Interaktion von Kraftstoff und Öl zu vermeiden, das heißt die Applikation der Gemischbildung durch Optimierung der Einspritzparameter (zum Beispiel Zeitpunkt, Dauer, Anzahl oder Druck) auch unter Beachtung der Kohlenwasserstoffemissionen durchzuführen.

Weitere Gemischbildungseinflüsse wurden in einem hochdynamischen RDE-Ausschnitt anhand von fünf verschiedenen Kraftstoffen untersucht, die teilweise mit 10% Ethanol beziehungsweise mit 10% Dimethylcarbonat additiviert wurden. Die Verdampfungseigenschaften der Kraftstoffe korrelieren bezüglich des verdampften Volumens bei 100 °C und 150 °C sehr deutlich mit der Partikelanzahlemission (Korrelationskoeffizient von $0,99$). Auch bei diesen Variationen können sehr hohe Korrelationen zwischen der Partikelanzahl- und den Ölemissionen ermittelt werden (Korrelationskoeffizient $> 0,97$). Folglich zeigen sich auch hier Einflüsse der Gemischbildung auf die Partikelentstehung über den Zusammenhang mit den Emissionen von schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffen aus dem Motoröl.

Zur Detailanalyse wurden Massenspektren des Time-of-Flight-Massenspektrometers betrachtet. Diese weisen für unbefeuerten Schub und befeuerte Last signifikante Unterschiede auf. Das Massenspektrum im unbefeuerten Schub ist bezüglich der Massenpeaks bis zu einem Masse-zu-Ladungsverhältnis von circa 350 m/z den Ergebnissen aus dem Laborversuch ohne motorische Einflüsse sehr ähnlich. Im befeuerten Motorbetrieb hingegen wurden einige Massenpeaks ($178, 202, 216, 228$ und 276 m/z) identifiziert, welche den vermutlich polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs) zuzuordnen sind. Diese im befeuerten Motorbetrieb ermittelten Komponenten weisen gemäß Yield Sooting Index Database [233] eine stark erhöhte Neigung zur Rußbildung auf. Aufgrund

des Messverfahrens, der Ionisierung und der daraus folgenden Fragmentierung kann allerdings keine eindeutige Zuordnung dieser Massenpeaks zu den ursprünglichen Molekülen erfolgen. Das Time-of-Flight-Massen-spektrometer wird für die schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe üblicherweise für den Messbetrieb im Massenbereich 170 - 550 m/z mit einer Hochpassfilterung eingestellt. Für dieses Messsignal wurden massenbandgeschnittene Spektren für die PAK- und die Öl-Massen definiert und das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis aus diesen Spektren definiert und berechnet. In den untersuchten Messzyklen wird sowohl im stationären Motorbetrieb als auch bei Schub-Last-Wechseln und im hochdynamischen RDE-Ausschnitt für die PAK- und Öl-Massen eine sehr hohe Korrelation von $> 0,98$ ermittelt, womit ein Zusammenhang zwischen den PAK- und den Öl-Massen nachgewiesen wird. Auch bei Parametervariationen der Kraftstoffe, des Kurbelgehäusedrucks, des Saugrohrdrucks und des Einspritzbeginns wurden sehr hohe Werte des Korrelationskoeffizienten ($> 0,98$) zwischen dem PAK-zu-Öl-Massenverhältnis und der Partikelanzahl festgestellt. Der Zusammenhang der PAK- und Öl-Anteile im Rohabgas lässt damit Rückschlüsse auf den Einfluss der variierten Parameter auf die Partikelemission zu. Im Fall einer positiven Steigung über eine Parametervariation überwiegen Gemischbildungseffekte. Bei einer negativen Steigung überwiegen Effekte aus dem Motoröl und dem geänderten Öltransport in den Brennraum auf das Emissionsverhalten im Rohabgas.

Der entwickelte methodische Ansatz aus gezielter Versuchsführung und Messtechnikeinsatz ermöglicht die Bewertung von Parameteränderungen. Beispielsweise lässt sich hiermit abschätzen, ob die Gemischbildung oder der Öltransport der jeweilige Haupteinflussfaktor für die Änderung der Partikelanzahlemission ist. Insbesondere die Kombination von Massenspektrenanalyse und Kondensationspartikelzähler erlaubt detaillierte Aussagen zur Partikelentstehung aus Gemischbildung und Öleintrag. Diese Vorgehensweise ist für eine gezielte Systemoptimierung des Verbrennungsmotors bezüglich der Partikelemissionen auch im Hinblick auf die eventuell kommende EU7-Gesetzgebung mit einer Reduzierung der limitierten Partikelemissionen im Bereich unter 23 nm nutzbar. Die bisher eingesetzten zeitaufwendigen Filteranalysen bieten hingegen keine genaue zeitliche Auflösung und machen daher eine detaillierte Analyse im dynamischen Motorbetrieb nur sehr bedingt möglich. Die hohe zeitliche Auflösung des Time-of-Flight-Massenspektrometers kann direkt am Prüfstand während des Prozesses der Motorentwicklung eine Aussage zum Einfluss der variierten Parameter liefern und führt damit zu einer deutlichen Zeitersparnis.

Aus der vorliegenden Arbeit ergeben sich Fragestellungen, die in weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen betrachtet werden sollten. Die im befeuerten Betrieb gemessenen

PAK-Komponenten konnten noch nicht eindeutig identifiziert werden. Für eine genauere Charakterisierung empfehlen sich daher weitergehende Untersuchungen zum Beispiel mit einem Time-of-Flight Aerosol Massenspektrometer, wie in [226, 227] beschrieben, oder mit einem Verfahren nach Rezaei et al. [182] (TD-GCxGC-TOF-MS; TD: thermische Desorption, GC: Gaschromatographie, TOF: Time-of-Flight, MS: Massenspektrometer). Der Einfluss von Gemischbildungseffekten auf das Emissionsverhalten der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe könnte mit CFD-Simulationen und optischen Untersuchungen mit Lichtleiterzündkerze und Endoskopie oder auch mit der Zwei-Farben-Methode [45] untersucht werden. Wie die Untersuchungen mit den nahezu aromatenfreien Kraftstoffen gezeigt haben, bieten synthetische oder alternative Kraftstoffe ein erhebliches Potenzial zur Schadstoffemissionsreduzierung, insbesondere hinsichtlich der Partikelanzahl. Der Anteil der ölunduzierten Partikel nimmt durch die Reduzierung der gemischinduzierten Partikel zu und bedarf zum Beispiel bei Gas- oder Wasserstoffmotoren einer weiteren Optimierung zur Reduzierung der Ölanteile.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung die Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen untersucht. Dazu wurde eine methodische Vorgehensweise angewendet: Von der Systemanalyse über die eingesetzte Online-Messtechnik bis zur gezielten Parametervariation am System bezüglich Änderung des Öltransports in den Brennraum und der Gemischbildung. Die Untersuchung erfolgte sowohl im stationären als auch im dynamischen Motorbetrieb unter realen und synthetischen Fahrbedingungen mit einer Messtechnikkombination aus Kondensationspartikelzähler und Elektrometer zur Betrachtung der Partikelgrößenverteilung sowie einem Time-of-Flight-Massenspektrometer für die langkettigen Kohlenwasserstoffe. Diese Methodik kann zur gezielten Systemoptimierung des Verbrennungsmotors mit dem Fokus Partikelemissionsreduzierung eingesetzt werden. Zur Analyse der Entstehungsmechanismen der Partikelemission wurden Einflüsse durch Änderung des Öltransportverhaltens in den Brennraum (Parameter: Kurbelgehäuse- und Saugrohrdruck sowie Ölviskosität), Einflüsse durch Änderung der Gemischbildung bezüglich Einspritzbeginn und Einflüsse des Verdampfungsverhaltens unterschiedlicher Kraftstoffe betrachtet. Je nach Betriebsrandbedingung wurden sehr hohe Korrelationskoeffizienten (bis zu $> 0,99$) zwischen Öl- und Partikelemissionen ermittelt und damit ein Zusammenhang nachgewiesen. Zur weiteren Bewertung der Haupteinflussparameter wird das PAK-zu-Öl-Massenverhältnis definiert, hiermit lässt sich ein Gemischbildungseinfluss oder ein Einfluss aus dem Motoröl unterscheiden. Generell fördern ein geringer Kurbelgehäusedruck und ein höherer Saugrohrdruck den Öltransport in Richtung Kurbelgehäuse und führen damit zu einer Emissionsreduzierung. Bei Einstellung des Einspritzbeginns ist auf eine möglichst geringe Interaktion des Kraftstoffs mit dem Öl zu achten, um erhöhte Partikel- und Kohlenwasserstoffemissionen zu vermeiden. Aus der Untersuchung der verschiedenen Kraftstoffe lässt sich zusammenfassen, dass leichtflüchtige Kraftstoffe mit geringen Aromatenanteilen ein erhebliches Emissionsreduzierungspotenzial insbesondere bezüglich Partikel- und Ölemissionen aufweisen. In weiterführenden Untersuchungen sollten die noch offenen Fragestellungen bezüglich der genauen Identifikation der im befeuerten Betrieb gemessenen PAK-Anteile sowie des Einflusses durch Gemischbildungseffekte auf das Emissionsverhalten der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe beantwortet werden. Zur Analyse der PAK-Anteile im Abgas könnte als Messtechnik ein Time-of-Flight Aerosol Massenspektrometer oder ein Verfahren aus thermischer Desorption, Gaschromatographie und Time-of-Flight Massenspektrometer nach Rezaei et al. [182] eingesetzt

werden. Um die Gemischbildungseffekte und deren Einflüsse auf die Ölemission detaillierter zu untersuchen, würde sich eine Kombination aus optischen Untersuchungen mit Lichtleiterzündkerze oder der Zwei-Farben-Methode am Motor sowie CFD-Simulationen der Gemischbildung eignen.

