



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



Dekanat der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

---

## DISSERTATION

# **Einfluss der Motorölspezifikationen sowie unterschiedlicher Kraftstoffeigenschaften auf das Vorentflammungsverhalten von hochaufgeladenen direkteinspritzenden Ottomotoren**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Hofmann

E315

**Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Mattias Mayer

Matrikelnummer: 0727934

Bäckergasse 35, 2124 Niederkreuzstetten

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Geringer für das Ermöglichen und Fördern dieser Arbeit.

Vor allem aber gilt mein Dank besonders Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Hofmann für seine Betreuung meiner Arbeit sowie die Unterstützung und fachlichen Anregungen während dieser Zeit.

Ebenfalls danken möchte ich Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Winter vom Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technischen Biowissenschaften der Technischen Universität Wien für die Übernahme des Koreferates und das Interesse an dieser Arbeit.

Ganz besonderer Dank gilt Dr. John Williams und Dr. James Moss von BP p.l.c. für die konstante Unterstützung in allen Projektphasen sowie für sehr fruchtbare und teilweise erheiternde Diskussionen. Ebenso möchte ich mich bei Dr. Paul Kapus von der AVL List GmbH für seine Unterstützung und Kompetenz über die gesamte Projektlaufzeit bedanken. Des Weiteren gilt Dipl.-Ing. Martin Huber mein Dank für die Kommunikation und Koordination, wodurch dieses gemeinsame Projekt erst ermöglicht wurde.

Auch gilt mein Dank sämtlichen Mitarbeitern und Kollegen am Institut für die freundliche Zusammenarbeit. Vor allem meine beiden Bürokollegen Christian Martin und Felix Zahradnik möchte ich für die Unterstützung und die freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Darüber hinaus möchte ich in diesem Zusammenhang Herrn Ing. Christian Bauer erwähnen und mich für die reibungslose Zusammenarbeit im gesamten Laborbereich bedanken.

Ganz besonders danken möchte ich meiner Familie und Freunden für die Unterstützung in allen Lebenslagen.

Wien, November 2015

Mattias Mayer

November 2015

B15034

## Kurzfassung

Um die künftigen CO<sub>2</sub>-Zielvorgaben für Personenkraftwagen einzuhalten, wurden in den letzten Jahren im Bereich der Ottomotoren vermehrt hubraumreduzierte Motoren in Kombination mit Direkteinspritzung und Abgasturboaufladung forciert. Diese, so genannten, DOWNSIZINGMOTOREN mit erhöhter spezifischer Leistung und angepasster Getriebeübersetzung, zur Lastpunktverschiebung in wirkungsgradgünstigere Kennfeldbereiche, erlauben eine signifikante Verbrauchsreduktion im Vergleich zu einem entsprechenden hubraumstärkeren Saugmotor.

Die erhöhten spezifischen Leistungen dieser Downsizingmotoren verschärfen allerdings die Klopfproblematik und führen zu weiteren Verbrennungsanomalien im Bereich niedriger Drehzahlen und Vollastbedingungen, so genannte Vorentflammungen, welche bisher von Saugmotoren nicht bekannt waren. Hierbei erfolgt eine sporadische Selbstentzündung des Kraftstoffs vor Einleitung mit dem Zündfunken. Die frühe Verbrennungslage einer Vorentflammung, verbunden mit deutlich erhöhtem Spitzendruck sowie starkem Klopfen, birgt sehr hohes Schadenspotential, welches bis zum Motorschaden führen kann. Damit stellt das Auftreten von Vorentflammungen, einhergehend mit dem Verlust der Kontrolle über den Verbrennungsprozess, aktuell den limitierenden Faktor für weitere Effizienzsteigerungsmaßnahmen beim Ottomotor dar.

Nach derzeitigem Forschungsstand gilt Motoröl, welches aus dem Ringspaltbereich in den Brennraum gelangt, als wesentliche Ursache für das Auslösen von Vorentflammungen. Verstärkt wird der Effekt durch zunehmende Schmierölverdünnung, hervorgerufen durch Wandbenetzung des direkt in den Brennraum eingespritzten Kraftstoffes. Das Ablösen von Öltropfen aus dem Kolbenringspalt erfolgt im Bereich des oberen Totpunkts, wodurch diese verdampfen und in weiterer Folge ein zündfähiges Gemisch bilden. Ist dieses in der Lage das umgebende Kraftstoff-Luft-Gemisch vor Einleitung des Zündfunkens zu zünden, spricht man von einer Vorentflammung. Neben den Motoröleigenschaften gelten auch Kraftstoffeigenschaften mit Einfluss auf Wandbenetzung und Schmierölverdünnung als wesentlicher Einflussfaktor auf den Ablösemechanismus ölunduzierter Vorentflammungen bei heutigen Downsizingmotoren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Hypothese anhand umfangreicher Parametervariationen verifiziert. Des Weiteren lag der Fokus auf dem Einfluss verschiedener Motorölspezifikationen auf das Vorentflammungsverhalten am Motorprüfstand. Zusätzlich wurden in einem weiteren Schritt der Einfluss verschiedener Versuchskraftstoffe sowie die Auswirkungen von Brennraumablagerungen auf das Auftreten von Vorentflammungen aufgezeigt.

## Abstract

The next targets of future CO<sub>2</sub> emissions represent a major challenge for gasoline engines. The current trend towards even smaller engine displacements and simultaneously increasing specific performance, so called downsizing engines, will increase continuously. Downsized gasoline engines are an important concept for the reduction of fuel consumption and emissions. In this case, the engine displacement is reduced to shift the operating points to more fuel-efficient regions. In order to ensure no loss of power, as a result of this displacement reduction turbochargers are used.

Due to the resulting higher specific performance of the engines, it can, however - especially at full load and low speeds - come to the occurrence of new combustion anomalies referred to as Low Speed Pre-Ignitions (LSPI). The premature ignition of the air-fuel mixture prior the spark ignition leads to a significant increase in pressure and temperature of the end gas, thus increasing the risk of end gas knocking. This phenomena, which often leads to potentially damaging peak cylinder pressures, is the most important factor limiting further downsizing and the potential CO<sub>2</sub> benefits that it could bring.

Previous studies have identified several potential triggers for pre-ignition where engine oil seems to have an important influence. Furthermore, wall wetting and subsequently oil dilution by impinging fuel on the cylinder wall seem to have a significant impact in terms of accumulation and detachment of oil droplets in the combustion chamber. The detachment of oil droplets from the piston crevice volume occurs near top dead center, these evaporate to subsequently form an ignitable mixture. If the surrounding fuel-air mixture ignites before initiating the spark, it is called a pre-ignition. In addition to engine oil properties the fuel characteristics according to wall wetting and oil dilution have a major consequence on the mechanism of oil-induced pre-ignitions.

For this reason the interaction of fuel and engine oil at the combustion chamber walls was investigated in a comprehensive parameter variation. Furthermore, the focus of this thesis was on the influence of different engine oil specifications on their pre-ignition tendency at the test bench. In addition, the effects of various test fuels as well as these of combustion chamber deposits on the occurrence of pre-ignitions were examined in a further step.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Herausforderung . . . . .	2
1.2	Motivation und Zielsetzung . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Ottomotorische Verbrennung</b>	<b>5</b>
2.1	Downsizing . . . . .	6
2.2	Direkteinspritzung . . . . .	7
2.2.1	Partikelproblematik . . . . .	8
2.2.2	Problematik der Wandbenetzung . . . . .	10
2.3	Abgasturboaufladung . . . . .	12
2.4	Verbrennungsanomalien . . . . .	13
2.4.1	Klopfende Verbrennung . . . . .	13
2.4.2	Glühzündung . . . . .	15
2.4.3	Vorentflammung . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Ölinduzierte Vorentflammungen</b>	<b>23</b>
3.1	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen . . . . .	23
3.2	Tropfenzündung . . . . .	26
3.3	Stand der Technik in Bezug auf ölinduzierte Vorentflammungen . . . . .	30
3.4	Transport von Öltropfen in den Brennraum . . . . .	33
3.5	Hypothesen zur Auslösung von ölinduzierten Vorentflammungen . . . . .	35
3.6	Zusammenfassung . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Wesentliche Anforderungen und Eigenschaften heutiger Motoröle</b>	<b>39</b>
4.1	Basisöleigenschaften . . . . .	42
4.2	Eigenschaften wesentlicher Additive . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Prüfstand und Messtechnik</b>	<b>48</b>
5.1	Versuchsträger . . . . .	48
5.2	Betriebsstoffe . . . . .	49
5.3	Prüfstands Aufbau . . . . .	49
5.4	Zylinderselektive Spitzendruckabschaltung . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Basisuntersuchungen zur Entwicklung einer Testmethodik</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Ergebnisse in Bezug auf ölinduzierte Vorentflammungen</b>	<b>59</b>

7.1	Parametervariation zur Verifizierung der Einflussgrößen auf den Ablösemechanismus . . . . .	59
7.1.1	Variation der Öltemperatur . . . . .	61
7.1.2	Variation der Kühlwassertemperatur . . . . .	64
7.1.3	Variation des Einspritzbeginns SOI . . . . .	65
7.1.4	Einfluss der Einspritzstrategie . . . . .	66
7.1.5	Zusammenfassung - Parametervariation . . . . .	68
7.2	Einfluss von Ölalterung und Additivdegradation . . . . .	71
7.3	Einfluss der Motorölspezifikationen . . . . .	75
7.3.1	Einfluss der Basisölspezifikationen . . . . .	75
7.3.2	Zusammenfassung - Basisölspezifikationen . . . . .	82
7.3.3	Einfluss ausgewählter Detergentien und Antioxidantien . . . . .	83
7.3.3.1	Einfluss der Additivierungsrate . . . . .	83
7.3.3.2	Einfluss verschiedener Detergentien . . . . .	84
7.3.3.3	Einfluss verschiedener Additive auf das Selbstzündungsverhalten . . . . .	95
7.3.3.4	Einfluss verschiedener Antioxidantien . . . . .	101
7.3.4	Zusammenfassung - Detergentien und Antioxidantien . . . . .	103
7.4	Einfluss von Ethanolkraftstoffen . . . . .	105
7.4.1	Kraftstoffbewertung an einem modifizierten CFR-Motor . . . . .	112
7.4.2	Mögliche Wechselwirkung mit Motorölspezifikationen . . . . .	114
7.4.3	Zusammenfassung - Ethanoluntersuchungen . . . . .	115
7.5	Einfluss der Kraftstoffvolatilität . . . . .	116
7.5.1	Bewertung des Öl- und Kraftstoffeinflusses . . . . .	121
7.5.2	Zusammenfassung - Kraftstoffvolatilität . . . . .	123
7.6	Zusammenfassung - ölinduzierte Vorentflammungen . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Einfluss von Brennraumablagerungen auf die Vorentflammungsneigung</b>	<b>126</b>
8.1	Zusammenfassung - Brennraumablagerungen . . . . .	131
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>136</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>150</b>

# Abkürzungen und Symbole

## Abkürzungen

<b>a</b>	Kolbenbeschleunigung
<b>ACEA</b>	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
<b>AGR</b>	Abgasrückführung
<b>API</b>	American Petroleum Institute
<b>AS</b>	Auslassventil Schließen
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>AW</b>	Anti-Wear Additiv
<b>BSFC</b>	Best Specific Fuel Consumption
<b>C</b>	Kohlenstoff
<b>Ca</b>	Calcium
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Calciumcarbonat
<b>CaO</b>	Calciumoxid
<b>CEN</b>	Comite Europeen de Normalisation
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>CFR</b>	Cooperative Fuel Research
<b>CLD</b>	Chemoluminiszenzdetektor
<b>CO</b>	Kohlenstoffmonoxid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CPI</b>	Compression Pre-ignition
<b>CVS</b>	Constant Volume Sampling
<b>Det</b>	Detergent
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e. V.
<b>E<sub>X</sub></b>	Ethanolbeimischrate
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>EOI</b>	End of Injection
<b>ES</b>	Einlassventil Schließen
<b>ET</b>	Evaporation Tube
<b>FBP</b>	Final boiling point
<b>FID</b>	Flammenionisationsdetektor
<b>FVV</b>	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.
<b>H</b>	Wasserstoff
<b>HC</b>	unverbrannte Kohlenwasserstoffe
<b>HCCI</b>	Homogeneous charge compression ignition

<b>HEPA</b>	High Efficiency Particulate Airfilter
<b>HO<sub>2</sub><sup>°</sup></b>	Hydroperoxyradikal
<b>HOOR<sup>°</sup>O<sup>°</sup></b>	Ketohydroperoxid
<b>HSPI</b>	High Speed Pre-ignition
<b>HTHS</b>	High Temperature High Shear-Viskosität
<b>ILSAC</b>	International Lubricants Standardization and Approval Committee
<b>IP 12</b>	Testmethode zur Bestimmung des Heizwertes
<b>KOH</b>	Kaliumhydroxid
<b>KV100</b>	kinematische Viskosität bei 100°C
<b>KW</b>	Kurbelwinkel
<b>LET</b>	Low-End Torque
<b>LIF</b>	Laserinduzierte Fluoreszenz
<b>LLK</b>	Ladeluftkühler
<b>LSPI</b>	Low Speed Pre-ignition
<b>Mg</b>	Magnesium
<b>MgCO<sub>3</sub></b>	Magnesiumcarbonat
<b>MgO</b>	Magnesiumoxid
<b>Mo</b>	Molybdän
<b>MoDTC</b>	Molybdändialkyldithiocarbamat
<b>MOZ</b>	Motor-Oktananzahl
<b>NEFZ</b>	Neuer europäischer Fahrzyklus
<b>Noack</b>	Testmethode zur Bestimmung des Verdampfungsverlustes eines Öls
<b>NO<sub>x</sub></b>	Stickoxide
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficient
<b>O</b>	Sauerstoff
<b>OH<sup>°</sup></b>	Hydroxyradikal
<b>OT</b>	oberer Totpunkt
<b>P</b>	Phosphor
<b>PAK</b>	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
<b>PAO</b>	Polyalphaolefin
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>PMP</b>	Particle Measurement Programme
<b>PN</b>	Partikelanzahl (engl.: particle number)
<b>PNC</b>	Kondensationskernzähler
<b>PND</b>	Porous Tube Diluter
<b>R<sup>2</sup></b>	Bestimmtheitsmaß
<b>R<sup>°</sup></b>	Alkyradikal
<b>RO<sub>2</sub></b>	Peroxyradikal

<b>R'OOH°</b>	Hydroperoxid
<b>R</b>	restliche Alkylgruppe
<b>RCM</b>	Rapid Compression Maschine
<b>RDE</b>	Real Driving Emissions
<b>REF</b>	Referenz
<b>ROZ</b>	Research-Oktanzahl
<b>S</b>	Schwefel
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers
<b>SAPS</b>	Sulphated Ash, Phosphorus, Sulphur
<b>SOI</b>	Start of Injection
<b>T80</b>	Temperatur bei der bereits 80% des Kraftstoffs verdampft ist
<b>TBN</b>	Total Base Number
<b>UN-ECE</b>	United Nations Economic Commission for Europe
<b>v</b>	Kolbengeschwindigkeit
<b>V150</b>	verdampftes Volumen bei 150°C
<b>Valvetronic</b>	vollvariable Ventilsteuerung
<b>VANOS</b>	variable Nockenwellensteuerung
<b>VE</b>	Vorentflammung
<b>VI</b>	Viskositätsindex
<b>WLTC</b>	Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle
<b>ZCK</b>	Zeit für chemische Kettenreaktionen
<b>ZDDP</b>	Zinkdialkyldithiophosphat
<b>Zn</b>	Zink
<b>ZW</b>	Zündwinkel
<b>ZOT</b>	Zünd-OT

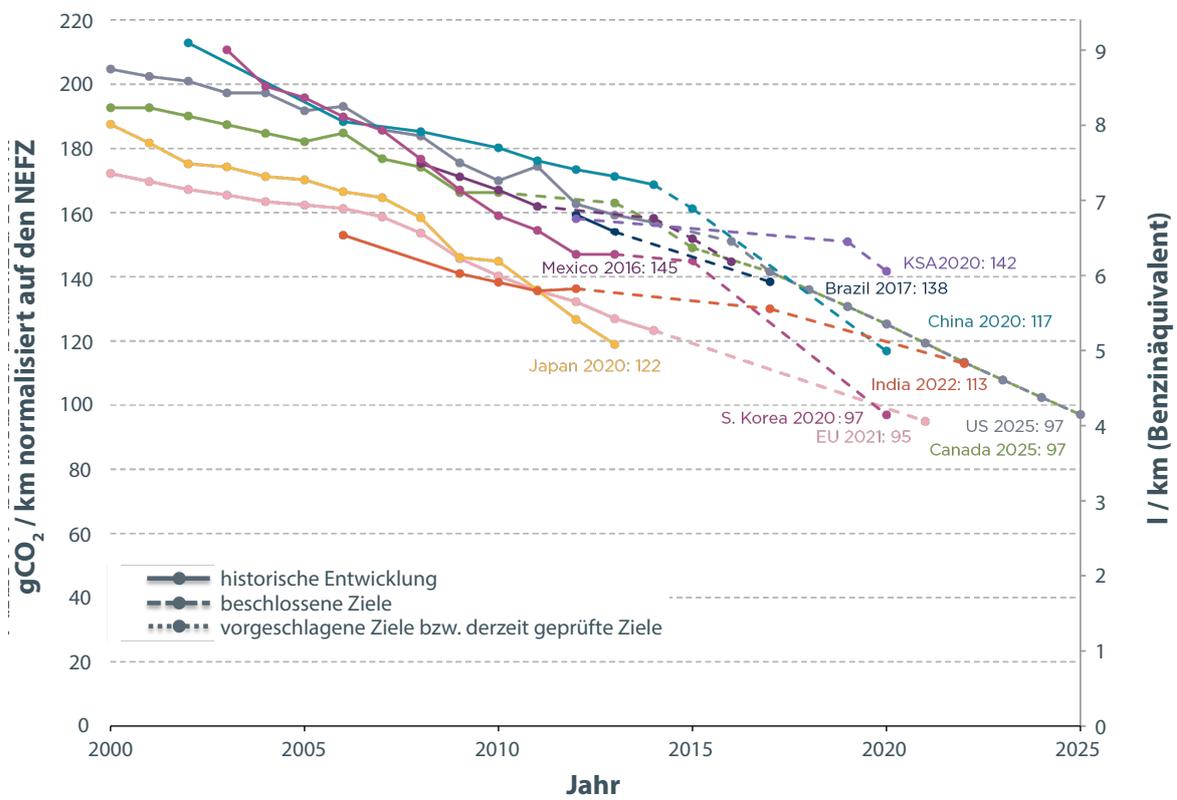
## Symbole

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{LSPi}$	Kurbelwinkel bei Vorentflammungsinitiierung
$\alpha_{ZW}$	aktueller Zündwinkel
$\epsilon$	Emissionsgrad
$\eta_i$	indizierter Wirkungsgrad
$\eta_m$	mechanischer Wirkungsgrad
$\lambda$	Verbrennungsluftverhältnis
$\lambda_g$	Wärmeleitfähigkeit der Gasphase
$\mu$	Reibungszahl

$\rho_L$	Dichte der Luft
$\rho_t$	Dichte des Tropfens
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma_{LSPI}$	Standardabweichung
$\Delta A$	aktuelle Kontaktfläche
$A, B, n$	chemische Spezies
$c_{p,g}$	spezifische Wärmekapazität der Gasphase
$c$	Stoffmengenkonzentration
$d$	Tropfendurchmesser
$dA$	Flächendifferential
$\Delta h$	Verdampfungsenthalpie
$H_U$	unterer Heizwert
$i$	Bauartfaktor für Zweitaktmotor bzw. Viertaktmotor
$^\circ KW_n ZOT$	Grad Kurbelwinkel nach Zünd-OT
$L_{min}$	Mindestluftbedarf
$L_{ST}$	stöchiometrischer Luftbedarf
$\dot{m}$	Massenstrom
$\dot{m}_{\dot{O}l}$	verdampfter Ölmassentrom
$\tilde{M}$	mittlere molare Masse
$\dot{n}$	Molmassenstrom
$n$	Drehzahl
$p$	Druck
$P_e$	effektive Leistung
$p_{me}$	effektiver Mitteldruck
$p_{mi}$	indizierter Mitteldruck
$\Delta T$	aktuelle Temperaturdifferenz
$T_B - T_{\dot{O}l}$	Temperaturdifferenz zwischen Brennraum und Motoröl
$T$	Temperatur
$T_{KW}$	Kühlwassertemperatur
$T_{nLLK}$	Temperatur nach Ladeluftkühler
$T_{\dot{O}l}$	Öltemperatur
$T_t$	Tropfentemperatur
$T_\infty$	Temperatur der Gasphase
$u$	Wanderungsgeschwindigkeit
$v$	Gleitgeschwindigkeit
$V_H$	Hubvolumen

# 1 Einleitung

Seit seinen Anfängen, Ende des 19. Jahrhunderts, hat der Ottomotor bis heute seine Dominanz mit über 80% weltweitem Marktanteil im Bereich PKW-Antrieben nicht verloren. Um weiterhin diese Stellung zu behalten, sind allerdings zahlreiche technische Maßnahmen in den letzten Jahren notwendig geworden, vor allem in Hinblick auf die steigenden CO<sub>2</sub>-Anforderungen. [1] Abbildung 1.1 gibt eine Übersicht über die weltweite Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Flottendurchschnitte unter Berücksichtigung weiterer geplanter Ziele für Personenkraftwagen bis 3.5t zulässigem Gesamtgewicht.

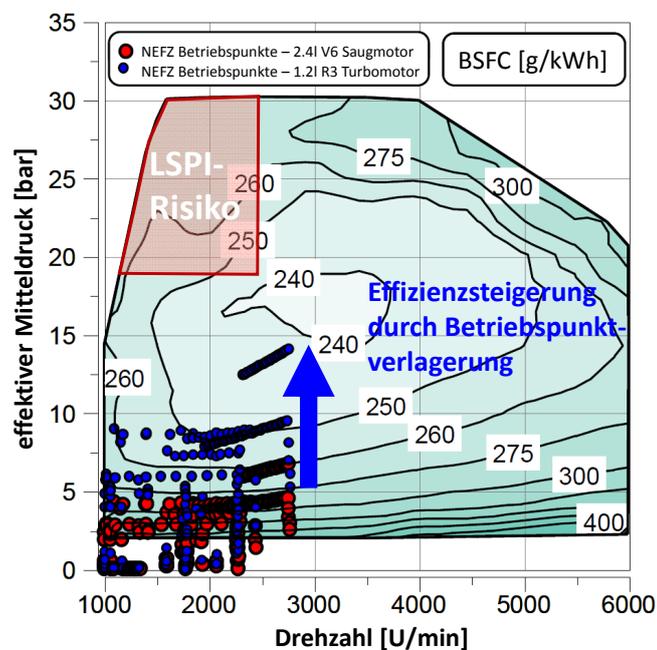


**Abbildung 1.1:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Flottendurchschnitte sowie des Kraftstoffverbrauchs für Pkw bis 3.5t zulässigem Gesamtgewicht [2] (eigene Darstellung)

Besonders die Zielvorgabe im EU-Raum von 95g CO<sub>2</sub>/km ab 2020 stellt eine große Herausforderung für Ottomotoren dar. Um diesen steigenden Anforderungen gerecht zu werden, wird der aktuelle Trend zu Motoren mit immer geringeren Hubvolumina und gleichzeitig steigenden spezifischen Leistungen, so genannte DOWNSIZINGMOTOREN, weiter zunehmen [3]. Die dabei umgesetzte Kombination der Technologien Benzindirekteinspritzung, Abgasturboaufladung und variable Ventiltriebe, bei gleichzeitiger Hubraumreduktion, erlauben Verbrauchsverbesserungen von bis zu 20% [1].

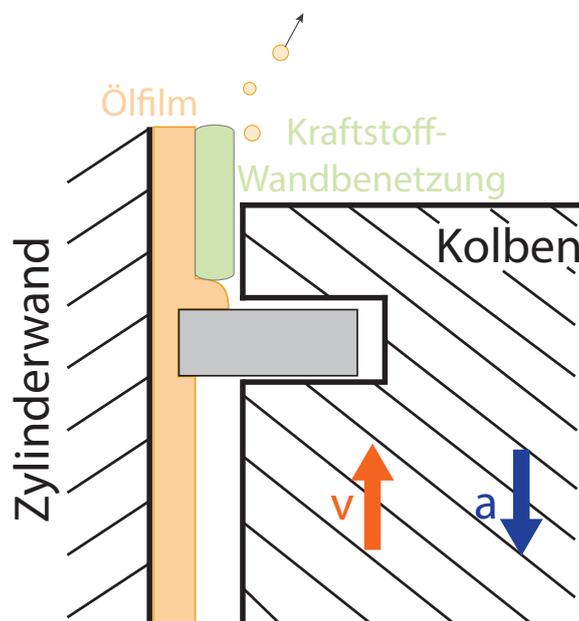
## 1.1 Problemstellung und Herausforderung

Dieser spezielle Technologieeinsatz bei Downsizingmotoren führt allerdings zu neuen Herausforderungen. Die Benzindirekteinspritzung bewirkt beispielsweise aufgrund der inneren Gemischbildung und damit der Gefahr von Inhomogenitäten und Wandfilmbildung im Brennraum einen erhöhten Ausstoß von Partikelemissionen. Mit der Einführung der Euro6-Abgasnorm stellen diese Partikelemissionen auch für Ottomotoren eine gesetzlich limitierte Schadstoffemission dar. Des Weiteren erfolgt unter bestimmten Randbedingungen eine signifikante Wandbenetzung durch Kraftstoff, welcher in weiterer Folge eine verstärkte Schmierölverdünnung bewirkt. Die aufgrund der Hubraumreduktion erforderliche Abgasturboaufladung zum Leistungserhalt heutiger Downsizingmotoren führt hingegen zu einer Verschärfung der Klopfproblematik. Aufgrund der gesteigerten spezifischen Leistungen können neben der typischen klopfenden Verbrennung weitere Verbrennungsanomalien auftreten, welche von freisaugenden Ottomotoren bisher nicht bekannt waren. Vor allem das Auftreten von Vorentflammungen (engl.: Low Speed Pre-Ignition LSPI) - der sporadischen Selbstentzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches vor Einleitung des Zündfunken - bei niedrigen Drehzahlen unter Volllastbedingungen stellt eine große Herausforderung und aktuell die limitierende Größe weiterer Effizienzsteigerungen am Ottomotor dar. Abbildung 1.2 verdeutlicht die Vorentflammungsproblematik bei heutigen Downsizingmotoren.



**Abbildung 1.2:** Betriebspunktverlagerung durch Downsizing und Downspeeding im Kennfeld eines hochaufgeladenen Turbomotors [4], [5] (eigene Darstellung)

Durch Hubraumreduktion (engl.: *Downsizing*) und angepasste Getriebeübersetzung (engl.: *Downspeeding*) erfolgt eine Verlagerung der Betriebspunkte zu niedrigeren spezifischen Verbräuchen. Im Bereich niedriger Drehzahlen und höheren Lasten decken sich die Bereiche niedrigster Verbräuche mit jenen hoher Vorentflammungswahrscheinlichkeit. Entsprechend der frühen Verbrennungslage, verbunden mit sehr hohen Zylinderdrücken, kann bereits das Auftreten einzelner Vorentflammungen zu Beschädigungen bis hin zum Motorschaden führen. Nach derzeitigem Forschungsstand gilt Motoröl, welches aus dem Ringspaltbereich in den Brennraum gelangt [6], als eine der wahrscheinlichsten Ursachen für das Auslösen von Vorentflammungen. Abbildung 1.3 zeigt schematisch die Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen unmittelbar vor dem oberen Totpunkt.



**Abbildung 1.3:** Hypothese zur Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen aus dem Kolbenringspalt unmittelbar vor dem oberen Totpunkt [6] (eigene Darstellung)

Die aktuelle Hypothese sieht, zusätzlich verstärkt durch zunehmende Schmierölverdünnung hervorgerufen durch Wandbenetzung, das Ablösen von Öl- und Kraftstofftropfen aus dem Kolbenringspalt im Bereich des oberen Totpunkts, welche in weiterer Folge verdampfen und ein zündfähiges Gemisch bilden. Ist dieses in der Lage das umgebende Kraftstoff-Luft-Gemisch vor Einleitung des Zündfunken zu zünden, spricht man von einer Vorentflammung. Neben den Motoröleigenschaften gelten auch Kraftstoffeigenschaften mit Einfluss auf Wandbenetzung und Schmierölverdünnung als wesentlicher Einflussfaktor auf den Ablösemechanismus ölinduzierter Vorentflammungen bei heutigen Downsizingmotoren.

Neben dem vorgestellten Mechanismus zur Auslösung von Vorentflammungen durch abgelöste Öl- und Kraftstofftropfen sind noch weitere Vorentflammungsursachen, wie beispielsweise Ablagerungen oder heißes Restgas, bekannt, welche in den folgenden Kapiteln näher dargestellt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt aber vorrangig auf dem Mechanismus zur Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen.

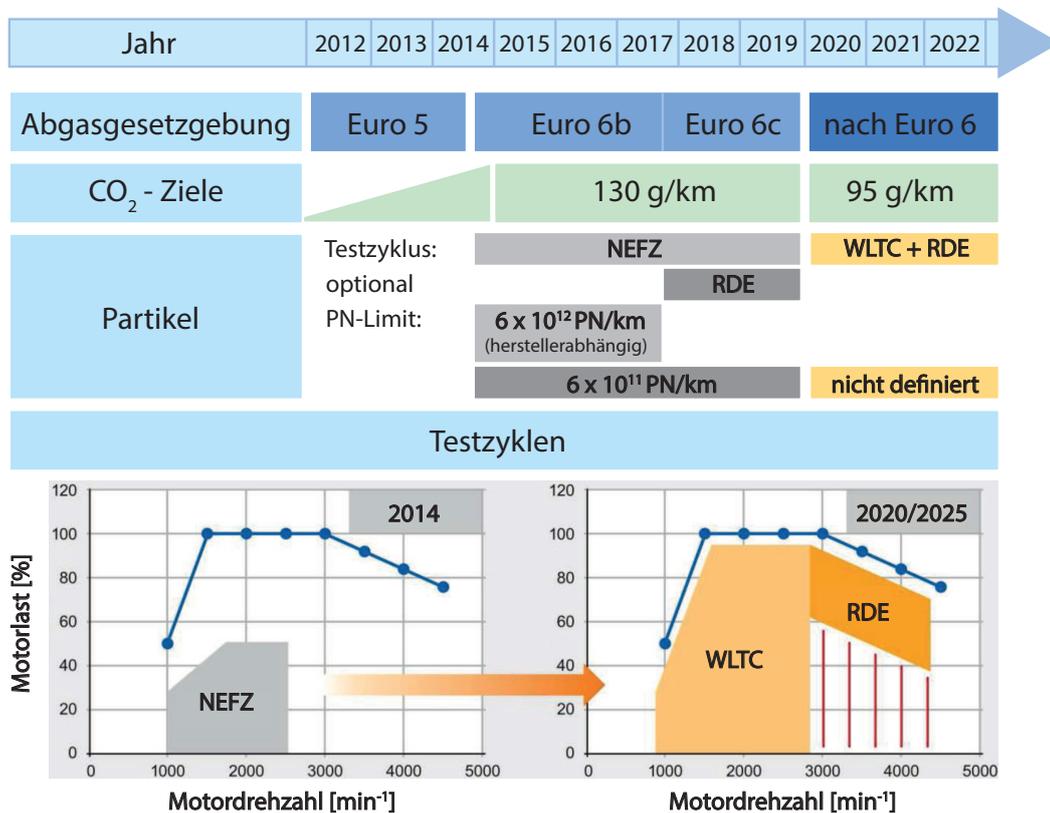
## 1.2 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation dieser Arbeit ist, ein besseres Verständnis über den Einsatz und die Auswirkungen von speziell abgestimmten Motorölen und Kraftstoffen auf Vorentflammungen an einem aufgeladenen direkteinspritzenden Ottomotor zu erlangen. Dabei liegt vor allem die Kraftstoff-Öl-Interaktion an der Zylinderwand im Fokus der Betrachtungen. Die Hauptziele dieser Arbeit sind:

- Erlangung eines besseren Verständnisses über den Auslösemechanismus von Vorentflammungen.
- Verifizierung des Einflusses einzelner Effekte und Sensitivitäten unterschiedlicher Betriebsparameter hinsichtlich ölunduzierter Vorentflammungen.
- Kenntnis über den Einfluss der Basisöleigenschaften Viskosität, Flammpunkt und Volatilität auf das Vorentflammungsverhalten.
- Verifizierung des Einflusses ausgewählter Motoröladditive auf deren Vorentflammungsverhalten mit speziellem Fokus auf metall-basierende Detergentien, welche unter besonderem Verdacht stehen, einen signifikanten Einfluss auf das Vorentflammungsverhalten zu haben. Aufzeigen des Einflusses bekannter Antioxidantien im Hinblick auf Vorentflammungen.
- Bestimmung der Auswirkungen von verschiedenen Ethanolkraftstoffen sowie Kraftstoffen unterschiedlicher Volatilität auf den Ablösemechanismus von ölunduzierten Vorentflammungen.

## 2 Ottomotorische Verbrennung

Zukünftige CO<sub>2</sub>-Flottenziele bis 2020 und 2025 machen weitere technische Fortschritte am Ottomotor notwendig. Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über die aktuellen und zukünftigen Abgasgesetzgebungen.



**Abbildung 2.1:** Übersicht über die aktuellen und zukünftigen Abgasgesetzgebungen [7], [8], [9] (eigene Darstellung)

Für den Ottomotor sind dabei insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Partikelemissionen, hinsichtlich der mit 1.9.2014 [7] eingetretenen Euro6-Abgasnorm mit Partikelgrenzwerten von  $6 \cdot 10^{11}$  PN/km für direkteinspritzende Ottomotoren von entscheidender Bedeutung. Zudem werden in Zukunft wesentlich höhere Dynamikanforderungen im Zuge des neuen Testzyklus WORLDWIDE HARMONIZED LIGHT DUTY TEST CYCLE (WLTC) gestellt. Dieser Testzyklus wird weiters noch um Realfahrtmessungen, mit Bestimmung der sogenannten REAL DRIVING EMISSIONS (RDE), ergänzt, welche ebenfalls Grenzwerte unterschreiten müssen [9].

Ein wichtiges Konzept zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen von Ottomotoren stellt dabei das sogenannte DOWNSIZING [10] dar. Dieses trägt wesentlich dazu bei, die künftigen CO<sub>2</sub>-Flottenziele zu erreichen.

## 2.1 Downsizing

Beim sogenannten Downsizing ist in erster Linie eine Reduzierung des Hubraums zu verstehen verbunden mit der einhergehenden Reduzierung von Reibungs- und Ladungswechselverlusten [3]. Eine alleinige Reduzierung des Hubraums, ohne weitere Gegenmaßnahmen, würde allerdings zu deutlichen Leistungs- und Drehmomenteinbußen führen. Anhand Gleichung 2.1 werden die Maßnahmen der Drehzahlerhöhung  $n$  und der Mitteldruckanhebung  $p_{me}$  zur Kompensation des Leistungsverlusts aufgrund der Hubraumreduzierung verdeutlicht [11]:

$$P_e = i \cdot n \cdot p_{me} \cdot V_H \quad (2.1)$$

$P_e$	....	effektive Leistung [kW]
$i$	....	Bauartfaktor für Zweitaktmotor (1) bzw. Viertaktmotor (0.5) [-]
$n$	....	Motordrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]
$p_{me}$	....	effektiver Mitteldruck [bar]
$V_H$	....	Hubvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

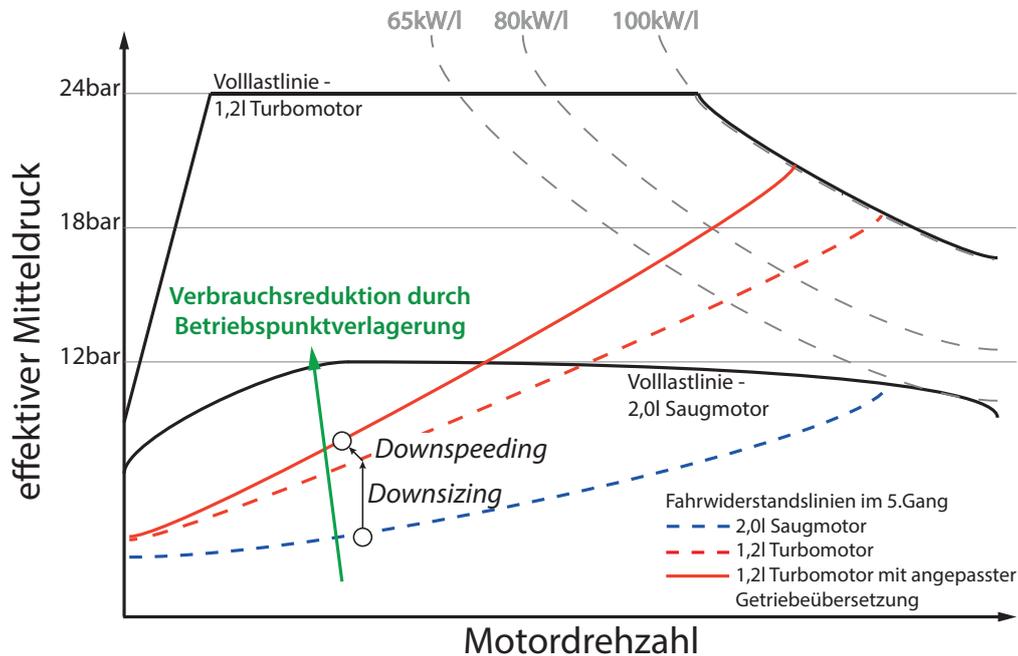
Je nach dem welche Möglichkeit gewählt wird unterscheidet man zwischen Hochlast- und Hochdrehzahlkonzepten. Bis auf wenige Ausnahmen im Sportwagenbereich sind in den letzten Jahren überwiegend Vertreter des Hochlastkonzepts umgesetzt worden, weshalb im weiteren Verlauf unter dem Begriff Downsizing lediglich Hochlastkonzepte zu verstehen sind.

Heutzutage ausgeführte Hochlastkonzepte nutzen dabei fast ausschließlich eine Kombination der folgenden Technologien [10]:

- Benzin-Direkteinspritzung
- Abgasturboaufladung
- angepasste Getriebeübersetzung (DOWNSPEEDING)

Beim Downsizing, als weitere Konsequenz des Hochlastkonzepts, wird zur Drehzahlabsenkung und der damit verbundenen Reduzierung der Reibungs- und Ladungswechselverluste eine längere Getriebeübersetzung gewählt. In Verbindung mit dem Hochlastkonzept erfolgt dadurch eine Betriebspunktverlagerung zu verbrauchsgünstigeren Kennfeldbereichen. Allerdings bedingt das Downsizing eine verringerte Drehmomentreserve verbunden mit Einbußen im Transientverhalten. [12]

Abbildung 2.2 zeigt schematisch die Verschiebung der Betriebspunkte in verbrauchs­günstigere Motorkennfeldbereiche verbunden mit einer Drehzahlabsenkung durch eine angepasste Getriebeübersetzung.



**Abbildung 2.2:** Wirkungsweise des Downsizings eingezeichnet in einem Motorkennfeld [3], [13] (eigene Darstellung)

Vor allem die beiden Schlüsseltechnologien Direkteinspritzung und Abgasturboaufladung sind maßgeblich entscheidend und werden nachfolgend näher dargestellt.

## 2.2 Direkteinspritzung

Die Direkteinspritzung des Kraftstoffs in den Brennraum ermöglicht eine signifikante Wirkungsgradsteigerung, aufgrund der Nutzung der Verdampfungsenthalpie, im Vergleich zur Saugrohreinspritzung. Die Verdampfung des Kraftstoffs im Brennraum bewirkt eine Ladungskühlung verbunden mit einem erhöhten Liefergrad. Des Weiteren ermöglichen die kühleren Brennraumtemperaturen Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung in Form von [1]:

- Erhöhung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses
- Anhebung des Aufladegrades

Bei der Benzin-Direkteinspritzung unterscheidet man grundsätzlich zwischen den beiden Betriebsarten Homogenbetrieb und Ladungsschichtung.

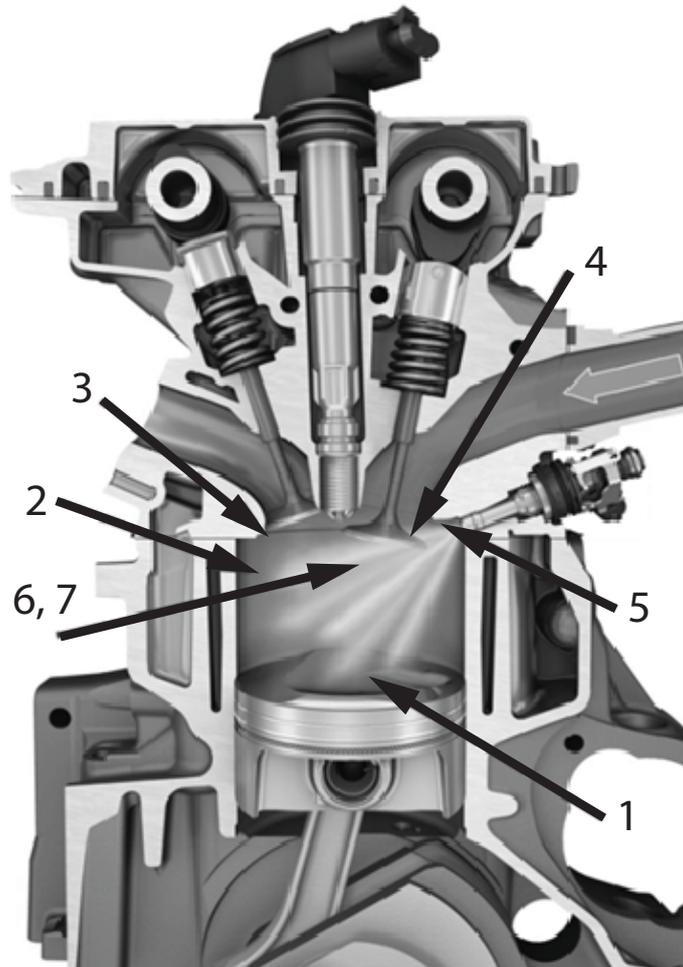
Im Gegensatz zum Homogenbetrieb, bei dem der Kraftstoff während des Saughubes eingespritzt wird und dabei global stöchiometrische Bedingungen vorliegen, wird beim Schichtbetrieb der Kraftstoff erst unmittelbar vor der Zündung, gegen Ende des Kompressionshubes, eingespritzt. Bei der Ladungsschichtung wird nahezu ungedrosselt Frischluft angesaugt und lediglich im Bereich der Zündkerze ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch bereitgestellt. Die globalen Luftverhältnisse im Brennraum sind allerdings deutlich überstöchiometrisch, wodurch zur Abgasnachbehandlung weitere Maßnahmen neben dem konventionellen Drei-Wege-Katalysator notwendig sind. [14]

Das volle Potential der Direkteinspritzung lässt sich nur im ungedrosselten Teillastbetrieb verbunden mit Ladungsschichtung realisieren. Hierbei ist vorrangig in der Teillast eine deutliche Reduktion des Kraftstoffverbrauchs zu verzeichnen [14].

### 2.2.1 Partikelproblematik

Neben dem bereits angesprochenen Kraftstoffeinsparungspotential durch Zylinderinnenkühlung geht mit der Direkteinspritzung allerdings eine verschlechterte Gemischaufbereitung einher. Diese unvollständige Gemischaufbereitung führt im Brennraum zu unterstöchiometrischen Bereichen, welche während der Verbrennung zu einer erhöhten Partikelbildung neigen. [15] Diese Partikel können sich im Brennraum agglomerieren und sogenannte Brennraumablagerungen ausbilden. Im Hinblick der Untersuchungen von ölunduzierten Vorentflammungen stellen diese Brennraumablagerungen eine weitere mögliche Vorentflammungsursache dar. Diese können nach Ablösung von den Brennraumwänden einen lokalen Hot spot im Brennraum darstellen. Aus diesem Grund ist die Kenntnis über die einzelnen Partikelentstehungsbereiche im Brennraum essentiell. Abbildung 2.3 zeigt schematisch die nachfolgend angeführten möglichen Partikelentstehungsbereiche im Brennraum eines direkteinspritzenden Ottomotors [16]:

1. Kraftstoffbenetzung des Kolbens
2. Wandbenetzung an den Zylinderlaufflächen
3. Benetzung des Brennraumdachs sowie der Zündkerze
4. Interaktion des Kraftstoffsprays mit dem Einlassventil
5. Ablagerungen an der Injektorspitze
6. Inhomogenitäten im Brennraum (lokal unterstöchiometrische Zonen)
7. Diffusionsflammen aufgrund flüssiger Kraftstofftropfen

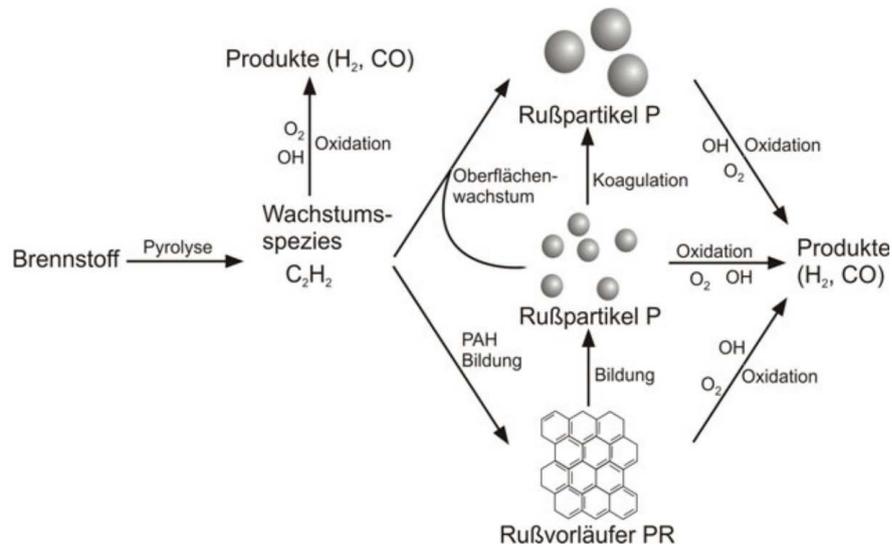


**Abbildung 2.3:** Partikelentstehungsbereiche im Brennraum [16]

Die grundsätzlichen Voraussetzungen für die Partikelentstehung, wie sie von der dieselmotorischen Verbrennung her bekannt sind, sind lokal unterstöchiometrische Zonen und hohe Brennraumtemperaturen im Bereich von 1700 bis 2600K [16]. Neben unterstöchiometrischen Zonen im Brennraum, welche bei direkteinspritzenden Ottomotoren trotz vorgemischtem Betrieb auftreten, ist besonders die Bildung von POLYZYKLISCHEN AROMATISCHEN KOHLENWASSERSTOFFEN (PAK), während der Pyrolyse des Kraftstoffs, entscheidend [17].

Die PAK-Bildung gilt als bestimmender Schritt bei der Rußentstehung. Bereits die Bildung des ersten Benzol-Ringes ist ein wesentlicher geschwindigkeitsbestimmender Schritt bei der Partikelentstehung [18]. Ausgehend von den gebildeten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen bilden sich durch Koagulation und Agglomeration immer größere Strukturen, welche schließlich als Partikel bezeichnet werden.

In [Abbildung 2.4](#) ist das phänomenologische Rußentstehungsmodell nach Tao et al. schematisch dargestellt.



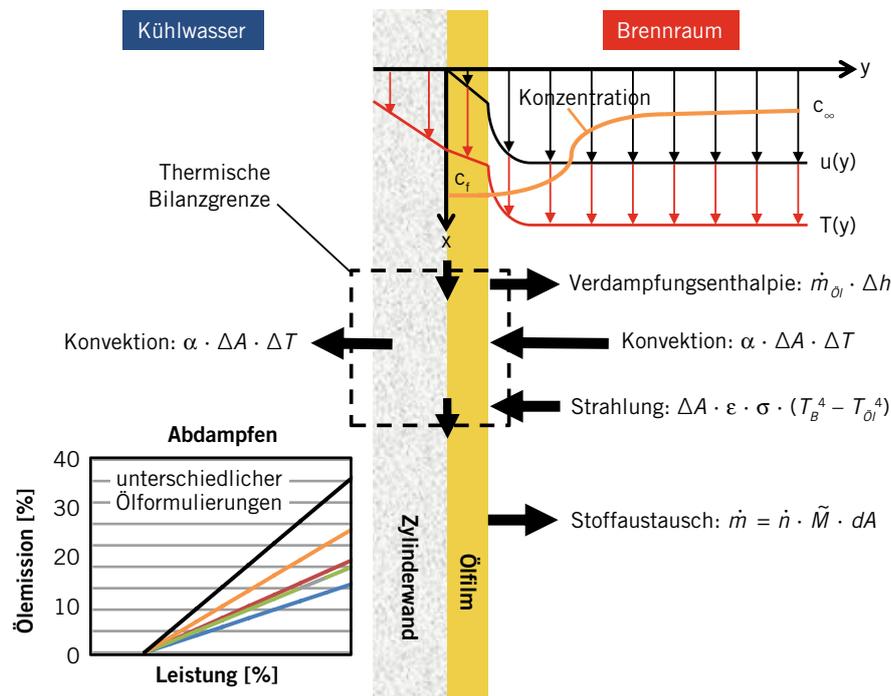
**Abbildung 2.4:** Phänomenologisches Rußentstehungsmodell nach Tao et al. [18]

## 2.2.2 Problematik der Wandbenetzung

Neben der Partikelproblematik führt die Direkteinspritzung des Kraftstoffs, unter bestimmten Bedingungen, zur Benetzung der Zylinderwand mit der Folge einer verstärkten Ölverdünnung sowie gesteigerten Ölemissionen. Eine verstärkte Verdünnung des Motoröls führt zu bleibenden Änderungen der Stoffeigenschaften, welche speziell im Hinblick auf Vorentflammungen zu berücksichtigen sind. Der Kraftstoffeintrag ins Motoröl setzt die Viskosität herab und beeinflusst damit signifikant das Benetzungsverhalten. Die Haupteinflussgrößen auf die Wandbenetzung sind [19]:

- Einspritzdruck und Einspritzdauer
- Einspritzzeitpunkt
- Einspritzstrategie
- Position und Auslegung des Injektors (Spraycharakteristik)
- Ladungsbewegung
- Kühlwasser- und Öltemperatur
- Kraftstoffeigenschaften

In Abhängigkeit von Einspritzdruck, Einspritzzeitpunkt und Spraytargeting können flüssige Kraftstofftropfen an der Zylinderwand auftreffen und einen Wandfilm bilden [10]. Vor allem die Kraftstoffkomponenten mit hohem Siedepunkt können bis zur Verbrennung flüssig vorliegen und verbrennen schließlich mit diffusiver Flamme. Untersuchungen hinsichtlich der Ölverdampfung bestätigen neben dem deutlichen Einfluss der jeweiligen Ölformulierung und des Kraftstoffeintrages, dass bereits eine 10%-ige Ölverdünnung zu einer Verdoppelung der Ölemissionen führt [19]. Abbildung 2.5 gibt einen Überblick der auftretenden Mechanismen bei der Ölverdampfung an der Zylinderwand.



**Abbildung 2.5:** Ölbezogene Verdampfungsverluste verschiedener Formulierungen dargestellt anhand der einzelnen Vorgänge an der Zylinderwand [20]

Eine umfangreiche Variation und Optimierung des Spraytargetings von Signargout et al. [21] zeigt, dass zwar ein geringer Spraywinkel das Risiko von Wandbenetzungen und damit Ölverdünnung reduziert, allerdings aufgrund der verschlechterten Gemischbildung das Risiko für Vorentflammungen steigt. Neben den bereits erwähnten Problemstellungen führt verstärkte Wandbenetzung zu einer ausgeprägten Ablagerungsbildung im Brennraum. Diese Ablagerungen, deren Ursprungsmaterial Kraftstoff- und Motorölkomponenten sind, bilden sich am Kolbenrand sowie an der Zylinderwand im Bereich des oberen Totpunktes [22]. Brennraumablagerungen gelten ebenfalls als mögliche Ursache von Vorentflammungen, weshalb der Wandbenetzung bei Direkteinspritzung eine entscheidende Rolle hinzukommt.

## 2.3 Abgasturboaufladung

Führt man die Überlegungen aus Gleichung 2.1 weiter, so erfordert die erwähnte Mitteldruckanhebung im Hinblick auf Downsizingmotoren den Einsatz von Abgasturbo-ladern. Denn gemäß Gleichung 2.2 ermöglicht lediglich die Steigerung der Dichte der angesaugten Luft in ausreichendem Maße die gewünschte Mitteldrucksteigerung, da weitere Kenngrößen wie der untere Heizwert des Kraftstoffs, die Wirkungsgradkette und der Mindestluftbedarf nur bedingt variiert werden können [23].

$$p_{me} = \rho_L \cdot \frac{H_U \cdot \eta_i \cdot \eta_m}{L_{min}} \quad (2.2)$$

$p_{me}$	....	effektiver Mitteldruck [bar]
$\rho_L$	....	Dichte der Luft [kg/m <sup>3</sup> ]
$H_U$	....	unterer Heizwert [MJ/kg]
$\eta_i$	....	indizierter Wirkungsgrad [-]
$\eta_m$	....	mechanischer Wirkungsgrad [-]
$L_{min}$	....	Mindestluftbedarf [-]

In Zusammenhang mit heutiger Ladeluftkühlung sind deutliche Steigerungen der spezifischen Leistungen und Drehmomente möglich und speziell in Kombination mit Benzindirekteinspritzung erschließt sich ein hohes CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential.

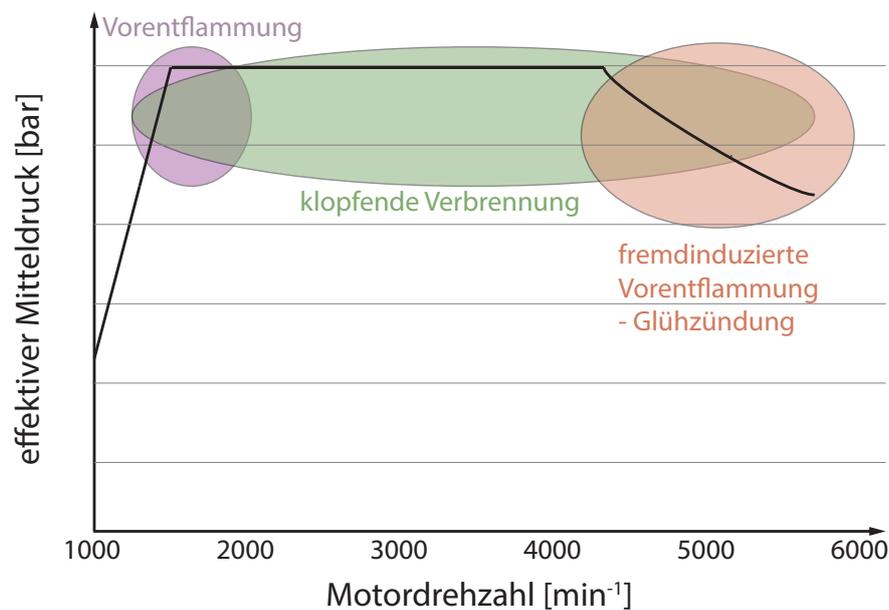
Ein wesentliches Kriterium bei aufgeladenen Motoren stellt ein ausreichend hohes An-fahrdrehmoment, sogenanntes LOW-END TORQUE (LET), dar, um ähnliches Transi-entverhalten wie bei Saugmotoren abzubilden [11]. Diese LET-Anforderung deckt sich ebenso mit dem Ziel einer längeren Getriebeübersetzung zur Betriebspunktverlagerung im Sinne des Downspeedings. Allerdings zeigen bereits eine Vielzahl an Untersuchungen der letzten Jahre, dass gerade dieses hohe An-fahrdrehmoment zu neuen Verbrennungs-anomalien führt.

Zudem geht mit der Steigerung der Ladungsdichte im Brennraum auch eine Erhö-hung der thermischen und mechanischen Belastung einher. Vor allem den erhöhten Wärmestromdichten an Zylinderkopf, Kolben und Laufbuchse muss mit verstärkten Kühlmaßnahmen Rechnung getragen werden [23]. Verbunden mit der erhöhten ther-mischen Belastung verschärft sich die Klopfproblematik [11] aufgeladener Motoren im Vergleich zu Saugmotoren und es können weitere Verbrennungsanomalien auftreten.

## 2.4 Verbrennungsanomalien

Irreguläre Verbrennungsphänomene, sogenannte Verbrennungsanomalien, bezeichnen Vorgänge die nicht zwangsläufig durch den Zündfunken, sondern durch Selbstentzündung, ausgelöst werden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die drei Gruppen klopfende Verbrennung, Glühzündung und Vorentflammung. [18]

Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über das Auftreten der irregulären Verbrennungsphänomene dargestellt im Motorkennfeld.



**Abbildung 2.6:** Auftreten der irregulären Verbrennungsphänomene dargestellt im Motorkennfeld [18] (eigene Darstellung)

Viele dieser irregulären Verbrennungsphänomene können nicht vorhergesagt werden, weshalb eine genaue Kenntnis über deren Auslöser entscheidend ist. Die ohnehin erhöhten thermischen und mechanischen Belastungen moderner Downsizingmotoren werden durch das Auftreten irregulärer Verbrennungsphänomene weiter gesteigert, wodurch mitunter Schädigungen bis hin zum Motorausfall auftreten.

### 2.4.1 Klopfende Verbrennung

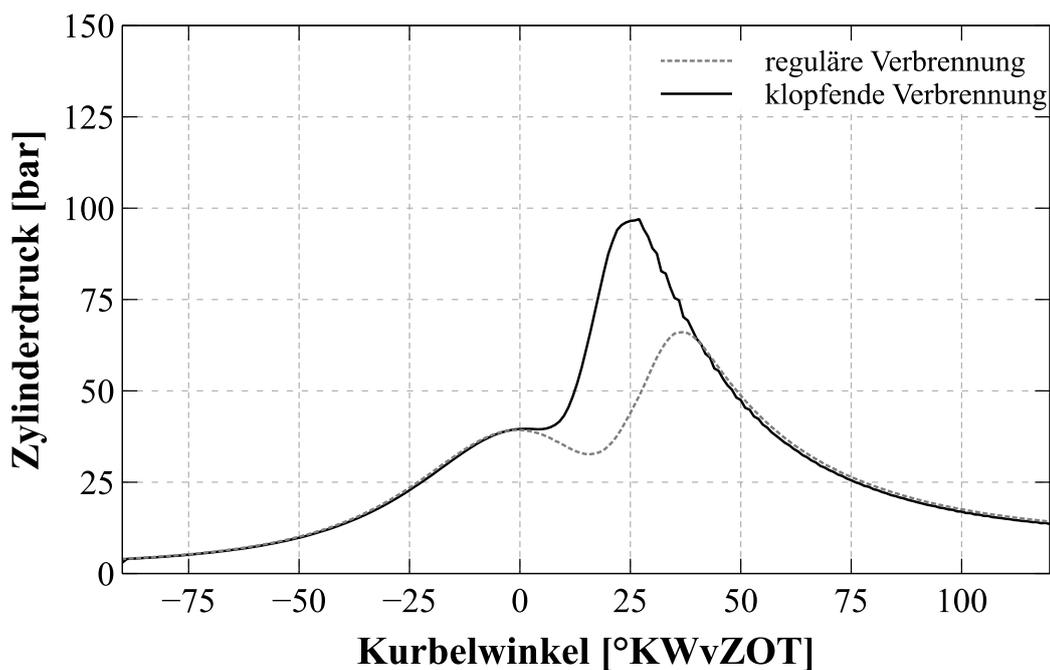
Beim sogenannten Klopfen erfolgt durch die fortschreitende Flammenfront, ausgelöst durch den Zündfunken, entsprechend der weiteren isentropen Drucksteigerung und der damit einhergehenden Temperatursteigerung im noch unverbrannten Kraftstoff-Luft-Gemisch (Endgas) eine Selbstentzündung.

