

„Optimierung der motorinternen späten Nacheinspritzung im Regenerationsmodus eines Pkw-Dieselmotors zur Verringerung der Ölverdünnung bei Betrieb mit den Mischkraftstoffen B7, B10 und B30“

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: **UFOP-Nr. 540/093**

gefördert durch: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP),
Volkswagen AG Wolfsburg



Institut für Mobile Systeme – Lehrstuhl Kolbenmaschinen

„Optimierung der motorinternen späten Nacheinspritzung im Regenerationsmodus eines Pkw-Dieselmotors zur Verringerung der Ölverdünnung bei Betrieb mit den Mischkraftstoffen B7, B10 und B30“

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

UFOP–Nr. 540/093

gefördert durch:

- Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP)
- Volkswagen AG Wolfsburg

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.
H. Tschöke

Lehrstuhl Kolbenmaschinen

Dipl.-Ing. G. Braungarten

Dipl.-Ing. U. Patze

Magdeburg, 31.08.2010

An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurden im Institut für Mobile Systeme IMS, Lehrstuhl Kolbenmaschinen an einem Pkw-Dieselmotor 2,0 I-TDI mit Common-Rail-System, motornahem Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter (DPF) in stationären Prüfläufen auf dem Motorprüfstand die Auswirkungen von Veränderungen der motorinternen „späten“ Nacheinspritzung im Regenerationsmodus bei Betrieb mit den Mischkraftstoffen B7, B10 und B30 auf den Kraftstoffeintrag in das Motoröl sowie auf die Veränderung der Ölviskosität und der limitierten gasförmigen Emissionen untersucht. Die Rußmessung entfiel wegen der Verwendung eines DPF.

Der Dieselmotor sowie u. a. auch das Applikationssteuergerät und die Abgasnachbehandlungsanlage wurden von der Volkswagen AG für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Die serienmäßige späte Nacheinspritzung wurde in 2 Teile aufgesplittet. Variiert werden konnten allerdings nur der Einspritzzeitpunkt und die Kraftstoffmenge der 1. Teilmenge. Die 2. Teilmenge der späten Nacheinspritzung wurde automatisch durch das Steuergerät angepasst, um die Abgastemperatur von 640 °C vor dem DPF zu erreichen. Die beiden frühen Nacheinspritzungen konnten nicht verändert werden. Die 2. Teilmenge der frühen Nacheinspritzung wurde vom Steuergerät automatisch angepasst (zusammen mit der automatischen Anpassung der 2. späten Teilmenge).

Zusätzlich zu der im Projekt der UFOP enthaltenen Aufgabe wurden auch der Kraftstoffeintrag und der Abfall der Motorölviskosität durch die an die Haupteinspritzung angelagerten frühen Nacheinspritzungen ermittelt.

Die Motorversuche wurden mit dem vom Motorhersteller zugelassenen Motoröl „Titan GT1 Longlife III 5W-30“ der Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH durchgeführt.

Die stationären Prüfstandsuntersuchungen ergaben, dass

- der Gesamt-Kraftstoffeintrag in das Motoröl mit steigendem RME-Anteil des Kraftstoffs zunahm,
- dabei die RME-Konzentration im Öl anstieg und die DK-Konzentration sank,
- mit der Serienapplikation „alt“ mit 5 und „neu“ mit 6 Einspritzungen im Regenerationsmodus keine signifikanten Konzentrationsunterschiede im Öl feststellbar waren,
- die Splittung der späten Nacheinspritzung bei Betrieb mit B30 den Gesamt-Kraftstoff-, den RME- und den DK-Eintrag im Vergleich zur Serienapplikation „neu“ um jeweils 27 % senkte und den beim Prüflauf entstehenden Abfall der Ölviskosität bei 100 °C um ca. 10 % verringerte,
- die an die Haupteinspritzung angelagerten frühen Nacheinspritzungen (Vorwärmmodus ohne späte NE) bei Betrieb mit B10 und B30 nahezu den gleichen Kraftstoffeintrag und den gleichen Viskositätsabfall des Motoröls ergaben wie der Regenerationsbetrieb mit der optimierten, gesplitteten späten Nacheinspritzung,
- die Splittung der späten Nacheinspritzung im Regenerationsmodus im Vergleich zur Serienapplikation „neu“ keine negativen Auswirkungen auf die Partikelfilterregeneration und die limitierten gasförmigen Abgasemissionen hatte.

Die stationären Prüfstandsuntersuchungen ergaben, dass die Optimierung der späten Nacheinspritzungen im Bereich des Ausschubtaktes den Kraftstoffeintrag in das Motoröl signifikant reduzieren kann. Sie machten aber auch deutlich, dass die frühen, an die Haupteinspritzung angelagerten Nacheinspritzungen einen erheblichen Anteil an der Motorölverdünnung haben können, wenn Teilmengen der Kraftstoffstrahlen auf die Zylinderwand treffen. Zur weiteren Reduzierung des Kraftstoffeintrags in das Motoröl sollten daher auch die frühen Nacheinspritzungen in zukünftige Untersuchungen einbezogen werden.

	Seite
Kurzfassung	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abkürzungen	4
1 Einleitung	5
2 Aufgabenstellung	6
3 Betriebsstoffe	7
3.1 Testkraftstoffe	7
3.2 Siedekennlinien der Kraftstoffe	7
3.3 Motoröl.....	8
4 Versuchsaufbau	8
4.1 Versuchsmotor.....	8
4.2 Motorprüfstand.....	9
4.3 Versuchsdurchführung	10
4.3.1 Projektetappen.....	10
4.3.2 Versuchsablauf	11
4.3.3 Betriebspunkte des Motors	15
4.3.4 Betriebskennwerte des Motors	16
4.3.5 Einspritzablauf	18
5 Vertrauensbereich für die Mittelwerte	20
6 Ergebnisse der Untersuchungen	20
6.1 Ergebnisse im Regenerationsmodus	20
6.1.1 Kraftstoffaufprall auf die Zylinderwände.....	20
6.1.2 Optimierung der späten Nacheinspritzung	21
6.1.3 Kraftstoffeintrag in das Motoröl	24
6.1.3.1 Kraftstoffeintrag bei 6 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „neu“)	24
6.1.3.2 Kraftstoffeintrag bei 7 Einspritzungen je Zyklus (gesplittete späte Nacheinspritzung).....	25
6.1.4 Kraftstoffeintrag in das Motoröl bei Betrieb mit B10 in Abhängigkeit von der Einspritzstrategie	26
6.1.5 Abfall der Motorölviskosität in Abhängigkeit von der Einspritzstrategie	27
6.1.6 Verbesserungen durch Splittung der späten Nacheinspritzmenge im Vergleich zur Serienapplikation „neu“.....	28
6.1.6.1 Verringerung des Kraftstoffeintrags	28
6.1.6.2 Verringerung des Abfalls der Motorölviskosität	29
6.2 Ergebnisse im Vorwärmmodus.....	30
6.2.1 Kraftstoffeintrag durch frühe Nacheinspritzungen	30
6.2.2 Abfall der Motorölviskosität durch frühe Nacheinspritzungen.....	32
6.3 Überprüfung der Abgasnachbehandlung bei unterschiedlichen Einspritzstrategien im Regenerationsbetrieb des Motors	33
6.3.1 Beladung und Regeneration	33
6.3.2 Abgasemissionen.....	35
7 Zusammenfassung	37
8 Literatur	39

Abkürzungen

ATL	Abgasturbolader
B_e	stündlicher Kraftstoffverbrauch
BP	Betriebspunkt
B7	Kraftstoffgemisch aus 7 Vol.% RME und 93 Vol.% DK
B10	Kraftstoffgemisch aus 10 Vol.% RME und 90 Vol.% DK
B30	Kraftstoffgemisch aus 30 Vol.% RME und 70 Vol.% DK
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CAT	Oxidationskatalysator
DK	Diesekraftstoff, ohne RME-Anteil
DPF	Dieselpartikelfilter
dp	Differenzdruck des Dieselpartikelfilters
h	Betriebsstunden
Krst. ges.	gesamter Kraftstoff, bestehend aus RME- und DK-Anteilen
kW	Kilowatt
KW	Kurbelwinkel
M_d	Drehmoment
NE	Nacheinspritzung
NO _x	Stickoxid
n	Drehzahl
n	Anzahl der Messungen
Oxi-Kat	Oxydationskatalysator
O ₂	Sauerstoff
p_{Abg}	Abgasgegendruck nach ATL
p_{LL}	Ladeluftdruck (absolut) nach Ladeluftkühler
P	Wahrscheinlichkeit
P_e	effektive Motorleistung
p_{me}	effektiver Mitteldruck
p_{Abg}	Abgasgegendruck nach DPF
RME	Rapsmethylester, Biodiesel, B100
s	Standardabweichung
T_{Abg}	Abgastemperatur nach ATL bzw. nach DPF
THC	Kohlenwasserstoffemission
T_R	Temperatur der Raumluft
T_{KW}	Kühlwassertemperatur am Motorausstritt
T_{LL}	Ladelufttemperatur nach Ladeluftkühler
T_{v_ATL}	Abgastemperatur vor dem Abgasturbolader
T_{v_PF}	Abgastemperatur vor dem Partikelfilter (nach Oxi-Kat)
T_{n_PF}	Abgastemperatur nach dem Partikelfilter
$T_{öl}$	Öltemperatur in der Ölwanne
t	Student-Faktor
v	Vertrauensintervall

Einleitung

Die Markteinführung von Biodiesel als Zumischkomponente in Dieselkraftstoff schreitet weltweit voran. Die Erhöhung des Beimischungsanteils von Biodiesel von 7 %Vol. (B7) auf 10 %Vol. (B10) oder höher stößt jedoch auf zunehmende Bedenken seitens der Pkw-Hersteller [1].

Der Grund hierfür ist, dass Fahrprofile mit niedrigen Geschwindigkeiten, wie sie z. B. im Stadtverkehr auftreten, für mit Dieselpartikelfiltern ausgerüstete Pkw äußerst kritisch sind, denn im normalen Betriebsmodus des Dieselmotors treten hierbei nur sehr niedrige Abgastemperaturen auf. Um die Regeneration eines beladenen Partikelfilters bei diesen Betriebszuständen dennoch zu gewährleisten, muss die Abgastemperatur vor dem Eintritt in den Partikelfilter auf > 550 °C erhöht werden.

Hierfür kommen standardmäßig Zylinder-Nacheinspritzstrategien zum Einsatz. Wegen der späten, auf den ZOT bezogenen Lage dieser innermotorischen Einspritzung wird diese als späte Nacheinspritzung bezeichnet. Weil diese Einspritzung während der Expansion im Verbrennungstakt physikalisch bedingt einen schlechten Wirkungsgrad hat, steigt die Abgastemperatur entweder direkt oder über einen nachgeschalteten Oxidationskatalysator an. Bei manchen Motoren wird innermotorisch Kraftstoff auch gezielt in den Auspufftakt eingespritzt, der dann erst im nachgeschalteten Oxidationskatalysator verbrennt und die Abgastemperatur so weit anhebt, dass diese für die Zündung der Rußablagerungen im nachgeschalteten Dieselpartikelfilter ausreichend ist.

Ein Hauptproblem beim Einsatz der Nacheinspritzung ist, dass dabei ein Aufprallen des Kraftstoffs auf die Zylinderwände auftreten kann, was zu einer Motorschmierölverdünnung führt. Als Folge der Ölverdünnung ergibt sich ein Viskositätsabfall mit der Gefahr Verschleiß fördernder Betriebsbedingungen. Bei Überschreitung eines gewissen Grenzwertes kann die Ölverdünnung zu Motorschäden führen.

Während Dieselkraftstoff ohne Zumischanteile von Biodiesel aus dem Motoröl wieder ausdampfen kann, verbleiben die in das Motoröl gelangten Biodieselanteile aufgrund der höheren Siedetemperaturen von z. B. RME gegenüber Dieselkraftstoff im Schmieröl und führen zu einer dauerhaften Ölverdünnung [2].

Neben dem Partikelfiltersystem mit aktiver Partikelfilterregeneration durch motorinterne Kraftstoffnacheinspritzung, das z. Z. bei allen deutschen Pkw-Herstellern ohne Additivzusatz eingesetzt wird, gibt es auch additivunterstützte Systeme, die grundsätzlich mit geringeren Kraftstoffmengen während der Nacheinspritzung für die Regeneration auskommen. Bei diesen Systemen können unter besonderen Bedingungen (z. B. Reduzierung des Ölwechselintervalls) Biodieselanteile von bis zu 30 Prozent (B30) zugelassen werden [3]. Systeme, bei denen dagegen der für die Regeneration notwendige Zusatzkraftstoff ausschließlich direkt vor den Oxidationskatalysator eingespritzt wird, haben prinzipiell keine hierdurch bedingten Probleme mit Schmierölverdünnung.

Um bei einer weiteren Erhöhung des Biodieselanteils im Dieselkraftstoff über 7 %Vol. hinaus die irreversible Motorschmierölverdünnung bei Pkw-Motoren mit motorinterner Nacheinspritzung zu verringern, muss versucht werden, den Kraftstoffeintrag vor allem im Regenerationsmodus durch Optimierung der späten Nacheinspritzung hinsichtlich Anzahl der Nacheinspritzungen, der Einspritzmenge und der Einspritzzeitpunkte zu reduzieren. Mit diesem Ziel wurden die nachfolgend beschriebenen Prüfstandsuntersuchungen durchgeführt.

2 Aufgabenstellung

Die Schmierölverdünnung im Regenerationsmodus eines modernen Pkw-Dieselmotors soll durch Optimierung der motorinternen späten Nacheinspritzung bei Betrieb mit den Mischkraftstoffen B7, B10 und B30 verringert werden. Die Untersuchungen sind an einem Dieselmotor 2,0-I-TDI mit Common-Rail-Einspritzung der Volkswagen AG durchzuführen.

Ausgehend von der aktuellen Serienapplikation mit insgesamt 6 Einspritzungen sind die Auswirkungen der Splittung der im Regenerationsmodus nacheingespritzten Menge in zwei Teile (insgesamt 7 Einspritzungen) sowie der Variation dieser Teileinspritzmengen und deren Einspritzzeitpunkte auf den Kraftstoffeintrag in das Motoröl zu untersuchen. Dabei ist die in der aktuellen Serienapplikation für die Regeneration des Dieselpartikelfilters vorgesehene Abgastemperatur vor dem Filter auch mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung beizubehalten. Bei allen Prüfläufen sind die RME- und DK-Anteile sowie der Einfluss des im Schmieröl enthaltenen Kraftstoffs auf die Ölviskosität zu ermitteln.

Die mit der optimierten späten Nacheinspritzung (7 Einspritzungen je Zyklus) erhaltenen Ergebnisse sind den mit der aktuellen Serienapplikation (6 Einspritzungen je Zyklus) gemessenen Kraftstoffeintragswerten gegenüber zu stellen. Die mit dem Kraftstoff B10 ermittelten Ergebnisse sind mit den in dem FNR/UFOP-Projekt (FKZ: 22010007) [2], dokumentierten Werten zu vergleichen, die mit der vorangegangenen Serienapplikation (5 Einspritzungen je Zyklus) für diese Motorausführung gemessenen wurden.

Es sind der Verlauf der Filterregeneration sowie die limitierten gasförmigen Abgasemissionen im Regenerationsmodus beim Einsatz der gesplitteten späten Nacheinspritzung und der aktuellen Serienapplikation zu vergleichen.

Die Untersuchungen sind stationär auf dem Motorprüfstand durchzuführen.

Als Motoröl ist ein vom Motorhersteller zugelassenes Öl zu verwenden.

Die im Regenerationsmodus durchzuführenden Kraftstoffeintragsversuche sowie die Regeneration des beladenen Partikelfilters sind mit dem in der **Tab. 2-1** enthaltenen Motorbetriebspunkt BP1 durchzuführen. Die Beladung des Partikelfilters soll im Motorbetriebspunkt BP2 erfolgen.

Tab. 2-1: Betriebspunkte des Motors 2,0 I TDI CR 4V, 103 kW

BP	n [1/min]	M _d [Nm]	p _{me} [bar]	
1	2140	30	1,9	Regeneration
2	2000	65	4,2	Beladung

Als Ergebnis der Untersuchungen sind ggf. Maßnahmen zur Verringerung des Kraftstoffeintrags in das Motoröl vorzuschlagen.

3 Betriebsstoffe

3.1 Testkraftstoffe

Dieselmkraftstoff

Für die Untersuchungen wurde Dieselmkraftstoff von der Fa. Mundt + Thoms GmbH in Magdeburg beschafft, der frei von RME-Anteilen war.

Biodiesel B100 (RME)

Der für die in diesem Projekt vorgesehenen Untersuchungen bereitgestellte Biodiesel B100 war ein Rapsmethylester (RME) in Winter-Qualität mit Kälteadditiv.

Mischkraftstoffe B7, B10 und B30

Die Mischkraftstoffe wurden im IMS aus Biodiesel (RME) und RME-freiem DK gemischt. Das Mischen und die Lagerung der Blends erfolgten in 200 l-Fässern, aus denen die Kraftstoffe während der Versuchsdurchführung entnommen wurden. Die RME- und DK-Anteile der Blends sind in der folgenden **Tab. 3-1** enthalten:

Tab. 3-1: Verwendete Kraftstoff-Blends

Kraftstoff	B7	B10	B30
RME-Anteil [%]	7	10	30
DK-Anteil [%]	93	90	70

3.2 Siedekennlinien der Kraftstoffe

Die Siedekennlinien der Kraftstoffe B0, B7, B10 und B30 wurden von der ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH aufgenommen und in den Prüfberichten 161935 und 181697 dokumentiert. Für B0, B7 und B10 wurde die Prüfmethode DIN EN ISO 3405 und für B30 die ASTM D 1160 angewendet. Die Ergebnisse sind im **Bild. 3-1** enthalten.

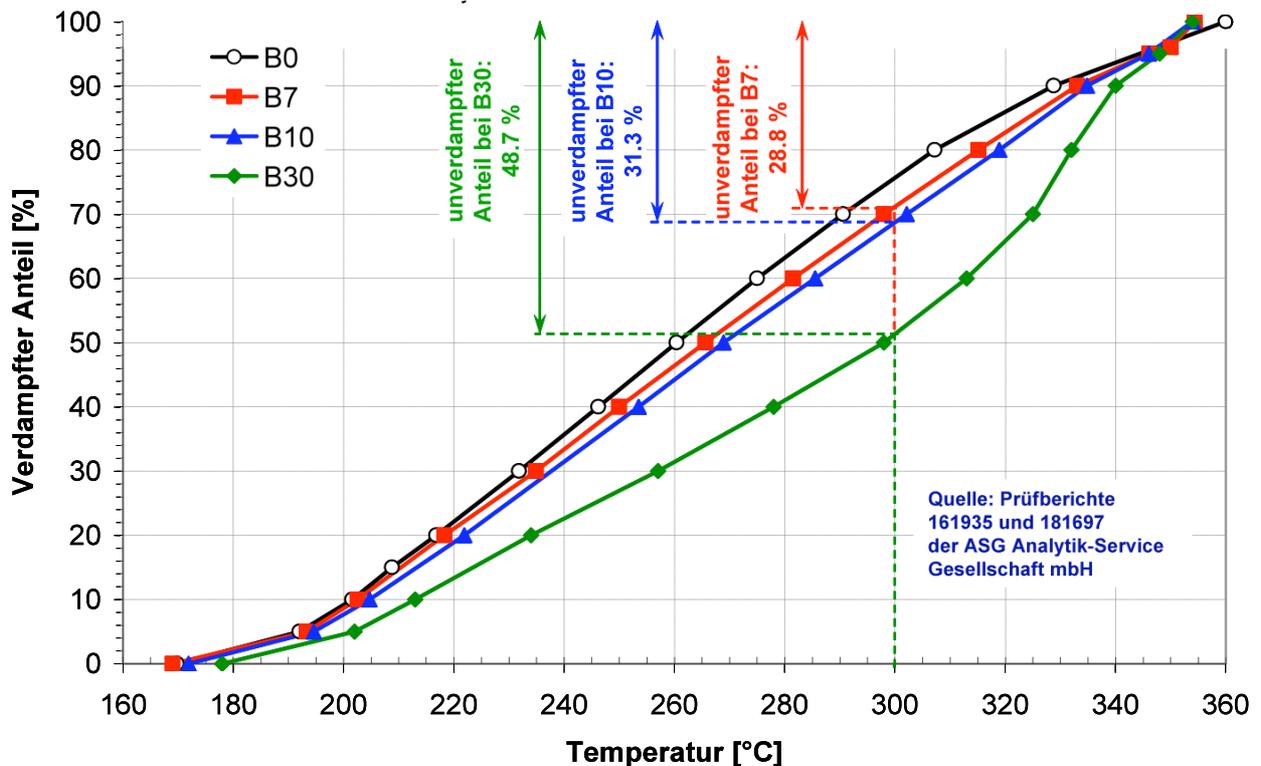


Bild 3-1: Siedekurven der Mischkraftstoffe B0, B7, B10 und B30

Das Bild zeigt, dass sich mit zunehmendem RME-Anteil im Mischkraftstoff der verdampfte Kraftstoffanteil bei gleicher Siedetemperatur verringert bzw. der unverdampfte Anteil vergrößert. So wurde z. B. für die Siedetemperatur von 300 °C der unverdampfte Anteil bei B7 mit 28,8 %, bei B10 mit 31,3 % und bei B30 mit 48,7 % ermittelt. Das Destillationsende der drei Kraftstoffe lag bei 354 °C.

