



**OTTO-VON-GUERICKE-
UNIVERSITÄT MAGDEBURG**



Institut für Mobile Systeme - Lehrstuhl Kolbenmaschinen

Abschlussbericht

„Ölverdünnung bei Betrieb eines Pkw-Dieselmotors mit Mischkraftstoff B10“

Förderkennzeichen: 22010007 (07NR100)

gefördert durch:

- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP)
- Volkswagen AG Wolfsburg
- Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. H. Tschöke
Lehrstuhl Kolbenmaschinen

Dipl.-Ing. G. Braungarten
Bearbeiter

Dipl.-Ing. U. Patze
Bearbeiter

Magdeburg, 10.12.2008

Im Institut für Mobile Systeme IMS, Lehrstuhl Kolbenmaschinen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde an einem von der Volkswagen AG bereitgestellten Pkw-Dieselmotor 2,0 I-TDI mit Common-Rail-System, motornahem Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter auf dem Motorprüfstand der Einfluss des Mischkraftstoffs B10 auf den Kraftstoffeintrag in das Motoröl und den Kraftstoffaustrag sowie auf die Veränderung der Ölviskosität untersucht.

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 bereitgestellt, die auch die gaschromatographischen Ölanalysen zur Bestimmung der Kraftstoffkonzentrationen in den 74 Ölproben und die Viskositätsbestimmungen durchgeführt hat.

Die Untersuchungen zum Kraftstoffeintrag wurden mit dem Kraftstoff B10 in drei Betriebspunkten ohne späte Nacheinspritzung in stationären Prüfläufen über jeweils 80 Stunden sowie mit 100 Motorstarts bei Umgebungstemperaturen um 22 °C mit anschließendem Leerlaufbetrieb über jeweils 10 Minuten pro Start durchgeführt. Der Kraftstoffeintrag im Regenerationsmodus erfolgte in drei Prüfläufen über jeweils 8 Stunden mit aktivierter später Nacheinspritzung.

Die Kraftstoffaustragsversuche wurden mit zwei Prüfläufen über 32 und 64 Stunden in einem Betriebspunkt mit hoher Motorbelastung bei der Drehzahl von 2140 1/min und einem Mitteldruck von 16 bar mit einem Motoröl durchgeführt, das vor Versuchsbeginn mit 15 Volumenprozent des Mischkraftstoffs B10 verdünnt worden war. Als Kraftstoff kam bei diesen Prüfläufen Dieselkraftstoff ohne RME-Anteil zum Einsatz.

Die stationären Prüfstandsuntersuchungen ergaben, dass

- der höchste Kraftstoffeintrag im Regenerationsmodus mit später Nacheinspritzung bei der Drehzahl von 2140 1/min und dem Mitteldruck von 1,9 bar erfolgte,
- die Ölverdünnung durch die Nacheinspritzung erheblich war,
- der Motorbetrieb bei der Drehzahl von 1000 1/min und der geringen Belastung durch den Mitteldruck von 1,1 bar sowie häufige Motorstarts mit längeren Leerlaufzeiten zu geringen Kraftstoffeinträgen führten, die für den Praxisbetrieb kaum Bedeutung haben,
- in diesen beiden Betriebsarten des Motors die Viskositätsverringering des Motoröls sehr gering war,
- bei der hohen Motorbelastung von 16 bar aus dem mit B10 verdünnten Motoröl Kraftstoff ausgetragen wurde,
- bei diesem Kraftstoffaustrag der RME-Anteil im unverdampften Kraftstoff angestiegen war und
- hauptsächlich der DK-Anteil, aber in geringem Maße auch der RME-Anteil aus dem Motoröl ausgetragen wurde.

Neben dem Partikelfiltersystem mit aktiver Partikelfilterregeneration durch motorinterne Kraftstoffnacheinspritzung, das bei dem untersuchten Motor und z. Z. auch bei allen deutschen Pkw-Herstellern ohne Additivzusatz eingesetzt wird, gibt es auch additiv-unterstützte 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 [7]. 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 zukünftig bei einer weiteren Erhöhung des Biokraftstoffanteils im Dieselkraftstoff die irreversible Motorschmierölverdünnung bei Pkw-Motoren mit motorinterner Nacheinspritzung zu vermeiden, muss versucht werden, den Kraftstoffeintrag vor allem im Regenerationsmodus durch Optimierung der späten Nacheinspritzung zu verringern. Dabei darf die Regeneration des Partikelfilters jedoch nicht beeinträchtigt werden.

	Seite
Kurzfassung	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abkürzungen	4
1 Einleitung	5
2 Aufgabenstellung	5
3 Betriebsstoffe	6
3.1 Testkraftstoffe.....	6
3.2 Siedekennlinien der Kraftstoffe	7
3.3 Motoröl	8
4 Versuchsaufbau	8
4.1 Versuchsmotor	8
4.2 Prüfstand.....	10
4.3 Versuchsdurchführung	12
4.3.1 Projektetappen	12
4.3.2 Versuchsablauf	13
4.3.3 Betriebspunkte des Motors	15
4.3.4 Betriebskennwerte des Motors.....	16
5 Vertrauensbereich für die Mittelwerte	21
6 Ergebnisse der Untersuchungen	22
6.1 Kraftstoffeintrag ohne späte Nacheinspritzung (Etappe 1) bei Motorbetrieb mit B10.....	22
6.1.1 Kraftstoffkonzentration im Motoröl bei den Prüfläufen in den Betriebspunkten BP1, BP2 und BP3	22
6.1.2 Einfluss des Kraftstoffeintrags auf die Motorölviskosität	24
6.2 Kraftstoffeintrag in das Motoröl im Regenerationsmodus (Etappe 2) bei Motorbetrieb mit B10.....	26
6.2.1 Kraftstoffkonzentration im Motoröl bei drei Prüfläufen im BP1 mit später Nacheinspritzung.....	26
6.2.2 Einfluss des Kraftstoffeintrags durch späte Nacheinspritzung auf die Motorölviskosität.....	28
6.3 Kraftstoffaustrag bei Motorbetrieb mit DK im BP3 (Etappe 3).....	29
6.3.1 Kraftstoffkonzentration	29
6.3.2 Einfluss des Kraftstoffaustrags auf die Motorölviskosität	31
6.4 Kraftstoffeintrag bei 100 Motorstarts mit anschließendem Leerlaufbetrieb über 10 Minuten pro Start (Etappe 4).....	33
6.4.1 Kraftstoffkonzentration im Motoröl	33
6.4.2 Einfluss des Kraftstoffeintrags auf die Motorölviskosität	35
6.5 Vergleich des Kraftstoffeintrags in den verschiedenen Betriebsarten.....	36
6.5.1 Zunahme der Kraftstoffkonzentration pro Stunde	36
6.5.2 Viskositätsverringerung pro Stunde	37
7 Zusammenfassung	38
8 Literatur	40

Abkürzungen

ATL	Abgasturbolader
b_e	spezifischer, gravimetrischer Kraftstoffverbrauch
B_e	stündlicher Kraftstoffverbrauch
BP	Betriebspunkt
B10	Kraftstoffgemisch aus 10 Vol.% RME und 90 Vol.% DK
B100	100 Vol.% Rapsmethylester, Biodiesel, RME
CO_2	Kohlendioxid
CAT	Oxidationskatalysator
DK	Diesekraftstoff, ohne RME-Anteil
DPF	Dieselpartikelfilter
Krst. ges.	gesamter Kraftstoff, bestehend aus RME- und DK-Anteilen
M_d	Drehmoment
M_{EAKT}	aktuelle Einspritzmenge lt. Steuergerät
n	Drehzahl
n	Anzahl der Messungen
Oxikat	Oxydationskatalysator
p_{Abg}	Abgasgegendruck nach ATL
p_{LL}	Ladeluftdruck nach Ladeluftkühler
p_B	Luftdruck
P	Wahrscheinlichkeit
P_e	effektive Motorleistung
PL1	Prüflauf 1
PL2	Prüflauf 2
p_{me}	effektiver Mitteldruck
p_A	Abgasgegendruck nach ATL
RME	Rapsmethylester, Biodiesel, B100
s	Standardabweichung
T_{Abg}	Abgastemperatur nach ATL bzw. nach DPF
T_R	Temperatur der Raumluft
T_{KW}	Kühlwassertemperatur am Motorausstritt
T_{LL}	Ladelufttemperatur nach Ladeluftkühler
$T_{Öl}$	Öltemperatur in der Ölwanne
t	Student-Faktor
v	Vertrauensintervall
V_{40°	Viskosität bei 40 °C
V_{100°	Viskosität bei 100 °C

1 Einleitung

Das Interesse an erneuerbaren Kraftstoffen hat in den letzten Jahren weltweit stark zugenommen. Zur Sicherung der Energieversorgung und zur Reduzierung der anthropogenen CO₂-Emission von Verbrennungsmotoren werden Biotreibstoffe den erdölbasierten Treibstoffen zugemischt.

Das in Deutschland geltende Biokraftstoffquotengesetz der Bundesregierung sieht eine stufenweise Anhebung der Biokraftstoffquoten für Diesel- und Ottokraftstoff vor. Die Strategie der Bundesregierung zielt auf einen Biokraftstoffanteil von 8 Prozent im Jahr 2015 und einen Anteil von 15 Prozent im Jahr 2020. In der Europäischen Union gibt es ebenfalls konkrete Pläne zur Festschreibung von signifikanten Biokraftstoffanteilen [1]. Die EU sieht bis 2020 einen Anteil an Biokraftstoffen von 10 Prozent am Gesamtkraftstoffmarkt vor. In Deutschland hat die Bundesregierung Ende 2007 das Ziel herausgegeben, bis 2020 einen Anteil von 20 Volumenprozent zu erreichen [2].^{*)}

Biodiesel gemäß EN 14214 wird lt. Diesel-Norm EN 590 heute bis ca. 5 % dem fossilen Diesel beigemischt. Mit einer weiteren Erhöhung des RME-Anteils auf 10 % (B10) sind auf Grund der von handelsüblichem Diesel abweichenden chemisch-physikalischen Eigenschaften von RME Unsicherheiten hinsichtlich eines störungsfreien Dauerbetriebs verbunden.

Es ist u. a. bekannt, dass bei aktuellen Pkw-Motoren mit Partikelfiltern eine irreversible Motorschmierölverdünnung auftritt, deren Ursache mit der hohen Siedecharakteristik von RME im Vergleich zum fossilen Dieselkraftstoff begründet wird. Bei der Regeneration des Partikelfilters gelangt unverbrannter Kraftstoff über die Kolben-Zylinder-Gruppe in den Schmierstoff im Ölsumpf. Wegen seiner hohen Siedecharakteristik (> 340 °C) kann der RME-Anteil aus dem Motoröl nicht mehr ausdampfen [1]. Als Folge der Ölverdünnung ergibt sich ein Viskositätsabfall mit der Gefahr Verschleiß fördernder Betriebsbedingungen [3].

Bei Verwendung des Mischkraftstoffs B10 (10 % RME, 90 % DK) in Pkw-Dieselmotoren mit Dieselpartikelfiltern wurden Kraftstoffanteile im reinem Motoröl gefunden, wobei der RME-Anteil über dem des fossilen Dieselkraftstoffs lag. Das lässt sich jedoch nicht allein mit den unterschiedlichen Siedekurven der beiden Kraftstoffkomponenten erklären, wenn man davon ausgeht, dass die im Dieselmotor auftretenden Temperaturen der vom Motoröl benetzten bzw. angespritzten Bauteile im Allgemeinen nicht über 300 °C liegen. Bei der Siedetemperatur von 300 °C ist der nicht verdampfte Dieselkraftstoffanteil aber deutlich höher als der RME-Anteil. Er beträgt etwa das 2,2-fache des RME-Anteils. Erst bei der Siedetemperatur von 318 °C sind beide Anteile etwa gleich groß (**Bild 3-2**).

Die nachfolgend beschriebenen Prüfstandsuntersuchungen sollen einen Beitrag zur Klärung der bisher weitgehend unerforschten Gründe sein, warum im Schmieröl der mit Partikelfiltern ausgerüsteten Pkw-Dieselmotoren der RME-Anteil trotzdem größer als der DK-Anteil ist.

2 Aufgabenstellung

An einem modernen Pkw-Dieselmotor soll die Schmierölverdünnung bei Betrieb mit dem Mischkraftstoff B10 und unterschiedlichen Betriebsbedingungen in einer ersten Phase experimentell auf dem Motorprüfstand untersucht werden. Die Untersuchungen sind an einem Dieselmotor 2,0-l-TDI mit Common-Rail-Einspritzung der Volkswagen AG durchzuführen.

^{*)} Nach aktuellen Informationen soll dieser Anteil deutlich reduziert werden [5], [6].

Als Motoröl ist ein vom Motorhersteller zugelassenes Öl zu verwenden.

Mit den in der **Tab. 2-1** enthaltenen vier Motorbetriebspunkten sind die Zusammenhänge des Kraftstoffein- und -austrags zu untersuchen.

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
2	1000	17	1,1
3	2000	250	16,0
Leerlauf	790	0	0

Die Prüfstandsuntersuchungen sollen im Einzelnen zur Beantwortung folgender Fragen dienen:

- Bei welchen der vorgesehenen Betriebspunkte BP1 bis BP3 erfolgt bei Motorbetrieb mit dem Kraftstoff B10 ohne Nacheinspritzung ein Kraftstoffeintrag?
- Wie ist der zeitliche Verlauf des Kraftstoffeintrags von B10 bei später Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1?
- Wie ist das Verdampfungsverhalten von im Motoröl vorhandenen RME- und DK-Anteilen bei der hohen Motorbelastung im Betriebspunkt BP3 bei Betrieb mit „reinem“ DK?
- Wie hoch ist der Kraftstoffeintrag bei 100 Motorkaltstarts mit dem Kraftstoff B10 bei Umgebungstemperaturen um 22 °C mit jeweils anschließendem 10-minütigem Leerlauf?

Bei allen Prüfläufen sind die RME- und DK-Anteile sowie der Einfluss des im Schmieröl enthaltenen Kraftstoffs auf die Ölviskosität zu ermitteln.

Im Ergebnis der Untersuchungen sind ggf. Abhilfemaßnahmen zur Verringerung des Kraftstoffeintrags in das Motoröl vorzuschlagen.

3 Betriebsstoffe

3.1 Testkraftstoffe

Diesekraftstoff

Für die Untersuchungen wurde Diesekraftstoff 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 Sommer-Qualität.

Mischkraftstoff B10

Der Kraftstoff wurde im IMS aus 10 Vol.% Biodiesel (RME) und 90 Vol.% RME-freiem DK gemischt. Das Mischen und die Lagerung des 10 %-Blends erfolgten in 200 l-Fässern, aus denen der Kraftstoff während der Versuchsdurchführung entnommen wurde.

3.2 Siedekennlinien der Kraftstoffe

Die Siedekennlinien von RME-freiem DK, RME und B10 wurden von der ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH aufgenommen und im Prüfbericht 161935 dokumentiert. Für DK und B10 wurde die Prüfmethode DIN EN 3405 und für RME die ASTM D 1160 angewendet. Die Ergebnisse sind im **Bild. 3-1** enthalten.