Es folgt eine detonationsähnliche Verbrennung des Endgases verbunden mit starken Druckschwingungen. Das Auftreten der klopfenden Verbrennung über nahezu dem gesamten Drehzahlbereich in Abhängigkeit der Last limitiert die Möglichkeiten der Aufladung bei Ottomotoren. [23]

Wesentlichen Einfluss auf die klopfende Verbrennung haben [18], [23]:

- der Gemischzustand
- das Verdichtungsverhältnis sowie der Aufladegrad
- der Zündzeitpunkt
- die Brennraumform

Abbildung 2.7 zeigt einen normalen Verbrennungszyklus im Vergleich zur klopfenden Verbrennung.



**Abbildung 2.7:** Zylinderdruck bei klopfender Verbrennung im Vergleich zu einem regulären Verbrennungszyklus [24] (eigene Darstellung)

Ein probates Mittel zur Vermeidung klopfender Verbrennung besteht in der Verstellung der Zündung nach Spät. Heute im Einsatz befindliche Klopfregelungen erfassen über Körperschallsensoren die Schallamplitude der Druckschwingungen beim Klopfen und passen den Zündwinkel an die jeweilige Klopfgrenze an [10].

## 2.4.2 Glühzündung

Glühzündungen treten speziell bei hohen Drehzahlen und Lasten auf und zeichnen sich durch ein selbsterregendes und selbstverstärkendes Verhalten aus [24]. Auslöser für Glühzündungen sind heiße Oberflächen oder Bauteile im Brennraum, sogenannte HOT SPOTS.

Im Gegensatz zu Vorentflammungen ist die steigende Brennraumtemperatur der treibende Faktor bei Glühzündungen [25]. Klopfende Verbrennungszyklen können zu einer signifikanten Temperatursteigerung einzelner Stellen im Brennraum führen, welche, sobald diese eine kritische Temperatur erreichen, eine Selbstzündung vor der Einleitung des Zündfunken hervorrufen. Die Selbstentflammung bedingt einen weiteren Temperatureintrag in diese kritische Stelle wodurch der Zeitpunkt der Selbstentflammung immer weiter nach Früh geht. Mitunter erfolgt die Selbstentzündung bereits so früh, dass diese ohne das typische Klopfen begleitet ist. [18]

Abbildung 2.8 zeigt eine Glühzündung mit immer weiter fortschreitender Verbrennungslage im Vergleich zu einem normalen Verbrennungszyklus.

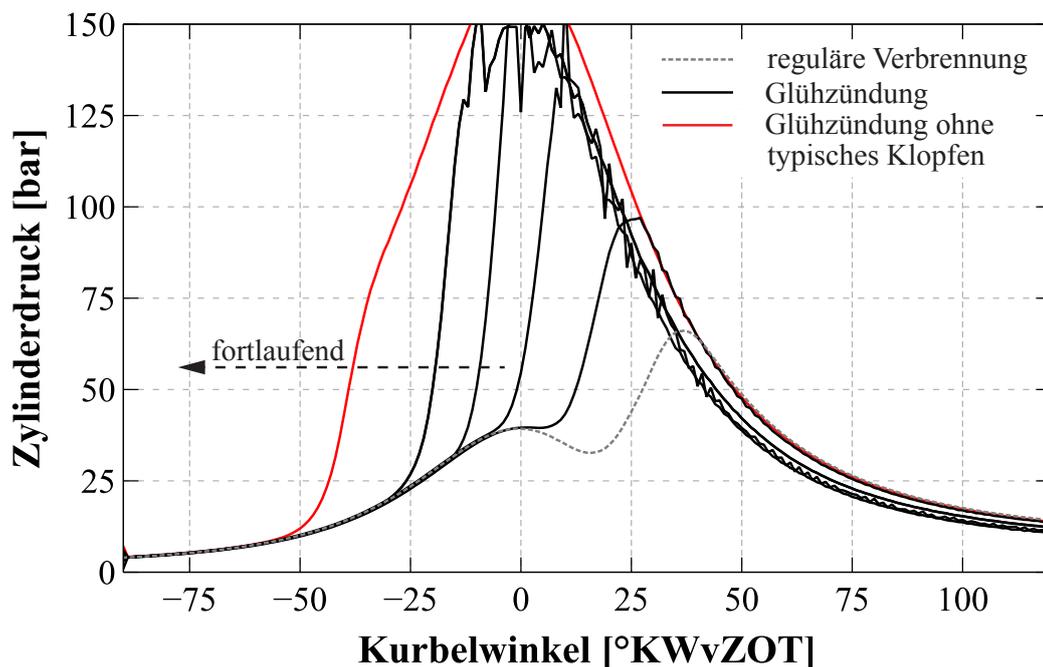


Abbildung 2.8: Zylinderdruck bei einer Glühzündung im Vergleich zu einem normalen Verbrennungszyklus [24] (eigene Darstellung)

Aufgrund des enormen Schadenspotentials von Glühzündungen muss deren Auftreten möglichst vermieden werden.

### 2.4.3 Vorentflammung

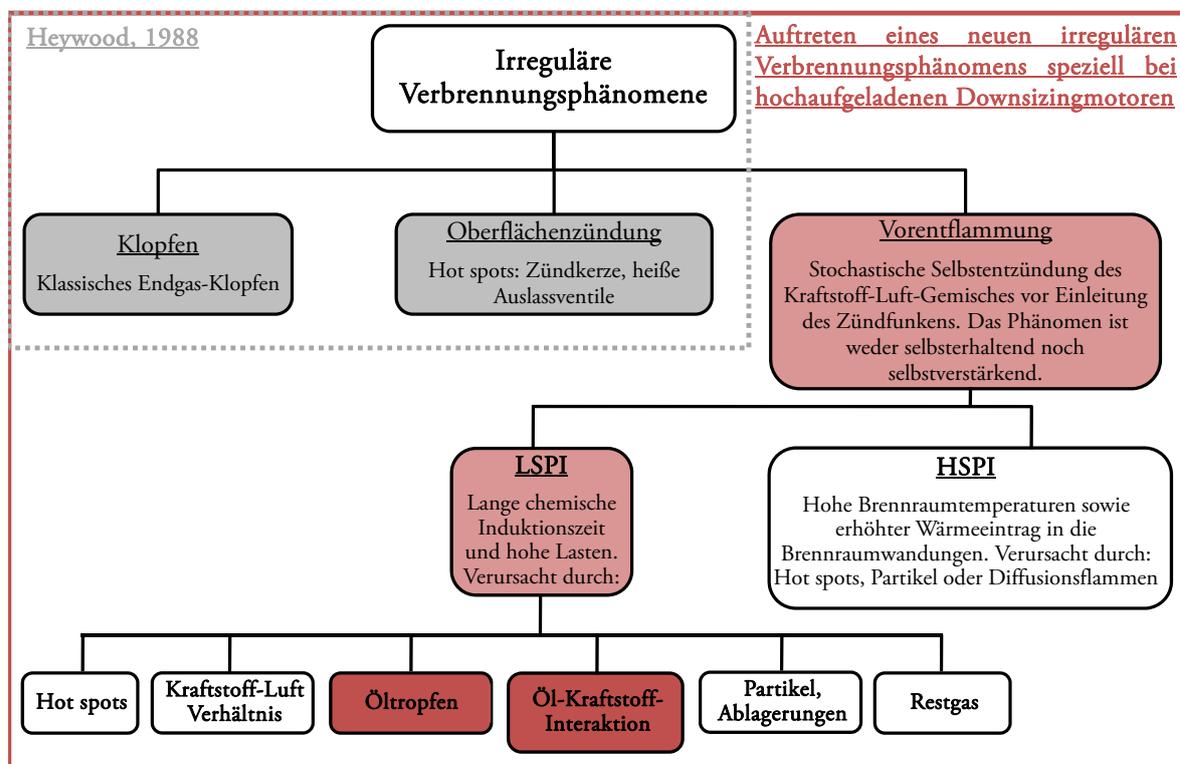
Grundsätzlich wird bei Vorentflammungen zwischen irregulären Verbrennungsphänomenen bei niedrigen und hohen Drehzahlen unterschieden. Vorrangig wird mit dem Begriff Vorentflammung [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32] allerdings eine irreguläre Verbrennungserscheinung, welche speziell im Bereich niedriger Drehzahlen und Vollastbedingungen, sogenannte LOW SPEED PRE-IGNITION (LSPI), in hochaufgeladenen Downsizingmotoren auftritt, bezeichnet. Auf diesem irregulären Verbrennungsphänomen liegt im Rahmen dieser Arbeit auch der Fokus der Betrachtungen. Ohne hier im Detail darauf einzugehen sind mögliche Ursachen für sogenannte High Speed Pre-ignition (HSPI) heiße Stellen im Brennraum, wie beispielsweise Zündkerzen oder Auslassventile. Weitere mögliche Ursachen sind Partikel, Diffusionsflammen oder Zündaussetzer [33].

Bei Vorentflammungen erfolgt eine Selbstentzündung vor Einleitung der Verbrennung durch den Zündfunken. Bereits vor Beginn der Verbrennung liegt in einem oder mehreren Bereichen im Brennraum ein höherer Energiezustand vor. Nach heutigem Kenntnisstand sind bereits eine Vielzahl an möglichen Ursachen von Vorentflammungen bekannt. Nachfolgend sind die verschiedenen Ursachen im Detail aufgelistet [6]:

- **inhomogene Temperaturverteilung:** Aufgrund des hohen Ladedrucks verbunden mit spätem Zündzeitpunkt können verstärkt lokal thermische Belastungen auftreten. Mögliche Ursachen sind daher Hot spots sowie erhöhte Konzentrationen heißen Restgases. Neben einem lokal erhöhten Temperatureintrag können die im Restgas verbliebenen Radikale durch vorausgehende Niedertemperaturoxidationen im Brennraum zu einem chemisch hoch reaktiven Zustand führen und in Abhängigkeit ihrer Konzentration eine Vorentflammung auslösen [34].
- **verschlechterte Gemischaufbereitung:** Durch unvollständige Homogenisierung bei Direkteinspritzung des Kraftstoffs können lokal unterstöchiometrische Zonen verbunden mit signifikant reduzierter Zündverzugszeit vorliegen [35].
- **Partikel und Ablagerungen:** Heiße Partikel oder abgelöste Brennraumablagerungen, welche den Wärmeübergang zu den Brennraumwänden verloren haben, können, sofern diese nicht während des Ladungswechsels ausgeschoben werden, einen lokalen Hot spot darstellen und eine Vorentflammung auslösen [22]. Ebenso ist das Freisetzen gespeicherter unvollständig verbrannter Kohlenwasserstoffe denkbar, verbunden mit katalytischen Auswirkungen auf die Vorentflammungsneigung [36].

- **Kraftstoff- und Öltropfen:** Zum einen zeigen niederoktanige Kraftstoffe eine erhöhte Vorentflammungsneigung, während andererseits unverdampfter Kraftstoff an der Zylinderwand eine lokale Ölverdünnung bedingt. Die geringere Viskosität begünstigt den Öltransport in den Feuerstegbereich und verstärkt zudem die Ablösung von Öltropfen in den Brennraum [35]. Vor allem abgelöste Öltropfen in Abhängigkeit deren Formulierung stehen unter Verdacht, maßgeblich die Vorentflammungsneigung zu beeinflussen.

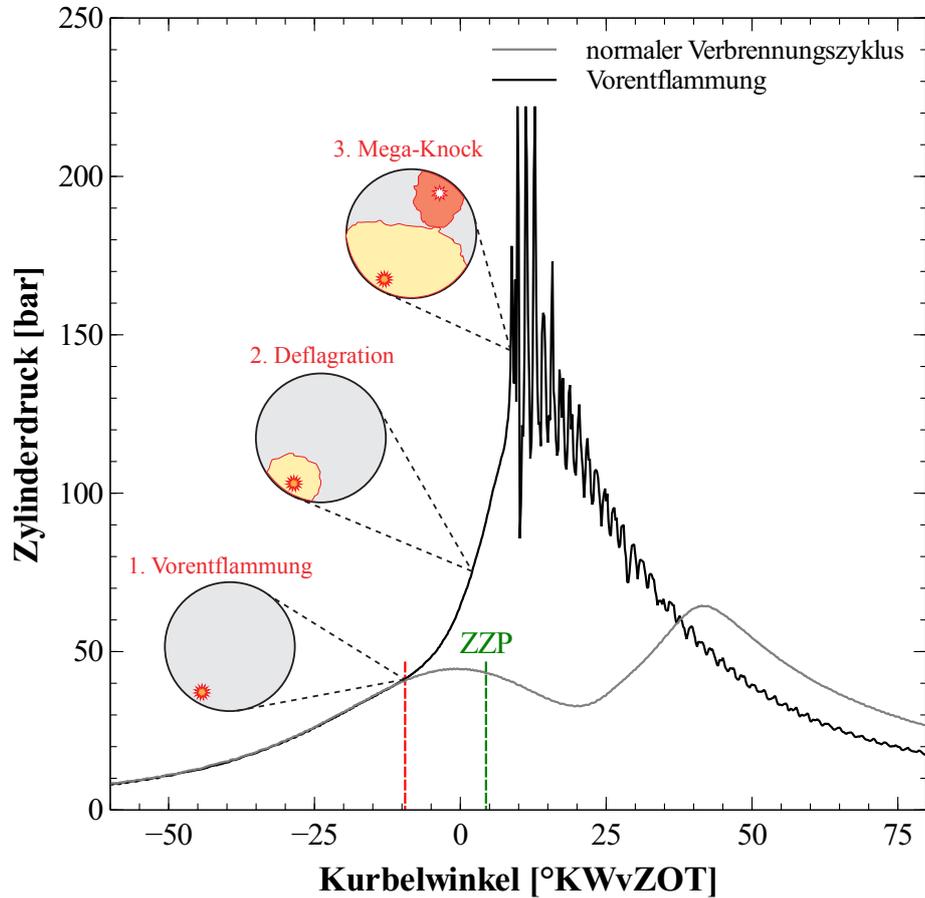
In Anbetracht der Erkenntnisse von Heywood [37] zeigt Abbildung 2.9, in Anlehnung an die Untersuchungen von Dahnz et al. [6], Kunde et al. [33] und Winkelhofer et al. [38], die wesentlichen Ursachen heutiger irregulärer Verbrennungsphänomene.



**Abbildung 2.9:** Übersicht der irregulären Verbrennungsphänomene sowie deren mögliche Ursachen [6], [33], [37], [38] (eigene Darstellung)

Der dominierende Faktor bei LSPI ist das Vorhandensein von Flüssigkeiten (Öl, Kraftstoff) oder Ablagerungen/Partikel sowie ausreichend Zeit, um thermochemische Reaktionen dieser Stoffe zu initiieren [25]. Im Gegensatz zur klopfenden Verbrennung können aufgetretene Vorentflammungen nicht durch den Eingriff der Klopfregelung vermieden werden, da deren Initiierung vor Einleitung des Zündfunken erfolgt und somit eine Spätstellung wirkungslos ist. Lediglich eine vollständige Abschaltung der Kraftstoffzufuhr kann das erneute Auftreten von Vorentflammungen unterbinden [13].

Abbildung 2.10 veranschaulicht anhand der Zylinderdruckverläufe die Unterschiede einer Vorentflammung, welche schließlich zu einem Mega-Knock führt, im Vergleich zu einem normalen Verbrennungszyklus.



**Abbildung 2.10:** Zylinderdruck bei einer Vorentflammung mit anschließendem Mega-Knock im Vergleich zu einem normalen Verbrennungszyklus

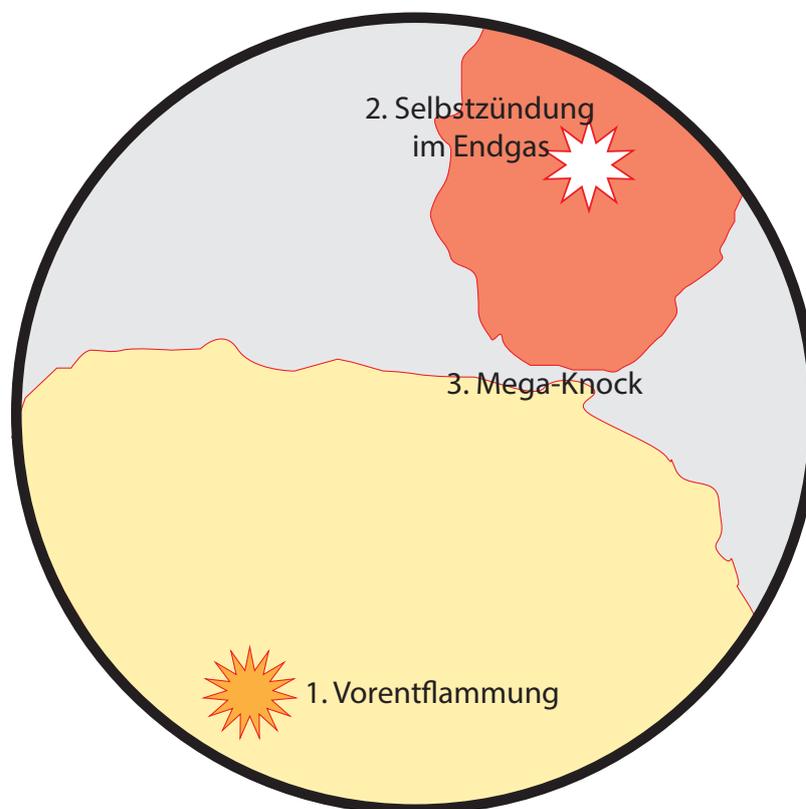
Der Druckverlauf einer Vorentflammung in Abbildung 2.10 verdeutlicht, entsprechend dem hohen Spitzendruck aufgrund der frühen Verbrennungslage, deren hohes Schadenpotential. Grundsätzlich unterscheidet man drei Stufen bei Vorentflammungen [39]:

1. Selbstentzündung vor der eigentlichen Entflammung durch den Zündfunken,
2. eine deflagrative Flammenausbreitung, ähnlich der regulären Verbrennung,
3. gefolgt von einer detonationsartigen Umsetzung der gesamten Zylinderladung, begleitet durch starkes Klopfen, sogenannte MEGA-KNOCKS.

Die vorzeitige Entflammung des Kraftstoff-Luft-Gemisches vor der Einleitung des Zündfunken führt zu einer deutlichen Druck- und Temperatursteigerung des Endgases und erhöht damit das Risiko von Selbstzündungen im Endgas (Mega-Knocks).

Peters et al. [40] zeigte anhand von Simulationsergebnissen die Möglichkeit, das Auftreten von Mega-Knocks anhand der Theorie von akustischer Resonanz zu beurteilen. Während der Auslöser von Vorentflammungen ein Hot spot gegen Ende des Kompressionsstaktes ist, verursacht ein zweiter Hot spot eine lokale Detonation, einen sogenannten Mega-Knock. Die Entstehung dieser lokalen Detonation erfolgt, wenn die Reaktionsfront des zweiten Hot spots mit den ausgehenden Schallwellen des ersten Hot spots interferiert.

Ein ähnliches Ergebnis veranschaulichten Kalghatgi und Bradley [41], die von einer zweiten weitaus drastischeren Selbstentzündung im Endgas ausgehen, welche verantwortlich für die enormen Druckoszillationen eines Mega-Knocks ist. Abbildung 2.11 gibt einen schematischen Überblick der Initiierung eines Mega-Knocks.

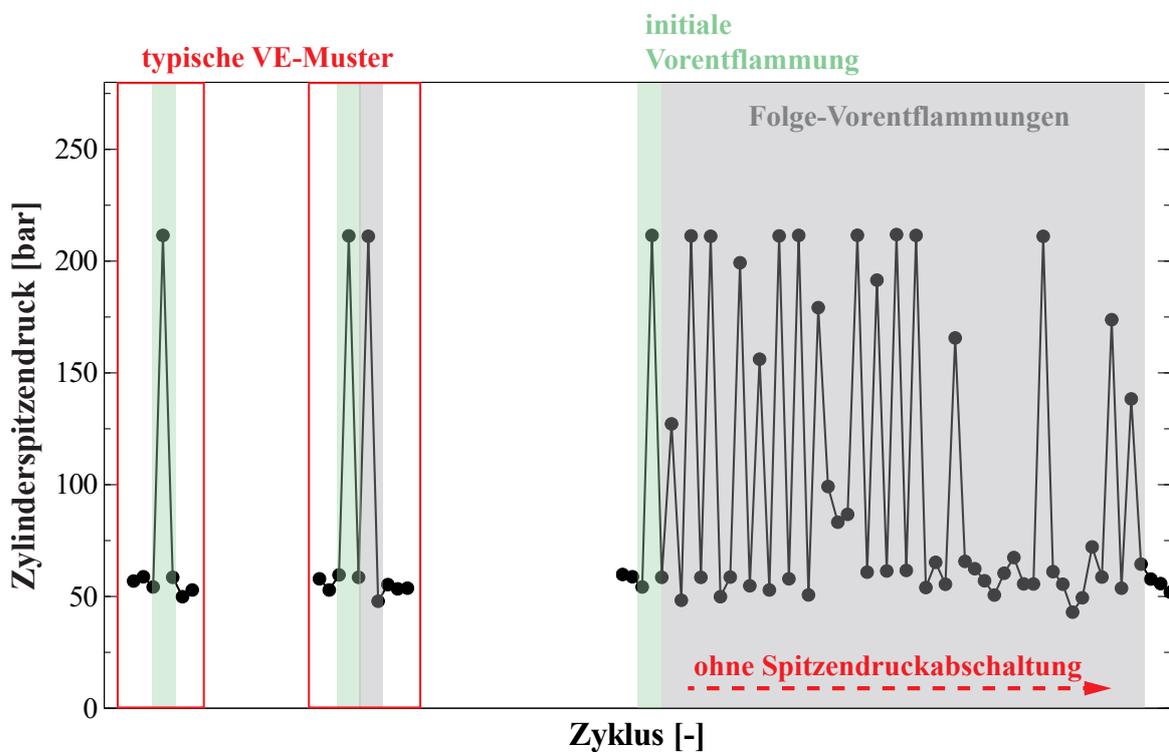


**Abbildung 2.11:** Schematische Darstellung der Initiierung eines Mega-Knocks

Sobald sich die, von der Vorentflammung ausgehende, Flammenfront, welche sich mit annähernd Schallgeschwindigkeit ausbreitet, dem zweiten Hot spot im Endgas nähert, kann eine Kopplung mit den Druckwellen der zweiten Reaktionsfront erfolgen. Diese Überlagerung der beiden Reaktionsfronten führt zu einem signifikanten Druckanstieg gefolgt von Oszillationen. In diesem Fall ist die Umsetzung einer deflagrativen Flammenausbreitung in eine Detonation möglich [41].

Durch die frühe Verbrennungslage verbunden mit dem erhöhten Spitzendruck und dem Auftreten sogenannter Mega-Knocks besitzen Vorentflammungen ein sehr hohes Schadenspotential.

Neben dem sporadischen Auftreten von Vorentflammungen, ohne Ankündigung im vorangegangenen Zyklus, ist eine weitere Eigenschaft von LSPI das Auftreten von intermittierenden Vorentflammungsserien, die mindestens durch einen Zyklus regulärer Verbrennung unterbrochen sind. Abbildung 2.12 zeigt die beobachteten typischen Vorentflammungsmuster von initialen Vorentflammungen und Folge-Vorentflammungen sowie eine Serie von insgesamt 17 Vorentflammungen in einem Zeitraum von rund 50 Verbrennungszyklen.



**Abbildung 2.12:** Typische Erscheinungsformen von initialen Vorentflammungen und Folge-Vorentflammungen entsprechend deren intermittierendem Auftreten - Darstellung anhand des Spitzendruck-Verlaufes über mehrere Verbrennungszyklen

Während es sich im Rahmen dieser Untersuchungen, entsprechend der gewählten Testmethodik, bei initialen Vorentflammungen mit größter Wahrscheinlichkeit um ölunduzierte Vorentflammungen handelt, werden Folge-Vorentflammungen vorrangig durch Brennraumablagerungen, abgelöst durch die starken Druckoszillationen eines vorangegangenen Mega-Knocks, initiiert.

Diese Serien dauern solange an, bis die Vorentflammungsursache erlischt. Abbildung 2.12 verdeutlicht weiters die Notwendigkeit einer Spitzendruckabschaltung mit zylinderselektiver Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr, um diese Serien frühzeitig zu unterbinden. Entsprechend der umgesetzten zylinderselektiven Spitzendruckabschaltung, siehe Abschnitt 5.4, zeigten sich während den Untersuchungen die beiden typischen VE-Muster aus einer ölunduzierten Vorentflammung mit oder ohne anschließender Folge-Vorentflammung. Die Anzahl an Ereignissen mit Folge-Vorentflammungen ist zudem ein Indiz für den Grad an gebildeten Brennraumablagerungen.

Studien von Döhler et al. [42] und Palaveev et al. [43] konnten diese Erscheinung, anhand optischer Untersuchungen, abgelösten Brennraumablagerungen zuweisen. Diese Brennraumablagerungen können durch eine Vorentflammung abgelöst werden und benötigen einen Zyklus regulärer Verbrennung, um sich aufzuheizen. Werden diese Ablagerungen in diesem Zeitraum durch den Ladungswechsel nicht ausgespült und besitzen eine ausreichende Größe, um genügend Wärme zu speichern, können diese im darauffolgenden Zyklus erneut eine Vorentflammung auslösen. Die Serien überdauern, in Abhängigkeit der vorhandenen abgelösten Ablagerungen, mehrere Zyklen [26].

Heiß et al. [44] konnte anhand von Simulationsergebnissen zeigen, dass ausgehend von einer zunächst angenommenen Partikelanzahl über 60% der Partikel nach dem Ladungswechsel im Brennraum verbleiben. Trotz entsprechenden Vereinfachungen (Eigenschaften von festem Ruß, Vernachlässigung zusätzlicher exothermer Reaktionen) verdeutlichten die Ergebnisse, dass die Partikel in einem engen Größenspektrum vorliegen müssen, um im nachfolgenden Zyklus den Auslöser einer Vorentflammung darzustellen. Palaveev et al. [43] konnte einen ähnlichen Zusammenhang zwischen der notwendigen Partikelgröße und der gespeicherten Energie für den Folgezyklus herstellen.

Im Hinblick auf den intermittierenden Charakter von Vorentflammungen besteht zudem die Vermutung, dass durch eine vorausgegangene Vorentflammung, entsprechend der frühen Verbrennungslage verbunden mit geringerer Abgastemperatur, gestörter Gaswechseldynamik, geringeren Gastemperaturen sowie reduziertem Restgasgehalt, ungünstige Bedingungen gegen Ende des Kompressionstaktes für eine Vorentflammung im darauffolgenden Zyklus vorliegen [29], [45].

Speziell bei Low Speed Pre-Ignition besteht, aufgrund der langen chemischen Induktionszeit in Verbindung mit hohen Lasten, die Gefahr einer Selbstzündung ausgelöst durch Öl- und Kraftstoffkomponenten sowie Brennraumablagerungen, welche mitunter unverbrannte Kohlenwasserstoffe beinhalten.

Folgender Arrhenius-Ansatz, gemäß Gleichung 2.3, verdeutlicht die Verhältnisse für die Zündverzugszeit [38]:

$$\tau = A \cdot p^{-n} \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2.3)$$

$\tau$	....	Zündverzugszeit
$A, B, n$	....	chemische Spezies
$p, T$	....	Druck und Temperatur bei Kompressionsende

Die Faktoren A, B und n sind stellvertretend für chemische Spezies wie unverdampfter Kraftstoff, Öl- bzw. Ölnebel aber auch Ablagerungen sowie Restgas und haben entscheidenden Einfluss auf die Zündverzugszeit [38]. Sobald das *Livengood-Wu*-Integral, gemäß Gleichung 2.4, den Wert 1 erreicht, sind die lokalen Bedingungen für die Selbstzündung [46] erfüllt.

$$\int_{ES}^{ES+ZCK} \frac{1}{\tau(s)} ds = 1 \quad (2.4)$$

$\tau$	....	Zündverzugszeit
$ES$	....	Einlassventil Schließen
$ZCK$	....	Zeit für chemische Kettenreaktionen

Besonders die Zeit vom Schließen der Einlassventile (ES) bis zum Zeitpunkt an dem erste chemische Kettenreaktionen beginnen (ZCK) ist entscheidend bei Vorentflammungen. Das Hauptaugenmerk bei Vorentflammungen liegt aber vor allem auf dem Einfluss von Öltropfen und der Öl-Kraftstoff-Interaktion, welche in den nachfolgenden Untersuchungen genauer betrachtet werden. Im nächsten Kapitel sind daher die wesentlichen Ergebnisse der Literaturstudie mit dem Fokus auf ölunduzierten Vorentflammungen sowie der Einfluss verstärkter Wandbenetzung mit Kraftstoff zusammengefasst und zeigen damit den aktuellen Stand der Technik.

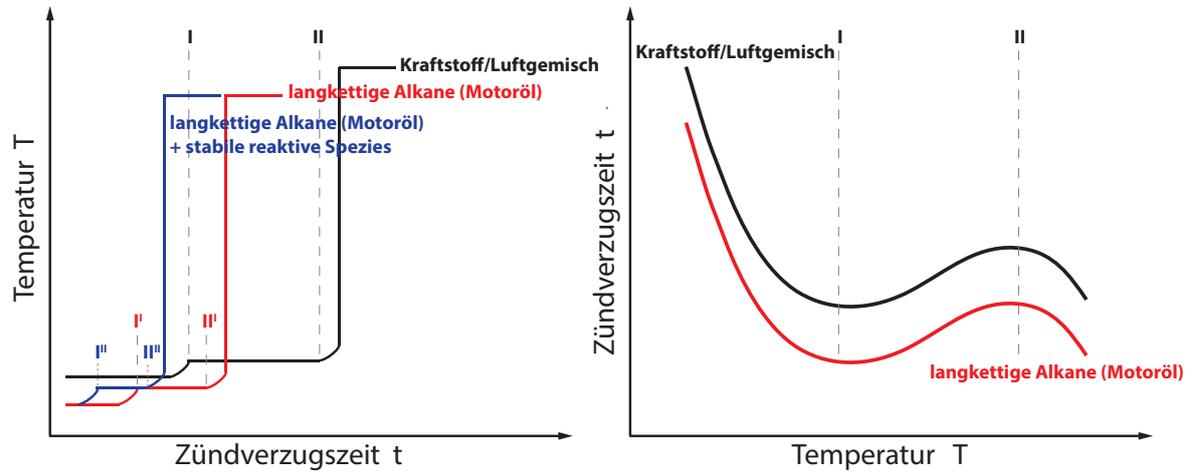
## 3 Ölinduzierte Vorentflammungen

Bevor nachfolgend der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf ölinduzierte Vorentflammungen näher dargestellt wird, wird im Hinblick auf Selbstzündungsvorgänge zunächst die Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen im Detail beschrieben. Vor allem die deutlich geringeren Zündverzugszeiten von höhermolekularen Kohlenwasserstoffen, wie sie beispielsweise in Motorölen vorzufinden sind, sowie deren ausgeprägtes NTC-Verhalten werden im Detail betrachtet. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Reaktionskinetik werden die Vorgänge der Tropfenzündung näher behandelt, welche im Hinblick ölinduzierter Vorentflammungen, ausgelöst durch verdampfende Öltropfen, essentiell sind. Vor allem die Verdampfungsrate sowie der ursprüngliche Tropfendurchmesser zeigen signifikanten Einfluss auf die kritische Dampfmenge zur Auslösung einer Vorentflammung. Abschließend stellt dieses Kapitel die wesentlichen Transportmöglichkeiten für Öltropfen in den Brennraum dar und fasst die aktuellen Hypothesen zur Auslösung ölinduzierter Vorentflammungen zusammen.

### 3.1 Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen

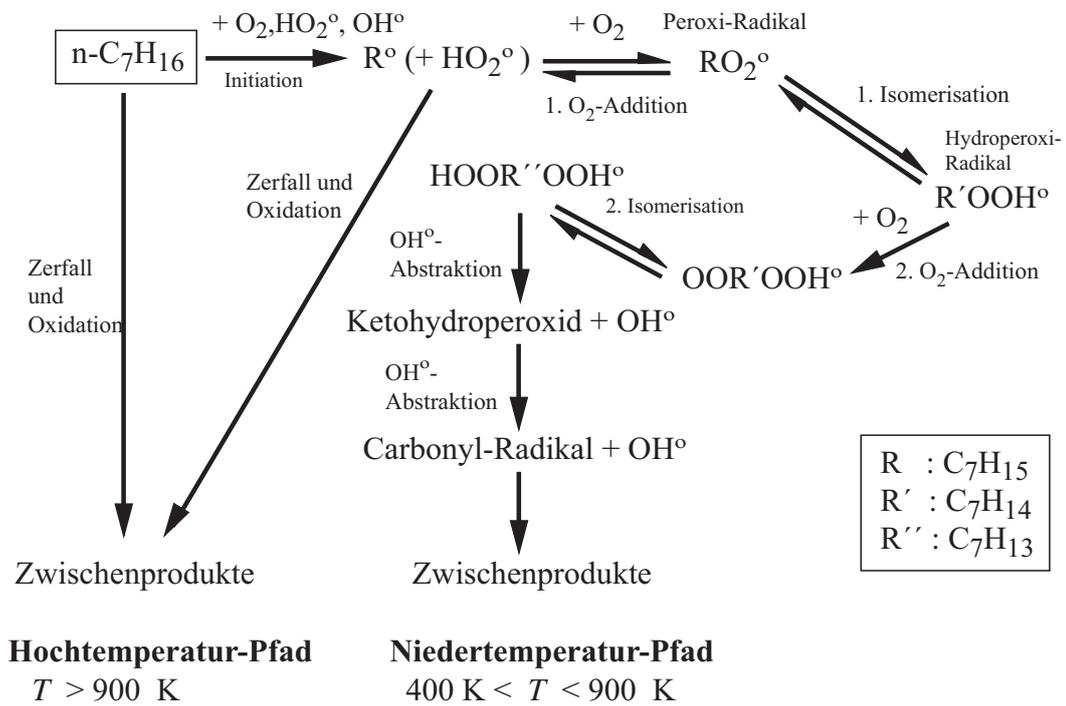
Im Gegensatz zu thermischen Explosionen, bei denen der Temperaturanstieg sogleich mit dem Einleiten der Zündung erfolgt, geht diesem Temperaturanstieg bei der Zündung von Kraftstoff-Luft-Gemischen, entsprechend einer Radikalkettenexplosion, eine gewisse Zündverzugszeit voraus [47]. Während dieser Zündverzugszeit verbleibt die Temperatur nahezu konstant wobei die Radikalkonzentration exponentiell ansteigt. Sobald die Radikalkonzentration eine gewisse Höhe erreicht hat, um die verbleibenden Kohlenwasserstoffe zu zersetzen, erfolgt die Verbrennung [18]. Die Oxidation von höhermolekularen Kohlenwasserstoffen weist dabei einen Bereich der Zündverzugszeit mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC-Bereich) auf, welcher die Nieder- und Hochtemperaturoxidation (Zweistufenzündung) verbindet [48]. Entsprechend der steigenden Reaktivität mit zunehmender Kettenlänge weisen höhermolekulare Kohlenwasserstoffe, wie beispielsweise Motoröle, ein deutlich ausgeprägtes NTC-Verhalten auf [49].

Abbildung 3.1 zeigt die qualitativen Verläufe der Zündverzugszeit während der Zweistufenzündung sowie das typische NTC-Verhalten von höhermolekularen Kohlenwasserstoffen bzw. stabiler reaktiver Zwischenprodukte.



**Abbildung 3.1:** Links: Zeitlicher Verlauf der Temperatur während der Zweistufenzündung; Rechts: Zündverzugszeit über Temperatur bei NTC-Verhalten von Kohlenwasserstoffen [47], [50] (eigene Darstellung)

Abbildung 3.2 zeigt schematisch den typischen Bereich der Nieder- und Hochtemperaturoxidation von höhermolekularen Kohlenwasserstoffen am Beispiel von n-Heptan.

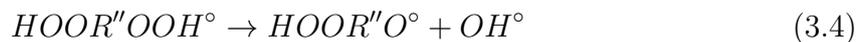


**Abbildung 3.2:** Schematischer Verlauf der Nieder- und Hochtemperaturoxidation von höhermolekularen Kohlenwasserstoffen am Beispiel von n-Heptan [48]

Zu Beginn der Oxidation erfolgt zunächst die Abstraktion eines Wasserstoffatoms vom vorliegenden Alkan  $RH$  ( $R$  repräsentiert in diesem Fall die Alkylgruppe des Alkanes  $C_nH_{(2n+2)-1}$ ) gemäß Gleichung 3.1 [18]:



Im Niedertemperaturbereich von 400-900K reagiert das Alkylradikal  $R^\circ$  mit einem Sauerstoffmolekül nach Gleichung 3.2 [48] zum Peroxyl-Radikal  $RO_2^\circ$ , welches zu Hydroperoxid  $R'OOH^\circ$  (Gleichung 3.3 [48]) übergeht und schließlich gemäß Gleichung 3.4 [48] über Zwischenschritte das Ketohydroperoxid  $HOOR''O^\circ$  bildet.



Das gebildete Ketohydroperoxid  $HOOR''O^\circ$  ist im Niedertemperaturbereich aufgrund seiner hohen Aktivierungsenergie sehr stabil [48] und kann unter gewissen Voraussetzungen im Brennraum akkumuliert werden.

Da im motorischen Bereich, auch bei hochaufgeladenen Downsizingmotoren, die Kompressionsendtemperatur unterhalb von 900K liegt, erfolgt eine Zweistufenzündung. Die erste Zündstufe der Niedertemperaturoxidation bis zum Ketohydroperoxid  $HOOR''O^\circ$  wird schnell erreicht [48]. Danach folgt ein langsamer Temperaturanstieg, während dessen die Zündverzugszeit ansteigt (NTC-Bereich), bis schließlich eine Temperatur von rund 1000K erreicht wird, so dass die thermische Zersetzung von gebildetem Wasserstoffperoxid (degenerierte Kettenverzweigung) ausreichende Mengen an  $OH^\circ$ -Radikalen freisetzt, dadurch die zweite Zündstufe einleitet und zur vollständigen Oxidation des Kraftstoffs führt [47]. Entsprechend Abbildung 3.1 ist festzuhalten, dass höhermolekulare geradkettige Alkane (zB. Motoröl) deutlich reaktionsfreudiger sind und geringere Zündverzugszeiten aufweisen.

Im Hinblick auf Vorentflammungen, mit besonderem Fokus auf den Einfluss von Motorölen, haben Simulationsergebnisse von Magar et al. [51] gezeigt, dass stabile reaktive Spezies der Niedertemperaturoxidation aus vorangegangenen Zyklen zu einer deutlichen Reduktion der Zündverzugszeit bis hin zur Vorentflammung führen können. Diese, bei niederen Temperaturen, stabilen Spezies (zBs. Ketohydroperoxid) können durch unvollständige Verbrennung von Kraftstoff und Öl im Ringspaltbereich akkumu-

liert werden. Wenn diese Spezies eine kritische Masse erreichen und freigesetzt werden, können diese eine Vorentflammung auslösen.

Heiß et al. [52] konnte in ähnlicher Weise an einem chemischen Reaktor unter Verwendung von Oktylketohydroperoxid, welches bei unvollständiger Oxidation während der Niedertemperaturoxidation entsteht (stellvertretend für reaktive Spezies aus dem Öl bzw. aus unvollständig oxidiertem Kraftstoff), die Selbstentzündung an einem Tropfen dotiert mit Oktylketohydroperoxid zeigen.

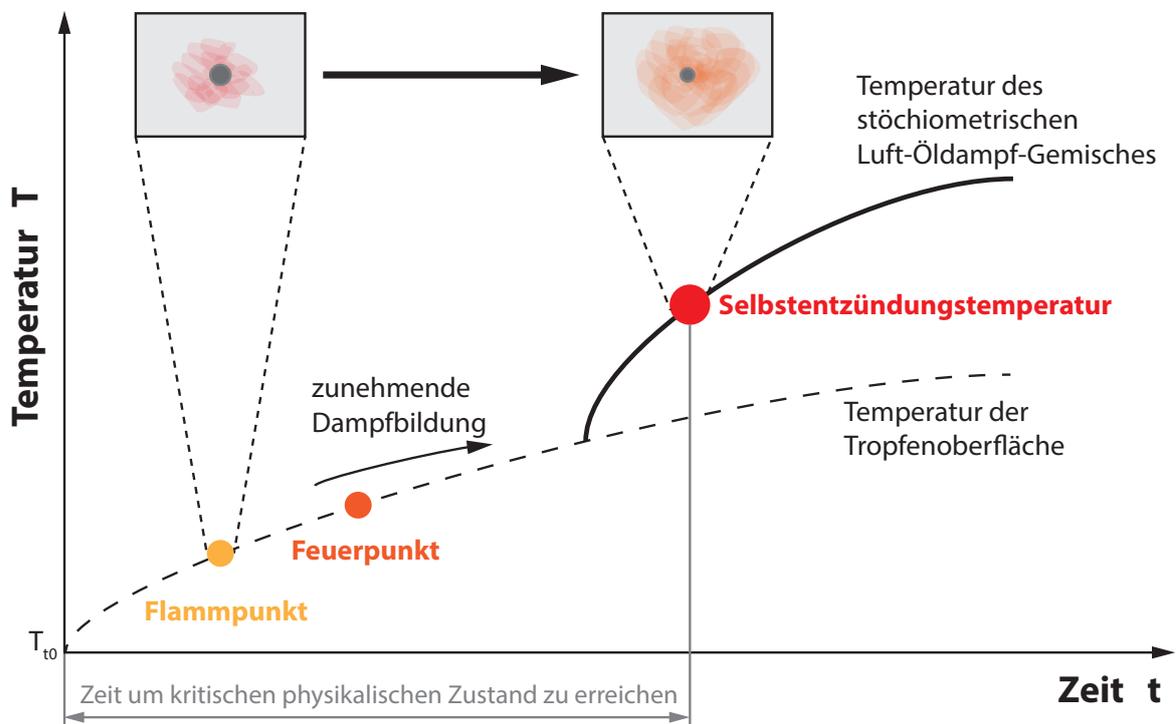
Aufgrund der metall-basierenden Struktur einzelner Additive ist davon auszugehen, dass diese in konzentrierter Form im Ringspaltbereich, durch die Verdampfung des Basisöls, vorliegen. Aus diesem Grund haben Miyasaka et al. [53] sowie Hayakawa et al. [54] Additive wie Detergentien (Ca) und Antioxidantien (ZDDP und MoDTC) einzeln in verschiedenen Additivraten einem Testkraftstoff zugemischt. Über einen optischen Zugang wurden die Lichtemissionen in einem Monochromator in die spektralen Komponenten aufgelöst. Dies ermöglichte die Detektion von Formaldehyd über dessen Wellenlänge. Formaldehyd stellt eine charakteristische Spezies während der Niedertemperaturoxidation dar und ist daher ein Indiz für abnormale Verbrennungserscheinungen. Die Untersuchungen zeigten, dass vor allem Ca-basierende Detergentien einen signifikanten Einfluss auf abnormale Verbrennungsphänomene haben, während Zn- und Mo-basierende Additive weitestgehend unauffällig blieben.

Diese Ergebnisse stellen ein wesentliches Indiz für den Einfluss von Öltropfen auf das Vorentflammungsverhalten an hochaufgeladenen Ottomotoren dar, weshalb nachfolgend die Vorgänge der Tropfenzündung im Detail betrachtet werden. Speziell im Hinblick ölinduzierter Vorentflammungen ist die Kenntnis über das Verdampfungsverhalten von Tropfen und vor allem die ausreichende Dampfmenge zur Entflammung des umgebenden Gemisches essentiell.

## 3.2 Tropfenzündung

Grundsätzlich bedingt die Wärmezufuhr der Gasphase das Aufheizen eines Tropfens bis dieser seine Siedetemperatur erreicht. Anschließend erfolgt die Verdampfung und Durchmischung des Dampfes mit der umgebenden Gasphase bis ein zündfähiges Gemisch entsteht, welches schließlich zündet und das restliche Gemisch deflagrativ verbrennt [47].

Abbildung 3.3 zeigt schematisch die wesentlichen Schritte der Tropfenzündung im Hinblick auf ölinduzierte Vorentflammungen.



**Abbildung 3.3:** Wesentliche Schritte der Tropfenzündung ausgehend vom Flammpunkt bis hin zur Erreichung der Selbstentzündungstemperatur des Luft-Öldampf-Gemisches [55] (eigene Darstellung)

Bei der Tropfenzündung in Abbildung 3.3 wird durch stetige Wärmezufuhr aus der Gasphase zunächst der Flammpunkt eines Tropfens erreicht. Der Flammpunkt stellt die niedrigste Temperatur eines Stoffes dar, bei dem durch eine externe Zündquelle eine Entflammung der gebildeten Dämpfe möglich ist [56]. Im Gegensatz zum Flammpunkt, bei dem die Verdampfungsrate zu gering ist, um die Oxidation aufrecht zu erhalten, liegt beim Feuerpunkt bereits eine ausreichende Dampfmenge vor, um in einem offenen Tiegel die Verbrennung zu erhalten. Bei Vorentflammungen ausgelöst durch einen verdampfenden Öltropfen ist vor allem die Verdampfungsrate entscheidend. Diese bestimmt im Wesentlichen die Erreichung der Selbstentzündungstemperatur des Luft-Öldampf-Gemisches speziell unter Berücksichtigung der Zeitspanne, welche im motorischen Betrieb zur Verfügung steht, um diesen kritischen Zustand vor Einleitung des Zündfunken zu erreichen. Neben dem Erreichen der Selbstentzündungstemperatur ist zudem eine kritische Dampfmenge notwendig, welche genügend Energie bereitstellt, um über die Entflammung des Luft-Öldampf-Gemisches hinaus auch das umgebende Kraftstoff-Luft-Gemisch zu entzünden.

Entsprechend dem  $d^2$ -Gesetz ergibt sich die Tropfenverdampfung gemäß Gleichung 3.5 zu [57]:

$$d^2(t) = d_0^2 - \frac{8\lambda_g}{\rho_t \cdot c_{p,g}} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{c_{p,g} \cdot (T_\infty - T_t)}{\Delta h} \right] \quad (3.5)$$

$d$	....	Tropfendurchmesser
$\lambda_g$	....	Wärmeleitfähigkeit der Gasphase
$\rho_t$	....	Dichte des Tropfens
$c_{p,g}$	....	spezifische Wärmekapazität der Gasphase
$T_\infty - T_t$	....	Temperaturdifferenz zwischen Tropfenoberfläche und der Gasphase
$\Delta h$	....	Verdampfungsenthalpie

Die Tropfenverdampfung als Differenz von  $d(t) - d_0$  ist nur geringfügig von Stoffeigenschaften abhängig und wird vielmehr durch die Bedingungen der umliegenden Gasphase (vorrangig  $T_\infty - T_t$ ) bestimmt, sowie im Wesentlichen durch den ursprünglichen Tropfendurchmesser  $d_0$ . Zudem begünstigt die Nähe zu heißen Brennraumbereichen, wie beispielsweise die Auslassventile, zusätzlich die Verdampfung. Unter Berücksichtigung der notwendigen Zeit zur Ausbildung dieses kritischen physikalischen Zustandes der Selbstzündung wird deutlich, dass Vorentflammungen und speziell jene ausgelöst durch Öltropfen auf den Bereich niedriger Drehzahlen beschränkt sind.

Gleichung 3.5 zeigt, dass eine Verdoppelung des Ausgangsdurchmessers eine Vervierfachung der Verdampfungsrate bedingt. Damit bestimmen der ausgehende Tropfendurchmesser sowie die Temperatur der Gasphase entscheidend die Ausbildung einer ausreichenden Dampfmenge, welche erforderlich ist, um das umliegende Gemisch zu entzünden. Grundsätzlich erfolgt mit abnehmendem Tropfendurchmesser eine Reduktion der Zündverzugszeit [58]. Allerdings weisen sehr kleine Tropfen ein gegenläufiges Verhalten auf, da diese bereits vollständig verdampft sind noch bevor ein zündfähiges Gemisch gebildet werden konnte [47]. Diese Erkenntnisse korrelieren mit der Vorstellung einer entsprechenden Mindestzündenergie, um das Kraftstoff-Luft-Gemisch in einem Ottomotor vor Einleitung des Zündfunken zu entflammen.

Yasueda et al. [59] konnte an hochaufgeladenen Gasmotoren Verbrennungsanomalien, ausgelöst durch Öltropfen, beobachten. Aufgrund der nahezu ablagerungsfreien Verbrennung bei überstöchiometrischen Verhältnissen konnten weitere Ursachen ausgeschlossen werden. Entsprechend den Beobachtungen wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Kompressionsendtemperatur und der Vorentflammungsneigung hergestellt. Neben dem Erreichen der Selbstentzündungstemperatur des Öltropfens ist vor allem die Ausbildung eines stabilen Flammenkerns, welcher genügend Wärme freisetzt, um das umliegende Gas-Luft-Gemisch zu entzünden, entscheidend.

Anhand von Simulationsergebnissen zeigte Dahnz et al. [6] die Möglichkeit zur Tropfenzündung beim Überschreiten einer Gastemperatur zu Kompressionsende von 740K, sofern die Tropfentemperatur 500K erreicht. Diese Erkenntnisse bestätigen weiter die Hypothese zur Auslösung von Vorentflammungen durch abgelöste Öltropfen aus dem Ringspaltbereich.

Ohtomo et al. [58] zeigte durch umfangreiche Untersuchungen mit einem eigens entwickelten Injektor, der eine separate Temperatur- und Durchmesservariation der dosierten Öltropfen ermöglicht, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Tropfengröße und Zündverzugszeit. Hierbei wiesen kleine Initialdurchmesser eine deutlich kürzere Zündverzugszeit auf. Neben dem Tropfendurchmesser ist aber vor allem die Anfangstemperatur des eindosierten Tropfens entscheidend für die Vorentflammungstendenz. Die Untersuchungen zeigten weiters, dass die Verdampfungsrate und damit die gebildete Menge an Öldampf die Vorentflammungsfrequenz bestimmt und entsprechend der Theorie dieses Gemisch aus Öldampf, Kraftstoff und Luft entzündet. Eine vorhandene Flüssigphase verbrennt schließlich diffusiv in der Flammenfront. Des Weiteren konnte kein Unterschied zwischen dosierten Öltropfen ohne und mit Additivpaket festgestellt werden. Dies lässt die Vermutung zu, dass sofern ein Öltropfen in den Brennraum transportiert wird, vorrangig dessen physikalische Eigenschaften ( $T_t$ ,  $d_0$ ) entscheidend an der Auslösung einer Vorentflammung beteiligt sind.

Bevor nachfolgend ausführlich auf den aktuellen Stand der Technik hinsichtlich ölinduzierter Vorentflammungen eingegangen wird, sollen im nächsten Abschnitt die wesentlichen Charakteristika von Vorentflammungen näher dargestellt werden.

### 3.3 Stand der Technik in Bezug auf ölinduzierte Vorentflammungen

Dahnz et al. [6] zeigte nach systematischer Untersuchung aller möglichen *alternativen* Zündquellen im Brennraum anhand verschiedenster Prüfstandsuntersuchungen und Simulationsergebnissen, dass vor allem Öltropfen entscheidenden Einfluss auf das Vorentflammungsverhalten haben.

Unabhängig davon verdeutlichten die Ergebnisse von Palaveev et al. [35] anhand von Untersuchungen in einer RAPID COMPRESSION MASCHINE (RCM), dass durch die Präsenz von Öl in einem Iso-Oktan-Luft-Gemisch die Zündverzugszeit drastisch reduziert werden konnte. Dies lässt darauf schließen, dass extrem „zündungsfreudige“ Bestandteile im Motoröl vorhanden sind, die in der Lage sind, nach Ablösung von der Zylinderwand und noch im selben Zyklus, das Gemisch frühzeitig zu entflammen.

Zahdeh et al. [60] verdeutlichte anhand umfangreicher Untersuchungen, dass speziell Einspritzstrategie und Spraytargeting, entsprechend verstärkter Wandbenetzung und damit zunehmender Ölverdünnung, signifikanten Einfluss auf das Vorentflammungsverhalten haben. Zudem bekräftigen die Studien an Kolben mit verringerten Ringspaltvolumina und reduzierten Kolbenringvorspannungen, bei denen ein signifikanter Anstieg der Vorentflammungsfrequenz auftrat, die Hypothese, dass abgelöste Öl- und Kraftstofftropfen den Auslöser für Vorentflammungen darstellen. Optische Untersuchungen bestätigten zudem, dass der Ursprungsort einer Vorentflammung, im Gegensatz zu Glühzündungen, im Brennraum ständig variiert.

Dahnz et al. [61] veranschaulichte, dass ROZ bzw. MOZ nicht die besten Indikatoren zur Kraftstoffbewertung im Hinblick auf Vorentflammungen sind. Vor allem Kraftstoffe niedriger Volatilität führen zu erhöhter Wandbenetzung verbunden mit verstärkter Ablösung von Öltropfen in den Brennraum.

Amann et al. [62] bestätigt in ähnlicher Weise durch Variation der Kolbengeometrie und in weiterer Folge durch Vermeidung der Möglichkeiten zur Akkumulation von Öl- und Kraftstoff die angestellte Hypothese. Mittels Anfasen des Kolbens beim Ringspalt wurde der Flammenfront das Vordringen in diesen Bereich ermöglicht. Dies führte zu einer Verbrennung des akkumulierenden Öl-Kraftstoffvolumens und damit zu einer signifikanten Reduktion der Vorentflammungsfrequenz.

Ein weiteres Indiz für die Akkumulation von Öl- und Kraftstoff im Kolbenringspaltbereich zeigt Amann et al. [63], bei deren Untersuchungen jeweils in einem Vorentflammungszyklus eine signifikante Reduktion des Verbrennungsluftverhältnisses anhand der Lambdasonde detektiert wurde. Anhand dieser Ergebnisse wird vermutet, dass akkumulierte unverbrannte Kohlenwasserstoffe aus dem Kolbenringspaltbereich während einer Vorentflammung oxidiert werden. Obwohl nicht eindeutig bewiesen, ist davon auszugehen, dass diese gespeicherten Kohlenwasserstoffe maßgeblich an der Auslösung von Vorentflammungen beteiligt sind.

Zahdeh et al. [60], Waltner et al. [64] und vor allem Takeuchi et al. [65] zeigten in ausführlicher Weise, dass neben dem akkumulierten Öl-Kraftstoff-Volumen im Ringspaltbereich im Speziellen die einzelnen Motorölbestandteile einen signifikanten Einfluss auf die Vorentflammungsneigung haben. Neben den einzelnen Basisöleffekten, die anhand verschiedenster Grundöle dargestellt wurden, konnten insbesondere metall-basierende Detergentien als treibender Einflussfaktor für Vorentflammungen verifiziert werden.

Ebenso zeigte Welling et al. [66], dass neben den Basisöleigenschaften wie Viskosität und Dichte auch einzelne Additive einen signifikanten Einfluss auf das Vorentflammungsverhalten haben. Des Weiteren konnte durch Welling et al. [67], anhand direkter Dosierung von Öltropfen über einen Injektor innerhalb des Brennraums, ein klarer Zusammenhang zwischen dosierten Öltropfen und daraus resultierenden Vorentflammungen hergestellt werden.

Dingle et al. [68] verdeutlichte, anhand optischer Zugänge und direkter Dosierung von Öltropfen in den Brennraum, in eindeutiger Weise die Bewegung von Öltropfen im Brennraum sowie deren Entflammung und schließlich die Entzündung des Gemisches vor Einleitung des Zündfunken.

Anhand von CFD-Simulationsergebnissen konnte Heiß et al. [69] den „Öl- und Kraftstoffmechanismus“ als wahrscheinlichsten Auslöser für Vorentflammungen bestätigen. Gegen Ende der Kompression wird bei hochaufgeladenen Ottomotoren der superkritische Zustand der Tropfenzündung von Öl-Kraftstofftropfen erreicht. Dieser wird bei langkettigen Alkanen, wie sie in Motorölen zu finden sind, deutlich früher erreicht. Im Bereich des superkritischen Zustandes wird der Einfluss der Verdampfungsenthalpie<sup>1</sup> deutlich reduziert und es erfolgt eine Erhöhung der Verdampfungsrates, verbunden mit einer signifikanten Reduktion der Zündverzugszeit.

---

<sup>1</sup>im kritischen Punkt ist die Verdampfungsenthalpie gleich 0 [70]

Fujimoto et al. [71] sowie Hirano et al. [72] zeigten, dass vor allem metall-basierende Detergentien als wesentlicher Einflussfaktor von Vorentflammungen gelten. Untersuchungen mit unterschiedlichem Detergentanteil verdeutlichen speziell ab 1500ppm einen stark nichtlinearen Anstieg der Vorentflammungsereignisse. Zudem konnten die Auswirkungen von Antioxidantien wie Phosphor, Zink und Molybdän bestätigt werden, welche als Radikalfänger eingesetzt werden sowie Hydroperoxide binden und auf diese Weise die Vorentflammungsneigung deutlich reduzieren.

Magar et al. [45] gelang mittels modifiziertem Kurbelgehäuse, welches über kleine Kanäle die exakte Dosierung von Testölen in den Kolbenringpaltbereich ermöglichte, in eindeutiger Weise den Einfluss von Ölviskosität und Benetzungsverhalten auf die Vorentflammungsneigung darzustellen. Während erhöhte Viskosität den Öltransport in den Feuerstegbereich und damit die Anzahl abgelöster Öltropfen reduziert, erschwert ein verbessertes Benetzungsverhalten verbunden mit reduzierter Oberflächenspannung die Ausbildung von Tropfen und reduziert damit die Größe der abgelösten Tropfen. Die Analyse ölbezogener HC-Emissionen mittels Massenspektrometer, während und noch mehrere Zyklen nach einer Vorentflammung, zeigte einen signifikanten Anstieg und verdeutlicht damit die Eingangs erwähnte Hypothese, dass abgelöste Öltropfen maßgeblich für die Auslösung von Vorentflammungen verantwortlich sind.

Kuboyama et al. [73] konnte anhand laserinduzierter Fluoreszenz (LIF), über optische Zugänge in den Brennraum, die Auslösung einer Vorentflammung durch einen Öltropfen beziehungsweise ein Öl-Kraftstoff-Gemisch festhalten. Im Gegensatz zu bereits aufgezeichneten glühenden Partikeln, als Auslöser von Vorentflammungen, war es bislang nicht gelungen, mittels herkömmlichen optischen Methoden Öltropfen im Brennraum festzuhalten, da diese keinerlei Lichtemissionen, vor der Ausbildung eines ersten Flammenkerns, aufweisen. Daher wurde in diesem Fall die fluoreszierende Substanz Cumarin-6 dem Motoröl beigemischt. Die Aufnahmen zeigen letztlich in eindeutiger Weise, dass Öltropfen maßgeblich an der Auslösung von Vorentflammungen im gegenständlichen Fall beteiligt sind.