A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikel in den menschlichen Organismus [11].....	2
Abbildung 2.1: Typische Partikelgrößenverteilung aus dem Abgas von Verbrennungsmotoren [61]	6
Abbildung 2.2: Klassifizierung von Partikeln nach deren physikalischem Verhalten [63].....	7
Abbildung 2.3: Phasen der Rußentstehung nach Bockhorn [70] und Mayer [71], Abbildung aus [44].....	8
Abbildung 2.4: Einspritzarten und deren Einfluss auf Partikelemissionen; mit Anpassungen übernommen aus [52].....	13
Abbildung 2.5: Zusammensetzung der Schmiermittelbilanz [104].....	16
Abbildung 2.6: Übersicht der Ölverbrauchs- und Öltransportmechanismen	17
Abbildung 2.7: Kraftstoffeinfluss auf die Ölverdampfung bei 120°C [137]	22
Abbildung 2.8: Ölverbrauch und Blow-by im transienten Lastwechsel von 0 % in 100% Last [145].....	23
Abbildung 2.9: Einfluss des Saugrohrunterdrucks im Schub auf den Ölverbrauch und die Ölemission in einem transienten Schub-Last-Zyklus [157]	24
Abbildung 2.10: Vergleich von drei Kraftstoffen (PM1, PM2 und PM3) bezüglich Kraftstoffeigenschaften und deren Partikelemissionsverhalten [177]	28
Abbildung 2.11: Emissionseinfluss der Öleindosierung im Zwischenringbereich [185].....	30
Abbildung 2.12: Vergleich der mittleren Partikelgrößenverteilung im NEFZ in Beschleunigungs- (oben) und Schubphasen (unten) am Dieselmotor [188].....	31
Abbildung 2.13: Partikelgrößenverteilung für Mehrloch- und A-Düse im Katalysatorheizen [44].....	32
Abbildung 2.14: Öleindosierung, Aschebelastung und Partikelgrößenverteilung in einem Grundlagenversuch bei einem mit Diesel betriebenen Verbrenner [189].....	32
Abbildung 3.1: Kohlenwasserstoffeintrag in den Brennraum und Mechanismen der Rußentstehung; mit Anpassungen übernommen von Hadler et al. [52] und Hopp [79]	36
Abbildung 3.2: Messprinzip und Aufbau eines TOF-MS zur Abgasanalyse; mit Anpassungen übernommen aus [201].....	38
Abbildung 3.3: Massenspektrum und Messbereiche für Otto- und Dieselmotoren [106]	38
Abbildung 3.4: Massenspektrum mit einer Ionisierungsenergie von 70 eV von Tetrakontan, Daten aus [201]	39
Abbildung 3.5: Partikelanzahlmessung konform nach UNECE-R83 [205]	40
Abbildung 3.6: Schematische Messprinzip-Darstellung eines Kondensationspartikelzählers [209] und die Zähleffizienz über die Partikelgröße [206]	41
Abbildung 3.7: Probenahme und Messprinzip des Partikelspektrometers Cambustion DMS500 mit Änderungen übernommen aus [186, 211].....	42
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Messpositionen im Rohabgas	46
Abbildung 4.2: Partikel- und Ölemissionen in der quasistationären Drehzahlrampe im unbefeuerten Schubbetrieb mit Öl A und Variation des Kurbelgehäusedrucks	50
Abbildung 4.3: Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf die kumulierten Öl- und Partikelemissionen in der quasistationären Drehzahlrampe im unbefeuerten Schub mit Öl A	52
Abbildung 4.4: Betriebsprofil des synthetischen Dynamikzyklus mit Schub-Last-Wechsel	53

Abbildung 4.5: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs des Kurbelgehäusedrucks, der Partikel- und Ölemissionen bei Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks im Schub bei Schub-Last-Wechseln mit Kraftstoff B und hochviskosem Öl A in einer 10 und 30 Sekunden Schubphase.....	55
Abbildung 4.6: Öl- und Partikelemissionen bei Schub-Last-Wechseln für zwei Hardwarevarianten [187].....	57
Abbildung 4.7: Öl- und Partikelemissionen für zwei Öle unterschiedlicher Viskosität [159].....	58
Abbildung 4.8: Einfluss des Saugrohrdrucks auf Partikelemissionen und die schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe bei Schub-Last-Wechsel mit hochviskosem Öl A	59
Abbildung 4.9: Zeitlicher Verlauf der Partikel- und Ölemissionen bei Schub-Last-Wechseln mit 10 und 30 Sekunden Schub und Variation des Kurbelgehäusedrucks im Schub mit hochviskosem Öl A bei einem Saugrohrdruck von 169 mbar im Schub	60
Abbildung 4.10: Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf Partikel- und Ölemissionen bei Schub-Last-Wechseln mit hochviskosem Öl A und konstantem Saugrohrdruck von 169 mbar im Schub.....	61
Abbildung 4.11: Einfluss des Kurbelgehäusedrucks auf Öl- und Partikelemissionen bei Schub-Last-Wechseln mit niedrigviskosem Öl B und konstantem Saugrohrdruck von 169 mbar im Schub	62
Abbildung 4.12: Korrelation der kumulierten Öl- und Partikelemissionen bei Variation des Kurbelgehäuse- und Saugrohrdrucks sowie des Öls bei Schub-Last-Wechseln	63
Abbildung 4.13: Korrelation der Ölemission in der Schubphase und der nachfolgenden Lastphase mit der Partikelemission in der nachfolgenden Lastphase für jeden Lastwechsel mit Öl A und B	64
Abbildung 4.14: Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405 des Kraftstoffs A und des Kraftstoffs B mit erhöhtem verdampften Volumen im Temperaturbereich 50 - 150 °C	66
Abbildung 4.15: Einfluss des Einspritzbeginns auf die Partikelemissionen mit Kraftstoff A und B	67
Abbildung 4.16: Einfluss des Einspritzbeginns auf die Ölemissionen mit Kraftstoff A und B.....	68
Abbildung 4.17: Kraftstoffvergleich für Kraftstoff A und B bezüglich Partikelgrößenverteilung und Massenspektrum bei unterschiedlichem Einspritzbeginn bei $\lambda = 1$ und 72 °C Kühlwassertemperatur im Stationärpunkt 2000 min ⁻¹ , 90 Nm	69
Abbildung 4.18: Zeitlicher Verlauf der Motordrehzahl und des Pedalwertes im hochdynamischen RDE-Ausschnitt	71
Abbildung 4.19: Destillationsverlauf nach DIN EN ISO 3405 der Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10	73
Abbildung 4.20: Einfluss des Kraftstoffs auf die maximalen kumulierten Partikel- und schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffemissionen im hochdynamischen RDE-Ausschnitt	74
Abbildung 4.21: Korrelation der Partikelanzahl aus dem Kondensationspartikelzähler mit dem verdampften Volumen der Destillation nach DIN EN ISO 3405 bei 70 °C, 100 °C und 150 °C	75
Abbildung 5.1: Massenspektren des Kraftstoff C-E10 und des Öls B im Laborversuch ohne motorische Einflüsse.....	77
Abbildung 5.2: Massenspektren in Schubphasen mit dem Kraftstoff C-E10 im hochdynamischen RDE-Ausschnitt und des Öls B im Laborversuch	79
Abbildung 5.3: Massenspektren in Last- und Schubphasen mit Kraftstoff C-E10 und Öl B im hochdynamischen RDE-Ausschnitt.....	80
Abbildung 5.4: Zuordnung der Massen aus dem Motoröl und aus den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) ohne Überschneidungsbereiche.....	82
Abbildung 5.5: Korrelation der Öl- und PAK-Massen (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (alle Lastphasen)	83

A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.6: Korrelation der Öl- und PAK-Massen (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (nur Lastphase 2)	83
Abbildung 5.7: Korrelation des PAK-zu-Öl-Massenverhältnisses und der Partikelanzahl (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D und D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (nur Lastphase 2). 84	
Abbildung 5.8: Korrelation der Öl- und PAK-Massen (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D, D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (Lastphasen 1-7 gemittelt)	85
Abbildung 5.9: Korrelation der Partikelanzahlemission mit dem PAK-zu-Öl-Massenverhältnis (Öl B; Kraftstoffe C, C-E10, C-DMC10, D, D-DMC10) im hochdynamischen RDE-Ausschnitt (Lastphasen 1-7 gemittelt)	86
Abbildung 5.10: Korrelation zwischen PAK- und Öl-Massen im stationären Motorbetrieb bei 2000 min ⁻¹ , 90 Nm mit Variation des Einspritzbeginns (ESB) mit Öl B und den zwei Kraftstoffen A und B.....	88
Abbildung 5.11: Korrelationen der PAK-zu-Öl-Massenverhältnisse und der Partikelanzahl der beiden Kraftstoffe A und B mit Öl B im stationären Motorbetrieb bei 2000 min ⁻¹ , 90 Nm mit Variation des Einspritzbeginns (ESB, 295 - 330 °KWvZOT)	89
Abbildung 5.12: Korrelation der PAK- und Öl-Massen bei Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks in Schub-Last-Wechsel mit hochviskosem Öl A und Kraftstoff B	90
Abbildung 5.13: Korrelation von PAK-zu-Öl-Massenverhältnis und Partikelanzahl bei Variation des Saugrohr- und Kurbelgehäusedrucks im Prüfprogramm mit Schub-Last-Wechseln mit hochviskosem Öl A und Kraftstoff B	91

B Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Klassifizierung der bekannten Einflussparameter auf Öl- und Partikelemissionen aus der in Kapitel 2 zusammengefassten Literatur.....	35
Tabelle 3.2: Versuchparameterübersicht und Untersuchungsschwerpunkte.....	45
Tabelle 4.1: Eigenschaften der untersuchten Öle.....	47
Tabelle 4.2: Übersicht und Beschreibung der Emissionswerte und kumulierten Emissionswerte je nach Messsignal.....	50
Tabelle 4.3: Vergleich ausgewählter Eigenschaften von p-Xylol, Ethylbenzol und n-Propylbenzol (Daten und Molekülstruktur aus [217 bis 219]).....	66
Tabelle 4.4: Bezeichnungen der fünf untersuchten Kraftstoffe im RDE-Ausschnitt.....	72
Tabelle 4.5: Ausgewählte Spezifikationen der Kraftstoffe C und D (Daten aus [221] und [222]).....	72
Tabelle 5.1: Korrelationskoeffizienten der Öl- und der PAK-Massen und PAK-zu-Öl-Massenverhältnis mit Partikelemissionen der einzelnen Lastphasen.....	85

C Literaturverzeichnis

- [1] Markt und Mittelstand: Die Zukunft des Autos ist nicht nur elektrisch, 2017. <https://www.marktundmittelstand.de/themen/nutzfahrzeuge/die-zukunft-des-autos-ist-nicht-nur-elektrisch-1262591/>, abgerufen am: 06.02.2022
- [2] Delphi: Worldwide Emissions Standards. Passenger Cars and Light Duty Vehicles, 2017
- [3] Diesel Engines Exhaust Carcinogenic, Press Release No. 213, World Health Organization, 2012
- [4] Silverman, D. T., Samanic, C. M., Lubin, J. H., Blair, A. E., Stewart, P. A., Vermeulen, R., Coble, J. B., Rothman, N., Schleiff, P. L., Travis, W. D., Ziegler, R. G., Wacholder, S. u. Attfield, M. D.: The Diesel Exhaust in Miners study. A nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust. *Journal of the National Cancer Institute* 104 (2012) 11, S. 855–868
- [5] Fokus: Partikel-Emissionen, Benzinmotoren, Direkteinspritzer. Das nächste Abgas-Desaster: Jetzt sind die Benziner dran, 2017. https://www.focus.de/auto/news/abgas-skandal/partikel-emissionen-und-direkteinspritzer-das-naechste-abgas-desaster-jetzt-sind-die-benziner-dran_id_5030582.html, abgerufen am: 06.02.2022
- [6] Pope, C. A. u. Dockery, D. W.: Health Effects of Fine Particulate Air Pollution. Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56 (2006) 6, S. 709–742
- [7] Peters, A.: Air quality and cardiovascular health. Smoke and pollution matter. *Circulation* 120 (2009) 11, S. 924–927
- [8] Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W. u. Cox, C.: Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation toxicology* 16 (2004) 6-7, S. 437–445
- [9] Dockery, D.: Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. *Annual Review of Public Health* 15 (1994) 1, S. 107–132
- [10] Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L. u. Kaufman, J. D.: Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 121 (2010) 21, S. 2331–2378
- [11] Stadt Zürich, Gesundheits- und Umweltdepartement: Feinstaub PM10. https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/luftqualitaet/schadstoffe/feinstaub.html, abgerufen am: 06.02.2022
- [12] Maynard, A. D. u. Kuempel, E. D.: Airborne Nanostructured Particles and Occupational Health. *Journal of Nanoparticle Research* 7 (2005) 6, S. 587–614
- [13] Review of evidence on health aspects of air pollution- REVIHAAP Project. Technical Report, World Health Organization
- [14] Oberdörster, G., Oberdörster, E. u. Oberdörster, J.: Nanotoxicology. An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives* 113 (2005) 7, S. 823–839
- [15] Amtsblatt der Europäischen Union: Verordnung EU 2017/1151. 2017
- [16] Amtsblatt der Europäischen Union: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffanforderungen des Motors [2019/253]. 2019
- [17] Vidmar, K., Götschl, P., Kapus, P., Jansen, H., Fraidl, G. u. Dobes, T.: Partikeloptimale Benzindirekteinspritzung – Eine Voraussetzung für RDE. In: Tschöke, H. (Hrsg.): 9. Tagung Diesel- und Benzin-direkteinspritzung 2014. Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, S. 473–489

- [18] Eifler, G., Neumann, R. u. Herzberger, C.: Partikelemissionsentwicklung am Ottomotor für zukünftige RDE-Anforderungen. In: Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, S. 168–183
- [19] Blei, S., Busch, S. u. Thiel, M.: Methodik zur Bewertung der partikelförmigen Emission des Verbrennungsmotors. In: Roß, T. u. Heine, A. (Hrsg.): Der Verbrennungsmotor - ein Antrieb mit Vergangenheit und Zukunft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018, S. 283–313
- [20] Zinola, S., Raux, S. u. Leblanc, M.: Persistent Particle Number Emissions Sources at the Tailpipe of Combustion Engines. SAE Technical Paper (2016) 2016-01-2283
- [21] Heinz, A., Stalp, A., Beidl, C. u. Koch, T.: Modellierung und Untersuchung von Partikelbildung bei DI-Ottomotoren in transienten Fahrsituationen. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 82 (2021) 10, S. 66–70
- [22] European Commission: Horizon 2020. Work Programme 2016 - 2017. http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2016_2017/main/h2020-wp1617-intro_en.pdf, abgerufen am: 06.02.2022
- [23] European Commission: Portable Nano-Particle Emission Measurement System, 2017. <https://cordis.europa.eu/project/id/724145>, abgerufen am: 06.02.2022
- [24] European Commission: Measuring automotive exhaust particles down to 10 nanometres, 2017. <https://cordis.europa.eu/project/id/724085>, abgerufen am: 06.02.2022
- [25] European Commission: Understanding and measuring SUB-23 nm particle emissions from direct injection engines including REAL driving conditions, 2017. <https://cordis.europa.eu/project/id/724136>, abgerufen am: 06.02.2022
- [26] European Commission: Particle Reduced, Efficient Gasoline Engines, 2017. <https://cordis.europa.eu/project/id/723954>, abgerufen am: 06.02.2022
- [27] Amtsblatt der Europäischen Union: Regelung Nr. 83 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffordernissen des Motors. 2015
- [28] Winkler, M., Grimm, J., Lenga, H. u. Min, B.-H.: Gasoline engine combustion development for EU 6c emission legislation. In: Liebl, J. (Hrsg.): Internationaler Motorenkongress 2014. Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, S. 193–206
- [29] Kayes, D., Hochgreb, S., Maricq, M. M., Podsiadlik, D. H. u. Chase, R. E.: Particulate Matter Emission During Start-up and Transient Operation of a Spark-Ignition Engine (2). Effect of Speed, Load, and Real-World Driving Cycles. SAE Technical Paper (2000) 2000-01-1083
- [30] Kayes, D., Liu, H. u. Hochgreb, S.: Particulate Matter Emission During Start-up and Transient Operation of a Spark-Ignition Engine. SAE Technical Paper (1999) 1999-01-3529
- [31] Tan, C., Xu, H., Ma, H. u. Ghafourian, A.: Investigation of VVT and spark timing on combustion and particle emission from a GDI Engine during transient operation. SAE Technical Paper (2014) 2014-01-1370
- [32] Bertsch, M.: Experimental Investigations on Particle Number Emissions from GDI Engines, Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe 2016
- [33] Automobilwoche: Kampf gegen Rußpartikel. Partikelfilter für Ottomotoren sind im Kommen, 2017. <https://www.automobilwoche.de/article/20170321/AGENTURMELDUNGEN/303219993/kampf-gegen-russpartikel-partikelfilter-fuer-ottomotoren-sind-im-kommen>, abgerufen am: 06.02.2022
- [34] Christiane Brüninghaus: Volkswagen kündigt Partikelfilter für Ottomotoren an, 2016. <https://www.springerprofessional.de/ottomotor/abgasnachbehandlung/volkswagen-kuendigt-partikelfilter-fuer-ottomotoren-an/10558076?searchResult=11.Partikelfilter&searchBackButton=true&abEvent=detailLink>, abgerufen am: 06.02.2022