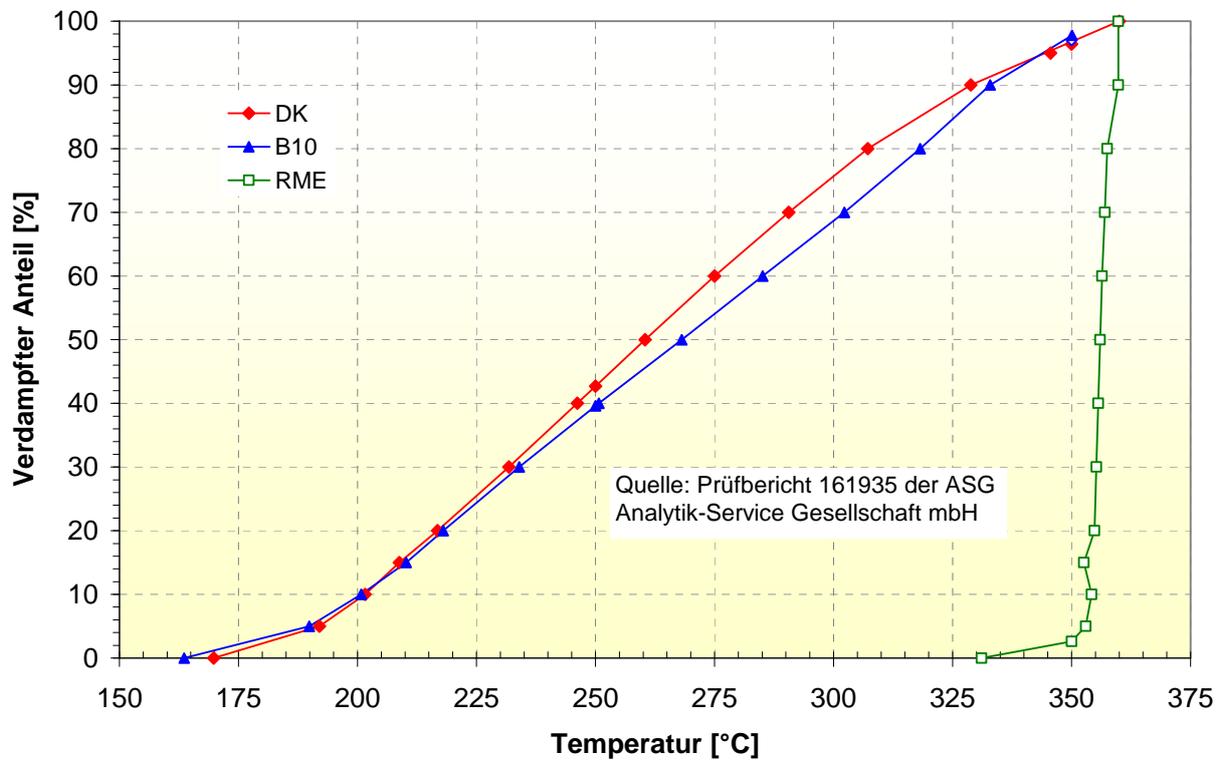


Bild 3-1: Siedekurven von Dieselkraftstoff (ohne RME-Anteil), RME und B10

Deutlich ist die für RME charakteristische, nahezu gleich bleibend hohe Siedetemperatur zu erkennen. Sie liegt für den verdampften Anteil von ca. 5 bis 100 % bei 353 °C bis maximal 360 °C. Im Gegensatz zu RME beginnt die Verdampfung von DK bereits ab ca. 170 °C. Der verdampfte Anteil von DK nimmt mit steigender Temperatur nahezu stetig zu. Bei 360 °C ist der DK vollständig verdampft.

Die Siedekurve von B10 (10% RME + 90 % DK) liegt nur geringfügig, maximal um ca. 7 °C über der Siedekurve von DK. Das Destillationsende von B10 wurde bei der Temperatur von 350,1 °C ermittelt. Der Destillationsrückstand betrug 2,2 %.

Im **Bild 3-2** sind der unverdampfte Kraftstoffanteil von B10 und die darin enthaltene RME-Konzentration in Abhängigkeit von der Kraftstofftemperatur dargestellt. Der unverdampfte Anteil wurde aus der in Bild 3-1 eingetragenen Siedekurve des B10 abgeleitet. Der darin enthaltene RME-Anteil wurde berechnet. Dabei wurde berücksichtigt, dass der RME-Anteil von ursprünglich 10 % bis zu der Kraftstofftemperatur von 332,9 °C vollständig in der flüssigen Phase im Kraftstoff erhalten war und bis zu dieser Temperatur nur die Verdampfung von DK erfolgte. Mit steigender Kraftstofftemperatur wurde daher der RME-Anteil immer größer. Bis zur Temperatur unterhalb des Siedebeginns von B10 betrug der RME-Anteil 10 %, bei einer Kraftstofftemperatur von z. B. 268 °C aber schon 20 % (B20) und bei 310 °C bereits 39 % (B39). Bei 318 °C waren der RME- und der DK-Anteil gleich groß (B50). Bei Temperaturen über 318 °C war der im unverdampften Kraftstoff enthaltene RME-Anteil größer als der DK-Anteil. Der DK-Anteil war bei 332,9 °C vollständig verdampft, so dass nur noch der RME-Anteil (B100) in der flüssigen Phase vorlag.

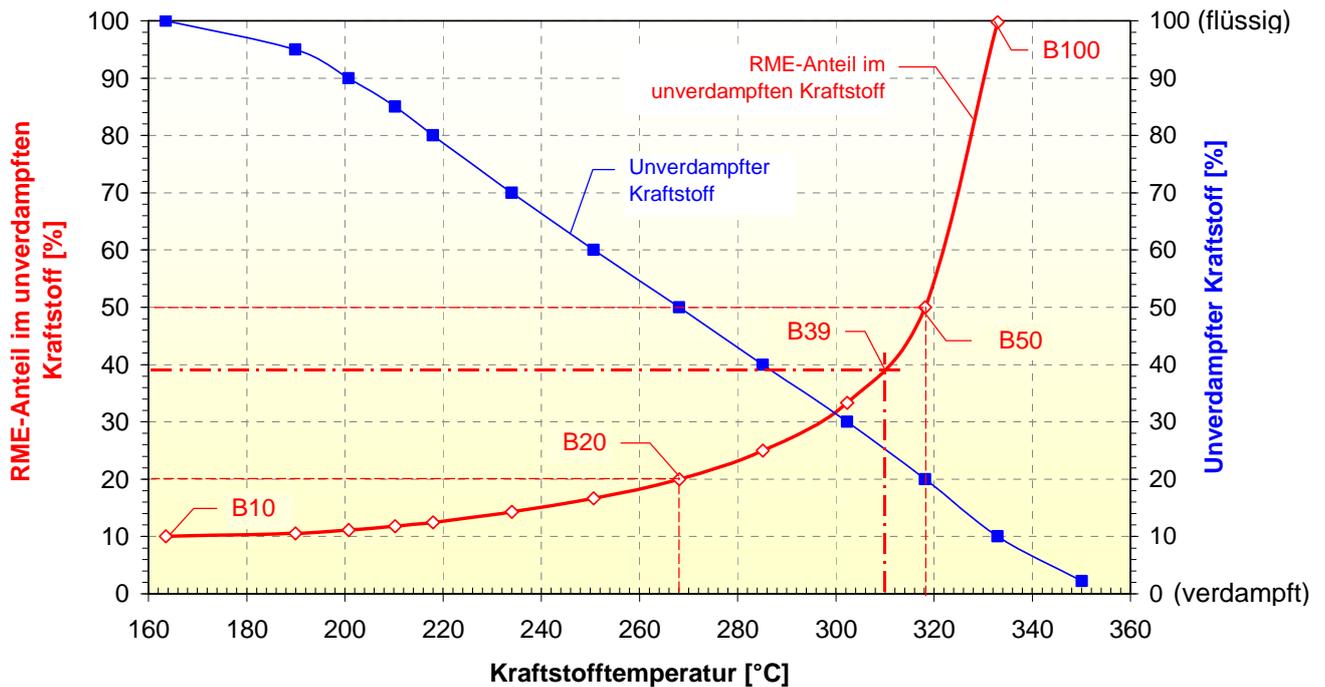


Bild 3-2: Unverdampfter Kraftstoff B10 und darin enthaltener RME-Anteil in Abhängigkeit von der Kraftstofftemperatur, berechnet aus der Siedekurve von B10 in Bild 3-1

Wird bei einer gaschromatographischen Analyse des Gebrauchtsöls eines mit B10 betriebenen Dieselmotors z. B. festgestellt, dass die Zusammensetzung des eingetragenen Kraftstoffs einem B39-Kraftstoff entspricht, könnte der Kraftstoff B10 im stationärem Motorbetrieb durch Wärmeeinwirkung mit einer mittleren Temperatur von ca. 310 °C zu B39 verdampft worden sein.

3.3 Motoröl

Das vom Motorenhersteller zugelassene Motoröl mit der Bezeichnung „Titan GT1 Longlife III 5W-30“, das der VW Norm VW 507 00 entspricht, wurde von der Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH bereitgestellt.

4 Versuchsaufbau

4.1 Versuchsmotor

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

Die folgende **Tabelle 4-1** beinhaltet 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 0000422
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	Dieselmotortreibstoff nach EN 590
Emissionsklasse	Euro 5

Der 2,0-I-TDI-CR-4V-Motor basiert auf dem Aggregat 2,0-I-TDI-PD-4V. Er ist die Weiterentwicklung der TDI-Technologie von Volkswagen auf die Abgasanforderungen der Zukunft. 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 [4].

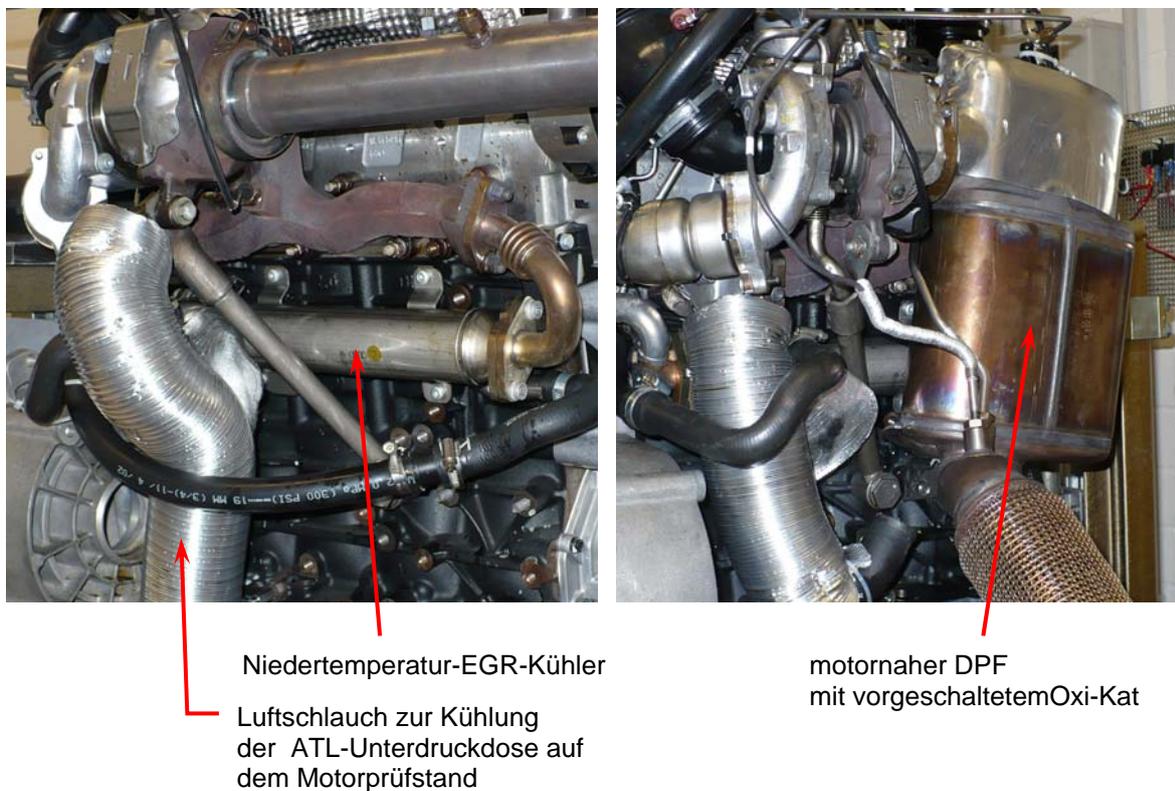


Bild 4-1: Niedertemperatur-EGR-Kühler (links) und motornaher DPF mit Oxi-Kat (rechts)

4.2 Motorprüfstand

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

Der Motor 2,0-l-TDI-CR-4V war über eine elastische Gelenkwelle mit der Bremseinrichtung von der Fa. Froude Hofmann, dem Wechselstrom-Dynamometer AC250F, verbunden. Dieser Wechselstrommotor kann im Antriebs- und Bremsmodus betrieben werden und verfügt über einen Vier-Quadranten-Regler.

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

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

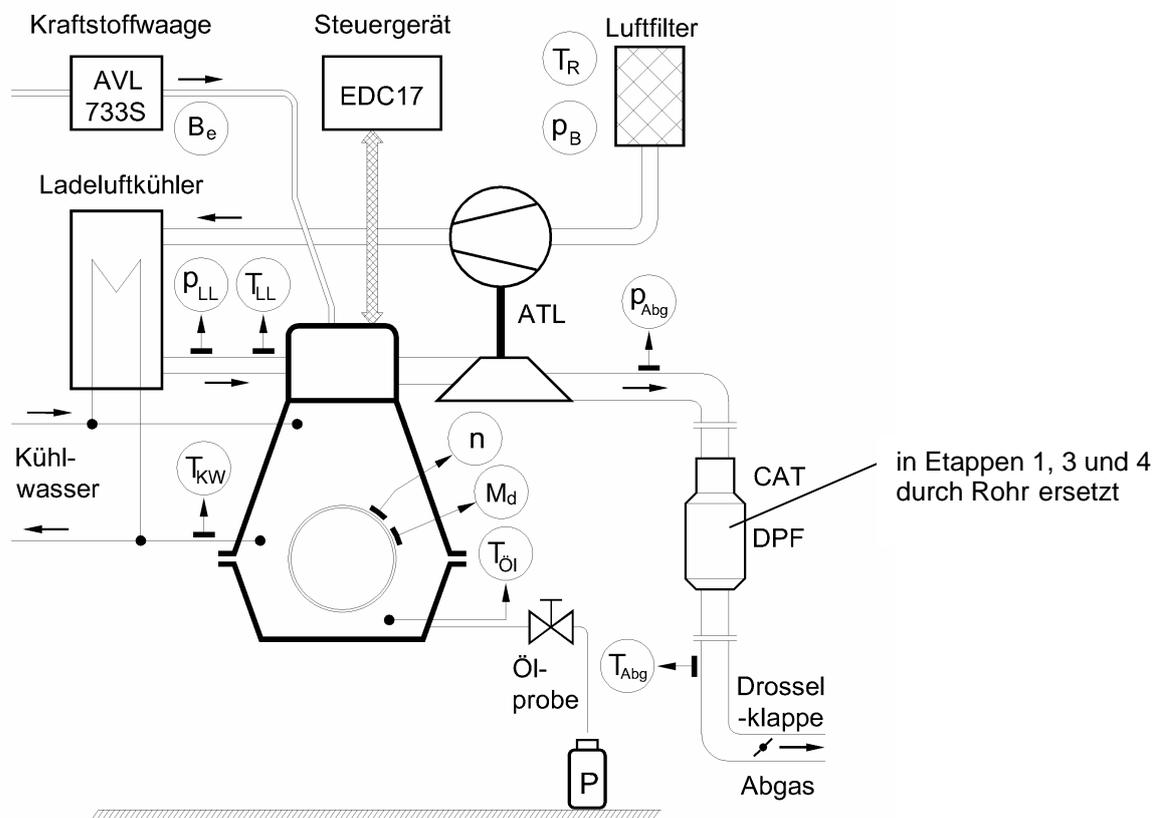


Bild 4-2: Motorprüfstand mit Abgasnachbehandlungsanlage und Messtechnik

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 733S zum Einsatz.

Die Motorsteuerung erfolgte mit dem serienmäßigen Steuergerät EDC 17. Daher konnten auch keine Motordaten aus dem Steuergerät ausgelesen werden. Lediglich für die Untersuchungen mit später Nacheinspritzung stand ein Applikationssteuergerät zur Verfügung.

Der im Abgasstrang dargestellte Dieselpartikelfilter mit vorgeschaltetem Oxi-Kat. kam nur bei den Untersuchungen mit später Nacheinspritzung sowie bei der Aufnahme der Volllastkurve zum Einsatz. Bei allen anderen Versuchen wurden der Dieselpartikelfilter mit vorgeschaltetem Katalysator durch ein glattes Rohr ersetzt und der Abgasgegendruck p_{Abg} mit der Abgasdrosselklappe (**Bild 4-3**) auf die in der **Tabelle 4-3** angegebenen Werte eingestellt. Damit wurde eine Anpassung an die im Pkw-Betrieb herrschenden Gegendruckwerte vorgenommen.

Um für die Kaltstartuntersuchungen eine schnelle Motorabkühlung zu erreichen, wurden der Kühlwasserthermostat des Motors offen blockiert und anstelle des externen Kühlsystems des Prüfstands ein Kühlaggregat und zusätzlich ein Lüfter eingesetzt (Bild 4-3), dessen Luftstrom die Ölwanne angeblasen hat. Mit der im Kühlaggregat installierten Pumpe wurde das Kühlwasser bei Motorstillstand durch den Motor gepumpt. Damit wurde der Motor innerhalb von ca. 80 min auf die für den Motorkaltstart erreichbare Raumtemperatur von 22 °C abgekühlt.