### 3.4 Transport von Öltropfen in den Brennraum

Das Motoröl muss im Verbrennungsmotor eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen, während es sehr hohen Temperaturen und sauren Verbrennungsprodukten ausgesetzt ist. Das Temperaturprofil reicht dabei von Kolbentemperaturen von 350°C bis hin zu Gastemperaturen von 550°C im Ringspaltbereich. Dies kann in weiterer Folge zu Ölverdampfung, Oxidation und Ablagerungsbildung führen. [74]

Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik gilt Motoröl derzeit als eine der wahrscheinlichsten Ursachen für das Auftreten von Vorentflammungen in hochaufgeladenen Ottomotoren. Zur isolierten Beurteilung von ölinduzierten Vorentflammungen gilt es zunächst die wesentlichen Einflussfaktoren für den Ölverbrauch zu bestimmen. Die Ursachen für den Ölverbrauch in einem direkteinspritzenden aufgeladenen Ottomotor sind [75]:

- Turboladerdichtung
- Ventilschaftdichtung
- Kurbelgehäuseentlüftung
- In-Zylinder Ursachen

Die In-Zylinder-Ursachen für den Ölverbrauch lassen sich nach Tornehed [75], gemäß Abbildung 3.4, wie folgt unterteilen.

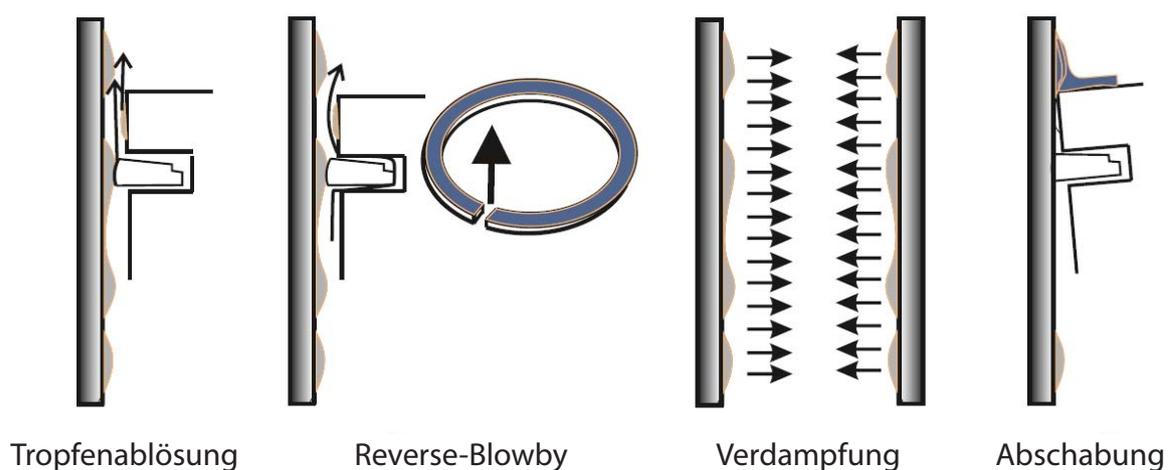


Abbildung 3.4: In-Zylinder-Ursachen für den Ölverbrauch [75]

Der in Abbildung 3.4 dargestellte Mechanismus der Tropfenablösung wird von einer Vielzahl an Studien [6], [65], [72] als Hauptursache für das Eindringen von Öl- und Kraftstofftropfen in den Brennraum genannt. Dahnz et al. [6] postuliert das Ablösen von Öltropfen aus dem oberen Ringspaltbereich im Bereich der negativen Kolbenbeschleunigung unmittelbar vor dem oberen Totpunkt.

Eine weitere Möglichkeit für den Transport von Öltropfen in den Brennraum stellt Reverse-Blowby dar. Simulationsergebnisse von Zahdeh et al. [60] verdeutlichen, dass über einen großen Kurbelwinkelbereich (Expansions- und Teile des Kompressionstakts) ungünstige Druckverhältnisse im Vollastbetrieb ein Rückströmen des Blowby in den Brennraum bewirken. Auf diese Weise eingebrachte Öl- und Kraftstofftropfen können in weiterer Folge die Ursache für eine Vorentflammung darstellen. Untersuchungen von Welling et al. [67] zeigten, dass während des Öffnens der Auslassventile Öltropfen aus dem Ringspaltbereich rückströmen und im darauffolgenden Zyklus eine Vorentflammung auslösen können.

Hohe Kolbentemperaturen verursachen zudem eine verstärkte Ölverdampfung, welche maßgeblich für den Ölverlust verantwortlich ist [76]. Eine typische Kenngröße für die Ölemissionen stellt der Noack-Wert dar. Dieser beschreibt den Verdampfungsverlust eines Motoröls über eine Stunde bei 250°C. Im Hinblick auf Vorentflammungen würden diese Ölemissionen bei aktivierter Kurbelgehäuseentlüftung bei erneutem Eintritt in den Brennraum, entsprechend der hohen Zündwilligkeit der Motoröle, zu einem verschlechterten Klopfverhalten führen. Allerdings steht vermehrtes Klopfen nicht in direktem Zusammenhang mit dem Auslösen von Vorentflammungen.

Neben dem Kolbenringpaket, verbunden mit der entsprechenden Kolbenringvorspannung [45], und den Motorbetriebsparametern sind vor allem die Öleigenschaften verantwortlich für den Öltransport durch das Ringpaket bis schließlich zur Akkumulation im Ringspaltbereich [77].

Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Kurbelgehäuseentlüftung auf die Vorentflammungsneigung in [78] zeigten, dass lediglich die Flüssigphase von Öl entscheidenden Einfluss auf die Vorentflammungsneigung hat, welche durch geeignete Abstimmung des Ölabscheiders beeinflusst werden kann. Die Gasphase hingegen zeigt keinerlei Auswirkungen auf die Vorentflammungsfrequenz.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen bei deaktivierter Kurbelgehäuseentlüftung und intakten Turbolader- und Ventilschaftdichtungen sind in weiterer Folge lediglich die In-Zylinder-Ursachen Tropfenablösung sowie Reverse-Blowby als relevant anzusehen.

## 3.5 Hypothesen zur Auslösung von ölunduzierten Vorentflammungen

Abbildung 3.5 zeigt die aktuellen Hypothesen zur Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen aus dem Ringspaltbereich, welche in weiterer Folge eine Vorentflammung auslösen.

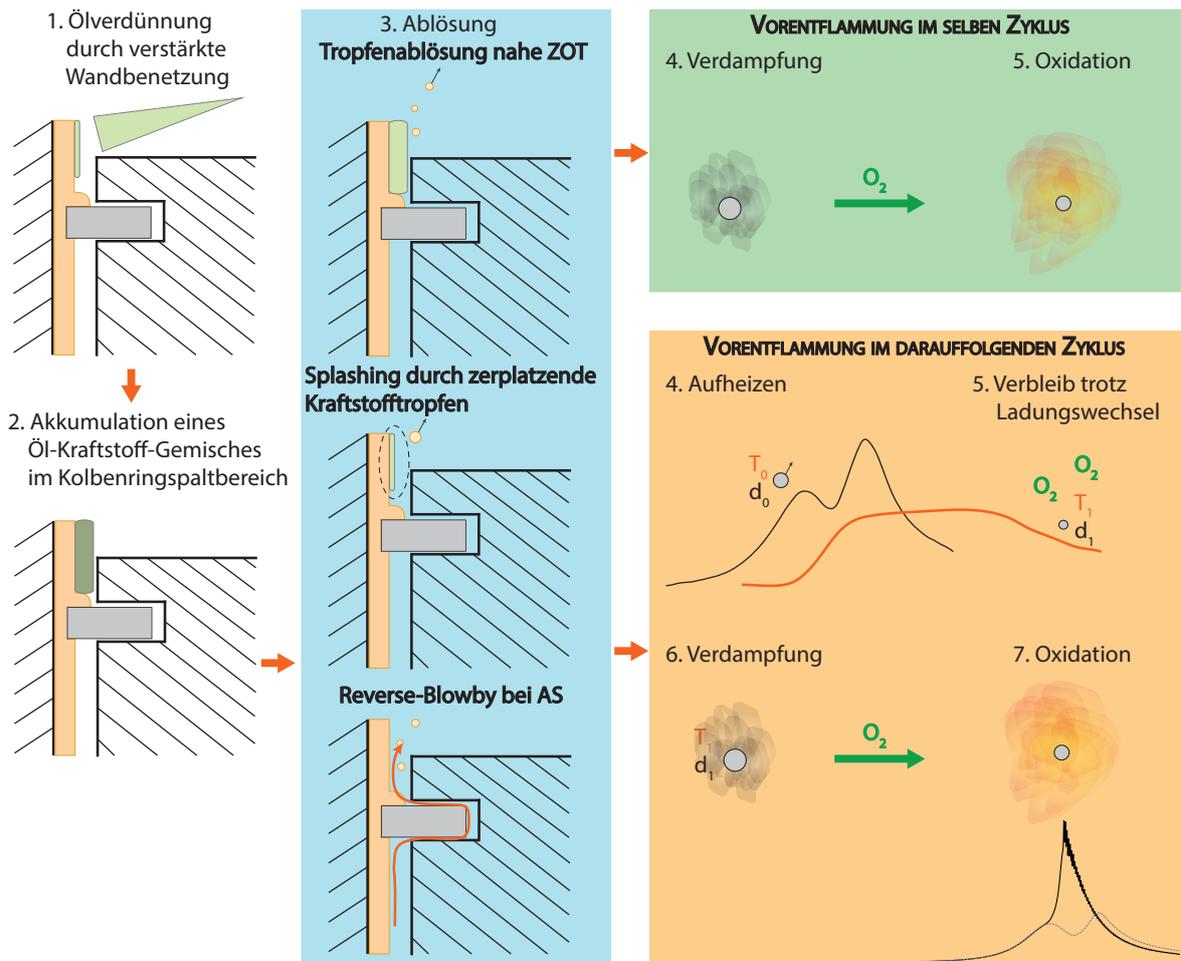


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Ablösemechanismus von Öl- und Kraftstofftropfen [6], [58], [68], [72], [79] (eigene Darstellung)

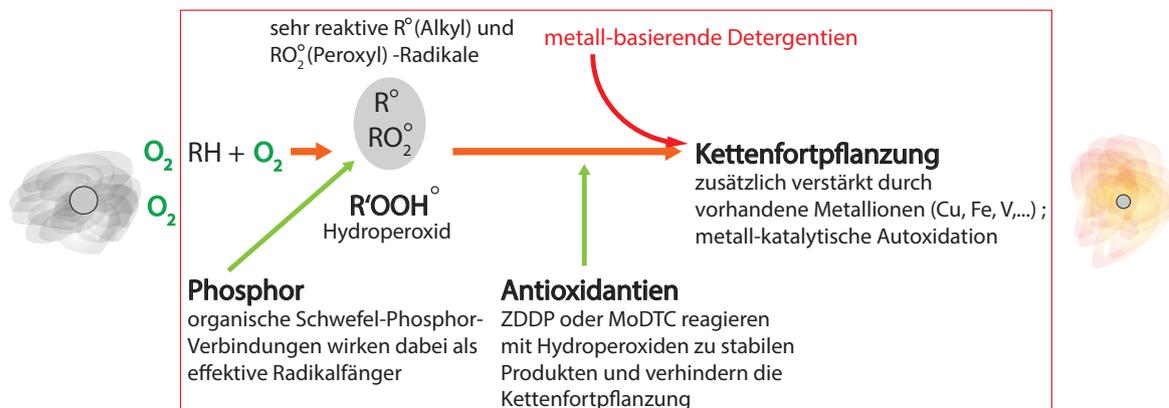
**Ölverdünnung** Die Direkteinspritzung des Kraftstoffs erhöht die Gefahr der Ölverdünnung aufgrund verstärkter Wandbenetzung. Vor allem im Bereich niedriger Drehzahlen und hoher Lasten kann es zu einer verschlechterten Gemischaufbereitung und Homogenisierung angesichts der hohen Einspritzmengen und der geringeren Ladungsbewegung kommen [38]. Dies erhöht weiter das Risiko der Ölverdünnung durch verstärkte Wandbenetzung.

**Akkumulation** Es ist davon auszugehen, dass über mehrere Arbeitsspiele Motoröl und Kraftstoff im Kolbenringspaltbereich akkumuliert werden. Die verstärkte Wandbenetzung sowie die Anwesenheit hochsiedender Kraftstoffkomponenten können eine deutliche Änderung der Viskosität und der Oberflächenspannung des Öls bewirken. Die damit verbundenen Änderungen des Benetzungsverhaltens begünstigen die Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen. Speziell bei seitlicher Injektorlage besteht die Wahrscheinlichkeit, dass durch erhöhte Penetration des Einspritzstrahls direkt Kraftstofftropfen auf der Zylinderwand auftreffen.

**Ablösung** Dieses akkumulierte Öl-Kraftstoff-Gemisch wird in regelmäßigen Abständen, bei Aufwärtsbewegung des Kolbens kurz vor dem oberen Totpunkt, in dem die maximale Verzögerung wirkt, abgelöst und gelangt in den Brennraum [6]. Weitere Möglichkeiten für das Ablösen von Öltropfen sind zerplatzende Kraftstofftropfen bei Wandaufprall (SPLASHING) [79] oder Reverse-Blowby beim Schließen der Auslassventile [60], [67]. Studien sowie eigene Ergebnisse zeigten zudem, dass speziell in Anwesenheit von flüssigem Kraftstoff durch verstärkte Wandbenetzung das Öl zunehmend verdünnt wird und damit auch die Vorentflammungsneigung steigt. Die Überlegung der verringerten Viskosität durch vermehrte Kraftstoffverdünnung ist dabei konsistent mit den Ergebnissen. Aus diesem Grund wurden im Zuge der durchgeführten Parametervariation einzelne Einflussfaktoren isoliert betrachtet, um deren Auswirkungen auf die Wandfilmbildung und damit auf das Vorentflammungsverhalten zu verifizieren.

**Verdampfung - Oxidation** Nachdem ein Öltropfen abgelöst wird, erfolgt die Verdampfung und in weiterer Folge die Ausbildung eines Flammenkerns. Nur wenn die Wärmefreisetzung dieses Flammenkerns größer als die Wärmeverluste an die Umgebung ist, kommt es zur Selbstzündung des umliegenden Kraftstoff-Luft-Gemisches. Andererseits erlischt der Flammenkern wieder [59]. Aus diesem Grund ist neben der Anzahl der abgelösten Öltropfen auch deren Größe entscheidend, um ausreichend Energie für die Entflammung des Gemisches bereitzustellen. Ohtomo et al. [58] zeigte, dass die Verdampfung der bestimmende Schritt ist. Vor allem die Tropfengröße sowie die Temperatur des Öltropfens sind dabei entscheidend. Durch Kontakt der verdampfenden Kohlenwasserstoffe RH mit Sauerstoff, siehe [Abbildung 3.6](#), bilden sich zu Beginn erste sehr reaktive Radikale (Alkyl- und Peroxylradikale) und in weiterer Folge Hydroperoxide. Diese Hydroperoxide sind sehr stabil und beschleunigen durch weitere Kettenfortpflanzung den Oxidationsprozess bis schließlich die Selbstzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches erfolgt [58]. Die Anwesenheit von Metallionen kann zusätzlich die Kettenfortpflanzung verstärken, sogenannte metall-katalytische Autoxidation von Kohlenwasserstoffen [80].

Fujimoto et al. [71] und Hirano et al. [72] zeigten anhand von Untersuchungen den positiven Einfluss von organischen Schwefel-Phosphor-Verbindungen und Verschleißschutzadditiven auf die Vorentflammungsneigung. Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Erkenntnissen in [80]. Organische Schwefel-Phosphor-Verbindungen gelten als wichtige Radikalfänger, während Antioxidantien wie Zinkdialkyldithiophosphat (ZDDP) oder Molybdändialkyldithiocarbamat (MoDTC) Hydroperoxide binden und damit weitere Kettenfortpflanzung verhindern. Im Gegensatz dazu gelten metall-basierende Detergentien als oxidationsbeschleunigende Substanzen, welche zu einer signifikanten Reduktion der Zündverzugszeit führen [72].



**Abbildung 3.6:** Schritte bei der Oxidation beginnend mit der Verdampfung eines Öltröpfchens bis zur Selbstzündung [58], [80], [81] (eigene Darstellung)

**Hypothese I** Nach Ablösung eines Öl- und Kraftstofftröpfchens verdeutlichte Dingle et al. [68] die Auslösung einer Vorentflammung im gleichen Zyklus der Ablösung.

**Hypothese II** Ohtomo et al. [58] und Döhler et al. [42] zeigten hingegen erst die Auslösung einer Vorentflammung durch einen Öl- und Kraftstofftröpfchen im darauffolgenden Zyklus aufgrund eines notwendigen Aufheizvorganges.

Ungeachtet dessen weisen diese Hypothesen auf die Notwendigkeit von abgestimmten Motorölen hin zur Prevention von ölinduzierten Vorentflammungen, welche als eine der wahrscheinlichsten Ursachen gelten. Im Rahmen einer statistischen Betrachtung dieser Hypothesen erschließt sich, dass Maßnahmen die zu einer Erhöhung des akkumulierten Volumens respektive zu einer häufigeren Befüllung dieses Volumens führen, in der Regel eine Verschlechterung des Vorentflammungsverhaltens bewirken.

## 3.6 Zusammenfassung

Die Auslösung von ölinduzierten Vorentflammungen ist einerseits von der Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen aus dem Ringspaltbereich, andererseits vom Verdampfungs- und Oxidationsverhalten der jeweiligen Tropfen abhängig.

Der aktuelle Stand der Technik zeigt, dass die Interaktion von unverdampftem Kraftstoff und Motoröl an der Zylinderwand signifikant die Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen beeinflusst. Allerdings sind die wesentlichen Effekte verschiedener Kraftstoffparameter auf die Ablösung sowie die Sensitivitäten hinsichtlich einzelner Betriebsparameter noch unklar. Das Verdampfungs- und Oxidationsverhalten der abgelösten Tropfen bestimmt maßgeblich, ob eine Vorentflammung des umliegenden Kraftstoff-Luft-Gemisches erfolgt. Unter Berücksichtigung der Zeitspanne, welche im motorischen Betrieb zur Verfügung steht, um den kritischen Zustand der Selbstentzündung vor Einleitung des Zündfunken zu erreichen, gilt die Verdampfungsrate als der bestimmende Schritt. Während die langkettigen Alkane des Motoröls deutlich geringere Zündverzugszeiten aufweisen, verstärkt die lokale Ölverdünnung durch schwersiedende Kraftstoffanteile zusätzlich die Verdampfungsrate. Einzelne Veröffentlichungen zeigten bereits, dass Motorölspezifikationen die Auslösung von Vorentflammungen entscheidend beeinflussen. Eine mögliche Wechselwirkung der Motorölkomponenten auf die Ablösung im Ringspaltbereich oder auf den Oxidationsprozess ist aber weiterhin unbekannt. Aus diesem Grund liegt, neben einzelnen Basisöleigenschaften, der Fokus der weiteren Betrachtungen auf der Klärung des Einflusses metall-basierender Additive auf das Vorentflammungsverhalten. Sowohl Detergentien als auch Antioxidantien stehen dabei unter Verdacht durch chemische Reaktionen entscheidend den Auslösemechanismus ölinduzierter Vorentflammungen zu bestimmen.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden diese offenen Fragen ausführlich behandelt, um zu einem besseren Verständnis in Bezug auf ölinduzierte Vorentflammungen beizutragen.

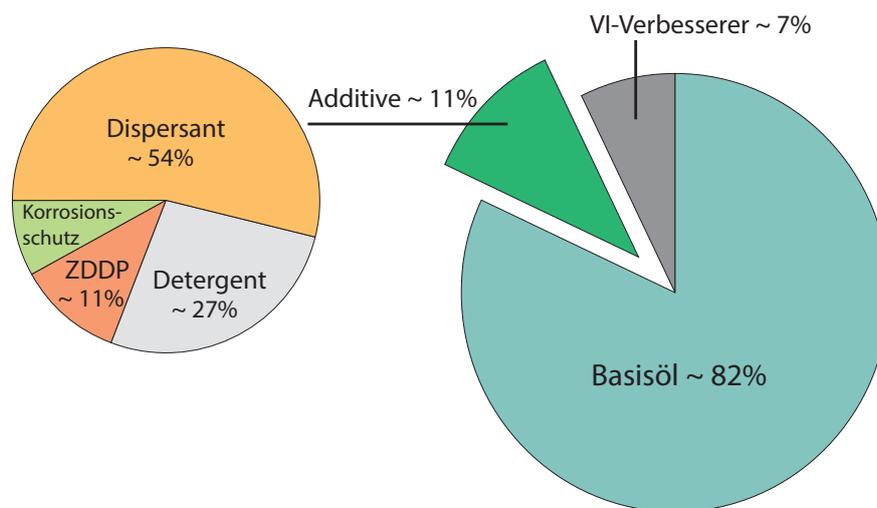
Vor allem einzelne Motorölspezifikationen haben entscheidenden Einfluss auf ölinduzierte Vorentflammungen, weshalb im nächsten Abschnitt die Anforderungen und Eigenschaften heutiger Motoröle im Detail dargestellt sind.

## 4 Wesentliche Anforderungen und Eigenschaften heutiger Motoröle

Neben den wesentlichen Eigenschaften heutiger Motoröle wird vor dem Hintergrund, dass metall-basierende Additive entscheidenden Einfluss auf die Vorentflammungsneigung haben, der Aufbau und die Wirkungsweise von Detergentien und Antioxidantien in diesem Kapitel näher dargestellt. Grundsätzlich sind die Aufgaben heutiger Motoröle ausgesprochen vielseitig. Neben den Hauptaufgaben Verschleiß, Reibung und Kühlung müssen Motoröle zudem [82]:

- vor Ölalterung und Schaumbildung schützen,
- Korrosionsschutz bieten
- und die Sauberkeit des Verbrennungsmotors aufrecht erhalten.

Abbildung 4.1 zeigt die typische Zusammensetzung heutiger PKW-Motoröle.

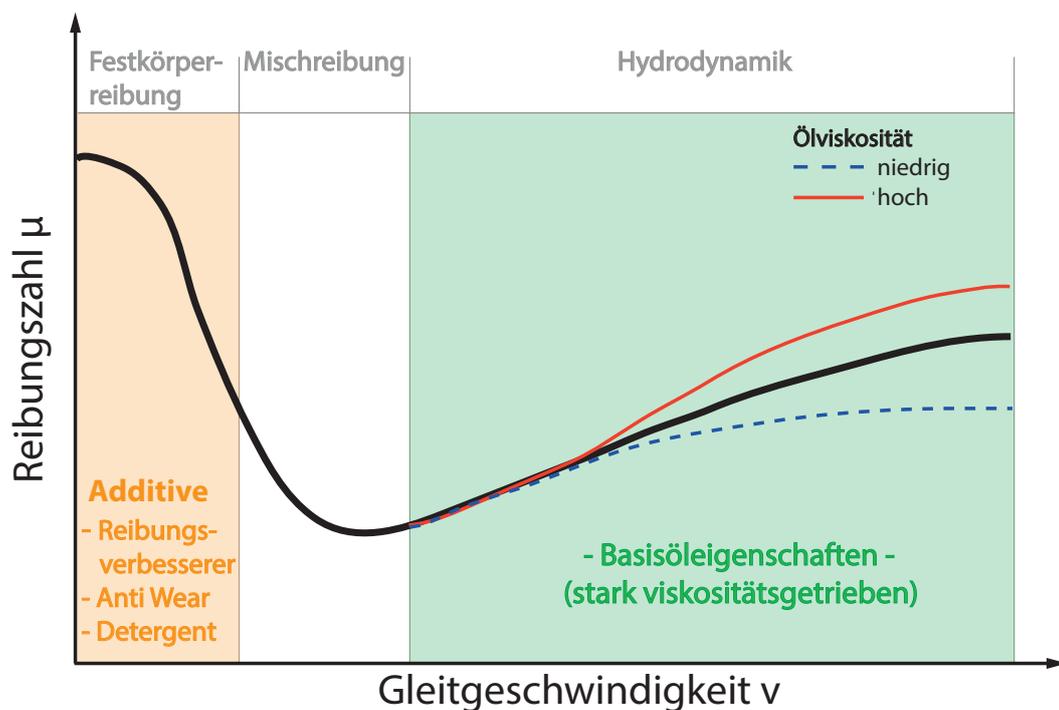


**Abbildung 4.1:** Zusammensetzung heutiger Motoröle [82], [83] (eigene Darstellung)

Der größte Teil des Motoröls wird zu 82% durch das Grundöl bestimmt, welches sowohl von dem verwendeten Rohöl als auch von den nachgeschalteten Raffinationsprozessen abhängig ist [81]. Die Anwendung von Mehrbereichsölen erfordert den Einsatz sogenannter Viskositätsindexverbesserer (VI-Verbesserer). Dabei handelt es sich um verschiedene Polymere (Polymethacrylate, Olefinopolymere, Polyisobuthylene), welche die signifikante Temperaturabhängigkeit der Viskosität vermindern und damit das Fließverhalten bei niedrigen Temperaturen verbessern sowie eine ausreichende Filmdicke bei hohen Temperaturen gewährleisten [12].

Aufgrund der immer vielseitigeren Anforderungsprofile sowie der erhöhten Ölwechselintervalle ist heute ein Additivanteil von rund 11% üblich. Die Additive verändern dabei im Wesentlichen die physikalischen aber auch die chemischen Eigenschaften des Grundöls, um das Öl vor verschiedensten Einflüssen im Motorbetrieb zu schützen und weitere Anforderungen zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die aschefreien Dispersants, Verschleißschutzadditive und insbesondere die metall-basierenden Detergentien zu nennen, welche üblicherweise mit bis zu 3% im Motoröl (entspricht einem Ca- bzw. Mg-Anteil von  $\sim 0.24\%$ ) vertreten sind [83].

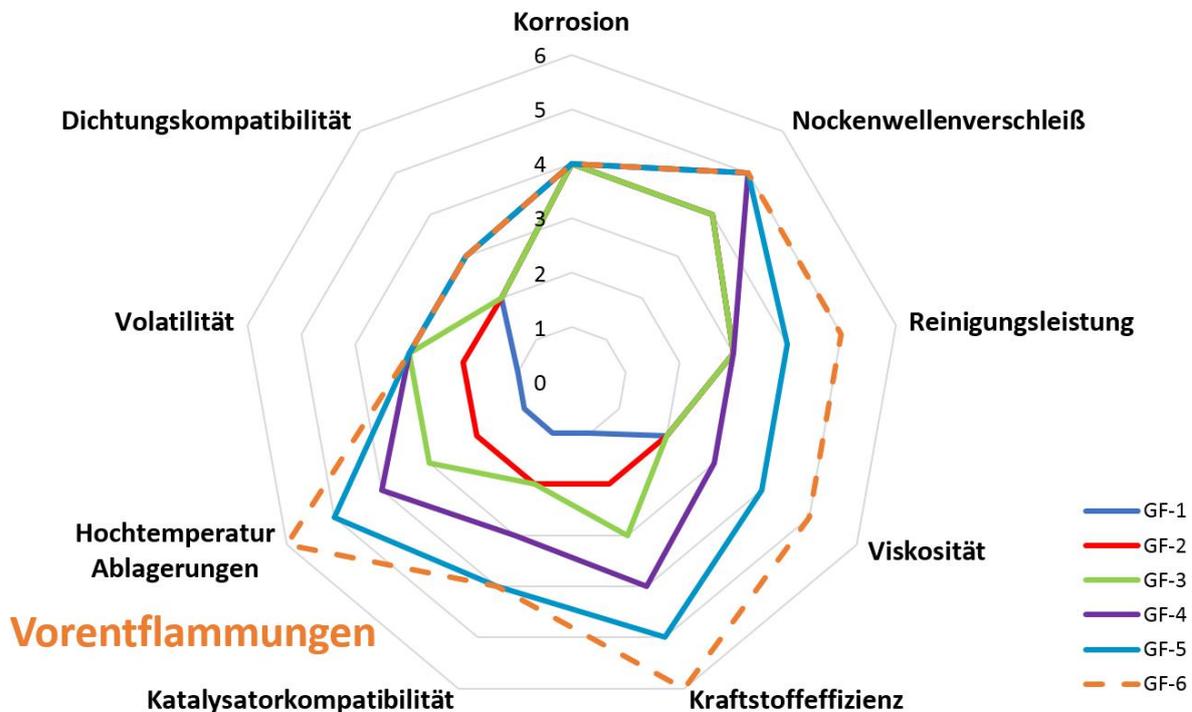
Eine der wesentlichen Aufgaben heutiger Motoröle ist die Reduktion der Reibung im Bereich der Hydrodynamik sowie der Schutz der Reibpartner und Oberflächen in Regionen, in denen das Ausbilden eines entsprechenden Schmierfilms nicht möglich ist [82]. Zur besseren Übersicht veranschaulicht Abbildung 4.2 die Reibungsverhältnisse anhand einer Stribeckkurve sowie den Einfluss heutiger Motoröle.



**Abbildung 4.2:** Einfluss der Basisöleigenschaften sowie einzelner Additive auf die Reibungsverhältnisse [84] (eigene Darstellung)

Im Bereich der Hydrodynamik in der eine ausreichende Schmierfilmdicke, beispielsweise in den Hauptlagern, vor übermäßigem Verschleiß schützt, ist vor allem die Viskosität des Basisöls entscheidend. Dahingegen sind nahe dem Mischreibungsgebiet die Additive Reibungsverbesserer, Anti-Wear und Detergent für den Oberflächenschutz verantwortlich. [84]

Abbildung 4.3 veranschaulicht die künftigen Anforderungen an Motoröle mit Einführung der neuen ILSAC-Spezifikation (INTERNATIONAL LUBRICANTS STANDARDIZATION AND APPROVAL COMMITTEE) GF-6.



**Abbildung 4.3:** Künftige Anforderungen an Motoröle mit Einführung der neuen ILSAC-Spezifikation GF-6 [4] (eigene Darstellung)

Im Vergleich zu den vorangegangenen Spezifikationen ILSAC GF-1 bis GF-5 werden erstmals Maßnahmen zum Schutz gegen Vorentflamungen gefordert. Neben erhöhter Ölrobustheit, vor allem im Hinblick auf unterschiedliche Kraftstoffqualitäten in den verschiedenen Märkten, sowie erhöhtem Verschleißschutz entsprechend heutiger Motorapplikation (bspw. Start-Stopp Funktion) ist der Schutz gegen Vorentflamungen bei Downsizingmotoren die wesentliche Neuerung gegenüber den vorangegangenen ILSAC-Spezifikationen.

Diese Forderung nach einer nahezu ganzheitlichen Betrachtung der Ölformulierung bestätigt zum einen, dass Motoröl eine der wahrscheinlichsten Ursachen zur Auslösung von Vorentflamungen ist, und zum anderen, dass auch seitens der Zertifizierung an weiteren Lösungen gearbeitet wird, um die Vorentflamungsproblematik zu entschärfen und weiteres CO<sub>2</sub>-Potential zu erschließen.

## 4.1 Basisöleigenschaften

Grundsätzlich werden die verschiedenen Basisöle je nach Raffinationsprozess in die fünf, vom AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) vorgeschlagenen, Gruppen eingeteilt. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die entsprechenden API-Gruppen.

**Tabelle 4.1:** API-Klassifizierung der Basisöle [80]

API-Gruppe	gesättigte HC [%]	Aromaten [%]	VI [-]	Schwefel [%]
I	<90	>10	$\geq 80, <120$	$\geq 0.03$
II	$\geq 90$	<10	$\geq 80, <120$	<0.03
III	$\geq 90$	<10	$\geq 120$	<0.03
IV	Polyalphaolefine PAO			
V	alles außer Gruppe I-IV (Ester,...)			

Bei den Basisölen der API-Gruppen I und II handelt es sich um reine Mineralöle, welche sich in der Regel durch eine verstärkte Entparaffinierung und weitere Reinigungsschritte (Isomerisierung) von einander unterscheiden [81].

In Gruppe III reihen sich sogenannte Hydrocracköle ein. Motoröle der Gruppe III sind entweder reine Mineralöle oder enthalten bereits Anteile an synthetischen Ölen. Durch den weiteren Verarbeitungsschritt des HYDROCRACKENS werden unter Gegenwart von Wasserstoff höhermolekulare Kohlenwasserstofffraktionen in Zwischenprodukte umgewandelt und auf diese Weise der Viskositätsindex maßgeblich verbessert [80]. Zudem weisen diese Motoröle eine exzellente Löslichkeit von Additiven auf [81].

Bei den POLYALPHAOLEFINEN (PAO) handelt es sich um synthetische polymerisierte Basisöle, hergestellt aus kleinen Molekülen. PAO zeichnen sich durch ihr exzellentes Tieftemperaturverhalten und geringste Verdampfungsverluste aus [85]. Neben einer sehr guten thermischen Stabilität weisen sie allerdings eine schlechte Additivlöslichkeit auf [81].

Gruppe V umfasst jene Öle, welche nicht in die Gruppen I-IV einzuteilen sind. Übliche Vertreter dieser synthetischen Öle sind verschiedene Phosphat- und Polyolester aber auch Öle auf Glycol- und Silikonbasis [85]. Diese Motoröle zeichnen sich durch außerordentliche thermische Stabilität aus und weisen einen Viskositätsindex von bis zu 190 auf [85]. Aufgrund des deutlich höheren Preisniveaus gegenüber Gruppe I-III finden heute, bis auf wenige Ausnahmen, vorrangig Hydrocracköle Einsatz.

Im Folgenden werden die wesentlichen Grundöleigenschaften, welche auch im Rahmen der Basisöluntersuchungen betrachtet werden, im Detail dargestellt.

**Viskosität** Gemäß DIN 1342 definiert der Begriff Viskosität die Eigenschaft eines Stoffes unter Einwirkung einer Spannung zu fließen und irreversibel deformiert zu werden [86]. Heutige Motoröle für den Einsatz im PKW-Bereich, sogenannte Mehrbereichsöle, werden nach SAE J300 (*Society of Automotive Engineers*) in verschiedene Viskositätsklassen eingeteilt. Neben der kinematischen Viskosität bei 100°C (KV100) ist vor allem die HIGH TEMPERATURE HIGH SHEAR-Viskosität (HTHS) von entscheidender Bedeutung. Dabei handelt es sich um einen fiktiven Viskositätswert eines Motoröls bei 150°C und einem Geschwindigkeitsgefälle von  $10^6 \text{s}^{-1}$ , welcher annähernd die Verhältnisse in hochbelasteten Regionen wie Kurbelwellenhauptlager oder Kolbenringpalt beschreibt [82].

**Volatilität** Die Volatilität eines Motoröls wird über den Verdampfungsverlust nach Noack gemäß ASTM D-5800 (*American Society for Testing and Materials*) bestimmt. Dabei wird in einem Verdampfungstiegel unter konstantem Luftstrom eine Ölprobe für eine Stunde auf 250°C erhitzt und die Gewichtsabnahme bestimmt [87]. Der Verdampfungsverlust ist ein Maß für den Ölverbrauch und die Ölemissionen. Je höher der Verdampfungsverlust ist, desto zähflüssiger wird das Öl und erhöht in weiterer Folge den Kraftstoffverbrauch und den Verschleiß.

**Flammpunkt** Nach DIN 51755 bezeichnet der Flammpunkt die niedrigste Temperatur, bei der sich in einem offenen bzw. geschlossenen Tiegel aus Motoröl, bei einem Druck von 1013mbar, in ausreichendem Maß Dämpfe entwickeln, so dass sich im Tiegel ein durch Fremdzündung entflammbares Dampf-Luft-Gemisch bildet [56]. Neben dem Siedebeginn gibt der Flammpunkt entscheidenden Einblick über das Selbstzündungsverhalten des Motoröls und ist damit eine wichtige Kenngröße im Rahmen der Vorentflammungsuntersuchungen.

**Sulfatasche** Die Sulfatasche, welche nach DIN 51575 bestimmt wird, ist ein Maß für die mineralischen Rückstände, die beim Veraschen von Mineralölen unter Zugabe von Schwefelsäure als Sulfat zurückbleiben. Die Zugabe von Schwefelsäure unmittelbar vor dem Glühen verhindert, dass neben der erwünschten Verflüchtigung der organischen Bestandteile (Asche) auch Alkalihalogenide in die Gasphase übergehen und damit nicht mehr erfasst werden [88]. Vor allem metall-organische Verschleißschutzadditive (Zink)

sowie metall-basierende Detergentien (Calcium, Magnesium) tragen maßgeblich zur Aschebildung bei.

**Gesamtbasenzahl** Die Gesamtbasenzahl, häufig auch als TOTAL BASE NUMBER TBN bezeichnet, wird gemäß DIN ISO 3771 bestimmt. Diese ist die Menge an Perchlorsäure, angegeben in äquivalenter Anzahl Milligramm Kaliumhydroxid mgKOH, die erforderlich ist, um alle basischen Bestandteile einer 1g-Probe zu neutralisieren [89]. Vor allem Detergentien bestimmen maßgeblich die basische Reserve und erhöhen damit die Alterungsbeständigkeit des Motoröls.

## 4.2 Eigenschaften wesentlicher Additive

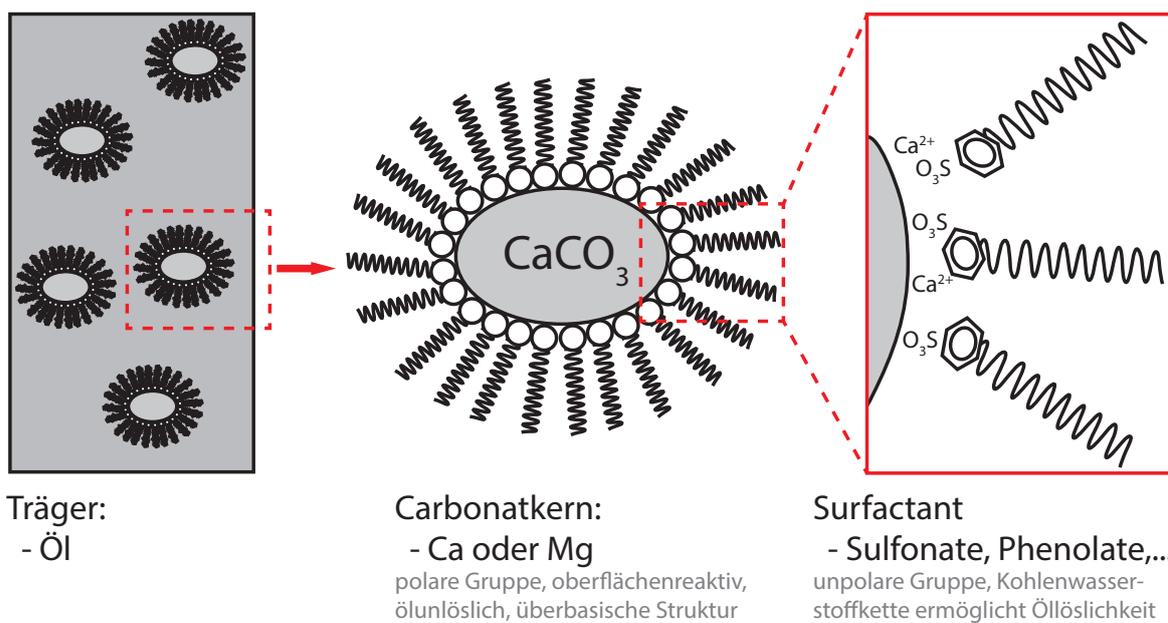
Öladditive verbessern gezielt die Eigenschaften des Grundöls. Die Hauptaufgaben der Additive sind zum einen der Ölschutz durch Antioxidantien und Anti-Schaumbildner, zum anderen der Schutz der Oberflächen und Reibpartner. Der Oberflächenschutz unterteilt sich in:

- Reinigungsadditive (Detergentien, Dispersants),
- Verschleißschutzadditive (Anti-Wear) und
- Reibungsverbesserer.

Nachfolgend werden diese Vertreter des Oberflächenschutzes näher dargestellt. Es ist allerdings festzuhalten, dass manche Additive auch mehrere Funktionen (engl.: *multifunctional lubricant additives*) vereinen können. Beispielsweise sind Zinkdialkyldithiophosphate ZDDP, vorrangig bekannt als Verschleißschutzadditive, auch sehr gute Oxidationsinhibitoren [90]. Ebenso zeichnen sich Molybdändialkyldithiocarbamate MoDTC neben ihren Eigenschaften als Reibungsverbesserer auch als gute Antioxidantien aus.

Vor allem Detergentien aber auch Antioxidantien, wie Zinkdialkyldithiophosphat oder Molybdändithiocarbamat, sind ihm Zuge der zunehmenden Vorentflammungsproblematik durch Motoröl verstärkt in den Fokus der Untersuchungen gerückt [65], [72]. Aus diesem Grund sind nachfolgend die wesentlichen Eigenschaften dieser beiden Gruppen näher dargestellt.

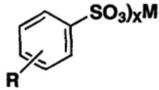
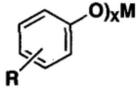
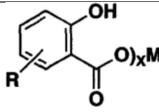
**Detergentien** Bei Detergentien handelt es sich um metall-basierende, waschaktive Substanzen (Ca, Mg), die der Bildung von Ablagerungen an thermisch belasteten Bauteilen entgegenwirken (bilden einen Schutzfilm mittels Adsorption [81]) und saure Verbrennungsprodukte im Öl neutralisieren. Sie halten ö unlösliche Verbrennungsrückstände und Oxidationsprodukte in Suspension und verhindern damit Schlammablagerungen und Öleindickungen. Abbildung 4.4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau sowie die chemische Struktur solcher überbasischen (engl.: *overbased*) Detergentien. Der Begriff überbasisch bezieht sich in diesem Zusammenhang auf das Verhältnis zwischen dem Metallcarbonat und dem Säureanteil der öllöslichen Gruppe (engl.: *Surfactant*). Diese werden in der Regel überbasisch ausgeführt, um die nötige Neutralisation im Öl (basische Reserve) bereitzustellen [91]. Der Kern aus Calcium- oder Magnesiumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$  bzw.  $\text{MgCO}_3$ ) der oberflächenreaktiven Gruppe erlaubt die entsprechende Neutralisation im Motoröl, während der Surfactant Schlammablagerungen und Öleindickungen durch Suspension verhindert. [12], [82], [84]



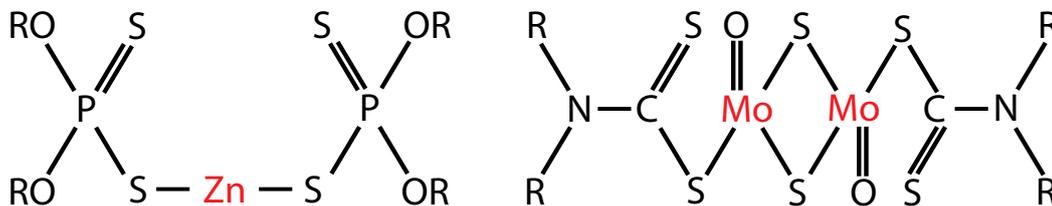
**Abbildung 4.4:** Aufbau und chemische Struktur überbasischer Detergentien [92] (eigene Darstellung)

Grundsätzlich finden verschiedene Surfactants, wie beispielsweise Sulfonate, Phenolate oder Salicylate, Anwendung zur Stabilisierung des Kerns aus Metallcarbonat. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Surfactants. Der Begriff *M* in den chemischen Strukturen der Detergentien repräsentiert die entsprechenden Erdalkalimetalle Calcium beziehungsweise Magnesium. Aufgrund des niedrigeren Molekulargewichts hat Magnesium eine geringere Neigung zur Aschebildung im Vergleich zu Calcium [92].

**Tabelle 4.2:** Eigenschaften und Struktur verschiedener Surfactants [91]

Eigenschaft	Sulfonate	Phenolate	Salicylate
chemische Struktur			
TBN [mgKOH/g]	0-500	0-300	0-300
Oxidationsstabilität	schlecht	gut	sehr gut
Reinigungsleistung	gut	gut	exzellent
Rostinhibition	gut	niedrig	niedrig
Oxidationsresistenz	keine	sehr gut	sehr gut

**Antioxidantien** Wie bereits erwähnt, zeigen sowohl ZDDP als auch MoDTC sehr gute antioxidantische Eigenschaften, die speziell im Hinblick auf ölunduzierte Vorentflamungen zunehmend von Interesse sind. Abbildung 4.5 zeigt schematisch den chemischen Aufbau von ZDDP und MoDTC. *R* repräsentiert in diesem Fall die Alkylgruppe des Alkanes.



**Abbildung 4.5:** Chemische Struktur von Zinkdialkyldithiophosphat ZDDP (links) und Molybdändialkyldithiocarbamat MoDTC (rechts) [90], [93] (eigene Darstellung)

Grundsätzlich unterscheidet man bei Antioxidantien zwischen Radikalfängern und Hydroperoxidzersettern. Metall-basierende Verbindungen aus Übergangsmetallen, wie beispielsweise Mo oder Zn, besitzen die Eigenschaft, in verschiedenen Oxidationszuständen vorzuliegen [80]. Auf diese Weise können bestimmte Übergangsmetalle, gemäß den Gleichungen 4.1-2, sowohl Alkyl- als auch Peroxyl-Radikale zu stabilen Produkten oxidieren [80]. *M* beschreibt in den Gleichungen 4.1-2 das Übergangsmetall Molybdän.



Vor allem Molybdän erweist sich als sehr effektiv bei der Stabilisierung von Motorölen. MoDTC zeigt neben seinen Eigenschaften als Radikalfänger durch Molybdän auch großen Einfluss als Hydroperoxidzersetzer aufgrund der Dialkyldithiocarbamat-Struktur [80]. Im Gegensatz zu Radikalfängern wirken diese erst in zweiter Instanz und verhindern eine weitere Kettenfortpflanzung durch die Zersetzung von Hydroperoxiden in stabile Produkte. Insbesondere ZDDP zeigt mit Abstand den größten Effekt als Oxidationsinhibitor durch Zersetzen von Hydroperoxiden in stabile Produkte.

## 5 Prüfstand und Messtechnik

Im folgenden Abschnitt werden im Detail der Prüfstands Aufbau, der verwendete Versuchsträger und das entsprechende Messequipment dargestellt.

### 5.1 Versuchsträger

Als motorischer Versuchsträger diente der Typ N18B16 aus der Kooperation der BMW AG und PSA Peugeot Citroën, welcher einen aktuellen Vertreter des Downsizing-Konzeptes darstellt und sich daher besonders für die Durchführung der vorgesehenen Untersuchungen eignet. Das verwendete Triebwerk zeichnet sich unter anderem durch folgende Merkmale aus [94]:

- Direkteinspritzung
- Twin-Scroll-Turboaufladung
- einlass- und auslassseitige Nockenwellen-Phasensteller (Doppel-VANOS)
- vollvariabler Ventilhub - einlassseitig (VALVETRONIC)

Tabelle 5.1 listet die wesentlichen Kenndaten des Versuchsträgers im Detail auf.

**Tabelle 5.1:** Kenndaten des Versuchsträgers vom Typ N18B16 [94]

Bezeichnung	Einheit	
Bauart	Reihen-Vierzylinder R4	
Gemischaufbereitung	Homogenbetrieb $\lambda=1$	
Injektorlage	seitlich	
Hubraum	cm <sup>3</sup>	1598
Hub / Bohrung	mm	85.8 / 77.0
max. Leistung	kW/PS	135/184 bei 5500min <sup>-1</sup>
max. Drehmoment	Nm	240 bei 1600min <sup>-1</sup>
Verdichtungsverhältnis	1:10.5	
Zündfolge	1-3-4-2	
Kraftstoffauslegung	ROZ	91-98 max. E25
Abgasnorm	EU5	
Abgassystem	3-Wege-Katalysator, motornah	

## 5.2 Betriebsstoffe

Neben den untersuchten Testölen wurde als Referenzöl das voll synthetische Motoröl Castrol Edge 5W-30, gemäß ACEA-Spezifikationen (ASSOCIATION DES CONSTRUCTEURS EUROPÉENS D'AUTOMOBILES) Klasse C3 und BMW Longlife-04 Freigabe, verwendet. [Tabelle 5.2](#) gibt eine Übersicht der wesentlichen Eigenschaften des sauerstofffreien Referenzkraftstoffs E0 ROZ95. Zudem wird reines Ethanol, vergällt mit 1% Benzinkraftstoff zur Herstellung von Ethanol-Benzin-Versuchskraftstoffen (Splash-Blends) verwendet.

**Tabelle 5.2:** Kenndaten des Referenzkraftstoffs E0 ROZ95

Bezeichnung	Testmethode	Einheit	Ergebnis
RON	ASTM D2966		95.5
MON	ASTM D2700		86.0
Dichte bei 15°C	EN ISO 12185	kg/L	0.748
Dampfdruck bei 37.8°C	EN 13016-1	kPa	59.6
Aromaten	ASTM D1319	%v	33.1
Olefine	ASTM D1319	%v	5.2
Paraffine	ASTM D1319	%v	61.7
Sauerstoff	EN 13132	%v	<0.25
Kohlenstoff	ASTM D5291	%m	86.8
Wasserstoff	ASTM D5291	%m	12.9
unterer Heizwert	IP 12	MJ/kg	43.1

Die wesentlichen Eigenschaften der untersuchten Ethanolkraftstoffe, der Testkraftstoffe unterschiedlicher Volatilität sowie der verschiedenen Testöle sind ausführlich in [Kapitel 7](#) dargestellt.

## 5.3 Prüfstandsaufbau

[Abbildung 5.1](#) zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsträgers, dessen Peripherie, die verwendete Messtechnik sowie die Einbindung in die Prüfstandssteuerung. Besonderes Augenmerk ist hier vor allem auf die externe Aufladeeinheit, die Spitzendruckabschaltung sowie die Partikelmesstechnik (AVL Particle Counter) zu legen.

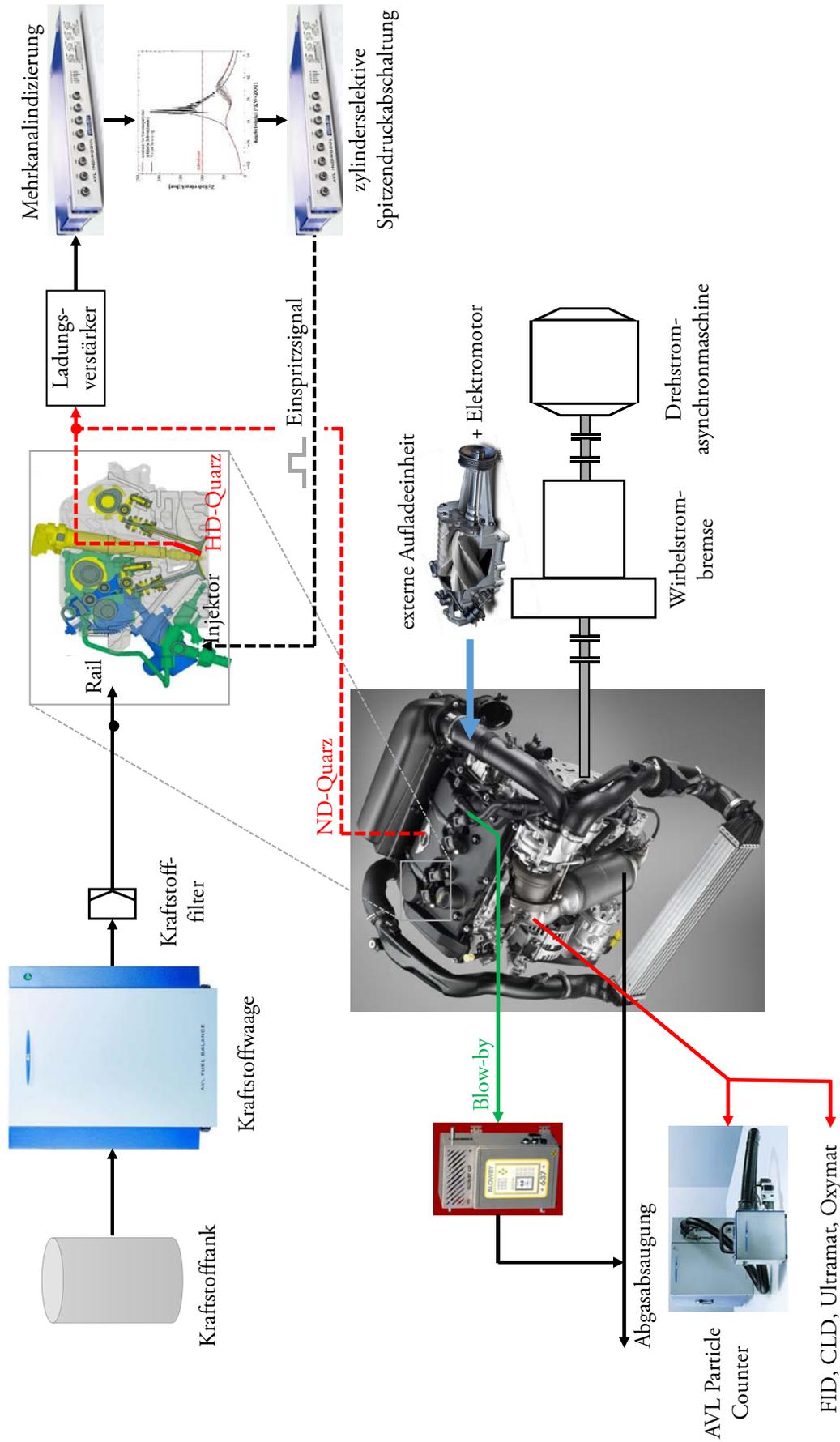


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Motorprüfstands

Direkt nach dem Luftfilter wurde ein extern angetriebener Kompressor in die Saugstrecke vor dem Verdichter des Turboladers eingebunden, um im Bereich niedriger Drehzahlen, durch erhöhte Aufladegrade, Vorentflammungen zu provozieren.

Das von der Firma AVL List GmbH zur Verfügung gestellte Entwicklungssteuergerät erlaubte diverse Applikationsmöglichkeiten zur gezielten Beeinflussung verschiedenster Motorparameter, wie Zündzeitpunkt, Einlasssteuerzeit, Einspritzzeitpunkt, Einspritzstrategie und Lambda-Regelung, wodurch die Vorentflammungsuntersuchungen, entsprechend einer gewählten Testmethodik, erst ermöglicht wurden.

Zur Vermeidung von Quereffekten bei den Vorentflammungsuntersuchungen durch Öleintrag über die Kurbelgehäuseentlüftung wurde diese über ein Blowby-Meter [95] direkt in die Abgasabsaugung geführt.

Die Messung der Rohabgasemissionen erfolgt über verschiedene Entnahmeleitungen, welche über einen beheizten Filter und in weiterer Folge über beheizte Probeleitungen mit den jeweiligen Messgeräten verbunden sind.

Die normgerechte Messung der Partikelanzahl im Rohabgas erfolgt gemäß dem *Particle Measurement Programme* (PMP) und der UN-ECE Regulation 83 mittels Particle Counter der Firma AVL List GmbH. Dieser erlaubt die Detektion von Partikeln in einem Spektrum von 23nm bis 2.5 $\mu$ m mit einer Effizienz von 50 $\pm$ 12% [96], [97].

In Tabelle 5.3 ist ein Überblick der verwendete Messtechnik dargestellt.

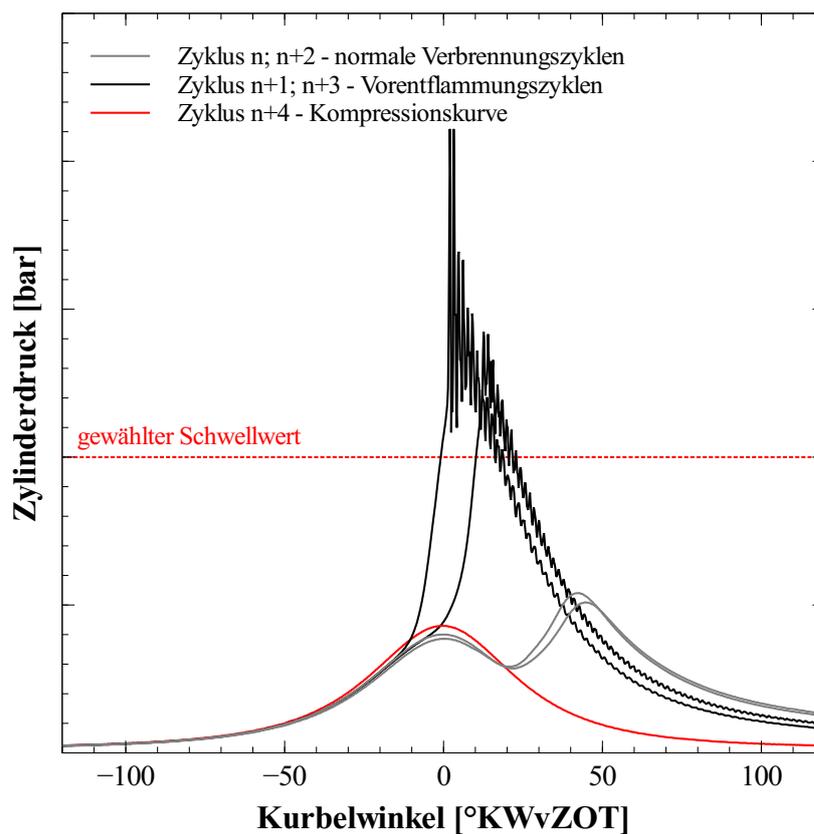
**Tabelle 5.3:** Verwendete Messtechnik

Messung	Hersteller	Beschreibung
Kraftstoffverbrauch	AVL List GmbH	Kraftstoffwaage
Verbrennungsluftverhältnis	NGK GmbH	Lambdasonde TC6110 Typ D
Winkeländerung	AVL List GmbH	Winkelmarkengeber Typ 365C
CO, CO <sub>2</sub> -Bestimmung	Siemens AG	Ultramat 6 / Oximat 6
O <sub>2</sub> -Bestimmung	Siemens AG	Ultramat 6 / Oximat 6
HC-Bestimmung	TESTA GmbH	FID 123
Blowby	Kristl, Seibt & Co	Blowby-Meter Typ 627
Indizierung	AVL List GmbH	Indiziersystem Indimodul 621
	Kistler GmbH	Hochdrucksensoren Typ 6041B
	Kistler GmbH	Niederdrucksensor Typ 4075A
Partikelzählung	AVL List GmbH	Particle Counter Typ 489

## 5.4 Zylinderselektive Spitzendruckabschaltung

Die Einbindung einer Spitzendruckabschaltung, zur Vermeidung selbstverstärkender Phänomene (sogenannte RUN-AWAYS) ausgelöst durch eine Vorentflammung, sowie die frühzeitige Unterbindung der bereits angesprochenen Vorentflammungsserien (siehe Kapitel 2.4.3), ist von größter Bedeutung. Während das bekannte und gut kontrollierbare Phänomen Klopfen durch Spätstellen der Zündung verhindert werden kann, ist diese Maßnahme bei Vorentflammungen wirkungslos. Die einzige Möglichkeit zur Vermeidung von Run-aways oder Vorentflammungsserien ist die zylinderselektive Unterbindung der Kraftstoffzufuhr. Aufgrund des sporadischen Auftretens von Vorentflammungen können lediglich nach der ersten Vorentflammung entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

Abbildung 5.2 verdeutlicht die Auslegung des Detektionskriteriums sowie die Funktionsweise der integrierten zylinderselektiven Spitzendruckabschaltung.