3.3 Motoröl

Der Motor wurde mit dem vom Motorenhersteller zugelassenen Motoröl mit der Bezeichnung „Titan GT1 Longlife III 5W-30“, das der VW Norm VW 507 00 entspricht, betrieben. Das Öl wurde von der Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH bezogen.

4 Versuchsaufbau

4.1 Versuchsmotor

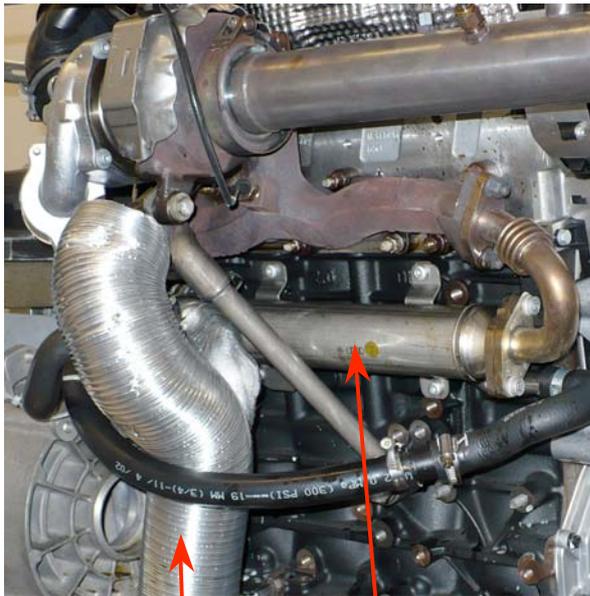
Als Versuchsmotor diente ein von der Volkswagen AG Wolfsburg bereitgestellter Pkw-Dieselmotor 2,0-I-TDI-CR-4V mit der Nennleistung 103 kW.

Die folgende **Tabelle 4-1** beschreibt die technischen Daten des abgasturboaufgeladenen, ladeluftgekühlten 4-Zylinder-Dieselmotors.

Tabelle 4-1: Technische Daten des Versuchsmotors 2,0-I-TDI-CR-4V

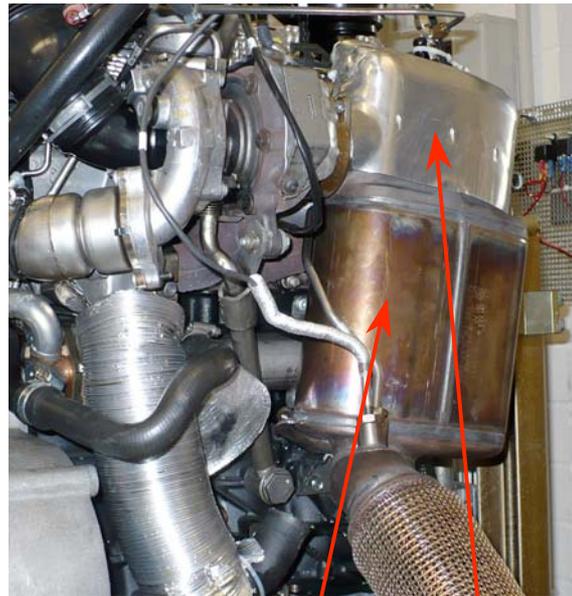
Motorbauart	Vierzylinder-Dieselmotor
Motornummer	CBA 0634448
Motorkennbuchstabe	CBAB
Hersteller	Volkswagen AG
Einspritzsystem	Common-Rail , Einspritzdruck: 1800 bar 8-Loch-Einspritzdüse, Piezo-Inline-Injektoren
Motorsteuerung	EDC 17
Ventile pro Zylinder	4
Hubraum	1968 cm ³
Bohrung/Hub	81,0/95,5 mm
geometrisches Verdichtungsverhältnis	16,5 : 1
Abgasturboaufladung	Abgasturbolader VNT, Ladeluftkühlung
Abgasreinigung	EGR mit Niedertemperaturkühlung, Oxi-Kat und DPF motornah
max. Leistung	103 kW bei 4200 1/min
max. Drehmoment	320 Nm bei 1750 – 2500 1/min
Kraftstoff	Dieselmotorkraftstoff nach EN 590
Emissionsklasse	Euro 5

Die hohen Standards der Abgasnorm Euro 5 erreicht der Motor mit einer geschalteten Niedertemperatur-EGR-Kühlung zur Optimierung der Rohemission und einem motornahen Dieselpartikelfilter (**Bild 4-1**) mit vorgeschaltetem Oxi-Kat [5].



Niedertemperatur-EGR-Kühler

Luftschlauch zur Kühlung
der ATL-Unterdruckdose auf
dem Motorprüfstand



- motornaher DPF
- mit vorgeschaltetem Oxi-Kat

Bild 4-1: Niedertemperatur-EGR-Kühler (links) und motornaher DPF mit Oxi-Kat (rechts)

4.2 Motorprüfstand

Den prinzipiellen Aufbau des Motorprüfstands zeigt **Bild 4-2**.

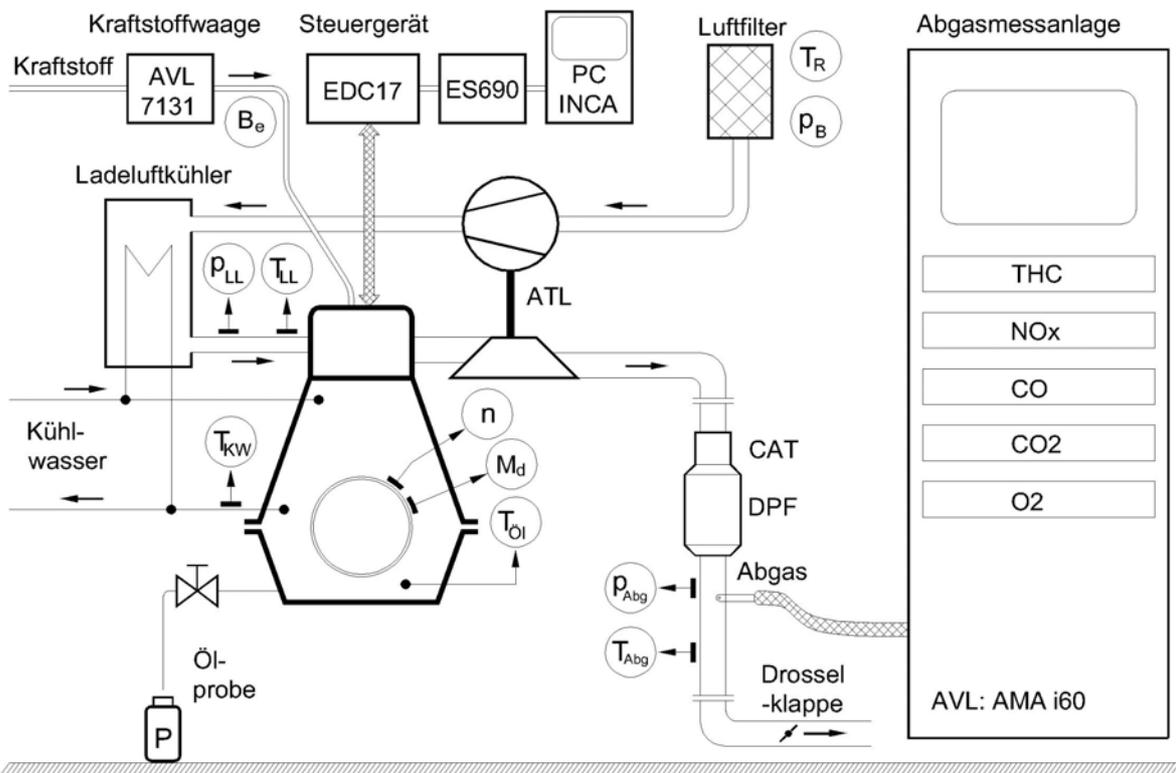


Bild 4-2: Motorprüfstand mit Abgasmachbehandlungsanlage und Messtechnik

Der Motor 2,0-I-TDI-CR-4V war über eine elastische Gelenkwelle mit der Schenck-Wirbelstrombremse W 230 verbunden. Das Starten des Motors erfolgte mit einem Drehstrom–Schleppmotor, der während des Anlassen mit der Bremseinrichtung verbunden war und den Motor auf eine Drehzahl von 1450 1/min beschleunigte.

Wichtige Motorparameter, wie z.B. Drehzahl, Drehmoment, Kühlwasser- und Öltemperatur sowie Ladelufttemperatur und Ladedruck nach dem wassergekühlten Ladeluftkühler, der Abgasgegendruck und die Abgastemperatur nach dem Partikelfilter, der stündliche Kraftstoffverbrauch und die Prüfraumtemperatur wurden über Messstellen erfasst, die mit dem Prüfstandsrechner verbunden waren.

Die Motorsteuerung erfolgte mit einem Applikationssteuergerät (Steuergerät EDC 17). Die Motordaten, die für die Untersuchungen von Bedeutung sind, wurden mit dem Schnittstellenmodul ES690 und der ETAS-Software INCA V5.4 ausgelesen und auf dem PC angezeigt.

Zur Bestimmung der gasförmigen Abgaskomponenten Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (CH), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) sowie Sauerstoff (O_2) wurde die Motorabgas-Analysenanlage der AVL AMA i60 eingesetzt. Das Abgas wurde über eine Mehrlochsonde, die nach dem Partikelfilter radial im Abgasstrang eingebaut war, entnommen und über einen beheizten Schlauch der Analysenanlage zugeführt.

Die Kraftstoffversorgung des Motors wurde über eine separate Pumpe, die den Kraftstoff aus einem 200 Liter-Fass in das Kraftstoffsystem des Prüfstands gepumpt hat, realisiert. Für die Messung des gravimetrischen Kraftstoffverbrauchs kam die AVL-Kraftstoffwaage 7131-03 zum Einsatz.

Die Motorkühlung und der wassergekühlte Ladeluftkühler waren an das externe Kühlsystem des Motorprüfstands angeschlossen. Der Motor wurde mit dem im Kühlkreislauf des Motors integrierten Thermostaten betrieben.

Der im Bild 4-2 dargestellte Dieselpartikelfilter mit vorgeschaltetem Oxi-Kat war motornah direkt am Ausgang des Abgasturboladers angeordnet. Zum Schutz der Unterdruckdose des Abgasturboladers vor unzulässig hohen Temperaturen musste wegen des auf dem Motorprüfstand fehlenden Fahrtwindes, der im Fahrzeug den Motorraum ausreichend kühlt, zusätzlich ein Lüfter eingesetzt werden, dessen Luftstrom auf die Abdichtung des Verstellgestänges an der Unterdruckdose gerichtet war (Bild 4-1).

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Projektetappen

Die im Projekt durchgeführten Prüfstandsversuche waren in 6 Etappen eingeteilt:

- Etappe 1

Ermittlung des Kraftstoffeintrags im Regenerationsmodus mit 6 und 7 Einspritzungen im Motorbetriebspunkt BP1 mit später Nacheinspritzung und dem Mischkraftstoff B7. Ziel war die Ermittlung des Eintrags von RME und DK über eine Dauer von 8 Betriebsstunden und dessen Einfluss auf die Motorölviskosität. Dieser Prüflauf wurde dreimal durchgeführt.

- Etappe 2

Wie Etappe 1, jedoch mit dem Mischkraftstoff B10.

- Etappe 3:

Wie Etappe 1, jedoch mit dem Mischkraftstoff B30

- Etappe 4

Ermittlung der Motorölviskosität im Regenerationsmodus mit 7 Einspritzungen im Motorbetriebspunkt BP1 bei Variation der späten Nacheinspritzung. Es wurden die Einspritzmenge der dritten Nacheinspritzung und der Einspritzbeginn der dritten und der vierten Nacheinspritzung bei Motorbetrieb mit dem Mischkraftstoff B30 variiert.

- Etappe 5

Beladung des Dieselpartikelfilters über jeweils 7 Stunden im Betriebspunkt BP2 ohne Nacheinspritzung und Regeneration im Betriebspunkt BP1 mit 6 und 7 Einspritzungen bei Motorbetrieb mit dem Mischkraftstoff B10 sowie Regeneration im Betriebspunkt BP1 mit 7 Einspritzungen und dem Mischkraftstoff B30. Ziel war die Ermittlung des Einflusses der gesplitteten späten Nacheinspritzung auf den Regenerationsablauf des Dieselpartikelfilters.

- Etappe 6:

Ermittlung des Kraftstoffeintrags in der Vorwärmstufe mit 5 Einspritzungen im Motorbetriebspunkt BP1 (ohne späte Nacheinspritzung) und den Mischkraftstoffen B10 und B30. Ziel war die Ermittlung des Eintrags von RME und DK über eine Dauer von 8 Betriebsstunden und dessen Einfluss auf die Motorölviskosität. Dieser Prüflauf wurde zweimal durchgeführt.

4.3.2 Versuchsablauf

Zeitlicher Ablauf:

Die Laufzeit des Projekts war für den Zeitraum vom August 2009 bis Ende April 2010 geplant. Der Projektbeginn wurde jedoch aufgrund der erforderlich gewordenen Bereitstellung eines neuen Motors incl. eines Applikationssteuergerätes um 4 Monate mit Bestätigung durch den Projektträger kostenneutral verschoben.

Die Prüfstandsversuche wurden im Dezember 2009 mit dem Einlauf des neuen Motors über 20 Betriebsstunden und der sich daran anschließenden Aufnahme der Volllastkurven mit Dieselmischkraftstoff in Tankstellenqualität nach EN 590 und mit dem Mischkraftstoff B30 begonnen.

Nach der im Dezember 2009 durch die Volkswagen AG Wolfsburg erfolgten Bereitstellung der für die Untersuchung erforderlichen Datensätze mit der serienmäßig verwendeten späten Nacheinspritzung und mit gesplitteter Nacheinspritzung wurden die Kraftstoffeintragsversuche im Regenerationsmodus mit dem Mischkraftstoff B7 im Januar 2010 begonnen.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Regenerationsdauer in den stationären Untersuchungen auf dem Motorprüfstand 8 Stunden betragen hat, um die Unterschiede im Kraftstoffeintrag deutlich zu machen. Die einzelne Regeneration des Filters im Fahrzeug ist dagegen deutlich kürzer. Außerdem erfolgt zwischen den einzelnen Regenerationen auch ein DK-Austrag, was hier nicht berücksichtigt werden konnte.

Der zeitliche Ablauf der im Jahr 2010 im Projekt durchgeführten Prüfstandsversuche ist in der **Tabelle 4-2** enthalten.

Tabelle 4-2: Übersicht der im Jahr 2010 im Projekt durchgeführten Prüfstandsversuche

Etappe	Versuch	Aufgabe	von/bis:	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
1	1 - 6	Regeneration 6 E und 7 E Kraftstoff: B7, 8 h/d	14.01.-27.01.	■					
1	1 - 3	6 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	19.01.-21.01.	■					
1	4 - 6	7 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	22.01.-26.01.	■					
2	1 - 6	Regeneration 6 E und 7 E Kraftstoff: B10, 8 h/d	28.01.-10.02.		■				
2	1 - 3	6 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	28.01.-01.02.		■				
2	4 - 6	7 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	02.02.-08.02.		■				
3	1 - 6	Regeneration 6 E und 7 E Kraftstoff: B30, 8 h/d	11.02.-12.03.		■	■			
3	1 - 3	6 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	15.02.-17.02.		■				
3W	1 - 3	6 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	09.03.-11.03.			■			
3	4 - 6	7 E - BP1: 2140 1/min; 30 Nm	18.02.-23.02.		■				
4	1 - 5	Variation späte NE Kraftstoff: B30 Regeneration 7 E	22.03.-08.04.			■			
5	1 - 3	Beladung DPF, 7 h/d Kraftstoff B7, B30 Regeneration 6 E, 7 E DPF wiegen	22.04.-30.04.				■		
5	1	6 E - B7	26.04.-27.04.				■		
5	2	7 E - B7	28.04.-30.04.				■		
5	3	7 E - B30	22.04.-23.04.				■		
6	1 - 4	Vorwärmstufe (frühe NE), 5 E 8 h/d, Kraftstoff: B10, B30	08.06.-18.06.						■
6	1 - 2	5 E - B10	10.06.-14.06.						■
6	3 - 4	5 E - B30	16.06.-17.06.						■

W: Wiederholung

E : Einspritzungen je Zyklus

Ölfüllung:

Die Motorölfüllung betrug außer in Etappe 4 für jeden Prüflauf 3600 cm³ Titan GT1 Longlife III 5W-30. Nur in der Etappe 4 wurde mit einer auf 2,2 Liter verringerten Ölfüllung gefahren, um in der auf nur 4 Stunden verkürzten Prüflaufzeit je Variante auswertbare Viskositätsunterschiede der zu bewertenden Varianten zu erhalten.

Entnahme der Ölproben

Zu Beginn und zum Ende eines jeden Prüflaufs wurden je eine Ölprobe aus der Motorölwanne entnommen. Hierfür war die Ölablassschraube in der Motorölwanne durch eine Hohlschraube ersetzt worden. Das Öl konnte somit durch ein Ringstück über den Ablasshahn in den Probenahmebehälter abgelassen werden. **Bild 4-4** zeigt die Ölabinahmeeeinrichtung.