Während der Starts und der Leerlaufphasen war der Kühlwasserkreislauf vor dem Kühlaggregat blockiert, so dass das Kühlwasser trotz des offen blockierten Thermostaten nicht durch das Kühlaggregat fließen konnte sondern durch die Kühlwasserpumpe des Motors nur im Motor umgepumpt wurde.

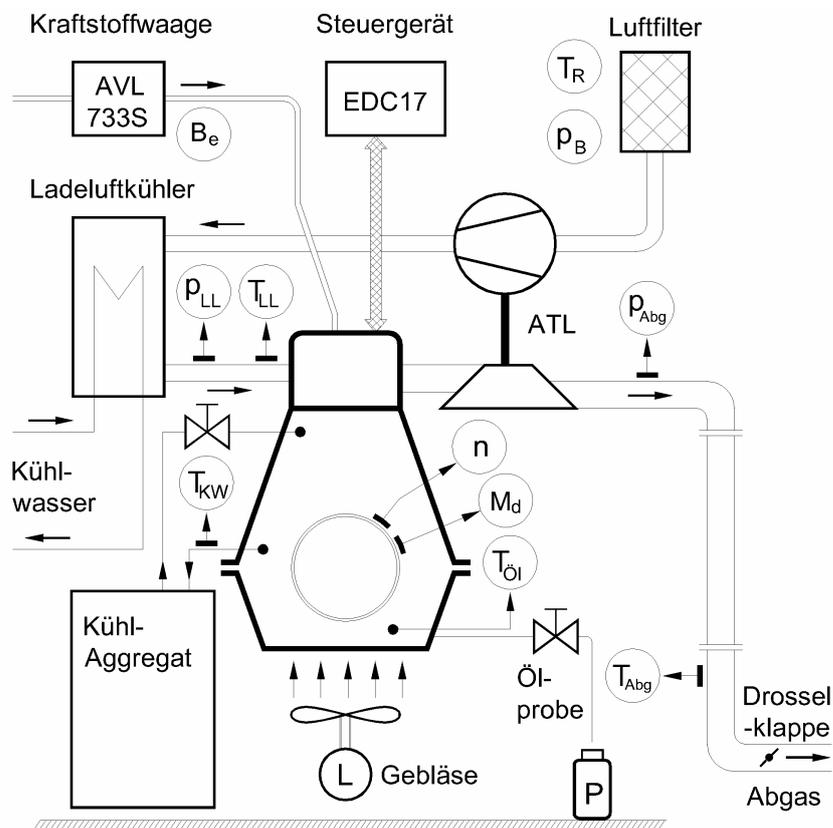


Bild 4-3: Motorprüfstand mit Zwangskühlung durch Kühlaggregat und Gebläse

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 Unterdruckdose an der Abdichtung des Verstellgestänges gerichtet war (Bild 4-1).

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Projektetappen

Die im Projekt vorgesehenen Prüfstandsversuche wurden in vier Etappen eingeteilt:

- Etappe 1:

Durchführung von Langzeituntersuchungen mit dem Mischkraftstoff B10 über eine Dauer von jeweils 80 Stunden der in der Tabelle 2-1 angegebenen Betriebspunkte BP1, BP2 und BP3 ohne späte Nacheinspritzung. Das Ziel war die Ermittlung der in den verschiedenen Betriebspunkten in Abhängigkeit von der Motorlaufzeit in das Motoröl eingetragenen RME- und DK-Anteile sowie deren Einfluss auf die Motorölviskosität.

- Etappe 2:

Ermittlung des Kraftstoffeintrags bei Motorbetrieb mit später Nacheinspritzung und dem Mischkraftstoff B10 bei Betriebspunkt BP1. Ziel war die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs des Eintrags von RME und DK über eine Dauer von 8 Betriebsstunden und dessen Einfluss auf die Motorölviskosität. Diese Untersuchung wurde dreimal durchgeführt.

- Etappe 3:

Untersuchungen des Kraftstoffaustrags von RME und DK aus dem Motoröl, dem vor Versuchsbeginn 15 Volumenprozent des Mischkraftstoffs B10 zugemischt worden waren. Der Motor wurde bei diesen Versuchen bei Betriebspunkt BP3 mit Dieselkraftstoff ohne Biodieselanteil (B0) und ohne Nacheinspritzung betrieben. Mit diesem Versuch sollte festgestellt werden, ob der bei Versuchsbeginn im Vergleich zum RME-Anteil im Kraftstoff B10 neunmal höhere DK-Anteil soweit aus dem Motoröl verdampft, dass der RME-Anteil größer als der DK-Anteil wird und wie die Ölviskosität durch den Kraftstoffaustrag beeinflusst wird. Es wurden zwei Prüfstandsläufe mit 32 und 64 Betriebsstunden durchgeführt.

- Etappe 4:

Untersuchung des Kraftstoffeintrags von B10 in das Motoröl bei 100 Motorkaltstarts bei Umgebungstemperaturen um 22 °C mit anschließendem Leerlaufbetrieb über jeweils 10 Minuten und Ermittlung der Ölviskosität in Abhängigkeit von der Startanzahl.

4.3.2 Versuchsablauf

Zeitlicher Ablauf:

Der zeitliche Ablauf der Prüfstandsversuche ist in der **Tabelle 4-2** enthalten.

Die Prüfstandsuntersuchungen wurden mit dem 32-Stunden-Lauf im Betriebspunkt BP3 ($n = 2000 \text{ 1/min}$, $M_d = 250 \text{ Nm}$) zum Kraftstoffaustrag begonnen. Das verwendete Motoröl Titan GT1 Longlife III 5W-30 war vor dem Lauf mit dem Kraftstoff B10 verdünnt worden. Der Kraftstoffanteil im Motoröl betrug 15 Volumenprozent.

Ölverdünnung:

Die Motorölfüllung betrug für jeden Prüflauf 3600 cm^3 , d. h. die Ölfüllung setzte sich für den Prüflauf zum Kraftstoffaustrag wie folgt zusammen:

- 3060 cm^3 Titan GT1 Longlife III 5W-30,
- 540 cm^3 Kraftstoff B10 (54 cm^3 RME, 486 cm^3 DK).

Entnahme der Ölproben

Während dieses Prüflaufs wurden nach jeweils ca. 2 Stunden Ölproben 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 Ölabnahmeeinrichtung.

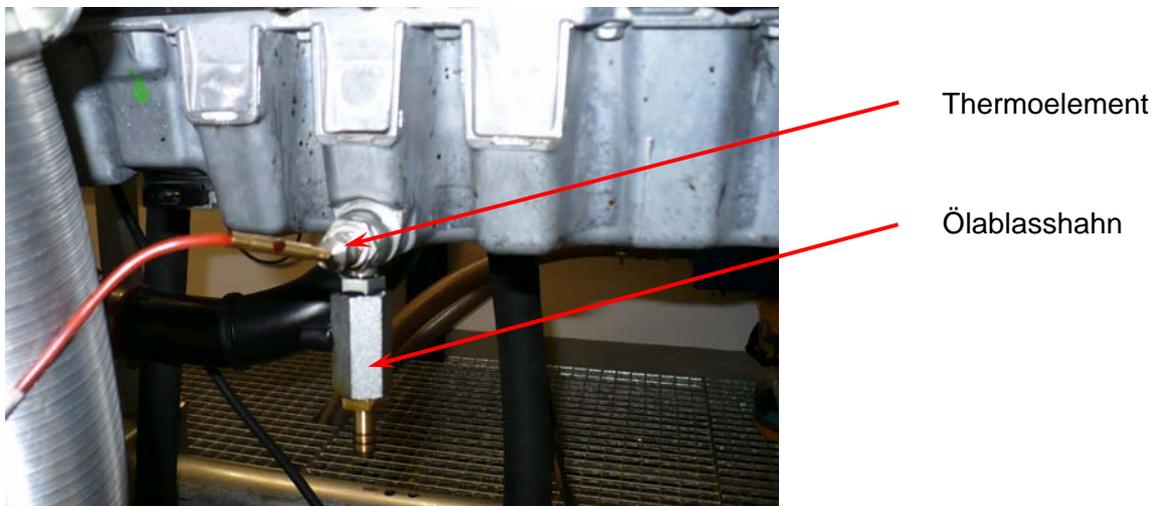


Bild 4-4: Ölprobenahme aus der Motorölwanne

Tabelle 4-2: Übersicht der im Jahr 2008 im Projekt durchgeführten Prüfstandsversuche

Etappe	Versuch	Aufgabe	von/bis:	März			April			Mai			Juni		
1	1 - 3	Kraftstoffeintrag 80 Stunden; 16 h/d, 3 BP Kraftstoff: B10		■								■			
1	1	BP1: 2140 1/min; 30 Nm	18.03.-26.03.		■										
1	2	BP2: 1000 1/min; 17 Nm	27.03.-03.04.			■									
1	3	BP3: 2000 1/min; 250 Nm	10.03.-17.03.	■											
1	W2	BP2: 1000 1/min; 17 Nm	29.05.-05.06.									■			
2	1 - 3	Kraftstoffeintrag 3 x 8 h; BP1: 2140 1/min; 30 Nm mit später Nacheinspritzung Kraftstoff: B10	21.04.-24.04.						■						
3	1 - 2	Kraftstoffaustrag BP3: 2000 1/min; 250 Nm Motoröl verdünnt mit 15 % B10 Kraftstoff: DK		■											■
3	1	32 h; BP3: 2000 1/min; 250 Nm	05.03.-06.03.	■											
3	2	64 h; BP3: 2000 1/min; 250 Nm	18.06.-24.06.											■	
4	1	Kraftstoffeintrag 100 x Kaltstart mit je 10 min Leerlauf Kraftstoff: B10	29.04. - 26.05.							■					
-	1	Vollastkurve mit DPF Kraftstoff: B10	26.06.												■

W: Wiederholung

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

In allen Prüfläufen wurde der Motor während der 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 Ölproben wurden auf 50 cm³/Probe begrenzt, um die Motorölfüllung so wenig wie möglich zu verringern, damit die Prüfläufe trotz der vielen Ölproben ohne Ölnachfüllung durchgeführt werden konnten.

Ölwechsel

Nach jedem Prüflauf wurden das Motorenöl bei betriebswarmem Motor abgelassen und der Motorölfilter gewechselt. Das Öl konnte anschließend mindestens 12 Stunden aus dem Motor austropfen, bevor der Motor neu mit Öl befüllt wurde.

Ölanalysen

Die während der Prüfläufe aus dem Motor entnommenen insgesamt 74 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 deren Ergebnisse an das IMS übergeben.

4.3.3 Betriebspunkte des Motors

Die in den vier Etappen vorgesehenen Betriebspunkte gemäß Tabelle 2-1 sowie die mit dem Kraftstoff B10 zum Abschluss der Untersuchungen aufgenommene Volllastkurve des Motors sind im **Bild 4-5** zu sehen.

Dieses Bild zeigt, dass der Betriebspunkt BP3 mit der Drehzahl von 2000 1/min und dem Drehmoment von 250 Nm bei nahezu 80 Prozent des maximalen Drehmoments liegt und somit eine erhebliche Motorbelastung darstellt. Die Betriebspunkte BP1 bzw. BP2 liegen mit 17 Nm bzw. 30 Nm in einem sehr niedrigen Belastungsbereich, so dass in diesen Betriebspunkten wie auch bei Leerlaufbetrieb ein Kraftstoffeintrag und kein Austrag zu erwarten war.

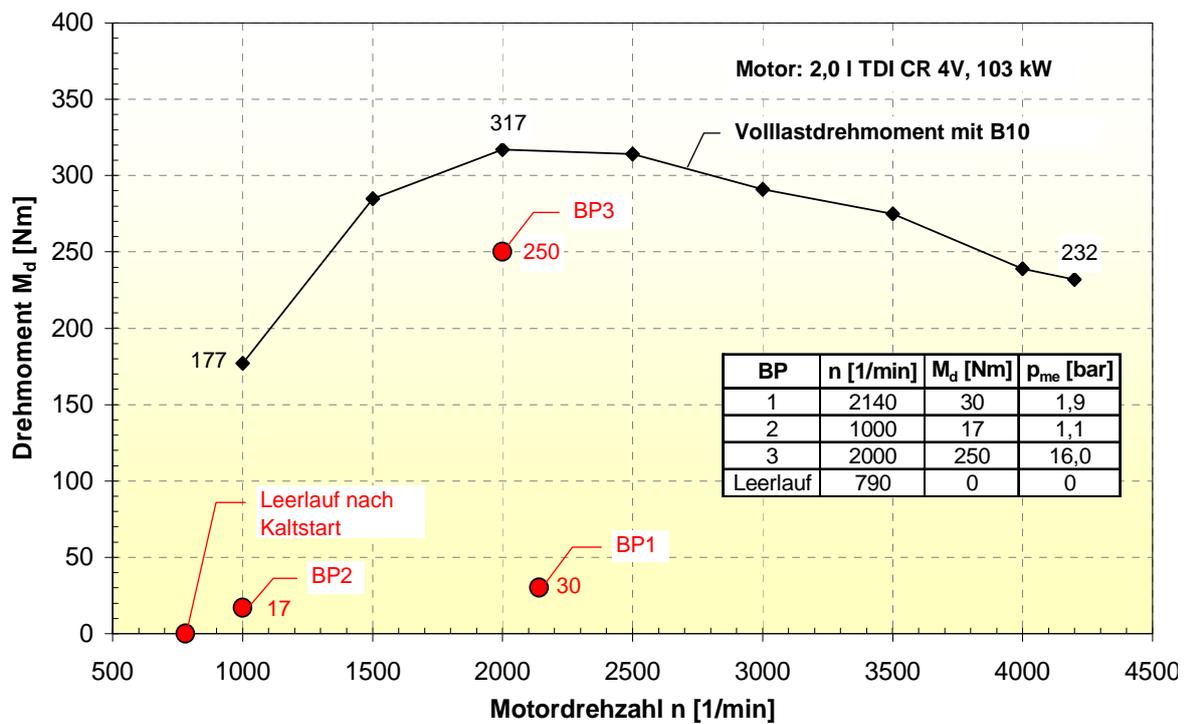


Bild 4-5: Betriebspunkte und Volllastkurve des Motors mit B10

4.3.4 Betriebskennwerte des Motors

Die **Tabelle 4-3** zeigt die während der stationären Prüfstandläufe aufgenommenen, gemittelten Betriebskennwerte des Motors in den vier verschiedenen Betriebspunkten sowie die verwendeten Kraftstoffe.

Alle Versuche zum Kraftstoffeintrag wurden mit dem Kraftstoff B10 gefahren. Nur für die Prüfstandläufe zum Kraftstoffauftrag in Etappe 3 kam DK ohne Zusatz von RME zum Einsatz.

Die Abgastemperaturwerte ohne späte Nacheinspritzung machen nochmals deutlich, dass nur im BP3 mit ca. 425 °C eine relativ hohe Motorbelastung vorlag. Im Leerlauf und in den Betriebspunkten BP1 und BP2 war das Temperaturniveau des Motors deutlich geringer.

In den Prüfläufen der Etappe 2 wird sichtbar, dass die späte Nacheinspritzung im BP1 die Abgastemperatur um ca. 380 °C auf ca. 588 °C und damit auf das für die Filterregeneration erforderliche Niveau erhöht hat. (Die Temperaturmessstelle war ca. 50 cm nach dem Partikelfilter in der Abgasleitung des Prüfstands installiert. Daher war dieser Temperaturwert niedriger als die in unmittelbarer Filternähe vom Steuergerät verarbeiteten Temperaturwerte).

Die Motoröltemperaturen erreichten erwartungsgemäß im BP3 den höchsten Wert von ca. 117 °C. In allen anderen Betriebspunkten blieben sie unterhalb von 100 °C.

In der Etappe 4 sind in der oberen Zeile die gemittelten Messwerte, die unmittelbar vor den 100 Motorstarts gemessen wurden und in der unteren Zeile die nach 10 Minuten im Leerlaufbetrieb unmittelbar vor dem Abstellen des Motors erreichten Mittelwerte angegeben.