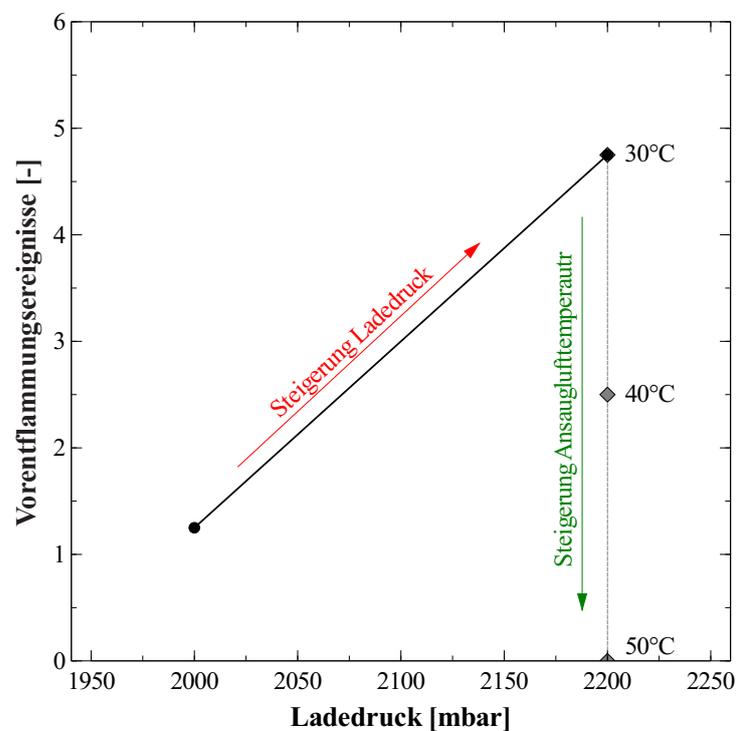
**Abbildung 5.2:** Auslegung des Detektionskriteriums und Funktionsweise der zylinderselektiven Spitzendruckabschaltung - dargestellt anhand des Zylinderdrucks für eine Reihe von aufeinanderfolgenden Verbrennungszyklen

Als Kriterium für die Detektion von Vorentflammungen wurde der Zylinderdruck herangezogen. Die Auslegung erfolgt in der Form, dass nach dem Auftreten von zwei Vorentflammungen innerhalb von fünf Verbrennungszyklen, welche den gewählten Schwellwert überschreiten, die Kraftstoffzufuhr in dem jeweiligen Zylinder für 30 Verbrennungszyklen unterbunden wird.

Ausgehend von einem normalen Verbrennungszyklus (Zyklus  $n$ ) tritt im darauffolgenden Zyklus ohne Vorankündigung eine Vorentflammung (Zyklus  $n+1$ ), begleitet von starkem Klopfen (Mega-Knock), auf. Eine wesentliche Eigenschaft von Vorentflammungen ist, dass diese, im Vergleich zu Glühzündungen, zumindest durch einen Zyklus regulärer Verbrennung (Zyklus  $n+2$ ) unterbrochen sind. Glühzündungen weisen in der Regel einen selbstverstärkenden Effekt durch eine immer weiter steigende thermische Belastung des Brennraums auf [18]. Diese typischen intermittierenden Serien zeigen sich mit dem erneuten Auftreten einer weiteren Vorentflammung (Zyklus  $n+3$ ) mit bereits moderatem Spitzendruck. Anhand von Abbildung 5.2 ist die Funktionsweise der zylinderselektiven Spitzendruckabschaltung deutlich an der Kompressionskurve (Zyklus  $n+4$ ) des deaktivierten Zylinders, in Folge der gesetzten Maßnahmen der Unterbindung der Kraftstoffzufuhr (FUEL CUT), zu erkennen.

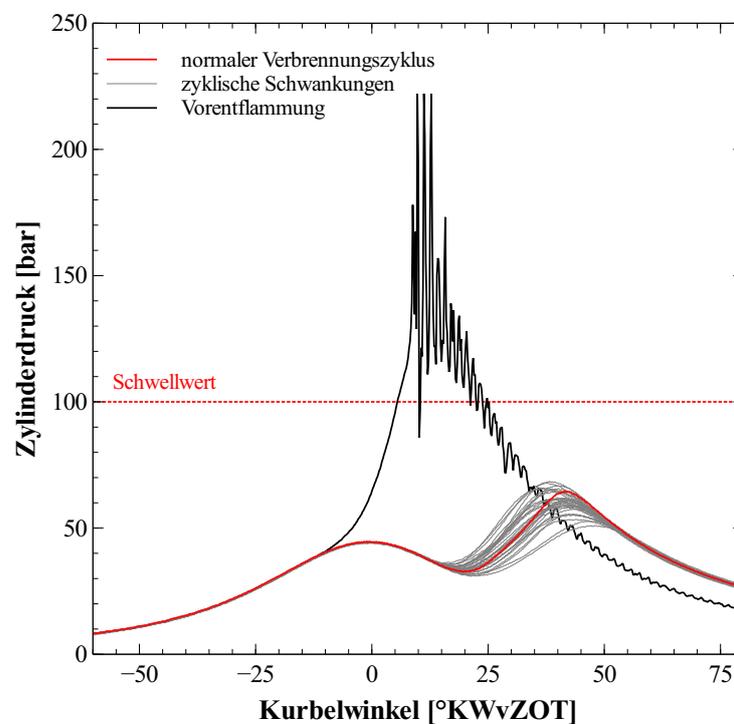
## 6 Basisuntersuchungen zur Entwicklung einer Testmethodik

Vor dem Hintergrund, dass unterschiedliche Ursachen wie beispielweise abgelöste Brennraumablagerungen oder heißes Restgas ebenso Vorentflammungen initiieren können, wurde zu Beginn dieser Untersuchungen eine Testmethodik entwickelt, um lediglich ölinduzierte Vorentflammungen zu verifizieren. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen wie [34], [98], welche über sukzessive Laststeigerung bewusst kritische Selbstzündungsbedingungen hervorgerufen haben, um die Vorentflammungsneigung einzelner Parameter zu bestimmen, wäre dieser Ansatz im vorliegenden Fall nicht zielführend. Zur Bewertung von ölinduzierten Vorentflammungen ist eine statistische Betrachtung notwendig, da die Öl-Kraftstoff-Interaktion an der Zylinderwand sowie eine damit einhergehende Akkumulation starken Einfluss auf ölinduzierte Vorentflammungen nimmt. Der nachfolgend näher beschriebene Testzyklus erlaubt unter Ausschluss weiterer Vorentflammungsursachen eine sehr genaue reproduzierbare Bewertung ölinduzierter Vorentflammungen. Abbildung 6.1 zeigt die Vorentflammungsereignisse in Abhängigkeit von Ladedruck und Ladelufttemperatur, um die jeweiligen Betriebs- und Lastbereiche, in denen Vorentflammungen in ausreichendem Maße auftreten, zu identifizieren.



**Abbildung 6.1:** Anzahl der Vorentflammungsereignisse in Abhängigkeit von Ladedruck und Ladelufttemperatur in einem Konstantpunkt über 60min

Abbildung 6.1 ist zu entnehmen, dass ausgehend von einem Ladedruck von 2000mbar zunächst ein deutlicher Anstieg der Vorentflammungsereignisse bei 2200mbar Ladedruck zu verzeichnen ist. Aufgrund des gesteigerten Ladedrucks und in weiterer Folge der kritischeren Bedingungen gegen Ende der Kompression (gesteigerter Kompressionsenddruck und Kompressionsendtemperatur) nehmen die Vorentflammungsereignisse bei konstanter Ladelufttemperatur von 30°C signifikant zu. Entgegen den Erwartungen führt eine anschließende Variation der Ladelufttemperatur bei einem Ladedruck von 2200mbar zu einer sukzessiven Reduktion der Vorentflammungsereignisse. Die Ursache hierfür liegt in der reduzierten Füllung aufgrund der geringeren Ladungsdichte bei erhöhter Ladelufttemperatur und konstantem Ladedruck. Aus diesem Grund erfolgt mit zunehmender Erhöhung der Ladelufttemperatur eine Reduzierung des Lastniveaus entsprechend dem verringerten Energieumsatz und damit eine Entschärfung der Bedingungen, wodurch die Vorentflammungsneigung reduziert wird. Für das weitere Vorgehen wird daher eine Ladelufttemperatur von 30°C gewählt. Bevor nachfolgend im Detail auf die Entwicklung der gewählten Testmethodik eingegangen wird, soll im Folgenden das gewählte Detektionskriterium näher vorgestellt werden. Als Bewertungskriterium für das Auftreten einer Vorentflammung wird die Überschreitung eines definierten Zylinderdruckwertes herangezogen. Abbildung 6.2 zeigt den Zylinderdruck, der als Schwellwert im Rahmen der Untersuchungen gewählt wird.



**Abbildung 6.2:** Zylinderdruck-Schwellwert als Detektionskriterium zur Bewertung zur Bewertung von Vorentflammungen

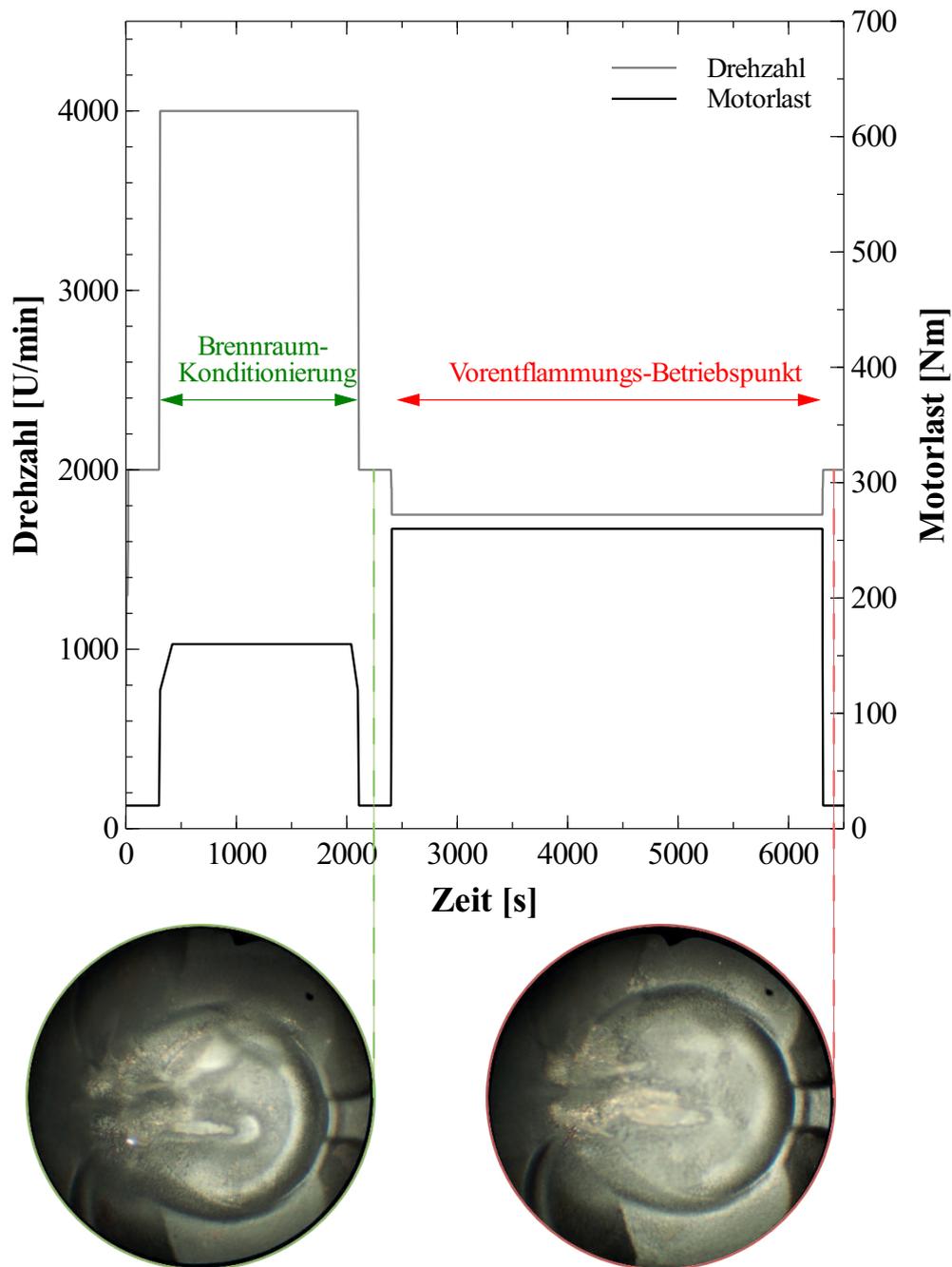
Als Grenze für die Detektion von Vorentflammungen wird ein Zylinderdruck von 100bar verwendet. Unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Spitzendrucks von etwa 60bar und prozessbedingten zyklischen Schwankungen, zeigt die ausgewählte Druckgrenze ausreichenden Abstand von etwa  $3\sigma_{LSP1}$  (Standardabweichung), um Fehldetektionen zu vermeiden.

Trotz der ausreichend hohen Detektionsgüte werden alle Vorentflammungen anschließend ausgewertet und in einer Datenbank abgespeichert. Darüber hinaus werden 100 Verbrennungszyklen zuvor und nach jeder Vorentflammung gespeichert und analysiert, um etwaige Rückschlüsse auf deren Ursprung zu erhalten. Allerdings zeigen diese stochastisch auftretenden Vorentflammungen keinerlei Indikation in dem vorausgehenden Zyklus, aber treten oftmals in Serien, jeweils durch mindestens einen Zyklus normaler Verbrennung unterbrochen, auf. Da neben Öl- und Kraftstofftropfen weitere mögliche Einflüsse, wie beispielsweise

- Ablagerungen,
- Partikel oder
- heißes Restgas

als Ursache für Vorentflammungen in Frage kommen, wurde zu Beginn eine geeignete Methodik entwickelt, um in erster Linie ölunduzierte Vorentflammungen zu provozieren. Zur eindeutigen Beurteilung des Öleinflusses verschiedener Testöle auf deren Vorentflammungsneigung wird die Kurbelgehäuseentlüftung über ein Blowby-Meter in die Umgebung geführt, um so den Einfluss von flüssiger und dampfförmiger Ölphase über das Saugrohr auszuschließen. Weitere Einflüsse der Turboladerschmierung sowie der Ventilschaftdichtungen werden vernachlässigt. Entsprechend dem gewählten überstöchiometrischen Verbrennungsluftverhältnis von  $\lambda \approx 1.2$  und einem relativ frühen Verbrennungsschwerpunkt können Hot spots, wie beispielsweise eine heiße Zündkerze oder Auslassventile, effektiv vermieden werden.

Als Testzyklus wird ein, in Anlehnung an Kunde et al. [33] und Takeuchi et al. [65], weiterentwickelter Zyklus herangezogen, welcher eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und vor allem eine kurze Zyklusdauer von weniger als zwei Stunden aufweist. Abbildung 6.3 zeigt den, für die gesamten Untersuchungen, verwendeten Testzyklus, der aus zwei Phasen besteht. Zu Beginn des Testlaufs erfolgt eine 30-minütige Konditionierungsphase bei  $4000\text{min}^{-1}$  und mittlerer Last, welche eine fast vollständige Entfernung von Ablagerungen und Partikeln im Brennraum ermöglicht. Zudem erfolgt diese Konditionierung bei mageren Verhältnissen ( $\lambda \approx 1.15$ ), um keine neuen Partikel oder Ablagerungen zu bilden und für jeden Testlauf einheitliche Bedingungen herzustellen.



**Abbildung 6.3:** Gewählter Testzyklus im Rahmen der Vorentflammungsuntersuchungen

Des Weiteren konnte durch stichprobenartige Brennraumendoskopie bevor und nach dem Vorentflammungstestlauf der Aufbau von Brennraumablagerungen ausgeschlossen werden, welche zu einer Überlagerung der Effekte geführt hätten. Dadurch können mit einem sehr hohen Genauigkeitsgrad ausschließlich ölunduzierte Vorentflammungen verifiziert werden.

Im Anschluss an diese Konditionierungsphase folgt die einstündige Messung im Vorentflammungsbetriebspunkt bei  $1750\text{min}^{-1}$  und Vollastbedingungen. In diesem Betriebspunkt wird, bei deutlich mageren Bedingungen von  $\lambda \approx 1.2$ , eine weitere Partikel- und Ablagerungsbildung weitestgehend unterbunden. Zudem konnten, mittels entsprechender Ventilüberschneidung und dem positiven Spüldruckgefälle, die Messungen nahezu ohne Restgaseinfluss durchgeführt werden. Wie bereits erwähnt, wird diese einstündige Vorentflammungsphase zur Provozierung eines verträglichen Maßes an Vorentflammungen herangezogen, welche anschließend ausgewertet und evaluiert werden. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick der wesentlichen Betriebsbedingungen im Vorentflammungsbetriebspunkt.

**Tabelle 6.1:** Vorentflammungsbetriebspunkt

Parameter	Einheit	Wert
Drehzahl	$\text{min}^{-1}$	1750
ind. Mitteldruck $p_{mi}$	bar	$\approx 22$
Zündzeitpunkt	-	an der Klopfgrenze
Ventilüberschneidung		maximal
$\lambda_{Abgas}$	-	$\approx 1.2$
Ladelufttemperatur	$^{\circ}\text{C}$	30
Kühlwassertemperatur	$^{\circ}\text{C}$	90
Öltemperatur	$^{\circ}\text{C}$	107
Ladedruck	$\text{mbar}_{absolut}$	2200

Für die jeweiligen Untersuchungen wird zuvor jeweils ein Ölwechsel inklusive Ölfilter durchgeführt. Im Rahmen der Testöluntersuchungen wird abwechselnd zwischen den einzelnen Testölen ein eigenes Referenzöl verwendet, um mögliche Rückstände des vorangegangenen Testöls zu entfernen. Ebenso wird während den Testöluntersuchungen das Referenzöl in regelmäßigen Abständen herangezogen, um den Verschleißzustand des Motors, anhand des Vorentflammungs-Testzyklus, zu beurteilen.

Wie die Ergebnisse in Kapitel 7 zeigen werden, konnte mit diesem Zyklus über die gesamte Projektlaufzeit eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit trotz relativ kurzer Testdauer gewährleistet werden. Auf diese Weise konnten im Rahmen dieser Dissertation weit über 1500 Vorentflammungen verifiziert werden. Vor allem die vorausgehende Brennraumreinigung erlaubt durch Ausschluss weiterer Vorentflammungsursachen die qualitative Bewertung ölinduzierter Vorentflammungen.

## 7 Ergebnisse in Bezug auf ölunduzierte Vorentflammungen

In diesem Abschnitt sind die gesamten Messergebnisse hinsichtlich ölunduzierter Vorentflammungen dargestellt, welche im Zuge dieser Dissertation erarbeitet wurden. Beginnend mit der Verifizierung der in Kapitel 3.5 angestellten Hypothesen zeigt zunächst die Parametervariation, anhand isolierter Betrachtung einzelner Einflussfaktoren, die Sensitivitäten auf, mit besonderem Fokus auf die Öl-Kraftstoff-Interaktion und die damit einhergehende Ablösung von Öltröpfen in den Brennraum. Im Anschluss wird neben den einzelnen Basisöleigenschaften, wie Viskosität, Volatilität u.a., das Hauptaugenmerk auf den Einfluss metall-basierender Additive gelegt. Das Ziel hierbei ist ein besseres Verständnis über die Einflüsse metall-basierender Additive, wie Detergentien und Antioxidantien, auf das Vorentflammungsverhalten zu erlangen und mögliche Wechselwirkungen im Ringspaltbereich aufzuzeigen. Zur weiteren Verifizierung einzelner Kraftstoffparameter auf den Ablösemechanismus hinsichtlich lokaler Ölverdünnung sind in diesem Abschnitt die Ergebnisse verschiedener Versuchskraftstoffe mit unterschiedlichem Ethanolanteil und geänderter Volatilität dargestellt.

### 7.1 Parametervariation zur Verifizierung der Einflussgrößen auf den Ablösemechanismus

Wie bereits in Kapitel 3.5 verdeutlicht, gilt die Interaktion von Kraftstoff und Motoröl an den Brennraumwänden insbesondere im Ringspaltbereich als wahrscheinlichste Ursache für Vorentflammungen. Zur Klärung dieser Hypothese wird eine umfangreiche Variation einzelner Betriebsparameter des Motors durchgeführt, welche speziell diese Wandfilmbildung beeinflussen. Dabei werden folgende Parameter variiert:

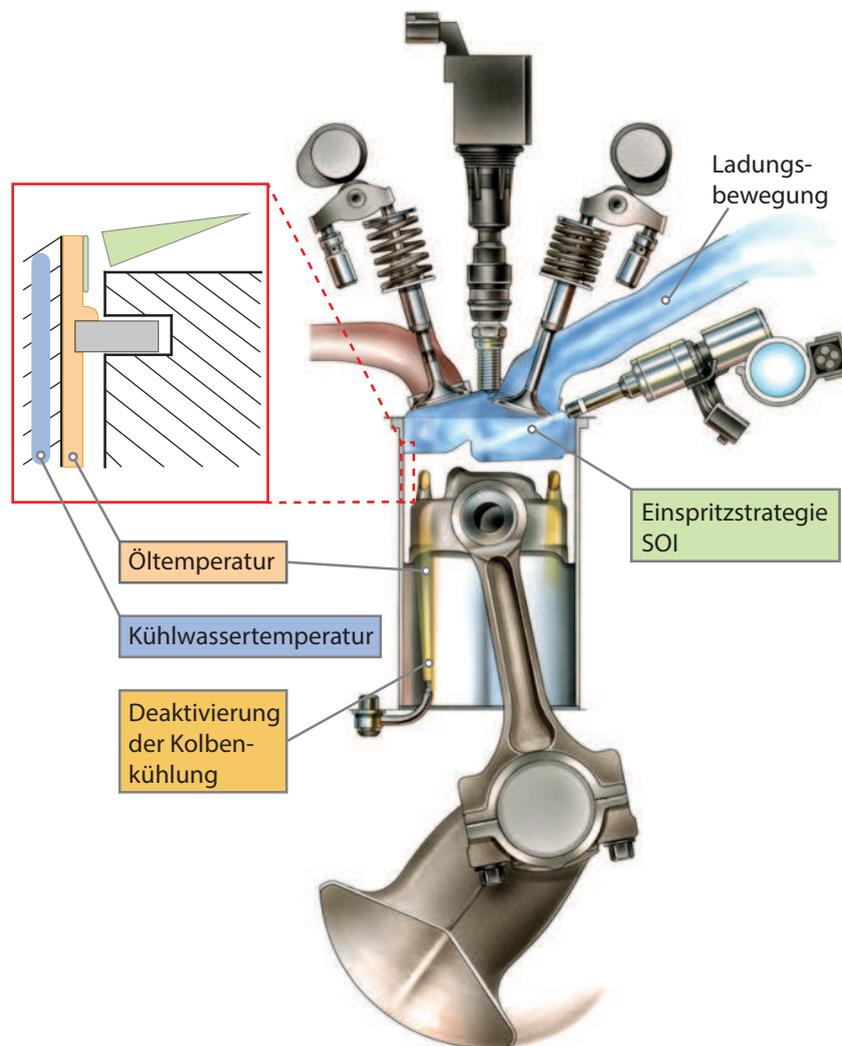
- Öltemperatur
- Kühlwassertemperatur
- Einspritzbeginn (START OF INJECTION SOI)
- Einspritzstrategie

Ausgehend von den Standardbetriebsbedingungen von 90°C Kühlwassertemperatur, 107°C Öltemperatur, 330°KWvZOT Einspritzbeginn, 1-fach Einspritzung und aktiver Kolbenkühlung wurden die einzelnen Parameter, entsprechend [Tabelle 7.1](#), variiert.

**Tabelle 7.1:** Betriebsbedingungen während der Parametervariation

Variationen	I	II	III	IV
Öltemperatur [°C]	<b>80-115</b>	107	107	107
Kühlwassertemperatur [°C]	90	<b>60-90</b>	90	90
Einspritzbeginn [°KWvZOT]	330	330	<b>270-330</b>	330
Einspritzstrategie <sup>1</sup> [-]	1-fach	1-fach	1-fach	<b>1-/2-fach</b>

Abbildung 7.1 zeigt einen schematischen Überblick der Einflussfaktoren auf die Wandfilmbildung im Ringspaltbereich an einem direkteinspritzenden aufgeladenen Ottomotor mit seitlicher Injektorlage.



**Abbildung 7.1:** Schematische Übersicht der Einflussfaktoren auf die Wandfilmbildung im Ringspaltbereich [99] (eigene Darstellung)

<sup>1</sup>Diese Untersuchungen wurden bei einem erhöhten Lastniveau durchgeführt.

Speziell bei direkteinspritzenden Ottomotoren mit seitlicher Injektorlage ist der Gemischaufbereitung große Aufmerksamkeit zu widmen, um bei hohen Lasten mit entsprechend erhöhter Einspritzmenge eine verstärkte Wandbenetzung zu vermeiden.

Um eine separate Variation der Öl- bzw. Kühlwassertemperatur zu ermöglichen, wurde der serienmäßige Öl-Kühlwasser-Wärmetauscher durch einen externen, mit Frischwasser gekühlten, Wärmetauscher ersetzt. Die Beurteilung der Parametervariation erfolgt in allen Fällen anhand des in Kapitel 6 vorgestellten Vorentflammungs-Testzyklus. Bei allen Messungen, die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführt wurden, wurde ausschließlich das Referenzöl Castrol Edge 5W-30 sowie der sauerstofffreie Referenzkraftstoff E0 ROZ95 verwendet.

### 7.1.1 Variation der Öltemperatur

Abbildung 7.2 zeigt den Einfluss der Öltemperaturvariation zwischen 80°C und 115°C, ausgehend von der Basisuntersuchung bei 107°C Öltemperatur, auf die Vorentflammungshäufigkeit.

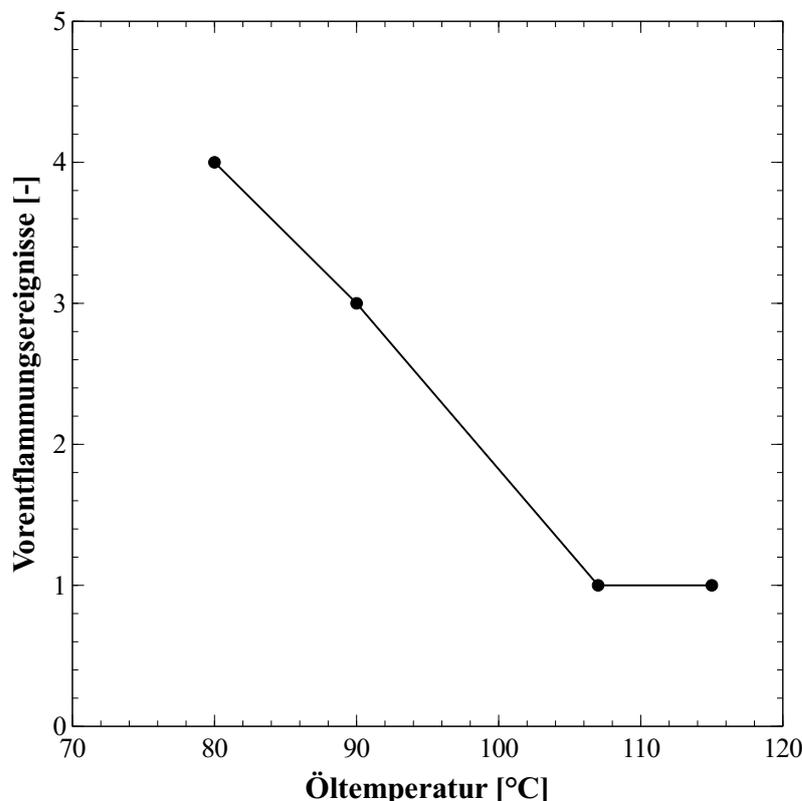


Abbildung 7.2: Einfluss der Öltemperatur auf die Vorentflammungsfrequenz

Abbildung 7.2 ist ein signifikanter Anstieg der Vorentflammungsfrequenz mit sinkender Öltemperatur zu entnehmen. Der Grund für den Anstieg der Vorentflammungsfrequenz mit sinkender Öltemperatur liegt in einem erhöhten flüssigen Kraftstoffeintrag in das Motoröl aufgrund der reduzierten Schmierfilmtemperatur an der Zylinderwand. Die auf diese Weise zunehmende Ölverdünnung führt zu einer Reduktion der Viskosität und damit zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Schmieröleigenschaften. Aufgrund der geringeren Viskosität sowie der erhöhten Menge an akkumulierten Öl-Kraftstoff-Gemisch werden vermehrt Öltropfen im Ringspaltbereich abgestreift und gelangen in den Brennraum. Wie bereits in Kapitel 3.5 erwähnt, können diese Öltropfen unter bestimmten Voraussetzungen eine Vorentflammung auslösen.

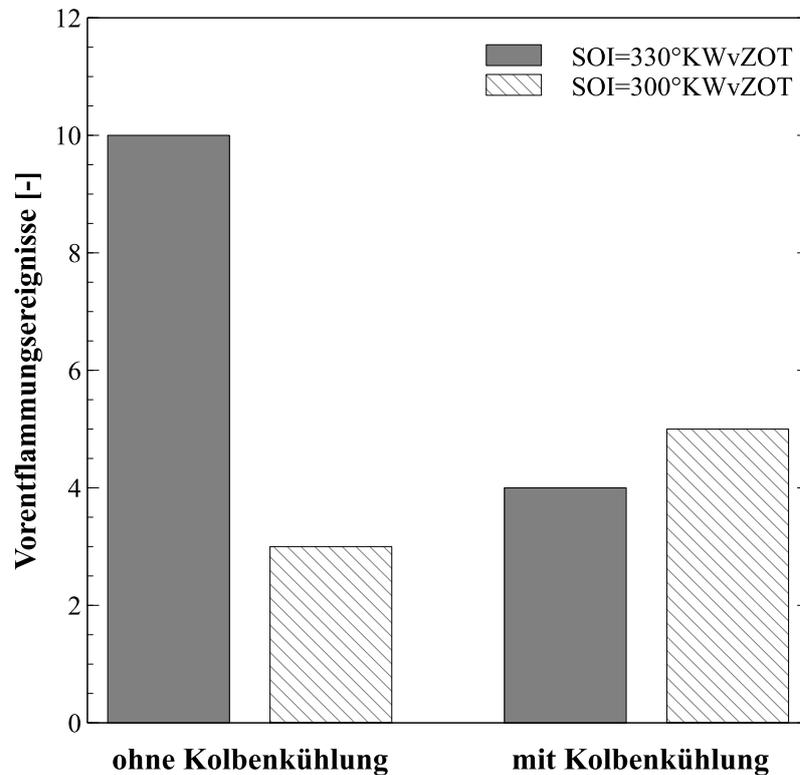
Eine weitere Erklärung für den deutlichen Anstieg ist die reduzierte Kolbentemperatur, die sich entsprechend der kühleren Öltemperatur über die Kolbenkühlung einstellt. Die reduzierte Verdampfungsleistung des Kolbens begünstigt zudem den Eintrag von flüssigem Kraftstoff in das Motoröl. Um die Überlagerung dieser beiden Effekte zu trennen und Aufschluss über den genauen Einfluss der Kolbentemperatur zu erhalten, wird in weiterer Folge für eine Öltemperatur von 80°C die Kolbenkühlung für diesen Fall deaktiviert. Abbildung 7.3 zeigt in der linken Bildhälfte eine originale und in der rechten Bildhälfte eine der verwendeten Kolbenspritzdüsen, welche mit einem Schweißpunkt verschlossen wurde.



**Abbildung 7.3:** Links: Kolbenspritzdüse; Rechts: verschweißte Kolbenspritzdüse

Abbildung 7.4 zeigt den Einfluss der Kolbenkühlung bei einer Öltemperatur von 80°C und unterschiedlichen Einspritzzeitpunkten auf das Vorentflammungsverhalten. Entgegen den Erwartungen zeigte sich in der Basiskonfiguration mit einem Einspritzbeginn von 330°KWvZOT ein deutlicher Anstieg der Vorentflammungsfrequenz. Eine Analyse und anschließende Literaturrecherche ergaben, dass aufgrund der deutlich erhöhten Kolbentemperatur der Leidenfrost-Effekt einsetzt. Matsumoto et al. [101] zeigte das Auftreten des Leidenfrost-Effekts besonders bei frühem Einspritzzeitpunkt in Kombination mit seitlicher Injektorlage und in weiterer Folge die unzureichende Gemischbildung. Der eingespritzte Kraftstoff wird in diesem Fall an der heißen Kolbenoberfläche abgelenkt und trifft direkt auf die Zylinderwand, an der das Motoröl stark verdünnt und

gegebenenfalls direkt Öltropfen durch zerplatzende Kraftstofftropfen abgelöst werden [79]. Aus diesem Grund wurde, abweichend von der Basisausführung, der Einspritzzeitpunkt auf  $300^\circ\text{KWvZOT}$  nach Spät verschoben. In diesem Fall trifft nur mehr ein geringer Anteil des Einspritzstrahls auf den heißen Kolbenboden, während sich die Mehrheit mit der einströmenden Luftmenge vermischt.



**Abbildung 7.4:** Einfluss der Kolbenkühlung bei unterschiedlichen Einspritzzeitpunkten auf die Vorentflammungsfrequenz

Trotz des erhöhten Wandeintrags, entsprechend dem späteren Einspritzbeginn, ist aufgrund der erhöhten Verdampfungsleistung des Kolbens eine deutliche Reduktion der Vorentflammungsfrequenz zu verzeichnen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit entsprechend angepasster Einspritzstrategie eine erhöhte Kolbentemperatur, durch Verdampfen des flüssigen Kraftstoffanteils speziell im oberen Ringspaltbereich, zu einer Reduktion der Vorentflammungsfrequenz beiträgt. Neben dem Temperatureinfluss bei deaktivierter Kolbenkühlung und der damit verbundenen Verdampfung flüssigen Kraftstoffs wird zudem, entsprechend der Wärmeausdehnung des Kolbens, der Öltransport in den Brennraum reduziert, vergleichbar mit dem Effekt einer erhöhten Kolbenringvorspannung. Zudem bedeuten niedrige Kolbentemperaturen im Allgemeinen erhöhte Partikelemissionen und verstärkte Ablagerungsbildung am Kolben entsprechend den

verschlechterten Verdampfungsbedingungen. Jüngste Erkenntnisse [102] zeigen, dass dieses Verdampfungsverhalten des Kolbens gezielt zur Reduktion von Vorentflammungen in Serienmotoren bei niedrigen Drehzahlen eingesetzt wird. Dabei wird entweder direkt über Magnetventile die Ölzufuhr zu den Kolbenspritzdüsen unterbrochen oder über einen reduzierten Öldruck einer kennfeldgesteuerten Ölpumpe, in Kombination mit druckabhängigen Ventilen, deren Versorgung unterbunden.

### 7.1.2 Variation der Kühlwassertemperatur

Abbildung 7.5 zeigt den Einfluss der Kühlwassertemperaturvariation zwischen 60°C und 90°C, ausgehend von der Basisuntersuchung bei 90°C Kühlwassertemperatur, auf die Vorentflammungshäufigkeit. Obwohl durch den separaten Ölkühler grundsätzlich eine Trennung der Effekte der Öl- und Kühlwassertemperatur erfolgt, ist durch den Wandwärmeübergang an den Zylinderlaufflächen und vor allem über den Zylinderkopf eine vollständige Trennung nicht möglich. Damit geht mit zunehmender Reduzierung der Kühlwassertemperatur auch eine Beeinflussung der Öltemperatur einher.

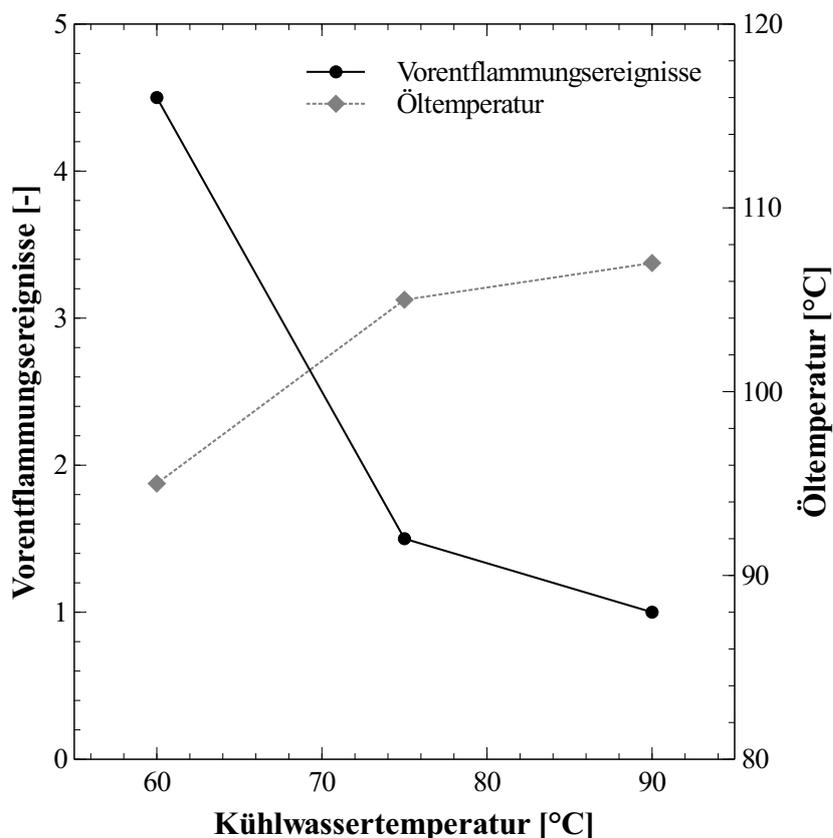


Abbildung 7.5: Einfluss der Kühlwassertemperatur auf die Vorentflammungsfrequenz sowie die Öltemperatur

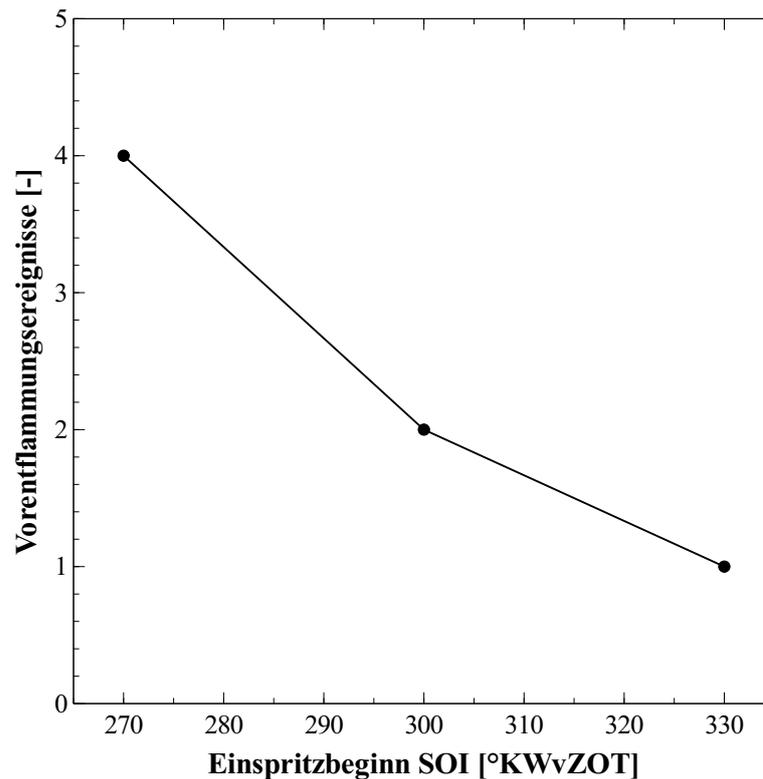
Abbildung 7.5 zeigt ein stark nichtlineares Verhalten der Vorentflammungsneigung mit abnehmender Kühlwassertemperatur, welches bei 60°C noch zusätzlich durch eine reduzierte Öltemperatur überlagert ist. Die Reduzierung der Kühlwassertemperatur bedingt bei 60°C eine verstärkte lokale Verdünnung sowie eine geändertes Benetzungsverhalten des Motoröls verbunden mit einer erhöhten Anzahl an abgelösten Öltropfen. Diese Erkenntnisse korrelieren mit den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen [26], [40], [72], [100], [103], welche allerdings eine Kombination aus Öl- und Kühlwasservariation, entsprechend einer Serienapplikation, beurteilen.

Obwohl die Kühlwassertemperatur womöglich der bessere Indikator für die Öltemperatur im Ringspaltbereich und damit für die lokale Ölverdünnung durch Kraftstoffeintrag ist, zeigt die Variation der Öltemperatur, dass eine signifikante Verbindung zwischen der Öltemperatur im Ringspalt sowie in der Ölwanne, vor allem bei aktivierter Kolbenkühlung, besteht. Der Anstieg der Vorentflammungsfrequenz mit reduzierter Kühlwassertemperatur verdeutlicht die Unterschiede der zugrunde liegenden Mechanismen bei Vorentflammungen im Vergleich zu Glühzündungen oder klopfender Verbrennung, bei denen mit sinkender Kühlwassertemperatur eine Reduktion erfolgt.

### 7.1.3 Variation des Einspritzbeginns SOI

Abbildung 7.6 zeigt den Einfluss der Variation des Einspritzbeginns SOI zwischen 330 und 270°KWvZOT, ausgehend von der Basisuntersuchung bei 330°KWvZOT, auf die Vorentflammungshäufigkeit. Dabei ist festzuhalten, dass das Einspritzende EOI (End of Injection) in allen Varianten vor dem Schließen der Einlassventile erfolgt, um verschlechterte Gemischbildung, aufgrund geänderter Strömungsverhältnisse im Brennraum, auszuschließen. Abbildung 7.6 ist ein signifikanter Anstieg der Vorentflammungsfrequenz mit späterem Einspritzbeginn zu entnehmen.

Speziell bei der verwendeten Ausführung mit seitlicher Injektorlage erfolgt bei frühem Einspritzbeginn von 330°KWvZOT eine starke Benetzung des Kolbens mit flüssigem Kraftstoff, welcher allerdings aufgrund der hohen Kolbentemperaturen rasch verdampft. Mitunter begünstigen zusätzlich die geöffneten Einlassventile eine Ablenkung der Einspritzstrahlen und verhindern auf diese Weise eine verstärkte Ölverdünnung.



**Abbildung 7.6:** Einfluss des Einspritzbeginns auf die Vorentflammungsfrequenz

Aufgrund der Verschiebung des Einspritzbeginns nach Spät kommt es zu einer steigenden Benetzung der Zylinderwand mit flüssigem Kraftstoff. Des Weiteren wird die verbleibende Zeit, um Teile des flüssigen Kraftstoffs an der Zylinderwand abzdampfen, bei spätem Einspritzbeginn zusätzlich reduziert. Auch eine deutliche Verwehung des Einspritzstrahls bei verspäteter Einspritzung ist möglich, wodurch vermehrt flüssiger Kraftstoff an die Zylinderwand gelangt. Der abwärtsbewegende Kolben wird in diesem Fall kaum noch von den Einspritzstrahlen benetzt, sondern ein gewisser Anteil trifft direkt auf die Zylinderwand. Neben der zunehmenden Ölverdünnung und den daraus resultierenden geänderten Stoffeigenschaften des Motoröls, ist davon auszugehen, dass in einzelnen Fällen durch den Strahlaufprall an der Zylinderwand Öltropfen abgeplatzt werden und in weiterer Folge den Auslöser für eine Vorentflammung darstellen [79].

#### 7.1.4 Einfluss der Einspritzstrategie

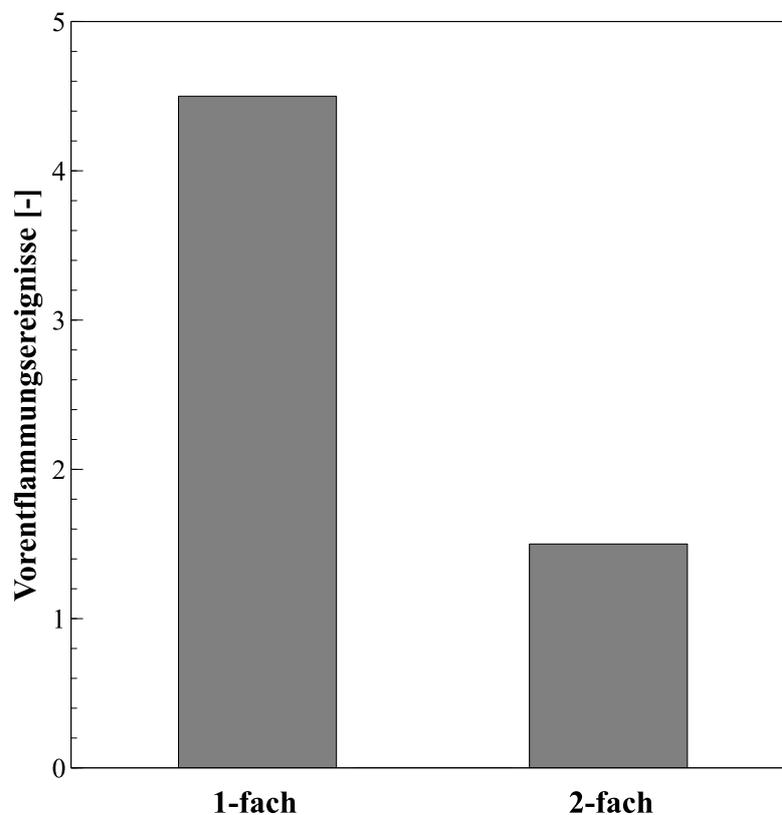
Während die vorangegangenen Untersuchungen zum Ziel hatten, eine Verschlechterung der Vorentflammungsbedingungen entsprechend einer zunehmenden Ölverdünnung zu bewirken, soll mittels Mehrfacheinspritzung eine Reduktion der Vorentflammungshäufigkeit erfolgen. Da das Ausgangsniveau mit 1-fach Einspritzung bereits bei nur einem

Vorentflammungsereignis lag, wurde das Lastniveau für diese Untersuchung angehoben. Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die verwendete Einspritzstrategie.

**Tabelle 7.2:** Ausgeführte Strategie der 2-fach Einspritzung

Einspritzstrategie	SOI [ $^{\circ}$ KWvZOT]		Gewichtung [%]	
	1	2	1	2
1-fach	330		100	
2-fach	330	260	70	30

In Anbetracht der geringen Gemischbildungsdauer und der hohen Einspritzmengen konnte lediglich eine 2-fach Einspritzung realisiert werden. Dabei wird die gesamte Einspritzmenge in zwei Teileinspritzungen unterteilt, welche jeweils unterschiedlich gewichtet werden. Die beiden Einspritzzeitpunkte sind 330 und 260 $^{\circ}$ KWvZOT. Die Gewichtung der beiden Teileinspritzmengen erfolgt dabei 70:30 zugunsten der ersten Einspritzung. Abbildung 7.7 zeigt den Einfluss der 2-fach Einspritzung, ausgehend von der Basisuntersuchung mit 1-fach Einspritzung, auf die Vorentflammungshäufigkeit.



**Abbildung 7.7:** Einfluss der Einspritzstrategie auf die Vorentflammungsfrequenz bei 1-fach und 2-fach Einspritzung

Die Verwendung der 2-fach Einspritzung führt zu einer signifikanten Reduktion der Vorentflammungsfrequenz. Aufgrund der verbesserten Kraftstoffverdampfung und der geringeren Eindringtiefe des Einspritzstrahls erfolgen eine bessere Homogenisierung sowie eine geringere Wandbenetzung. Damit zeigen die Ergebnisse der 2-fach Einspritzung eine Verbesserung der Vorentflammungsproblematik und verdeutlichen, in Korrelation mit den weiteren Betriebsparametern, den Einfluss der lokalen Ölverdünnung auf die Auslösung von Vorentflamungen und bestätigen damit die zugrunde liegende Hypothese aus Kapitel 3.5.

### 7.1.5 Zusammenfassung - Parametervariation

Im Rahmen dieser Parametervariation wurden diverse Motorbetriebsparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Vorentflammungsneigung untersucht. Abbildung 7.8 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse.

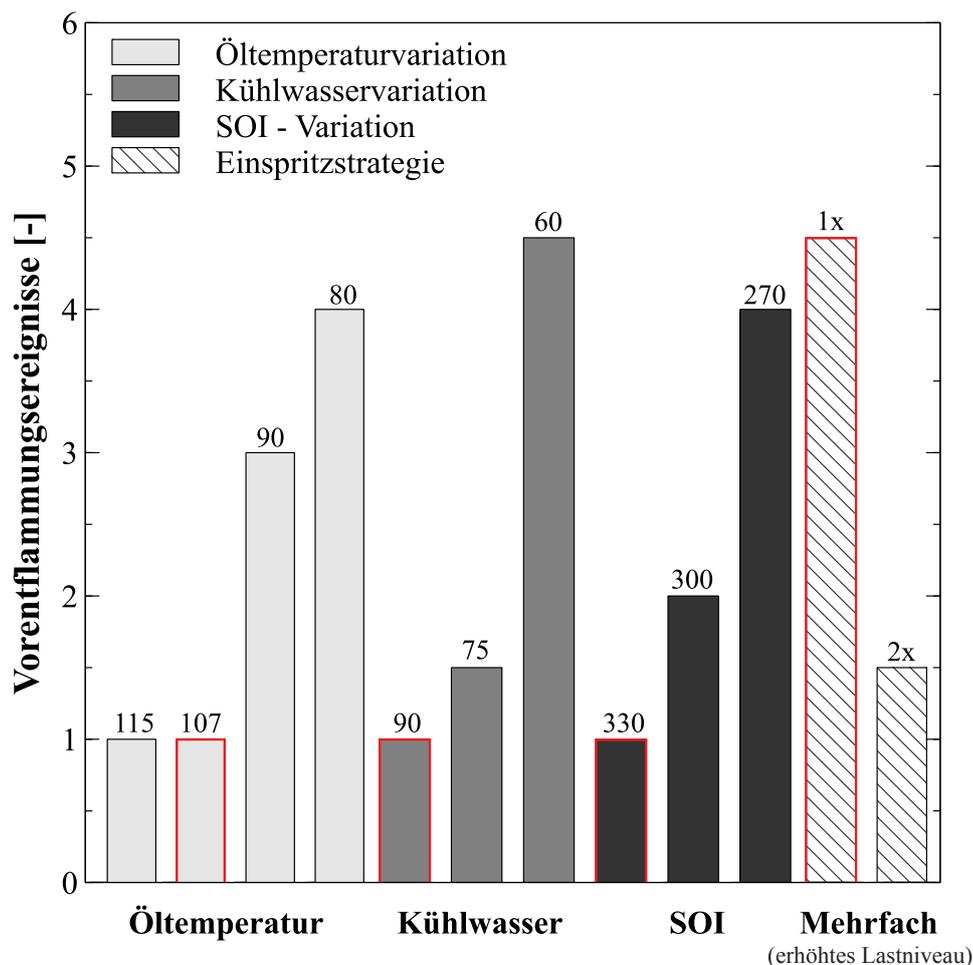


Abbildung 7.8: Zusammenfassung der Ergebnisse der Parametervariation

Dabei wird deutlich, dass die Parameter Öltemperatur, Kühlwassertemperatur, Einspritzbeginn und der Einsatz der 2-fach Einspritzung signifikante Auswirkungen auf die Vorentflammungshäufigkeit haben. Vor allem die Variation der Kühlwassertemperatur zeigt einen stark nichtlinearen Effekt auf die Vorentflammungsfrequenz. Anzumerken ist, dass die Untersuchung des Einflusses der Einspritzstrategie an einem gesteigerten Lastniveau durchgeführt wurde, wodurch sich das erhöhte Ausgangsniveau der Vorentflammungsfrequenz erklärt.

Anhand der Ergebnisse der Parametervariation können für die weiteren Vorentflammungsuntersuchungen folgende Schlüsse gezogen werden:

**Variation der Öltemperatur** Eine Verringerung der Öltemperatur führt zu einer deutlichen Erhöhung der Vorentflammungshäufigkeit. Neben den geringeren Ölfilmtemperaturen an der Zylinderwand bewirkt eine reduzierte Kolbentemperatur, entsprechend der Kolbenkühlung und der daraus resultierenden geringeren Verdampfungsleistung, einen signifikanten Viskositätsverlust des Motoröls. Durch die geänderten Stoffeigenschaften des Motoröls sowie des erhöhten Anteils an flüssigem Kraftstoff im Ringspaltbereich steigt die Vorentflammungsfrequenz mit sinkender Öltemperatur signifikant. Des Weiteren zeigt der Einfluss der Kolbenkühlung bei entsprechend angepasstem Einspritzbeginn eine deutliche Reduktion der Vorentflammungsfrequenz, aufgrund der verbesserten Verdampfung von akkumuliertem Wandfilm aus dem Ringspaltbereich und reduziertem Öltransport in den Brennraum. Damit stellt der geregelte Einsatz der Kolbenspritzdüsen im niedrigen Drehzahlbereich ein probates Mittel zur Reduktion von Vorentflammungen für die Serienanwendung dar.

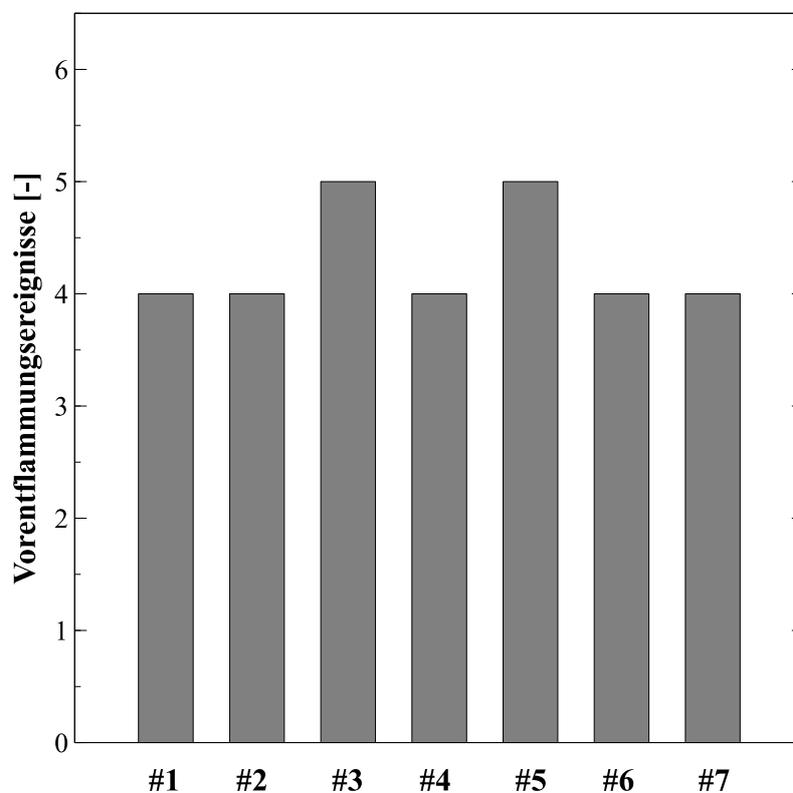
**Variation der Kühlwassertemperatur** Die Reduzierung der Kühlwassertemperatur zeigt einen stark nichtlinearen Einfluss auf die Vorentflammungshäufigkeit. Trotz der Trennung des gemeinsamen Öl- und Kühlwasserkreislaufes erfolgt bei 60°C Kühlwassertemperatur eine Reduzierung der Öltemperatur entsprechend dem Wandwärmeübergang an der Zylinderlauffläche und dem Zylinderkopf. Obwohl die Ergebnisse noch durch Quereffekte wie beispielsweise durch die Kolbenkühlung überlagert sind, verdeutlicht die Betrachtung der Kühlwassertemperatur den signifikanten Einfluss der Ölverdünnung auf den Ablösemechanismus von Öltropfen. Es ist zu berücksichtigen, dass im heutigen Serieneinsatz kombinierte Öl-Kühlwasser-Wärmetauscher eingesetzt werden, wodurch die Öl- und Kühlwassertemperatur nicht unabhängig voneinander sind.

**Variation des Einspritzbeginns SOI** Der späte Einspritzbeginn des Kraftstoffs führt zu einer signifikanten Benetzung der Zylinderwand und in weiterer Folge zu einem verstärkten Kraftstoffeintrag in das Motoröl. Die erhöhte Menge an unverdampftem Kraftstoff bewirkt eine deutliche Steigerung der Vorentflammungsfrequenz.

**Variation der Einspritzstrategie** Aufgrund der verbesserten Gemischaufbereitung und der geringeren Eindringtiefe der einzelnen Einspritzstrahlen führt bereits die Verwendung der 2-fach Einspritzung zu einer signifikanten Reduktion der Vorentflammungsereignisse. Eine angepasste Einspritzstrategie, siehe [64], stellt künftig eine wirkungsvolle Maßnahme in der Serienapplikation zur Reduktion der Vorentflammungshäufigkeit dar.

## 7.2 Einfluss von Ölalterung und Additivdegradation

Zur weiteren Beurteilung der Auswirkungen der Basisöleigenschaften wird ein Alterungstestlauf auf Basis des Referenzöls durchgeführt. Da alleine durch kontrollierte Oxidation des Öls unter Laborbedingungen nicht die gewünschten Randbedingungen des Motorbetriebs (Blowby, saure Verbrennungsprodukte, Abrieb...) nachgestellt werden können, wird eine Alterung unter Motorbetrieb durchgeführt. Anhand dieser erfolgt die Evaluierung weiterer Eigenschaften wie Oxidation, Alterungserscheinungen, die basische Reserve des Öls sowie der Kraftstoffeintrag. Dabei wird über einen Zeitraum von 7 Tagen täglich mit dem gleichen Referenzöl ein Testzyklus absolviert. Zur kontinuierlichen Beobachtung des Ölzustandes werden während des Alterungstestlaufs jeweils nach dem dritten und fünften Testlauf 50ml-Ölproben über die Führung des Ölmesstabes extrahiert. Diese geringen Ölproben erlauben die Bestimmung der TBN, der Oxidationsprodukte, des Kraftstoffeintrags sowie der einzelnen Additivanteile. Zudem wird am Ende des Testlaufs eine 1000ml-Ölprobe entnommen, um größtenteils alle Parameter des Öls zu bestimmen. Abbildung 7.9 zeigt die jeweiligen Testergebnisse während des Alterungstestlaufs des Referenzöls.