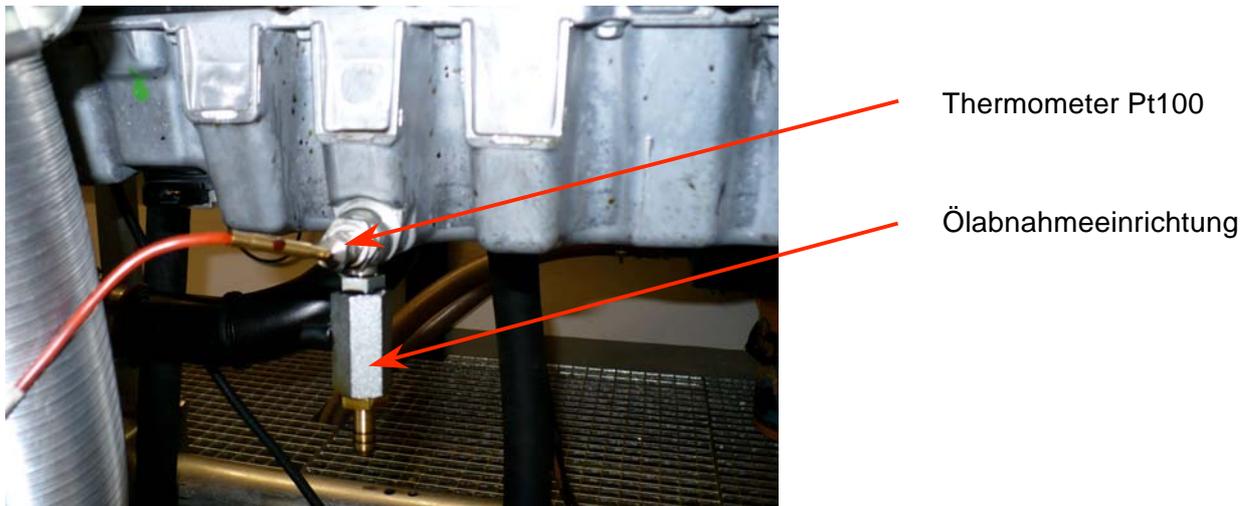


Bild 4-4: Ölprobenahme aus der Motorölwanne

Die Öltemperatur wurde in der Motorölwanne mit dem durch die Hohlschraube geführten Widerstandsthermometer Pt100 gemessen.

In allen Prüfläufen wurde der Motor während der Öl-Probenahme im Leerlauf betrieben. Die ersten 50 bis 100 cm³ des abgelassenen Öls wurden dem Motor unmittelbar nach der anschließenden Entnahme der zu analysierenden Ölprobe über den Öleinfüllstutzen wieder zugeführt. Damit wurde gewährleistet, dass für die Ölprobe kein abgestandenes Öl aus der Entnahmeeinrichtung verwendet wurde.

Die dem Motor dauerhaft entnommenen Ölprobenmengen wurden auf 50 cm³/Probe begrenzt, um die Motorölfüllung so wenig wie möglich zu verringern.

Ölwechsel

Nach jedem Prüflauf wurde das Motoröl bei betriebswarmem Motor abgelassen und der Motorölfilter gewechselt. Das Öl konnte über ca. 30 Minuten austropfen. Zum Spülen wurde der Motor danach dreimal mit 2,5 Litern frischem Öl befüllt und jeweils ca. 15 Minuten betrieben. Nach dem Spülbetrieb wurde das Motoröl abgelassen, wobei das Ölfiltergehäuse zur vollständigen Entleerung nach dem ersten und zweiten Spülen belüftet wurde. Da bei früheren Versuchen nach dem letzten Spülbetrieb keine Belüftung des Filtergehäuses erfolgte, wurde das Ölfiltergehäuse nach dem dritten Spülbetrieb ebenfalls nicht belüftet, um einen Vergleich der Ergebnisse zu den Prüfläufen des vorangegangenen Projekts [2] zu ermöglichen. Das Öl konnte nach dem letzten Spülen mindestens 12 Stunden aus dem Motor austropfen.

Anschließend wurde der Motor mit 3600 cm³ bzw. in der Etappe 4 mit nur 2200 cm³ Frischöl der Marke Titan GT1 Longlife III 5W-30 neu befüllt.

Ölanalysen

Die während der Prüfläufe aus dem Motor entnommenen 57 Ölproben wurden nach Abschluss eines jeden Laufs zur Analyse an die Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH geschickt. Dort erfolgte die gaschromatographische Analytik nach DIN 51380 zur quantitativen Bestimmung der RME- und DK-Anteile im Motoröl. Außerdem wurde die Viskositätsprüfung der Ölproben durchgeführt. Nachdem alle Proben eines Prüflaufs analysiert waren, wurden die Ergebnisse dem IMS übergeben.

Beladung und Regeneration des Dieselpartikelfilters

Zur Bestimmung der während der Beladung erfolgten Massezunahme des Dieselpartikelfilters sowie zum Nachweis der erfolgreichen Regeneration wurde der Filter unmittelbar vor und nach der Beladung sowie nach Abschluss der Regeneration gewogen (**Bild 4-5**).

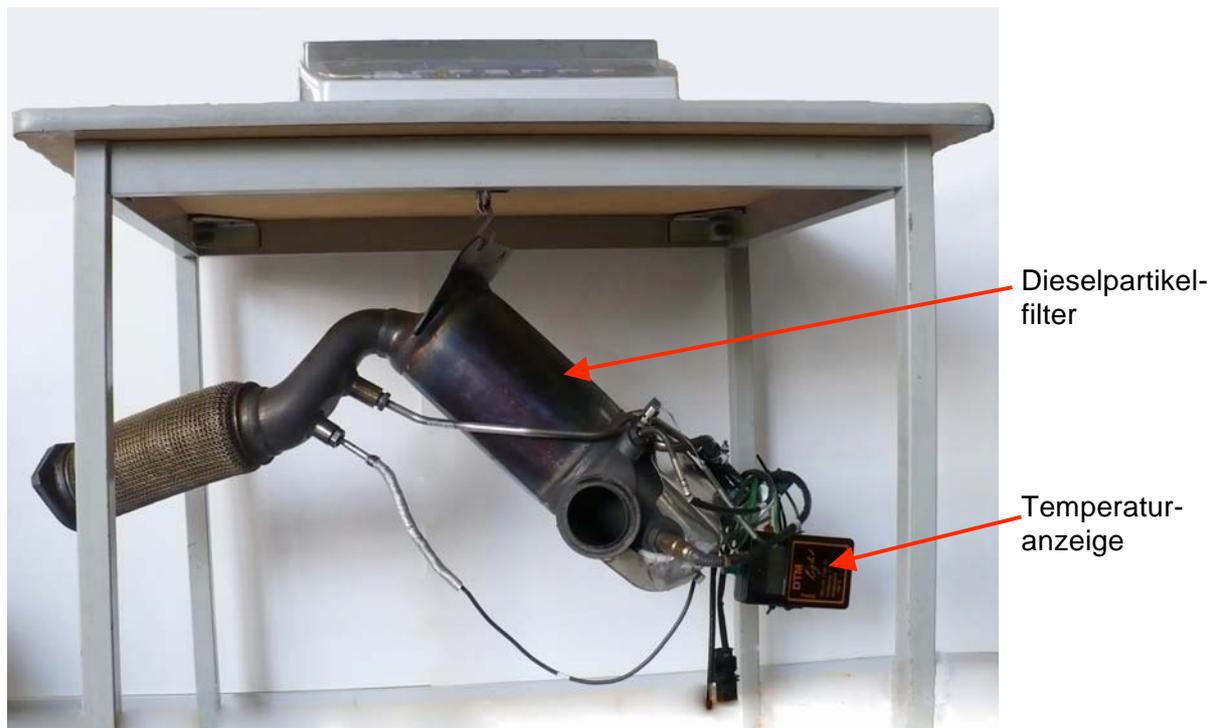


Bild 4-5: Wägung des Dieselpartikelfilters

Für die Wägung wurde der Filter stets mit dem im gleichen Gehäuse installierten, vorgeschaltetem Oxi-Kat und den eingebauten Temperatur- und Drucksensoren ausgebaut und frei hängend an der auf einem Tisch stehenden Wägevorrichtung befestigt. Der Filter wurde hierfür unmittelbar nach dem Abstellen des Motors ausgebaut und mit dem digitalen Temperaturmessgerät komplettiert. Die Wägung erfolgte erst bei stets gleicher Temperatur der Messstelle $T_{v_PF} = 140 \text{ °C}$.

4.3.3 Betriebspunkte des Motors

Die in den sechs Etappen vorgesehenen Betriebspunkte sowie die mit dem üblichen Tankstellen-DK und mit dem Kraftstoff B30 aufgenommenen Volllastkurven des Motors sind im **Bild 4-5** zu sehen.

Der Betriebspunkt BP1 lag mit $M_d = 30 \text{ Nm}$ ($p_{me} = 1,9 \text{ bar}$) bei $n = 2140 \text{ 1/min}$ in einem sehr niedrigen Belastungsbereich. In diesem Betriebspunkt wurden alle Versuche, die im Regenerations- und Vorwärmmodus vorgesehen waren, durchgeführt.

Im Betriebspunkt BP2 mit $M_d = 65 \text{ Nm}$ ($p_{me} = 4,2 \text{ bar}$) wurde der Motor nur während der Versuche zur Beladung des Partikelfilters betrieben. Dieser Betriebspunkt wurde gewählt, weil aufgrund der hohen Abgasrückführrate eine starke Filterbeladung zu erwarten war.

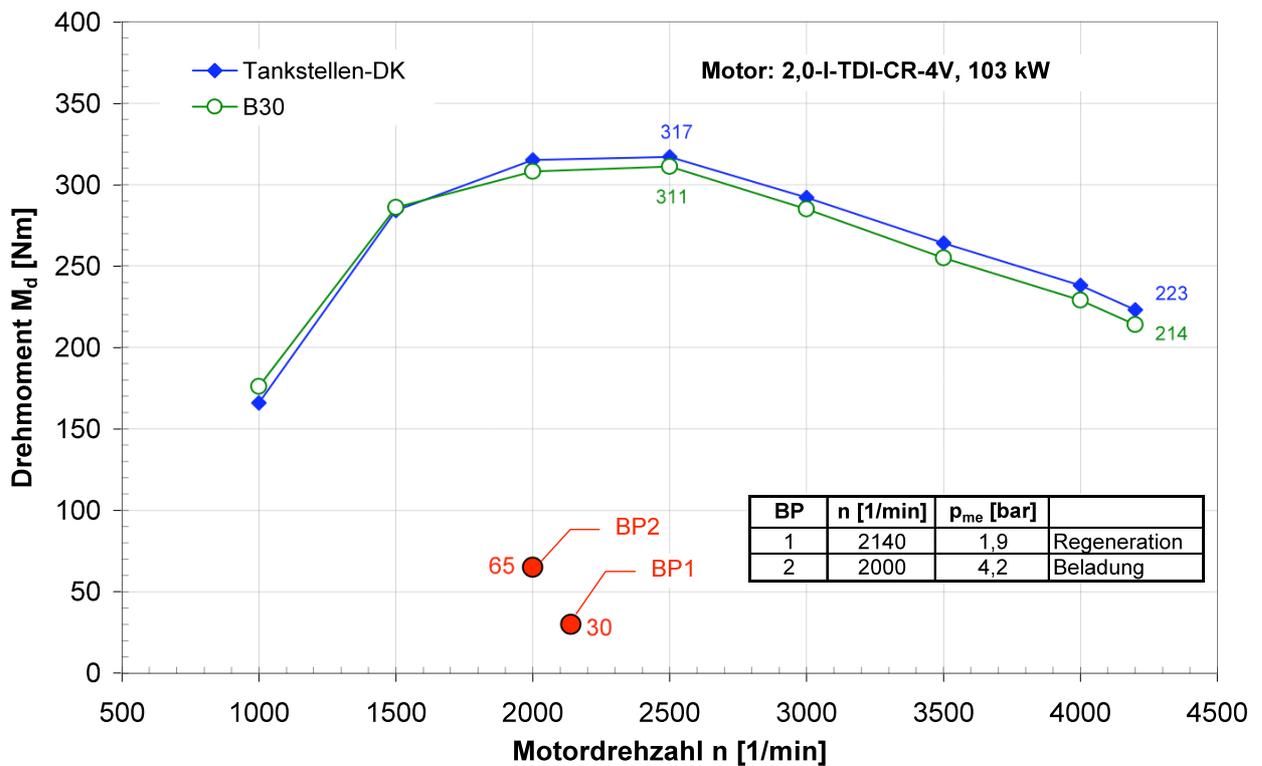


Bild 4-5: Betriebspunkte und Volllastkurve des Motors mit B10

Der Verlauf der Volllastkurven mit den beiden Kraftstoffen zeigt, dass die Volllastdrehmomente bei gleicher Einspritzmengenvorgabe, d. h. ohne Anpassung an den speziellen Kraftstoff mit dem Mischkraftstoff B30 geringfügig unter den mit Tankstellen-DK gemessenen Werten lagen. Der Unterschied wurde beim maximalen Drehmoment mit ca. 2 % und im Nennleistungspunkt mit ca. 4 % gemessen.

4.3.4 Betriebskennwerte des Motors

Die **Tabelle 4-3** enthält die während der stationären Prüfstandläufe aufgenommenen, gemittelten Betriebskennwerte des Motors für die verschiedenen Kraftstoffe im Regenerationsmodus bei 6 und 7 Einspritzungen, während der Partikelfilterbeladung mit 3 Einspritzungen und im Vorwärmmodus bei 5 Einspritzungen je Zyklus. Die Messwerte wurden vom Prüfstandsrechner erfasst und manuell protokolliert.

Die Versuche zum Kraftstoffeintrag im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen je Zyklus im Betriebspunkt BP1 wurden mit den Mischkraftstoffen B7, B10 und B30 gefahren. Die Variation der späten Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1 erfolgte mit dem Mischkraftstoffen B30. Die Beladungs- und Regenerationsversuche wurden mit den Mischkraftstoffen B7 und B30 und die Untersuchungen in der Vorwärmstufe (5 Einspritzungen je Zyklus) mit B10 und mit B30 durchgeführt.

Die gemessenen Motoröl-, Kühlwasser- und Abgastemperaturen hatten nur sehr geringe Streuungen und weisen damit auf einen stabilen Motorlauf hin.

In den Prüfläufen der Etappe 5 wird sichtbar, dass die späte Nacheinspritzung im BP1 die Abgastemperatur im Vergleich zur Beladung im Betriebspunkt BP2 um ca. 300 °C auf ca. 566 °C und damit auf das für die Filterregeneration erforderliche Niveau erhöht hat. Die Temperaturmessstelle war ca. 15 cm nach dem Partikelfilter in der Abgasleitung des Prüfstands installiert. Daher war dieser Temperaturwert niedriger als der vor dem Partikelfilter mit ca. 640 °C gemessene und dem Steuergerät gemeldete Temperaturwert.

Die Abgasgegendruckwerte wurden ca. 50 cm nach dem Partikelfilter und die Ladedruckwerte ca. 45 cm nach dem Ladeluftkühler ermittelt. Im Betriebspunkt 1 wurden im Vorwärm- und im Regenerationsmodus beim Ladedruck Absolutwerte von 1,59 bis 1,76 bar gemessen.

Die stündlichen Kraftstoffverbrauchswerte lagen im Regenerationsmodus bei $B_e = 4,9$ bis 5,2 kg/h.

Relativ große Schwankungen wiesen die Raildruckwerte p_{Rail} auf. In der Etappe 3 wurden in den 6 Prüfläufen mit dem Kraftstoff B30 im BP1 Werte von 514 bis 609 bar gemessen. Diese Werte wurden mit dem Schnittstellenmodul ES690 und der ETAS-Software INCA V5.4 ausgelesen und auf dem PC angezeigt. Unterschiedlich hohe Raildruckwerte können bei gleicher Einspritzdauer zu unterschiedlichen Einspritzmengen und damit vermutlich auch zu schwankenden Kraftstoffeinträgen in das Motoröl führen.

Deutliche Schwankungen von 555 bis 606 bar wiesen auch die in der Etappe 4 gemessenen Raildruckwerte auf. Die Ursachen für die Raildruckschwankungen konnten nicht analysiert werden.

Tabelle 4-3: Messwerte des Motors entsprechend Messstellenplan

Etappe	Versuch	Beschreibung	Kraftstoff	Anzahl Einspritzungen	n [1/min]	M_d [Nm]	T_{Öl} [°C]	T_{KW} [°C]	T_{Abg} [°C]	p_{Abg} [mbar]	T_R [°C]	T_{LL} [°C]	p_{LL} [bar]	p_{Rail} [bar]
1	1 - 3	Regeneration	B7	6	2140	30	106	97	560	38	29	38	1,63	n. g.
	4 - 6	Regeneration		7			106	97	561		28	39	1,75	n. g.
2	1 - 3	Regeneration	B10	6	2140	30	105	97	559	38	26	37	1,60	n. g.
	4 - 6	Regeneration		7			106	97	560		26	38	1,74	n. g.
3	1 - 3	Regeneration	B30	6	2140	30	104	97	557	38	28	30	1,59	514 – 533
	4 - 6	Regeneration		7			106	97	563		26	40	1,73	603 – 609
4	1 - 5	Variation der späten NE	B30	7	2140	30	105	97	568	41	27	33	1,72	555-606
5	1 - 2	DPF-Beladung	B7	3	2000	65	102	94	268	25	27	30	1,20	n. g.
		Regeneration		6 / 7	2140	30	105	97	567	55	26	38	1,76	n. g.
	3	DPF-Beladung	B30	3	2000	65	102	94	260	25	27	28	1,20	n. g.
		Regeneration		7	2140	30	105	97	566	42	27	34	1,76	n. g.
6	1 - 2	Vorwärmung	B10	5	2140	30	106	97	485	34	29	37	1,70	558 – 592
	3 - 4	Vorwärmung	B30	5	2140	30	106	98	484	38	27	37	1,74	585 – 589

4.3.5 Einspritzablauf

Da für die Untersuchungen ein Applikationssteuergerät zur Verfügung stand, konnten die im **Bild 4-6** enthaltenen Betriebszustände und Daten auf dem PC ständig beobachtet und ausgelesen werden. Das Bild zeigt Momentaufnahmen der Einspritzmengen und der Abgastemperaturen vor ATL, vor und nach DPF im Betriebspunkt BP1 in vier verschiedenen Betriebsarten bzw. Einspritzstrategien des Motors.

	Anzahl der Einspritzungen					
	3	5	6	7		
InjCrv_qPil2Des_mp	0.9	1.2	1.2	1.2	[mg/hub]	← Voreinspritzung
InjCrv_qPil1Des_mp	1.0	1.4	1.4	1.4	[mg/hub]	← Voreinspritzung
InjCrv_qMI1Des	6.0	4.0	4.0	3.6	[mg/hub]	← Haupteinspritzung
InjCrv_qPol3Des_mp	0.0	1.0	1.0	1.0	[mg/hub]	← 1. Nacheinspritzung
InjCrv_qPol2Des_mp	0.0	11.1	10.7	10.3	[mg/hub]	← 2. Nacheinspritzung
InjCrv_qPil3Des_mp	0.0	0.0	0.0	2.0	[mg/hub]	← 3. Nacheinspritzung
InjCrv_qPol1Des_mp	0.0	0.0	2.7	0.8	[mg/hub]	← 4. Nacheinspritzung
Exh_tAdapTTrbnUs	283	686	684	695	[deg C]	← Abgastemperatur vor ATL
Exh_tAdapTPFltUs	253	562	640	644	[deg C]	← Abgastemperatur vor DPF
Exh_tAdapTPFltDs	237	509	590	590	[deg C]	← Abgastemperatur nach DPF

ohne Regeneration Vorwärmstufe Regeneration Regeneration

Bild 4-6: Motordaten des Applikationssteuergeräts im Betriebspunkt BP1 bei unterschiedlichen Betriebsarten

Im Normalbetrieb lief der Motor mit 3 Einspritzungen je Arbeitsspiel. Zur Vorbereitung einer erforderlichen Regeneration des Partikelfilters wird der Motor bei Bedarf zwecks Erhöhung der Abgastemperatur in der Vorwärmstufe mit 5 Einspritzungen je Zyklus, d. h. mit 2 zusätzlichen frühen Nacheinspritzungen (1. und 2. Nacheinspritzung) nahe der Haupteinspritzung betrieben. Im Regenerationsmodus wurde der Motor in der aktuellen Serienausführung mit 6 Einspritzungen je Zyklus gefahren, d.h. neben zwei Voreinspritzungen und der Haupteinspritzung erfolgten zwei frühe und eine späte Nacheinspritzung (3. Nacheinspritzung). Durch Splittung dieser 3. Nacheinspritzung in zwei Teileinspritzmengen (3. und 4. Nacheinspritzung) konnte der Motor für Versuchszwecke mit 7 Einspritzungen je Zyklus betrieben werden. Die einzelnen Einspritzmengen wiesen Schwankungen auf, so dass für die weiteren Auswertungen Mittelwerte verwendet wurden.