Tabelle 4-3: Betriebskennwerte des Motors in den Etappen 1 bis 4

Etappe	Versuch	Beschreibung	Kraftstoff	BP [-]	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]	B _e [kg/h]
1	1	80 Std. Eintrag/Versuch	B10	1	2140	30	96	92	205	20	24	30	0,179	2,20
	2			2	1000	17	89	91	180	8	23	27	0,125	0,85
	W 2			3	1000	17	90	92	178	8	24	30	0,118	0,85
	3			3	2000	250	117	102	425	100	26	41	1,242	10,90
2	1	8 Std. Eintrag/Versuch mit später Nacheinspritzung	B10	1	2140	30	94	91	586	20	26	31	0,229	4,10
	2			1	2140	30	94	91	588	20	27	32	0,234	4,10
	3			1	2140	30	95	91	588	20	27	32	0,221	4,00
3	1	32 Std. Austrag	DK	3	2000	250	115	102	420	100	26	41	1,190	10,8
	W 1	64 Std. Austrag		3	2000	250	117	101	429	100	26	43	1,192	10,7
4	1	100 x Kaltstart mit jeweils 10 min Leerlauf	B10	Start Leerlauf	0 - 790	0 0	22 - 39	22 - 49	26 - 94	0 - 4	21 21	21 21	0 0	0 - 0,45

W: Wiederholung

Die folgenden Bilder zeigen einerseits die Unterschiede im Temperaturniveau des Motors in den verschiedenen Prüfläufen der vier Etappen und zeigen andererseits, dass sich nach ca. einer halben Stunde nach Beginn der Prüfläufe in den Etappen 1 bis 3 stabile Temperaturwerte eingestellt haben.

Kraftstoffeintrag ohne Nacheinspritzung (Etappe 1)

Im **Bild 4-6** sind die Motordrehzahl, die Abgas-, die Öl- und die Kühlwassertemperatur der ersten 16 Betriebsstunden des 80-Stundenlaufs im Betriebspunkt BP2 zum Kraftstoffeintrag mit dem Kraftstoff B10 dargestellt. Der 80-Stunden-Prüflauf wurde an 5 Tagen mit der im Bild eingetragenen Prüflaufzeit von jeweils 16 Stunden pro Tag durchgeführt.

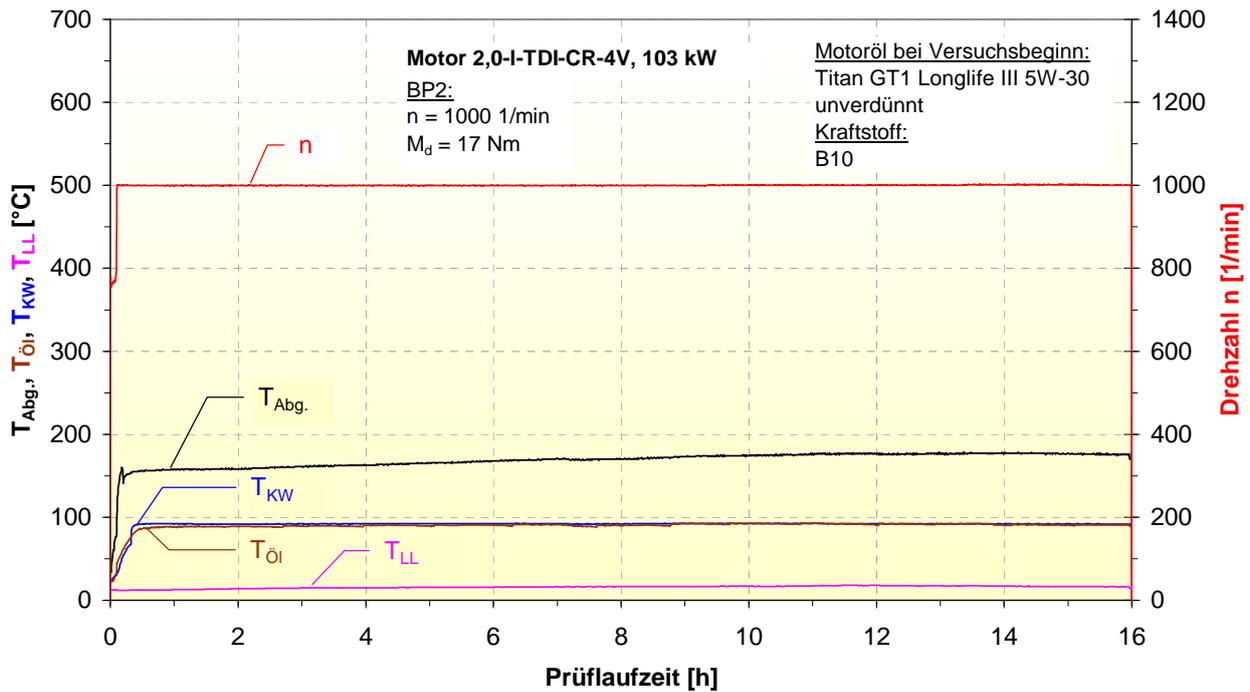


Bild 4-6: Motorkennwerte aus dem 80-Stunden-Prüflauf zum Kraftstoffeintrag im BP2 mit B10

Bei der konstanten Drehzahl von 1000 1/min und dem Drehmoment von 17 Nm ($p_{me} = 1,1$ bar) wurden die Abgastemperaturen mit ca. 180 °C, die Öl- und die Kühlwassertemperaturen mit ca. 90 °C gemessen. Die Ladelufttemperatur war mit dem wassergekühlten Ladeluftkühler auf ca. 30 °C eingestellt.

Kraftstoffeintrag im Regenerationsmodus mit Nacheinspritzung (Etappe 2)

Das **Bild 4-7** zeigt bei der Drehzahl von 2140 1/min und dem Drehmoment von 30 Nm ($p_{me} = 1,9$ bar), die Abgas-, die Öl- und die Kühlwassertemperaturen in dem 8-Stunden-Prüflauf zum Kraftstoffeintrag im Betriebspunkt BP1 mit später Nacheinspritzung.

Nach der etwa halbstündigen Erwärmungsphase des Motors erreichte die Abgastemperatur durch die späte Nacheinspritzung ca. 65 cm nach dem Partikelfilter 590 °C. Während der gesamten restlichen Prüflaufzeit wurde der Motor bei $n = 2140$ 1/min dauernd mit später Nacheinspritzung betrieben. Die Öl- und die Kühlwassertemperatur stellten sich auf ca. 95 °C bzw. 91 °C ein. Die im Bild 4-8 zu sehenden Drehzahlverringerungen auf die Leerlaufdrehzahl wurden zur Entnahme der Ölproben vorgenommen.

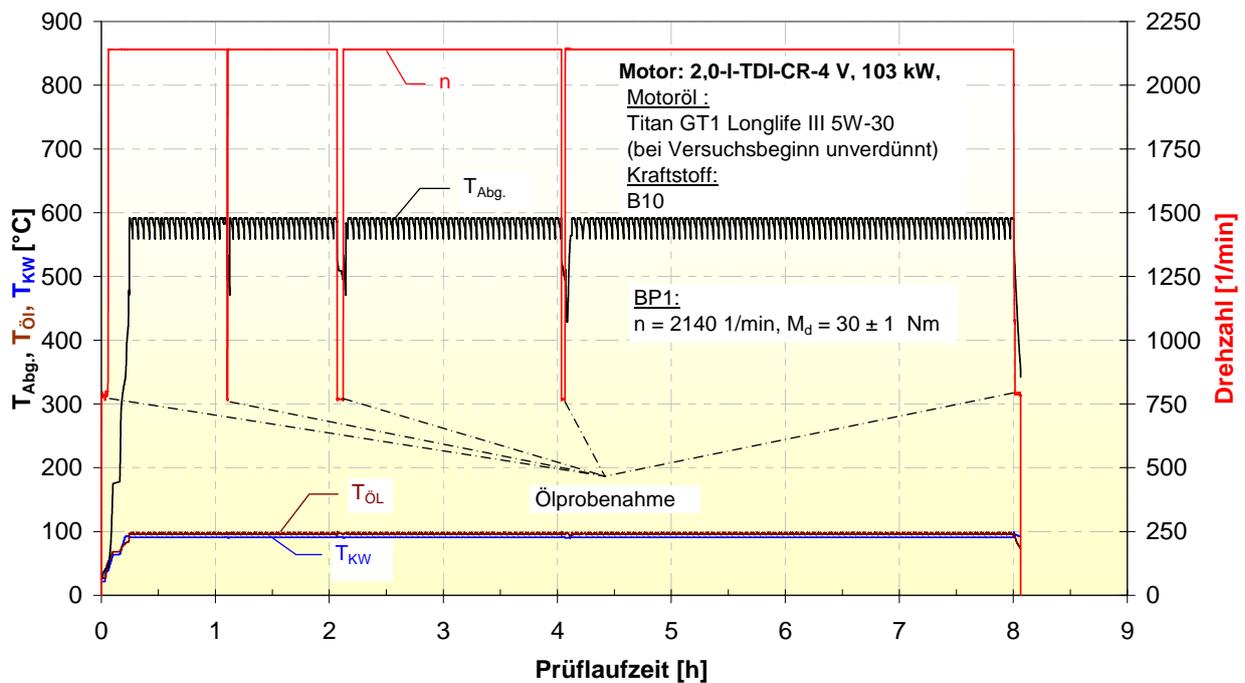


Bild 4-7: Temperatur- und Drehzahlverlauf im 8-h-Lauf zum Kraftstoffeintrag im Betriebspunkt BP1 mit später Nacheinspritzung

Für die drei 8-Stunden-Prüfläufe im Regenerationsmodus mit später Nacheinspritzung stand ein Applikationssteuergerät zur Verfügung. Dadurch war das Auslesen der z. B. im **Bild 4-8** dargestellten Daten möglich. Im Regenerationsmodus wurde der Motor mit zwei Nacheinspritzungen gefahren. Das Bild enthält in der vorletzten Zeile jedoch nur die momentane Einspritzmenge der zweiten späten Nacheinspritzung.

InjCtl_qSetUnBal	7.2700 [mg/hub]	← Einspritzmenge Haupteinspritzung
CoEOM_stOpModeAct	110002 [hex]	← Modus (110002=permanente NE)
PFFitLd_mSot	0.0700 [g]	← Partikelfilterbeladung
PFFit_tInrDes	487.360 [deg C]	← Sollwert vor Turbine
Exh_tAdapTTrbnUs	489.060 [deg C]	← Istwert vor Turbine
PFFit_tOutrDes	635.560 [deg C]	← Sollwert vor Partikelfilter
Exh_tAdapTPFFitUs	635.560 [deg C]	← Istwert vor Partikelfilter
Exh_tAdapTPFFitDs	610.360 [deg C]	← Istwert nach Partikelfilter
InjCrv_qPoI1Des_mp	6.1100 [mg/hub]	← Einspritzmenge späte Nacheinspritzung
LSU_rLam_[0]	1.43000 [-]	← Lambda

Bild 4-8: Motordaten des Applikationssteuergeräts im 8-h-Lauf zum Kraftstoffeintrag im Betriebspunkt BP1 bei später Nacheinspritzung

Die Mengen der einzelnen Einspritzungen haben geschwankt. Dabei erfolgte die erste Nacheinspritzung im Mittel mit 5,5 mg/Hub bei 40 bis 60 °KW nach OT und die zweite bei 200 °KW nach OT im Mittel mit ebenfalls 5,5 mg/Hub. Die Einspritzmenge der Haupteinspritzung lag im Mittel bei 7,6 mg/Hub.

Das Bild zeigt, dass die Istwerte der gemessenen Temperaturen sehr gut mit den Sollwerten übereinstimmen. Daraus ist zu folgern, dass der Motorbetrieb ordnungsgemäß erfolgte und bei den Prüfläufen unverfälschte Ergebnisse zu erwarten waren.

Der Partikelfilter war neu und daher unbeladen. Die vom Steuergerät ausgelesene Abgastemperatur nach dem Filter war niedriger als die vor dem Filter. D. h., dass keine Rußoxidation erfolgt ist.

Kraftstoffaustrag aus dem mit 15 % B10 verdünnten Motoröl (Etappe 3)

Im **Bild 4-9** sind die Motordrehzahl, die Abgas-, die Öl- und die Kühlwassertemperatur der ersten 16 Betriebsstunden des 64-Stundenlaufs im Betriebspunkt BP3 zum Kraftstoffaustrag aus dem verdünnten Motoröl dargestellt. Das Motoröl war vor Prüflaufbeginn mit 15 Volumenprozent B10 verdünnt worden. Als Kraftstoff wurde DK eingesetzt.

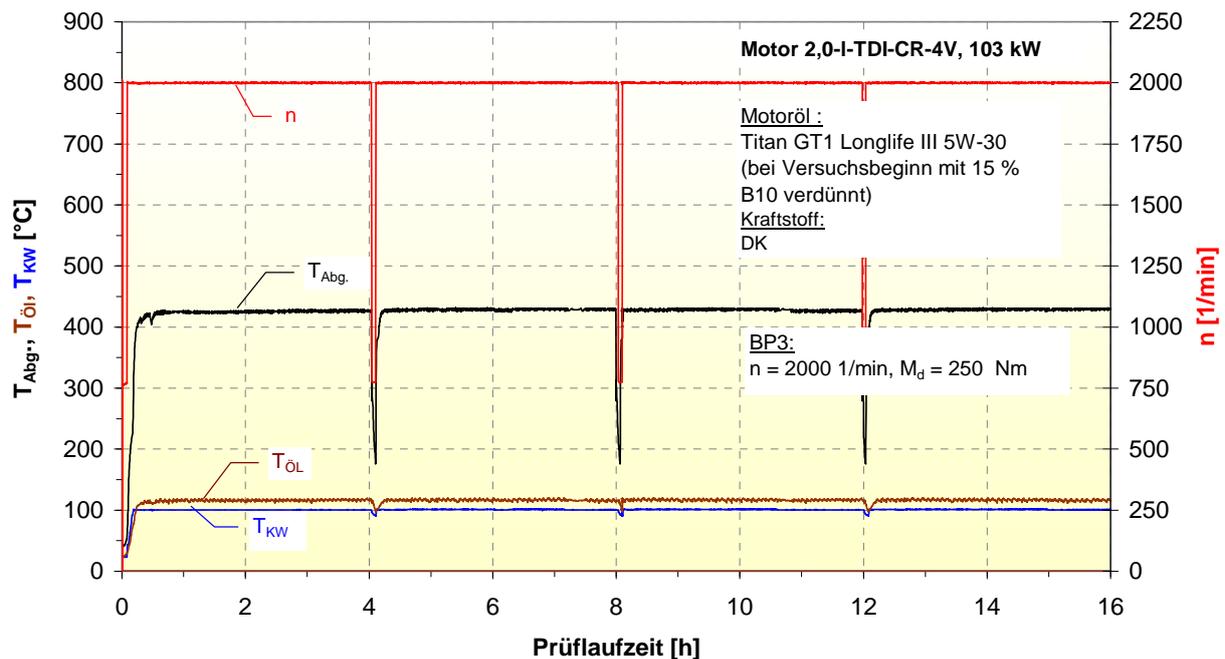


Bild 4-9: Temperatur- und Drehzahlverlauf im 64-h-Prüflauf zum Kraftstoffaustrag im Betriebspunkt BP3 mit DK (erste 16 h)

Bei der konstanten Drehzahl von 2000 1/min und dem Drehmoment von 250 Nm ($p_{me} = 16,0$ bar) wurden die Abgastemperaturen mit ca. 430 °C und die Öl- bzw. Kühlwassertemperatur mit ca. 117 °C bzw. mit ca. 100 °C gemessen.

Es wurden ein 32-Stunden- und ein 64-Stunden-Prüflauf gefahren. Bei jedem Lauf wurden 17 Ölproben genommen, d.h. zu Beginn des Laufs und anschließend alle zwei bzw. vier Stunden.

Kraftstoffeintrag bei Motorstart mit anschließendem Leerlauf (Etappe 4)

Im **Bild 4-10** sind die sich nach dem Motorstart anschließende 10-minütige Leerlaufphase und die Abkühlphase des Motors dargestellt. Bei der Leerlaufdrehzahl von ca. 790 1/min wurde das Abgas bis auf 94 °C, das Motoröl bis auf 48 °C und das Kühlwasser auf 40°C erwärmt. Durch Einsatz des Kühlaggregats zur Kühlung des Motorkühlwassers bei offen blockiertem Thermostaten sowie durch den Lüfter unter der Motorölwanne wurden die vor dem Start gemessenen Motortemperaturen bereits nach ca. 78 Minuten nach dem Abstellen des Motors erreicht. Somit konnten in 8 Stunden bis zu 4 Starts absolviert werden.