**Abbildung 7.9:** Vorentflammungsergebnisse anhand eines über mehreren Testzyklen geänderten Alterungszustandes des Referenzöls

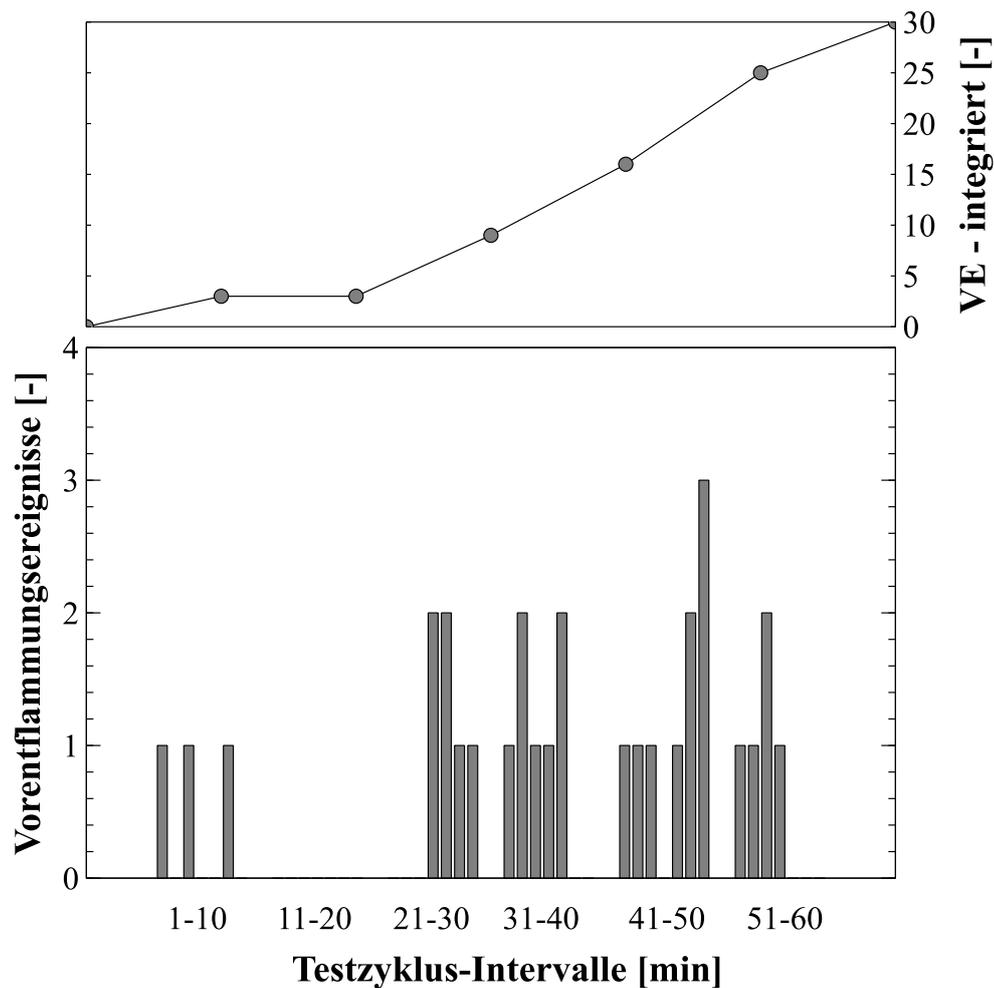
Abbildung 7.9 ist zu entnehmen, dass obgleich der kurzen Testdauer, bezogen auf ein herkömmliches Ölwechselintervall, in Verbindung mit dem hohen Intensitätsprofil (erhöhtes Blowby, erhöhter Kraftstoffeintrag,...) des Testzyklus, Alterungseffekte bis zu einem gewissen Grad ausgeschlossen werden können. Diese Erkenntnisse korrelieren weitestgehend mit den Ergebnissen von Hirano et al. [72]. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Ölanalysen in Tabelle 7.3 verdeutlicht, dass weder der Abbau der basischen Reserve (Detergent-Abbau) noch eine erhöhte Oxidation Auswirkungen auf die Vorentflammungshäufigkeit zeigen. Des Weiteren offenbaren die Ergebnisse des Alterungstestlaufs die hohe Reproduzierbarkeit des gewählten Testzyklus.

**Tabelle 7.3:** Ölanalysen während des Alterungstestlaufs

		Frischöl	nach Testlauf Nr.		
		0	3	5	7
Detergent	ppm	2558	-3,47%	-4,41%	-4,42%
Anti Wear	ppm	1075	-2,86%	-3,63%	-4,08%
Ruß	ppm	1	+47%	+75%	+100%
Oxidationsprodukte	ppm	1	+70%	+80%	+90%
TBN	mgKOH/g	9,02	-7,54%	-9,31%	-10,53%
Kraftstoffgehalt	%	0	1	2	5
KV bei 100°C	cSt	10,73	-	-	-12,95%

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass weder die Abnahme der basischen Reserve TBN von über 10% noch ein 5%-iger Kraftstoffeintrag und damit verbunden ein Viskositätsverlust von knapp 13% Auswirkungen auf die Vorentflammungsneigung haben. Daraus kann gefolgert werden, dass vielmehr die lokalen Verhältnisse an der Zylinderwand (kühlere Wandtemperaturen, geändertes Benetzungsverhalten, gesteigerter Anteil an flüssigem Kraftstoff) über das Ablöseverhalten von Öl- und Kraftstofftropfen entscheiden und weniger ein geringfügig global niederviskoseres Öl.

Die einzelnen Vorentflammungsereignisse sowie der integrierter Verlauf der sieben Testläufe sind in Abbildung 7.10, entsprechend deren zeitlichem Auftreten im Testzyklus, exemplarisch dargestellt. Dabei ist deutlich festzustellen, dass rund 70% aller Vorentflammungsereignisse erst in der zweiten Hälfte des Testzyklus auftreten, was sich wiederum mit der Hypothese eines akkumulierenden Öl-Kraftstoffreservoirs im Ringspaltbereich deckt.

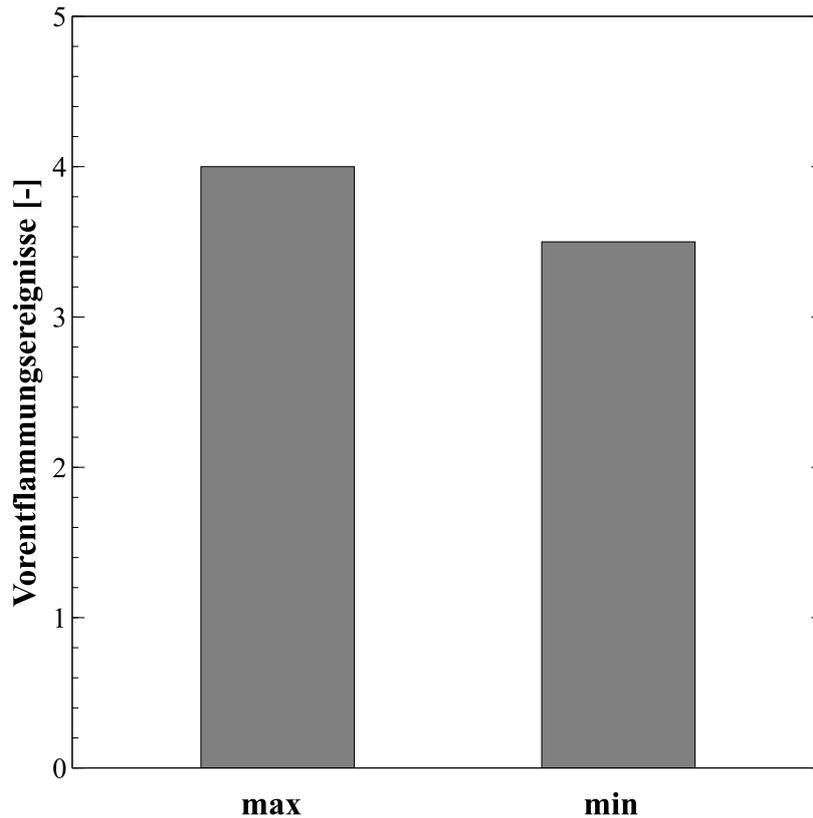


**Abbildung 7.10:** Zeitliche Verteilung der Vorentflamungsereignisse im Testzyklus während des Alterungstestlaufs

Um Quereinflüsse aufgrund eines reduzierten Ölfüllstandes während des Alterungstestlaufs, entsprechend Ölverbrauch und der Ölprobenentnahme, auszuschließen, wird in einer weiteren Untersuchung der Einfluss des Ölfüllstandes auf die Vorentflamungsfrequenz bestimmt.

Grundsätzlich birgt ein geringerer Ölfüllstand Nachteile hinsichtlich Alterungsprozess, Additivabbau und Verschleiß, welche jedoch im Rahmen der kurzen Zyklusdauer unbedenklich sind. Allerdings zeigen weitere Forschungsergebnisse [104], dass der geringste Ölfüllstand auch die geringsten Ölemissionen bedeutet.

Abbildung 7.11 zeigt den Einfluss des Ölfüllstandes zwischen min- und max-Markierung auf die Vorentflamungsfrequenz.



**Abbildung 7.11:** Einfluss des Ölfüllstandes zwischen min- und max-Markierung auf die Vorentflammungsfrequenz

Abbildung 7.11 ist zu entnehmen, dass bei deaktivierter Kurbelgehäuseentlüftung kein nennenswerter Effekt durch einen geringeren Ölfüllstand festzustellen ist. Diese Ergebnisse bestätigen weiter die Erkenntnisse aus dem Alterungstestlauf, so dass ein etwas geringerer Ölfüllstand (Probenentnahme, Ölverbrauch) keinesfalls das Ergebnis des Alterungstestlaufs verzerrt. Der Einfluss des Ölfüllstandes könnte bei aktivierter Kurbelgehäuseentlüftung schlagend werden, da durch die Füllstandsdifferenz von ca. 1l, in dieser Motorkonfiguration zwischen min- und max-Markierung, mehr Öl mit dem Blowby aufgenommen und über das Saugrohr in den Brennraum transportiert wird.

## 7.3 Einfluss der Motorölspezifikationen

Neben den eigens angestellten Untersuchungen im Rahmen der Parametervariation zeigten bereits mehrere Veröffentlichungen [6], [59], [64], [65], [78], [100], [105], dass Motoröl einen entscheidenden Einfluss auf das Auftreten von Vorentflammungen im LET-Bereich heutiger hochaufgeladener Downsizingmotoren hat. Diese Tatsache war die Motivation für die Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Motorölspezifikationen auf deren Vorentflammungsneigung. Im Folgenden wird der Einfluss einzelner Motorölspezifikationen, ausgehend von einer Basisöluntersuchung sowie der anschließenden Variation verschiedener Additive, näher untersucht.

### 7.3.1 Einfluss der Basisölspezifikationen

In einem ersten Schritt werden vier Testöle bei gleichem Additivpaket sowie zusätzlich das Testöl 022A mit dem Referenzöl Castrol Edge 5W-30 verglichen. Abbildung 7.12 gibt einen schematischen Überblick der untersuchten Basisölmatrix.

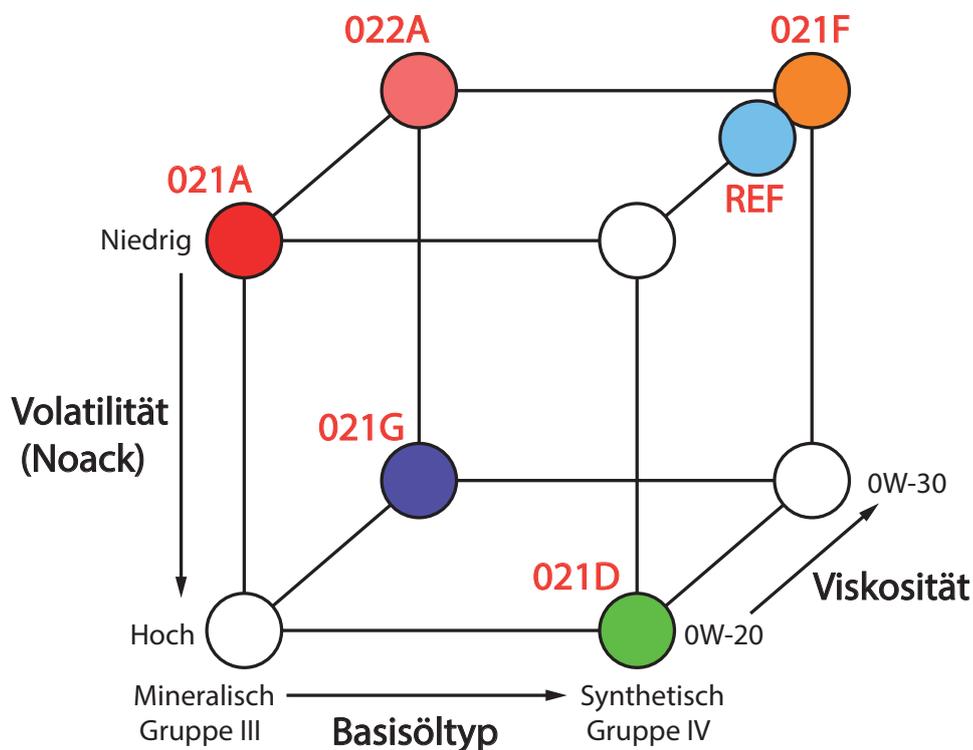


Abbildung 7.12: Ölmatrix der untersuchten Testöle

Bei den Basisöluntersuchungen wird entsprechend der Ölmatrix das Hauptaugenmerk auf die drei Parameter Basisöltyp, Viskositätsklasse und Volatilität gelegt. Im Gegensatz zu Erkenntnissen aus der Literatur [65] werden lediglich Basisöle der API-Gruppen III und IV verwendet, welche heutzutage in modernen aufgeladenen Ottomotoren entsprechend den Herstellerspezifikationen Einsatz finden. Bei dem untersuchten mineralischen Basisöl handelt es sich um ein Motoröl der API-Klasse III, während das synthetische Basisöl ein Vertreter der API-Klasse IV ist.

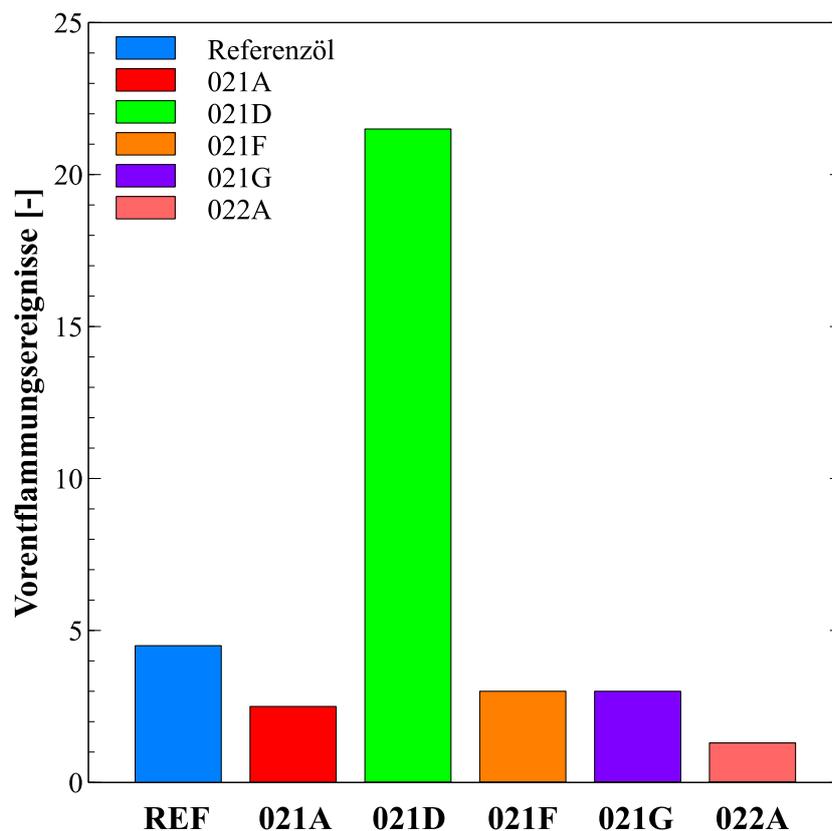
Tabelle 7.4 listet im Detail die einzelnen Eigenschaften der verschiedenen Testöle auf. Besonders hervorzuheben sind dabei die beiden Viskositätsklassen 0W-20 und 0W-30, der Flammpunkt der Öle, der Verdampfungsverlust nach Noack sowie der Siedebeginn der Testöle.

**Tabelle 7.4:** Übersicht der einzelnen Eigenschaften der verschiedenen Testöle bei gleichem Additivpaket sowie des Testöls 022A

		REF	021A	021D	021F	021G	022A
API-Klassifizierung		IV	III	IV	IV	III	III
<b>Viskositätsverhalten</b>		5W-30	0W-20	0W-20	0W-30	0W-30	0W-30
KV bei 100°C	cSt	10,73	8,44	8,99	11,63	12,14	11,81
HTHS bei 150°C	cSt	3,17	2,64	2,63	3,15	3,28	3,22
Viskositätsindex	-	164	166	182	175	181	174
<b>Verdampfungsverlust</b>							
nach Noack	%	10,5	12,1	19,8	9,6	17,1	12,0
Flammpunkt	°C	209	206	188	214	200	203,5
Siedebeginn	°C	294	222	302	346	224	224

Neben den beiden Viskositätsklassen ist ein weiterer deutlicher Unterschied dem Siedebeginn der einzelnen Basisöle zu entnehmen. Während die beiden mineralischen Vertreter (API-Klasse III), aufgrund der vorhandenen leichter siedenden Motorölbestandteile nach der Rohölraffination, einen Siedebeginn im Bereich von 220°C aufweisen, liegt der Siedebeginn der synthetischen Basisöle (API-Klasse IV), entsprechend ihrem deutlich höheren Reinstoff-Anteil (Polyalphaolefin), weit über jenem der mineralischen Basisöle.

Abbildung 7.13 zeigt die Ergebnisse der Vorentflammungsuntersuchungen der einzelnen Testöle jeweils im Bezug auf das Referenzöl. Jeder Testlauf wird dabei zweimal durchgeführt und zwischen jedem Testöl wird, zur Sicherstellung des Referenzzustandes sowie zur rückstandsfreien Reinigung vom vorangegangenen Testöl, der Motor mit frischem Referenzöl gespült und der Ölfilter gewechselt. Die kontinuierliche Überprüfung des Referenzzustandes mittels Referenzöl erlaubt einen fortschreitenden Motorverschleiß zu berücksichtigen und die Messergebnisse über einen ausreichend langen Messzeitraum entsprechend zu validieren.

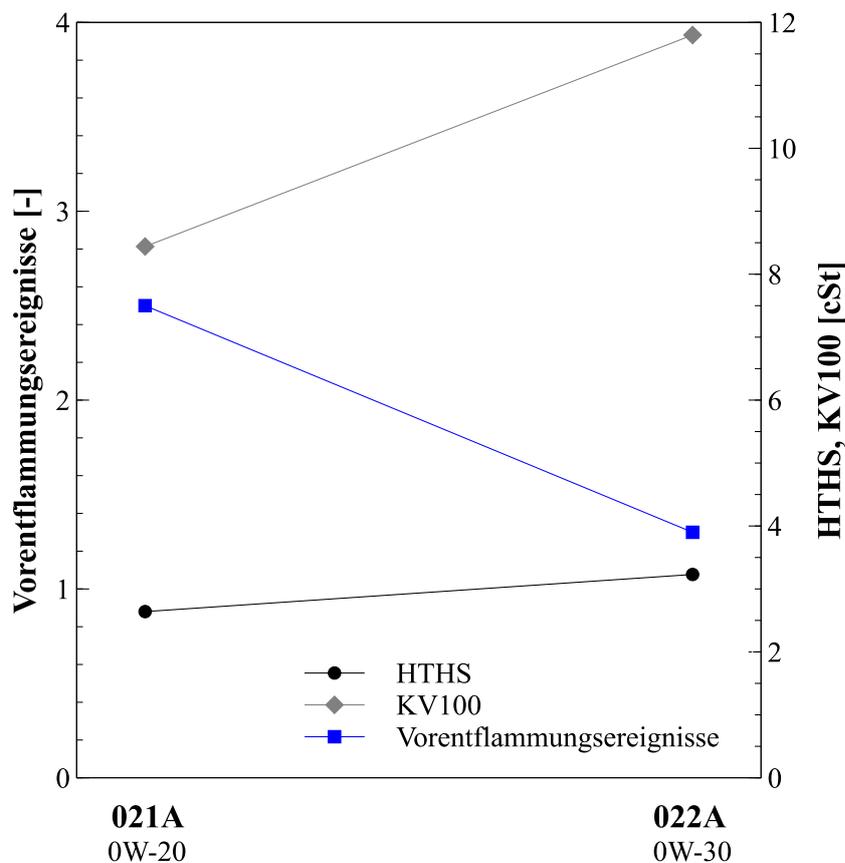


**Abbildung 7.13:** Ergebnisse der Vorentflammungsuntersuchungen der Testöle

Während die Testöle 021A, F und G zu einer Reduktion der Vorentflammungshäufigkeit führen, bewirkt Testöl 021D einen signifikanten Anstieg. Dabei ist festzuhalten, dass nach dem Erreichen von 10 Vorentflammungsereignissen die beiden Testläufe für 021D abgebrochen wurden und das Ergebnis entsprechend der verbleibenden Zeit im Zyklus extrapoliert wurde. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse in Abbildung 7.13 wird deutlich, dass in erster Linie kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen dem Basisöltyp (mineralisch - synthetisch) und den Vorentflammungsereignissen besteht. Aus diesem Grund wird in weiterer Folge auf eine Differenzierung dieser beiden

Ölklassen verzichtet. Abschließend erfolgt eine genaue Analyse der Ergebnisse anhand spezifischer Öleigenschaften.

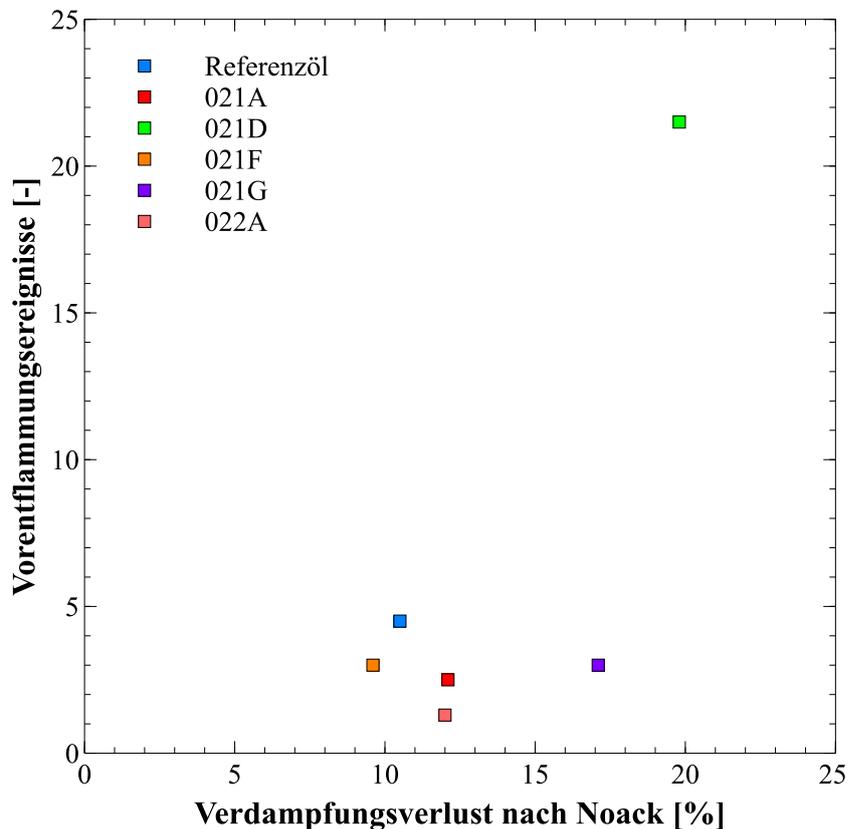
**Viskosität** Wie bereits aus der Ölmatrix hervorgeht unterscheiden sich die beiden Testöle 021A und 022A lediglich in ihrer Viskosität, während alle weiteren Öleigenschaften nahezu identisch sind. Eine gesonderte Betrachtung der Testöle 021A und 022A sowie deren Einfluss auf das Vorentflamungsverhalten, siehe [Abbildung 7.14](#), verdeutlicht den Einfluss der Viskosität.



**Abbildung 7.14:** Einfluss der Viskosität auf die Vorentflamungsfrequenz

Zudem zeigen die Testöle 021F und 021G eine geringere Vorentflamungsfrequenz im Vergleich zu den beiden 0W-20 Testöle aber auch zum Referenzöl, aufgrund der höheren Viskosität verbunden mit einer geringeren Neigung zur Ablösung von Öltröpfen in den Brennraum. Die ebenfalls niedrige Vorentflamungsneigung von Testöl 021A lässt sich allerdings nicht alleine über die Viskosität des Öls erklären. Die Analyse der folgenden Öleigenschaften soll dabei zu einem besseren Verständnis der geringen Vorentflamungsfrequenz von Testöl 021A beitragen.

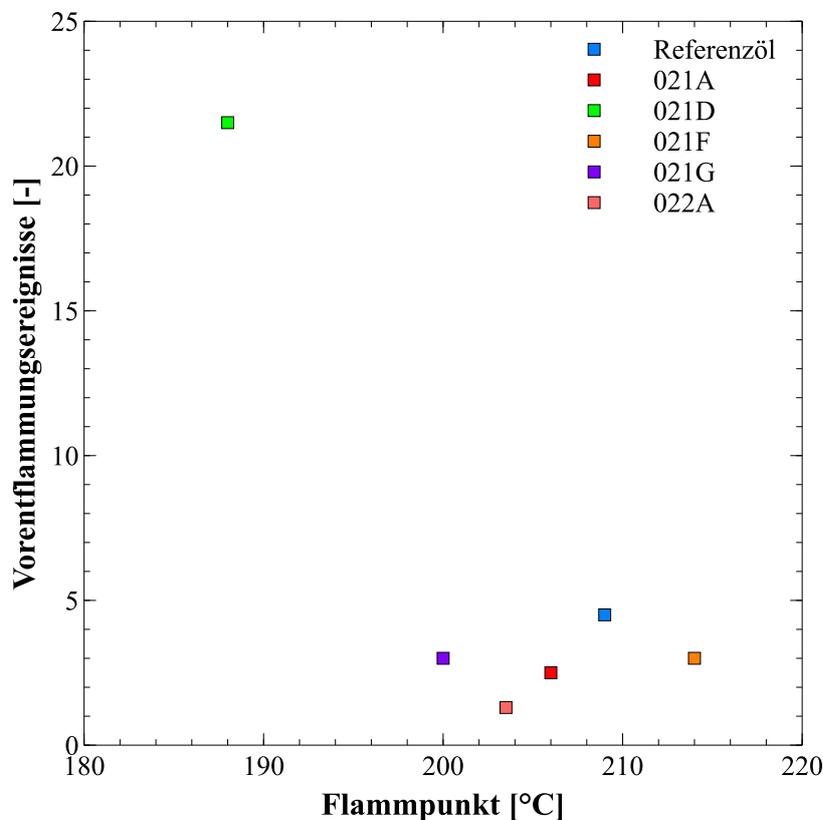
**Verdampfungsverlust nach Noack** Abbildung 7.15 zeigt den Einfluss des Verdampfungsverlusts nach Noack auf die Vorentflammungsfrequenz der untersuchten Testöle. Dabei wird deutlich, dass abgesehen von der signifikanten Abweichung für Testöl 021D kein Zusammenhang zwischen dem Verdampfungsverlust und der Vorentflammungshäufigkeit besteht.



**Abbildung 7.15:** Einfluss des Verdampfungsverlusts nach Noack auf die Vorentflammungsfrequenz

Vielmehr stellt der Noack-Wert einen Zusammenhang zu den Ölemissionen her. Der Verdampfungsverlust bezeichnet den Masseverlust eines Motoröls über eine Stunde bei einer Temperatur von 250°C und ist dabei abhängig von der Viskosität und bei den Mineralölen zusätzlich vom Raffinationsgrad. Hohe Verdampfungsverluste führen in der Regel zu erhöhtem Ölverbrauch und verstärkter Ablagerungsbildung auf Kolben und Einlassventilen [82]. In dem verwendeten Messaufbau wird allerdings das Blowby über ein Blowby-Meter in die Abgasabsaugung geführt. Auf diese Weise besteht keine Verbindung zwischen den Ölemissionen und einem möglichen Einfluss auf die Vorentflammungsentstehung im Brennraum, da durch die deaktivierte Kurbelgehäuseentlüftung die Kopplung zum Saugrohr fehlt. Diese Erkenntnisse korrelieren mit jenen von Takeuchi et al. [65].

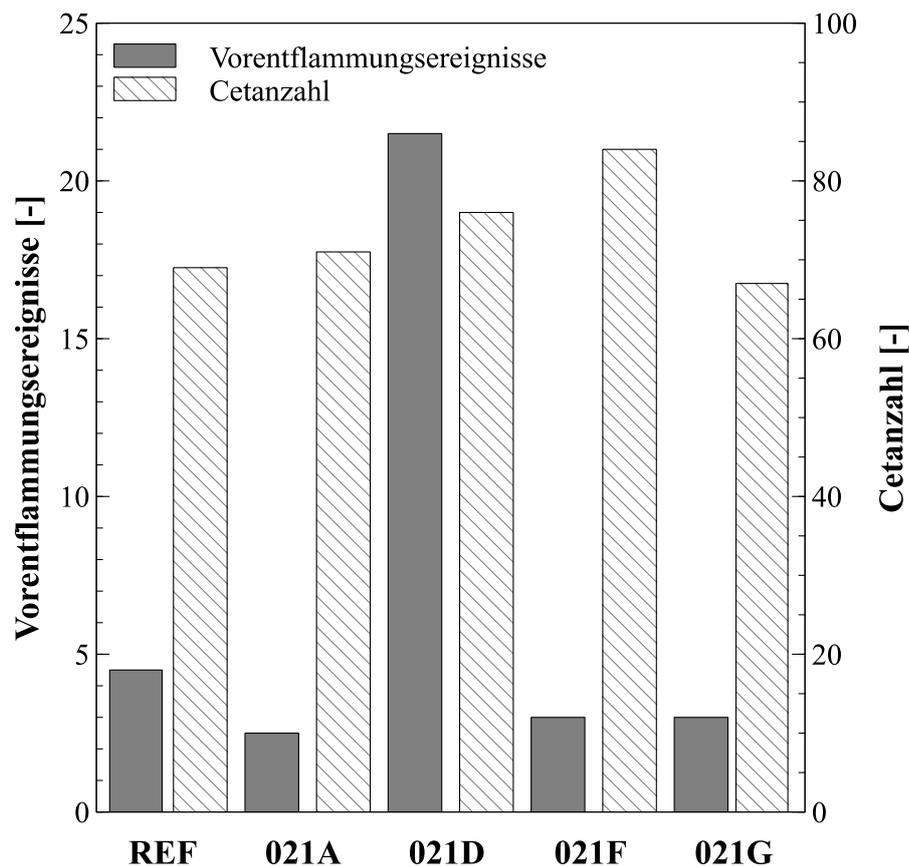
**Flammpunkt** Abbildung 7.16 zeigt den Einfluss des Flammpunkts auf die Vorentflammungsfrequenz der verschiedenen Testöle.



**Abbildung 7.16:** Einfluss des Flammpunkts auf die Vorentflammungsfrequenz

Während bei einem Flammpunkt oberhalb von 200°C die Testöle innerhalb eines Streubereichs liegen, deuten die Ergebnisse von Testöl 021D ein stark nichtlineares Verhalten an. Dieses Verhalten stimmt mit den Erkenntnissen von Takeuchi et al. [65] überein. Dieser konnte einen ähnlichen nichtlinearen Zusammenhang für die Selbstentzündungstemperatur und die Vorentflammungsneigung der Testöle aufzeigen. Des Weiteren ist zu beachten, dass, durch den Kraftstoffeintrag an der Zylinderwand, eine separate Betrachtung des Motoröls alleine nicht zielführend ist. Vielmehr muss ein abgelöster Tropfen als Öl-Kraftstoff-Gemisch angesehen werden, welches von den Grundeigenschaften des Motoröls deutlich abweichen kann. Ljubas et al. [106] berichtete, dass bereits eine 5%-ige Ölverdünnung mit gewöhnlichem Eurosuper, gemäß EN 228, bei einzelnen Ölen zu einer drastischen Reduktion des Flammpunkts (ca. 150°C) führen kann. Damit bewirkt der höhere Flammpunkt von Testöl 021A eine niedrige Vorentflammungsfrequenz, trotz verstärkter Ablösung von Öltropfen aus dem Ringspaltbereich einhergehend mit der geringeren Viskosität.

**Cetanzahl** Zum besseren Verständnis über den Einfluss einzelner Öltropfen im Brennraum wurde mittels CFR-Motor die Cetanzahl der Testöle bestimmt. Bei diesen Untersuchungen wurde unverdünntes Motoröl in die Vorkammer des Brennraums eingebracht. Die Vorgehensweise ist analog zu der Cetanzahl-Bestimmung bei Dieselmotoren gemäß DIN 51773 [107]. Abbildung 7.17 zeigt den Zusammenhang zwischen Cetanzahl und Vorentflammungsneigung der einzelnen Testöle.



**Abbildung 7.17:** Zusammenhang zwischen der Cetanzahl und der Vorentflammungsneigung der Testöle

Grundsätzlich liegen die Cetanzahlen, mit einem Maximalwert von 84, auf einem deutlich höheren Niveau als herkömmlicher Dieselmotoren. Allerdings ist kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Cetanzahl und der Vorentflammungsneigung, anhand dieser Messreihe, zu erkennen. Dieses Ergebnis lässt die Vermutung zu, dass alleine die Zündwilligkeit des Öls nicht entscheidend ist für dessen Vorentflammungsneigung. Vielmehr sind der Ablösemechanismus, die Wechselwirkung mit Kraftstoff, die Tropfengröße sowie die Anzahl der abgelösten Öl- und Kraftstofftropfen von entscheidender Bedeutung.

### 7.3.2 Zusammenfassung - Basisölspezifikationen

Im Anschluss sind die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen der Basisölspezifikationen, welche als Empfehlung für vorentflammungsresistentere Testöle verstanden werden können, zusammengefasst:

- Eine erhöhte Viskosität bewirkt, aufgrund der verringerten Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen in den Brennraum, eine Reduktion der Vorentflammungsneigung.
- Ein höherer Flammpunkt bewirkt eine geringere Vorentflammungsneigung.
- Im Hinblick auf die Volatilität konnte kein Einfluss auf die Vorentflammungsfrequenz festgestellt werden. Allerdings zeigen Untersuchungen von Amann et al. [108], anhand verschiedener Motoröle, den Einfluss deren erhöhter Reaktivität auf das Klopfverhalten. Hierbei führt die Öleinbringung (ähnlich einer Kurbelgehäuseentlüftung) zu einer global verringerten Klopfestigkeit des Kraftstoff-Luft-Gemisches (ROZ-Effekt). Dieses Verhalten bedingt aber nicht im Umkehrschluss ein erhöhtes Vorentflammungsverhalten, da weniger die Verdampfungsverluste (Kurbelgehäuseentlüftung - ROZ-Effekt), sondern die Flüssigphase des Öls als kritisch einzustufen ist. Untersuchungen von Schünemann et al. [78] zeigten, dass durch entsprechende Ölabscheidung vor der Rückführung in den Brennraum, die für Vorentflammungen kritische Flüssigphase des Blowby und damit die Vorentflammungsfrequenz reduziert werden konnte. Die über die Kurbelgehäuseentlüftung einströmende Dampfphase zeigte dabei keinerlei Einfluss auf die Vorentflammungsneigung.
- Der Vergleich der Cetanzahl zeigt keinerlei Korrelation mit der Vorentflammungsneigung. Dies verdeutlicht, dass der Ablösemechanismus, hinsichtlich Wechselwirkung mit Kraftstoff, Tropfengröße sowie der Anzahl an abgelösten Öl- und Kraftstofftropfen, entscheidend ist.

Die bisherigen Ergebnisse verdeutlichen, dass die Basisölspezifikationen alleine nicht entscheidend sind für die Vorentflammungsneigung. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden Abschnitt der Einfluss metall-basierender Additive näher untersucht.

### 7.3.3 Einfluss ausgewählter Detergentien und Antioxidantien

Auf Basis der vorausgegangenen Grundöluntersuchungen werden zunächst verschiedene Additivpakete untersucht. Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik, siehe Kapitel 3.3, zeigen bereits eine Vielzahl an Untersuchungen, dass Motoröl wesentlich an der Auslösung von Vorentflammungen beteiligt ist. Vor allem metall-basierende Additive scheinen einen signifikanten Einfluss auf den Auslösemechanismus auszuüben [65], [72]. Um im ersten Schritt diesen möglichen Einfluss von Additiven auf Vorentflammungen zu verifizieren, werden zwei idente Additivpakete bei unterschiedlicher Additivierungsrate untersucht.

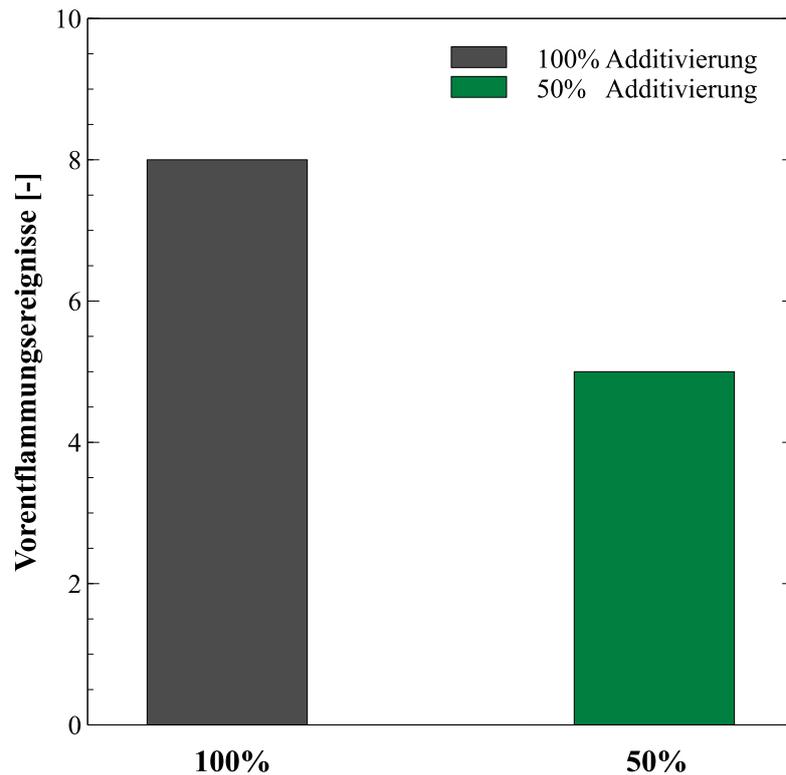
#### 7.3.3.1 Einfluss der Additivierungsrate

Im Rahmen dieser Untersuchung werden zwei idente Additivpakete bei einer Additivierung von 100% und 50% verglichen. Tabelle 7.5 listet im Detail die einzelnen Eigenschaften der beiden Additivöle, im Vergleich zu den Eigenschaften des Referenzöls, auf.

**Tabelle 7.5:** Übersicht der Eigenschaften der verschiedenen Additivöle mit unterschiedlicher Additivierung

		Additivöle		
		REF	100%	50%
		5W-30	0W-30	0W-30
KV bei 100°C	cSt	10,73	11,52	11,36
Volatilität (Noack)	%	10,5	12,1	12,0
Flammpunkt	°C	209	210	213
Calcium	ppm	2558	2890	1415
Phosphor	ppm	951	764	373
Zink	ppm	1075	851	420

Tabelle 7.5 kann entnommen werden, dass, basierend auf dem gleichen Grundöl, keine nennenswerten Unterschiede in den Öleigenschaften Viskosität, Verdampfungsverlust nach Noack und dem Flammpunkt für die beiden Testöle festzustellen sind. In Abbildung 7.18 ist der Einfluss der Additivierungsrate auf das Vorentflammungsverhalten dargestellt.



**Abbildung 7.18:** Einfluss der Additivierungsrate auf das Vorentflammungsverhalten

Abbildung 7.18 ist zu entnehmen, dass sich durch Halbierung der Additivierungsrate eine signifikante Reduktion der Vorentflammungsfrequenz einstellt. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass metall-basierende Additive (Calcium, Zink,...) entscheidend in den Auslösemechanismus von Vorentflammungen involviert sind. Um in weiterer Folge den Einfluss dieser Additive zu verifizieren, werden im nächsten Abschnitt im Detail die Auswirkungen der Detergentien auf das Vorentflammungsverhalten untersucht.

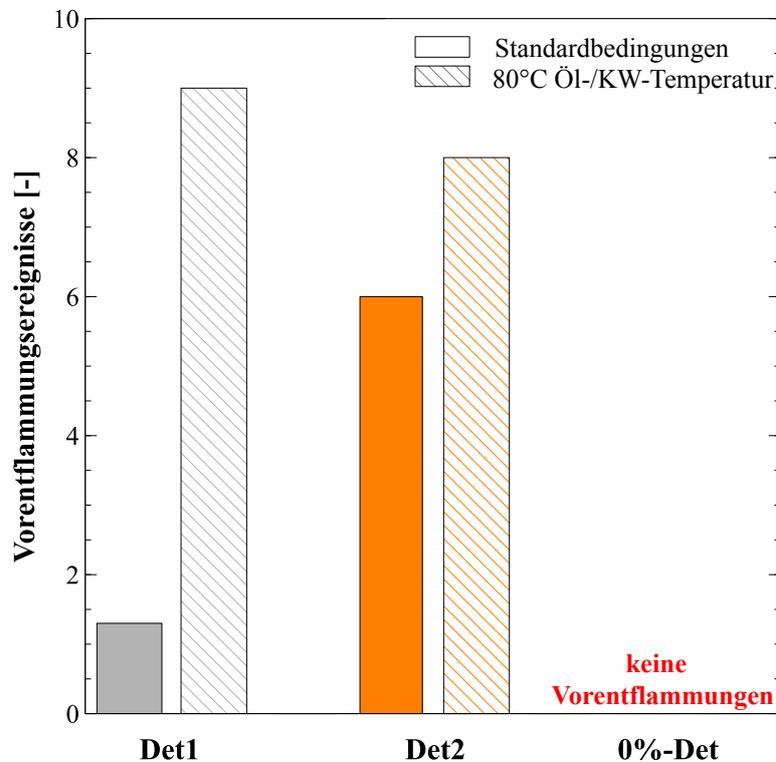
### 7.3.3.2 Einfluss verschiedener Detergentien

Um den Einfluss verschiedener Detergentien auf das Vorentflammungsverhalten von Motorölen zu evaluieren, werden zu Beginn zwei Testöle mit unterschiedlichen Detergentien bei verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht. Ausgehend von den Standardbedingungen bei 90°C Kühlwassertemperatur und 107°C Öltemperatur werden die beiden Additivöle Det1 und Det2, welche sich lediglich in der chemischen Struktur des Surfactants unterscheiden, zusätzlich bei einem deutlich niedrigeren Temperaturniveau von 80°C Öl- und Kühlwassertemperatur untersucht. [Tabelle 7.6](#) listet im Detail die wesentlichen Eigenschaften der beiden Additivöle Det1 und Det2, im Vergleich zu den Eigenschaften des Referenzöls, auf.

**Tabelle 7.6:** Übersicht der Eigenschaften der beiden Detergent-Additivöle

		Additivöle		
		REF	Det1	Det2
		5W-30	0W-30	0W-30
KV bei 100°C	cSt	10,73	11,8	11,95
Volatilität (Noack)	%	10,5	12,0	12,1
Flammpunkt	°C	209	203	210
Calcium	ppm	2558	2844	2914
Phosphor	ppm	951	776	773
Zink	ppm	1075	822	841

Tabelle 7.6 ist zu entnehmen, dass die Unterschiede der Detergentien lediglich auf deren chemischer Struktur des Surfactants basieren. Bei identischem Calciumanteil werden die Anordnungen der umgebenden organischen Verbindungen, welche für die Öllöslichkeit verantwortlich sind, geändert. Abbildung 7.19 zeigt die Ergebnisse bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen für die Additivöle Det1 und Det2 sowie für das spezielle Testöl 0%-Det.

**Abbildung 7.19:** Einfluss verschiedener Detergentien auf das Vorentflammungsverhalten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen

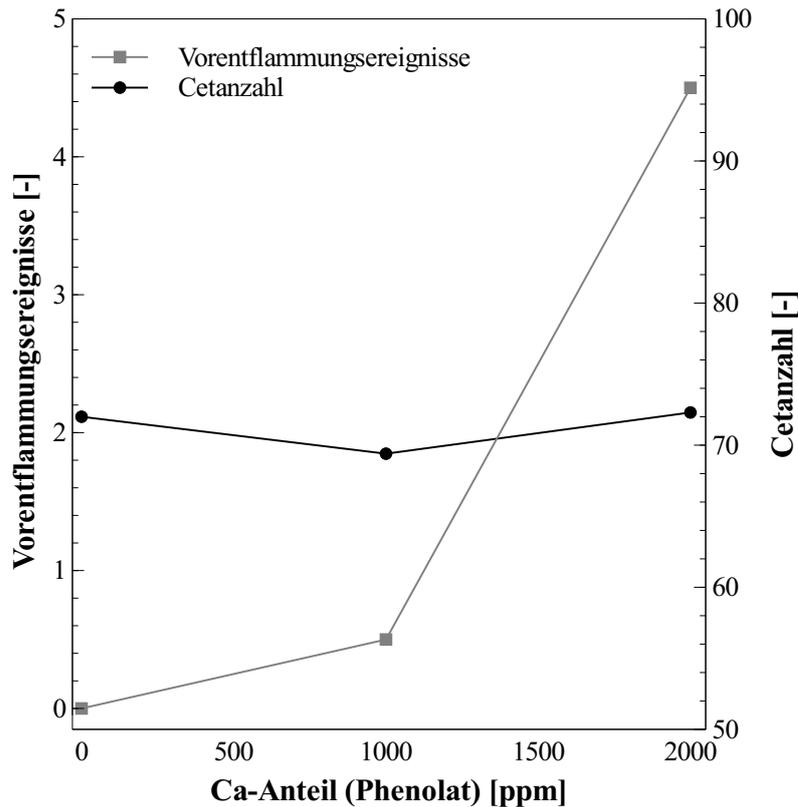
Die Untersuchungen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Detergentien Det1 und Det2, wodurch unmittelbar ein Zusammenhang zwischen dem Einfluss des Surfactants und der Vorentflammungsneigung hergestellt ist. Offenbar weisen die verschiedenen Surfactants deutliche Unterschiede im Hinblick auf das Benetzungsverhalten auf, welches in weiterer Konsequenz den Ablösemechanismus und damit die Vorentflammungsneigung bestimmt.

Zudem zeigen die geänderten Betriebsbedingungen einen deutlichen Temperatureinfluss von Det1, während sich das Verhalten von Det2 nur geringfügig ändert. Um sicherzustellen, dass hierbei keine Überlagerung der Effekte durch zunehmende Wandbenetzung vorliegt und in weiterer Folge eine verstärkte Tropfenablösung von der Zylinderwand bedingt, wird in diesem Zusammenhang ein spezielles Testöl ohne Detergent (0%-Det) untersucht.

Die Ergebnisse von Testöl 0%-Det verdeutlichen den signifikanten Temperatureinfluss auf das Vorentflammungsverhalten der beiden öllöslichen Detergentkomponenten. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse von Testöl 0%-Det, dass vor allem calciumhaltige Detergentien ölunduzierte Vorentflammungen hervorrufen.

Zur genauen Verifizierung des Einflusses von Calciumanteil und Surfactant werden im Folgenden beide Parameter der Detergentien im Detail untersucht. Bei Surfactants handelt es sich im Grunde um Seifen, welche für die Sauberkeit in den Kolbenringbereichen verantwortlich sind. Der Calciumkern des Detergents dient in diesem Zusammenhang als basischer Anteil zur Neutralisation saurer Verbrennungsprodukte, welche beispielsweise über das Blowby ins Motoröl gelangen. Detergentien sind oberflächenaktive Substanzen und beeinflussen damit zu einem großen Teil das Benetzungsverhalten und damit die Tropfenbildung.

**Einfluss des Calciumanteils auf das Vorentflammungsverhalten** Zur Verifizierung des Einflusses des polaren Teils von Detergentien wird ausgehend von einem 0%-Detergent-Testöl der Ca-Anteil bis 2000ppm gesteigert. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Additivölen wird dabei ein Basisöl der Viskositätsklasse 0W-20 herangezogen. Bei dem verwendeten Surfactant handelt es sich um ein Phenolat. [Abbildung 7.20](#) zeigt die Ergebnisse der Variation des Calciumanteils bis 2000ppm auf das Vorentflammungsverhalten sowie auf die Cetanzahl, welche in einem CFR-Motor jeweils für das unverdünnte Testöl bestimmt wurde.



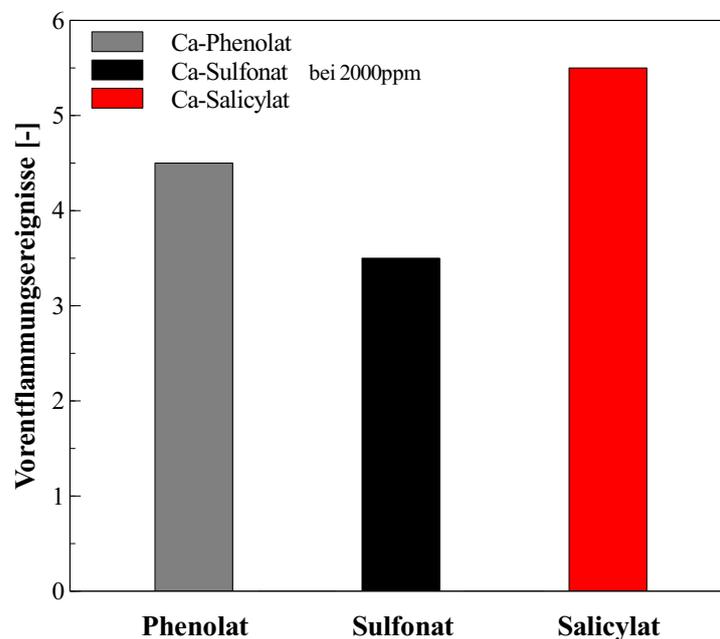
**Abbildung 7.20:** Einfluss des Calciumanteils auf das Vorentflammungsverhalten sowie auf die Cetanzahl am Beispiel eines Phenolats

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Calciumanteil maßgeblich an der Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen beteiligt ist. Während das 0%-Detergent-Testöl, analog zu den Ergebnissen in Abbildung 7.19, keinerlei Vorentflammungen zeigt, ist ab einem Calciumanteil von 1000ppm ein stark nichtlinearer Anstieg der Vorentflammungsneigung zu verzeichnen. Die Cetanzahl liegt dabei für die drei untersuchten Additivöle auf dem selben Niveau und im Bereich der Messgenauigkeit des Prüfverfahrens. Die Bestimmung der Cetanzahl zeigt vor allem die Reaktivität des Grundöls auf, während der Einfluss einzelner Additive nur bedingt verifiziert werden kann. Anhand der Ergebnisse für das 0%-Detergent-Testöl sind zwei Mechanismen denkbar:

- Mit zunehmendem Calciumanteil wird die Tropfengröße, aufgrund geänderter Oberflächenspannung, und damit die erforderliche minimale Dampfmenge zur Auslösung der Selbstzündung des umliegenden Gemisches beeinflusst. Auch Transporteffekte innerhalb eines Tropfens, welche zu einer Agglomeration der  $\text{CaCO}_3$ -Kerne führen können, sind zu berücksichtigen.
- Andererseits wäre es möglich, dass ein erhöhter Calciumanteil chemische Reaktionen auslöst oder verstärkt, welche die Selbstentzündung begünstigen.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass sich die Ölzusammensetzung im Ringspaltbereich deutlich von der frischen Motoröls unterscheidet. Entsprechend der hohen Zersetzungstemperatur von Erdalkalimetallen liegen Detergentien in einer deutlich höheren Konzentration vor als im frischen Motoröl, wodurch ein signifikanter Einfluss auf die Tropfenbildung zu erwarten ist.

**Einfluss verschiedener Surfactants auf das Vorentflammungsverhalten** In Anbetracht der Ergebnisse aus Abbildung 7.19 wird in einem weiteren Schritt der Einfluss verschiedener Surfactants auf das Vorentflammungsverhalten untersucht. Abbildung 7.21 veranschaulicht den Einfluss der drei üblicherweise eingesetzten Surfactants Phenolate, Sulfonate und Salicylate für einen Calcium-Detergent bei 2000ppm.



**Abbildung 7.21:** Einfluss unterschiedlicher Surfactants auf das Vorentflammungsverhalten am Beispiel eines Ca-Detergents bei 2000ppm

Ein Vergleich mit den Eigenschaften der einzelnen Surfactants in Tabelle 4.2 verdeutlicht, dass keine der angeführten Eigenschaften, wie beispielsweise Oxidationsstabilität oder Reinigungsleistung, mit den Ergebnissen in Abbildung 7.21 korreliert. Vielmehr scheinen nicht etwa die thermische Stabilität oder die Oxidationsresistenz, sondern die Auswirkungen der einzelnen Surfactants auf das Benetzungsverhalten und in weiterer Konsequenz auf das Vorentflammungsverhalten entscheidend zu sein. Es ist allerdings festzuhalten, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Surfactants deutlich geringer ausfallen im Vergleich zu dem stark nichtlinearen Verhalten des Calciumanteils. Demnach kommt in weiterer Folge dem polaren Anteil des Detergents größere Bedeutung hinzu.

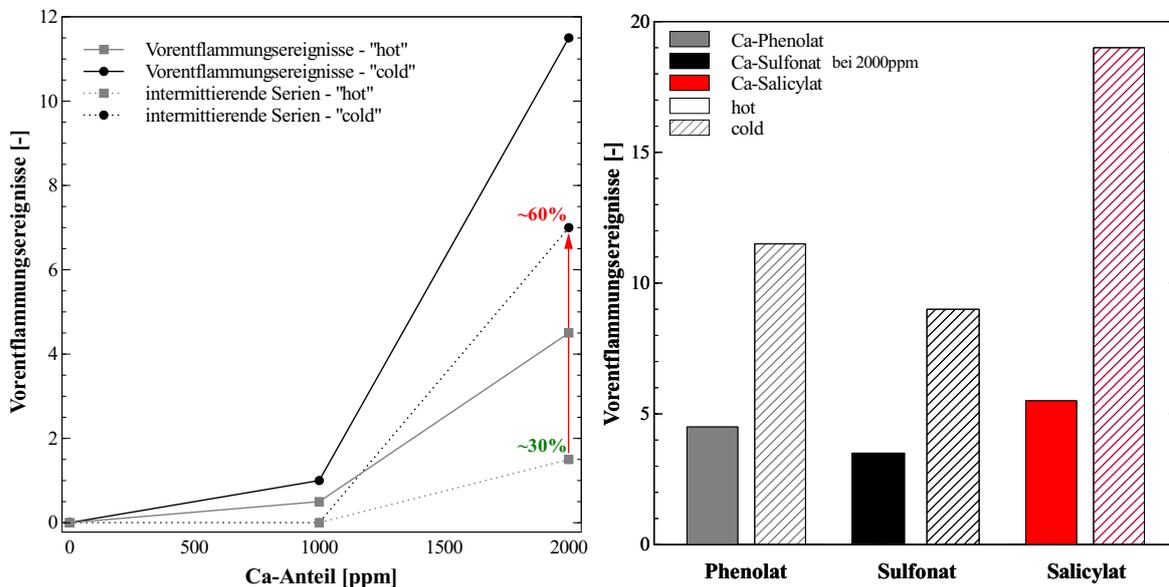
**Einfluss geänderter Betriebsbedingungen auf das Vorentflammungsverhalten** Zur Verifizierung der einzelnen Additiveigenschaften auf das Vorentflammungsverhalten und der ganzheitlichen Betrachtung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Motoröls werden neben den bisherigen Betriebsbedingungen von 90°C Kühlwasser- und 107°C Öltemperatur (**hot**), weitere Betriebsbedingungen bei 60°C Kühlwasser- und 95°C Öltemperatur (**cold**) herangezogen. Abbildung 7.22 zeigt im Detail die gewählten Betriebsbedingungen, den Fokus der Untersuchungen sowie die Ergebnisse mit dem Referenzöl als Ausgangsbasis.

	<b>hot</b>	<b>cold</b>
Betriebspunkt	90°C Kühlwassertemperatur 107°C Öltemperatur	60°C Kühlwassertemperatur 95°C Öltemperatur
Ziel	<i>Bewertung der <b>chemischen</b> und <b>physikalischen</b> Eigenschaften der Gas- und Flüssigphase des Motoröls</i>	
Fokus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidationsstabilität</li> <li>- thermische Stabilität</li> <li>- Verdampfungsverhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oberflächenspannung</li> <li>- Filmdicke</li> <li>- Mischbarkeit mit Kraftstoff</li> </ul>
Ergebnisse Referenzöl	<b>4.5</b> VE-Ereignisse	<b>20</b> VE-Ereignisse

**Abbildung 7.22:** Übersicht der Betriebsbedingungen der hot/cold-Untersuchungen

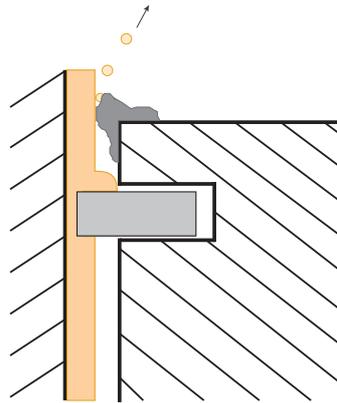
Neben dem signifikanten Einfluss der geringen Kühlwassertemperatur auf das Filmverhalten sowie die Wandbenetzung, verbunden mit lokaler Ölverdünnung, ist zudem eine gewisse Ablagerungsbildung zu erwarten. Eine verstärkte Ablagerungsbildung bedingt unter Umständen eine Überlagerung der Ergebnisse durch partikelinduzierte Vorentflammungen [22].

Abbildung 7.23 zeigt den Vergleich der Vorentflammungsuntersuchungen bei geänderten Betriebsbedingungen für unterschiedliche Ca-Anteile auf Phenolat-Basis sowie für die verschiedenen Surfactants bei einem Ca-Anteil von 2000ppm.