Zusätzlich erfolgt in der Serienapplikation „neu“, neben der vorhandenen späten Nacheinspritzung eine weitere Einspritzung, die im Bild 4-7 als 3. NE gekennzeichnet ist. Diese 3. Nacheinspritzung wurde etwa gegen Ende des Arbeitstaktes wenige Grad KW vor dem unteren Totpunkt des Kolbens ausgelöst.

Die Einspritzzeitpunkte der 3. und der 4. Nacheinspritzung und die Einspritzmenge der 3. Nacheinspritzung waren von der VW AG zur Variation innerhalb der Optimierungsuntersuchungen frei gegeben worden. Alle anderen Label, so z. B. die Einspritzmenge der 4. Nacheinspritzung, konnten manuell nicht verstellt werden. Zur Sicherstellung der für die Regeneration des Partikelfilters hohen Abgastemperatur, die in dieser Applikation mit ca. 640 °C vorgegeben war, wurden die 2. und die 4. Nacheinspritzmenge automatisch ohne Zugriff von außen angepasst.

Die exakten Werte der Einspritzwinkel und Einspritzmengen können in diesem Bericht aus Geheimhaltungsgründen nicht angegeben werden.

5 Vertrauensbereich für die Mittelwerte

Der Vertrauensbereich, der für die Mittelwerte in den nachfolgenden Ergebnisdiagrammen dargestellt ist, ist der Bereich, in dem der wahre Mittelwert einer Grundgesamtheit mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit liegt. Er ist in den nachfolgenden Diagrammen als Fehlerbalken über dem aus den Stichproben berechneten Mittelwert eingetragen. Für das Vertrauensniveau P, auch als Aussagewahrscheinlichkeit bezeichnet, wurde der in der Technik übliche Wert von 95 % gewählt.

Das um den berechneten Mittelwert als Fehlerbalken dargestellte Vertrauensintervall v , in dem sich der wahre Mittelwert befindet, wurde nach folgender Formel berechnet:

$$v = \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}}$$

t: Student-Faktor für P = 95 %

s: Standardabweichung der Stichprobe

n: Anzahl der Messwerte in der Stichprobe

Bei einer Überschneidung der Vertrauensintervalle der zu vergleichenden Mittelwerte kann nicht von signifikanten Mittelwertdifferenzen ausgegangen werden.

6 Ergebnisse der Untersuchung

6.1 Ergebnisse im Regenerationsmodus

6.1.1 Kraftstoffaufprall auf die Zylinderwände

Um aktive Regenerationsbedingungen am DPF-Einlass zu schaffen, kamen bei dem untersuchten VW-Motor im Regenerationsmodus Nacheinspritzstrategien mit bis zu vier Nacheinspritzungen pro Zyklus zum Einsatz, die hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Kraftstoffeintrag in das Motoröl sowie die kinematische Ölviskosität untersucht wurden.

Es ist bekannt, dass Nacheinspritzungen während der Regeneration in hohem Maße zur Ölverdünnung beitragen. Insbesondere bei der spät erfolgenden Einspritzung, bei der der Kolben weit vom Zylinderkopf entfernt ist, kommt es bei der hohen Kraftstoffstrahldurchdringung zum Aufprallen des Kraftstoffs auf die Zylinderwände [4]. Aber auch die frühe, an die Haupteinspritzung angelagerte Nacheinspritzung kann zur Ölverdünnung beitragen, wenn der Einspritzbeginn zu einem Zeitpunkt erfolgt, wo der Kolben bereits soweit vom oberen Totpunkt entfernt ist, dass die Kraftstoffstrahlen nicht mehr auf den Kolben treffen und Teilmengen der Kraftstoffstrahlen die Zylinderwand erreichen.

Das **Bild 6-1** zeigt, dass bei dem vorliegenden Motor die Kraftstoffstrahlachsen bei Kurbelwinkeln über ca. 30° nach ZOT nicht mehr auf den Kolben sondern auf die Zylinderwand treffen.

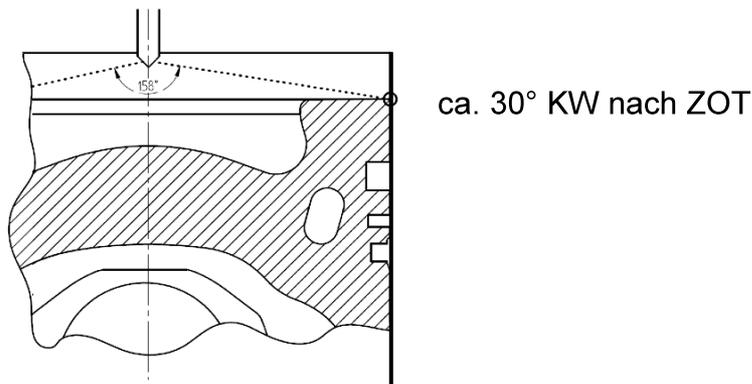


Bild 6-1: Kurbelwinkellimit zur Vermeidung des Strahlaufpralls auf die Zylinderwand

Die im Zyklus später erfolgenden Einspritzungen, die also über das Limit von ca. 30 °KW nach ZOT hinausgehen, können zur Ölverdünnung beitragen. Bei diesem Motor fanden auch die an die Haupteinspritzung angelagerten frühen Nacheinspritzungen später statt (> 30 °KW nach ZOT).

Eine Möglichkeit zur Verringerung der Ölverdünnung besteht in der Verminderung des Strahlimpulses, was durch Aufteilen der naheingespritzten Menge in zwei Teile erreicht werden kann. In [4] wird die Verringerung der Ölverdünnung durch Splittung der Nacheinspritzung anhand von zwei Hauptphänomenen wie folgt erklärt:

- Durch Reduzierung der Einspritzmengen bei den zwei Einspritzungen ergeben sich kürzere Einspritzzeiten und damit ein reduzierter Strahlimpuls. Der Kraftstoffaufprall auf die Zylinderwand wird vermindert und die Ölverdünnung reduziert.
- Der „Sitzdrossel-Effekt“ entsteht durch die geteilte späte Nacheinspritzung zweimal statt einmal. Der Sitzdrossel-Effekt während des Öffnens und Schließens der Düse führt zu einem niedrigeren mittleren Einspritzdruck und damit zu einer Reduzierung des Strahlimpulses und der Durchdringung und somit zur Verringerung der Ölverdünnung.

6.1.2 Optimierung der gesplitteten späten Nacheinspritzung

Das Ziel der Optimierung der gesplitteten späten Nacheinspritzung bestand darin, im Regenerationsmodus einen Einspritzablauf mit dem geringsten Kraftstoffeintrag in das Motoröl zu realisieren, wobei die Regenerationseffizienz wie mit der Serienapplikation „neu“ (6 Einspritzungen je Zyklus) beibehalten werden sollte.

Die Versuche wurden mit der im Bild 4-7 dargestellten und von der VW AG bereitgestellten Versuchsapplikation mit insgesamt 7 Einspritzungen je Zyklus durchgeführt. In dieser Applikation des Steuergerätedatensatzes waren zwei frühe, an die Haupteinspritzung angelagerte (1. und 2. NE) und zwei späte Nacheinspritzungen (3. und 4. NE) enthalten.

Der Datensatz entspricht im Anlieferungszustand der im **Bild 6-2** unten eingetragenen Variante V5. In diesem Bild sind die untersuchten 5 Einstellungen des Einspritzbeginns der 3. und der 4. Nacheinspritzung sowie der Einspritzmenge der 3. Nacheinspritzung für den Betriebspunkt BP1 prinzipiell dargestellt. Die exakten Werte der Einspritzwinkel und Einspritzmengen unterliegen der Vertraulichkeit.

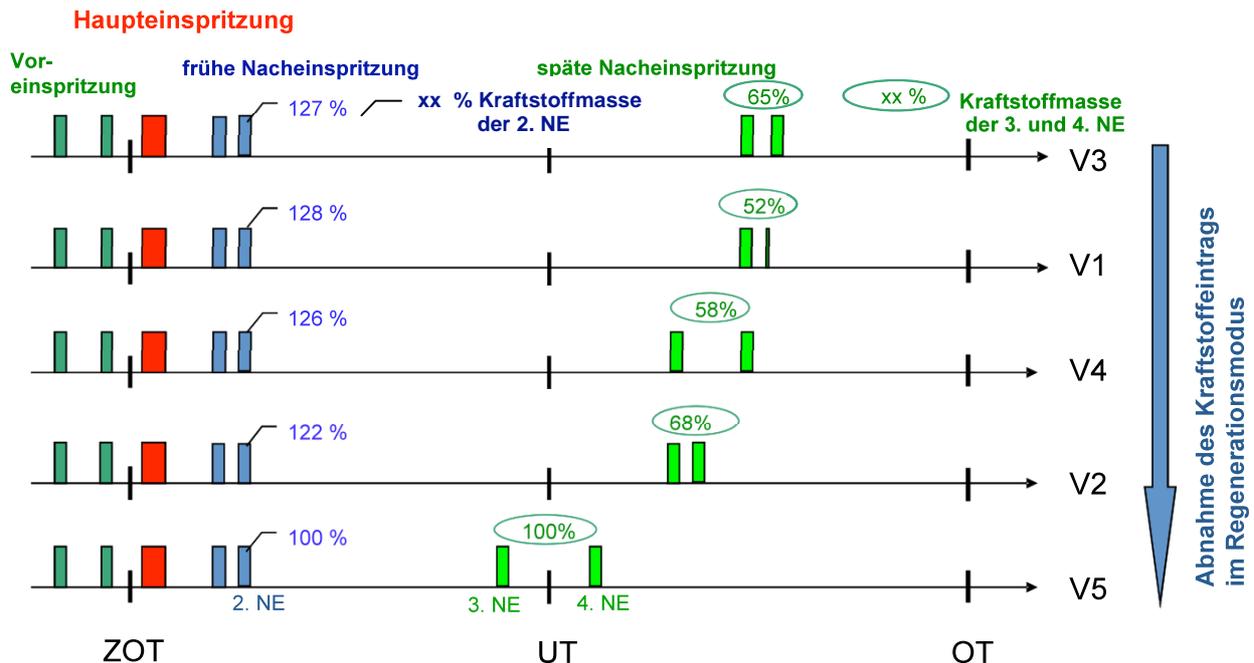


Bild 6-2: Variation der späten Nacheinspritzung

Zur Bewertung der Größe des Kraftstoffeintrags wurde nach den Prüfläufen mit 5 unterschiedlichen Einspritzabläufen die kinematische Viskosität der Motorölproben ermittelt.

Die Summe der in der Variante V5 gewählten Kraftstoffmassen der gesplitteten späten Nacheinspritzung, d. h. der 3. und 4. Nacheinspritzung wurden mit 100 % festgelegt. Die Kraftstoffmassen in den Varianten V2, V4, V1 und V3 waren erheblich geringer als in der Variante V5. Dabei wurden neben den Kraftstoffmassen auch die Einspritzzeitpunkte verändert.

Die Kraftstoffmasse der 2. frühen Nacheinspritzung wurde in der Variante V5 je Zyklus ebenfalls mit 100 % festgelegt. Bei den Varianten V2, V4, V1 und V3 wurde eine deutlich höhere Kraftstoffmasse der 2. Nacheinspritzung je Zyklus von 122 bis 128 % ermittelt. Die 1. Nacheinspritzung war hingegen bei allen Varianten unverändert.

Die Veränderungen der Nacheinspritzung hinsichtlich der Kraftstoffeinspritzmengen und der Einspritzzeitpunkte ergaben, dass der Kraftstoffeintrag in das Motoröl bei der Variante V3 am stärksten war. Er wurde in den Varianten V1, V4, V2 bis V5 geringer, was auch anhand der zunehmenden Viskositätswerte der Varianten V3 bis V5 festgestellt wurde.

Das **Bild 6-3** zeigt die Ergebnisse der Ölviskositätsmessung der fünf untersuchten Varianten der gesplitteten späten Nacheinspritzung für die Öltemperatur von 40 °C. Mit jeder Variante wurde ein Prüflauf im Betriebspunkt BP1 über 4 Stunden im Regenerationsmodus gefahren. Der Motor hatte bei diesen Versuchen eine verringerte Ölfüllung von nur 2,2 Litern, um trotz kürzerer Prüflaufzeit hinreichend hohe Ölverdünnungen für die Messung der kinematischen Viskosität der verschiedenen Varianten zu gewährleisten. Mit jeder der nach 4 Stunden entnommenen Ölproben erfolgten 5 Viskositätsmessungen.

Die Mittelwerte dieser Messungen und einer Frischölprobe aus dem Motor machen im Bild 6-3 deutlich, dass die Ölviskosität bereits nach 4 Stunden im Regenerationsmodus nahezu auf die Hälfte des Frischölwertes gesunken ist.

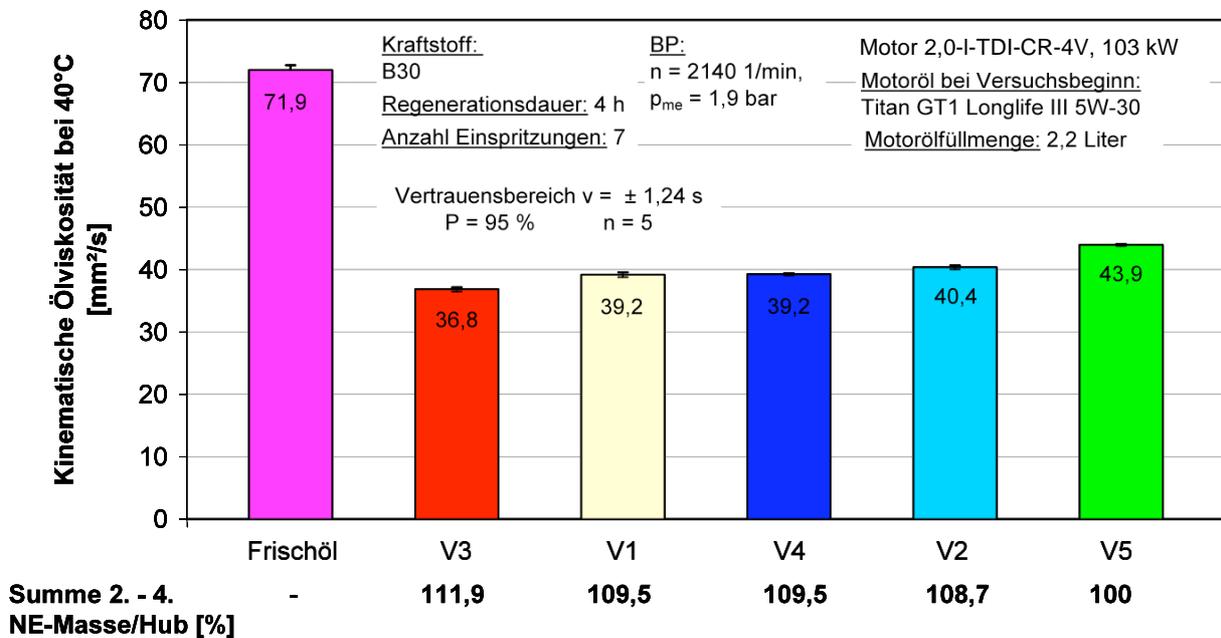


Bild 6-3: Kinematische Ölviskosität bei Variation der gesplitteten späten Nacheinspritzung

Betrachtet man die Viskositätswerte der Varianten, die von V3 zu V5 hin zunehmen und die Summe der in der 2., 3. und 4. Nacheinspritzung aus dem Steuergerät ausgelesenen Kraftstoffmassen (Kraftstoffmasse der 1. NE konstant), dann fällt auf, dass die kinematische Ölviskosität mit abnehmender Kraftstoffmasse der frühen und späten Nacheinspritzung ansteigt, d. h., dass der Kraftstoffeintrag sinkt.

Die Feststellung, dass der Kraftstoffeintrag in das Motoröl trotz Verringerung der Kraftstoffmasse der 3. und 4. Nacheinspritzung und der sich daraus in der 2. Nacheinspritzung ergebenden Erhöhung der früh eingespritzten Kraftstoffmasse in den untersuchten Varianten V2, V4, V1 und V3 zugenommen hat, lässt darauf schließen, dass auch die an die Haupteinspritzung angelagerten frühen Nacheinspritzungen einen nicht unerheblichen Anteil an der Ölverdünnung haben muss. Die Bestätigung hierfür wird im Punkt 6.2 erbracht.

Alle weiteren beschriebenen Versuche mit 7 Einspritzungen je Zyklus, d. h. die Versuche mit gesplitteter später Nacheinspritzung wurden mit der Variante V5 durchgeführt, da diese den geringsten Kraftstoffeintrag ergeben hatte.

6.1.3 Kraftstoffeintrag in das Motoröl

6.1.3.1 Kraftstoffeintrag bei 6 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „neu“)

Die stationären Prüfläufe im Regenerationsmodus wurden im Betriebspunkt BP1 mit jedem Mischkraftstoff dreimal gefahren. Die Prüflaufzeit betrug jeweils 8 Stunden. Nach dem Motorstart und einer kurzen Erwärmungsphase wurde der Motor über 8 Stunden im Regenerationsmodus betrieben. Die Ölprobenahme erfolgt bei 0 und nach 8 Stunden. Bei den Probenahmen wurde der Motor im Leerlauf betrieben.

Die Ergebnisse der aus den Ölproben gaschromatographisch ermittelten Kraftstoffkonzentrationen der Prüfläufe mit 6 Einspritzungen je Zyklus sind im **Bild 6-4** zu sehen.