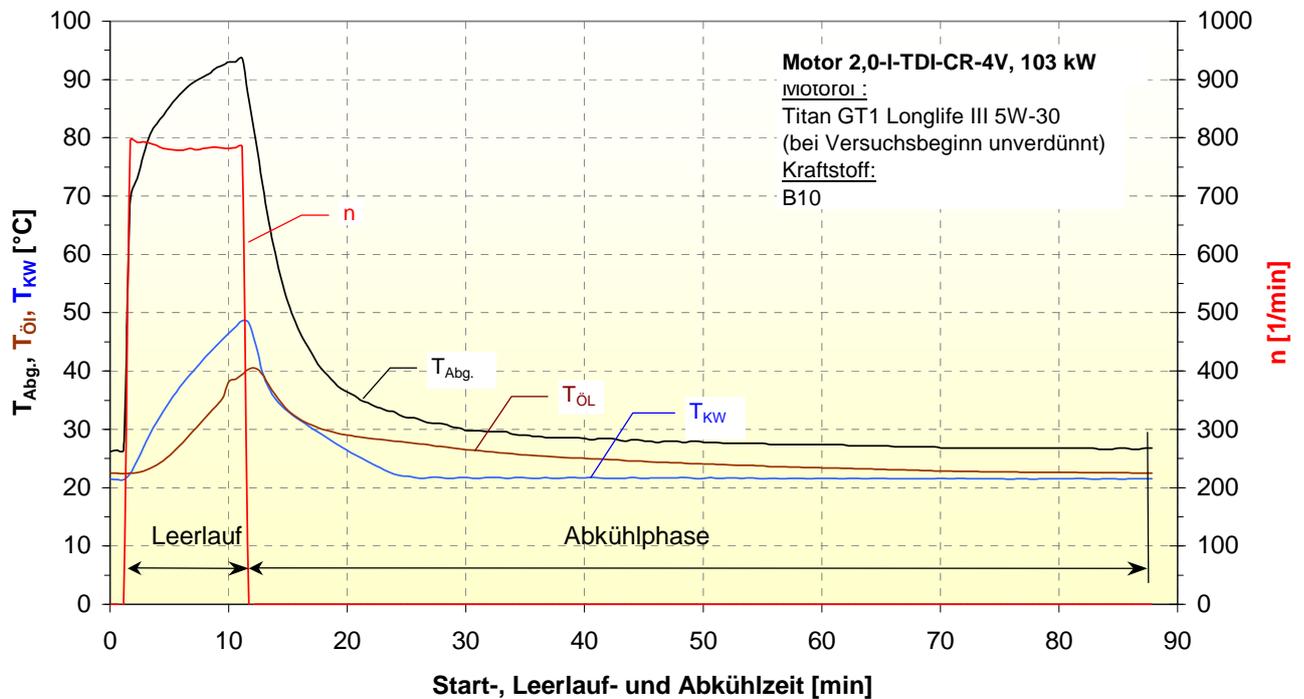


Bild 4-10: Temperatur- und Drehzahlverlauf bei Start, Leerlauf mit B10 und in der Abkühlphase

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 Untersuchungen

6.1 Kraftstoffeintrag ohne späte Nacheinspritzung (Etappe 1) bei Motorbetrieb mit B10

In den in Tabelle 2-1 angegebenen Betriebspunkten BP1, BP2 und BP3 wurde im stationären Motorbetrieb über eine Prüflaufzeit von 80 Stunden untersucht, wie die in das Motoröl eingetragenen RME- und DK-Anteile von der Motorbelastung abhängen und wie die Konzentration des eingetragenen Kraftstoffs die Motorölviskosität beeinflusst.

6.1.1 Kraftstoffkonzentration im Motoröl bei den Prüfläufen in den Betriebspunkten BP1, BP2 und BP3

Im Bild 6-1 sind die zum Abschluss der 80-Stunden-Prüfläufe im Motoröl enthaltenen RME- und DK-Anteile sowie die Gesamtkraftstoffkonzentrationen dargestellt.

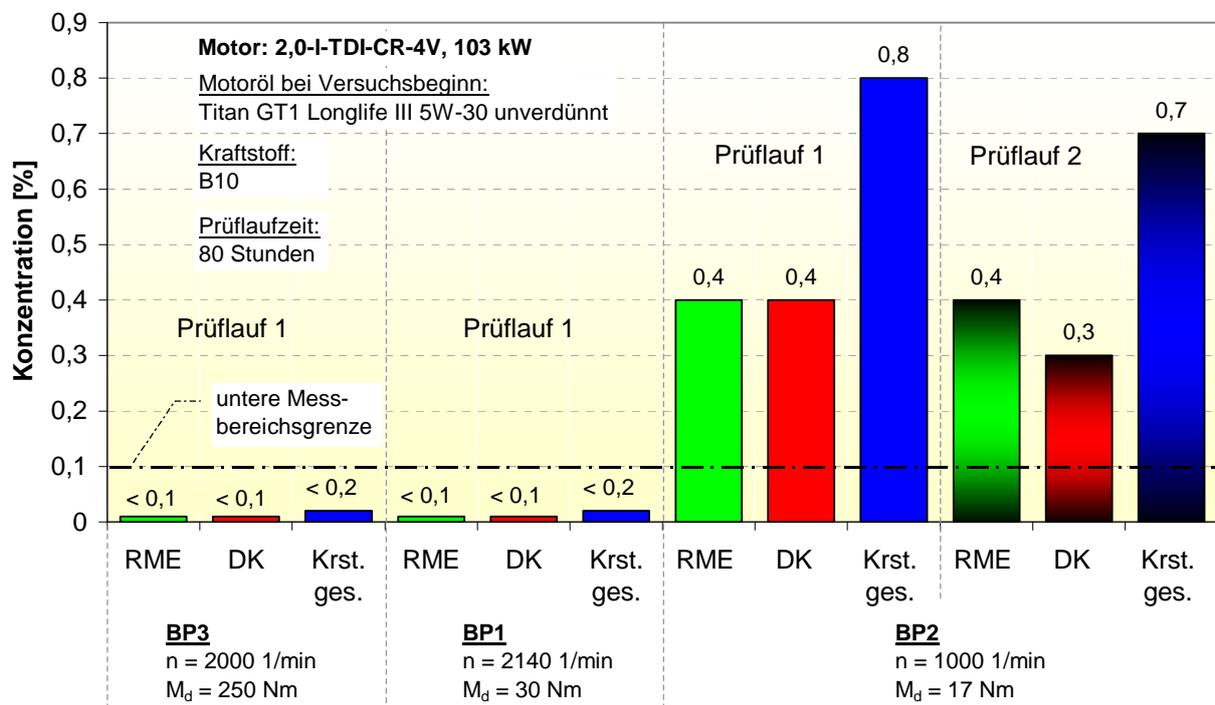


Bild 6-1: Kraftstoffeintrag während des 80-Stunden-Prüflaufs in das Motoröl in Abhängigkeit von der Motorbelastung in den Betriebspunkten BP 1, BP2 und BP3 mit B10

In den beiden Betriebspunkten BP3 und BP1 erfolgte jeweils ein Prüflauf über 80 Stunden. In beiden Betriebspunkten konnte bei den Mitteldruckwerten des Motors von 16,0 bar bzw. 1,9 bar mit dem gaschromatographischen Verfahren kein Kraftstoff im Öl nachgewiesen werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die untere Messbereichsgrenze des Verfahrens bei einem Massenkonzentrationswert von etwa 0,1 % lag. Die nachgewiesenen Konzentrationen lagen darunter.

Der Betriebspunkt BP2 mit $n = 1000$ 1/min und $M_d = 17$ Nm ergab beim ersten Prüflauf einen Kraftstoffeintrag von 0,8 % Gesamtkraftstoff. Die RME- und DK-Anteile wurden in gleicher Größe mit jeweils 0,4 % ermittelt.

Nach zwei Monaten wurde der Prüflauf mit nahezu gleichem Endergebnis wiederholt (Prüflauf 2). Der Gesamtkraftstoffeintrag betrug 0,7 %, wobei der RME-Anteil mit 0,4% und der DK-Anteil mit 0,3 % gemessen wurden.

Im **Bild 6-2** ist der zeitliche Verlauf der in das Motoröl eingetragenen Kraftstoffanteile bei Betrieb des Motors mit B10 im Betriebspunkt BP2 über der Prüflaufzeit aufgetragen, wobei jeder eingetragene Messpunkt das Analyseergebnis einer Ölprobe ist. Die Konzentrationen der Kraftstoffe im Motoröl der Prüfläufe in den Betriebspunkten BP3 und BP1 waren in allen Ölproben zu den Prüflaufzeiten 0, 20, 40 und 80 Stunden stets < 0,1 %. Daher sind die Werte im Bild 6-2 für diese beiden Betriebspunkte nicht dargestellt sondern nur die Werte für den mit sehr niedriger Last betriebenen Punkt BP2.

Vergleicht man die Konzentrationsverläufe beider Prüfläufe im BP2, die mit PL1 und mit PL2 gekennzeichnet sind, ist zu erkennen, dass die Konzentrationen der beiden Versuche Unterschiede von nur etwa 0,1 % aufweisen. Dabei sind die Werte, die mit < 0,1 % ermittelt wurden, im Diagramm mit dem Wert Null eingetragen. Dadurch weisen die RME- und DK-Konzentrationskurven beider Läufe im Bereich niedriger Konzentrationen am Anfang der Prüfläufe größere Abweichungen als gegen Prüflaufende auf.

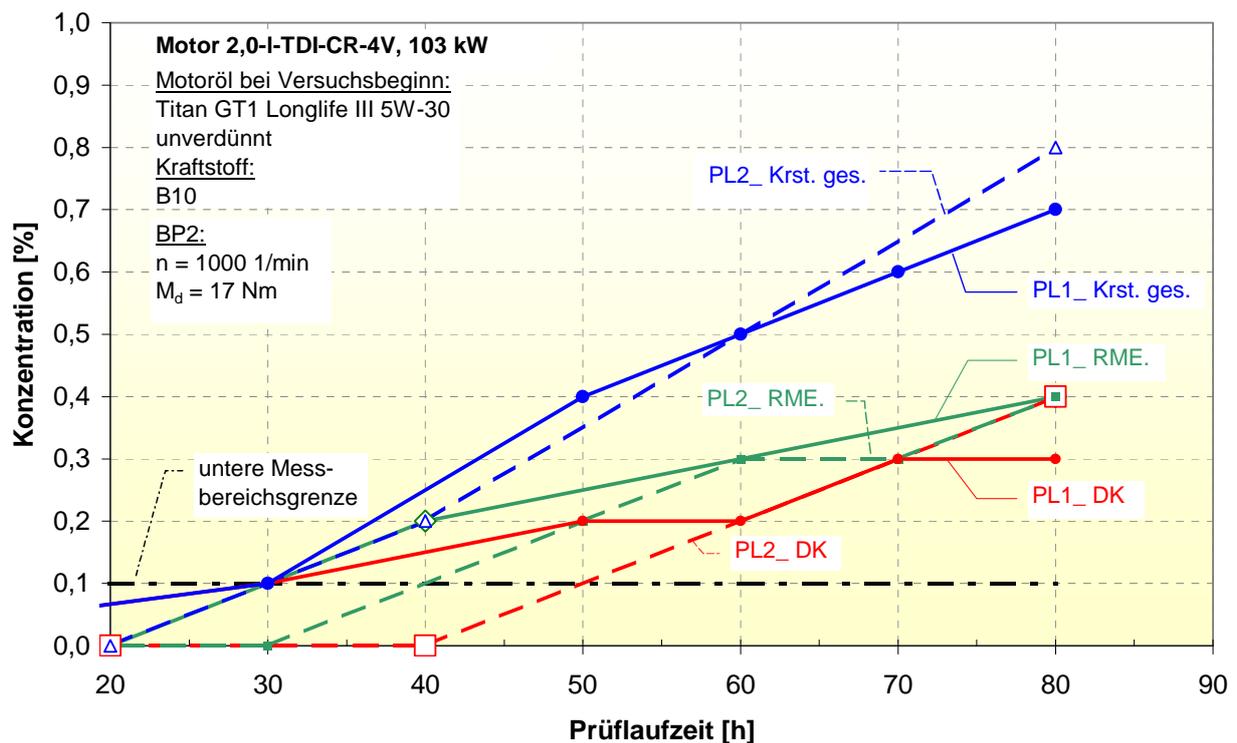


Bild 6-2: Kraftstoffeintrag in das Motoröl für zwei Prüfläufe im BP2 mit B10 in Abhängigkeit von der Prüflaufzeit

Im **Bild 6-3** sind die Konzentrationen der RME- und DK-Anteile sowie der gesamten Kraftstoffmengen im Motoröl, die nach Abschluss der beiden Prüfläufe PL1 und PL2 mit B10 im BP2 ermittelt wurden, einander gegenüber gestellt. Zusätzlich sind die Konzentrationsmittelwerte aus den beiden Prüfläufen eingetragen.

Während die RME-Konzentrationen im Öl der beiden Läufe mit 0,4 % den gleichen Wert hatten, wurde die DK-Konzentration im zweiten Prüflauf (PL2) mit 0,3 % und somit um 0,1 % niedriger als im ersten Prüflauf (PL1) ermittelt. Daher ergab sich ein Mittelwert der Gesamtkraftstoffkonzentration aus beiden Prüfläufen von 0,75 %.

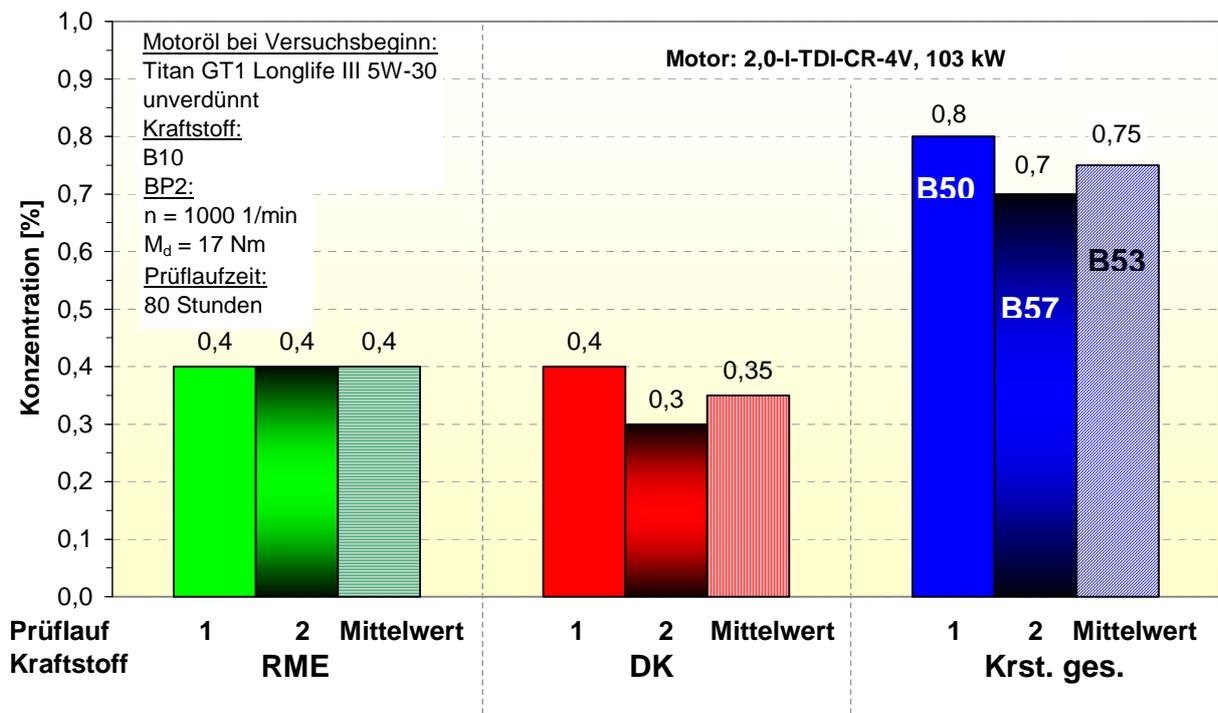


Bild 6-3: Kraftstoffeintrag in das Motoröl in zwei Prüfläufen im Betriebspunkt BP2 mit B10 nach Prüflaufzeiten von jeweils 80 Stunden

Der im ersten Prüflauf in das Öl eingetragene Kraftstoff entsprach aufgrund der RME- und DK-Anteile einem B50, im zweiten Lauf einem B57 und im Mittel beider Läufe einem B53.

Die mittlere Konzentrationszunahme pro Betriebsstunde betrug bei Verwendung des Kraftstoffs B10 in dem Betriebspunkt BP2 bei RME 0,0050 %, bei DK 0,0044 % und bei dem Gesamtkraftstoff 0,0094 %.