C Literaturverzeichnis

- [35] Süddeutsche Zeitung: Dem Benziner an den Kragen - Partikelfilter für Ottomotoren, 2017. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/verkehr-dem-benziner-an-den-kragen-partikelfilter-fuer-ottomotoren-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-170320-99-737435>, abgerufen am: 06.02.2022
- [36] Giechaskiel, B., Valverde, V., Kontses, A., Melas, A., Martini, G., Balazs, A., Andersson, J., Samaras, Z. u. Dilara, P.: Particle Number Emissions of a Euro 6d-Temp Gasoline Vehicle under Extreme Temperatures and Driving Conditions. *Catalysts* 11 (2021) 5, S. 607
- [37] Boger, T., Rose, D., Nicolin, P. u. Coulet, B.: Felderfahrung mit DI-Ottomotoren mit Partikelfilter. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 78 (2017) 1, S. 32–39
- [38] Kattouah, P., Kato, K., Thier, D., Ohara, E., Vogt, C. D., Ito, Y., Shimoda, T., Aoki, T., Shibagaki, Y., Yuuki, K., Sakamoto, H. u. Liebl, J. (Hrsg.): The potential of an advanced GPF concept for low pressure drop and low CO₂ emission // Internationaler Motorenkongress 2014. *Antriebstechnik im Fahrzeug*. Internationaler Motorenkongress, Bd. 1. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [39] Chan, T. W., Saffaripour, M., Liu, F., Hendren, J., Thomson, K. A., Kubsh, J., Brezny, R. u. Rideout, G.: Characterization of Real-Time Particle Emissions from a Gasoline Direct Injection Vehicle Equipped with a Catalyzed Gasoline Particulate Filter During Filter Regeneration. *Emission Control Science and Technology* 2 (2016) 2, S. 75–88
- [40] Kunert, S., Müller, W., Musa, S., Spiess, S., Hentschel, L., Schlüter, L. u. Thiele, M.: Integration der Drei-Wege-Funktionalität in den Ottopartikelfilter – eine neue Technologie in der motornahen Abgasnachbehandlung. In: Geringer, B. u. Lenz, H. P. (Hrsg.): 39. Internationales Wiener Motorensymposium 26.-27. April 2018. *Fortschritt-Berichte VDI*. Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, Nr. 802. VDI Verlag GmbH 2018
- [41] Amtsblatt der Europäischen Union: Verordnung (EU) 2019/631 - Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/ 2009 und (EU) Nr. 510/ 2011. 2019
- [42] Achleitner, E., Frenzel, H., Grimm, J., Maiwald, O., Rösel, G., Senft, P. u. Zhang, H.: Systemansatz für ein Fahrzeug mit Benzindirekteinspritzung und Partikel Filter im RDE. In: Geringer, B. u. Lenz, H. P. (Hrsg.): 39. Internationales Wiener Motorensymposium 26.-27. April 2018. *Fortschritt-Berichte VDI*. Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, Nr. 802. VDI Verlag GmbH 2018
- [43] Görgen, M., Lehn, H., Sterlepper, S. u. Claßen, J.: Neue Entwicklungsmethoden zur Kalibrierung von Ottomotor-Partikelfiltern. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 79 (2018) 5, S. 68–75
- [44] Dageförde, H.: Untersuchung innermotorischer Einflussgrößen auf die Partikelemission eines Ottomotors mit Direkteinspritzung. *Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, Band 2015,1. Berlin: Logos-Verl. 2015
- [45] Partikel bei Otto-DI. Untersuchung von Maßnahmen zur Reduktion der Partikel-Anzahlemissionen bei Otto-DI-Motoren, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV). Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1046, Dageförde, H., 2013
- [46] Untersuchung der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung im transienten Betrieb an einem Ottomotor mit strahlgeführter Direkteinspritzung. Abschlussbericht zur Projektphase I, Az. 30369, Disch, C. u. Kubach, H., 2014
- [47] Backes, F.: Experimentelle Untersuchungen zu Partikelanzahlemissionen beim direkteinspritzenden Ottomotor, Technische Universität München Dissertation. München 2021
- [48] Karjalainen, P.: Vehicle Nanoparticle Emissions under Transient Driving Conditions. Publication 1268, Tampere University of Technology Dissertation. Tampere 2014
- [49] Rönkkö, T., Pirjola, L., Ntziachristos, L., Heikkilä, J., Karjalainen, P., Hillamo, R. u. Keskinen, J.: Vehicle engines produce exhaust nanoparticles even when not fueled. *Environmental science & technology* 48 (2014) 3, S. 2043–2050

- [50] Karjalainen, P., Pirjola, L., Heikkilä, J., Lähde, T., Tzamkiozis, T., Ntziachristos, L., Keskinen, J. u. Rönkkö, T.: Exhaust particles of modern gasoline vehicles. A laboratory and an on-road study. *Atmospheric Environment* 97 (2014), S. 262–270
- [51] Bika, A., Fang, W., Franklin, L., Huang, B. u. Kittelson, D. B.: Particle Emissions from a Soot Free Engine. Cambridge Particle Meeting. Cambridge 2012
- [52] Hadler, J., Lensch-Franzen, C., Gohl, M. u. Mink, T.: Einflussfaktoren auf die Partikelentstehung unter Realfahrbedingungen. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 77 (2016) 3, S. 52–61
- [53] Frommer, A.: Massenspektrometrische Untersuchung des Ölemissionsverhaltens von Verbrennungsmotoren bei stationärem und transientem Betrieb. Dissertation. Schriftenreihe des MAHLE Doktorandenprogramms, Band 4. Shaker Verlag GmbH 2015
- [54] Guderian, R.: Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 1B: Atmosphäre Aerosol/Multiphasenchemie Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen Auswirkungen auf Strahlung und Klima. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2000
- [55] Kulkarni, P., Baron, P. A. u. Willeke, K. (Hrsg.): Aerosol measurement. Principles, techniques, and applications. Hoboken, NJ: Wiley 2011
- [56] Kittelson, D. B.: Engines and Nanoparticles: A Review. *Journal of Aerosol Science* 29 (1998) 5-6, S. 575–588
- [57] Willeke, K. u. Whitby, K. T.: Atmospheric Aerosols. Size Distribution Interpretation. *Journal of the Air Pollution Control Association* 25 (1975) 5, S. 529–534
- [58] Review of Diesel Particulate Matter Sampling Methods. Final Report, Kittelson, D. B., Arnold, M. u. Watts, W., Minneapolis, MN 1999
- [59] Kittelson, D. B.: Measurement of Engine Exhaust Particle Size. Davis 2000
- [60] Kittelson, D. B., Northrop, W., Avenido, A., Watts, W. u. Lucachick, G.: Prospects of meeting EU number emission standards with a diesel engine without a DPF. Cambridge Particle Meeting. Cambridge 2014
- [61] Cudeiro Torruella, M.: Partikelemissionsuntersuchungen an einem Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung und aufgeladenem Magerbetrieb. Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2017
- [62] Merkisz, J. u. Pielecha, J.: Nanoparticle Emissions from Combustion Engines. Springer tracts on transportation and traffic, Volume 8. Cham: Springer 2015
- [63] Öl- und Partikelemission. Literaturrecherche zum Thema Bestimmung des Anteils von Partikeln aus dem Motoröl im Abgas, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 748, Sargenti, R. u. Hitzler, G., 2000
- [64] Eastwood, P.: Particulate emissions from vehicles. Warrendale, PA: Wiley-Blackwell 2008
- [65] Okamura, K., Yamashita, T. u. Kawase, H.: Chemical composition of the size-classified nanoparticle exhausted from gasoline vehicle. ETH Conference on Combustion-Generated Nanoparticles. Zürich 2014
- [66] Seong, H., Choi, S. u. Lee, K.: Examination of nanoparticles from gasoline direct-injection (GDI) engines using transmission electron microscopy (TEM). *International Journal of Automotive Technology* 15 (2014) 2, S. 175–181
- [67] Choi, S., Myung, C. L. u. Park, S.: Review on characterization of nano-particle emissions and PM morphology from internal combustion engines. Part 2. *International Journal of Automotive Technology* 15 (2014) 2, S. 219–227
- [68] Kumar, P., Morawska, L. u. Harrison, R. M.: Nanoparticles in European Cities and Associated Health Impacts. In: Viana, M. (Hrsg.): Urban Air Quality in Europe. The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 339–365

C Literaturverzeichnis

- [69] Alanen, J., Simonen, P., Saarikoski, S., Timonen, H., Kangasniemi, O., Saukko, E., Hillamo, R., Lehtoranta, K., Murtonen, T., Vesala, H., Keskinen, J. u. Rönkkö, T.: Comparison of primary and secondary particle formation from natural gas engine exhaust and of their volatility characteristics. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17 (2017) 14, S. 8739–8755
- [70] Bockhorn, H.: Soot Formation in Combustion. Mechanisms and Models. Springer Series in Chemical Physics, Bd. 59. Berlin, Heidelberg: Springer 1994
- [71] Mayer, K.: Pyrometrische Untersuchung der Verbrennung in Motoren mit Common-Rail-Direkteinspritzung mittels einer erweiterten Zwei-Farben-Methode. Dissertation. Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH), Bd. 1. Berlin: Logos-Verlag 2000
- [72] Reck, T.: Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen zur Minimierung der Partikelrohmissionen bei Benzindirekteinspritzung // Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen zur Minimierung der Partikelrohmission bei Benzindirekteinspritzung. Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen, 10/2013. Berlin: Logos Berlin 2013
- [73] Merker, G. P. u. Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014
- [74] Roßbach, M.: Untersuchung der Bildung und Oxidation von Ruß in Motoren mit Direkteinspritzung. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Diss., 2012. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2013
- [75] Kittelson, D. B. u. Kraft, M.: Particle Formation and Models in Internal Combustion Engines, 2014. <https://como.ceb.cam.ac.uk/media/preprints/c4e-Preprint-142.pdf>, abgerufen am: 06.02.2022
- [76] Review of Diesel Particulate Matter Sampling Methods. Aerosol Dynamics, Laboratory and On-Road Studies, Supplemental Report #2, Kittelson, D. B., Watts, W. u. Arnold, M., Minneapolis, MN 1998
- [77] Reime, L.: Partikelbewegung unter dem Einfluss elektrischer und thermophoretischer Kräfte in einer Rohrströmung, Universität Hannover Dissertation. Hannover 2004
- [78] Sager, C.: Der Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen und seine besondere Bedeutung für die Partikelmesstechnik, Universität Duisburg-Essen Dissertation. Duisburg-Essen 2007
- [79] Hopp, M.: Untersuchung der Rußoxidation unter dieselmotorischen Randbedingungen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen Dissertation. Aachen 2001
- [80] Partikel bei Otto-DI III. Untersuchungen zur Partikelbildung und -emission an PKW-Ottomotoren mit Benzin-Direkteinspritzung (Teil III), Projekt Nr. 1188 und 1193, Notheis, D. u. Bertsch, M., 2017
- [81] Schilling, M.: Betriebsstrategien zur Emissionsreduzierung beim Ottomotor mit strahlgeführtem Brennverfahren, Karlsruher Institut für Technologie Dissertation. Karlsruhe 2012
- [82] Nauwerck, A., Kettner, M., Velji, A. u. Spicher, U.: Gemischbildung und Verbrennung in Ottomotoren mit strahlgeführtem Brennverfahren. In: Spicher, U. (Hrsg.): Forschungsergebnisse und aktueller Entwicklungsstand bei der Benzin-Direkteinspritzung. Fachbuch / Haus der Technik, Bd. 24. Renningen-Malmsheim: expert-Verl. 2003
- [83] Leach, F., Stone, R., Richardson, D., Lewis, A., Akehurst, S., Turner, J., Remmert, S., Campbell, S. u. Cracknell, R. F.: Particulate emissions from a highly boosted gasoline direct injection engine. *International Journal of Engine Research* 19 (2017) 3, S. 347–359
- [84] Schumann, F.: Experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Katalysatorheizbetrieb mit strahlgeführter Benzin-Direkteinspritzung und Einspritzdrücken bis 800 bar, Karlsruher Institut für Technologie Dissertation. Karlsruhe 2014
- [85] Eitel, F., Schäfer, J., Königstein, A. u. Heeger, C.: Kraftstoffdruckerhöhung bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung auf bis zu 50 MPa. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 79 (2018) 7-8, S. 52–59
- [86] Altenschmidt, F.: Grundsatzuntersuchungen zu einem ottomotorischen Brennverfahren mit Direkteinspritzung und Aufladung, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe