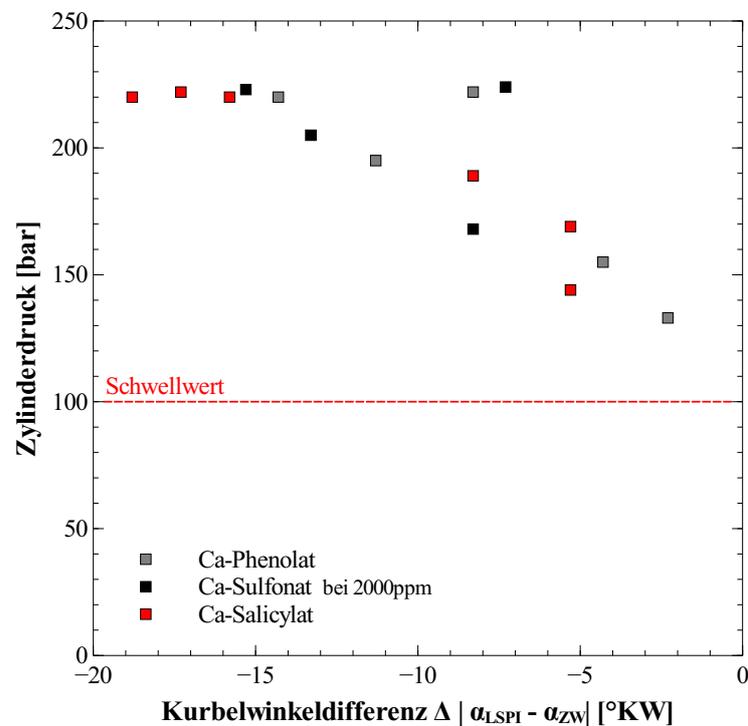
**Abbildung 7.23:** Untersuchungsergebnisse bei hot- und cold-Betriebsbedingungen  
Links: Einfluss des Ca-Anteils; Rechts: Einfluss verschiedener Surfactants bei einem Ca-Anteil von 2000ppm

Die Untersuchungen bei hot- und cold-Betriebsbedingungen verdeutlichen den stark nichtlinearen Einfluss des Ca-Anteils auf das Vorentflammungsverhalten, während die zugrunde liegenden Trends auch bei den verschiedenen Surfactants weitestgehend erhalten bleiben. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen der Parametervariation verstärkt die reduzierte Kühlwassertemperatur durch zunehmende Wandbenetzung und lokale Ölverdünnung den Ablösemechanismus, überlagert durch die jeweiligen Öleigenschaften. Ein Vergleich mit den Ergebnissen bei heißen Betriebsbedingungen zeigt, dass der Anteil an intermittierenden Serien, verursacht durch Brennraumablagerungen, von 30% auf 60% bei kalten Betriebsbedingungen angestiegen ist. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass, trotz vorausgegangener Brennraumreinigung zu Beginn jedes Testlaufs, eine verstärkte Ablagerungsbildung vorliegt. Eine Überlagerung durch Vorentflammungen, ausgelöst durch heiße Partikel oder Ablagerungen, kann daher nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Daneben sind zudem alternative Ablösemechanismen, beispielsweise durch Abschabung von Öltropfen mittels Ablagerungen, siehe [Abbildung 7.24](#), denkbar. Auch eine weiterführende Analyse der verschiedenen Surfactants liefert keine Indikation für die Unterschiede.



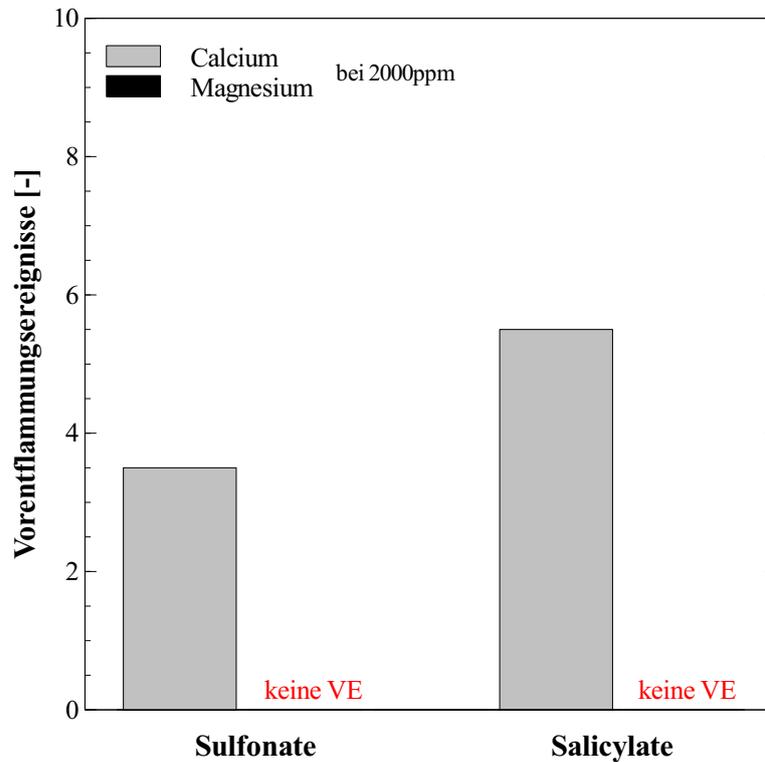
**Abbildung 7.24:** Alternativer Ablösemechanismus durch Abschaben von Öltröpfen mittels Ablagerungen im Ringspaltbereich

Die in Abbildung 7.25 dargestellte Analyse der Vorentflammungsergebnisse der verschiedenen Surfactants bei 2000ppm unter Standardbedingungen, im Hinblick auf deren maximalen Zylinderdruck sowie das zeitliche Auftreten im Brennraum, zeigt keinerlei Korrelation mit den jeweiligen Ölformulierungen. Allerdings verdeutlichen die Ergebnisse den Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Vorentflammungsauslösung und dem resultierenden Zylinderspitzenndruck.



**Abbildung 7.25:** Weiterführende Analyse der verschiedenen Ca-Surfactants und deren Einfluss auf den maximalen Zylinderspitzenndruck ausgelöst durch eine Vorentzündung

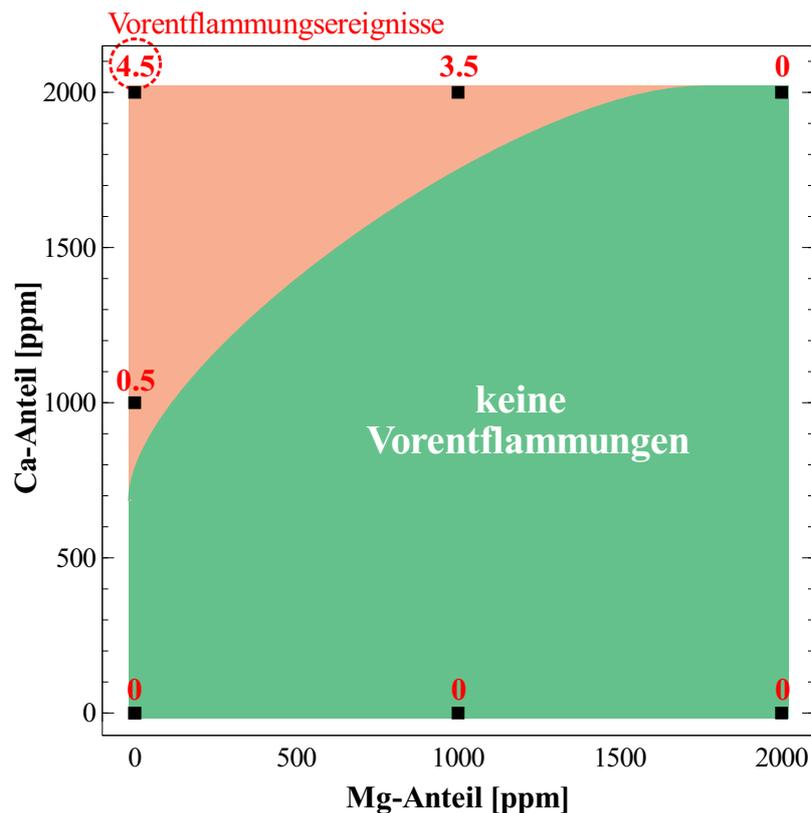
**Einfluss von Magnesium-Detergentien auf das Vorentflammungsverhalten** Neben Calcium wird in heutigen Motorölen, vorrangig im Heavy-Duty-Bereich, auch Magnesium für Detergentien herangezogen. Zur Verifizierung des Einflusses von Magnesium-Detergentien auf das Vorentflammungsverhalten werden zwei Magnesium-Detergents auf Sulfonat- und Salicylat-Basis, siehe Abbildung 7.26 untersucht.



**Abbildung 7.26:** Vergleich des Einflusses von Calcium- und Magnesium-Detergentien auf das Vorentflammungsverhalten für verschiedene Surfactants bei 2000ppm sowie hot- und cold-Betriebsbedingungen

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen mit Calcium-Detergentien zeigt Magnesium keinerlei Vorentflammungsneigung, selbst bei den cold-Betriebsbedingungen von gesteigerter Intensität. Aufgrund des geringeren Molekulargewichts von Magnesium gegenüber Calcium fällt die Neigung zur Ablagerungsbildung deutlich geringer aus [92]. Dies bedingt signifikante Unterschiede in der Menge und der Ausprägung von Ablagerungen im Ringspaltbereich, wodurch unter Umständen auch das Filmverhalten des Motoröls im Ringspaltbereich in seiner Zusammensetzung sowie in seinen physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise Filmdicke und Benetzungsverhalten, beeinflusst wird. Zur weiteren Verifizierung, ob Magnesium-Detergentien zusätzlich auch eine hemmende Wirkung auf die Auslösung von Vorentflammungen haben, werden nachfolgend kombinierte Additivpakete bestehend aus Ca- und Mg-Detergentien untersucht.

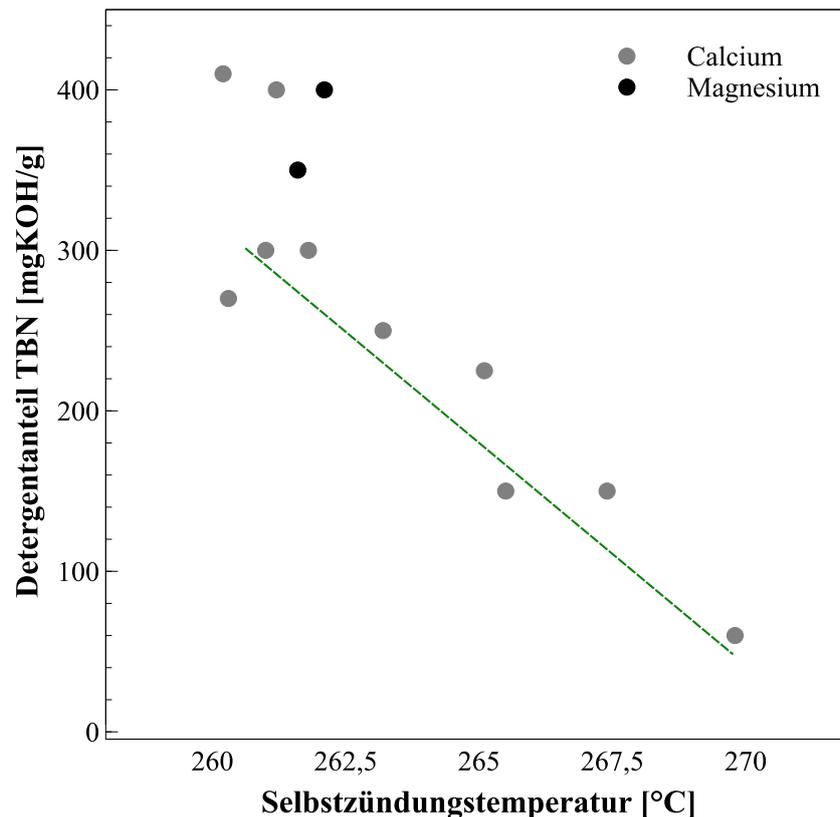
Abbildung 7.27 gibt zusammenfassend einen Überblick über die bereits dargestellten Erkenntnisse für Ca-Phenolat, die Magnesium-Detergentien sowie die Vorentflammungsergebnisse der verschiedenen Testöle mit kombinierten Calcium- und Magnesium-Detergentien. Im Rahmen der kombinierten Detergentien wird einem Ca-Phenolat jeweils bei 2000ppm zusätzlich Magnesium-Sulfonat in einem Anteil von 1000 bzw. 2000ppm beigemischt.



**Abbildung 7.27:** Einfluss von metall-basierenden Detergentien bis jeweils 2000ppm auf die Vorentflammungsneigung

Die Ergebnisse der kombinierten Detergentien verdeutlichen, dass magnesiumhaltige Detergentien eine signifikante Reduktion der Vorentflammungsneigung bewirken. Bereits eine Beimengung von 1000ppm Magnesium bedingt eine geringere Vorentflammungsneigung, welche bei einem Anteil von 2000ppm bereits einen *vorentflammungsfreien* Betrieb ermöglicht. Diese Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass die Anwesenheit von Magnesium eine Beeinflussung des Oxidationsprozesses, im Sinne eines Inhibitors, bewirkt. Zur Abklärung eines möglichen katalytischen Effekts von Calcium auf den Oxidationsprozess wird in [Abschnitt 7.3.3.3](#) der Einfluss verschiedener Additive auf das Selbstzündungsverhalten, anhand der Bestimmung ihrer Klopfneigung, untersucht.

Zur weiteren Verifizierung des Einflusses der verschiedenen metall-basierenden Detergentien wird in einer weiterführenden Analyse die Selbstzündungstemperatur einzelner Testöle bestimmt. Die Bestimmung der Selbstzündungstemperatur erfolgt anhand der dynamischen Differenzkalorimetrie bei einem Druck von 10bar. Abbildung 7.28 zeigt die Selbstzündungstemperatur der einzelnen Testöle.

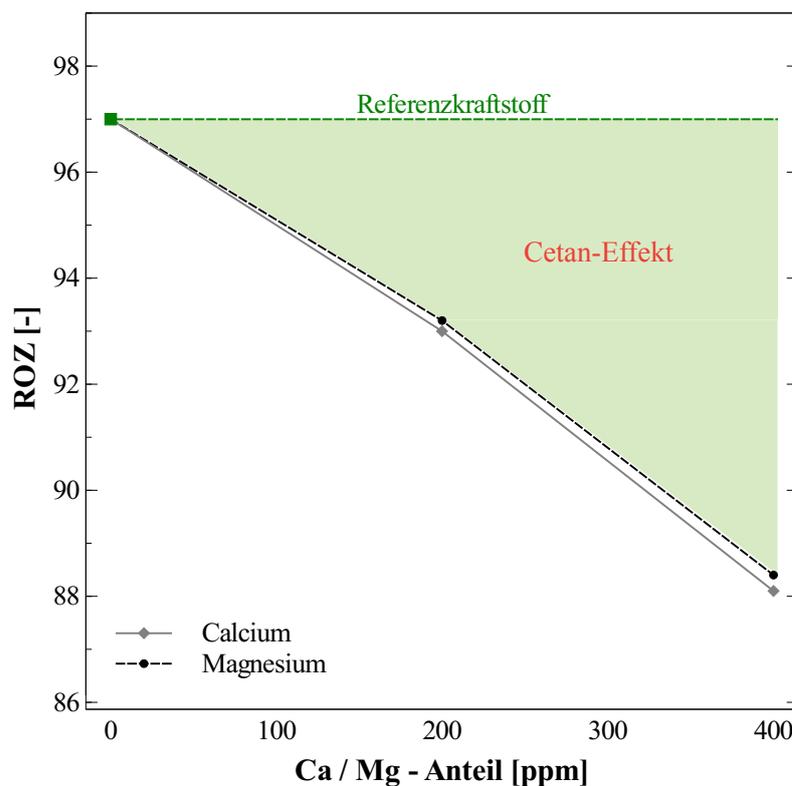


**Abbildung 7.28:** Einfluss metall-basierender Detergentien auf die Selbstzündungstemperatur verschiedener Testöle entsprechend dynamischer Differenzkalorimetrie bei 10bar [109]

Die Untersuchungen zeigen eine sehr gute Korrelation zwischen der Reduktion der Selbstzündungstemperatur und der steigenden TBN, welche den steigenden Detergent-Anteil im Motoröl repräsentiert. Trotz ähnlich niedriger Selbstzündungstemperaturen wie Calcium-Detergentien bei identischem Detergent-Anteil, weisen Magnesium-Detergentien keinerlei Vorentflammungsneigung auf. Diese Erkenntnisse verdeutlichen, dass der Einfluss von Magnesium auf den Vorentflammungsmechanismus sowie die Wechselwirkung mit Calcium im Ringspaltbereich wesentlich komplexer ist. Um das Selbstzündungsverhalten dieser beiden Detergentien näher zu betrachten, werden im nächsten Abschnitt jeweils Beimengungen zum Referenzkraftstoff auf deren Einfluss auf die Klopfneigung in einem CFR-Motor untersucht.

### 7.3.3.3 Einfluss verschiedener Additive auf das Selbstzündungsverhalten

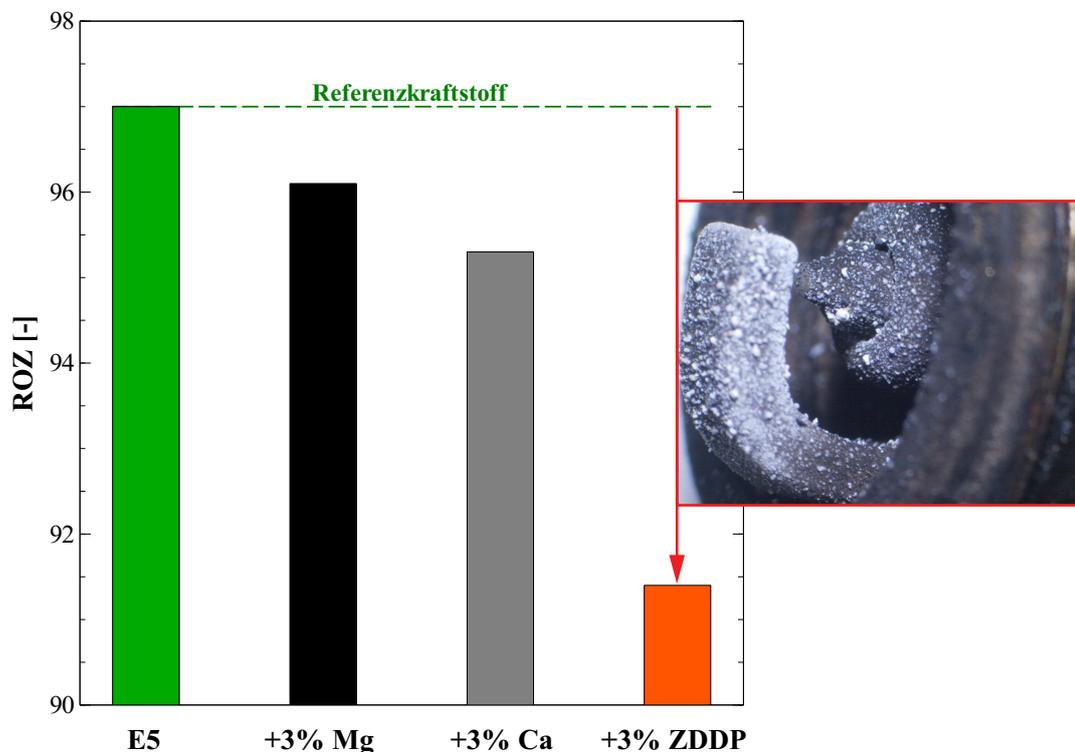
Zur weiteren Verifizierung der einzelnen Additive auf das Selbstzündungsverhalten werden diese in einem bestimmten Mischungsverhältnis dem Referenzkraftstoff beigemischt und in einem CFR-Motor die Klopfneigung ermittelt. Die Bestimmung der Klopfneigung ermöglicht dabei in erster Näherung auf die Einflüsse unter Vorentflammungsbedingungen zu schließen. Abbildung 7.29 zeigt die Auswirkungen auf die Oktanzahl durch Beimengung zweier Testöle mit Calcium- bzw. Magnesium-Detergent bis zu einem Verhältnis von 20% (entspricht einem Detergentanteil von 400ppm).



**Abbildung 7.29:** Einfluss verschiedener Testöle auf die Klopfneigung

Die auf diese Weise nur geringfügig eingebrachten Calcium bzw. Magnesium-Anteile zeigen keinerlei Unterschiede im Klopfverhalten, wobei ein Einfluss der einzelnen Erdalkalimetalle möglicherweise durch den signifikanten Cetan-Effekt überlagert ist. Die Zumischung der Testöle bedingt eine signifikante Reduktion der Selbstzündungstemperatur des Kraftstoffs entsprechend der hohen Basisölreaktivität. Aus diesem Grund wird weiterführend auf reine Calcium- bzw. Magnesium-Detergentien zurückgegriffen. Dies erlaubt, unter Ausschluss der Basisölreaktivität, selektiv mögliche katalytische Einflüsse der einzelnen Additive zu verifizieren. Neben den beiden Detergentien wird dabei auch die Beimengung von 3% ZDDP zum Referenzkraftstoff untersucht.

In Abbildung 7.30 sind im Detail die Auswirkungen der jeweiligen Reinstoffe auf das Klopfverhalten dargestellt.

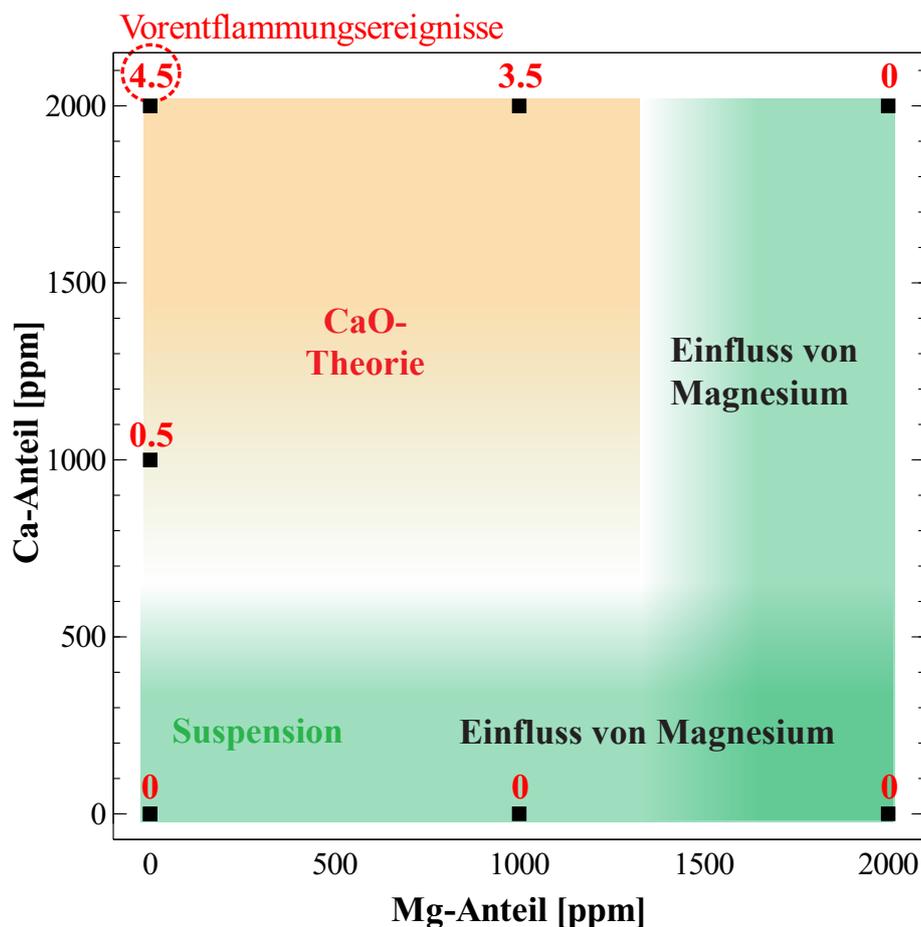


**Abbildung 7.30:** Einfluss der einzelnen Reinstoffe auf die Klopfneigung sowie die signifikante Ablagerungsbildung von ZDDP im Brennraum des CFR-Motors (Bildausschnitt zeigt die Zündkerzenelektrode)

Die Ergebnisse zeigen den erhöhten Einfluss von Calcium auf den Oxidationsprozess im Vergleich zu dem additivierten Referenzkraftstoff mit Magnesium-Sulfonat. Unter Berücksichtigung, dass leichter siedende Motorölanteile bei erhöhten Temperaturen im Ringspaltbereich bereits verdampfen, ist von einer gesteigerten Konzentration der Erdalkalimetalle auszugehen. Dadurch liegt deren Konzentration weit über jener im Frischöl, wodurch, im Falle calciumhaltiger Detergentien, der dargestellte Einfluss auf den Oxidationsprozess womöglich weitaus signifikanter ausfällt. Die Untersuchungen des Selbstzündungsverhaltens der einzelnen Detergentien geben damit eine erste Indikation über die unterschiedliche Beeinflussung der Vorentflammungsneigung durch Calcium und Magnesium. Im Hinblick der kombinierten Detergentien und der Kompensation der Vorentflammungsneigung durch die Beimengung von 2000ppm Magnesium liegt die Vermutung nahe, dass Magnesium eine Beeinflussung des Oxidationsprozesses bewirkt oder die Interaktion mit Calcium zu Änderungen im Auslösemechanismus führt. Allerdings ist die genaue Klärung des Einflusses von Magnesium auf das Vorentflammungsverhalten Gegenstand weiterer Forschungsvorhaben.

Abschließend sei die signifikante Reduktion der ROZ durch die Beimengung von ZDDP erwähnt. Aufgrund verstärkter Ablagerungsbildung im gesamten Brennraum, verbunden mit dem reduzierten Wandwärmeübergang, erfolgt eine deutliche Steigerung der Brennraumtemperatur, einhergehend mit einer Reduktion der Oktanzahl. Ungeachtet der Tatsache, dass der ZDDP-Anteil, im Vergleich zur konventionellen Anwendung im Motoröl, erhöht ist, verdeutlichen die Ergebnisse zudem die Neigung zur Ablagerungsbildung der einzelnen Reinstoffe.

**Schlussfolgerungen - metall-basierender Detergentien** Abschließend werden die aktuellen Hypothesen und Schlussfolgerungen im Hinblick auf die unterschiedlichen Einflüsse der Detergentien zusammengefasst. Abbildung 7.31 stellt die wesentlichen Hypothesen anhand der Vorentflammungsergebnisse der metall-basierenden Detergentien dar.



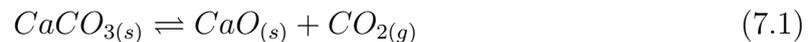
**Abbildung 7.31:** Auswirkung des Ca- und Mg-Anteils auf die Anzahl der Vorentflammungsereignisse sowie wesentliche Hypothesen zur Vorentflammungsneigung metall-basierender Detergentien

## Suspension

Die Ergebnisse der detergentfreien Testöle, selbst bei cold-Betriebsbedingungen, verdeutlichen, dass mit zunehmendem Ca-Anteil, im Sinne einer Suspension, möglicherweise die Tropfengröße und damit die Vorentflammungsneigung beeinflusst wird. Die Untersuchungen von Morikawa et al. [110] zeigten ebenso keinerlei Vorentflammungen beim Einsatz eines detergentfreien Testöls. Entsprechend dieser Theorie liegt die Vermutung nahe, dass ohne vorhandenen Detergent im Motoröl, abgelöste Öltropfen aus dem Ringspaltbereich, im Hinblick fehlender Oberflächen zur heterogenen Keimbildung, signifikant kleiner ausfallen und daher nicht die nötige Mindestzündenergie aufbringen. Demnach erfolgt mit zunehmendem Ca-Anteil eine Erhöhung des Anteils größerer  $\text{CaCO}_3$ -Kerne, welche den Ausgangspunkt für die weitere Tropfenbildung darstellen können. Folglich würde auch der zunehmende Magnesium-Anteil eine Erhöhung der abgelösten Tropfengröße bewirken. Aufgrund der geringeren Zersetzungstemperatur von Magnesium wäre es allerdings denkbar, dass abgelöste Öltropfen bereits zersetzt sind noch bevor eine ausreichende Größe zur Initiierung einer Vorentflammung erreicht wird.

## CaO-Theorie

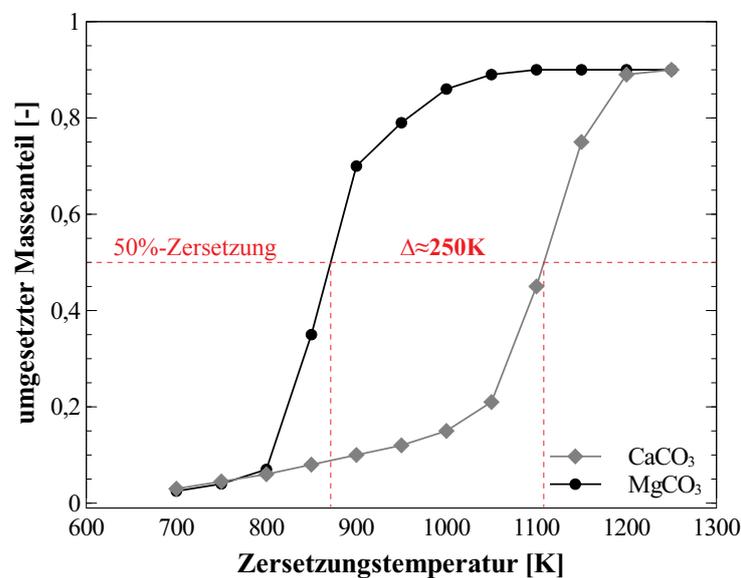
Dieser Theorie liegt zu Grunde, dass Calcium als Kern aus Calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$  im Motoröl durch den Surfactant gebunden ist. Bei hohen Temperaturen erfolgt die thermische Zersetzung zu CaO und  $\text{CO}_2$  gemäß Gleichung 7.1 [111]:



Die gebildeten CaO-Partikel reagieren ihrerseits wiederum mit  $\text{CO}_2$  in einer exothermen Reaktion zu  $\text{CaCO}_3$ . Bei dieser exothermen Reaktion können die CaO-Partikel Temperaturen von über 1000K erreichen. Moriyoshi et al. [111] stellt in seinen Untersuchungen die Vermutung an, dass ein abgelöster Öltropfen diffusiv verbrennt und der  $\text{CaCO}_3$ -Kern in ein CaO-Partikel zersetzt wird. Während des nachfolgenden Kompressionstakts reagiert das CaO-Partikel wiederum mit  $\text{CO}_2$  (Restgas, AGR) und heizt sich auf über 1000K auf. Damit stellt das aufgeheizte CaO-Partikel eine mögliche Vorentflammungsursache im Sinne eines lokalen Hot spots dar. Die Simulationsergebnisse in [111] zeigen zudem eine signifikante Reduktion der Zündverzugszeit mit zunehmender Partikelgröße. Dies korreliert mit den Erkenntnissen der stark nichtlinearen Vorentflammungsneigung mit steigendem Calciumanteil. Auch die Tatsache, dass gebildete CaO-Partikel während des Ladungswechselvorgangs nicht ausgeschoben werden dürfen, stimmt mit der Vorstellung einer statistischen Betrachtung sowie dem stochastischen Auftreten ölunduzierter Vorentflammungen überein.

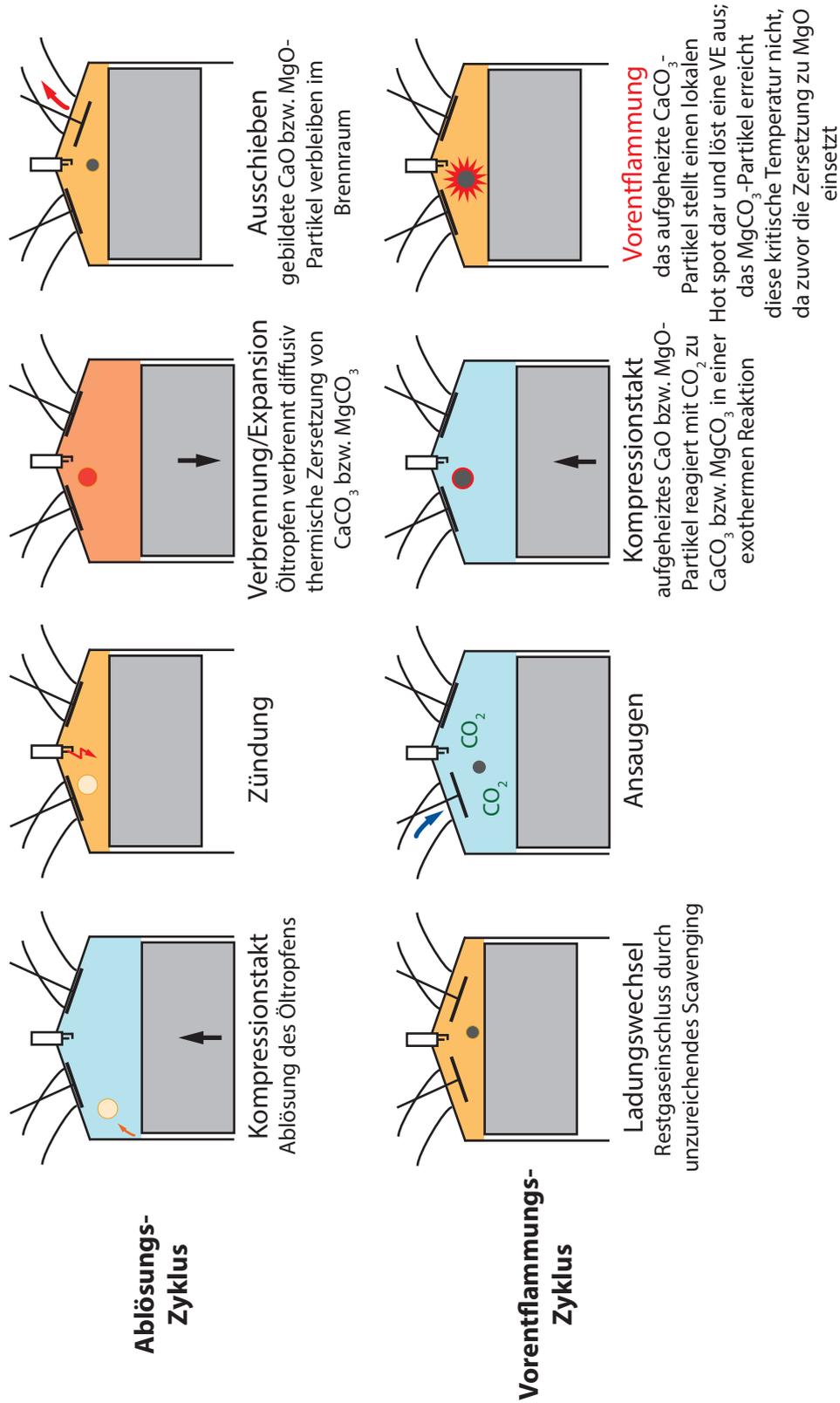
### Einfluss von Magnesium auf den Vorentflammungsmechanismus

Sowohl die Ergebnisse der Magnesium-Detergentien als auch der kombinierten Detergentien zeigen einen signifikanten Einfluss von Magnesium auf die Vorentflammungsneigung. Da nicht von physikalischen Unterschieden im Hinblick auf das Filmverhalten (Filmdicke, Oberflächenspannung) und den Ablösemechanismus auszugehen ist, wird vermutet, dass Magnesium deutlichen Einfluss auf den Oxidationsprozess eines abgelösten Öltropfens nimmt. Unter Berücksichtigung der CaO-Theorie liegt die Ursache des Einflusses von Magnesium auf das Vorentflammungsverhalten möglicherweise ebenfalls in dessen thermischer Zersetzung von  $\text{MgCO}_3$  zu  $\text{MgO}$  und  $\text{CO}_2$ , analog zu Gleichung 7.1, begründet. Abbildung 7.32 ist zu entnehmen, dass die thermische Zersetzung von Magnesiumcarbonat bei deutlich geringeren Temperaturen einsetzt und die erneute exotherme Reaktion wieder zu  $\text{MgCO}_3$  ein geringeres Energieniveau bereitstellt.



**Abbildung 7.32:** Thermische Zersetzung der Erdalkalimetalle  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{MgCO}_3$  [112] (eigene Darstellung)

Aufgrund der endothermen Zersetzung von  $\text{MgCO}_3$  auf dem Temperaturniveau von bereits ca. 870K wird der Temperaturanstieg abgeschwächt,  $\text{MgCO}_3$  erreicht nicht ein so hohes Temperaturniveau wie  $\text{CaCO}_3$  (dieses liegt bei ca. 1100K, siehe Abb. 7.32). Dieser Hypothese folgend stellen magnesiumhaltige Partikel keine signifikanten Hot spots dar, welche das umliegende Kraftstoff-Luft-Gemisch entzünden können. Zur genauen Klärung der unterschiedlichen Effekte von Calcium und Magnesium auf Verbrennungsanomalien sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig. Abbildung 7.33 zeigt abschließend, in Anlehnung an die Erkenntnisse von Othomo et al. [58] und Moriyoshi et al. [111], eine schematische Modellvorstellung über den Einfluss von Ca- und Mg-Detergentien auf die Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen.



**Abbildung 7.33:** Schematische Modellvorstellung über den Einfluss von Ca- und Mg-Detergentien auf die Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen in Anlehnung an die Erkenntnisse von Ohtomo et al. [58] und Moriyoshi et al. [111] (eigene Darstellung)

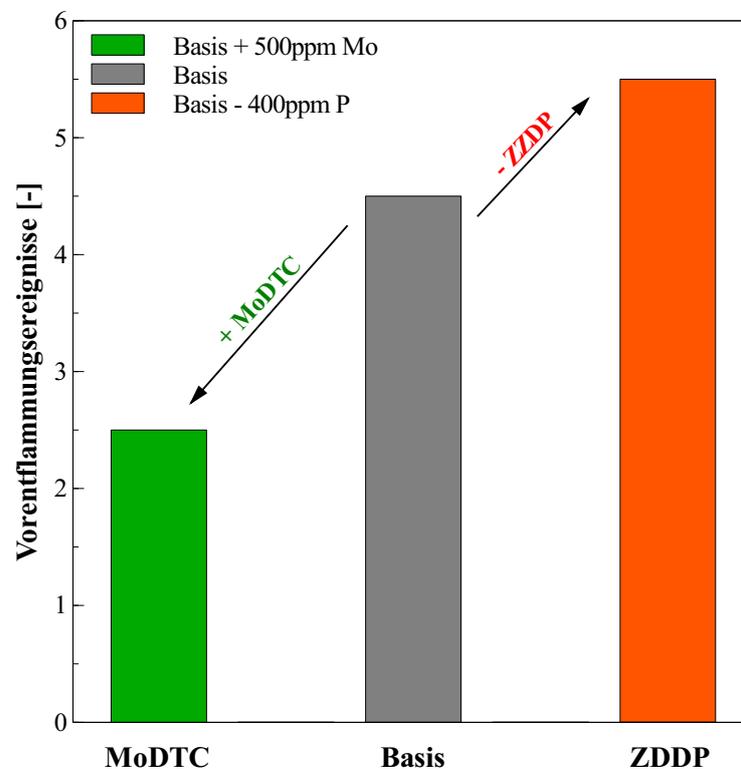
### 7.3.3.4 Einfluss verschiedener Antioxidantien

Neben Detergentien können auch weitere Inhaltsstoffe des Motoröls Einfluss auf die Vorentflammungsneigung besitzen. Zur Beurteilung verschiedener Antioxidantien auf den Auslösemechanismus ölunduzierter Vorentflammungen werden nachfolgend speziell additivierte Testöle untersucht. Tabelle 7.7 listet die wesentlichen Eigenschaften dieser Testöle, zur Verifizierung des Einflusses des Reibungsverbessers (MoDTC) sowie von organischen Phosphorverbindungen (ZDDP) auf deren Vorentflammungsneigung, auf. Bei den untersuchten Testölen handelt es sich um 0W-20 Motoröle der API-Klasse III, wobei der eingesetzte Detergent auf einem Phenolat basiert.

**Tabelle 7.7:** Übersicht der wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Testöle

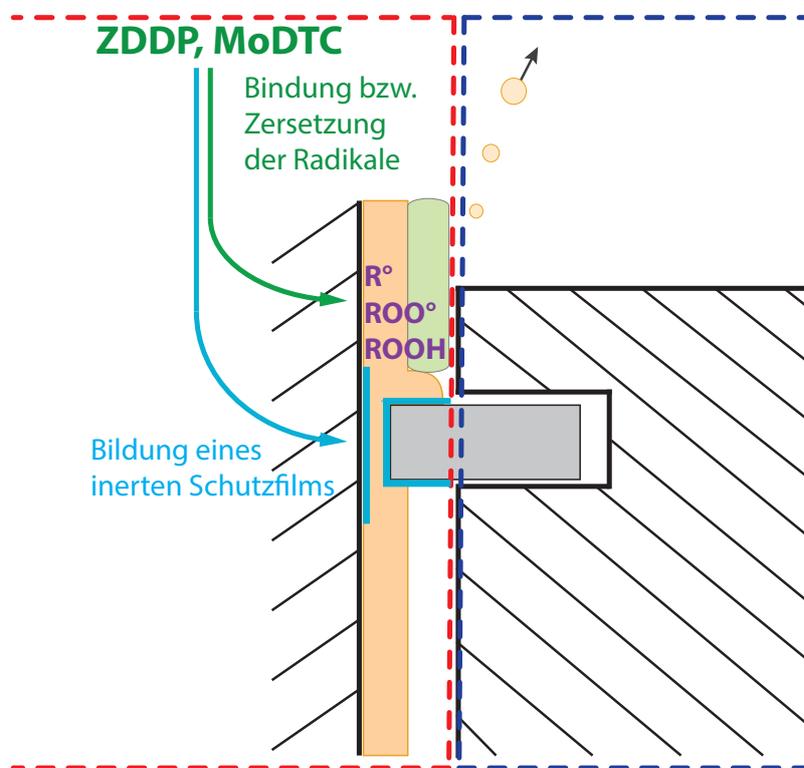
		Basis	MoDTC	ZDDP
Calcium	ppm	2000	2000	2000
Phosphor	ppm	800	800	400
Molybdän	ppm	0	500	0

Abbildung 7.34 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen der verschiedenen Antioxidantien auf die Vorentflammungsneigung.



**Abbildung 7.34:** Einfluss einzelner Antioxidantien auf die Vorentflammungsneigung

Während die Zugabe von MoDTC zu einer signifikanten Reduktion der Vorentflammungsneigung führt, bewirkt die Halbierung des ZDDP-Anteils nur einen geringfügigen Anstieg der Vorentflammungstendenz. In jedem Fall verdeutlichen diese Ergebnisse den Einfluss verschiedener Antioxidantien auf den Auslösemechanismus und korrelieren mit der Theorie über die Wirkungsweise von Antioxidantien. Wie bereits erwähnt, zeigte Magar et al. [51], dass stabile reaktive Spezies der Niedertemperaturoxidation aus vorangegangenen Zyklen zu einer deutlichen Reduktion der Zündverzugszeit bis hin zur Vorentflammung führen können. Vorhandene Antioxidantien können dabei effektiv den Reaktionen im Niedertemperaturbereich, angefangen bei der Bindung erster Radikale bis hin zur Zersetzung von Hydroperoxiden, entgegenwirken und damit die Vorentflammungstendenz reduzieren. Abbildung 7.35 zeigt schematisch die Wirkungsbereiche von Antioxidantien im Hinblick auf ölunduzierte Vorentflammungen.



**Abbildung 7.35:** Schematische Darstellung der Wirkungsbereiche von Antioxidantien im Hinblick auf ölunduzierte Vorentflammungen

Bei beiden Additiven handelt es sich um oberflächenreaktive Substanzen, welche auf tribochemischem Wege einen verschleißmindernden beziehungsweise reibungsmindernden Schutzfilm an den jeweiligen Bauteiloberflächen ausbilden. Aufgrund dieser Schutzfilme, beispielsweise an der Zylinderwand sowie im Bereich des ersten Kolbenringes, besteht zudem die Möglichkeit, dass dadurch der Öltransport in den Feuerstegbereich und in weiterer Folge der Ablösemechanismus beeinflusst wird.

### 7.3.4 Zusammenfassung - Detergentien und Antioxidantien

In der folgenden Zusammenfassung sind zunächst die aktuellen Erkenntnisse der Additivuntersuchungen dargestellt. Darüber hinaus werden die bereits gewonnen Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen zusammengefasst und deren Einfluss den jeweiligen Schritten des Auslösemechanismus ölunduzierter Vorentflammungen zugeordnet. Die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen unterschiedlicher Additivöle sind:

- Der Calciumanteil heutiger Detergents ist maßgeblich an der Vorentflammungsneigung beteiligt. Ausgehend von einem *vorentflammungsfreien* Betrieb für ein 0%-Detergent-Testöl ist ab einem Calciumanteil von 1000ppm ein stark nichtlinearer Anstieg der Vorentflammungsneigung zu verzeichnen.
- Die verschiedenen Surfactants, welche sich, entsprechend ihrer oberflächenreaktiven Struktur, unterschiedlich auf das Benetzungsverhalten und in weiterer Konsequenz auf den Ablösemechanismus auswirken, zeigen Unterschiede im Vorentflammungsverhalten.
- Die Untersuchungen bei geänderten Betriebsbedingungen verdeutlichen den stark nichtlinearen Einfluss des Ca-Anteils auf das Vorentflammungsverhalten, während die zugrunde liegenden Trends auch bei den verschiedenen Surfactants weitestgehend erhalten bleiben.
- Die Magnesium-Detergentien zeigen keinerlei Vorentflammungsneigung und reduzieren im Hinblick auf die kombinierten Detergentien zudem den Einfluss des Calciumanteils auf das Vorentflammungsverhalten. Damit nimmt Magnesium signifikanten Einfluss auf die Auslösung von Vorentflammungen.
- Die Untersuchungen der speziell additivierten Testkraftstoffe verdeutlichen die erhöhte Reaktivität von Calcium auf den Verbrennungsprozess. Der mit Mg-Sulfonat additivierte Testkraftstoff zeigt im Vergleich zu jenem mit Ca nur eine geringfügige Reduktion der Oktanzahl und damit in erster Näherung die unterschiedlichen Effekte von Calcium und Magnesium auf Verbrennungsanomalien.
- Die verschiedenen Antioxidantien haben Einfluss auf den Auslösemechanismus von Vorentflammungen und korrelieren mit der Theorie über die Wirkungsweise von Antioxidantien. Vorhandene Antioxidantien können dabei effektiv den Reaktionen im Niedertemperaturbereich, angefangen bei der Bindung erster Radikale bis hin zur Zersetzung von Hydroperoxiden, entgegenwirken und damit die Vorentflammungstendenz reduzieren.

Anhand der umfangreichen Erkenntnisse hinsichtlich dem Einfluss der einzelnen Motorölspezifikationen auf die Vorentflammungsneigung liegt der Fokus der weiteren Betrachtungen auf dem Einfluss einzelner Kraftstoffe. Im Speziellen werden nachfolgend Ethanolkraftstoffe und Kraftstoffe unterschiedlicher Volatilität betrachtet. Neben erhöhter Verdampfungsenthalpie verbunden mit Ladungskühlung bei Ethanolkraftstoffen nehmen Kraftstoffe unterschiedlicher Volatilität signifikanten Einfluss auf die Wandbenetzung und damit auf die lokale Ölverdünnung im Ringspaltbereich.

## 7.4 Einfluss von Ethanolkraftstoffen

Die Zumischung von Ethanol zu Benzin-Kraftstoff zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, aufgrund des günstigeren H- zu C-Verhältnisses [113] sowie vor allem durch die biogene Herstellung von Ethanol, findet bereits seit vielen Jahren flächendeckenden Einsatz. Speziell bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung zeigen sich weitere positive Effekte, verbunden mit der deutlich höheren Verdampfungsenthalpie von Ethanol im Vergleich zu konventionellem Ottokraftstoff. Einhergehend mit der erhöhten Verdampfungsenthalpie weist Ethanol eine hohe Oktanzahl auf, welche effizienzsteigernde Maßnahmen, wie beispielsweise Anhebung der Verdichtung, Erhöhung des Ladedrucks oder frühere Zündzeitpunkte, erlaubt. [Tabelle 7.8](#) gibt einen Überblick der wesentlichen Eigenschaften von Ethanol im Vergleich zu konventionellem Eurosuper gemäß EN 228.

**Tabelle 7.8:** Wesentliche Eigenschaften von Ethanol [28], [114]

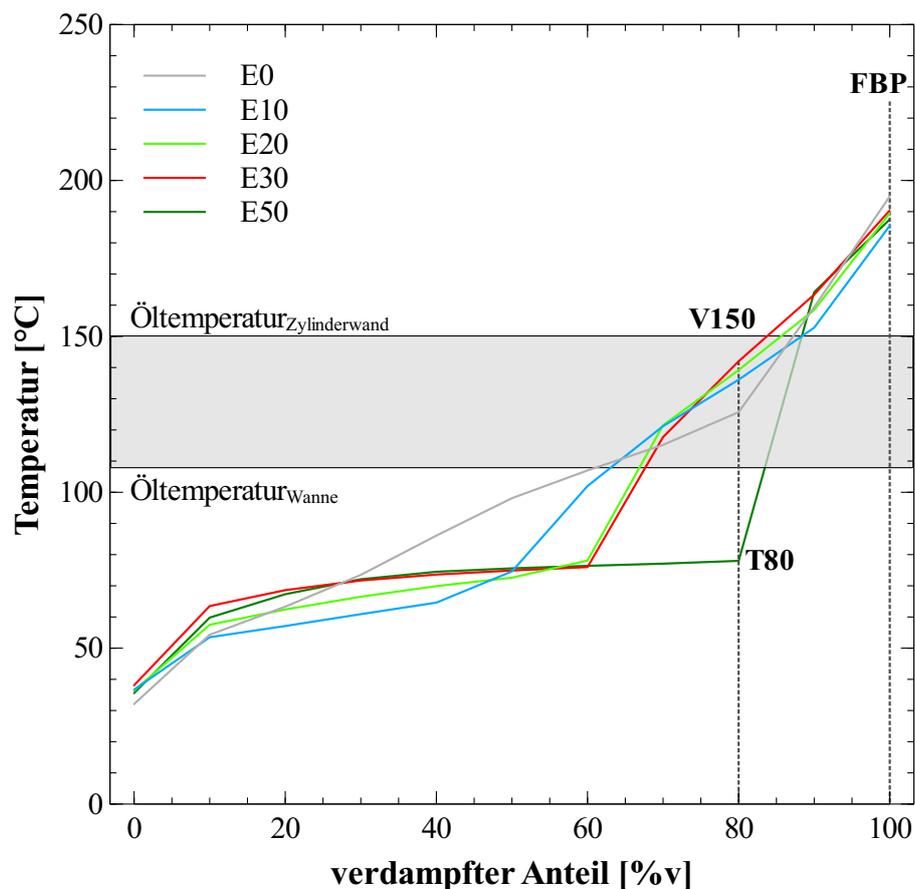
		Eurosuper	Ethanol
ROZ	-	95	109
Heizwert $H_U$	MJ/kg	43	27
Luftbedarf $L_{ST}$	-	14,7	9,0
Verdampfungsenthalpie $h_V$	kJ/kg	305	885
laminare Flammgeschwindigkeit	m/s	0,33	0,41
Massenanteil Kohlenstoff C	%	86,6	47,6
Massenanteil Wasserstoff H	%	13,4	13,0
Massenanteil Sauerstoff O	%	0	39,4

Bereits Martin et al. [115] und Bobicic et al. [116] zeigten, dass Ethanolkraftstoffe, aufgrund der verstärkten Ladungskühlung mit zunehmendem Ethanolanteil, eine signifikante Reduktion der Vorentflammungsneigung ermöglichen. Neben Ethanolkraftstoffen konnte Martin et al. den positiven Einfluss weiterer Alkohole auf die Vorentflammungsneigung sowohl bei Vergaserbetrieb als auch mittels Direkteinspritzung aufzeigen. Zudem verdeutlichte Nozomi et al. [117] in seinen Untersuchungen den Einfluss verschiedener Kraftstoffbestandteile, wie beispielsweise Aromaten, Paraffine, Olefine u. a., auf die Vorentflammungsfrequenz. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird der Einfluss verschiedener Ethanolkraftstoffe, bis zu einem Ethanolanteil von 50%, auf die Vorentflammungsneigung verifiziert. Dabei wird auf die Auslösemechanismen und zum Teil gegensätzlich wirkenden Eigenschaften eingegangen. [Tabelle 7.9](#) gibt einen Überblick der Eigenschaften und Zusammensetzungen der untersuchten Testkraftstoffe.

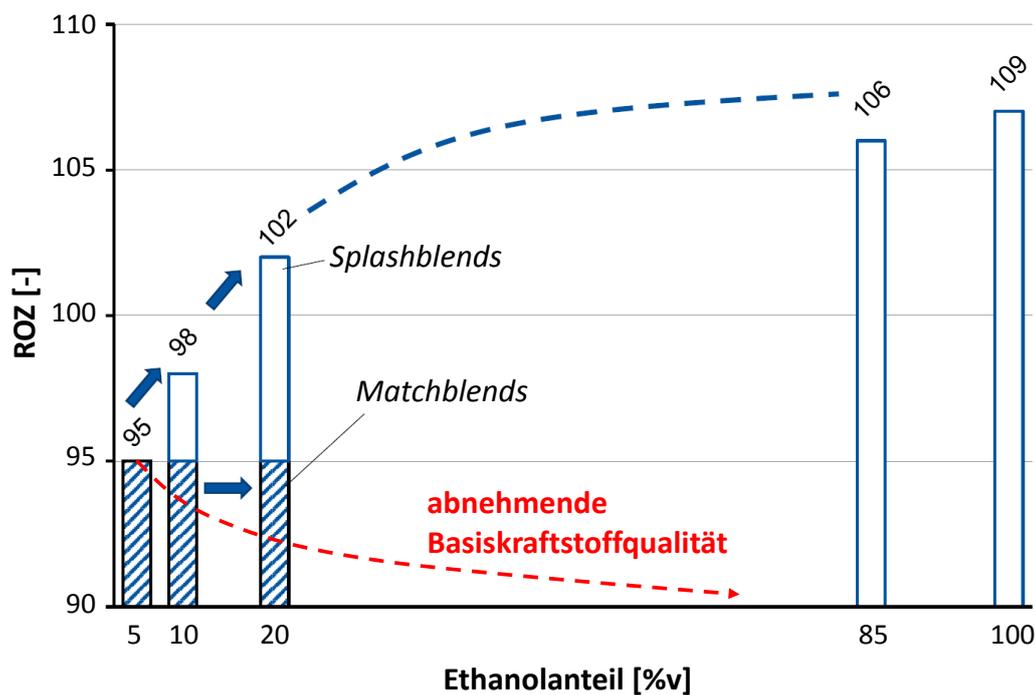
**Tabelle 7.9:** Übersicht der einzelnen Eigenschaften der verschiedenen Testkraftstoffe

	REF	Matchblends					E50specE30	Splash	Norm
		E0	E10	E20	E30	E50		E50S	EN228
<b>ROZ</b>	-	95.5	95.9	96.4	96.7	97.8	103	106	$\geq 95$
<b>MOZ</b>	-	86.0	85.5	86.0	86.2	86.4	88.8	89.1	$\geq 85$
<b>Aromaten</b>	%v	33.1	23.2	20.2	14.3	3.3	11.15	16.55	$\leq 35$
<b>Olefine</b>	%v	5.2	8.0	4.3	0.2	0.3	0.16	2.6	$\leq 18$
<b>Paraffine</b>	%v	61.7	59.2	55.8	53.5	44.9	41.73	30.85	
<b>Ethanol</b>	%v	0	9.6	19.7	32.0	51.5	50	50	$\leq 10$

Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung sind in Abbildung 7.36 die Siedekurven der verschiedenen Ethanolkraftstoffe dargestellt. Die unterschiedliche Volatilität der Kraftstoffe, vor allem für den Testkraftstoff E50, lässt signifikante Unterschiede in der Gemischaufbereitung erwarten.

**Abbildung 7.36:** Siedekurven der verschiedenen Ethanolkraftstoffe

Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen an *Splashblends* wird bei diesen Untersuchungen das Hauptaugenmerk auf sogenannte *Matchblends* gelegt. Im Unterschied zu *Splashblends* werden mit zunehmendem Ethanolanteil die hochoktanigen Kraftstoffanteile sukzessive substituiert und dabei eine Spezifikation, wie beispielsweise die Motor-Oktanzahl MOZ, annähernd konstant gehalten. Auf diese Weise erfolgt mit stetiger Zumischung eine signifikante Veränderung der Zusammensetzung des Grundkraftstoffs. Der Vollständigkeit halber zeigt Abbildung 7.37 schematisch die Unterschiede zwischen *Splash-* und *Matchblends*.



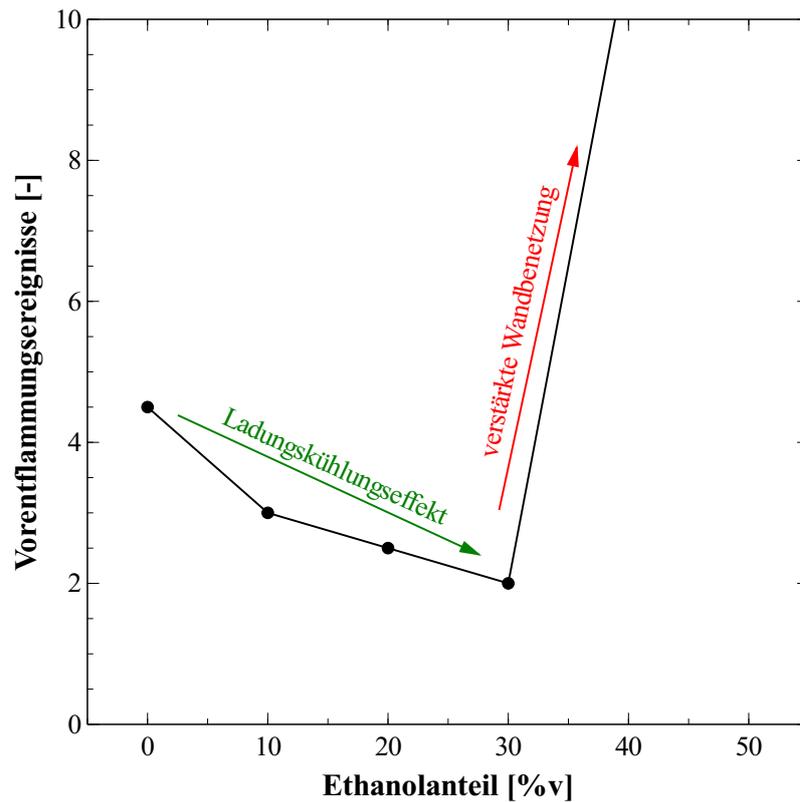
**Abbildung 7.37:** Unterschiede zwischen *Splash-* und *Matchblends* entsprechend geänderter Zusammensetzung des Basiskraftstoffs [3] (eigene Darstellung)

Zusätzlich, zu den in Tabelle 7.9 angeführten Ethanolkraftstoffen, werden zwei weitere E50-Testkraftstoffe

- *E50specE30* - hierbei wird dem E30-Matchblend reines Ethanol zugemischt bis ein Ethanolanteil von 50%v erreicht wird
- *E50S* - 1:1-Mischung des sauerstofffreien Referenzkraftstoffs E0 mit reinem Ethanol

untersucht.

Abbildung 7.38 zeigt den Einfluss der verschiedenen Testkraftstoffe auf die Vorentflammungsfrequenz.