6.1.2 Einfluss des Kraftstoffeintrags auf die Motorölviskosität

Im **Bild 6-4** sind die Ergebnisse der Viskositätsprüfung der Ölproben der 80-Stunden-Prüfläufe mit dem Kraftstoff B10 in den Betriebspunkten BP1, BP2 und BP3 dargestellt. Die Proben waren bei Prüflaufzeiten von 0, 20, 40 und 80 Stunden entnommen worden. Die Viskosität wurde bei der Öltemperatur von 40 °C (V40°) und 100 °C (V100°) ermittelt.

Das Frischöl hatte bei der Temperatur von 40 °C eine Viskosität von 69,4 mm²/s und bei 100 °C eine Viskosität von 11,6 mm²/s.

Die Ergebnisse der bei 40 °C gemessenen Viskositäten zeigen, dass mit abnehmender Motorbelastung die Viskositätswerte durch zunehmenden Kraftstoffeintrag geringer werden. Die größte Viskositätsverringering wurde beim Prüflauf im BP2 nachgewiesen. Nach 80 Stunden betrug die Viskosität bei 40 °C noch 63,3 mm²/s. In diesem Betriebspunkt war nach Bild 6-1 (Prüflauf 1) auch ein deutlicher Kraftstoffeintrag festgestellt worden. Zum Ende des Prüflaufs war im BP3 hingegen der Viskositätswert so hoch wie zum Prüflaufbeginn. Das bestätigt, dass bei Motorbetrieb im BP3 mit der Drehzahl n = 2000 1/min und dem Drehmoment M_d = 250 Nm kein Kraftstoff in das Öl eingetragen wurde.

Für den Lauf im BP1 ist bei der Öltemperatur von 40 °C eine geringfügige Viskositätsabsenkung über der Laufzeit zu erkennen. Der offensichtlich sehr geringe Kraftstoffeintrag als Ursache für diese Viskositätsabsenkung konnte bei der gaschromatographischen Analyse nicht nachgewiesen werden (Bild 6-1).

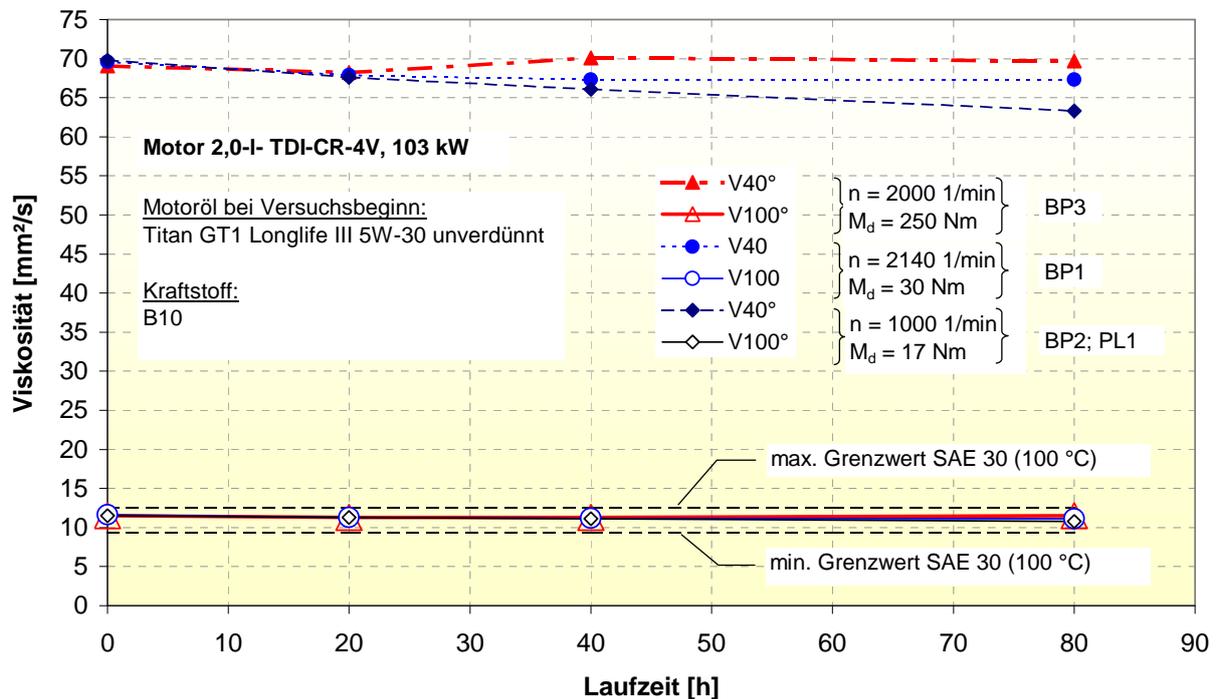


Bild 6-4: Ölviskosität der Prüfläufe mit B10 in den Betriebspunkten BP1, BP2 und BP3

Bei der für den Motorbetrieb bedeutenderen Öltemperatur von 100 °C war der Einfluss des Kraftstoffeintrags auf die Viskosität deutlich geringer. Die Viskositätskurven im unteren Bildabschnitt liegen nahezu übereinander. Die Ölviskosität des Laufs im Schwachlastbetriebspunkt BP2, in dem auch der Öleintrag nachgewiesen wurde, betrug am Anfang 11,5 mm²/s und wurde zum Ende Laufs noch mit 10,8 mm²/s gemessen. Damit lag die Viskosität des verdünnten Öls in allen drei Prüfläufen noch innerhalb der für ein SAE 30-Öl zulässigen Viskositätsgrenzwerte von 9,3 bis 12,45 mm²/s.

Im **Bild 6-5** sind die Viskositätswerte der in dem Schwachlastbetriebspunkt BP2 mit dem Kraftstoff B10 durchgeführten beiden Prüfläufe gegenüber gestellt. Sowohl bei der Öltemperatur von 40 °C als auch bei 100 °C sind die Viskositätswerte beider Läufe nahezu deckungsgleich. Das zeigt einerseits, dass der Motor in den beiden Läufen, die in einem zeitlichen Abstand von etwa 2 Monaten erfolgten, ein stabiles Verhalten aufgewiesen hat und bedeutet andererseits, dass die nur gering von einander abweichenden Konzentrationswerte beider Prüfläufe in Bild 6-3 vertrauenswürdig sind.

Durch den im Schwachlastbetriebspunkt BP2 mit einer Konzentration von 0,75 % in das Motoröl eingetragenen Kraftstoff wurde in beiden mit B10 durchgeführten 80-Stunden-Prüfläufen die Ölviskosität bei 100 °C von 11,5 mm²/s auf 10,8 mm²/s und somit um 6,1 % verringert. Diese Viskositätsverringernung bewegte sich noch in dem für ein SAE 30-Öl zulässigen Bereich.

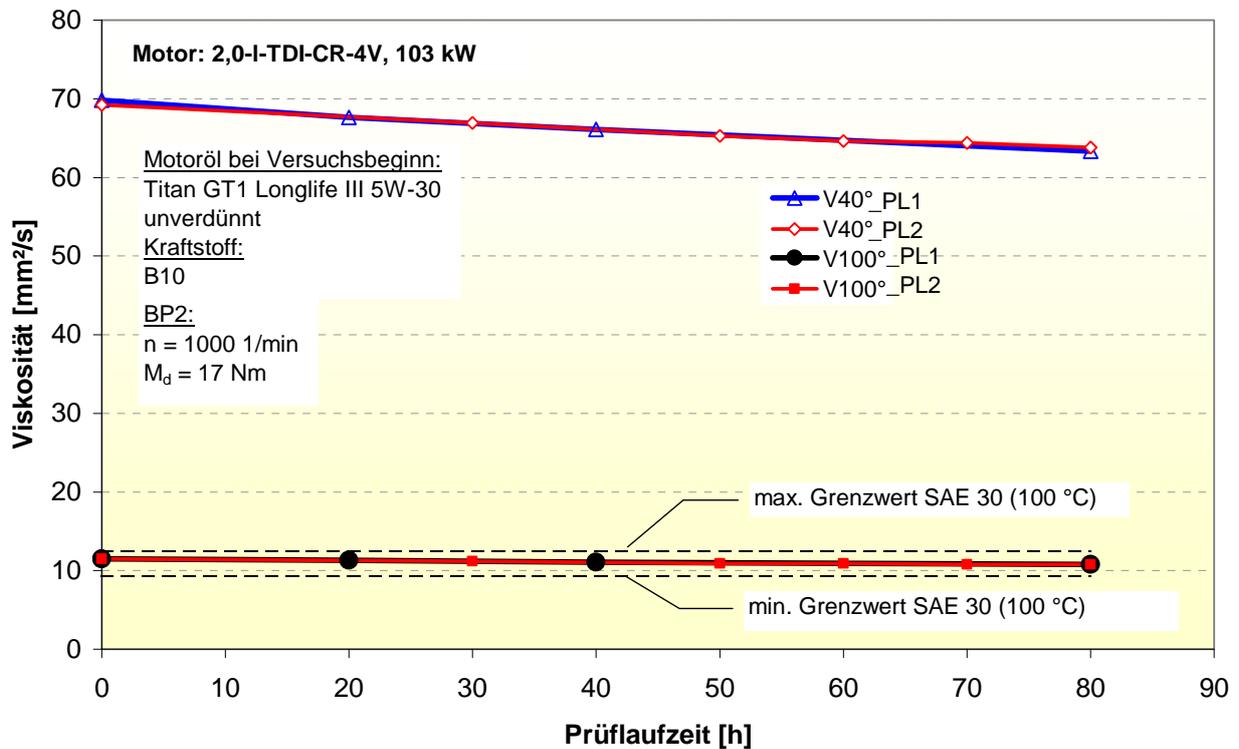


Bild 6-5: Ölviskosität der zwei Prüfläufe mit B10 im Betriebspunkt BP2

6.2 Kraftstoffeintrag in das Motoröl im Regenerationsmodus (Etappe 2) bei Motorbetrieb mit B10

6.2.1 Kraftstoffkonzentration im Motoröl bei drei Prüfläufen im BP1 mit später Nacheinspritzung

Der Prüflauf mit später Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1 wurde insgesamt dreimal gefahren. Die Prüflaufzeit betrug jeweils 8 Stunden. Nach dem Motorstart und einer kurzen Erwärmungsphase wurde der Motor über nahezu 8 Stunden im Regenerationsmodus betrieben. Dieser wurde nur für die Ölprobenahme, die bei 0, 1, 2, 4 und 8 Stunden bei Leerlaufbetrieb erfolgte, unterbrochen.

Die Ergebnisse der aus den Ölproben gaschromatographisch ermittelten Kraftstoffkonzentrationen der drei Prüfläufe PL1, PL2 und PL3 sind im **Bild 6-6** zu sehen.

In diesem Bild fällt auf, dass die Kraftstoffkonzentrationen am Beginn der drei Prüfläufe nicht gleich sind. D. h., dass schon beim Start des zweiten und insbesondere des dritten Laufs eine messbare Ölverdünnung vorgelegen hat. Diese Ölverdünnung aus dem vorangegangenen Prüflauf ließ sich durch den üblichen Öl- und Ölfilterwechsel nicht vermeiden. Da die Ölproben der drei Läufe erst nach Abschluss des dritten Prüflaufs gleichzeitig zur Untersuchung zum Analytiklabor geschickt werden konnten, wurde erst nach Abschluss der Etappe 2 bei der Analyse festgestellt, dass durch den hohen Kraftstoffeintrag beträchtliche Kraftstoffmengen beim Öl- und Ölfilterwechsel im Motor verbleiben, wenn man auf die Motorspülung verzichtet. So begann der dritte Prüflauf bereits mit Konzentrationswerten von 0,3 % RME-, 0,5 % DK- und 0,8 % Gesamtkraftstoffeintrag. Beachtet man die unterschiedlichen Anfangskonzentrationen, so erkennt man dennoch einen relativ gute Übereinstimmung der Messergebnisse.

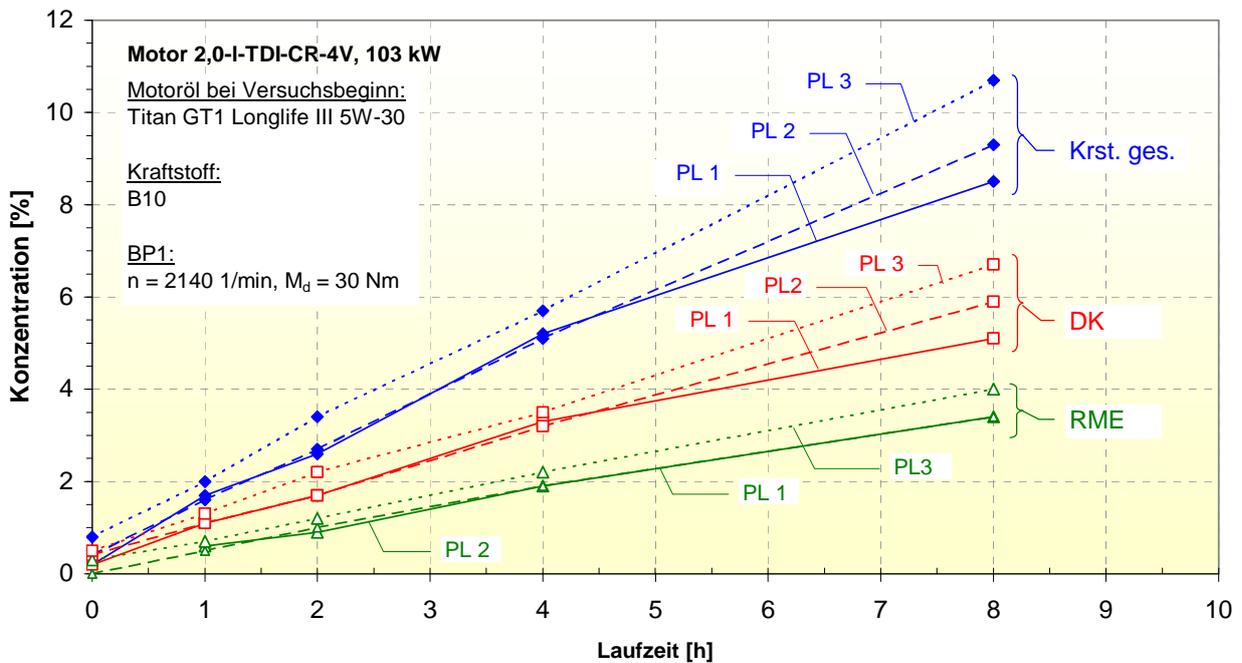


Bild 6-6: Kraftstoffeintrag in das Motoröl von drei Prüfläufen mit später Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1 mit B10 in Abhängigkeit von der Prüflaufzeit

Um die Ergebnisse mit anderen Messungen vergleichbar zu machen, wurden die Konzentrationen der ersten Ölprobe zu Beginn der drei Läufe für das folgende **Bild 6-7** auf den Wert Null korrigiert und der jeweils erforderliche Korrekturwert bei allen weiteren Konzentrationsmesspunkten des betrachteten Prüflaufs ebenfalls berücksichtigt. Die auf diese Weise korrigierten Messwerte wurden für die Mittelwertbildung der drei Prüfläufe im Bild 6-7 benutzt.