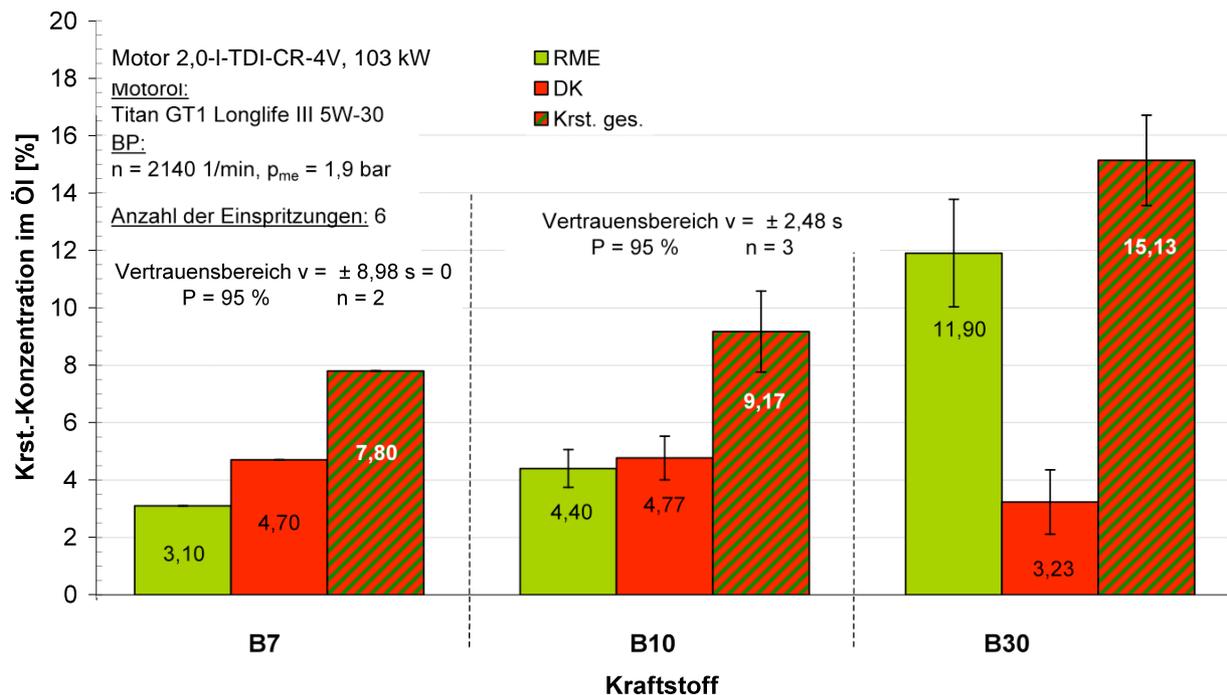


Bild 6-4: Konzentration von RME, DK und Kraftstoff gesamt im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb im Regenerationsmodus mit 6 Einspritzungen je Zyklus im BP1 mit B7, B10 und B30

Das Bild macht deutlich, dass der Kraftstoffeintrag in das Motoröl bei der Erhöhung des Biodieselanteils im Mischkraftstoff von B7 zu B10 und B30 signifikant zunimmt. Während bei dem stationären Motorbetrieb im Regenerationsmodus über 8 Stunden mit B7 die Konzentration des Kraftstoffs gesamt, der sich aus dem RME- und dem DK-Anteil zusammensetzt, im Motoröl 7,8 % betrug, stieg sie bei Betrieb mit B10 auf 9,17 % und mit B30 auf 15,13 % an. Bei Betrieb mit B30 ist der Eintrag vom Kraftstoff gesamt somit um 94 % höher als mit B7. Dabei entstand diese Konzentrationszunahme durch die im Öl festgestellten Erhöhungen der RME-Konzentrationen. Diese stiegen von 3,10 % bei Betrieb mit B7 auf 4,40 % mit B10 und 11,90 % mit B30 an. D. h., dass der RME-Eintrag bei Betrieb mit B30 um 284 % höher als bei Betrieb mit B7 war. Die DK-Konzentration von 4,70% mit B7 und 4,77 % mit B10 ließ keine signifikanten Unterschiede erkennen.

Die geringere DK-Konzentration im Motoröl von nur 3,23 % bei Betrieb mit B30 ist auf den erheblich geringeren DK-Anteil des Mischkraftstoffs B30 im Vergleich zu B7 und B10 zurück zu führen.

6.1.3.2 Kraftstoffeintrag bei 7 Einspritzungen je Zyklus (gesplittete späte Nacheinspritzung)

Im **Bild 6-5** sind die Ergebnisse von jeweils 3 Prüfläufen im Regenerationsmodus mit 7 Einspritzungen je Zyklus, d. h. mit gesplitteter später Nacheinspritzung (Variante V5) im Betriebspunkt BP1 bei Betrieb mit B7, B10 und B30 dargestellt.

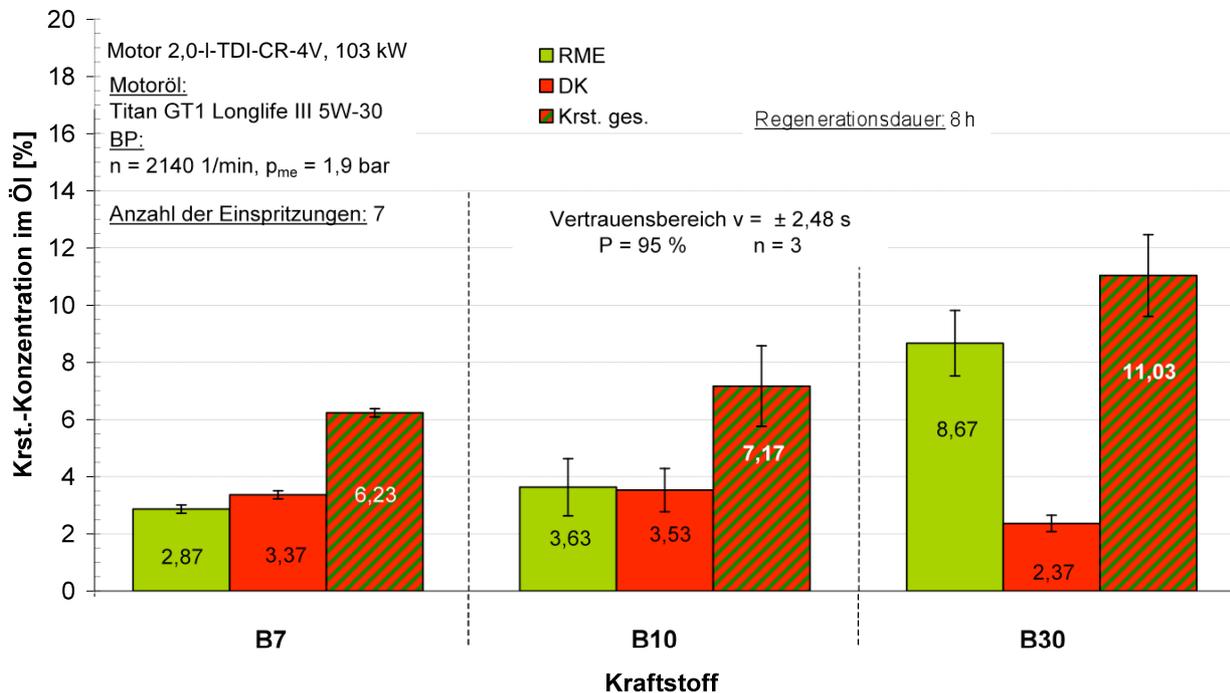


Bild 6-5: Konzentration von RME, DK und Kraftstoff gesamt im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb im Regenerationsmodus mit 7 Einspritzungen je Zyklus im BP1 mit B7, B10 und B30

Prinzipiell ergab sich im Regenerationsmodus mit 7 Einspritzungen je Zyklus ein ähnliches Bild wie mit 6 Einspritzungen. Allerdings war das Niveau der gaschromatographisch ermittelten Kraftstoffkonzentrationen im Motoröl deutlich niedriger. Auch hier ist festzustellen, dass mit zunehmendem RME-Anteil im Mischkraftstoff der RME-Eintrag in das Motoröl zunahm. Mit B7 betrug die RME-Konzentration im Durchschnitt von jeweils drei Prüfläufen pro Mischkraftstoff nach der Prüflaufdauer von 8 Stunden nur 2,87 %, mit B10 schon 3,63 % und 8,67% mit B30. D. h., dass der RME-Eintrag mit B30 um 202 % höher als mit B7 war. Die DK-Konzentration mit B7 von 3,37 % wies keinen signifikant unterschiedlichen Wert zum Betrieb des Motors mit B10 auf, bei dem die DK-Konzentration 3,53 % ergab. Die geringere DK-Konzentration im Motoröl von nur 2,37 % bei Betrieb mit B30 ist wiederum auf den erheblich geringeren DK-Anteil im Mischkraftstoff B30 im Vergleich zu B7 und B10 zurück zu führen.

Die Erhöhung des Konzentrationswertes des Kraftstoffs gesamt von 6,23% mit B7 über 7,17 % mit B10 bis auf 11,03% mit B30 ist – wie auch im Regenerationsmodus mit 6 Einspritzungen je Zyklus - mit der Zunahme des RME-Eintrags durch den höheren RME-Anteil im Mischkraftstoff zu erklären. Die Konzentration vom Kraftstoff gesamt ist folglich mit B30 um 77 % höher als mit B7.

6.1.4 Kraftstoffeintrag in das Motoröl bei Betrieb mit B10 in Abhängigkeit von der Einspritzstrategie

Im **Bild 6-6** sind die Kraftstoffkonzentrationswerte bei Motorbetrieb mit 6 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „neu“) und 7 Einspritzungen je Zyklus (gesplittete späte Nacheinspritzung Variante V5) für RME, DK und Kraftstoff gesamt bei Motorbetrieb mit B10 im BP1 enthalten. Außerdem sind die Ergebnisse aus dem zurückliegenden FNR/UFOP-Projekt [2] mit 5 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „alt“) für den Mischkraftstoff B10 den Ergebnissen dieses Projekts gegenüber gestellt. Dabei ist zu bemerken, dass diese Ergebnisse des vorangegangenen Projekts mit einem anderen, jedoch baugleichen Dieselmotor der VW AG ermittelt wurden.

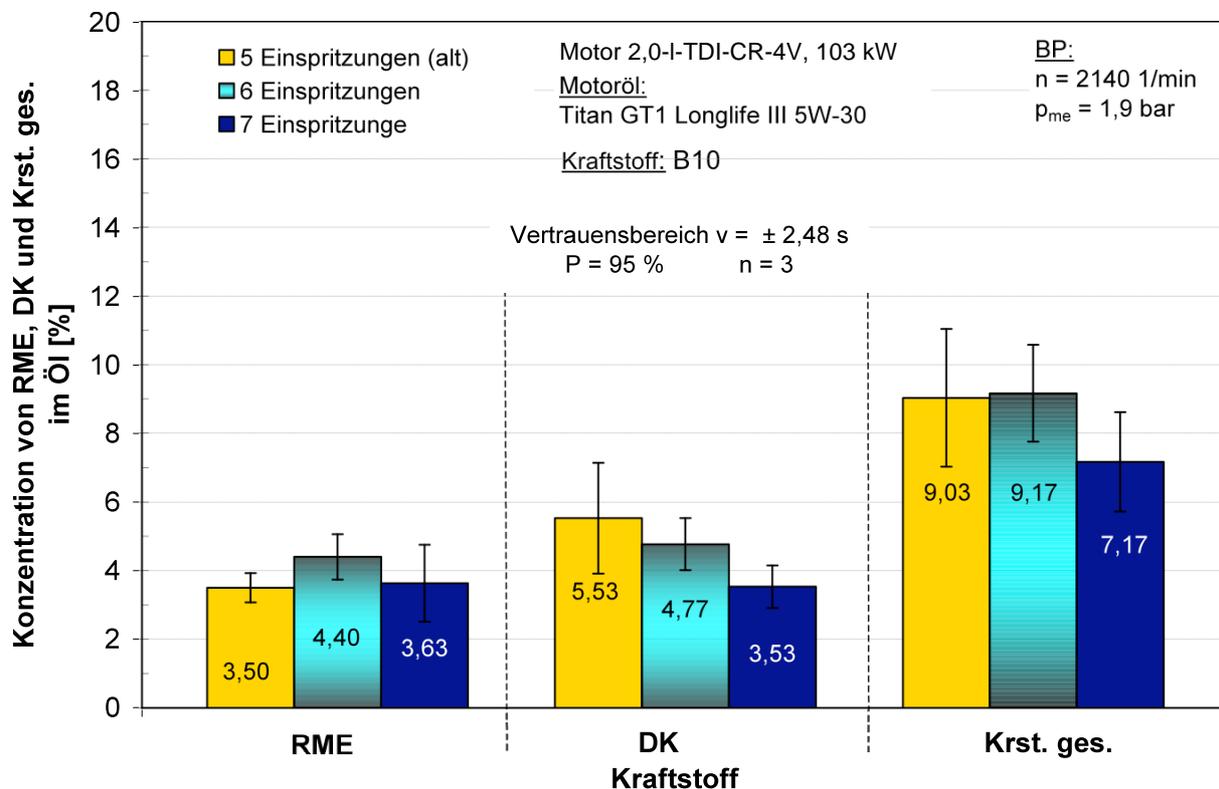


Bild 6-6: Konzentration von RME, DK und Krst. ges. im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb im Regenerationsmodus mit 5, 6 und 7 Einspritzungen je Zyklus im BP1 mit B10

Die Konzentrationswerte der Serienapplikation „alt“ mit 5 Einspritzungen und der Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus wiesen keine signifikanten Unterschiede auf. Tendenziell war die RME-Konzentration bei der Serienapplikation „neu“ mit 4,40 % im Vergleich zur Serienapplikation „alt“ mit 3,5 % etwas höher. Bei der DK-Konzentration war es umgekehrt. Hier wurde bei der Serienapplikation „alt“ mit 5,53 % gegenüber der Serienapplikation „neu“ mit nur 4,77 % tendenziell ein höherer DK-Konzentrationswert ermittelt. Die Konzentrationen vom Kraftstoff gesamt waren mit 9,03 % und 9,17 % nahezu gleich.

Bei Betrieb des Motors mit B10 wurde die RME-Konzentration mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung im Vergleich zur Serienapplikation „neu“ von 4,40 % auf 3,63 % und die DK-Konzentration von 4,77 % auf 3,53 % verringert, so dass sich mit 7,17 % der niedrigste Konzentrationswert des Kraftstoffs gesamt ergab.

6.1.5 Abfall der Motorölviskosität in Abhängigkeit von der Einspritzstrategie

Im Bild 6-7 werden die Mittelwerte des Viskositätsabfalls im Regenerationsmodus nach Prüflaufzeiten des Motors von jeweils 8 Stunden mit den Kraftstoffen B7, B10 und B30 mit 6 Einspritzungen (Serienapplikation „neu“) und 7 Einspritzungen je Zyklus (gesplittete späte Nacheinspritzung Variante V5) gezeigt. Zusätzlich ist bei B10 der im vorangegangenen FNR/UFOP-Projekt [2] mit 5 Einspritzungen (alt) gekennzeichnete Viskositätsabfall eingetragen, der bei Betrieb des Motors mit der Serienapplikation „alt“ gemessen wurde.

Die Viskositätsmessungen wurden bei einer Öltemperatur von 100 °C durchgeführt..

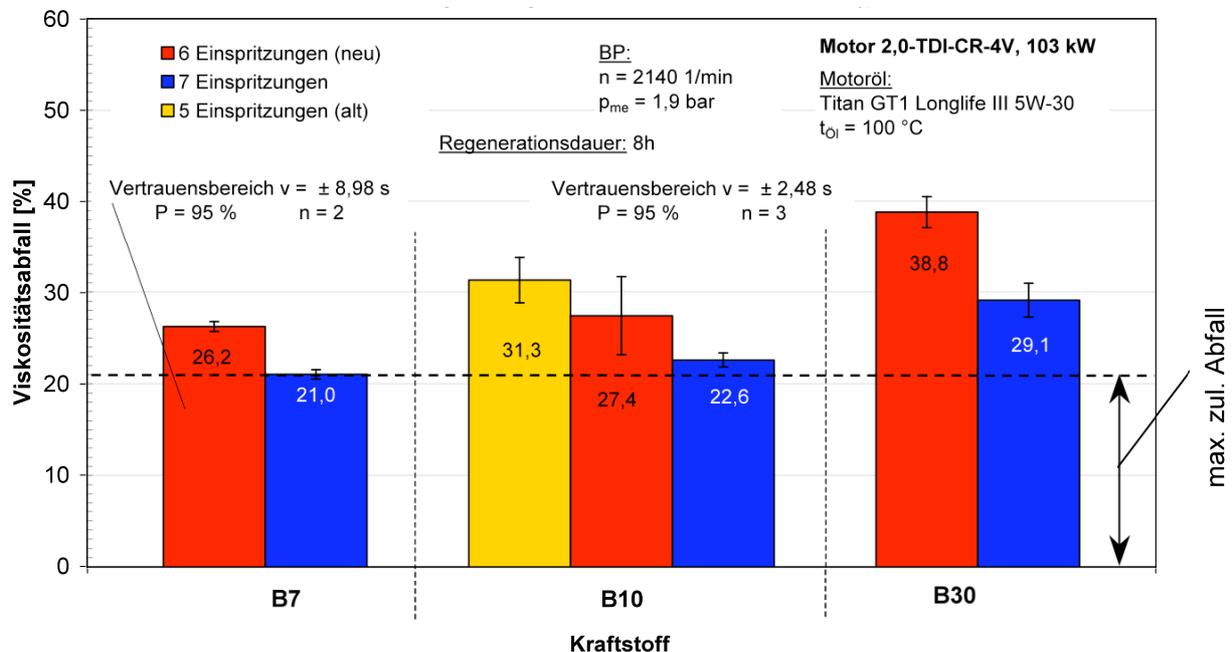


Bild 6-7: Abfall der Ölviskosität bei 100 °C im Regenerationsmodus über 8 Stunden bei Motorbetrieb mit 5, 6 und 7 Einspritzungen (Variante V5) mit den Kraftstoffen B7, B10 und B30

Der für ein SAE 30-Öl bei der Öltemperatur von 100 °C zulässige obere Viskositätsgrenzwert beträgt 12,45 mm²/s. Der untere Grenzwert wird mit 9,3 mm²/s angegeben. Die Viskosität der vor dem Prüflaufbeginn aus dem Motor entnommenen Ölproben lag im Durchschnitt bei 11,75 mm²/s und somit im zulässigen Bereich. Ausgehend von diesem Wert wird die untere zulässige Viskositätsgrenze bei einem Abfall der Viskosität um ca. 21 % erreicht. Dieser Wert wurde mit Ausnahme der mit B7 und mit gesplitteter später Nacheinspritzung durchgeführten Prüfläufe in allen Prüfläufen überschritten.

Sowohl mit 6 als auch mit 7 Einspritzungen je Zyklus nahm der Viskositätsabfall mit zunehmendem RME-Anteil im Mischkraftstoff höhere Werte an. Dabei lagen die mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung ermittelten Werte unter den mit der Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus gemessenen Werten. Bei B30 ist diese Differenz signifikant.

Der mit der Serienapplikation „alt“ mit 5 Einspritzungen im vorangegangenen Projekt [2] ermittelte Viskositätsabfall mit dem Kraftstoff B10 war tendenziell, jedoch nicht signifikant größer als mit der Serienapplikation „neu“.

6.1.6 Verbesserungen durch Splittung der späten Nacheinspritzung im Vergleich zur Serienapplikation „neu“

6.1.6.1 Verringerung des Kraftstoffeintrags

Das **Bild 6-8** zeigt die prozentuale Verringerung des Kraftstoffeintrags in das Motoröl durch Splittung der späten Nacheinspritzung (Variante V5) bezogen auf die Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus (100 %).