- [87] Bashirnezhad, K., Moghiman, M., Javadi Amoli, M., Tofighi, F. u. Zabetnia, S.: Effect of Fuel Spray Angle on Soot Formation in Turbulent Spray Flames. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* (2008) Vol. 2, No. 5
- [88] Dageförde, H., Kubach, H., Koch, T. u. Spicher, U.: Innermotorische Ursachen für Partikelemissionen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. In: Bargende, M., Reuss, H.-C. u. Wiedemann, J. (Hrsg.): 14. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik. Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014, S. 435–459
- [89] Dageförde, H., Bertsch, M., Kubach, H. u. Koch, T.: Reduktion der Partikelemissionen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 76 (2015) 10, S. 86–93
- [90] PN emissions from GDI engines. Investigations to reduce particle number emissions from GDI-engines II, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1144 & 1188, Bertsch, M., 2013
- [91] Kapus, P., Grieser, K., Vidmar, K. u. Berkemeier, O.: Innermotorische Maßnahmen zur Zielereichung EU6-Partikelanzahl am GTDI. *Antrieb von morgen*. 2013 2013
- [92] Fraidl, G. K., Hirsch, A., Kapus, P. E., Ogris, M., Philipp, H. u. Vidmar, K.: Entwicklungsprozess für die Darstellung niedrigster Partikel-Rohemissionen beim direkt einspritzenden Ottomotor. In: Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen
- [93] Kapus, P., Neubauer, M., Hilbert, D., Krenn, M. u. Fraidl, G.: High performance and stoichiometric operation – vision or reality? In: Liebl, J., Beidl, C. u. Maus, W. (Hrsg.): Internationaler Motorenkongress. Proceedings. 2018, S. 115–129
- [94] Gumprich, W., Hermann, I., Glahn, C. u. Paroll, M.: Simulation der Wassereinspritzung in SIDI-Turbomotoren. *Simulation und Test. Nahtlose Verknüpfung von Simulation und Test in allen Entwicklungsphasen*. 2018
- [95] Landerl, C., Rüllicke, M., Spanring, D. u. Schmuck-Soldan, S.: Die Ottomotorenfamilie des Next-Generation-Baukastens von BMW. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 79 (2018) 3, 40-46
- [96] Landerl, C., Spanring, D., Rüllicke, M., Durst, B., Hartmann, O. u. Schmuck-Soldan, S.: The New 3- and 4-Cylinder Gasoline Engines of BMW Group – Modular Engine Family NEXT GENERATION. *Aachener Colloquium Automobile and Engine Technology*, S. 35–56
- [97] Heiduk, T., Kuhn, M., Stichelmeir, M. u. Unselt, F.: Der neue 1,8-l-TFSI-Motor von Audi. Teil 2: Gemischbildung, Brennverfahren und Aufladung. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 72 (2011) 07-08, 596-604
- [98] Eichler, F., Demmelbauer-Ebner, W., Persigehl, K. u. Wendt, W.: Der 1,0-l-Dreizylinder-TSI-Motor im Modularen Baukasten von Volkswagen. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 75 (2014) 11, 32-39
- [99] Steimle, F., Kulzer, A., Schwarzenthal, D., Richter, H. u. Romberg, C.: Particle emission analysis in homogeneous direct injection SI engines. In: 13th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology. 2013
- [100] Wiese, W., Kufferath, A., Storch, A. u. Rogler, P.: Anforderungen an den Mehrlochinjektor zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte beim direkt einspritzenden Ottomotor. In: Liebl, J. u. Beidl, C. (Hrsg.): Internationaler Motorenkongress 2015. Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015
- [101] Wiese, W., Laidig, C., Schünemann, E., Balthasar, F. u. Chahal, J.: Einfluss von Kraftstoffeigenschaften, Additivierung und Einspritzung auf die Partikelentstehung bei DI Ottomotoren. In: Geringer, B. u. Lenz, H. P. (Hrsg.): 39. Internationales Wiener Motorensymposium 26.-27. April 2018. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, Nr. 802. VDI Verlag GmbH 2018
- [102] Püffel, P. K. u. Grafenstein, U. B. v.: Resonante Lasermassenspektrometrie zum Spurennachweis von Ölbestandteilen in Abgasen von Verbrennungsmotoren. *Entwicklung neuer Meßverfahren für und Untersuchung der Prozesse von Ölemissionen. Dissertation. Laserspektroskopie und Lasermassenspektrometrie, Bd. 8. München: Utz 1998*

C Literaturverzeichnis

- [103] Püffel, P. K., Thiel, W., Frey, R. u. Boesl, U.: A New Method for the Investigation of Unburned Oil Emissions in the Raw Exhaust of SI Engines. SAE Technical Paper (1998) 1998-10-19, 982438
- [104] Schnelle Ölverbrauchsmessung im Abgas. Massenspektrometrische Bestimmung des Ölverbrauchs von Verbrennungsmotoren und dessen Einfluss auf die HC-Emission, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 707, Gohl, M. u. Ihme, H., 1999
- [105] Schnelle Ölemissionsmessung bei Otto- und Dieselmotoren. Massenspektrometrische Bestimmung der Ölemission im Abgas von Otto- und Dieselmotoren, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 758, Gohl, M. u. Ollesch, T., 2002
- [106] Künzel, R., Freier, R. u. Papadopoulos, I.: Die Bedeutung der dynamischen Ölemissionsmessung in der Verbrennungsmotorenentwicklung. In: Roß, T. u. Heine, A. (Hrsg.): Der Verbrennungsmotor - ein Antrieb mit Vergangenheit und Zukunft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018, S. 537–552
- [107] Ölverbrauchswege. Untersuchung der Ölverbrauchswege bei Verbrennungsmotoren, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 507, Bergmann, M., Röthig, J., Zeuner, A. u. Seibold, J., 1995
- [108] Rosefort, Y., Mauermann, P., Grütering, U. u. Pischinger, S.: Motorölbedingte Emissionen und deren Bilanzierung beim DI-Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 69 (2008) 5, 432-442
- [109] Oscar Lopez: Experimental Study of Lube Oil Characteristics in the PCV System and Effects on Engine Oil Consumption, Massachusetts Institute of Technology Master Thesis. Cambridge 2004
- [110] Kolben und motorische Erprobung. ATZ / MTZ-Fachbuch, Bd. 2. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015
- [111] Püffel, P. K.: Eine neue Methode zur schnellen und exakten Ölverbrauchsmessung. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 60 (1999) 12, S. 820–827
- [112] Impact of Engine Oil Consumption on Particulate Emissions, Froelund, K. u. Yilmaz, E.
- [113] Simon, C., Lang, K., Feigl, P. u. Bock, E.: Turboladerdichtung für Null-Ölverbrauch und Minimiertes Blow-By. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 71 (2010) 4, S. 266–271
- [114] Yilmaz, E.: Sources and Characteristics of Oil Consumption in a Spark-Ignition Engine, Massachusetts Institute of Technology Dissertation. Cambridge 2003
- [115] Lensch-Franzen, C., Hadler, J., Kirsten, K., Guhr, C., Kehrwald, B., Spicher, U. u. Gohl, M.: Methoden für die Entwicklung eines RDE-fähigen Antriebs. Wiener Motorensymposium. Wien 2015
- [116] Sanjkovic, P.: Analyse der Öl-Aerosolbildung von Verbrennungsmotoren im Schubbetrieb, Karlsruher Institut für Technologie Bachelor Thesis. Karlsruhe 2014
- [117] Wigger, S.: Charakterisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe mittels laserinduzierter Fluoreszenz, Universität Duisburg-Essen Dissertation. Duisburg-Essen 2014
- [118] Kolbenring-Öltransport - Glasliner. Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1210, Schäffer, J.
- [119] Henaux, D., Orlowsky, K. u. Plettenberg, M.: Einsatz von Spezialmesstechnik im Mechanik-Testing am Beispiel detaillierter Untersuchungen druckdynamischer Effekte im Kolbenringpaket. In: Liebl, J. u. Beidl, C. (Hrsg.): VPC - Simulation und Test 2015. Methoden der Antriebsentwicklung im Dialog 17. MTZ-Fachtagung. Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018, S. 185–199
- [120] Wigger, S., Müller, T. u. Füßer, H.-J.: Tribologieanalyse der Kolbengruppe mittels optisch zugänglichem Forschungsmotor. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 78 (2017) 7-8, S. 46–51
- [121] Schmalzbauer, J.: Betrachtung der dynamischen Prozesse im Ringfeld von Hubkolbenmotoren, Hochschule Karlsruhe, Technik und Wirtschaft Master Thesis. Karlsruhe 2014
- [122] Audette, W. E. u. Wong, V. W.: A Model For Estimating Oil Vaporization From The Cylinder Liner As A Contributing Mechanism to Engine Oil Consumption. SAE Technical Paper (1999) 1999-01-1520
- [123] Yilmaz, E., Tian, T., Wong, V. W. u. Heywood, J. B.: An Experimental and Theoretical Study of the Contribution of Oil Evaporation to Oil Consumption. SAE Technical Paper (2002) 2002-01-2684