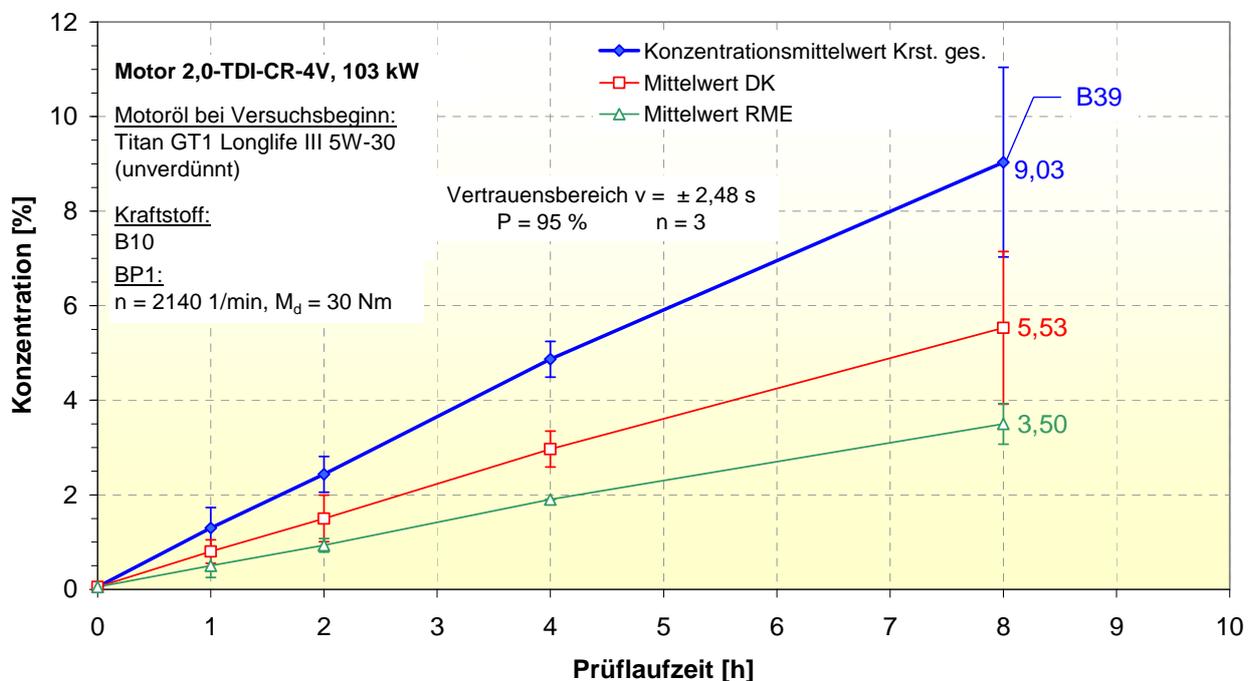


Bild 6-7: Mittelwerte der Kraftstoffkonzentration aus drei Prüfläufen mit B10 im Betriebspunkt BP1 mit später Nacheinspritzung

Das Bild zeigt, dass die Konzentrationen erwartungsgemäß nahezu linear mit der Prüflaufzeit zugenommen haben. Während der 8-Stunden-Prüfläufe nahmen die Konzentrationsmittelwerte von RME um 3,5 %, von DK um 5,5 % und folglich vom eingetragenen Kraftstoff insgesamt um 9 % zu.

Der eingetragene Kraftstoff entsprach im Mittel der drei Läufe einem B39. Die mittlere Konzentrationszunahme pro Betriebsstunde betrug bei Verwendung des Kraftstoffs B10 in dem Betriebspunkt BP1 bei RME 0,44 %, bei DK 0,69 % und bei dem Gesamtkraftstoff 1,13 %. Nach Bild 3-2 entsteht der Kraftstoff B39 aus dem ursprünglichen Kraftstoff B10 bei der Siedetemperatur von 310 °C.

6.2.2 Einfluss des Kraftstoffeintrags durch späte Nacheinspritzung auf die Motorölviskosität

Die Ölviskositätsmesswerte der drei Prüfläufe mit B10 und später Nacheinspritzung im BP1 sind im **Bild 6-8** für die Öltemperaturen von 40 °C und 100 °C dargestellt. Die Viskositätskurven für die Öltemperatur von 40 °C lassen erkennen, dass schon im zweiten und noch deutlicher im dritten Prüflauf bereits zu Prüflaufbeginn die Viskositätswerte geringer als im ersten Prüflauf waren. Dies ist auf die bereits zum Prüflaufbeginn ungleichen Konzentrationswerte, die im Bild 6-6 eingetragen sind, zurückzuführen.

Bei der Öltemperatur von 100 °C sind die Viskositätsunterschiede kaum sichtbar.

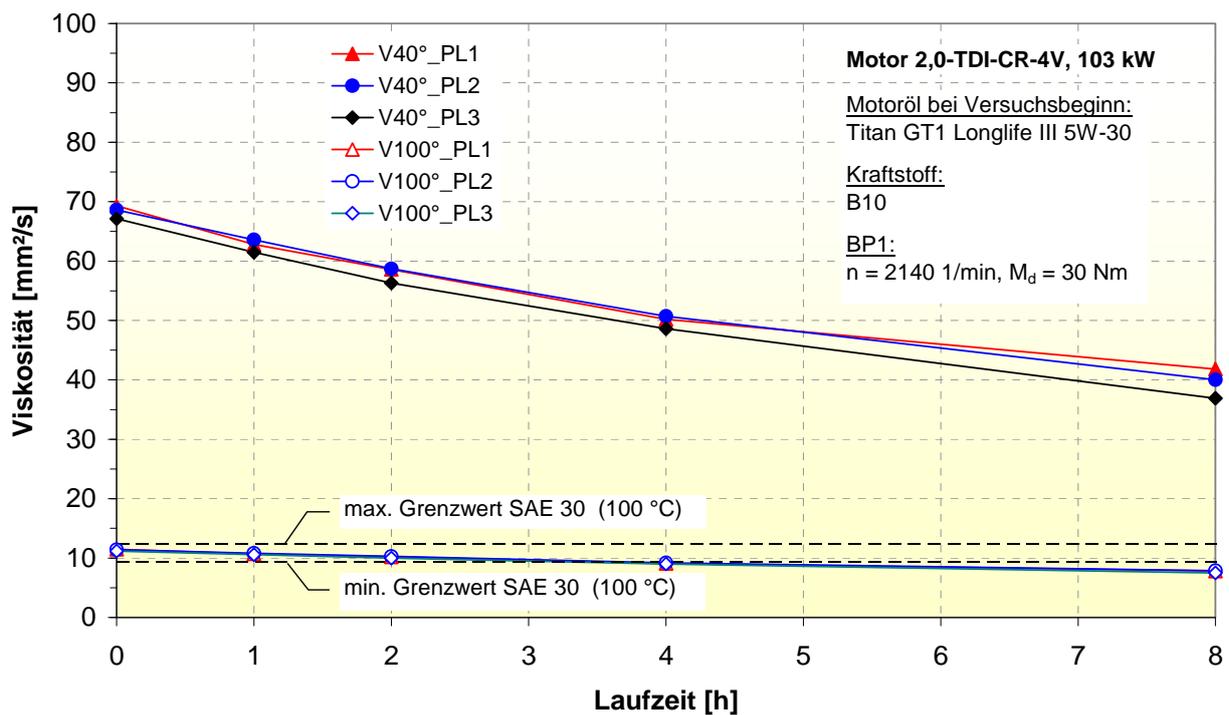


Bild 6-8: Ölviskosität der drei Prüfläufe mit B10 im Betriebspunkt BP1 mit später Nacheinspritzung in Abhängigkeit von der Laufzeit

Um den Einfluss der bereits zu Beginn der drei Prüfläufe unterschiedlich hohen Kraftstoffkonzentrationen auf die Ölviskositätswerte zu eliminieren, wurden für das **Bild 6-9** die Viskositäten der drei Prüfläufe im ersten Messpunkt, d.h. zu Prüflaufbeginn auf den Wert Null gesetzt und die dazu nötigen Korrekturwerte bei allen weiteren Viskositätsmesspunkten des betrachteten Prüflaufs berücksichtigt. Damit blieb die Steigung jeder Viskositätskurve erhalten. Es erfolgte lediglich eine Verschiebung der Kurven in den gleichen Anfangspunkt.

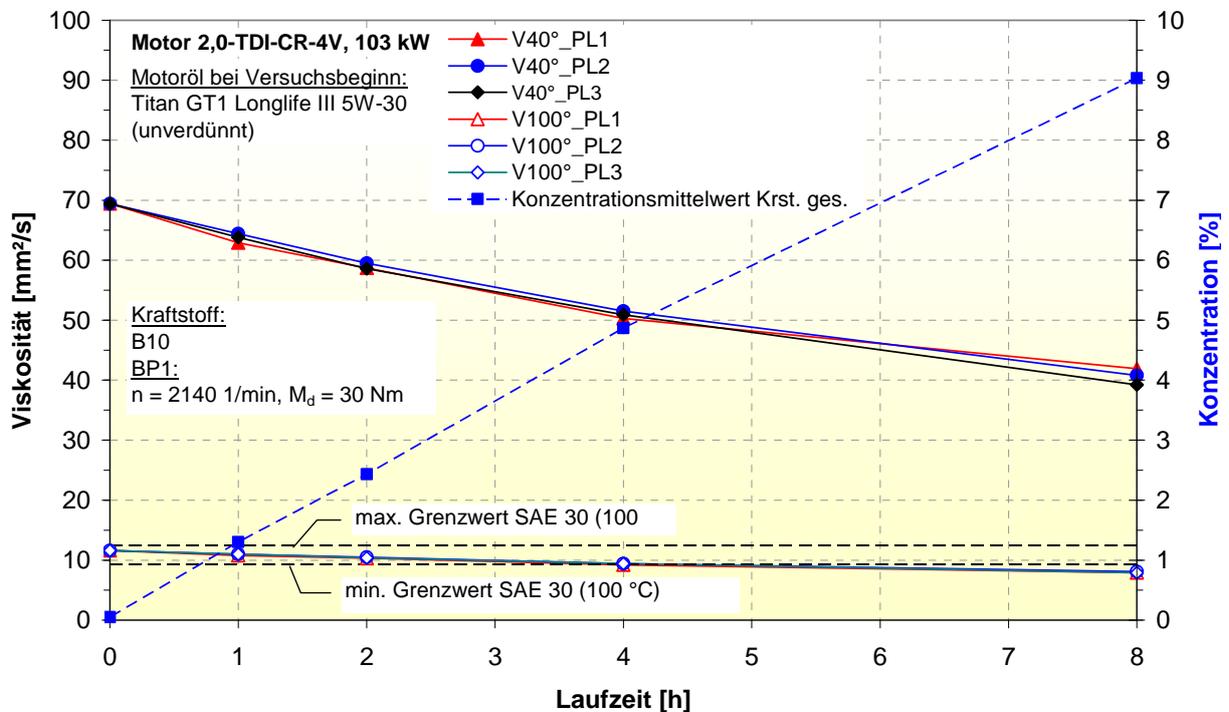


Bild 6-9: Gesamtkraftstoffkonzentration und Ölviskosität der drei Prüfläufe mit B10 im Betriebspunkt BP1 mit später Nacheinspritzung in Abhängigkeit von der Laufzeit

Die Viskositätswerte der drei Läufe zeigen bei den Öltemperaturen von 40 °C und 100 °C eine gute Übereinstimmung. Die Verringerung der Viskosität bei 40 °C betrug 41,5 %. Bei der für den Motorbetrieb bedeutenderen Öltemperatur von 100 °C verringerte sich die Ölviskosität von 11,6 mm²/s auf 7,97 mm²/s und somit um 31,3 %. Der für ein SAE 30-Öl zulässige Viskositätsbereich wurde bei Konzentrationen über 4,9 % des eingetragenen Kraftstoffs B39 unterschritten.

6.3 Kraftstoffaustrag bei Motorbetrieb mit DK im BP3 (Etappe 3)

6.3.1 Kraftstoffkonzentration

Für die Untersuchung des Kraftstoffaustrags im Betriebspunkt 3 wurde das Schmieröl vor dem Einfüllen in den Motor mit 15 Volumenprozent B10 verdünnt. Es wurden ein Prüflauf über 32 Stunden und ein zweiter über 64 Stunden durchgeführt.

Im **Bild 6-10** ist der Verlauf der Kraftstoffkonzentration während des Austragsversuchs im Betriebspunkt BP3 in Abhängigkeit von der Prüflaufzeit über 32 Stunden dargestellt. Um sicher zu sein, dass während des Prüflaufs kein Eintrag des Mischkraftstoffs B10 in das Öl erfolgen konnte, wurde der Motor für diese Prüfung mit biodieselfreiem DK (B0) betrieben.

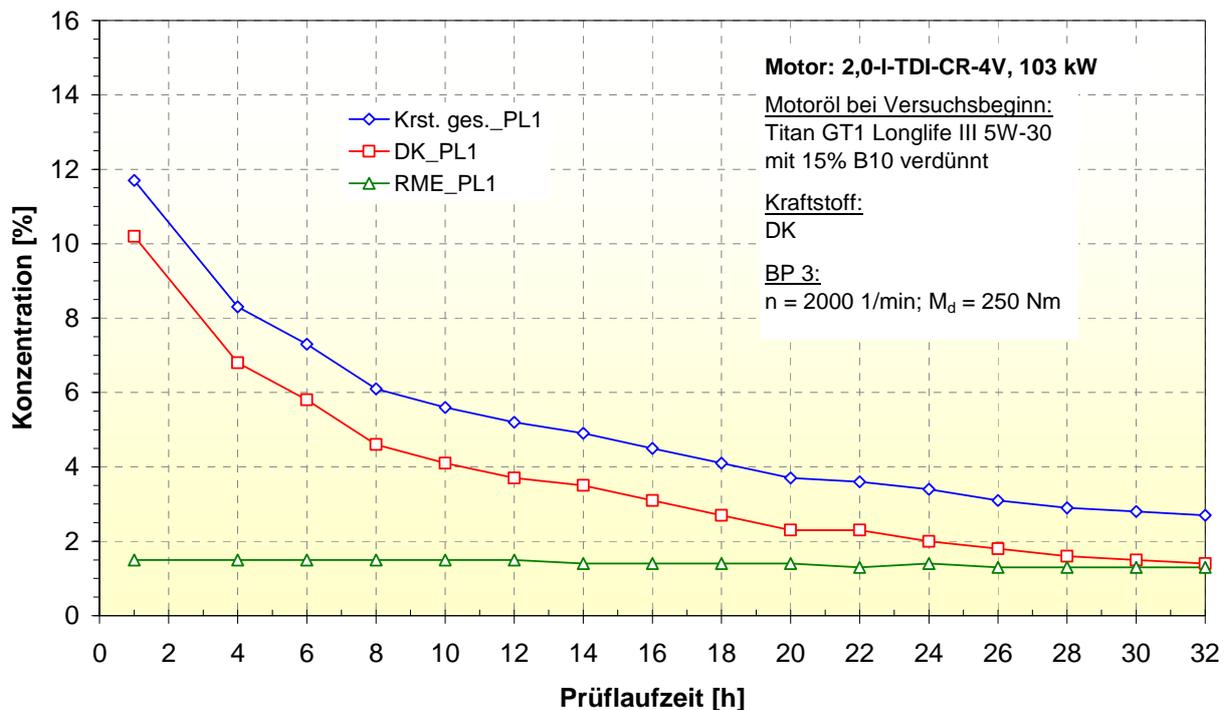


Bild 6-10: Kraftstoffaustrag aus dem mit 15 % B10 verdünnten Motoröl im BP3 mit DK

In diesem Bild wird deutlich, dass bei der gewählten Belastung des Motors mit einem Mitteldruck von $p_{me} = 16$ bar bei der Motordrehzahl von $n = 2000$ 1/min der DK-Anteil im Motoröl, der vor Beginn des Laufs ca. 13,5 % betrug, bis auf eine Konzentration von 1,4 % reduziert wurde. Der DK-Austrag pro Zeiteinheit war zu Beginn des Prüflaufs am stärksten und wurde mit zunehmender Prüflaufzeit immer geringer.

Der RME-Anteil hatte beim Prüflaufbeginn nur eine Konzentration von 1,5 %. Dieser Anteil wurde innerhalb des 32-Stunden-Laufs nur um 0,2 % auf 1,3 % verringert.

Aus dem Verlauf der DK-Konzentration war zu erwarten, dass bei Verlängerung der Prüflaufzeit über 32 Stunden hinaus noch ein weiteres Absenken der Kraftstoffkonzentration eintreten würde. Aus diesem Grund wurde noch ein zweiter Lauf (PL2) mit einer Prüflaufzeit von 64 Stunden durchgeführt.

Vor dem zweiten Prüflauf wurde das Motoröl ebenfalls mit 15 Volumenprozent B10 verdünnt. Zu Beginn des Laufes betrug die DK-Konzentration im Öl daher 13,5 % und die RME-Konzentration 1,5%. Während bei dem 32-Stunden-Prüflauf nach jeweils zwei Stunden eine Ölprobe von 50 cm³ entnommen wurde, erfolgte die Probenahme bei diesem Lauf erst nach jeweils vier Stunden, damit die Probenanzahl nicht zu hoch wird und die im Schmierölkreislauf des Motors vorhandene Ölmenge nicht durch Nachfüllen ergänzt werden musste.

Die Ergebnisse des Prüflaufs über 64 Stunden und zum Vergleich ebenfalls die des 32-Stunden-Laufs sind im **Bild 6-11** eingetragen. Die RME-Konzentrationen beider Läufe sind nahezu deckungsgleich. Die DK-Konzentrationen zeigen etwa von der 10. Stunde an ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Gleiches trifft auf die Gesamtkraftstoffkonzentrationen zu, die nach der Prüflaufzeit von 32 Stunden mit 2,7 % exakt den gleichen Wert aufwiesen.