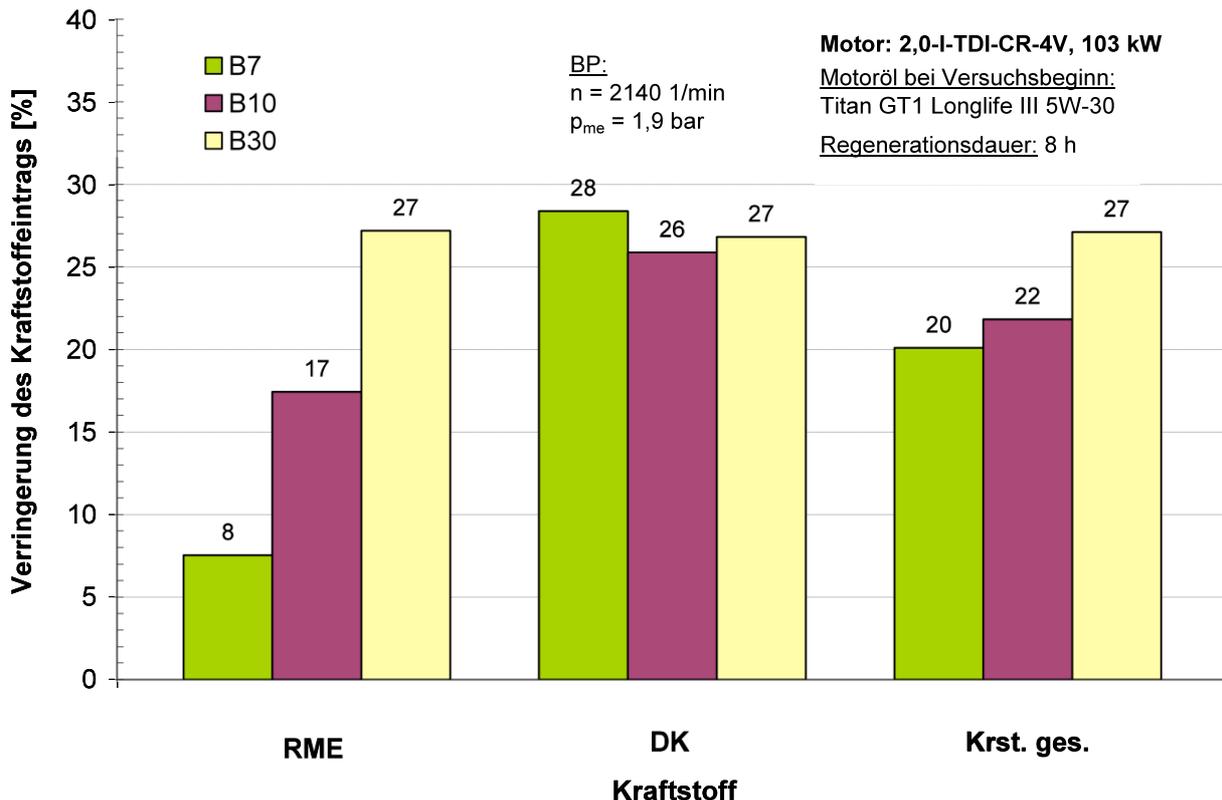


Bild 6-8: Verringerung des Kraftstoffeintrags durch die gesplittete späte Nacheinspritzung (Variante V5), bezogen auf die Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus

Die Ergebnisse wurden aus jeweils drei stationären Prüfläufen je Kraftstoff im Betriebspunkt BP1 über 8 Stunden im unterbrechungsfreien Regenerationsmodus ermittelt.

Der DK-Eintrag wurde bei Betrieb mit den drei Mischkraftstoffen um ca. 26 bis 28 % verringert. Die Verringerung der RME-Konzentration stieg jedoch bei zunehmendem RME-Anteil im Mischkraftstoff von B7 über B10 und B30 an. Sie betrug bei B30 ca. 27 %. Es blieb ungeklärt, warum die Verringerung des RME-Eintrags bei B7 mit 8 % und B10 mit 17 % geringere Werte als bei B30 aufwies.

Die von B7 zu B10 und B30 zunehmende Verringerung der RME-Konzentration durch die gesplittete späte Nacheinspritzung hatte zur Folge, dass auch die Konzentrationsverringerung des Kraftstoffs gesamt von B7 mit 20 % über B10 mit 22 % bis auf 27% bei B30 anstieg.

In [5] wird die Verbesserung der Ölverdünnung durch Aufteilung der spät nacheingespritzten Kraftstoffmenge in zwei Teile auf dem Motorprüfstand mit 25 % angegeben, wobei zur Kraftstoffzusammensetzung keine Angabe erfolgte. Im realen Stadtbetrieb bei Fahrten von Tür zu Tür führte dies nur zu einer um 20 % niedrigeren Ölverdünnung.

Da die hier beschriebenen Untersuchungen im stationären Prüfstandsbetrieb erfolgten, sind im praktischen Einsatz bei Fahrprofilen mit niedrigen Geschwindigkeiten und Leerlaufzeiten im Stadtverkehr hiervon abweichende Ergebnisse zu erwarten.

6.1.6.2 Verringerung des Abfalls der Motorölviskosität

Durch die Splittung der späten Nacheinspritzung wurde das Motoröl während der 8-stündigen Prüfläufe im Regenerationsmodus weniger als mit der Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus verdünnt (Bild 6-7).

Im **Bild 6-9** wird die Verbesserung, d. h. die Verringerung des Viskositätsabfalls durch die Splittung der späten Nacheinspritzung im Vergleich zum Motorbetrieb mit der Serienapplikation „neu“ deutlich gemacht. Das Bild beinhaltet die Differenz des in Prozent angegebenen Viskositätsabfalls zwischen dem Betrieb mit 6 und mit 7 Einspritzungen je Zyklus.

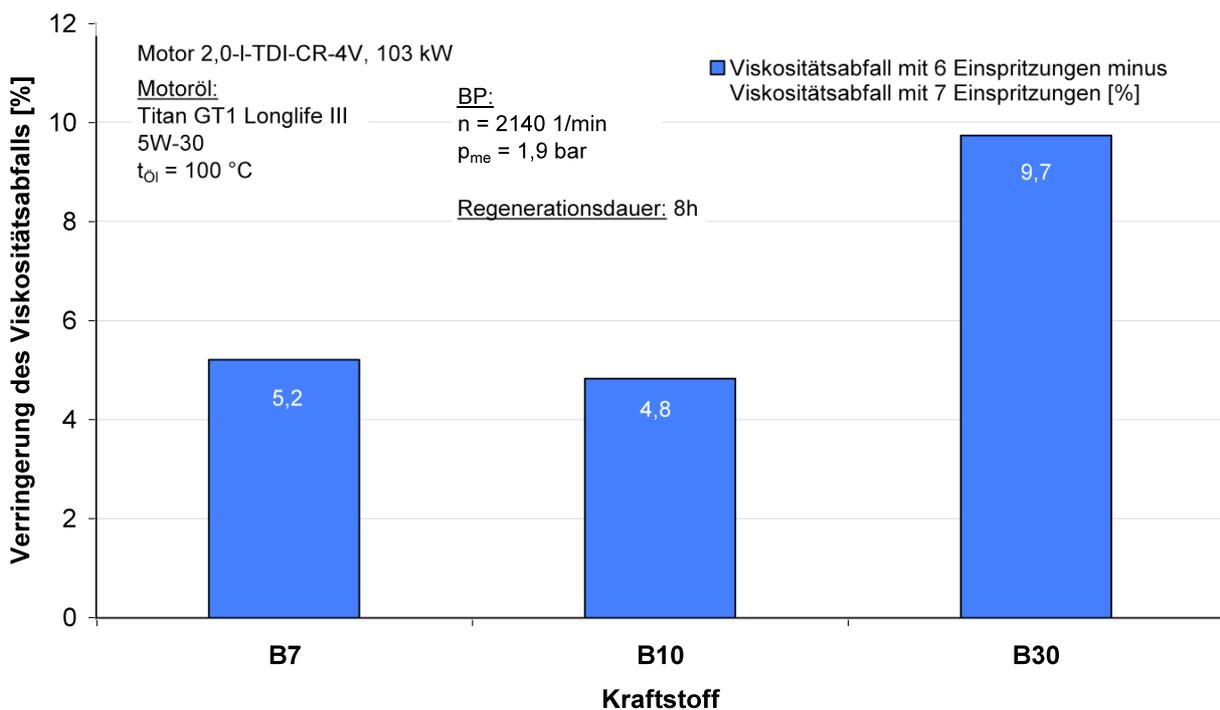


Bild 6-9: Verringerung des Viskositätsabfalls durch die gesplittete späte Nacheinspritzung (Variante V5) im Vergleich zur Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus

Der Viskositätsabfall, der mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung ermittelt wurde, lag bei B7 und B10 ca. 5 % und bei B30 ca. 10 % unter den mit der Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus gemessenen Werten. Außer bei B7 wurde der zulässige untere Viskositätsgrenzwert trotz der festgestellten Verbesserung während der 8-stündigen Prüfläufe mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung überschritten.

6.2 Ergebnisse im Vorwärmmodus

6.2.1 Kraftstoffeintrag durch frühe Nacheinspritzungen

Aus dem Ergebnis der im Punkt 6.1.2 beschriebenen Optimierung der späten Nacheinspritzung wurde gefolgert, dass auch die an die Haupteinspritzung angelagerte frühe Nacheinspritzung einen nicht unerheblichen Anteil an der Ölverdünnung haben muss.

Im **Bild 6-10** ist der Kraftstoffeintrag enthalten, der beim Motorbetrieb mit B10 und mit B30 in der Vorwärmstufe nach der Prüflaufdauer von 8 Stunden gemessen wurde. Im Bild sind die Mittelwerte von jeweils zwei Prüfläufen je Kraftstoff dargestellt.

In der Vorwärmstufe wurde der Motor mit 5 Einspritzungen betrieben, wobei zwei frühe Nacheinspritzungen nahe der Haupteinspritzung angeordnet waren (1. und 2. NE im Bild 4-7). Der Einspritzbeginn dieser beiden Nacheinspritzungen und die Einspritzmenge der 1. Nacheinspritzung sind sowohl im Vorwärm- als auch im Regenerationsbetrieb mit 6 und mit 7 Einspritzungen gleich. Lediglich die Einspritzmenge der 2. Nacheinspritzung war im Vorwärmmodus ca. 5 bis 17 % größer als im Regenerationsmodus mit 6 und 7 Einspritzungen.

Da beide Nacheinspritzereignisse jedoch zu einem Zeitpunkt erfolgen, wo sich der Kolben bereits um mehr als 30 °KW nach ZOT befindet, ist davon auszugehen, dass Teile der Kraftstoffstrahlen auf die Zylinderwand treffen und dadurch das Motoröl verdünnt wird.

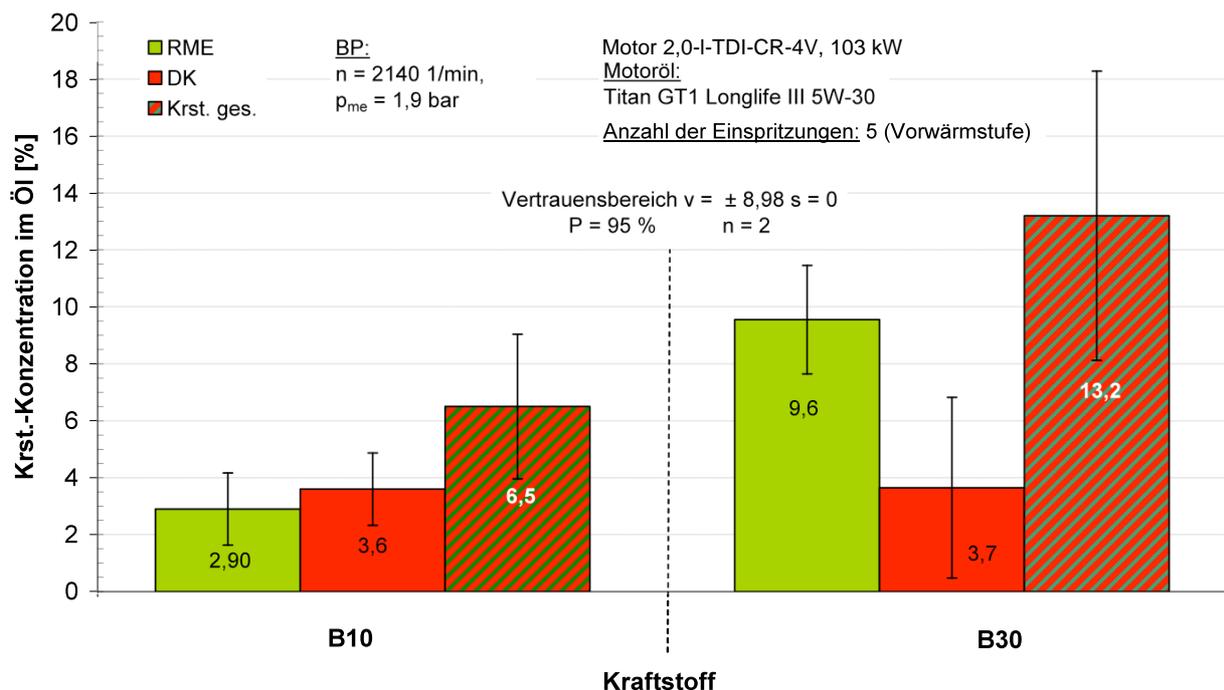


Bild 6-10: Kraftstoffkonzentration im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen je Zyklus im BP1 mit B10 und B30

Wie bereits beim Motorbetrieb im Regenerationsmodus festgestellt wurde, nahm der Kraftstoffeintrag in das Motoröl mit zunehmendem RME-Anteil des Mischkraftstoffs zu. Während beim Motorbetrieb mit B10 die Konzentrationen von RME mit 2,9 % und von DK mit 3,6 % gemessen wurden, ergaben sich mit B30 die Konzentrationswerte für RME mit 9,6 % und für DK mit 3,7 %. Dieser niedrige DK-Wert von 3,7 % ist – wie bereits auch im Regenerationsbetrieb des Motors festgestellt wurde – auf den geringeren DK-Anteil im Mischkraftstoff B30 im Vergleich zu B10 zurück zu führen.

6.2 Ergebnisse im Vorwärmmodus

6.2.1 Kraftstoffeintrag durch frühe Nacheinspritzungen

Aus dem Ergebnis der im Punkt 6.1.2 beschriebenen Optimierung der späten Nacheinspritzung wurde gefolgert, dass auch die an die Haupteinspritzung angelagerte frühe Nacheinspritzung einen nicht unerheblichen Anteil an der Ölverdünnung haben muss.

Im **Bild 6-10** ist der Kraftstoffeintrag enthalten, der beim Motorbetrieb mit B10 und mit B30 in der Vorwärmstufe nach der Prüflaufdauer von 8 Stunden gemessen wurde. Im Bild sind die Mittelwerte von jeweils zwei Prüfläufen je Kraftstoff dargestellt.

In der Vorwärmstufe wurde der Motor mit 5 Einspritzungen betrieben, wobei zwei frühe Nacheinspritzungen nahe der Haupteinspritzung angeordnet waren (1. und 2. NE im Bild 4-7). Der Einspritzbeginn dieser beiden Nacheinspritzungen und die Einspritzmenge der 1. Nacheinspritzung sind sowohl im Vorwärm- als auch im Regenerationsbetrieb mit 6 und mit 7 Einspritzungen gleich. Lediglich die Einspritzmenge der 2. Nacheinspritzung war im Vorwärmmodus ca. 5 bis 17 % größer als im Regenerationsmodus mit 6 und 7 Einspritzungen.

Da beide Nacheinspritzereignisse jedoch zu einem Zeitpunkt erfolgen, wo sich der Kolben bereits um mehr als 30 °KW nach ZOT befindet, ist davon auszugehen, dass Teile der Kraftstoffstrahlen auf die Zylinderwand treffen und dadurch das Motoröl verdünnt wird.

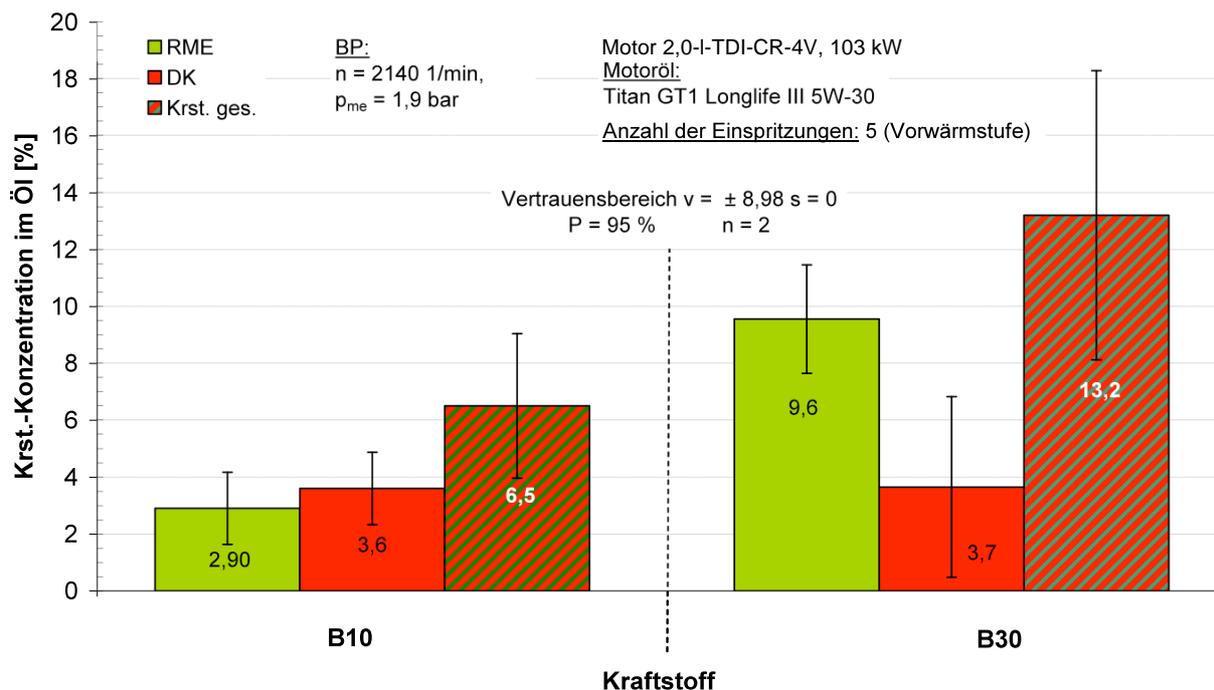


Bild 6-10: Kraftstoffkonzentration im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen je Zyklus im BP1 mit B10 und B30

Wie bereits beim Motorbetrieb im Regenerationsmodus festgestellt wurde, nahm der Kraftstoffeintrag in das Motoröl mit zunehmendem RME-Anteil des Mischkraftstoffs zu. Während beim Motorbetrieb mit B10 die Konzentrationen von RME mit 2,9 % und von DK mit 3,6 % gemessen wurden, ergaben sich mit B30 die Konzentrationswerte für RME mit 9,6 % und für DK mit 3,7 %. Dieser niedrige DK-Wert von 3,7 % ist – wie bereits auch im Regenerationsbetrieb des Motors festgestellt wurde – auf den geringeren DK-Anteil im Mischkraftstoff B30 im Vergleich zu B10 zurück zu führen.

Die Konzentration vom Kraftstoff gesamt bei B10 mit 6,5 % und bei B30 mit 13,2 % wurden durch Summation der jeweiligen RME- und DK-Werte errechnet.

Zum Vergleich sind im folgenden **Bild 6-11** die Konzentrationswerte, die beim Motorbetrieb mit B10 in der Vorwärmstufe mit 5 Einspritzungen sowie im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen gemessen wurden, einander gegenüber gestellt. Die Konzentrationswerte der Vorwärmstufe sind die Mittelwerte aus zwei Prüfläufen. Im Regenerationsmodus wurde der Mittelwert aus drei Prüfläufen gebildet.