- [124] Yilmaz, E., Tian, T., Wong, V. W. u. Heywood, J. B.: The Contribution of Different Oil Consumption Sources to Total Oil Consumption in a Spark Ignition Engine. SAE Technical Paper (2004) 2004-01-2909
- [125] Cho, Y. u. Tian, T.: Modeling Engine Oil Vaporization and Transport of the Oil Vapor in the Piston Ring Pack of Internal Combustion Engines. SAE Technical Paper (2004) 2004-01-2912
- [126] Ölverbrauchssimulation. Rechnerische Simulation der Ölverbrauchs- und Öltransportwege im Bereich Kolben-Kolbenring-Zylinder, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 646. Heft 707, Lechtape-Grüter, R., Frankfurt am Main 2001
- [127] Berechnung Ölverbrauch von Hubkolben-Verbrennungsmotoren. VDI-Berichte Nr. 1007, Lübbling, B. E. u. Gneithing, B., 1992
- [128] Ölverdampfung. Ölverdampfung im Brennraum von Verbrennungsmotoren, Messung und Modellierung, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 826, Hollen, P. von, Krause, S. u. Schlerege, F., Frankfurt am Main 2007
- [129] Krause, S.: Massenspektrometrisches Verfahren zur Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum von Ottomotoren, Technische Universität Hamburg-Harburg Dissertation. Hamburg 2009
- [130] Thirouard, B. u. Tian, T.: Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part I). Identification and Characterization of the Main Oil Transport Routes and Mechanisms. SAE Technical Paper (2003) 2003-01-1952
- [131] Thirouard, B. u. Tian, T.: Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part II). Zone Analysis and Macro Oil Transport Model. SAE Technical Paper (2003) 2003-01-1953
- [132] Thirouard, B., Tian, T. u. Hart, D. P.: Investigation of Oil Transport Mechanisms in the Piston Ring Pack of a Single Cylinder Diesel Engine, Using Two Dimensional Laser Induced Fluorescence. SAE Technical Paper (1998) 982658
- [133] Vokac, A. u. Tian, T.: An Experimental Study of Oil Transport on the Piston Third Land and the Effects of Piston and Ring Designs. SAE Technical Paper (2004) 2004-01-1934
- [134] Thirouard, B.: Characterization and Modeling of the Fundamental Aspects of Oil Transport in the Piston Ring Pack of Internal Combustion Engines, Massachusetts Institute of Technology Dissertation. Cambridge 2001
- [135] Przesmitzki, S., Vokac, A. u. Tian, T.: An Experimental Study of Oil Transport between the Piston Ring Pack and Cylinder Liner. SAE Technical Paper (2005) 2005-01-3823
- [136] Gunkel, M., Frensch, M., Robota, A. u. Gelhausen, R.: Innermotorische Emissionsreduzierung Zusammenhang zwischen Partikelemissionen und Ölverbrauch. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 79 (2018) 7-8, S. 46-51
- [137] Schmierölemission und Gemischbildung. Beeinflussung der Schmierölemission durch die Gemischbildung im Brennraum von Verbrennungsmotoren, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 933 Heft 901, Stein, C., Budde, M., Krause, S., Brandt, S. u. Schlerege, F., Frankfurt am Main 2010
- [138] Budde, M., Brandt, S., Krause, S. u. Gohl, M.: Einfluss der Gemischbildung auf die Ölemissionen von Verbrennungsmotoren. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 72 (2011) 1, S. 62-67
- [139] Gohl, M., Brandt, S., Wittler, M., Budde, M., Knoll, G., Krause, S., Pischinger, S., Stein, C., Adomeit, P., Matz, G. u. Schlerege, F.: Influence of the Mixture Formation on the Lubrication Oil Emission of Combustion Engines. SAE Technical Paper (2010) 2010-01-1275
- [140] Rehr, A.: Innovative Ölverbrauchsmesstechnik - Chancen und Erkenntnisse aus der Anwendung der Massenspektroskopie an Hochleistungsottomotoren. Ölkreislauf von Verbrennungsmotoren. 2005
- [141] Füßer, H.-J., Wigger, S. u. Müller, T.: Visualisierung der Öl- und Kraftstoffverteilung mittels LIF in der Kolbengruppe an einem optisch zugänglichen Forschungseinzyliner. 9. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2018

C Literaturverzeichnis

- [142] Behn, A., Feindt, M., Matz, G., Krause, S. u. Gohl, M.: Fuel Transport across the Piston Ring Pack. Measurement System Development and Experiments for Online Fuel Transport and Oil Dilution Measurements. SAE Technical Paper (2015) 2015-24-2535
- [143] Kittelson, D. B., Patwardhan, U., Zarling, D., Gladis, D. u. Watts, W.: Issues associated with measuring nothing or almost nothing: Real-time Measurements of Metallic Ash Emissions from Engines. Cambridge Particle Meeting. Cambridge 2013
- [144] Apple, J., Gladis, D., Watts, W. u. Kittelson, D.: Measuring Diesel Ash Emissions and Estimating Lube Oil Consumption Using a High Temperature Oxidation Method. SAE Technical Paper (2009) 2009-01-1843
- [145] Yilmaz, E., Thirouard, B., Tian, T., Wong, V. W., Heywood, J. B. u. Lee, N.: Analysis of Oil Consumption Behavior during Ramp Transients in a Production Spark Ignition Engine. SAE Technical Paper (2001) 2001-01-3544
- [146] Przesmitzki, S. u. Tian, T.: Oil Transport Inside the Power Cylinder During Transient Load Changes. SAE Technical Paper (2007) 2007-01-1054
- [147] Papadopoulos, I., Künzel, R. u. Frommer, A.: Einfluss von Ölrücklaufbohrungen auf die Ölemission an einem turboaufgeladenen Benzinmotor. 8. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel. Baden-Baden, 31. Mai und 1. Juni 2016. VDI-Berichte, Bd. 2282. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2016, S. 159–173
- [148] Senzer, E. B.: Piston Ring Pack Design Effects on Production Spark Ignition Engine Oil Consumption, Massachusetts Institute of Technology Master Thesis. Cambridge 2007
- [149] Frommer, A., Ehnis, H., Freier, R. u. Künzel, R.: Trade-off between friction reduction and lube oil consumption – tangential force reduction on oil control rings. In: 13th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology. 2013
- [150] Esser, J.: Einfluss von Ölabstreifringen auf den Ölverbrauch. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 63 (2002) 7-8, S. 592–601
- [151] Lube Oil Consumption Analysis of DI Engine Using Ricardo Ringpak Software, Dhoble, A. S. u. Sharma, R. P.
- [152] Yamada, T., Inagaki, H., Nozawa, Y., Katsumi, N., Yamashita, K. u. Kawai, K. (Hrsg.): Multiple Experimental Approaches to Investigate Oil Transport Mechanism of Piston-Liner System. 2015
- [153] Hoen, T., Schmid, J. u. Stumpf, W.: Weniger Verschleiß und Ölverbrauch durch Spiralgleithonung bei Deutz-Motoren. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 70 (2009) 04, 324-329
- [154] Robota, A. u. Zwein, F.: Einfluss der Zylinderlaufflächentopografie auf den Ölverbrauch und die Partikelemissionen eines DI-Dieselmotors. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 60 (1999) 4, S. 246–255
- [155] Gohl, M. u. Adams, D.: Analysis of Oil Emission Mechanisms by Simulation and Mass Spectrometry. SAE Technical Paper (2010) 2010-01-1562
- [156] Predicted Effects of Cylinder Kit Wear on Blowby and Oil Consumption for Two Diesel Engines, Richardson, D. E. u. Krause, S. A., Charleston, SC
- [157] MAHLE GmbH: Motorische Erprobung. In: Kolben und motorische Erprobung. ATZ / MTZ-Fachbuch, Bd. 2. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015, S. 123–295
- [158] Paoloni, F., Burette, G., Gohl, M., Lensch-Franzen, C. u. Holzmüller, J.: Beyond Noack Volatility: New Perspective for Engine Lubricant Oil and Particle Emissions. SAE Technical Paper (2020) 220-01-2161
- [159] Hadler, J., Lensch-Franzen, C., Gohl, M. u. Mink, T.: Emissionsreduzierung im Spannungsfeld von Ölformulierung, Applikation und Mechanikentwicklung. In: Liebl, J. u. Beidl, C. (Hrsg.): Internationaler Motorenkongress 2015. Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015, S. 79–163