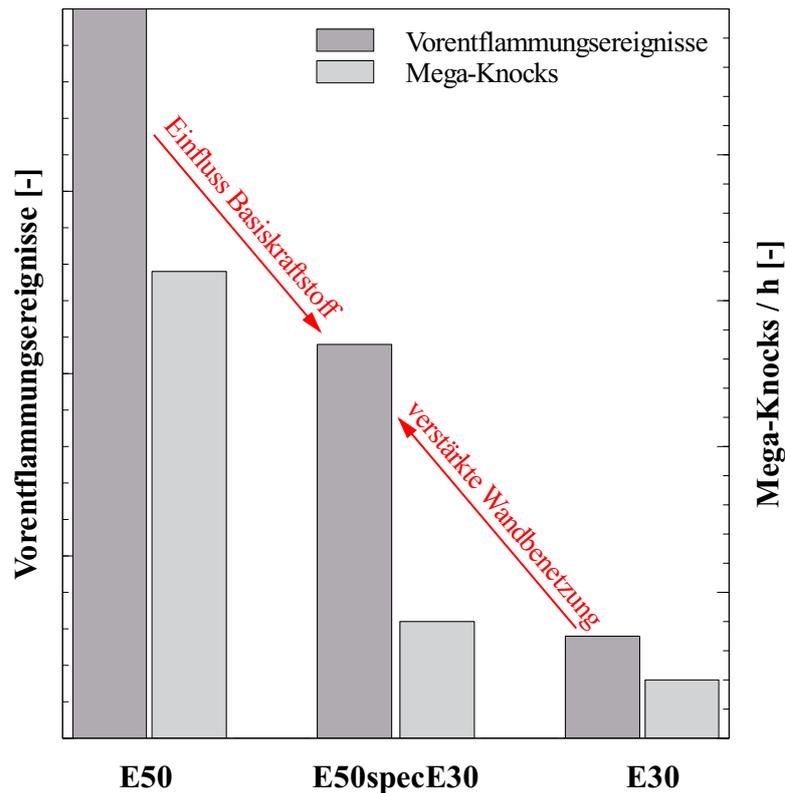


**Abbildung 7.38:** Einfluss des Ethanolanteils auf die Vorentflammungsfrequenz bei Betrachtung spezieller Matchblends

Bis zu einem Ethanolanteil von 30%v ist eine deutliche Reduktion der Vorentflammungsneigung aufgrund der steigenden Verdampfungsenthalpie zu verzeichnen. Bei dem Testkraftstoff E50 zeigt sich, entgegen den Erwartungen der weiter gesteigerten Verdampfungsenthalpie, ein signifikanter Anstieg der Vorentflammungstendenz. Ein erster Vergleich mit E30 lässt die Vermutung zu, dass der geringere Heizwert, verbunden mit einer erhöhten Einspritzmenge, Änderungen in der Verdampfungscharakteristik, die niedrigere Selbstzündungstemperatur von Ethanol sowie eine verstärkte Wandbenetzung und damit signifikantes Abwaschen von Motoröl von der Zylinderwand verursachen.

Um mögliche Quereffekte durch die geänderten Grundkraftstoffzusammensetzungen auszuschließen, werden in einem weiteren Schritt verschiedene E50-Blends untersucht. Dabei wird neben dem E50-Testkraftstoff (E50) und einem eigenen E50-Splashblend (E50S) zusätzlich eine spezielle E50-Variante (E50specE30), auf Basis des E30-Testkraftstoffs, herangezogen.

Abbildung 7.39 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen E50-Blends im Vergleich zu dem Testkraftstoff E30.



**Abbildung 7.39:** Ergebnisse der untersuchten E50-Varianten im Vergleich zu dem Testkraftstoff E30

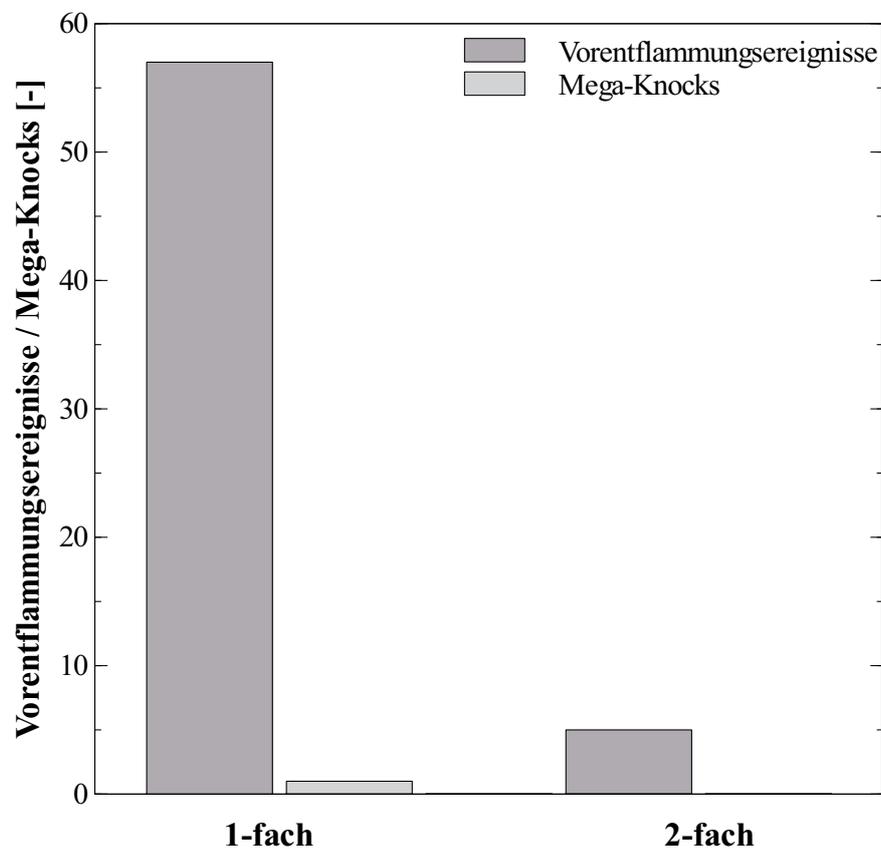
Speziell der Vergleich der E50-Variante auf Basis des E30-Testkraftstoffs mit dem E50-Matchblend verdeutlicht bei gleichem Luftbedarf und annähernd identischem Siedeverhalten<sup>2</sup> aufgrund der Ethanolbeimengung bis 50%v, dass, mit einer Reduktion der Vorentflammungstendenz von rund 45%, die Grundkraftstoffzusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf die Vorentflammungsneigung hat. Wie aus Tabelle 7.9 hervorgeht, ist der Grund dafür die signifikante Reduktion des Aromatengehalts um 70% im Falle von E50 im Vergleich zu E50specE30. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse den signifikanten Einfluss der Wandbenetzung aufgrund des erhöhten Ethanolgehalts von mehr als 46% als Auslöser für ölunduzierte Vorentflammungen anhand der beiden Testkraftstoffe E50specE30 und E30 bei identischem Grundkraftstoff. Allerdings wird trotz erhöhter Vorentflammungsfrequenz das Risiko von Mega-Knocks<sup>3</sup>, aufgrund der deutlich kühleren Brennraumbedingungen, signifikant reduziert.

<sup>2</sup>Bezugnehmend auf Abbildung 7.36 wird durch die Beimengung reinen Ethanols der Anteil an niedrigsiedenden Kraftstoffkomponenten für den Kraftstoff E50specE30 im Vergleich zu E30 signifikant erhöht und ein annähernd identisches Siedeverhalten wie jenes von E50 abgebildet.

<sup>3</sup>Da keine eindeutige Definition einer Schadensamplitude vorliegt und diese von Hersteller zu Hersteller, in Abhängigkeit des entsprechenden Motors sowie des Betriebspunktes, variiert, wurde im Rahmen dieser Arbeit für potentiell schädigende Klopfereignisse, sogenannte Mega-Knocks, eine Druckamplitude größer 20bar, in Anlehnung an die Untersuchungen von Rothe et al. [118], gewählt.

Während bei den Testöluntersuchungen jede Vorentflammung zu einem Mega-Knock führte, zeigen die Ethanolkraftstoffe eine deutliche Reduktion der Mega-Knocks. Zudem waren während den Untersuchungen keinerlei intermittierende Serien zu verzeichnen, wie dies noch bei den Testöluntersuchungen der Fall war. Ursächlich ist dabei vor allem die deutlich geringere Ablagerungsneigung der Ethanolkraftstoffe aufgrund des geringeren Anteils an hochsiedenden Kraftstoffkomponenten.

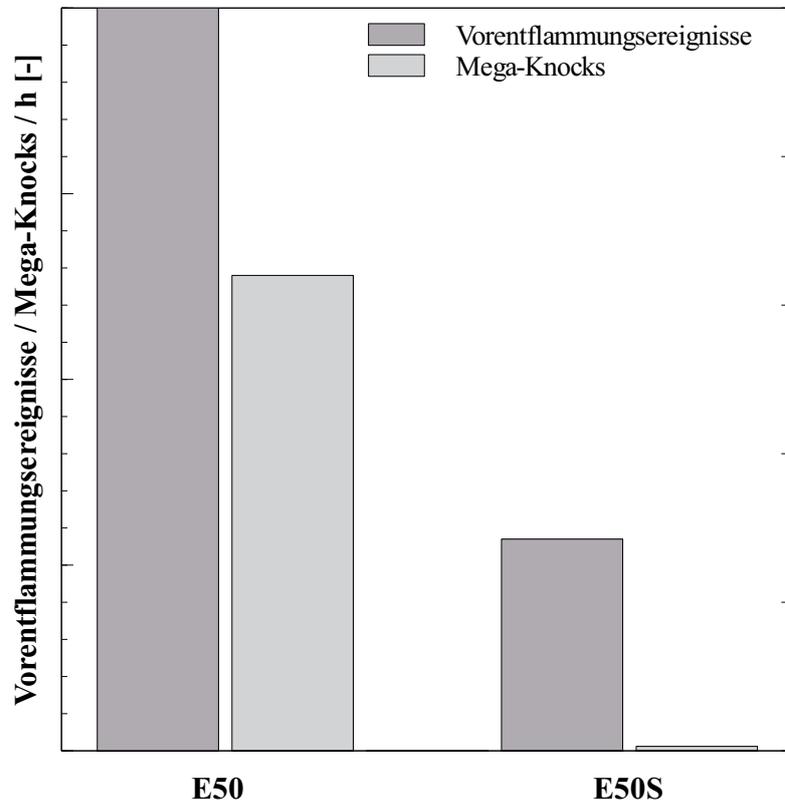
Zur eindeutigen Absicherung der Hypothese der verstärkten Wandbenetzung wird in einem weiteren Schritt der E50-Splashblend bei unterschiedlichen Einspritzstrategien untersucht. Abbildung 7.40 zeigt die Ergebnisse der 1-fach und 2-fach Einspritzung für den E50-Splashblend.



**Abbildung 7.40:** Vergleich des Einflusses von 1-fach und 2-fach Einspritzung auf die Vorentflammungsfrequenz des E50-Splashblends

Die Ergebnisse in Abbildung 7.40, mit einer 90%-igen Reduktion der Vorentflammungsfrequenz bei 2-fach Einspritzung, bestätigen die Hypothese der verstärkten Wandbenetzung. Dadurch wird speziell bei Kraftstoffen mit erhöhtem Ethanolgehalt, verbunden mit einer erhöhten Einspritzmenge, die Gemischaufbereitung essentiell.

Abschließend sind in [Abbildung 7.41](#), zur eindeutigen Abklärung der Unterschiede zwischen Matchblends und Splashblends und den damit einhergehenden Auswirkungen auf die Vorentflammungsneigung mit Fokus auf ölunduzierten Vorentflammungen, die jeweiligen Vorentflammungsereignisse bei einem Ethanolanteil von 50%v dargestellt.

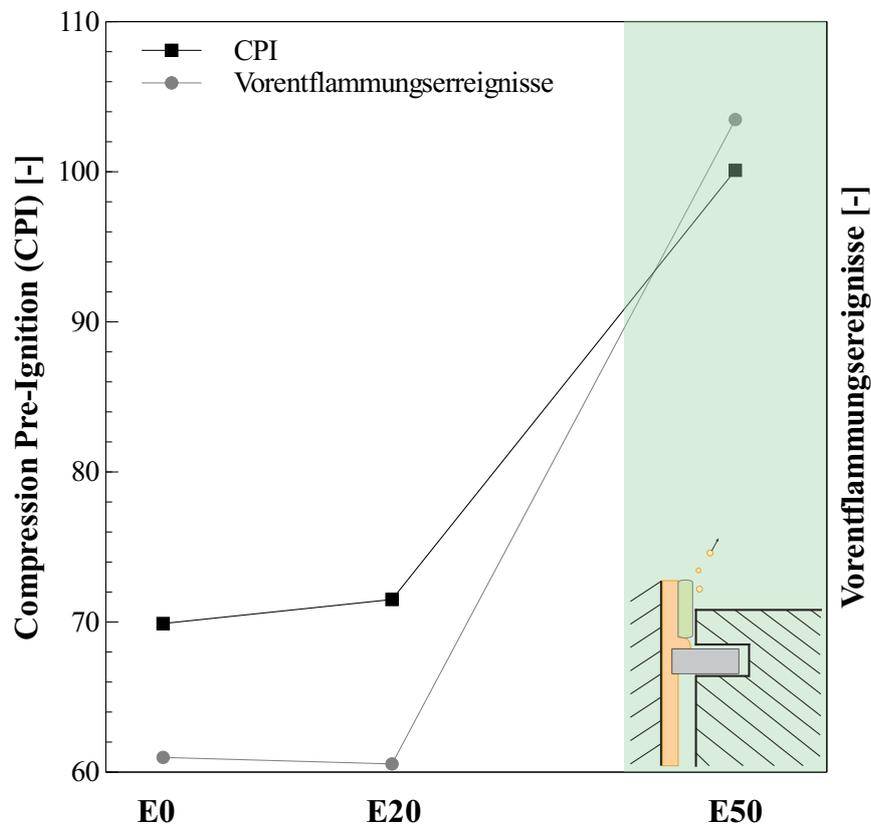


**Abbildung 7.41:** Einfluss von Matchblend und Splashblend auf die Vorentflammungsneigung bei einem Ethanolanteil von 50%v

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse in [Abbildung 7.37](#) verdeutlichen diese Ergebnisse die positiven Auswirkungen eines Splashblends gegenüber einem Matchblend vor allem im Hinblick auf irreguläre Verbrennungsphänomene. Neben der abgeänderten Basiskraftstoffzusammensetzung mit einem deutlich geringeren Aromatengehalt zeigt insbesondere die höhere Oktanzahl des E50-Splashblends von 106 deutliche Auswirkungen auf die Vorentflammungstendenz. Darüber hinaus verdeutlicht der Vergleich von Splashblend und Matchblend in Bezug auf ölunduzierte Vorentflammungen, dass nicht nur ein Anstieg der Oktanzahl, sondern gleichermaßen die Volatilität des Kraftstoffs von essentieller Bedeutung sind. Demzufolge ist die Zusammensetzung des Grundkraftstoffs nicht nur im Hinblick auf die Anteile an Aromaten, Paraffinen und deren Einfluss auf die Klopfneigung entscheidend, sondern vor allem die Kraftstoffvolatilität verbunden mit lokaler Ölverdünnung, weshalb diese in [Kapitel 7.5](#) im Detail betrachtet wird.

### 7.4.1 Kraftstoffbewertung an einem modifizierten CFR-Motor

Zur weiteren Bewertung der untersuchten Ethanolkraftstoffe wird das von Martin et al. [115] entwickelte Prüfverfahren für Kompressionszündungen in der Gasphase (COMPRESSION PRE-IGNITION CPI) angewendet. Die CPI-Zahl gibt dabei die Resistenz des entsprechenden Kraftstoffs gegenüber Kompressionszündungen an. Je höher der Wert der CPI-Zahl ist, desto resistenter ist der Kraftstoff gegenüber Gasphasenzündungen. Im Rahmen dieses Prüfverfahrens wird ein normgerechter CFR-Motor, welcher mit Direkteinspritzung bei zentraler Injektorlage ausgestattet wurde, verwendet. Ausgehend von einer gesteigerten Ansauglufttemperatur von 200°C, gegenüber der MOZ-Methode nach DIN EN ISO5163 [119], wird sukzessive die Verdichtung erhöht bis die erste Vorentflammung auftritt. Die dabei erreichte Verdichtung wird anschließend als Maß für die Vorentflammungsneigung herangezogen. Ähnlich dem MOZ-Verfahren wird Iso-Oktan als Referenzkraftstoff verwendet, um etwaige Auswirkungen durch Motorverschleiß zu kompensieren. Abbildung 7.42 zeigt die bestimmten CPI-Zahlen für die untersuchten Testkraftstoffe E0, E20 und E50 im Vergleich zu den Vorentflammungsergebnissen am Motorprüfstand.



**Abbildung 7.42:** Vergleich der CPI-Zahlen mit den Vorentflammungsergebnissen am Motorprüfstand für die Testkraftstoffe E0, E20 und E50

Während mit zunehmendem Ethanolgehalt die Neigung zur Kompressionszündung abnimmt, zeigen die Ergebnisse am Motorprüfstand ein gegenteiliges Bild. Der deutliche Anstieg der CPI-Zahl im Falle von E50 veranschaulicht, dass keine Zündung in der Gasphase erfolgt, sondern das Auslösen einer Vorentflammung von Öl- und Kraftstofftropfen, abgelöst durch verstärkte Wandbenetzung, bestimmt wird. Dies verdeutlicht, dass die höheren Ethanolanteile zu einer verstärkten Wandbenetzung führen, welche in weiterer Folge für das signifikante Ablösen von Öl- und Kraftstofftropfen von der Zylinderwand und dem Ringspaltbereich verantwortlich ist.

Damit bestätigen diese Untersuchungen die Ergebnisse der 2-fach Einspritzung am Motorprüfstand in der Hinsicht, dass vor allem die Gemischaufbereitung bei höherem Ethanolgehalt entscheidend ist, während der Kraftstoff grundsätzlich eine deutlich höhere Resistenz gegenüber Vorentflammungen aufweist.

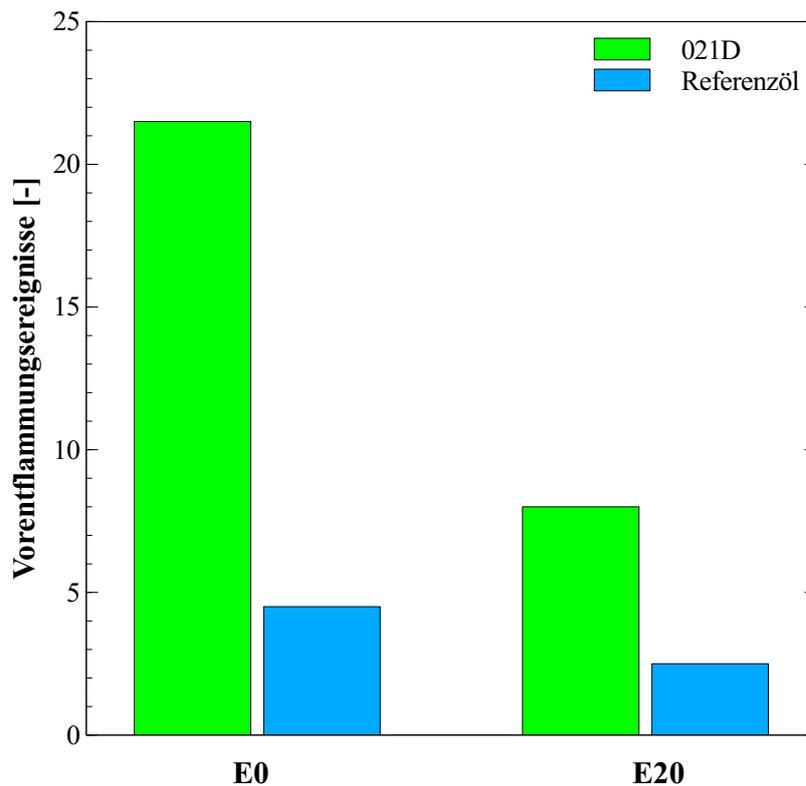
Diese Ergebnisse korrelieren mit den Erkenntnissen von Hülser et al. [120], der zeigte, dass im Falle von Ethanol keine Zündung in der Gasphase vorliegt, sondern sich das Gemisch an einem Partikel (verdampfender Öltropfen, fester aufgeheizter Partikel) im Brennraum entzündet. Die Messungen am CFR-Motor bestätigen die Ergebnisse des Motorprüfstands, wodurch in eindeutiger Weise die erhöhte Einspritzmenge bei E50, verbunden mit signifikanter Wandbenetzung, verantwortlich für die erhöhte Vorentflammungsfrequenz ist. Sieht man in weiterer Folge einen abgelösten verdampfenden Öltropfen als lokalen Hot spot an, welcher eine deutlich kürzere Zündverzugszeit als das umgebende Kraftstoff-Luft-Gemisch aufweist und eine eigene, lokal begrenzte, Wärmefreisetzung hat, dann ist die verstärkte Vorentflammungsfrequenz in diesem Fall gleichzusetzen mit der erhöhten Neigung von Ethanolkraftstoffen zu Oberflächenzündungen [115]. Zusammenfassend erschließt sich, dass sofern ein lokaler Hot spot im Brennraum vorhanden ist, die hohe Resistenz von Ethanolkraftstoffen gegenüber Gasphasenzündungen durch deren Neigung zur Oberflächenzündung, aufgrund der höheren Reaktivität überlagert, wird.

Im Falle der Oberflächenzündung überwiegt die höhere Reaktivität verbunden mit der geringeren Selbstentzündungstemperatur von Ethanol, welche auch durch einen verstärkten Ladungskühlungseffekt, entsprechend der hohen Verdampfungsenthalpie, nicht kompensiert werden kann.

## 7.4.2 Mögliche Wechselwirkung mit Motorölspezifikationen

Zur Abklärung, ob möglicherweise Wechselwirkungen zwischen speziellen Motorölspezifikationen und dem Anteil der Ethanolkraftstoffe vorliegen, wird im Rahmen dieser Untersuchungen das Testöl mit der höchsten Vorentflammungsneigung am Beispiel von E20 betrachtet.

Abbildung 7.43 zeigt die Ergebnisse des Testöls 021D sowie des Referenzöls am Beispiel von E0 und E20.



**Abbildung 7.43:** Einfluss von E20 auf das Vorentflammungsverhalten verschiedener Testöle

Abbildung 7.43 verdeutlicht, dass keinerlei Wechselwirkungen zwischen den Ethanolkraftstoffen und den verschiedenen Motorölen bestehen. Ein Vergleich mit Abbildung 7.38 zeigt, dass die rund 50%-ige Reduktion der Vorentflammungsfrequenz mit E20 global auf die deutlich kühleren Brennraumbedingungen zurückzuführen ist und damit auch für verschiedene Testöle gilt. Da sich, entsprechend den Erwartungen, keine Wechselwirkungen bei diesen Untersuchungen zeigten, unterstreichen diese Ergebnisse das weitere Potential erhöhter Ethanolanteile, um die Vorentflammungsproblematik moderner hochaufgeladener Downsizingmotoren zu reduzieren.

### 7.4.3 Zusammenfassung - Ethanoluntersuchungen

Die Ethanoluntersuchungen zeigen bis zu einem gewissen Ethanolanteil eine signifikante Reduktion der Vorentflammungsfrequenz. Allerdings führt der Testkraftstoff E50 zu einem deutlichen Anstieg der Vorentflammungsneigung. Weitere Untersuchungen mit verschiedenen E50-Kraftstoffen sowie eine Variation der Einspritzstrategie verdeutlichen, dass die erhöhte Einspritzmenge im Falle von E50 eine verstärkte Wandbenetzung und damit ein Abwaschen des Ölfilms von der Zylinderwand bewirkt.

Die wesentlichen Erkenntnisse der Ethanoluntersuchungen sind:

- Bis zu einem gewissen Ethanolanteil erfolgt eine Reduktion der Vorentflammungsfrequenz aufgrund der erhöhten Verdampfungsenthalpie.
- Eine weitere Erhöhung des Ethanolanteils steigert die Neigung zur Selbstzündung aufgrund eines ungünstigen Verdampfungsverhaltens, unzureichender Gemischaufbereitung, verstärkter Wandbenetzung und der geringeren Selbstentzündungstemperatur.
- Aufgrund der deutlich kühleren Zylinderladung, verbunden mit dem späten Durchzünden der Gesamtladung, können Mega-Knocks signifikant reduziert werden.
- Aufgrund des geringeren Anteils an hochsiedenden Komponenten bei Ethanolkraftstoffen und der damit verbundenen geringeren Ablagerungsneigung, konnten während den Ethanoluntersuchungen keine intermittierenden Vorentflammungsserien festgestellt werden.
- Des Weiteren zeigt die Basiskraftstoffzusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf die Vorentflammungsfrequenz. Vor allem der Vergleich von Matchblends und Splashblends bei einem Ethanolanteil von 50% verdeutlicht, dass nicht nur die Oktanzahl, sondern vielmehr die Anteile an Aromaten und Paraffinen, speziell vor dem Hintergrund der Volatilität des Kraftstoffs hinsichtlich lokaler Ölverdünnung, von entscheidender Bedeutung sind.
- Weitere Untersuchungen verdeutlichen, dass keine Wechselwirkungen zwischen den Ethanolkraftstoffen und bestimmten Motorölspezifikationen vorliegen.

## 7.5 Einfluss der Kraftstoffvolatilität

Zur weiteren Verifizierung des Einflusses des Kraftstoffs auf den Ablösemechanismus und in weiterer Folge die Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen, werden spezielle Testkraftstoffe mit unterschiedlicher Volatilität untersucht. Während sich bei den Untersuchungen der Ethanolkraftstoffe eine Vielzahl an Parameter, wie beispielsweise Verdampfungsenthalpie, Volatilität und stöchiometrischer Luftbedarf, änderten, steht in diesem Fall lediglich die Kraftstoffvolatilität und damit die Ölverdünnung durch Wandbenetzung im Fokus der Betrachtungen. Bereits die Untersuchungen des E50-Testkraftstoffs zeigten, welche signifikante Auswirkungen erhöhte Wandbenetzung auf die Vorentflammungsneigung hat. Demnach liegt die Motivation dieser Untersuchungen im besseren Verständnis über die Vorgänge der Kraftstoffbenetzung, die Wechselwirkung mit dem Schmierölfilm und in weiterer Folge die Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen in den Brennraum. Tabelle 7.10 gibt einen Überblick der Spezifikationen der Testkraftstoffe mit unterschiedlicher Volatilität.

**Tabelle 7.10:** Spezifikationen der Testkraftstoffe mit unterschiedlicher Volatilität

		Volatilität				Norm
		niedrig	niedrig-mittel	mittel	hoch	EN228
<b>ROZ</b>	-	97.0	96.5	97.3	97.2	min. 95
<b>MOZ</b>	-	87.1	86.7	87.4	87.2	min. 85
<b>Aromaten</b>	%v	23.9	31.1	29.5	28.8	max. 35
<b>Olefine</b>	%v	7.5	9.8	8.8	8.8	max. 18
<b>Paraffine</b>	%v	63.8	54.4	56.9	57.8	
<b>Ethanol</b>	%v	4.8	4.7	4.9	4.7	max. 10
<b>V150</b>	%v	82.3	82.7	88.1	95.0	min. 75
<b>IBP</b>	°C	32.2	31.5	32.2	30.4	
<b>T80</b>	°C	141.4	141.7	129.0	113.1	
<b>FBP</b>	°C	226.3	200.3	193.7	174.4	max. 210

Die Testkraftstoffe sind weiters ROZ- beziehungsweise MOZ-*matched* und besitzen ein annähernd konstantes Verhältnis von Aromaten, Olefinen und Paraffinen. Die unterschiedliche Volatilität wird in diesem Zusammenhang lediglich über die Anpassung der Kettenlänge der verwendeten Kohlenwasserstoffe realisiert.

Abbildung 7.44 zeigt in der oberen Bildhälfte die Siedekurven der einzelnen Testkraftstoffe sowie charakteristische Kenngrößen, während in der unteren Bildhälfte die Vorentflammungsergebnisse der Kraftstoffe unterschiedlicher Volatilität dargestellt sind.

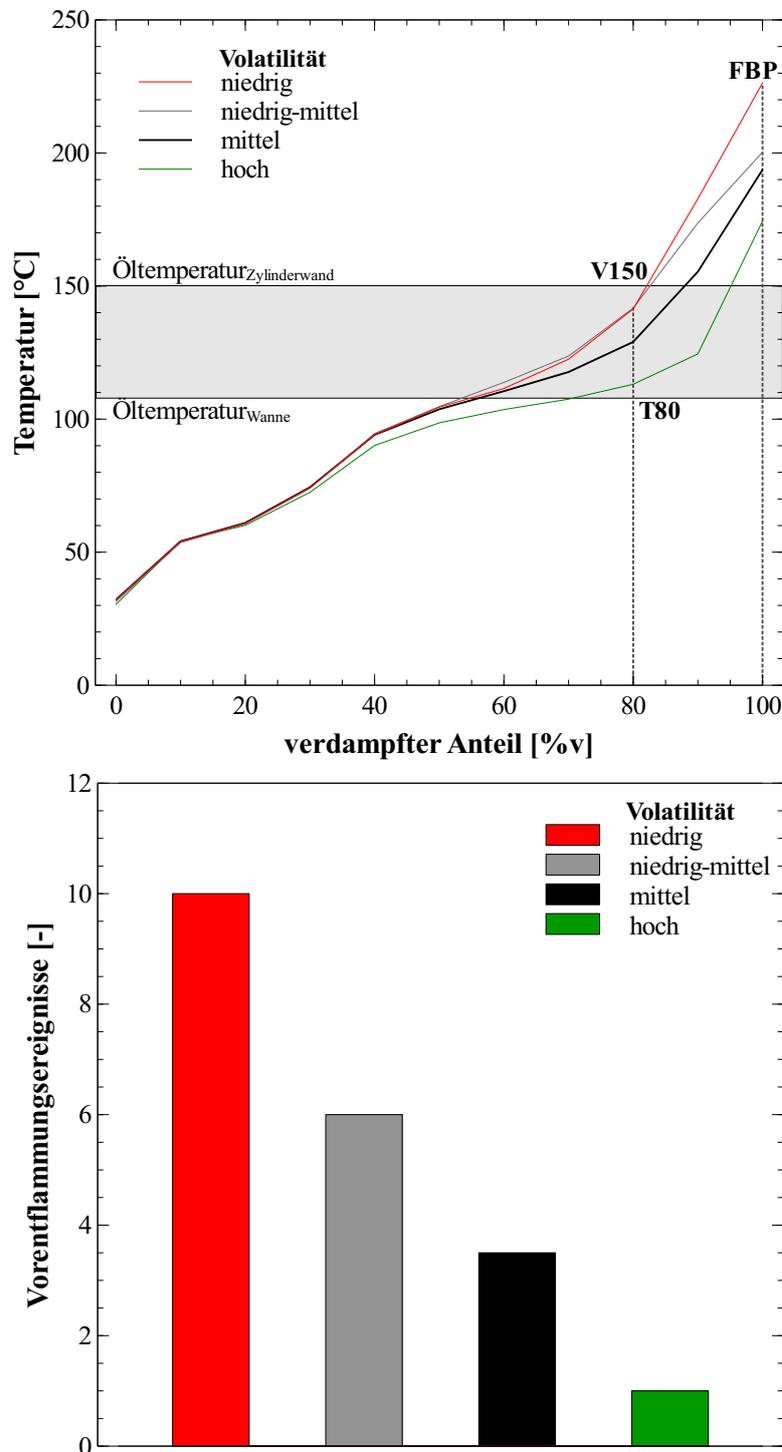
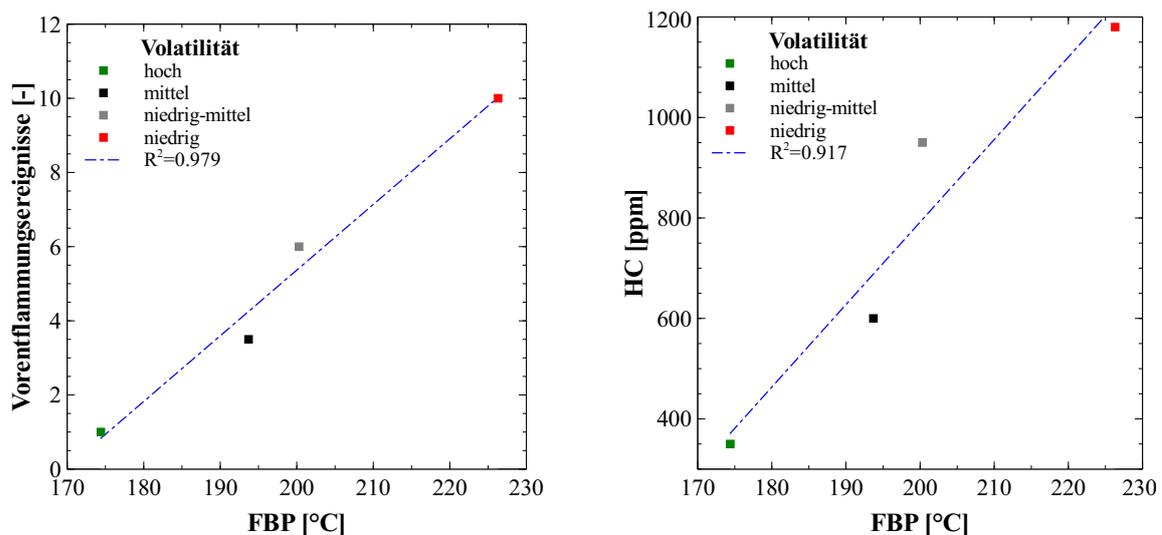


Abbildung 7.44: Oben: Siedeverlauf der untersuchten Testkraftstoffe; Unten: Einfluss der Volatilität der einzelnen Kraftstoffe auf die Vorentflammungsneigung

Die Ergebnisse in Abbildung 7.44 verdeutlichen, dass mit zunehmender Kraftstoffvolatilität die Vorentflammungsfrequenz signifikant abnimmt. Diese Erkenntnisse stimmen mit den Ergebnissen diverser Studien [121], [122] überein. Damit ist die verstärkte Wandbenetzung, verbunden mit lokaler Ölverdünnung an der Zylinderwand, maßgeblich für die Ablösung von Öl- und Kraftstofftropfen verantwortlich. Der deutlich erhöhte Anteil an flüssigem Kraftstoff noch bei Temperaturen von 150°C, für den Kraftstoff mit niedriger Volatilität, bewirkt eine starke lokale Ölverdünnung. Dieser erhöhte Kraftstoffauftrag auf den Ölfilm bedingt eine lokale Absenkung der kinematischen Viskosität und damit ein geändertes Benetzungsverhalten, welches einen erhöhten Transport von Öltröpfen in den Brennraum bewirkt. Für eine weitere Analyse werden die Vorentflammungsergebnisse sowie wesentliche charakteristische Kenngrößen einer linearen Regression zugeführt und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  berechnet. Abbildung 7.45 zeigt die Ergebnisse der linearen Regression für das Siedeende  $FBP$  auf die Vorentflammungsfrequenz sowie zwischen Siedeende und unverbrannten Kohlenwasserstoffen  $HC$ .



**Abbildung 7.45:** Ergebnisse der linearen Regression inklusive Bestimmtheitsmaß für das Siedeende auf die Vorentflammungsfrequenz und die Korrelation mit den unverbrannten Kohlenwasserstoffen

Die Vorentflammungsergebnisse zeigen eine sehr gute Korrelation für das Siedeende mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von bis zu 0.979. Der Trend der steigenden HC-Emissionen mit zunehmendem Siedeende bestätigt die bisherigen Ergebnisse hinsichtlich dem Einfluss lokaler Ölverdünnung. Abbildung 7.46 zeigt die Ergebnisse der linearen Regression für das bereits verdampfte Volumen  $V150$  bei 150°C und die Temperatur  $T80$ , bei der bereits 80% des Kraftstoffs verdampft ist.

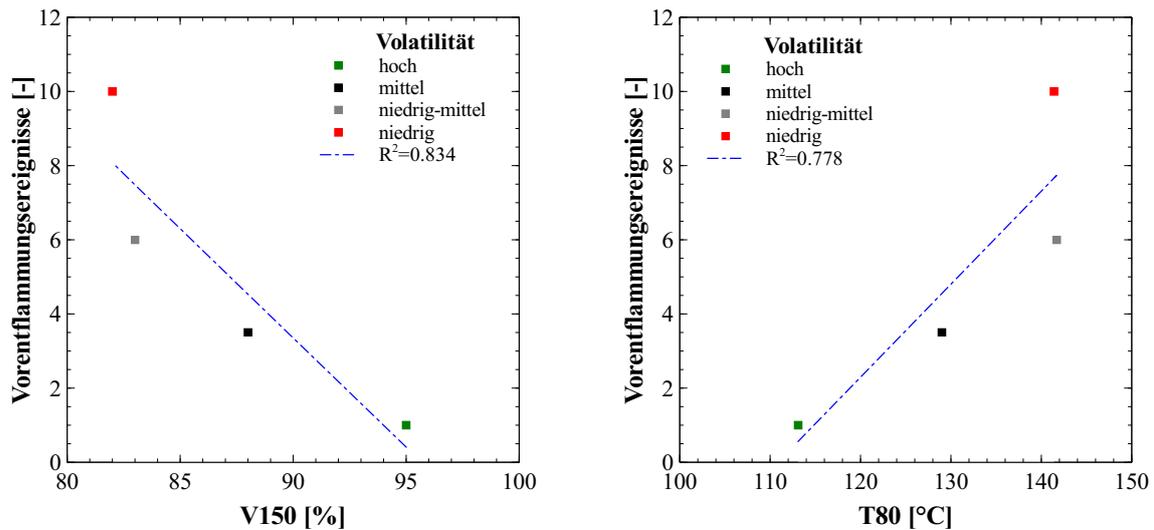


Abbildung 7.46: Ergebnisse der linearen Regression inklusive Bestimmtheitsmaß für die Parameter V150 und T80

Ein Vergleich zeigt, dass die Parameter V150 und T80 nur eine geringe lineare Korrelation mit den Vorentflammungsereignissen aufweisen, obwohl gerade der Parameter V150, entsprechend der angenommenen Öltemperatur im Ringspaltbereich, die Verhältnisse der Wandbenetzung am genauesten abbilden sollte. Zur Verdeutlichung dieser Theorie wird in einem weiteren Schritt das gewichtete Volumen an flüssigem Kraftstoff oberhalb der angenommenen Öltemperatur von 150°C, siehe [Abbildung 7.47](#), bestimmt.

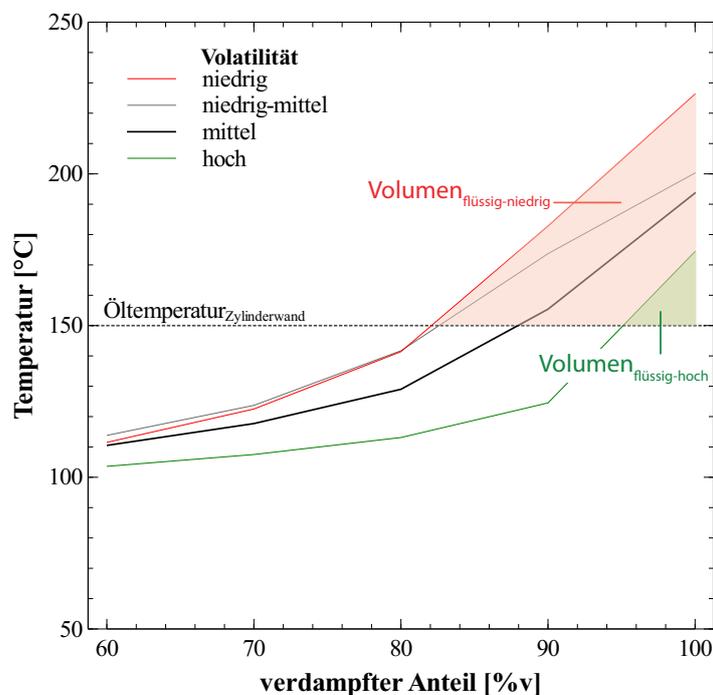
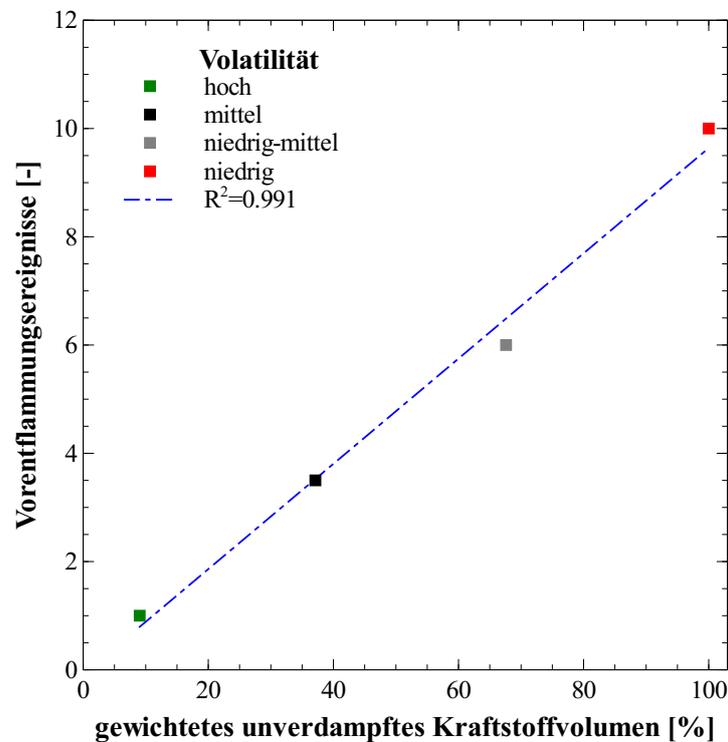


Abbildung 7.47: Schematische Darstellung der flüssigen Kraftstoffmengen

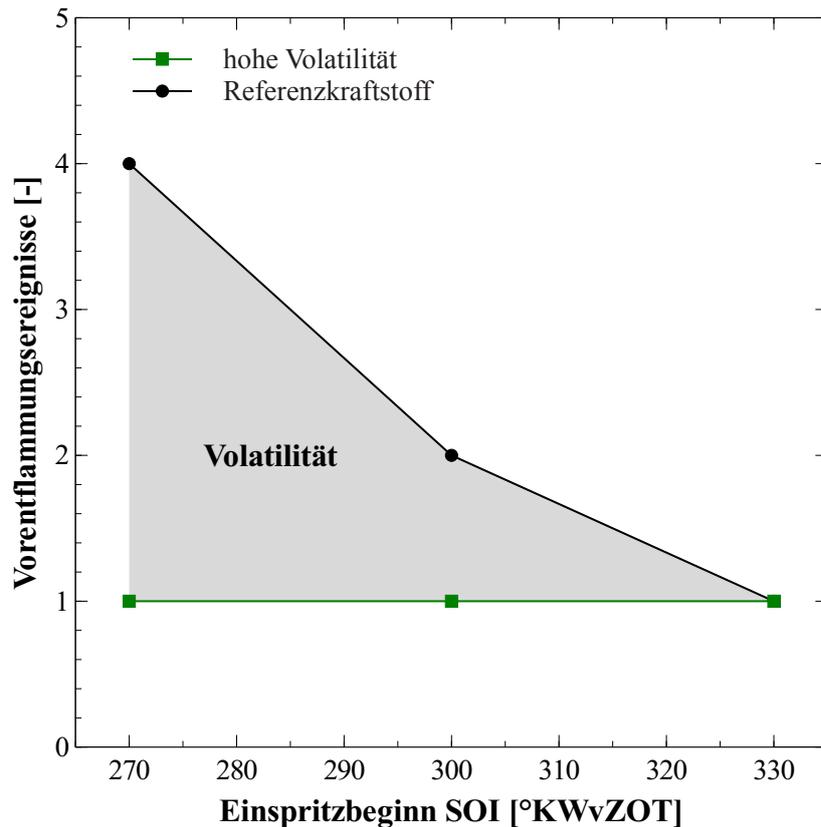
Abbildung 7.48 zeigt die Ergebnisse der linearen Regression für das gewichtete spezifische flüssige Kraftstoffvolumen bezogen auf den Testkraftstoff niedriger Volatilität.



**Abbildung 7.48:** Ergebnisse der linearen Regression inklusive Bestimmtheitsmaß für die gewichteten unverdampften Kraftstoffvolumina

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass für die bestimmten spezifischen unverdampften Kraftstoffmengen im Ringspaltbereich eine nahezu perfekte Korrelation mit der Vorentflammungsneigung der Kraftstoffe vorliegt. Dies erklärt auch die schwache Korrelation für den Parameter V150. Nicht nur der Parameter V150, sondern vielmehr die gewichtete Menge an unverdampftem Kraftstoff über 150°C ist kritisch. Diese Tendenz korreliert mit den bisherigen Ergebnissen hinsichtlich verstärkter Ablösung durch lokale Ölverdünnung, entsprechend dem Anteil an unverdampftem Kraftstoff bei der angenommenen Öltemperatur von 150°C im Ringspaltbereich.

Zur weiteren Verifizierung des Ablösemechanismus durch lokale Ölverdünnung zur Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen, wird anhand des Testkraftstoffs mit hoher Volatilität eine SOI-Variation durchgeführt. Abbildung 7.49 zeigt die Ergebnisse der SOI-Variation des Testkraftstoffs mit hoher Volatilität im Vergleich zum Referenzkraftstoff, wobei dieser, entsprechend den Ausführungen der Parametervariation in Kapitel 7.1.3, bei einem geringeren Lastniveau untersucht wurde.



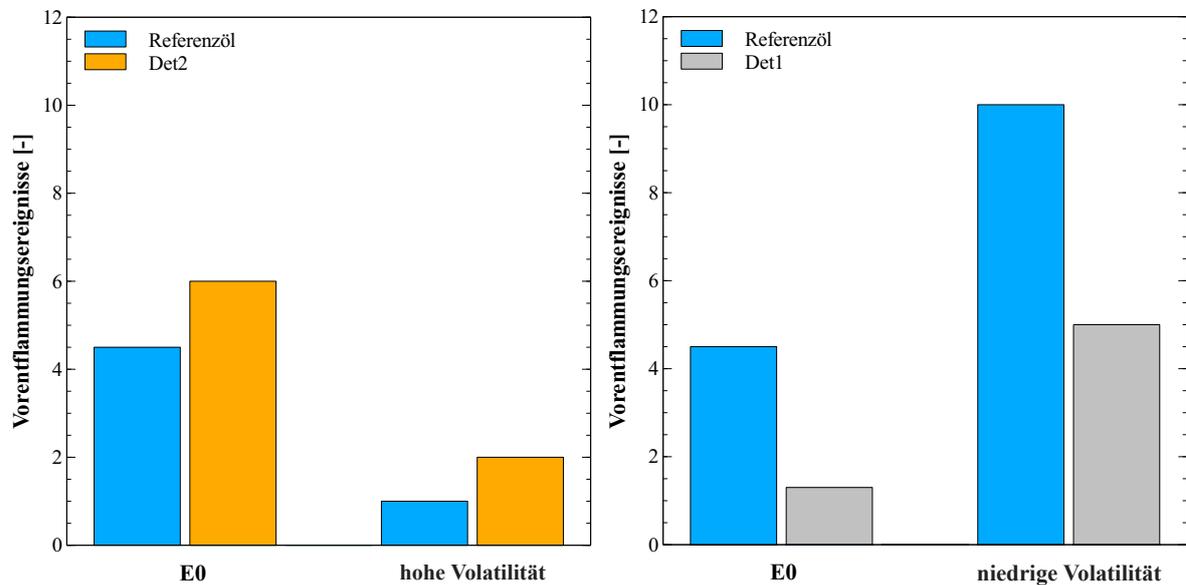
**Abbildung 7.49:** Ergebnisse der SOI-Variation für den Testkraftstoff hoher Volatilität im Vergleich zum Referenzkraftstoff E0

Die Ergebnisse der SOI-Variation verdeutlichen letztendlich, dass vor allem Wandbenetzung durch direkt eingespritzten Kraftstoff ein treibender Faktor bei der Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen ist. Trotz erhöhter Wandbenetzung bei spätem Einspritzbeginn von 270°KWvZOT folgt mit dem Kraftstoff hoher Volatilität keine Erhöhung der Vorentflammungsfrequenz. Aufgrund der hohen Kraftstoffvolatilität, verbunden mit der raschen Verdampfung, wird eine lokale Ölverdünnung verhindert, wodurch ein Anstieg der Vorentflammungsneigung bei spätem Einspritzbeginn ausbleibt.

### 7.5.1 Bewertung des Öl- und Kraftstoffeinflusses

Zur weiteren Verifizierung des Einflusses der lokalen Ölverdünnung durch Wandbenetzung, als Auslöser ölunduzierter Vorentflammungen, werden weitere Untersuchungen mit verschiedenen Testölen herangezogen. Zur Abklärung, ob Kraftstoff oder die zugrunde liegenden Öleigenschaften von primärem Interesse sind, werden wechselweise ein Kraftstoff von hoher Volatilität mit einem Testöl hoher Vorentflammungsneigung kombiniert und umgekehrt, siehe Tabelle 7.6.

Abbildung 7.50 zeigt die entsprechenden Ergebnisse zur Verifizierung des Ablösemechanismus für zwei unterschiedliche Kraftstoff-Testöl-Kombinationen.



**Abbildung 7.50:** Links: Vergleich eines Kraftstoffs mit hoher Volatilität und einem Testöl mit hoher Vorentflammungstendenz; Rechts: Vergleich eines Kraftstoffs mit niedriger Volatilität und einem Testöl mit niedriger Vorentflammungstendenz

Die Untersuchungen zeigen, auf Basis des Testöls Det2 mit hoher Vorentflammungsneigung, eindeutig, dass Kraftstoffeigenschaften wesentlichen Einfluss auf die Ablösung von Öltropfen in den Brennraum haben. Des Weiteren ist die Signifikanz der Kraftstoffvolatilität hinsichtlich Wandbenetzung und lokaler Ölverdünnung offensichtlich.

Ebenso zeigen die Untersuchungen an Testöl Det1, trotz niedriger Vorentflammungsneigung, erhöhte Vorentflammungsereignisse entsprechend der verstärkten Ablösung aufgrund erhöhter Wandbenetzung des Testkraftstoffs. Zusammenfassend erschließt sich, dass neben den jeweiligen Öleigenschaften zudem Wandbenetzung entscheidend für die Ablösung von Öltropfen in den Brennraum ist. Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Testöls Det1 bei 80°C Öl- und Kühlwassertemperatur zeigt, dass zudem Änderungen der physikalischen Eigenschaften des Surfactants von entscheidender Bedeutung für den Ablösemechanismus sind.

## 7.5.2 Zusammenfassung - Kraftstoffvolatilität

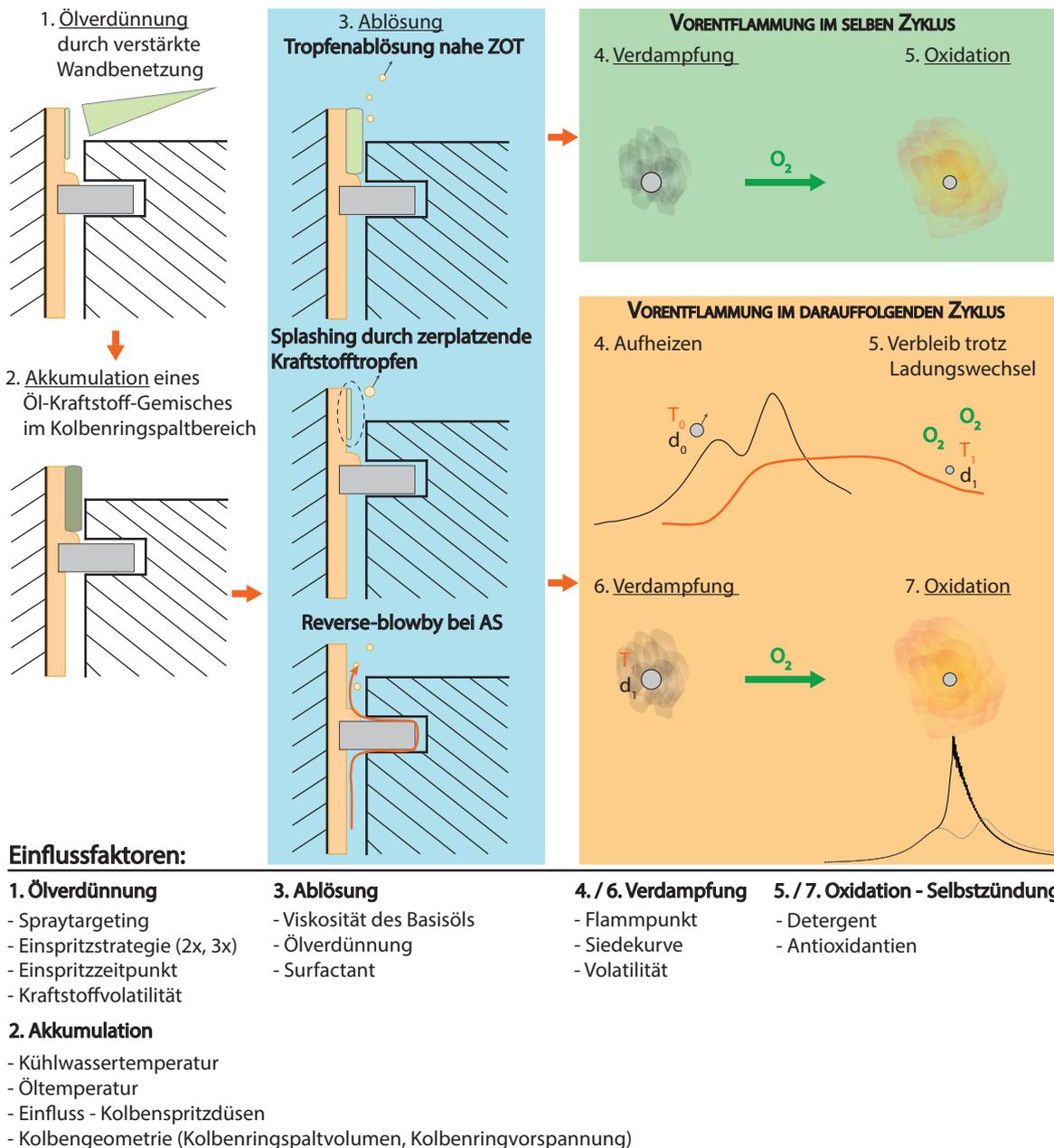
Ähnlich den Ergebnissen für den Ethanolkraftstoff E50, bei dem durch zunehmende Einspritzmenge deutlich erhöhte Wandbenetzung vorlag, zeigen die Untersuchungen des Einflusses der Kraftstoffvolatilität ebenso einen signifikanten Einfluss auf die lokale Ölverdünnung und damit auf die Vorentflammungsneigung. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind:

- Mit steigender Kraftstoffvolatilität nimmt die Vorentflammungsfrequenz signifikant ab, wodurch die Hypothese zur Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen, entsprechend lokaler Ölverdünnung, bestätigt wird.
- Die lineare Regressionsanalyse zeigt vor allem für das Siedeende eine sehr hohe Korrelation.
- Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.991 zeigen die gewichteten spezifischen flüssigen Kraftstoffvolumina im Ringspaltbereich eine nahezu perfekte Korrelation mit der Vorentflammungsneigung der Kraftstoffe. Dies erklärt auch die schwache Korrelation für den Parameter V150. Denn nicht nur der Parameter V150, sondern vielmehr die gewichtete Menge an unverdampftem Kraftstoff im Ringspaltbereich über 150°C wirkt kritisch auf das Vorentflammungsverhalten.
- Die Verifizierung der Hypothese zur Ölablösung anhand verschiedener Testöle offenbart, dass neben den jeweiligen Öleigenschaften vor allem die Tropfenablösung durch erhöhte Wandbenetzung entscheidenden Einfluss hat.

Abschließend sei erwähnt, dass alle Kraftstoffe die US-Spezifikationen erfüllen sowie, bis auf den Kraftstoff mit niedriger Volatilität, auch alle Kraftstoffe der europäischen Kraftstoffnorm EN228 entsprechen und damit theoretisch aktuell im Markt eingeführt werden können. Damit zeigen die Untersuchungen, dass die Kraftstoffvolatilität nicht nur im Hinblick auf Kaltstartproblematik und Verdampfungsverluste zu berücksichtigen ist, sondern vielmehr einen entscheidenden Einfluss auf moderne Brennverfahren und abnormale Verbrennungsphänomene hat.

## 7.6 Zusammenfassung - ölinduzierte Vorentflammungen

Zusammenfassend werden in Abbildung 7.51 noch einmal die bereits in Kapitel 3.5 vorgestellten Hypothesen dargestellt, sowie die gewonnen Erkenntnisse der Untersuchungen herangezogen und die einzelnen Effekte den jeweiligen Schritten zugeordnet.



**Abbildung 7.51:** Einfluss der verschiedenen Motorölspezifikationen auf die einzelnen Schritte des Auslösemechanismus ölinduzierter Vorentflammungen [6], [58], [68], [72], [79] (eigene Darstellung)

Ergänzend zu den bisherigen Erkenntnissen sind im Anschluss die wesentlichen Einflüsse, hinsichtlich Betriebsparametern und verschiedener Motorölspezifikationen, auf die Auslösung ölunduzierter Vorentflammungen zusammengefasst:

- **Änderungen der Öleigenschaften**

Bei verstärktem Kraftstoffeintrag an den Zylinderwänden erfolgt eine bleibende Veränderung der Stoffeigenschaften des Öls mit signifikanten Auswirkungen auf die Viskosität (Ablösemechanismus), die Volatilität (Verdampfungsrate) und das Oxidationsverhalten.

- **Kraftstoffeinfluss**

Neben dem Einfluss von Basiskraftstoffzusammensetzung und erhöhter Verdampfungsenthalpie bei Ethanolkraftstoffen ist vor allem die Kraftstoffvolatilität hinsichtlich lokaler Ölverdünnung entscheidend. In Bezug auf ölunduzierte Vorentflammungen sind daher weniger die Oktanzahl, sondern vielmehr Brennraumkühlung aufgrund erhöhter Verdampfungsenthalpie und insbesondere die Volatilität im Hinblick auf Wandbenetzung und Tropfenablösung ausschlaggebend.

- **Transport in den Brennraum**

Die geänderten Trägheitskräfte bei der Kolbenverzögerung unmittelbar vor OT, die Filmdicke im Feuerstegbereich sowie der Einfluss der Ölverdünnung durch schwersiedende Kraftstoffanteile, verbunden mit reduzierter Viskosität und Oberflächenspannung, beeinflussen maßgeblich die Neigung zu ölunduzierten Vorentflammungen. Neben dem Ablösemechanismus ist vor allem der Transport von Öl- und Kraftstofftropfen im Brennraum sowie die Berührung oder Nähe heißer Brennraumteile, im Hinblick auf ausreichende Verdampfung, entscheidend.

- **Anzahl und Größe der abgelösten Tropfen**

Da die abgelösten Öl- und Kraftstofftropfen im Gegensatz zu Partikeln nach dem Ablösen weiter oxidiert werden und damit einen Temperaturanstieg erfahren, können diese kleiner und kühler sein, um genügend Energie freizusetzen und die Selbstzündungsresistenz des Kraftstoffs zu überwinden.

- **Einfluss von Detergentien und Antioxidantien**

Vor allem der Carbonatkern des Detergents ist maßgeblich an der Initiierung ölunduzierter Vorentflammungen beteiligt. Während mit zunehmendem Calciumanteil ein stark nichtlinearer Anstieg der Vorentflammungsneigung einhergeht, zeigen magnesiumhaltige Detergentien keinerlei Vorentflammungen. Im Gegensatz dazu sind Antioxidantien in der Lage die Vorentflammungstendenz zu reduzieren.