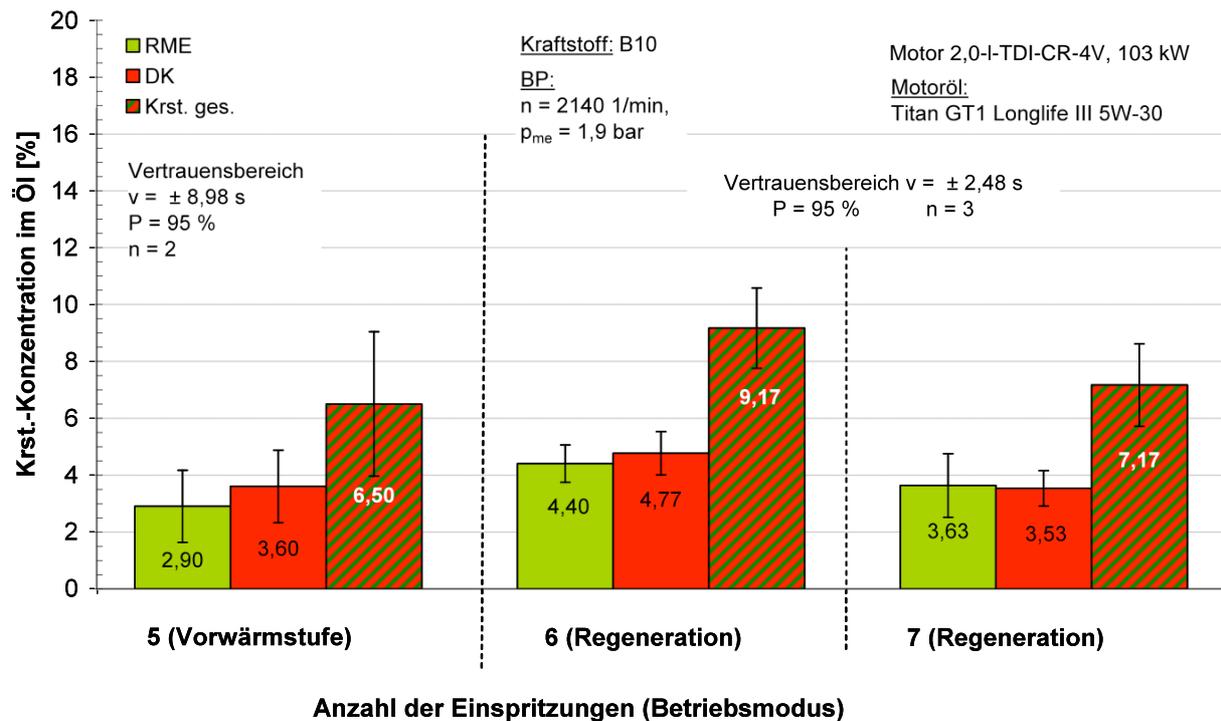


Bild 6-11: Kraftstoffkonzentration im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb mit B10 im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen und im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen je Zyklus im BP1

In diesem Bild wird deutlich, dass die zwei frühen Nacheinspritzungen in der Vorwärmstufe nahezu den gleichen Kraftstoffeintrag erzeugten, wie er im Regenerationsbetrieb insbesondere mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung (7 Einspritzungen je Zyklus) gemessen wurde. Die Unterschiede zwischen Vorwärm- und Regenerationsbetrieb sind nicht signifikant. In jedem Betriebsmodus sind die RME- und die DK-Konzentrationswerte annähernd gleich groß.

Im folgenden **Bild 6-12** sind die Konzentrationswerte des Motorbetriebs mit B30 in der Vorwärmstufe mit 5 Einspritzungen den Konzentrationswerten im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen gegenüber gestellt.

Auch beim Motorbetrieb mit B30 sind keine signifikanten Konzentrationsunterschiede nachweisbar. Es fällt auf, dass die RME-Konzentrationen in jedem Betriebsmodus den 2,6- bis 3,7-fachen Wert der DK-Konzentrationen aufwiesen. Die Konzentrationswerte aus dem Betrieb mit der Vorwärmstufe waren tendenziell eher größer als im Regenerationsmodus mit 7 Einspritzungen je Zyklus (gesplittete späte Nacheinspritzung). Der höchste Kraftstoffeintrag wurde im Regenerationsmodus mit 6 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „neu“) festgestellt.

Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass bei weiteren Versuchen zur Reduzierung des Kraftstoffeintrags im Regenerationsbetrieb die frühe Nacheinspritzung nicht unberücksichtigt bleiben darf.

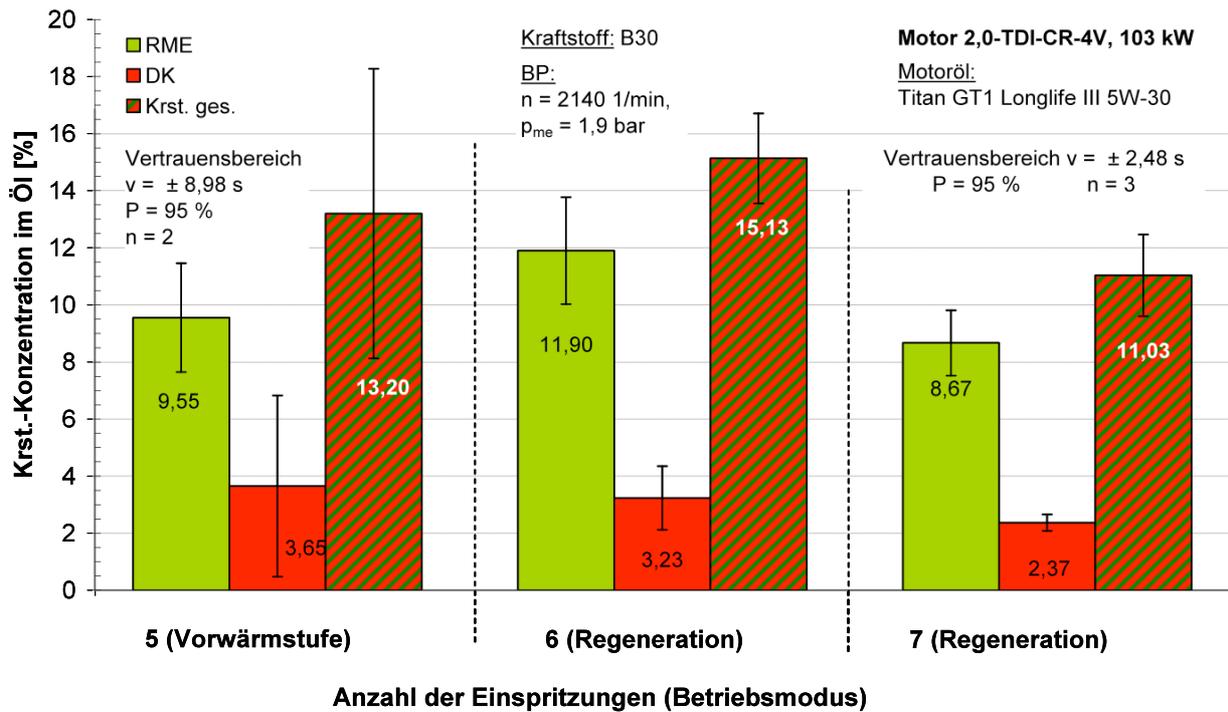


Bild 6-12: Kraftstoffkonzentration im Motoröl nach 8 Stunden Motorbetrieb mit B30 im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen und im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen je Zyklus im BP1

6.2.2 Abfall der Motorölviskosität durch frühe Nacheinspritzungen

Im **Bild 6-13** ist der Abfall der Ölviskosität nach 8-stündigem Motorbetrieb im Betriebspunkt BP1 mit B10 und B30 im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen dem Viskositätsabfall im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen gegenüber gestellt.

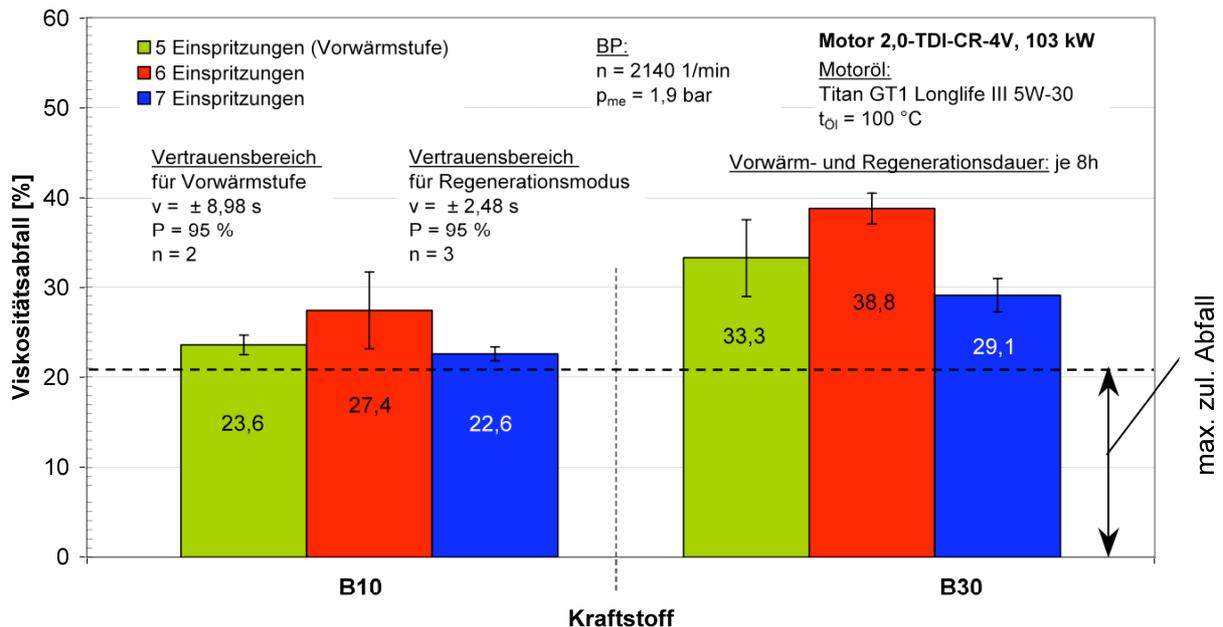


Bild 6-13: Abfall der Ölviskosität nach 8 Stunden Motorbetrieb mit B10 und mit B30 im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen und im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen je Zyklus im BP1

Das Bild bestätigt mit den folgenden Aussagen die im Punkt 6.2.1 zum Kraftstoffeintrag getroffenen Feststellungen:

- der tendenziell höchste Viskositätsabfall des Motoröls wurde mit beiden Kraftstoffen im Regenerationsmodus mit 6 Einspritzungen (Serienapplikation „neu“) gemessen,
- der geringste Viskositätsabfall wurde im Regenerationsmodus mit 7 Einspritzungen je Zyklus (gesplittete späte Nacheinspritzung) ermittelt,
- der Viskositätsabfall im Vorwärmmodus ist tendenziell größer als im Regenerationsmodus mit gesplitteter später Nacheinspritzung und kleiner als im Regenerationsmodus mit der Serienapplikation „neu“.

6.3 Überprüfung der Abgasnachbehandlung bei unterschiedlichen Einspritzstrategien im Regenerationsbetrieb des Motors

6.3.1 Beladung und Regeneration

Die Veränderung der Einspritzstrategie im Regenerationsmodus sollte die Effizienz des Abgasnachbehandlungssystems nicht verringern. In den folgenden Bildern werden deshalb die Ergebnisse der Überprüfung der Partikelfilterregeneration bei Betrieb des Motors mit der Serienapplikation „neu“ (6 Einspritzungen je Zyklus) und der Versuchsanwendung mit der optimierten gesplitteten Nacheinspritzung (7 Einspritzungen je Zyklus, Variante V5) gezeigt.

Im **Bild 6-14** ist die Aufzeichnung der während der Beladung mit dem Schnittstellenmodul ES690 und der ETAS-Software INCA V5.4 ausgelesenen Abgastemperaturen vor dem ATL, vor und nach dem DPF sowie des Differenzdrucks des DPF beim Motorbetrieb im Betriebspunkt BP2 mit den Kraftstoffen B7 und B30 dargestellt. Die Beladung erfolgte für jede der drei eingetragenen Beladevorgänge über jeweils 7 Stunden im Normalmodus des Motors mit insgesamt 3 Einspritzungen je Zyklus (Bild 4-7).

Bei jedem Beladevorgang wurde die angesammelte Partikelmasse durch Wägung des Filters vor und nach der Beladung ermittelt und danach der Filter regeneriert.

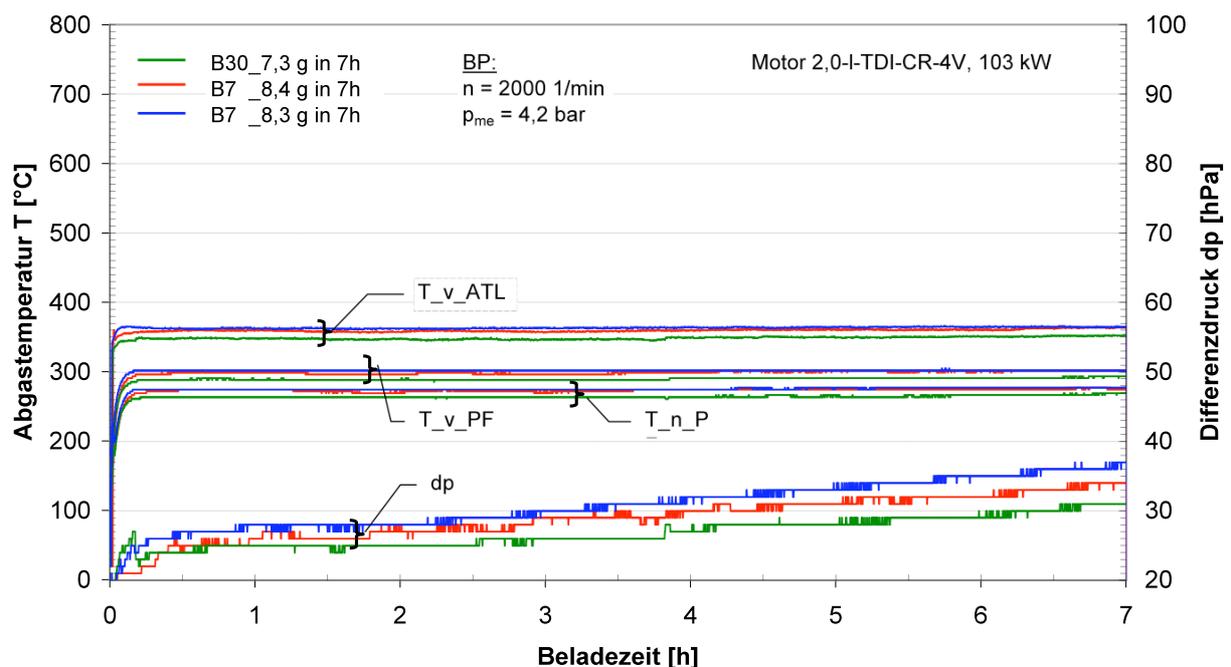


Bild 6-14: Abgastemperaturen und Differenzdruck des DPF bei der Beladung des Filters bei Motorbetrieb im BP2 mit B7 und B30

Die bei der Beladung im BP2 ($n = 2000 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 4,2 \text{ bar}$) vor dem Filter gemessene Abgastemperatur T_{v_PF} von ca. 290 bis 303 °C liegt noch weit unter der Temperatur, die zum Rußabbrand vor dem Filter erforderlich ist. Der Differenzdruck des Filters nahm kontinuierlich während der Beladung zu.

Die bei der Beladung über 7 Stunden im Filter angesammelte Partikelmasse und den Differenzdruckanstieg des Filters zeigt das **Bild 6-15**.

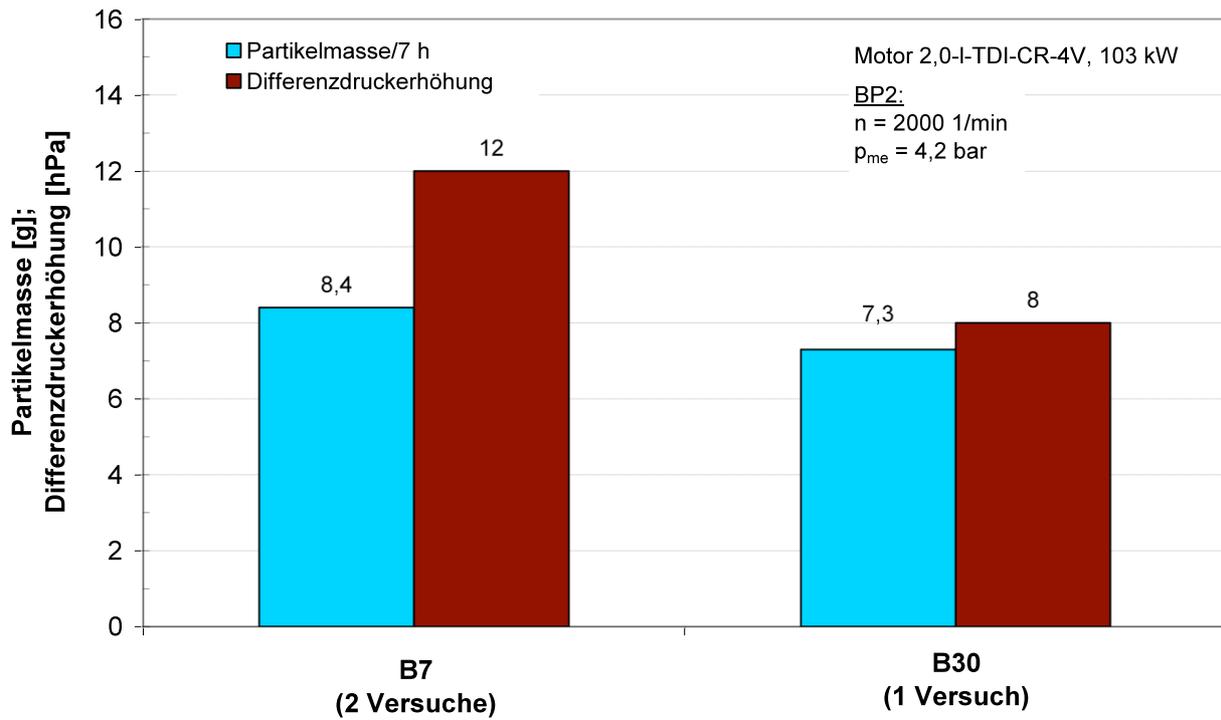


Bild 6-15: Angesammelte Partikelmasse und Differenzdruck des DPF nach der Beladung des Filters über 7 Stunden bei Motorbetrieb im BP2 mit B7 und B30

Der Mittelwert der im Filter angesammelten Partikelmasse von zwei Beladungsvorgängen betrug beim Motorbetrieb mit dem Kraftstoff B7 8,4 Gramm bei einer Differenzdruckerhöhung des Filters von ca. 12 hPa. Bei B30 wurde erwartungsgemäß aufgrund der bekannten geringeren Rußentwicklung bei höherem RME-Anteil im Kraftstoff eine geringere Partikelmasse angesammelt. Mit B30 wurden in einem Versuch 7,3 Gramm bei einer Differenzdruckerhöhung von ca. 8 hPa gemessen.

Die Beladung erfolgte in allen drei Prüfläufen mit der gleichen Einspritzstrategie (Normalmodus mit 3 Einspritzungen). Die Unterschiede sind somit nur auf die unterschiedlichen Kraftstoffe zurück zu führen.

Im **Bild 6-16** ist der Regenerationsverlauf bei Motorbetrieb im Regenerationsmodus mit 6 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „neu“) mit dem Kraftstoff B7 und je ein Regenerationsverlauf mit 7 Einspritzungen je Zyklus (Versuchsapplikation mit gesplitteter später Nacheinspritzung Variante V5) mit B7 und B30 abgebildet. Die Regeneration wurde im Betriebspunkt BP1 vorgenommen.