- [160] Froelund, K., Owens, E. C., Frame, E., Buckingham, J. P., Garbak, J., Tseregounis, S. u. Jackson, A.: Impact of Lubricant Oil on Regulated Emissions of a Light-Duty Mercedes-Benz OM611 CIDI-Engine. SAE Technical Paper (2001) 2001-01-1901
- [161] Gligorijevic, R., Jevtic, J. u. Borak, D. J.: Engine oil contribution to diesel exhaust emissions. *Journal of Synthetic Lubrication* 23 (2006) 1, S. 27–38
- [162] Wang, Y., Liang, X., Wang, Y., Sun, X., Yu, H., Zhang, H. u. Zhu, Z.: Effect of Lubricating Oil Volatile Fractions on Diesel Particle Emissions. SAE Technical Paper (2018) 2018-01-0637
- [163] Premnath, V., Khalek, I., Morgan, P., Michlberger, A., Sutton, M. u. Vincent, P.: Effect of Lubricant Oil on Particle Emissions from a Gasoline Direct Injection Light-Duty Vehicle. SAE Technical Paper (2018) 2018-01-1708
- [164] Price, P., Twiney, B., Stone, R., Kar, K. u. Walmsley, H.: Particulate and Hydrocarbon Emissions from a Spray Guided Direct Injection Spark Ignition Engine with Oxygenate Fuel Blends. SAE Technical Paper (2007) 2007-01-0472
- [165] Dageförde, H., Koch, T., Beck, K. W. u. Spicher, U.: Influence of Fuel Composition on Exhaust Emissions of a DISI Engine during Catalyst Heating Operation. SAE Technical Paper (2013) 2013-01-2571
- [166] Zhu, R., Hu, J., Bao, X., He, L. u. Zu, L.: Effects of aromatics, olefins and distillation temperatures (T50 & T90) on particle mass and number emissions from gasoline direct injection (GDI) vehicles. *Energy Policy* 101 (2017), S. 185–193
- [167] Dageförde, H., Kubach, H., Beck, K. u. Spicher, U. (Hrsg.): Einfluss verschiedener Ottokraftstoffe auf die Partikelemissionen im Katalysatorheizbetrieb. *Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors*, Bd. 13. 2013
- [168] Sharma, N. u. Agarwal, A. K.: Gasoline Direct Injection Engines and Particulate Emissions. In: Sharma, N., Agarwal, A. K., Eastwood, P., Gupta, T. u. Singh, A. P. (Hrsg.): *Air pollution and control. Energy, environment, and sustainability*. Singapore: Springer 2018, S. 87–105
- [169] Di Iorio, S., Lazzaro, M., Sementa, P., Vaglieco, B. M. u. Catapano, F.: Particle Size Distributions from a DI High Performance SI Engine Fuelled with Gasoline-Ethanol Blended Fuels. SAE Technical Paper (2011) 2011-24-0211
- [170] Vuk, C. u. Vander Griend, S. J.: Fuel Property Effects on Particulates In Spark Ignition Engines. SAE Technical Paper (2013) 2013-01-1124
- [171] Partikelbildung bei DI-Ottomotoren. Systematische Analyse der Partikelbildung an Ottomotoren, Projekt Nr. 1282, Stalp, A. u. Heinz, A., 2021
- [172] Leach, F., Stone, R. u. Richardson, D.: The Effect of Fuel Volatility and Aromatic Content on Particulate Emissions. *Cambridge Particle Meeting*. Cambridge 2012
- [173] Kraftstoffe - Unverbleite Ottokraftstoffe - Anforderungen und Prüfverfahren, DIN EN 228:2012+A1:2017, ICS 75.160.20, Deutsches Institut für Normung, 2017
- [174] Leach, F., Stone, R., Fennell, D., Hayden, D., Richardson, D. u. Wicks, N.: Predicting Particulate Matter Emissions from Gasoline Direct Injection Spark Ignition Engines – the PN index. *Cambridge Particle Meeting*. Cambridge 2014
- [175] Leach, F., Stone, R., Fennell, D., Hayden, D., Richardson, D. u. Wicks, N.: Predicting the particulate matter emissions from spray-guided gasoline direct-injection spark ignition engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 231 (2016) 6, S. 717–730
- [176] Steimle, F., Kulzer, A., Richter, H., Schwarzenthal, D. u. Romberg, C.: Systematic Analysis and Particle Emission Reduction of Homogeneous Direct Injection SI Engines. SAE Technical Paper (2013) 2013-01-0248

C Literaturverzeichnis

- [177] Tanaka, D., Uchida, R., Noda, T., Kolbeck, A., Henkel, S., Hardalupas, Y., Taylor, A. u. Aradi, A.: Effects of Fuel Properties Associated with In-Cylinder Behavior on Particulate Number from a Direct Injection Gasoline Engine. SAE Technical Paper (2017) 2017-01-1002
- [178] Härtl, M., Blochum, S., Pélerin, D., Maier, T., Berger, V., Wachtmeister, G., Seidenspinner, P., Wilhelm, T. u. Jacob, E.: DMC+ als partikelfreier und potenziell nachhaltiger Kraftstoff für DI Ottomotoren. In: Geringer, B. u. Lenz, H. P. (Hrsg.): 39. Internationales Wiener Motorensymposium 26.-27. April 2018. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, Nr. 802. VDI Verlag GmbH 2018, 202-229
- [179] Härtl, M., Stadler, A., Backes, F., Wachtmeister, G. u. Jacob, E.: Potenziell CO₂-neutrale Kraftstoffe für saubere Ottomotoren. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 78 (2017) 07-08, S. 80–88
- [180] Amara, A. B., Tahtouh, T., Ubrich, E., Starck, L., Moriya, H., Iida, Y. u. Koji, N.: Critical Analysis of PM Index and Other Fuel Indices: Impact of Gasoline Fuel Volatility and Chemical Composition. SAE Technical Paper (2018) 2018-01-1741
- [181] Öl- und Partikelemission. Untersuchung der Anteile der Partikelemission aus den Schmierölverbrauchsquellen bei Dieselmotoren, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 847, Rosefort, Y. u. Mauermann, P., 2007
- [182] Rezaei, S. Z., Alam, M. S., Liang, Z., Stark, C. P., Harrison, R. M. u. Xu, H.: Investigation of SVOC in diesel fuel, engine lubricating oil and diesel engine emissions. Cambridge Particle Meeting. Cambridge 2016
- [183] Maurer, M.: Beeinflussung der Partikelemission eines Dieselmotors durch das Schmieröl, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen Dissertation. Aachen 1985
- [184] Wulff, R.: Einfluss unverbrannter Kohlenwasserstoffe auf die Partikelbildung im Brennraum, Technische Universität Kaiserslautern Diplomarbeit. Kaiserslautern 2017
- [185] Lensch-Franzen, C., Gohl, M., Friedmann, M. u. Mink, T.: Emissionspotenziale von Betriebsstoffen und Antriebsfunktionen. Internationaler Motorenkongress. Baden-Baden 2018
- [186] Knissel, M.: Partikelbildung durch den Eintrag von Kohlenwasserstoffen in den Brennraum von Ottomotoren mit Direktspritzung, Hochschule Kaiserslautern Master Thesis. Kaiserslautern 2017
- [187] Hadler, J., Lensch-Franzen, C., Gohl, M. u. Mink, T.: Ganzheitliches Konzept zur Optimierung der Ölemission. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 75 (2014) 1, S. 44–49
- [188] Bergmann, M.: Entwicklung und Anwendung neuartiger Messverfahren zur Charakterisierung partikelförmiger Emissionen moderner Kraftfahrzeuge, Bergische Universität Wuppertal Dissertation. Wuppertal 2008
- [189] Cross, E. S., Sappok, A., Fortner, E. C., Hunter, J. F., Jayne, J. T., Brooks, W. A., Onasch, T. B., Wong, V. W., Trimborn, A., Worsnop, D. R. u. Kroll, J. H.: Real-Time Measurements of Engine-Out Trace Elements. Application of a Novel Soot Particle Aerosol Mass Spectrometer for Emissions Characterization. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 134 (2012) 7, S. 72801
- [190] Czerwinski, J., Comte, P., Güdel, M. u. Kurzwart, M.: Nanoparticle Emissions of GDI Car with increased Lube Oil Consumption, Potentials of GPF. ETH Conference on Combustion-Generated Nanoparticles. Zürich 2017
- [191] Jung, H. u. Kittelson, D. B.: Measurement of Electrical Charge on Diesel Particles. Aerosol Science and Technology 39 (2005) 12, S. 1129–1135
- [192] Jung, H., Kittelson, D. B. u. Zachariah, M. R.: The Influence of Engine Lubricating Oil on Diesel Nanoparticle Emissions and Kinetics of Oxidation. SAE Technical Paper (2003) 2003-01-3179
- [193] Spencer, M. T., Shields, L. G., Sodeman, D. A., Toner, S. M. u. Prather, K. A.: Comparison of oil and fuel particle chemical signatures with particle emissions from heavy and light duty vehicles. Atmospheric Environment 40 (2006) 27, S. 5224–5235