## 8 Einfluss von Brennraumablagerungen auf die Vorentflammungsneigung

Wie bereits in Kapitel 2.4.3 angeführt, sind neben ölunduzierten Vorentflammungen auch andere Vorentflammungsursachen bekannt. Vor allem die Auslösung von Vorentflammungen an heißen Partikeln/Ablagerungen konnte bereits mittels High-Speed-Aufnahmen [42] bestätigt werden. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt, allerdings in Abgrenzung zu den bisherigen Untersuchungen verschiedener Testöl- und Kraftstoffuntersuchungen, der Einfluss von Brennraumablagerungen auf die Vorentflammungsneigung näher betrachtet. Dies soll im Weiteren zu einer ganzheitlichen Betrachtung der LSPI-Problematik beitragen. Neben den bereits in Kapitel 2.4.3 erwähnten Folge-Vorentflammungen durch abgelöste Brennraumablagerungen können auch ohne eine vorausgegangene Vorentflammung abgelöste heiße Partikel/Ablagerungen eine Selbstzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches auslösen. Die Untersuchungen von Hanel et al. [27] zeigen, dass ein mit Ablagerungen beladener Brennraum eine erhöhte Vorentflammungstendenz aufweist. Zur Generierung der Brennraumablagerungen wird nach der 30-minütigen Konditionierungsphase des Testzyklus aus Kapitel 6 eine Beladungsphase angefügt. Dabei wird der Testträger für 30 bzw. 60 Minuten bei einer Drehzahl von  $2000\text{min}^{-1}$ , 2bar effektivem Mitteldruck und  $60^\circ\text{C}$  Kühlwassertemperatur betrieben. Abbildung 8.1 zeigt schematisch den speziell für diese Untersuchungen adaptierten Testzyklus.

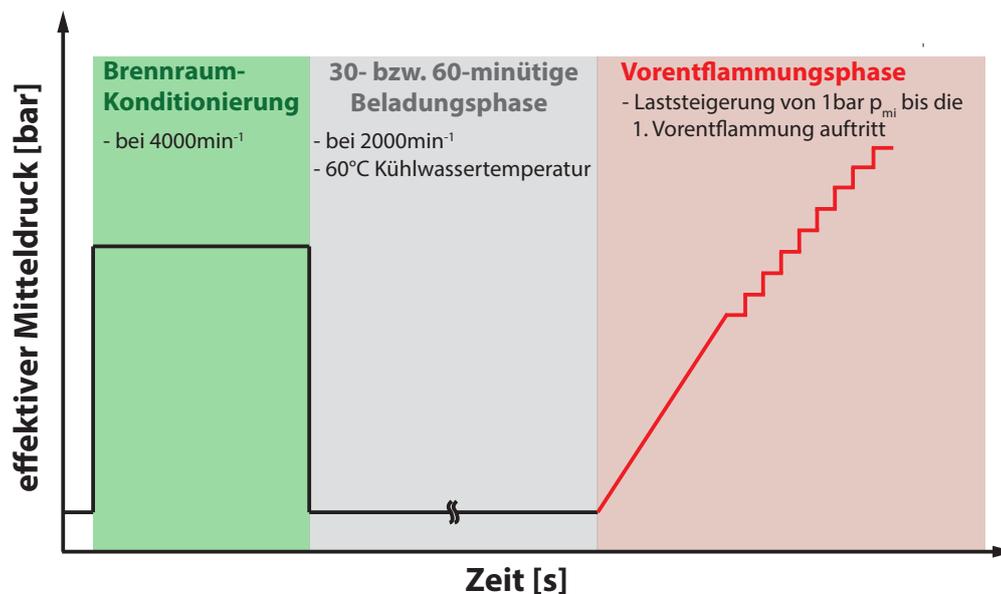
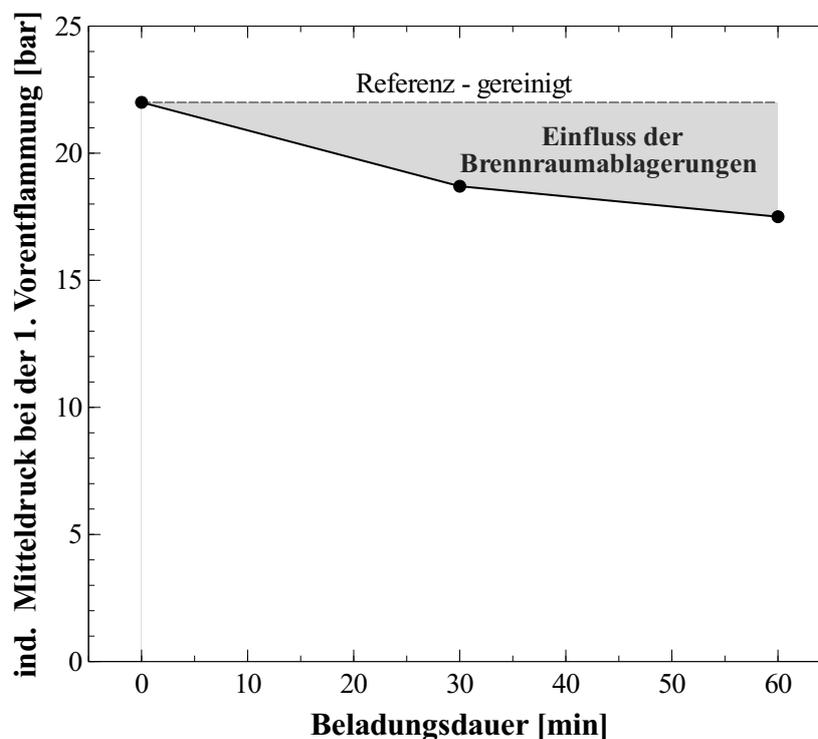


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung des Testzyklus speziell für die Untersuchungen der Brennraumablagerungen auf Vorentflammungen

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Messungen liegt das Ziel dieser Untersuchung nicht in der Bestimmung einer Vorentflammungsfrequenz über einer gewählten Messdauer, sondern in der Detektion der ersten Vorentflammung sowie die Zuordnung der jeweiligen Motorlast. Eine statistische Betrachtung der Vorentflammungsneigung, wie diese bei den bisherigen Untersuchungen zum Einsatz gekommen ist, ist in diesem Fall nicht zielführend. Grund dafür ist, dass durch eine Vorentflammung der Großteil der akkumulierten Brennraumablagerungen abgelöst wird. Bei einer statistischen Betrachtung würden sich daher die Auswirkungen eines beladenen Brennraums vorwiegend in der Anfangsphase abzeichnen, während im weiteren Verlauf zunehmend mit ölunduzierten Vorentflammungen gerechnet werden muss. Abbildung 8.2 zeigt den Einfluss von Brennraumablagerungen, anhand einer verstärkten Ablagerungsbildung nach einer 30- bzw. 60-minütigen Brennraumbeladung, im Vergleich zur Basisuntersuchung bei gereinigtem Brennraum auf die Vorentflammungsneigung.



**Abbildung 8.2:** Einfluss von Brennraumablagerungen auf die Vorentflammungsneigung im Vergleich zu einem gereinigten Brennraum

Ausgehend von einem Lastniveau ohne Vorentflammungsneigung wird während des Testlaufs das Lastniveau bis zum Eintreten der ersten Vorentflammung, jeweils nach einer kurzen Verweildauer zur Vermeidung von Öl- und Kraftstoffakkumulation im Ringspaltbereich, um 1 bar indizierten Mitteldruck erhöht. Das entscheidende Kriterium ist in diesem Fall die Motorlast, bei der die erste Vorentflammung auftritt.

Abbildung 8.2 ist zu entnehmen, dass bereits nach einer Beladungsdauer von 30 Minuten die erste Vorentflammung bei einem deutlich reduzierten Lastniveau eintritt. Dieses Niveau wird bei einer 60-minütigen Beladung noch weiter reduziert. Für die Testläufe bei gereinigtem Brennraum erfolgt bis zu einer Last von 22bar indiziertem Mittel- druck keine Vorentflammung innerhalb der vorgegebenen Verweildauer. Dieses Lastniveau wird in weiterer Folge auch als Abbruchkriterium herangezogen. Allerdings erfolgt nicht bei jeder Messung mit beladenem Brennraum eine Vorentflammung bei deutlich reduziertem Lastniveau. Die Gründe hierfür liegen im Entstehungsprozess einer abla- gerungsinduzierten Vorentflammung und dem vorliegenden Testzyklus. Aufgrund der geringen Verweildauer im jeweiligen Lastniveau und den entsprechenden Randbedin- gungen die erfüllt sein müssen, wird nicht in jedem Testlauf eine Vorentflammung durch abgelöste Brennraumablagerungen ausgelöst.

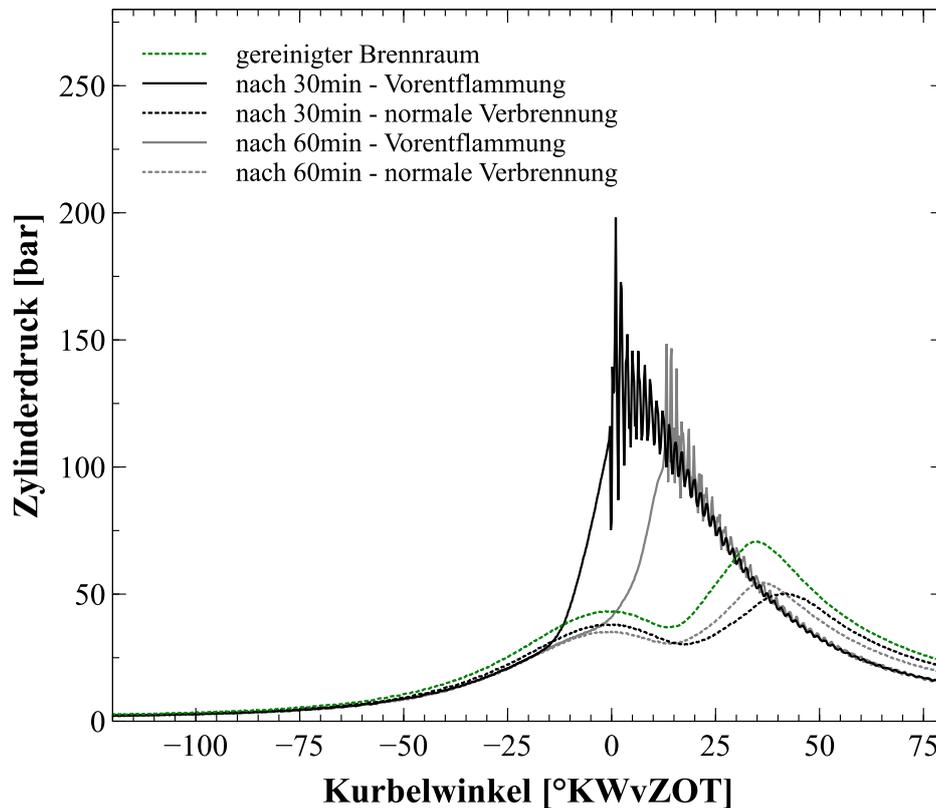
Für die Initiierung einer Vorentflammung, ausgelöst durch Brennraumablagerungen, müssen zumindest die folgenden Bedingungen erfüllt sein [43], [44]:

- Die abgelösten Brennraumablagerungen dürfen durch den Ladungswechsel nicht ausgespült werden.
- Die verbliebenen Ablagerungen heizen sich im nachfolgenden Verbrennungszyklus auf und müssen erneut nach dem Ladungswechsel im Brennraum erhalten bleiben.
- Im entsprechenden Vorentflammungszyklus müssen die Brennraumablagerungen noch eine ausreichende Größe aufweisen und genügend Wärme freisetzen, um das umliegende Kraftstoff-Luft-Gemisch, vor Einleitung des Zündfunkens, zu entzün- den.

Anhand der notwendigen Bedingungen zur Initiierung ablagerungsinduzierter Vorent- flammungen wird deutlich, weshalb nicht in jedem Testlauf bei beladenem Brennraum eine Vorentflammung eintritt. Es ist allerdings festzuhalten, dass durch vorhandene Brennraumablagerungen eine deutliche Reduktion des Lastniveaus, bei dem die erste Vorentflammung eintritt, hervorgerufen wird.

Abschließend zeigt Abbildung 8.3 die Zylinderdruckverläufe der aufgetretenen Vorent- flammungszyklen sowie den jeweils vorangegangenen Zyklus einer normalen Verbren- nung. Analog zu den vorangegangenen Ergebnissen ist eine deutliche Reduktion des Verdichtungsendrucks bei denen die erste Vorentflammung eintritt, im Vergleich zu einem Zyklus normaler Verbrennung für den gereinigten Brennraum, zu beobachten.

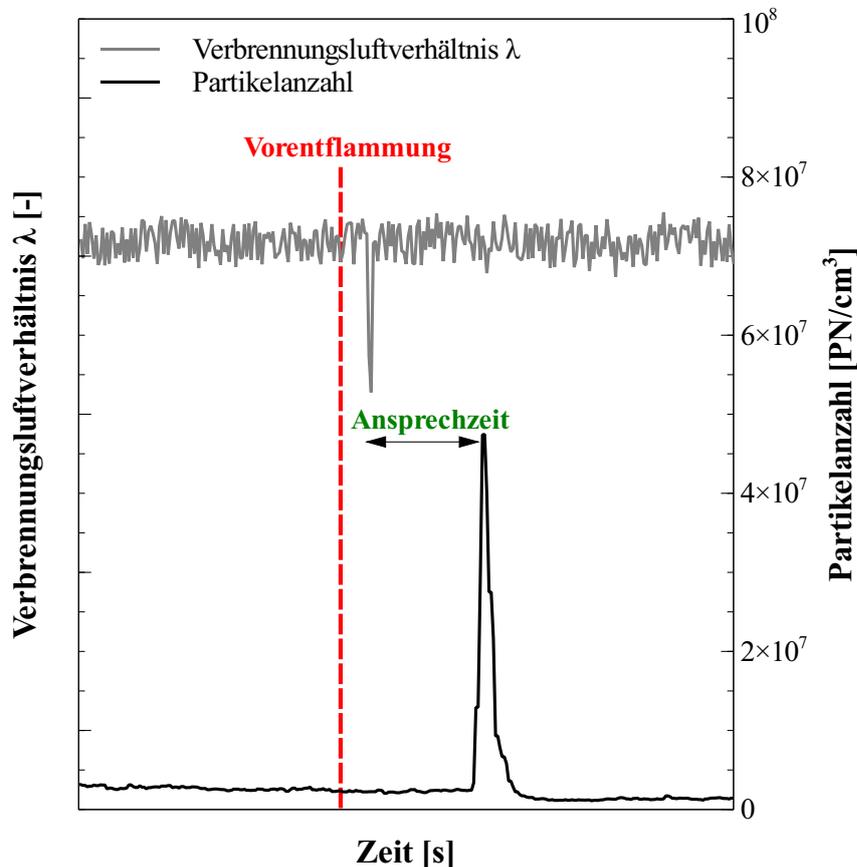
Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Parametervariation wird deutlich, dass das Lastniveau bei denen die Vorentflammungen auftreten signifikant unterhalb des Niveaus der Vorentflammungen, welche durch Öl-Kraftstoff-Interaktion an der Zylinderwand hervorgerufen werden, liegt. Somit kann eine Reduktion des Lastniveaus in eindeutiger Weise vorhandenen Brennraumablagerungen zugesprochen werden.



**Abbildung 8.3:** Zylinderdruckverläufe der aufgetretenen Vorentflammungszyklen bei beladenem Brennraum

Ergänzend zu diesen Messungen wird die Partikelanzahl im Abgas nach dem Turbolader mittels AVL Particle Counter 489 aufgezeichnet. Abbildung 8.4 zeigt den Verlauf von Partikelanzahl und Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  in einem Zeitabschnitt mit einer Vorentflammung. Das Auftreten einer Vorentflammung, verbunden mit erhöhten Brennraumtemperaturen und Zylinderdrücken, führt zur Entfernung akkumulierter Kohlenwasserstoffe aus dem Ringspaltbereich und in weiterer Folge zu einem Absinken des Verbrennungsluftverhältnisses. Zudem ist ein deutlicher Anstieg der Partikelemissionen, in verzögerter Form aufgrund der Leitungslänge des Messpfades und der nachgeschalteten Auswerteeinrichtung, zu beobachten. Die gebildeten Partikel und abgelösten Brennraumablagerungen werden vom Particle Counter als feste Abgasbestandteile detektiert.

Wie bereits in Kapitel 2.4.3 erwähnt, sind abgelöste Brennraumablagerungen maßgeblich für die typischen intermittierenden Serien von Vorentflammungen verantwortlich. Es ist zudem festzuhalten, dass die Partikelemissionen, entsprechend der regulären Verbrennung der drei weiteren Zylinder, zusätzlich verdünnt sind.



**Abbildung 8.4:** Partikelanzahl und Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  ausgelöst durch eine Vorentflammung

Unabhängig von den Ergebnissen der Parametervariation verdeutlichen die Ergebnisse in Abbildung 8.3 anhand des geringeren Verdichtungsendrucks bei partikelinduzierten Vorentflammungen, dass ein Brennraum mit verstärkter Ablagerungsbildung zu Vorentflammungen bei deutlich niedrigerem Lastniveau neigt. Zusätzlich ist zu beachten, dass im realen Motorbetrieb ein Lastsprung deutlich kritischer ausfällt im Vergleich zur verwendeten Lastrampe. Mit zunehmender Beladungsdauer steigt dabei die Wahrscheinlichkeit, dass sich Brennraumablagerungen ablösen, entsprechend dem verlorenen Wandwärmeübergang aufheizen und im nachfolgenden Zyklus das Kraftstoff-Luft-Gemisch frühzeitig entzünden, sofern diese nicht im Ladungswechseltakt ausgespült werden.

Vor allem der Einsatz hochaufgeladener Downsizingmotoren im innerstädtischen Betrieb, verbunden mit einem geringen Lastniveau, kann zu verstärkter Ablagerungsbildung im Brennraum führen. Durch einen abrupten Lastsprung, beispielsweise an einer Autobahnauffahrt, können sich diese Ablagerungen ablösen und in weiterer Folge die Ursache für eine Vorentflammung darstellen.

Wang et al. [123] konnte in diesem Zusammenhang an einem Einzylinder-Forschungsmotor mittels direkter Einblasung von Partikeln ins Saugrohr zeigen, dass während der Verbrennung gebildete Partikel im Ottomotor, mit einem Durchmesserbereich zwischen 10nm und 200nm, zu klein sind, um eine Vorentflammung auszulösen. Diese kleinen Rußpartikel müssen sich im Brennraum zunächst agglomerieren. Lediglich auf diese Weise gebildete Brennraumablagerungen können, wie bereits erwähnt, nach Ablösung von den Brennraumwandungen oder dem Kolbenboden eine Vorentflammung initiieren.

Lepperhoff [124] zeigte, dass die Entstehung ablagerungsbildender Komponenten durch Verdampfung und anschließende Verbrennung von Kraftstoff und Motoröl erfolgt. Auf diese Weise gebildete Partikel stellen die Grundlage für verschiedene Brennraumablagerungen dar. Die Ablagerungsbildung ist weiters von den jeweiligen Kraftstoff- und Motorölbestandteilen abhängig [36], [125]. Aus diesem Grund muss bei weiterer Betrachtung von neuen Motorölen und alternativen Ottokraftstoffen auch deren Neigung zur Ablagerungsbildung berücksichtigt werden.

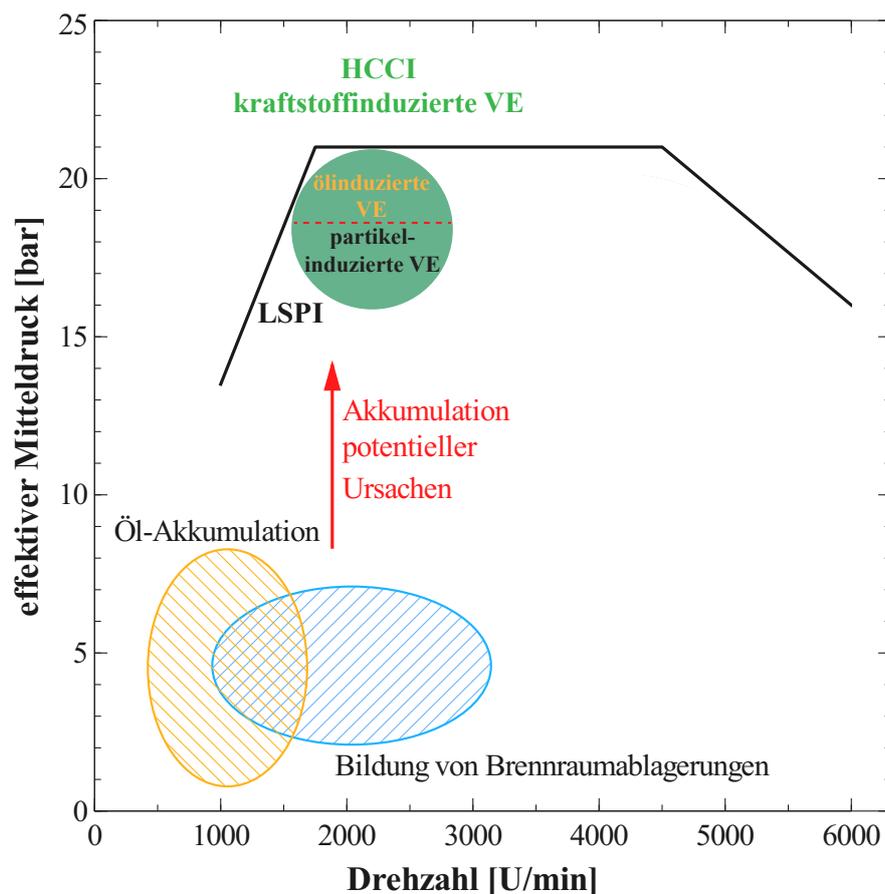
## 8.1 Zusammenfassung - Brennraumablagerungen

In der folgenden Zusammenfassung sind zunächst die aktuellen Erkenntnisse hinsichtlich dem Einfluss von Brennraumablagerungen auf die Vorentflammungsneigung dargestellt. Darüber hinaus werden die bereits gewonnenen Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen zusammengefasst und die jeweiligen Vorentflammungsursachen ganzheitlich in einem Motorkennfeld dargestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse in Bezug auf das Vorentflammungsverhalten, die aus den Untersuchungen der Brennraumablagerungen gewonnen werden konnten, sind:

- Eine verstärkte Ablagerungsbildung im Brennraum bedeutet eine signifikante Reduktion der Vorentflammungsgrenze bei der ölinduzierte Vorentflammungen verifiziert wurden. Nach Ablösung von den Brennraumwandungen können Ablagerungen Temperaturen von weit über 1000K erreichen und damit einen lokalen Hot spot im Brennraum darstellen, welcher das umliegende Kraftstoff-Luft-Gemisch entzündet.

- Brennraumablagerungen sind maßgeblich für das Auftreten der typischen intermittierenden Vorentflammungsserien verantwortlich [42], [43].

Abbildung 8.5 zeigt schematisch die typischen Vorentflammungsbereiche sowie die Erkenntnisse der vorangegangenen Vorentflammungsuntersuchungen. Basierend auf der Einteilung der Vorentflammungsbereiche nach Kunde et al. [33] über der Motordrehzahl und der Motorlast sind die Auswirkungen der Brennraumablagerungen, des Motoröls sowie des Kraftstoffs im LSPI-Bereich dargestellt. Während Brennraumablagerungen schon bei geringen Motorlasten von ca. 17bar indiziertem Mitteldruck Vorentflammungen auslösen, zeigen die Untersuchungen der verschiedenen Testöle eine signifikante Resistenz gegenüber diesen geringen Lasten. Die Untersuchungen der Ethanolkraftstoffe verdeutlichen hingegen, dass diese grundsätzlich eine höhere Resistenz, siehe Ergebnisse der CPI-Kennzahl in Abschnitt 7.4.1, gegenüber Vorentflammungen aufweisen, aufgrund verstärkter Brennraumkühlung sowie der erhöhten Oktanzahl im Falle von Splashblends.



**Abbildung 8.5:** Schematische Darstellung der Vorentflammungsbereiche sowie die Zuordnung der einzelnen Vorentflammungsursachen [33] (eigene Darstellung)

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit wurde auf den Einfluss einzelner Motorölspezifikationen und unterschiedlicher Kraftstoffe im Hinblick auf ölinduzierte Vorentflammungen gelegt. Neben weiteren Vorentflammungsursachen, wie beispielsweise abgelöste Brennraumablagerungen, haben vor allem abgelöste Öl- und Kraftstofftropfen aus dem Ringspaltbereich entscheidenden Einfluss auf die Vorentflammungsneigung. Hierbei ist besonders die Interaktion zwischen Motoröl und direkt eingespritztem Kraftstoff an der Zylinderwand sowie die damit einhergehende lokale Ölverdünnung im Ringspaltbereich entscheidend. Speziell vor dem Hintergrund künftiger CO<sub>2</sub>-Flottenverbrauchsziele von 95g/km bis 2020 stellt die Vorentflammungsproblematik eine wesentliche Limitierung dar, um weiteres Downsizingpotential zu erschließen.

Aus diesem Grund wurden, im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der Problematik ölinduzierter Vorentflammungen, in dieser Arbeit zunächst die Effekte und Sensitivitäten einzelner Motorbetriebsparameter auf die Auslösung ölinduzierter Vorentflammungen verifiziert. Im Anschluss daran erfolgte die Bewertung des Einflusses verschiedener Motorölspezifikationen sowie der Auswirkungen metall-basierender Detergentien und Antioxidantien. Zur weiteren Verifizierung des Kraftstoffeinflusses auf den Ablösemechanismus hinsichtlich lokaler Ölverdünnung sind in dieser Arbeit verschiedene Ethanolkraftstoffe und Kraftstoffe unterschiedlicher Volatilität untersucht worden. Nachfolgend sind die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt:

- Eine niedrigere Öltemperatur, speziell bei aktivierter Kolbenkühlung, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Vorentflammungsneigung. Besonders die Kolbentemperatur und damit dessen Verdampfungsverhalten ist entscheidend, um eine Akkumulation von Öl und Kraftstoff im Ringspaltbereich zu minimieren.
- Während eine verringerte Kühlwassertemperatur sowie ein später Einspritzbeginn die lokale Ölverdünnung und damit die Vorentflammungsneigung verstärken, ermöglicht der Einsatz von Mehrfacheinspritzstrategien eine deutlich bessere Gemischaufbereitung, geringere Wandbenetzung und damit eine signifikante Verbesserung des Vorentflammungsverhaltens.
- Eine geringere Viskosität sowie ein niedriger Flammpunkt haben aufgrund verstärkter Neigung zur Ablösung sowie niedrigerer Selbstzündungstemperaturen entscheidenden Einfluss auf die Vorentflammungsneigung.

- Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Cetanzahl und der Vorentflammungsneigung eines Motoröls.
- Während mit zunehmendem Calciumanteil ab 1000ppm ein stark nichtlinearer Anstieg der Vorentflammungsfrequenz einhergeht, zeigen magnesiumhaltige Detergentien, analog zu detergentfreien Testölen, keinerlei Vorentflammungsneigung. Kombinierte Detergentien aus Calcium und Magnesium verdeutlichen mittels sukzessiver Erhöhung des Magnesiumanteils deren signifikanten Einfluss durch Reduktion der Vorentflammungsneigung.
- Durch Bindung erster Radikale sowie der Zersetzung von Hydroperoxiden wirken Antioxidantien effektiv den Reaktionen im Niedertemperaturbereich entgegen und reduzieren dadurch die Vorentflammungstendenz.
- Bis zu einem gewissen Ethanolanteil erfolgt eine Reduktion der Vorentflammungsfrequenz aufgrund der erhöhten Verdampfungsenthalpie von Ethanol. Zudem bewirken die kühleren Brennraumtemperaturen, verbunden mit dem späten Durchzünden der Gesamtladung, eine signifikante Reduktion der Mega-Knocks.
- Mit steigender Kraftstoffvolatilität nimmt die Vorentflammungsfrequenz signifikant ab. Dabei sind vor allem das Siedende des Kraftstoffs sowie die gewichteten spezifischen flüssigen Kraftstoffvolumina im Ringspaltbereich relevant.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen, dass speziell formulierte Motorölspezifikationen und abgestimmte Ottokraftstoffe entscheidenden Einfluss auf ölunduzierte Vorentflammungen haben und damit einen wesentlichen Beitrag leisten können, um weiteres CO<sub>2</sub>-Potential zu erschließen. Neben hochoktanigen Kraftstoffen stellt vor allem die Substitution von Calcium durch Magnesium, in den Detergentien heutiger Motoröle, eine sehr attraktive und kostengünstige Möglichkeit dar, um ölunduzierte Vorentflammungen zu unterbinden.

Viele Fahrzeughersteller sehen ebenfalls das Auftreten von Vorentflammungen stark in Abhängigkeit der verwendeten Motoröle und Kraftstoffe. Da die Anzahl hochaufgeladener direktinspritzender Downsizingmotoren in Zukunft weiter steigen wird, sind hier vor allem hinsichtlich der Ölspezifikationen weitere Schritte zu setzen, um ganzheitlich das volle CO<sub>2</sub>-Potential zu nutzen und suboptimale Motorapplikationsmaßnahmen (Kraftstoffanreicherung, wirkungsgradungünstiger Zündzeitpunkt) zu vermeiden.

Aus diesem Grund wird bereits, ausgehend von dem INTERNATIONAL LUBRICANTS STANDARDIZATION AND APPROVAL COMMITTEE (ILSAC), an einer neuen Motorölkategorie für PKW-Ottomotoren gearbeitet. Im Rahmen der neuen ILSAC-Spezifikation GF-6 ist neben weiteren Forderungen nach geringerem Kraftstoffverbrauch, verbesserter Ölrobustheit und verstärktem Verschleißschutz erstmals ein Schutz gegen Vorentflammungen durch das Motoröl [126], [127] gefordert.

## Literaturverzeichnis

- [1] Grebe U. D.: *Weiterentwicklung des Ottomotors*, Skriptum, LVA-Nr. 315.032, TU Wien - IFA , 2014
- [2] International Council on Clean Transportation: *Passenger car CO<sub>2</sub> emissions and fuel consumption, normalized to NEDC*, Website: <http://www.theicct.org/>  
[Online] [http : //www.theicct.org/sites/default/files/info – tools/pvstds/chartlibrary/NEDC – CO2 – cars – Sept2015.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/info_tools/pvstds/chartlibrary/NEDC_CO2_cars_Sept2015.pdf), Update: September 2015, Zugriff am 12.10.2015
- [3] Kremer F.: *E10, E20 and beyond: Potential of higher blend rates and novel blend components from an engine research perspective*, 10. Tagung Kraftstoffe der Zukunft, Berlin, 2015
- [4] Fletcher K.; Gupta A.; Guinther G.: *The Impact of Low Speed Pre-Ignition on Next Generation Engine Oils*, Afton Chemical, KSTLE 2014
- [5] Mahr B.: *CO<sub>2</sub> Emission Reduction and Effects on Future Mobility*, Mahle Powertrain, KAUST 2014
- [6] Dahnz C.; Han K.-M.; Magar M.; Spicher U.; Maas U.: *Untersuchung des Auftretens und der Ursache von Selbstzündungen vor Zündungseinleitung bei aufgeladenen Motoren mit hohem Verdichtungsverhältnis*, FVV-Abschlussbericht: Vorentflammung bei Ottomotoren, Vorhaben Nr. 931, 2009
- [7] Kufferath A.; Berns S.; Hammer J.; Busch R.; Frank M.; Storchl A.: *EU6 als Herausforderung für die Benzindirekteinspritzung - Eine Bewertung zukunftsfähiger Systemansätze*, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2012
- [8] Denner V.: *Zukunft gestalten - Innovationen für effiziente Mobilität*, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2013
- [9] Schöppe D.; Knorr T.; Graf F.; Klingseis B.; Beer J.; Gutzmer P.; Hager S.; Schatz A.: *Hubraumreduzierter Verbrennungsmotor und 48V Eco Drive - Ein integrierter Ansatz zur ganzheitlichen Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs*, 35. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2014

- [10] van Basshuysen R.: *Ottomotor mit Direkteinspritzung - Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial*, Wiesbaden: VIEWEG Verlag 2008, ISBN 978-3-8348-0445-7
- [11] Golloch R.: *Downsizing bei Verbrennungsmotoren - Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung*, Springer Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage 2008, ISBN 3-540-23883-2
- [12] van Basshuysen R.; Schäfer F.: *Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, Wiesbaden: ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner, 6. Auflage 2012, ISBN 978-3-8348-1549-1
- [13] Rottengruber H.; Todsén E. C.: *Potentials and limits of downsizing*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [14] Hertzberg A.: *Betriebsstrategien für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NOx-Speicher-Katalysator*, Dissertation, Universität Karlsruhe 2001
- [15] Sabathil D.; Schaffner P.; Königstein A.: *Effizienter Einsatz optischer Messtechnik zur Reduzierung der Partikelemissionen am direkteinspritzenden Ottomotor*, 10. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden 2012
- [16] Steimle F.; Kulzer A.; Schwarzenenthal D.; Richter H.; Romberg C.: *Particle emission analysis in homogeneous direct injection SI engines*, 13. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart 2013
- [17] Dimou I.: *Particulate Matter Emissions from a DISI Engine under Cold-Fast-Idle Conditions for Ethanol-Gasoline Blends*, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2011
- [18] Merker G. P.; Teichmann R.: *Grundlagen Verbrennungsmotoren - Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*, Wiesbaden: ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, 7. Auflage 2014, ISBN 978-3-658-03194-7
- [19] Budde M.; Brandt S.; Krause S.; Gohl M.: *Einfluss der Gemischbildung auf die Ölemissionen von Verbrennungsmotoren*, Motorentchnische Zeitschrift (MTZ), Ausgabe 01/2011, S.62-67

- [20] Hadler J.; Lensch-Franzen C.; Gohl M.; Mink T.: *Ganzheitliches Konzept zur Optimierung der Ölemissionen*, Motorentechnische Zeitschrift (MTZ), Ausgabe 01/2014, S.44-49
- [21] Signargout P.; Chapelle C.; Passeron L.; Fourchon D.; Fournier E.; Merckx P.; Souhaite P.: *Der neue 3-Zylinder PureTech 1.2 e-THP von PSA Peugeot Citroën - Durchbruch bei Verbrauch und Fahrverhalten*, 35. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2014
- [22] Okada Y.; Miyashita S.; Izumi Y.; Hayakawa Y.: *Stuy of Low-Speed Pre-Ignition in Boosted Spark Ignition Engine*, SAE International 2014-01-1218
- [23] Hiereth H.; Prenninger P.: *Aufladung der Verbrennungskraftmaschine*, Springer Wien New York, 2003, ISBN3-211-83747-7
- [24] Kieberger M.; Biehl D.: *Continental's pre-ignition and glow ignition function - detection and avoidance of irregular combustions*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [25] Dobes T.; Hirsch A.; Kapus P.; Ninaus M.; Ogris M.; Philipp H.; Winklhofer E.: *Vorentflammung: Maßnahmen in der Entwicklung und Kalibrierung hoch aufgeladener Motoren*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [26] Dahnz C.; Spicher U.: *Irregular combustion in supercharged spark ignition engines - pre-ignition and other phenomena*, International Journal of Engine Research, 2010 11:485
- [27] Haenel P.; Seyfried P.; Kleeberg H.; Tomazic D.: *Systematic approach to analyze and characterize pre-ignition events in turbocharged direct-injected gasoline engines*, SAE International 2011-01-0343
- [28] Günther M.; Uygun Y.; Kremer F.; Pischinger S.: *Vorentflammung und Glühzündung von Ottokraftstoffen mit Bioanteilen*, Motorentechnische Zeitschrift (MTZ), Ausgabe 12/2013, S.994-1001
- [29] Amann M.; Alger T.; Mehta D.: *The Effect of EGR on Low-Speed Pre-Ignition in Boosted SI Engines*, SAE International 2011-01-0339

- [30] Zhang Z.; Liang X.; Liu G.; Wang Z.; Yang W.; Wang J.: *Investigation on Pre-Ignition Suppression of Turbo-Charged GDI Engine*, Journal of Combustion Science and Technology, Vol.18 No.2, April 2012
- [31] Inoue T.; Inoue Y.; Ishikawa M.: *Abnormal Combustion in a Highly Boosted SI Engine - The Occurrence of Super Knock*, SAE International 2012-01-1141
- [32] Wang Z.; Liu H.; Song T.; Xu Y.; Wang J.-X.: *Investigation on Pre-Ignition and Super-Knock in Highly Boosted Gasoline Direct Injection Engines*, SAE International 2014-01-1212
- [33] Kunde O.; Hansen J.; Zenner T.; Kapus P.; Obst C.; Queenan B.; Björnsson H.: *Der neue 2.0 SCTi EcoBoost Benzinmotor von Ford*, 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 2010
- [34] Kieberger M.: *Untersuchung des Phänomens der Vorentflammung bei der ottomotorischen Verbrennung zur Bestimmung von Einflussfaktoren und von Auslösemechanismen*, Dissertation, Technische Universität Wien, 2012
- [35] Palaveev S.; Kubach H.; Magar M.; Schießl R.; Spicher U.; Maas U.: *Untersuchung des Auftretens und der Ursache von Selbstzündungen vor Zündungseinleitung bei aufgeladenen Motoren mit hohem Verdichtungsverhältnis*, FVV-Abschlussbericht: Vorentflammung bei Ottomotoren II, Vorhaben Nr. 1051, 2013
- [36] Tamura K.; Utaka T.; Kamano H.; Hayakawa N.; Miyasaka T.; Ishino T.; Iijima A.; Shoji H.: *Abnormal Combustion Induced by Combustion Chamber Deposits Derived from Engine Oil Additives in a Spark-Ignited Engine*, SAE International, 2014-32-0091
- [37] Heywood J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill series in mechanical engineering, 2. Auflage 1988, ISBN 978-0-07-028637-5
- [38] Winkelhofer E.: *From Gasoline to Ethanol Direct Injection Engines*, FAPE-SP - International Workshop about Ethanol Combustion Engines, Sao Paulo, Brasilien 2012

- [39] Zaccardi J.-M.; Serrano D.: *Comparative analysis of low-speed pre-ignition phenomena in SI gasoline and dual fuel diesel-methane engines*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [40] Peters N.; Kerschgens B.; Jochim B.; Paczko G.: *Mega-knock in super-charged gasoline engines interpreted as a localized developing detonation*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [41] Kalghatgi G. T.; Bradley D.: *Pre-ignition and super-knock in turbo-charged spark-ignition engines*, International Journal of Engine Research, 2012 10.1177
- [42] Döhler A.; Pritze S.: *A contribution to better understanding the pre-ignition phenomenon in highly charged internal combustion engines with direct fuel injection*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [43] Palaveev S.; Magar M.; Disch C.; Schießl R.; Kubach H.; Spicher U.; Maas U.; Koch T.: *Simulations and experimental investigations of intermittent pre-ignition series in a turbocharged DISI engine*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [44] Heiß M.; Lauer T.: *Analysis of Pre-ignition Initiation Mechanisms using a Multi-Cycle CFD-Simulation*, International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting, Detroit 2014
- [45] Magar M.; Spicher U.; Palaveev S.; Gohl M.; Müller G.; Lensch-Franzen C.; Hadler J.: *Experimental Studies on the Occurrence of Low-Speed Pre-Ignition in Turbocharged GDI Engines*, SAE International, 2015-01-0753
- [46] Sonderforschungsbereich 224 - Motorische Verbrennung: *Kapitel 4.3 - Selbstzündung*, Abschlussbericht SFB 224
- [47] Warnatz J.; Maas U.; Dibble R.W.: *Combustion - Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, Springer Berlin Heidelberg New York, 4th edition 2006, ISBN 3-540-25992-9
- [48] Peters N.: *Technische Verbrennung I*, Skriptum, RWTH Aachen - ITV, 2013

- [49] Flowers D.; Pitz B.; Mehl M.; Saranthy M.; Westbrook C.: *Chemical Kinetics Research on HCCI & Diesel Fuels and Computationally Efficient Modeling of High-Efficiency Clean Combustion Engines*, DEER Conference, Detroit 2010
- [50] Ohler S.: *Entwicklung und Vergleich von Kriterien zur Erkennung der klopfenden Verbrennung in Ottomotoren*, Dissertation, Universität Hamburg, 2014
- [51] Magar M.; Wirbser H.; Schießl R.; Maas U.: *Numerical study on the impact of stable intermediates on engine combustion*, Proceedings of the European Combustion Meeting, 2009
- [52] Lauer T.; Heiss M.; Bobicic N.; Pritze S.: *Modellansatz zur Entstehung von Vorentflammungen*, Motorentechische Zeitschrift (MTZ), Ausgabe 01/2014, S.64-70
- [53] Miyasaka T.; Miura K.; Hayakawa N.; Ishino T.; Iijima A.; Shoji H.; Tamura K.; Utaka T.; Kamano H.: *A study on the Effect of a Calcium-Based Engine Oil Additive on Abnormal SI Engine Combustion*, SAE International, 2014-32-0092
- [54] Hayakawa N.; Miura K.; Miyasaka T.; Ishino T.; Iijima A.; Shoji H.; Tamura K.; Utaka T.; Kamano H.: *A study on the Effect of Zn- and Mo-Based Engine Oil Additive on Abnormal SI Engine Combustion using In-Cylinder Combustion Visualization*, SAE International, 2014-32-0096
- [55] Luo X.; Teng H.; Hu T.; Miao R.; Cao L.: *Mitigating Intensities of Super Knocks Encountered in Highly Boosted Gasoline Direct Injection Engines*, SAE International, 2015-01-0084
- [56] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 51755: Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel nach Abel-Pensky*, Berlin 1974
- [57] Joos F.: *Technische Verbrennung: Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*, Springer Berlin Heidelberg, 2006, ISBN 3-540-34333-4
- [58] Ohtomo M.; Miyagawa H.; Koike M.; Yokoo N.; Nakata K.: *Pre-Ignition of Gasoline-Air Mixture Triggered by a Lubricant Oil Droplet*, SAE International, 2014-01-2627

- [59] Yasueda S.; Takasaki K.; Tajima H.: *Abnormal Combustion caused by Lubricating Oil in High BMEP Gas Engines*, Motorentechnische Zeitschrift (MTZ), Industrial, Special Edition, Ausgabe Mai 2013, S.34-39
- [60] Zahdeh A.; Rothenberger P.; Nguyen W.; Anbarasu M.; Schmuck-Soldan S.; Schaefer J.; Goebel T.: *Fundamental Approach to Investigate Pre-Ignition in Boosted SI Engines*, SAE International 2011-01-0340
- [61] Dahnz C.; Han K.-M.; Spicher U.; Magar M.; Schiessl R.; Maas U.: *Investigations on Pre-Ignition in Highly Supercharged SI Engines*, SAE International 2010-01-0355
- [62] Amann M.; Alger T.; Westmoreland B.; Rothmaier A.: *The Effects of Piston Crevices and Injection Strategy on Low-Speed Pre-Ignition in Boosted SI Engines*, SAE International 2012-01-1148
- [63] Amann M.; Metha D.; Alger T.: *Engine Operating Condition and Gasoline Fuel Composition Effects on Low-Speed Pre-Ignition in High-Performance Spark Ignited Gasoline Engines*, SAE International 2011-01-0342
- [64] Waltner A.; Altenschmidt F.; Kaden A.; Kemmler R.: *BlueDirect - the technology for a globalised market*, 14. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart 2014
- [65] Takeuchi K.; Fujimoto K.; Hirano S.; Yamashita M.: *Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines*, SAE International 2012-01-1615
- [66] Welling O.; Collings N.; Williams J.; Moss J.: *Impact of Lubricant Composition on Low-Speed Pre-Ignition*, SAE International 2014-01-1213
- [67] Welling O.; Moss J.; Williams J.; Collings N.: *Measuring the Impact of Engine Oils and Fuels on Low-Speed Pre-Ignition in Downsized Engines*, SAE International 2014-01-1219
- [68] Dingle S. F.; Cairns A.; Zhao H.; Williams J.; Williams O.; Ali R.: *Lubricant Induced Pre-Ignition in an Optical SI Engine*, SAE International 2014-01-1222

- [69] Lauer T.; Heiß M.; Bobicic N.; Holly W.; Pritze S.: *A Comprehensive Simulation Approach to Irregular Combustion*, SAE International, 2014-01-1214
- [70] Rao Y. V. C.: *An Introduction to Thermodynamics*, Universities Press, 4. Auflage - Revised edition, ISBN 978-8173714610
- [71] Fujimoto K.; Yamashita M.; Hirano S.; Kato K.; Watanabe I.; Ito K.: *Engine Oil Development for Preventing Pre-Ignition in Turbocharged Gasoline Engine*, SAE International, 2014-01-2785
- [72] Hirano S.; Yamashita M.; Fujimoto K.; Kato K.: *Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines (Part 2)*, SAE International, 2013-01-2569
- [73] Kuboyama T.; Moriyoshi Y.; Morikawa K.: *Visualization and Analysis of LSPI Mechanism Caused by Oil Droplet, Particle and Deposit in Highly Boosted SI Combustion in Low Speed Range*, SAE International, 2015-01-0761
- [74] Grimley T. P.: *Modeling and Simulation of Oil Transport and Transformation for Studying Piston Deposits*, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2009
- [75] Tornehed P.: *Particulate Emissions Associated with Diesel Engine Oil Consumption*, Doctoral thesis, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm 2010
- [76] Cho Y.: *Modeling Engine Oil Vaporization and Transport of the Oil Vapor in the Piston Ring Pack of Internal Combustion Engines*, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2005
- [77] Senzer E. B.: *Oil Transport inside the Oil Control Ring Groove and Interaction with surrounding areas in Internal Combustion Engines*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2012
- [78] Schünemann E.; Witt A.; Selder M.; Schwarz C.: *Pre-Ignition analysis on a turbocharged gasoline engine with direct injection*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013

- [79] Adomeit P.; Dohmen J.; Thewes M.; Ewald J.; Günther M.; Morcinkowski B.; Pischinger S.: *Einfluss von Kraftstoff und Brennverfahren auf die Vorentflammung beim aufgeladenen Ottomotor*, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2013
- [80] Mortier R. M.; Fox M. F.; Orszulik S. T.: *Chemistry and Technology of Lubricants*, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 3. Auflage 2010, ISBN 978-1-4020-8662-5
- [81] Totten G. E.; Westbrook S. R.; Shah R. J.: *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance and Testing*, ASTM manual series MNL 37, 2003, ISBN 0-8031-2096-6
- [82] Castrol AG: *ABC der Schmierung - Aufbau, Verwendung und Eigenschaften von Schmierstoffen*, Schweiz, Mai 2009
- [83] Additive Technical Committee (ATC): *Lubricant Additives and the Environment*, ATC Document 49 (revision 1), December 2007
- [84] Williams J.; Moss J.: *interne Kommunikation*, British Petroleum BP p.l.c., 2014
- [85] Rudnick L. R.: *Synthetics, Mineral Oils and Bio-Based Lubricants - Chemistry and Technology*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006, ISBN 978-1-57444-723-1
- [86] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 1342-1: Viskosität - Teil1: Rheologische Begriffe*, Berlin 2003
- [87] ASTM American Society for Testing and Materials: *ASTM D5800: Standard Test Method for Evaporation Loss of Lubricating Oils by the NOACK Method*, 2010
- [88] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 51575: Prüfung von Mineralölen - Bestimmung der Sulfatasche*, Berlin 2011
- [89] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 3771: Gesamtbasenzahl - Bestimmung durch potentiometrische Perchlorsäure-Titration*, Berlin 1985

- [90] Stepina V.; Vesely V.: *Lubricants and Special Fluids*, Tribology Series 23, 1992, ISBN 978-0-444-98674-0
- [91] Yonglei W.; Wumanjiang E.: *Recent Advances in Colloidal Lubricant Detergents*, China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, Vol.12, No. 4, 2010
- [92] Rudnick L. R.: *Lubricant Additives - Chemistry and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, ISBN 978-1-4200-5964-9
- [93] De Barros Bouchet M. I.; Martin J. M.; Le Mogne Th.; Bilas P.; Vacher B.; Yamada Y.: *Mechanisms of MoS<sub>2</sub> formation by MoDTC in presence of ZnDTP: effect of oxidative degradation*, Elsevier, Wear 258, S.1643-1650, 2005
- [94] Kiesgen G.; Curtius B.; Steinparzer F.; Klütting M.; Kessler F.; Schopp J.; Lechner B.; Dunkel J.: *Der neue 1,6l Turbomotor mit Direkteinspritzung und vollvariablem Ventiltrieb für den MINI Cooper S*, 31. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien 2010
- [95] Kristl, Seibt & Co GmbH: *Technisches Datenblatt - Blowby Typ 627*, Graz, Österreich 2014
- [96] AVL List GmbH: *Training Material - AVL Particle Counter 489*, Graz, Österreich 2010
- [97] AVL List GmbH: *Product Guide - AVL Particle Counter 489*, Graz, Österreich 2010
- [98] Luef R.; Grabner P.; Eichlseder H.; Martin C.; Graf J.; Geringer B.: *Development of a New Test Procedure to Determine Fuel and Oil Impact on Irregular Combustion Phenomena with Focus on Highly Boosted Downsized S.I. Engines*, 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen 2014
- [99] Sloan Automotive Laboratory: Website: <http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/>  
[Online] <http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/images/LNF-intake.jpg>, 2015. Zugriff am 23.09.2015

- [100] Kaden A.; Frommelt A.; Gildein H.; Kraus E.; Schaupp U.: *Knocking simulation at Mercedes-Benz - application in series production development*, 4. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2013
- [101] Matsumoto A.; Moore W. R.; Lai M.-C.; Zheng Y.; Foster M.; Xie X.-B.; Yen D.; Confer K.; Hopkins E.: *Spray Characterization of Ethanol Gasoline Blends and Comparison to a CFD Model for a Gasoline Direct Injector*, SAE International 2010-01-0601
- [102] Watanabe I.; Kawai T.; Yonezawa K.; Ogawa T.: *The New Toyota 2.0-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC D-4ST Engine - Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine -*, 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen 2014
- [103] Luo X.; Teng H.; Hu T.; Miao R.; Cao L.: *An Experimental Investigation on Low Speed Pre-Ignition in a Highly Boosted Gasoline Direct Injection Engine*, SAE International, 2015-01-0758
- [104] Máynarczak A.: *The influence of oil refilling strategy on the amount of oil in trunk piston marine diesel engine lubricating system*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18 - No. 3, 2011
- [105] Smallbone A.; Bhave A.: *Advanced simulations of knocking and mega-knocking combustion events in highly boosted DISI engines*, 10. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden 2012
- [106] Ljubas D.; Krpan H.; Matanovic I.: *Influence of engine oils dilution by fuels on their viscosity, flash point and fire point*, NAFTA Scientific Journal, Vol. 61 - No.2, S.73-79, 2010
- [107] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: *DIN 51773: Prüfung flüssiger Kraftstoffe - Bestimmung der Zündwilligkeit (Cetanzahl) von Dieselmotoren mit dem BASF-Prüfmotor*, Berlin 2010
- [108] Amann M.; Alger T.: *Lubricant Reactivity Effects on Gasoline Spark Ignition Engine Knock*, SAE International, 2012-01-1140

- [109] Pearson R.; Smith A.; Williams J.; Leach B.; Mayer M.: *Impact of Fuels and Lubricants on Present and Future Engines*, 13th International Conference on Engines for Vehicles, Port Jefferson NY, USA, 21.-25. Juni 2015
- [110] Morikawa K.; Moriyoshi Y.; Kuboyama T.; Imai Y.; Yamada T.; Hatamura K.: *Investigation and Improvement of LSPI Phenomena and Study of Combustion Strategy in Highly Boosted SI Combustion in Low Speed Range*, SAE International, 2015-01-0756
- [111] Moriyoshi Y.; Yamada T.; Tsunoda D.; Xie M.; Kuboyama T.; Morikawa K.: *Numerical Simulation to Understand the Cause and Sequence of LSPI Phenomena and Suggestion of CaO Mechanism in Highly Boosted SI Combustion in Low Speed Range*, SAE International, 2015-01-0755
- [112] Maitra S.; Chakrabarty N.; Pramanik J.: *Decomposition kinetics of alkaline earth carbonates by integral approximation method*, Cerâmica Vol. 54 Nr.331 S.268-272, ISSN 1678-4553, 2008
- [113] Geringer B.; Spreitzer J.; Mayer M.; Martin C.: *Meta-analysis for an E20/25 technical development study - Task 2: Meta-analysis of E20/25 trial reports and associated data*, Commission of the European Union and the European Standardization Committee CEN (ENER/C2/GA/449-2012/SI2.641582), Brüssel/Wien 2014
- [114] Kasseris E. P.: *Knock limits in spark ignited direct injected engines using gasoline/ethanol blends*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2011
- [115] Martin C.; Graf J.; Geringer B.; Luef R.; Grabner P.; Eichlseder H.: *Entwicklung von Prüfverfahren zur Bestimmung des Klopf- und Vorentflammungsverhaltens von alternativen Kraftstoffen und Determination des Öleinflusses auf Vorentflammungen speziell für hochaufgeladene Ottomotoren mit Direkteinspritzung*, FVV-Frühjahrstagung, Magdeburg 2014
- [116] Bobicic N.; Hofmann P.; Geringer B.; Königstein A.; Hock C.; Grebe U. D.; Schmuck-Soldan S.: *Einfluss von Ethanolkraftstoff auf die Vorentflammungsneigung von hochaufgeladenen Ottomotoren*, 3. Internationale Fachtagung Ottomotorisches Klopfen, Berlin 2010

- [117] Sasaki N.; Nakata K.; Kawatake K.; Sagawa S.; Watanabe M.; Sone T.: *The Effect of Fuel Compounds on Pre-ignition under High Temperature and High Pressure Condition*, SAE International 2011-01-1984
- [118] Rothe M.; Heidenreich T.; Spicher U.; Schubert A.: *Knock Behavior of SI-Engines: Thermodynamic Analysis of Knock Onset Locations and Knock Intensities*, SAE International 2006-01-0225
- [119] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 5163: Mineralölerzeugnisse - Bestimmung der Klopfestigkeit von Otto- und Flugkraftstoffen - Motor-Verfahren*, Berlin 2012
- [120] Hülser T.; Grünefeld G.; Brands T.; Günther M.; Pischinger S.: *Optical Investigation on the Origin of Pre-Ignition in a Highly Boosted SI Engine Using Bio-Fuels*, SAE International 2013-01-1636
- [121] Palaveev S.; Magar M.; Kubach H.; Schiessl R.; Spicher U.; Maas U.: *Premature Flame Initiation in a Turbocharged DISI Engine - Numerical and Experimental Investigations*, SAE International, 2014-01-1226
- [122] Chapman E.; Davis R.; Studzinski W.; Geng P.: *Fuel Octane and Volatility Effects on the Stochastic Pre-Ignition Behavior of a 2.0l Gasoline Turbocharged DI Engine*, SAE International, 2013-01-0252
- [123] Wang Z.; Qi Y.; Liu H.; Long Y.; Wang J.-X.: *Experimental Study on Pre-Ignition and Super-Knock in Gasoline Engine Combustion with Carbon Particle at Elevated Temperatures and Pressures*, SAE International, 2015-01-0752
- [124] Lepperhoff G.; Lütkemeyer G.; Schönherr C.; Cassidy L.; Block D.: *Ablagerungsbildung und ORI eines Renault R19 im Feld*, Mineralöltechnik Nr.8, 1991
- [125] Klaisle M.: *Ablagerungsbildung beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsölkraftstoff*, Dissertation, Technischen Universität München TUM, 2012
- [126] Society of Tribologists and Lubrication Engineers: *PC-11 and GF-6: New engines drive change in oil specs*, <http://www.stle.org/resources/article/details.aspx?did=1671> - Online Ressource, Abruf: 15. Oktober 2014

- [127] Lubrizol: *GF-6 Specification Details - About the Proposed ILSAC GF-6 Specification*, <http://www.gf-6.com/specificationdetails> - Online Ressource, Abruf: 19. Oktober 2014

# 10 Anhang

MATTIAS MAYER

Bäckergasse 35

2124 Niederkreuzstetten

29. Dezember 1987, Wien

## Ausbildung

---

2013-2015	<p>TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN          Doktoratstudium der technischen Wissenschaften          Dissertationsthema: <i>Einfluss der Motorölspezifikationen sowie unterschiedlicher Kraftstoffeigenschaften auf das Vorentflammungsverhalten von hochaufgeladenen direkteinspritzenden Ottomotoren</i>          Rigorosum: November 2015</p>
2008-2013	<p>TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN          Bachelor-/ Masterstudium Maschinenbau          Diplomarbeitsthema: <i>Ablagerungsphänomene bei der Aufbereitung einer Harnstoffwasserlösung zur Selektiven Katalytischen Reduktion in einer Diesellabgasanlage</i>          Diplomprüfung: März 2013</p>
2002-2007	<p>HÖHERE TECHNISCHE BUNDESLEHR- UND VERSUCHSANSTALT          TECHNOLOGISCHES GEWERBE MUSEUM, Wien          Fachrichtung Elektronik</p>
1998-2002	<p>BUNDESREALGYMNASIUM KLEINE SPERLGASSE, Wien</p>
1994-1998	<p>VOLKSSCHULE MARKOMANNENSTRASSE, Wien</p>

## Berufstätigkeit

---

seit 03/2013	WISSENSCHAFTLICHER PROJEKTASSISTENT am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien unter der Leitung von Prof. Dipl. Ing. Dr. Bernhard Geringer
02/2011-03/2013	MITARBEITER am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien unter der Leitung von Prof. Dipl. Ing. Dr. Bernhard Geringer Prüfstandsmitarbeiter
08/2010-09/2010	MAN SPEZIALFAHRZEUGE Brunner Straße 44, Wien
07/2008-09/2010	MITARBEITER am Flughafen Wien-Schwechat Abteilung: Transport und Logistik

## Grundwehrdienst

---

07/2007-01/2008	GRUNDWEHRDIENER Aufklärungs- und Artilleriebataillon 3, Mistelbach
-----------------	---

## Veröffentlichungen

---

1. Mayer M.; Hofmann P.; Geringer B.; Williams J.; Moss J.; Kapus P.: *Influence of Different Oil Properties on Low Speed Pre-Ignition in Turbocharged Direct Injection Spark Ignition Engines*, SAE International 2016-01-0339
2. Mayer M.; Hofmann P.; Geringer B.; Williams J.; Moss J.: *Influence of Different Fuel Properties and Gasoline - Ethanol Blends on Low Speed Pre-Ignition in Turbocharged Direct Injection Spark Ignition Engines*, SAE International 2016-01-0340
3. Smith A.; Yates R.; Pearson R.; Williams J.; Mayer M.: *Effects of Lubricant Composition on Low Speed Pre-Ignition in Direct Injection Spark Ignition Engines*, SAE International 2016-01-0493

4. Pearson R.; Smith A.; Williams J.; Leach B.; Mayer M.: *Impact of Fuels and Lubricants on Present and Future Engines*, 13th International Conference on Engines for Vehicles, Port Jefferson NY, USA, 21.-25. Juni 2015
5. Geringer B.; Spreitzer J.; Mayer M.; Martin C.: *Meta-analysis for an E20/25 technical development study - Task 2: Meta-analysis of E20/25 trial reports and associated data*, Commission of the European Union and the European Standardization Committee CEN (ENER/C2/GA/449-2012/SI2.641582), Brüssel/Wien 2014
6. Smith H.; Lauer T.; Mayer M.; Pierson S.: *Optical and Numerical Investigations on the Mechanisms of Deposit Formation in SCR Systems*; SAE International Journal of Fuels and Lubricants 2014, 2014-01-1563