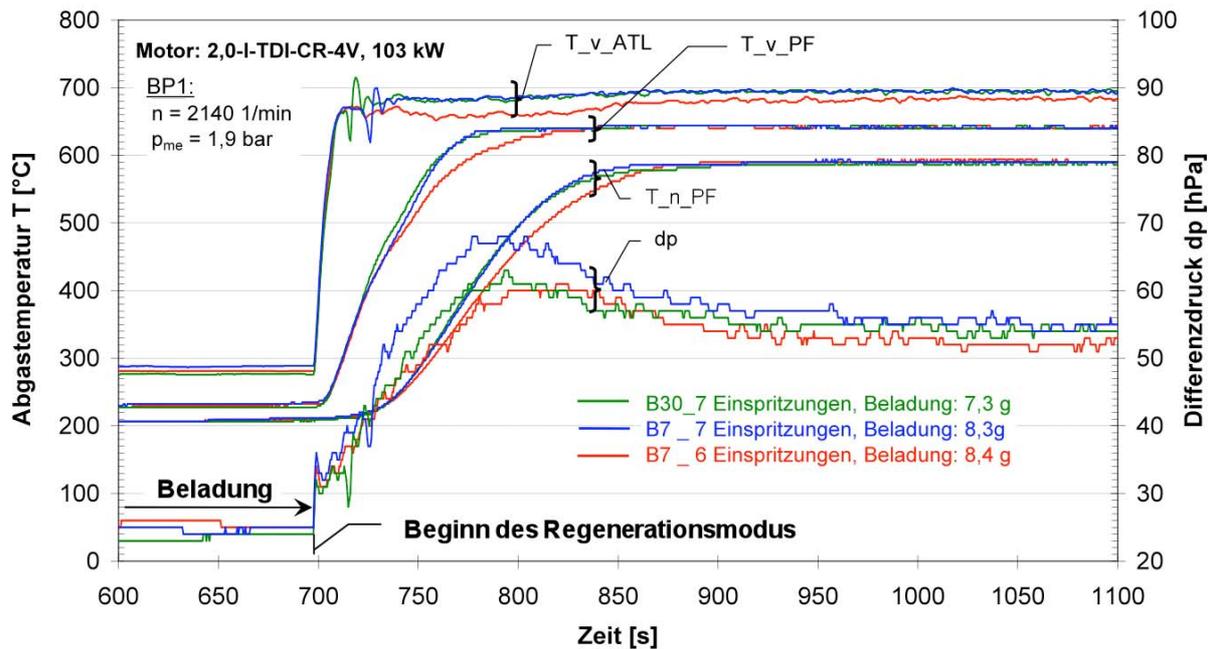


Bild 6-16: Regeneration des Partikelfilters bei Motorbetrieb im BP1 mit B7 und B30 im Regenerationsmodus mit 6 und mit 7 Einspritzungen je Zyklus

Nach der Beladung des Filters im BP2 wurde der Motor über ca. 5 Minuten vor dem im Bild eingetragenen Beginn der Regeneration im BP1 mit dem Belademodus (Normalbetrieb) gefahren. Dies war für einen reibungslosen Ablauf der Umschaltung der Betriebsart vom Belade- in den Regenerationsmodus, der im BP1 vorgesehen war, erforderlich.

In diesem Bild wird deutlich, dass die Regeneration mit den beiden Einspritzstrategien des Regenerationsmodus nahezu gleich abläuft:

- Die für die Regeneration vorgegebene Abgastemperatur vor dem Partikelfilter T_v_PF wurde bei allen drei Prüfläufen erreicht, mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung sogar ca. 40 Sekunden früher als mit Serienapplikation „neu“.
- Die Regeneration war bei allen drei Prüfläufen nach ca. 250 Sekunden abgeschlossen, was daran zu erkennen ist, dass kein weiterer Differenzdruckabfall erfolgte.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass der Ablauf der Partikelfilterregeneration durch Splittung der späten Nacheinspritzung bei Beibehaltung der Abgastemperatur vor dem Partikelfilter von 640 °C nicht nachteilig beeinflusst wurde.

6.3.2 Abgasemissionen

Im **Bild 6-17** sind die Ergebnisse der mit der Motorabgas-Analysenanlage der AVL AMA i60 gemessenen gasförmigen Abgasemissionen zu sehen. Die Messung erfolgte unmittelbar vor der Umschaltung aus dem Belade- in den Regenerationsmodus im BP1 mit dem Kraftstoff B7. Die Emissionen wiesen erwartungsgemäß keinen signifikanten Unterschied auf.

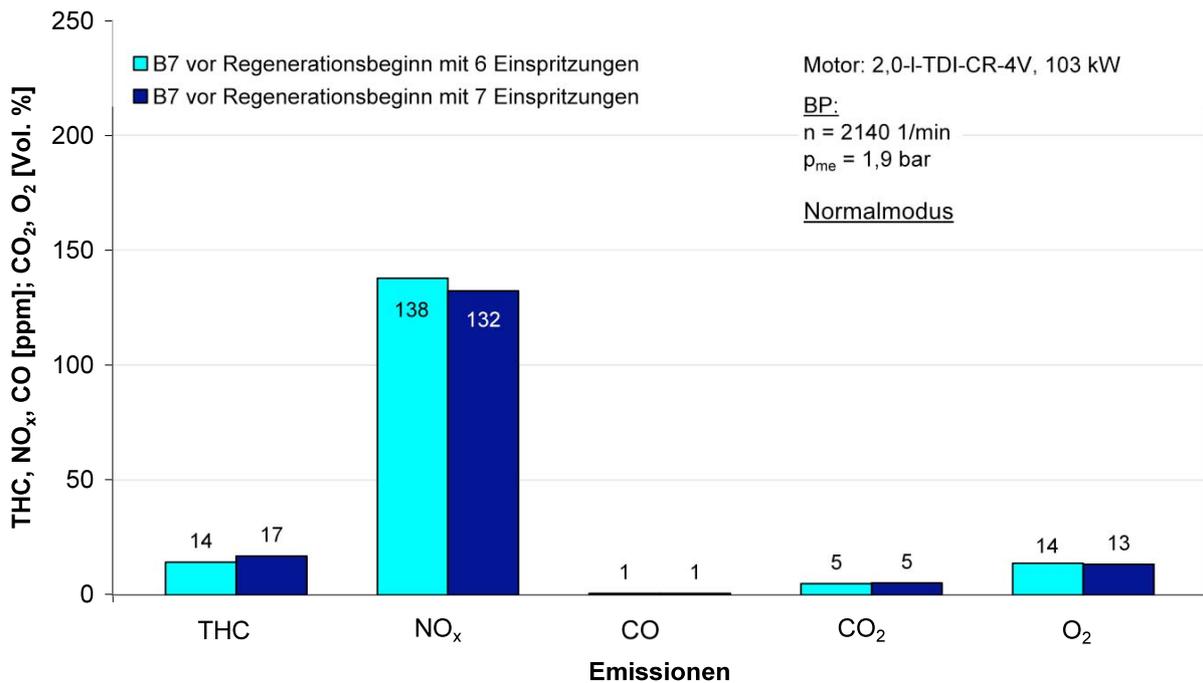


Bild 6-17: Abgasemissionen nach DPF unmittelbar vor Beginn der Regeneration des Partikelfilters bei Motorbetrieb im BP1 mit B7 im Normalmodus mit 3 Einspritzungen je Zyklus

Das **Bild 6-18** zeigt die Ergebnisse der gasförmigen Abgasemissionen, die bei Motorbetrieb mit B7 im Regenerationsmodus mit 6 und 7 Einspritzungen je Zyklus unmittelbar nach Beendigung der Regeneration gemessen wurden. Auch hier sind keine signifikanten Messwertunterschiede zwischen dem Betrieb des Motors mit der Serienapplikation „neu“ und der Versuchsapplikation mit gesplitteter später Nacheinspritzung zu erkennen.

Damit wurde im stationären Prüfstandsbetrieb im Betriebspunkt BP1 gezeigt, dass der Motorbetrieb im Regenerationsmodus mit gesplitteter später Nacheinspritzung keine negativen Auswirkungen auf die Regeneration des Partikelfilters und die gasförmigen Abgasemissionen hatte.

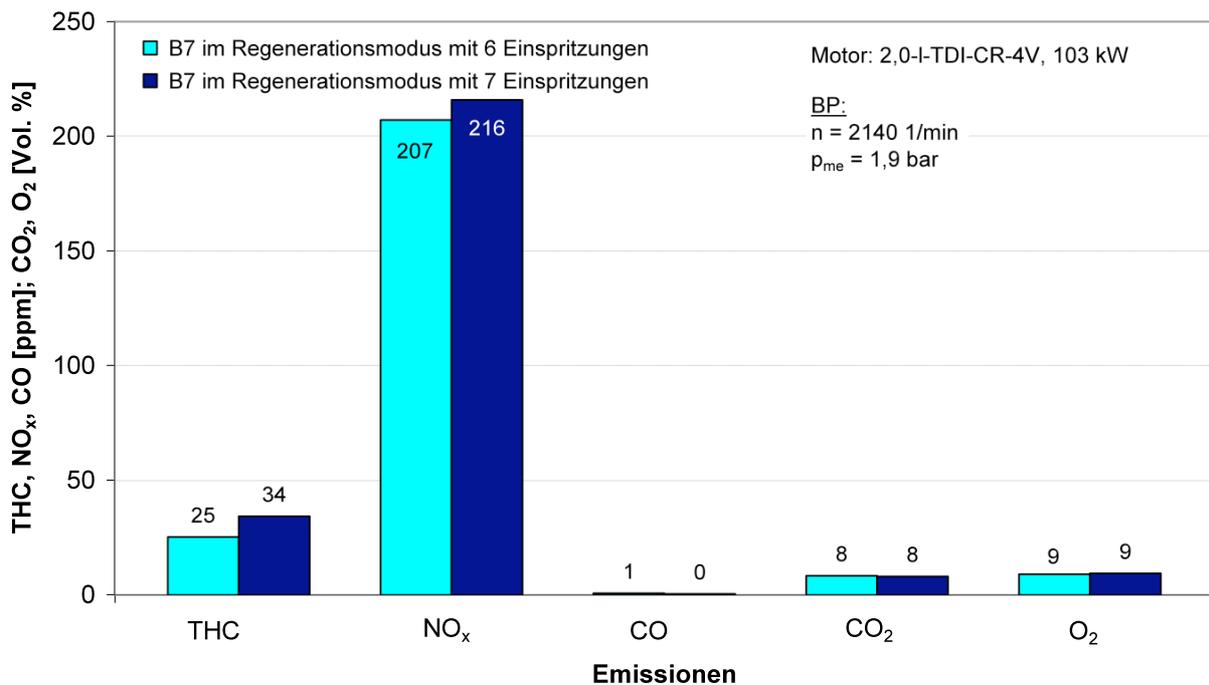


Bild 6-18 Abgasemissionen nach DPF unmittelbar nach Beendigung der Regeneration des Partikelfilters bei Motorbetrieb mit B7 im Regenerationsmodus mit 6 und 7 Einspritzungen je Zyklus im BP1

7 Zusammenfassung

An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurden im Institut für Mobile Systeme IMS, Lehrstuhl Kolbenmaschinen an einem Pkw-Dieselmotor 2,0 I-TDI mit Common-Rail-System, motornahem Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter in stationären Prüfläufen auf dem Motorprüfstand die Auswirkungen von Veränderungen der motorinternen „späten“ Nacheinspritzung im Regenerationsmodus bei Betrieb mit den Mischkraftstoffen B7, B10 und B30 auf den Kraftstoffeintrag in das Motoröl sowie auf die Veränderung der Ölviskosität und der limitierten Emissionen untersucht.

Zusätzlich zu der im Projekt der UFOP mit der Nr. 540/093 enthaltenen Aufgabe wurden auch der Kraftstoffeintrag und der Abfall der Motorölviskosität durch die an die Haupteinspritzung angelagerten frühen Nacheinspritzungen ermittelt.

Der Dieselmotor sowie u. a. auch das Applikationssteuergerät und die Abgasnachbehandlungsanlage wurden von der Volkswagen AG für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Mit dem Applikationssteuergerät wurde auch der aktuelle Datensatz für diese Motorausführung mit 6 Einspritzungen je Zyklus (Serienapplikation „neu“) bereit gestellt. Die Veränderung der motorinternen späten Nacheinspritzung erfolgte durch die Splittung der späten Nacheinspritzmenge in zwei Teilmengen. Diese Splittung wurde von der VW AG durch die Übergabe einer Versuchsapplikation des Steuergerätedatensatzes mit 7 Einspritzungen je Zyklus ermöglicht.

Durch die Variation von Einspritzmenge und Einspritzbeginn der gesplitteten späten Nacheinspritzungen wurde versucht, den Kraftstoffeintrag in das Motoröl und die Ölverdünnung zu minimieren. Dabei waren Veränderungen der frühen Nacheinspritzungen und der zweiten Teilmenge der gesplitteten Nacheinspritzung bei dem benutzten Applikationssteuergerät manuell nicht möglich. Diese wurden zur Gewährleistung der Abgastemperatur vor dem Partikelfilter von 640 °C automatisch korrigiert.

Das bei den Motorversuchen verwendete, vom Motorenhersteller zugelassene Motoröl mit der Bezeichnung „Titan GT1 Longlife III 5W-30“ wurde von der Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH bezogen, die auch die gaschromatographischen Ölanalysen zur Bestimmung der Kraftstoffkonzentrationen in den Motorölproben und die Viskositätsbestimmungen durchgeführt hat.

Zur Ermittlung des Kraftstoffeintrags im Regenerationsmodus mit 6 und 7 Einspritzungen je Zyklus wurden bei Motorbetrieb mit den Kraftstoffen B7, B10 und B30 jeweils drei Prüfläufe mit je 8 Stunden im Betriebspunkt BP1 bei einer Drehzahl von 2140 1/min und dem Mitteldruck von 1,9 bar durchgeführt.

Der Kraftstoffeintrag im Vorwärmmodus mit 5 Einspritzungen je Zyklus wurde bei Motorbetrieb mit den Kraftstoffen B10 und B30 im gleichen Betriebspunkt in jeweils zwei Prüfläufen mit je 8 Stunden untersucht.

Die Abgasnachbehandlung im Regenerationsbetrieb des Motors wurde mit der Serienapplikation „neu“ und der Versuchsapplikation mit optimierter, gesplitteter später Nacheinspritzung mit den Kraftstoffen B7 und B30 überprüft.

In dem vorliegenden Projekt wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Die Siedekennlinien der Mischkraftstoffe B7, B10 und B30 zeigten, dass der unverdampfte Kraftstoffanteil mit steigendem RME-Anteil im Kraftstoff bei gleicher Kraftstofftemperatur zunahm. Bei der Temperatur von z. B. 300 °C war der unverdampfte Anteil bei B30 um ca. 69 % höher als bei B7.
- Im Regenerationsmodus des Motors nahm der Gesamt-Kraftstoffeintrag in das Motoröl mit steigendem RME-Anteil im Kraftstoff zu. Bei der Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus war der Gesamt-Kraftstoffeintrag mit B30 um 94 % höher als mit B7 und bei der Versuchsapplikation mit optimierter, gesplitteter Nacheinspritzung, d. h. mit 7 Einspritzungen je Zyklus in der Variante V5 um 77 %.
- Der Anstieg der Gesamt-Kraftstoffkonzentration im Regenerationsbetrieb des Motors ergab sich bei sinkender DK-Konzentration aus dem erheblichen Anstieg der RME-Konzentration. Der RME-Eintrag war mit 6 Einspritzungen je Zyklus mit B30 um 287 % und mit 7 Einspritzungen je Zyklus um 202 % höher als mit B7.
- Die DK-Konzentration im Motoröl war im Regenerationsbetrieb mit 6 und 7 Einspritzungen je Zyklus mit B30 um ca. 30 % geringer als mit B7 und B10.
- Zwischen der Serienapplikation „alt“ mit 5 Einspritzungen aus dem vorangegangenen Projekt [2] und der Serienapplikation „neu“ mit 6 Einspritzungen je Zyklus gab es bei Betrieb mit B10 hinsichtlich des Kraftstoffeintrags keine signifikanten Unterschiede.
- Die Splittung der späten Nacheinspritzung (7 Einspritzungen je Zyklus) senkte im Vergleich zur Serienapplikation „neu“ den Gesamt-Kraftstoffeintrag
 - bei B7 um ca. 20 %
 - bei B10 um ca. 22 %
 - bei B30 um ca. 27 %

Während die DK-Konzentrationswerte bei den drei Kraftstoffen um ca. 26 bis 28 % verringert wurden, senkte die Splittung den RME-Eintrag sehr unterschiedlich:

- bei B7 um ca. 7 %
- bei B10 um ca. 18 %
- bei B30 um ca. 27 %.

Daraus folgt, dass eine Splittung besonders bei hohen RME-Anteilen positiv wirkt.

- Die Verringerung des während der Prüfläufe aufgetretenen Viskositätsabfalls betrug im Regenerationsmodus mit der späten Nacheinspritzung im Vergleich zur Serienapplikation „neu“ für die Öltemperatur von 100 °C bei B7 und B10 ca. 5 % und bei B30 ca. 10 %.
- Die beiden an die Haupteinspritzung angelagerten frühen Nacheinspritzungen erzeugten in der Vorwärmstufe mit 5 Einspritzungen je Zyklus nahezu den gleichen Kraftstoffeintrag wie er im Regenerationsbetrieb insbesondere mit der gesplitteten späten Nacheinspritzung gemessen wurde. Die RME-Konzentration erreichte mit B10 den 0,81-fachen und mit B30 den 2,62-fachen Wert der DK-Konzentration.
- Die Ölviskosität wurde bei den Prüfläufen in der Vorwärmstufe mit B10 um ca. 24 % und mit B30 um ca. 33 % gesenkt. Der Viskositätsabfall im Vorwärmmodus war somit tendenziell größer als im Regenerationsmodus mit gesplitteter später Nacheinspritzung und kleiner als im Regenerationsmodus mit der Serienapplikation „neu“.
- Die Beladung und die Regeneration des Partikelfilters erfolgten in den Prüfläufen mit B7 und mit B30 mit der Serienapplikation „neu“ und der Versuchsapplikation mit gesplitteter Einspritzung ohne Probleme. Bei B30 wurde aufgrund der geringeren Rußentstehung bei höherem RME-Anteil im Kraftstoff eine geringere Partikelmasse angesammelt. Die gesplittete späte Nacheinspritzung hatte keine negativen Auswirkungen auf die Regeneration des Partikelfilters und die gasförmigen Abgasemissionen.

Die stationären Prüfstandsuntersuchungen ergaben, dass die Optimierung der späten Nacheinspritzungen im Bereich des Ausschubtaktes den Kraftstoffeintrag in das Motoröl signifikant reduzieren kann. Sie machten aber auch deutlich, dass die frühen, an die Haupt-einspritzung angelagerten Nacheinspritzungen einen erheblichen Anteil an der Motoröl-verdünnung haben können, wenn Teilmengen der Kraftstoffstrahlen auf die Zylinderwand treffen. Zur weiteren Reduzierung des Kraftstoffeintrags in das Motoröl sollten daher auch die frühen Nacheinspritzungen in zukünftige Untersuchungen einbezogen werden.

8 Literatur

- [1] <http://www.ufop.de/3594.php>
Optimierungspotential zur Erhöhung von Biodiesel als Beimischungskomponente
UFOP-Pressemeldung, Berlin, 28. April 2010
- [2] Tschöke, H.; Braungarten G.; Patze, U.: Ölverdünnung bei Betrieb eines Pkw-Dieselmotors mit Mischkraftstoff B10
Abschlussbericht des FNR/UFOP-Projekts, Förderkennzeichen: 22010007 (07NR100),
Magdeburg, Dezember 2008
- [3] Schulz, Ph.: Biodiesel development: The view of a car manufacturer
Tagungsbeitrag
5. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP
„Kraftstoffe der Zukunft 2007“, 26./27. November 2007, ICC Berlin
- [4] Fasalo, B.; Hardy, J.-P.; Leroy, K.: Abgas Kraftstoffeinspritzsystem für effiziente DPF-Regeneration
MTZ 07-08/2009, Jahrgang 70, S. 554 - 561
- [5] Effiziente TSI-Aggregate – neue Common-Rail-Technologie
Sonderausgabe von ATZ und MTZ, September 2007



**UNION ZUR FÖRDERUNG
VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V.
Claire-Waldoff-Straße 7 • 10117 Berlin
info@ufop.de • www.ufop.de**