- [194] Fuel in Oil. Erforschung der Kraftstoff-Schmieröl-Interaktionen bei Dieselmotoren, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1084, Seel, K., Geppert, A., Meister, C., Ehrly, M., Behn, A., Feindt, M., Bregar, J., Lyubarsky, P. u. Oliva, A., 2015
- [195] Gohl, M.: Massenspektrometrisches Verfahren zur dynamischen Online-Messung der Ölemission von Verbrennungsmotoren. Zugl.: HamburgHarburg, Techn. Univ., Arbeitsbereich Messtechnik, Diss., 2003. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Bd. 1021. Düsseldorf: VDI-Verl. 2004
- [196] Lubrisense GmbH: Produktbeschreibung LUB360, 2018. https://lubrisense.com/wp-content/uploads/2019/05/Lubrisense_e-book.pdf, abgerufen am: 06.02.2022
- [197] Gey, M. (Hrsg.): Instrumentelle Analytik und Bioanalytik. Biosubstanzen, Trennmethode, Strukturanalytik, Applikationen. Massenspektrometrie. Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum 2015
- [198] Aprentas: Laborpraxis Band 4. Analytische Methoden. Massenspektroskopie. Springer 2017
- [199] Gruber, L. u. Gruner, A.: Grundlagen und Verfahren der Massenspektrometrie. In: Kramme, R. (Hrsg.): Medizintechnik. Verfahren - Systeme - Informationsverarbeitung. Springer Reference Technik. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2017, S. 715–724
- [200] Deutsche Gesellschaft für Massenspektrometrie: Massenskala, 2022. <https://dgms.eu/de/ueber-uns-dgms/das-ist-massenspektrometrie/massenskala/>, abgerufen am: 22.10.2022
- [201] Lensch-Franzen, C., Gohl, M., Friedmann, M. u. Müller, G.: Methoden zur Analyse der HC- und Partikelemission. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 79 (2018) 11, S. 40–45
- [202] Freier, R. u. Künzel, R.: Online-Messung des Ölverbrauchs. Ein effektives Werkzeug für die Motorenentwicklung. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) ATZ Extra (2016) 6
- [203] Knoll, G., Schlerge, F., Matz, G., Krause, S., Thiemann, W., Hollen, P. von u. Robota, A.: Ölemission eines Ottomotors. Verfahrensentwicklung zur Messung und Simulation. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 70 (2009) 02, S. 166–173
- [204] Frommer, A., Beckmann, A., Freier, R. u. Künzel, R.: Analyse des Ölverbrauchs bei transientem Motorbetrieb. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 74 (2013) 1, S. 46–53
- [205] Giechaskiel, B., Mamakos, A., Andersson, J., Dilara, P., Martini, G., Schindler, W. u. Bergmann, A.: Measurement of Automotive Nonvolatile Particle Number Emissions within the European Legislative Framework. A Review. Aerosol Science and Technology 46 (2012) 7, S. 719–749
- [206] PN-Messverfahren. Untersuchung und Bewertung verschiedener Methoden der Partikelanzahl Messung, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 1073, Maier, T., Kiwull, B. u. Wolf, J.-C., 2013
- [207] AVI Particle Counter. Product Guide, AT2858D, Rev. 5, AVL List GmbH, 2010
- [208] Pokorny, A.: AVL 489 - Partikel Zähler. AVL Skills Center. Graz
- [209] AVL Deutschland GmbH: Schulungsunterlagen AVL Partikelzähler 489. 2012
- [210] Rinke, R.: Parametrisierung des Auswaschens von Aerosolpartikeln durch Niederschlag, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe 2008
- [211] DMS500 User Manual. Fast Particulate Analyzer, Version 4.14, Cambustion Ltd., 2015
- [212] Cambustion Ltd.: Real-time Mode Finding & Lognormal Fitting with DMS Series Fast Particulate Spectrometers. Application Note DMS06 version 3, 2015. <https://www.cambustion.com/sites/default/files/applications/DMS/dms06v03.pdf>, abgerufen am: 28.12.2017
- [213] Mink, T.: Potenzialanalyse eines Zwei-Ring-Kolbens am Einzylinderprüfstand, Karlsruher Institut für Technologie Diplomarbeit. Karlsruhe 2012
- [214] Lensch-Franzen, C., Gohl, M., Mink, T. u. Schäfer, M.: Einflussanalyse von Brenn-, Betriebsstoffen und Verbrennungsparametern mit Fokus auf das Rohemissionsverhalten. Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 78 (2017) 07-08

C Literaturverzeichnis

- [215] Lensch-Franzen, C., Gohl, M., Kronstedt, M. u. Mink, T.: Modellbasierter Ansatz zur Effizienz- und Emissionsoptimierung unter Realfahrtbedingungen. *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)* 78 (2017) 12
- [216] Bartsch, H.-J.: *Kleine Formelsammlung Mathematik*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. 2003
- [217] National Center for Biotechnology Information. PubChem Database: P-Xylene, 2019. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/P-Xylene>, abgerufen am: 06.02.2022
- [218] National Center for Biotechnology Information. PubChem Database: Ethylbenzene, 2019. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethylbenzene>, abgerufen am: 06.02.2022
- [219] National Center for Biotechnology Information. PubChem Database: Propylbenzene, 2019. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Propylbenzene>, abgerufen am: 06.02.2022
- [220] van Basshuysen, R. u. Schäfer, F. (Hrsg.): *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017
- [221] Technisches Produktdatenblatt Aral ASF. Rev. 3.11, Aral Forschung, 2010
- [222] Spezifikationen Gasoline EN 228, RON 95, Winter, Haltermann Carless Deutschland GmbH, 2017
- [223] Sakai, S. u. Rothamer, D.: Effect of ethanol blending on particulate formation from premixed combustion in spark-ignition engines. *Fuel* 196 (2017), S. 154–168
- [224] National Center for Biotechnology Information. PubChem Database: Dimethyl carbonate, 2019. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Dimethyl-carbonate>, abgerufen am: 06.02.2022
- [225] Lubrisense GmbH: *Oil Emission Measurement Technology*, 2019. https://lubrisense.com/wp-content/uploads/2019/05/Lubrisense_e-book.pdf, abgerufen am: 06.02.2022
- [226] Drewnick, F., Hings, S. S., DeCarlo, P., Jayne, J. T., Gonin, M., Fuhrer, K., Weimer, S., Jimenez, J. L., Demerjian, K. L., Borrmann, S. u. Worsnop, D. R.: A New Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (TOF-AMS)—Instrument Description and First Field Deployment. *Aerosol Science and Technology* 39 (2005) 7, S. 637–658
- [227] Jayne, J. T., Leard, D. C., Zhang, X., Davidovits, P., Smith, K. A., Kolb, C. E. u. Worsnop, D. R.: Development of an Aerosol Mass Spectrometer for Size and Composition Analysis of Submicron Particles. *Aerosol Science and Technology* 33 (2000) 1-2, S. 49–70
- [228] Valle-Hernández, B. L., Amador-Muñoz, O., Jazcilevich-Diamant, A., Hernández-López, A. E., Villalobos-Pietrini, R. u. González-Oropeza, R.: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particulate Matter Emitted by the Combustion of Diesel and Biodiesel. *Combustion Science and Technology* 185 (2013) 3, S. 420–434
- [229] Souza, C. V. de u. Corrêa, S. M.: Polycyclic aromatic hydrocarbons in diesel emission, diesel fuel and lubricant oil. *Fuel* 185 (2016), S. 925–931
- [230] United States Environmental Protection Agency: Polycyclic organic matter - 16-PAH. https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/substreg/substance/details.do?displayPopup=&id=6012, abgerufen am: 06.02.2022
- [231] Lerda, D.: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Factsheet. 4th Edition Nr. 66955, 2011. https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Factsheet%20PAH_0.pdf, abgerufen am: 06.02.2022
- [232] Fanick, E. R. u. Kroll, S.: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Diesel Engine Exhaust Both with and without Aftertreatment. *SAE Technical Paper* (2018) 2018-01-1812
- [233] McEnally, C. S., Das, D. D. u. Pfefferle, L. D.: Yield Sooting Index Database Volume 2. Sooting Tendencies of a Wide Range of Fuel Compounds on a Unified Scale V1, 2017. <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/7HGFT8>, abgerufen am: 06.02.2022

D Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Tobias Mink
Geburtsort: Schwetzingen
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Beruflicher Werdegang

Seit 10/2022 Bereichsleiter System Functionality
bei Automobil-Prüftechnik Landau GmbH

09/2020 – 09/2022 Abteilungsleiter Powertrain Fluids
bei Automobil-Prüftechnik Landau GmbH

03/2020 – 08/2020 Abteilungsleiter Systementwicklung
bei Automobil-Prüftechnik Landau GmbH

09/2019 – 03/2020 Stellvertretender Abteilungsleiter Systementwicklung
bei Automobil-Prüftechnik Landau GmbH

02/2017 – 08/2019 Teamleiter Emission/Funktionsintegration
bei Automobil-Prüftechnik Landau GmbH

11/2012 – 01/2017 Projektingenieur Mechanikentwicklung
bei Automobil-Prüftechnik Landau GmbH

Studium und Schulbildung

10/2006 – 10/2012 Abschluss Diplom, Studiengang: Maschinenbau
am Karlsruher Institut für Technologie

09/1994 – 06/2004 Allgemeine Hochschulreife
am Hebel Gymnasium Schwetzingen

Diese Arbeit untersucht die Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Dabei werden die Entstehungsmechanismen der Partikelemission bezüglich mechanischer Einflüsse aus der Kolbengruppe und auch der Gemischbildungsparameter wie Kraftstoff und Einspritzung analysiert, um die Ursachen der Partikelemission zu identifizieren und daraus Optimierungsmaßnahmen an Motoren ableiten zu können. Der methodische Ansatz beinhaltet eine Versuchsführung mit stationären und dynamischen Messungen, insbesondere auch Ausschnitte aus Realfahrzyklen zur Abbildung zukünftiger Emissionsanforderungen an den Verbrennungsmotor. Für die zeitlich aufgelöste Messung zur Analyse der Dynamikvorgänge wird eine Kombination aus einem Kondensationspartikelzähler und einem Elektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung sowie einem Time-of-Flight-Massenspektrometer zur Messung der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe aus dem Öl eingesetzt. Die zusätzliche Information der Massenzusammensetzung im Rohabgas wird für verschiedene Kurbelgehäuse- und Saugrohrdrücke bei Schublast-Wechseln und Einspritzvariationen im stationären Motorbetrieb genutzt und detailliert analysiert. Hierfür wird eine Auswertemethodik entwickelt, um Einflüsse des Motoröls und der Gemischbildung auf die Partikelemission zu bewerten.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5796-6

ISSN 2941-4326