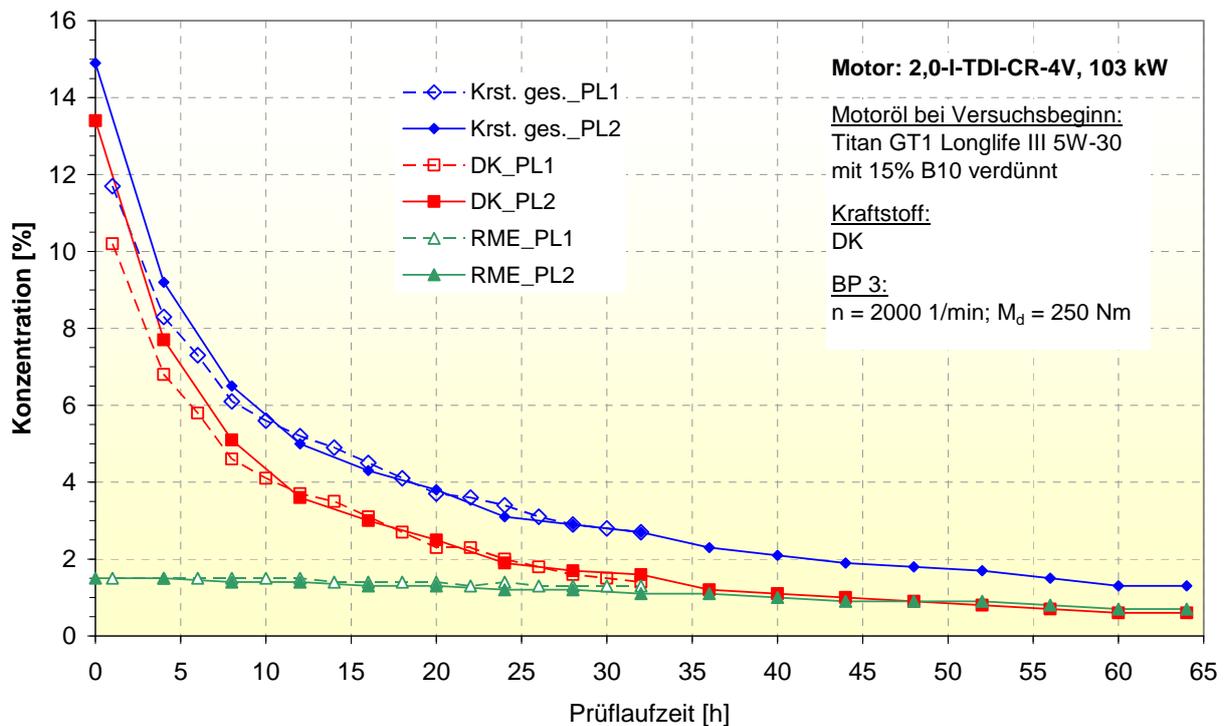


Bild 6-11: Kraftstoffaustrag aus dem mit 15 % B10 verdünnten Motoröl der zwei Prüfläufe PL1 und PL2 im Betriebspunkt BP3 mit DK

Im zweiten Prüflauf (PL2), der bis zur 64. Stunde fortgeführt wurde, wurden die DK- und die RME-Konzentrationen sowie folglich auch die Gesamtkraftstoffkonzentration weiter verringert. In der 60. und der 64. Prüflaufstunde wurde die Konzentrationen vom Gesamtkraftstoff mit 1,3 %, vom DK mit 0,6 % und vom RME mit 0,7 % ermittelt. Es wurde somit nicht nur die DK-Menge auf ca. 1/23 verringert, sondern auch die RME-Konzentration wurde von 1,5 % bis auf 0,7 % reduziert und somit etwa halbiert. Aus dem ursprünglich im Motoröl mit 15 % vorhandenen Kraftstoff B10 wurde durch die Verringerung beider Kraftstoffanteile bis zum Ende des 64-Stunden-Laufes im Motoröl ein B54-Kraftstoff mit einer Konzentration von 1,3 %. Bei einer nochmaligen Verlängerung der Prüflaufzeit ist eine weitere Verringerung der Gesamtkraftstoffkonzentration bei gleichzeitiger Erhöhung des prozentualen RME-Anteils des restlichen, im Motoröl verbliebenen Kraftstoffs zu erwarten.

6.3.2 Einfluss des Kraftstoffaustrags auf die Motorölviskosität

Die Ölviskositätsmesswerte des 32-Stunden-Prüflaufs zum Kraftstoffaustrag mit DK sind im **Bild 6-12** für die Öltemperaturen von 40 °C und 100 °C dargestellt. Im Betriebspunkt BP3 des Motors mit hoher Last ($n = 2000 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 16,0 \text{ bar}$) wurde über 32 Betriebsstunden untersucht, wie die Kraftstoffkonzentration in dem vor Versuchsbeginn auf 15 % B10-Anteil verdünnten Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeit beeinflusst wird, wobei der Motor mit B0, d.h. mit DK ohne RME-Anteil betrieben wurde.

Die Viskosität des auf 15 % B10-Anteil verdünnten Motoröls betrug bei 40 °C nur 44,6 mm²/s und lag bei 100 °C mit 8,5 mm²/s zu Versuchsbeginn knapp unter dem nach der SAE-Spezifikation zulässigen minimalen Grenzwert von 9,3 mm²/s. Aufgrund des starken DK-Austrags in den ersten Stunden des Versuchs stieg die Viskosität bereits vor der vierten Betriebsstunde auf 9,6 mm²/s an, blieb bis zum Prüflaufende innerhalb der zulässigen SAE-Grenzwerte und erreichte den Wert von 10,6 mm²/s.

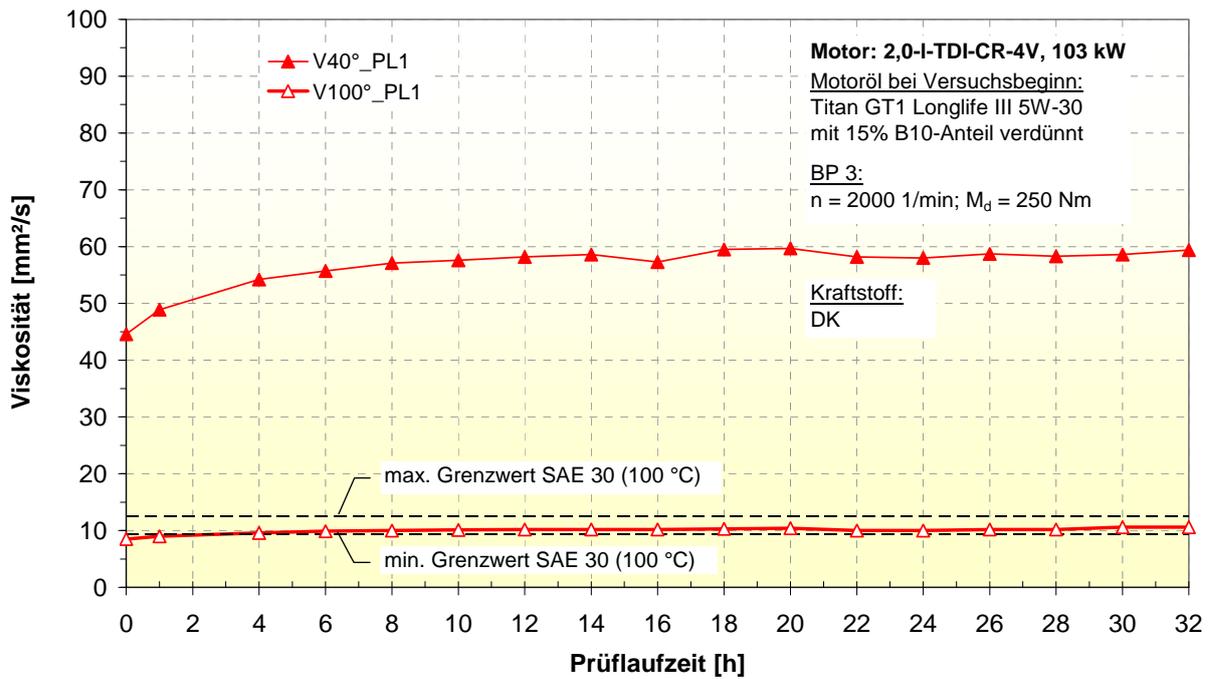


Bild 6-12: Einfluss des Kraftstoffaustrags aus dem mit 15 % B10 verdünnten Motoröl im Prüflauf PL1 mit DK im Betriebspunkt BP3

Bei einer Verlängerung der Prüflaufzeit über 32 Stunden hinaus wurde ein weiteres Absenken der Kraftstoffkonzentration und dadurch auch ein Ansteigen der Viskositätswerte erwartet. Die Viskositätswertmesswerte des 64-Stunden-Prüflaufs und zum Vergleich auch die des 32 Stunden-Prüflaufs sind im **Bild 6-13** für die Öltemperaturen von 40 °C und 100 °C dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf der Gesamtkraftstoffkonzentration des 64-Stunden-Prüflaufs (Krst. ges._PL2) eingetragen.

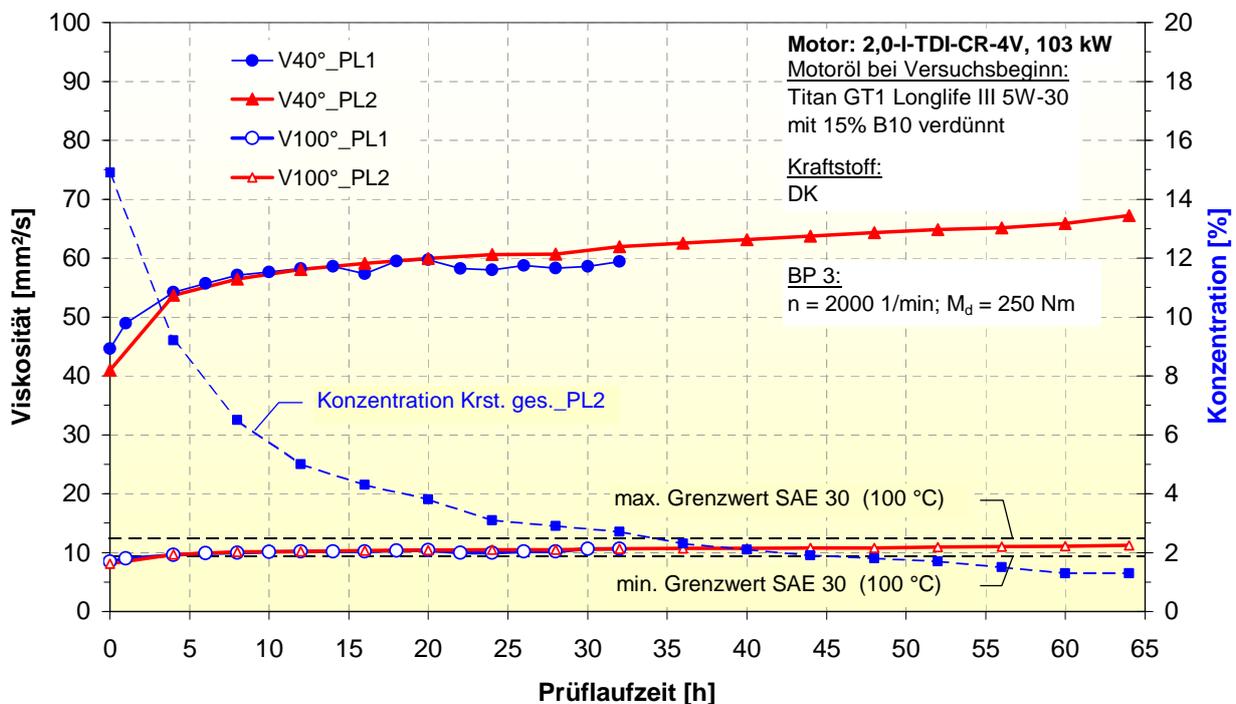


Bild 6-13: Ölviskosität des 32- und des 64-Stunden-Prüflaufs und Gesamtkraftstoffkonzentration des 64-Stunden-Prüflaufs mit DK im Betriebspunkt BP3 in Abhängigkeit von der Laufzeit

Die Messwerte beider Prüfläufe zeigen bis zur Laufzeit von 32 Stunden insbesondere bei Öltemperaturen von 100 °C eine sehr gute Übereinstimmung. Auch im zweiten Prüflauf wurde der nach SAE-Norm zugelassene minimale Viskositätsgrenzwert von 9,3 mm²/s noch vor der vierten Prüflaufstunde erreicht. Bei der Laufzeitverlängerung über 32 Stunden hinaus wurde eine weitere Erhöhung der Viskosität ermittelt. Sie erreichte bei der Öltemperatur von 40 °C den Wert von 67,2 mm²/s und bei 100 °C den Wert von 11,2 mm²/s.

Die Referenzwerte des Frischöls betragen 69,4 bzw. 11,6 mm²/s. Sie wurden wegen der noch im Öl vorhandenen Konzentration des Gesamtkraftstoffs von 1,3 %, der aufgrund der gemessenen RME- und DK-Anteile einem B54-Kraftstoff entsprach, nicht erreicht. Bei einer weiteren Verlängerung der Prüflaufzeit über 64 Stunden ist aufgrund der zu erwartenden Verringerung der Kraftstoffkonzentration mit einer weiteren Erhöhung der Viskositätswerte zu rechnen.

6.4 Kraftstoffeintrag bei 100 Motorstarts mit anschließendem Leerlaufbetrieb über 10 Minuten pro Start (Etappe 4)

6.4.1 Kraftstoffkonzentration im Motoröl

Da erwartet wurde, dass bei kaltem Motor, d.h. unmittelbar nach dem Start, der Kraftstoffeintrag in das Motoröl relativ hoch ist, erfolgte die Untersuchung über 100 Kaltstarts bei Raumtemperaturen von ca. 22 °C mit dem Mischkraftstoff B10. Nach jedem Start wurde der Motor bei Leerlaufdrehzahl über 10 min betrieben und anschließend wieder bis auf die Raumtemperatur von ca. 22 °C abgekühlt. Nach jeweils 20 Kaltstarts wurden eine Ölprobe entnommen und die Konzentrationen von RME und DK im Motoröl sowie die Ölviskosität ermittelt.

Im **Bild 6-14** sind die Ergebnisse der bei Raumtemperaturen um 20 °C durchgeführten 100 Kaltstarts mit anschließendem Leerlaufbetrieb ($n = 790$ 1/min, $p_{me} = 0$ bar) über jeweils 10 Minuten pro Start mit dem Kraftstoff B10 dargestellt. Auffallend ist, dass bereits zu Beginn der Untersuchung nach dem ersten Motorstart Kraftstoffkonzentrationen gemessen wurden, die selbst nach dem 40. Motorstart noch unverändert waren. Erst nach 60 Motorstarts wurde lediglich eine um 0,1 % größere DK-Konzentration ermittelt, die dann auch nach dem 80. Motorstart gleich hoch war und erst nach dem 100. Motorstart nochmals um 0,1 % höher gemessen wurde.

In allen Ölproben wurde die RME-Konzentration mit einer gleich bleibenden Höhe von 0,3 % ermittelt. Offensichtlich war der RME-Eintrag während der 100 Starts mit anschließendem Leerlaufbetrieb so gering, dass die Unterschiede in den 6 Ölproben nicht messbar waren. D. h., dass die Kaltstarts nur einen sehr geringen Kraftstoffeintrag zur Folge hatten und dass nach 99 Kaltstarts mit anschließendem 10-minütigem Leerlaufbetrieb eine Konzentrationszunahme nur bei DK messbar war, also scheinbar nur ein B0-Kraftstoff eingetragen wurde. Die Zunahme der Kraftstoffkonzentration der Ölproben, bezogen auf die Ergebnisse nach dem ersten Motorstart zeigt das **Bild 6-15**. Tatsächlich muss jedoch in dem in das Öl eingetragenen Kraftstoff der RME-Anteil mindestens 10 % oder mehr betragen haben. D. h., dass die RME-Konzentration mindestens 1/9 der in der 6. Ölprobe mit 0,2 % gemessenen DK-Konzentration und somit mindestens 0,022 % betragen haben muss. Diese geringe Konzentrationszunahme war mit dem gaschromatographischen Verfahren jedoch nicht nachweisbar.

Während der 99 Motorstarts und einer Leerlaufzeit von 990 Minuten bzw. 16,5 Stunden nahm die DK-Konzentration um 0,2 % zu. Die stündliche Konzentrationszunahme des DK-Eintrags betrug daher lediglich 0,0121 %/h. Die Zunahme des RME-Eintrags muss mindestens 0,0013 %/h betragen haben.

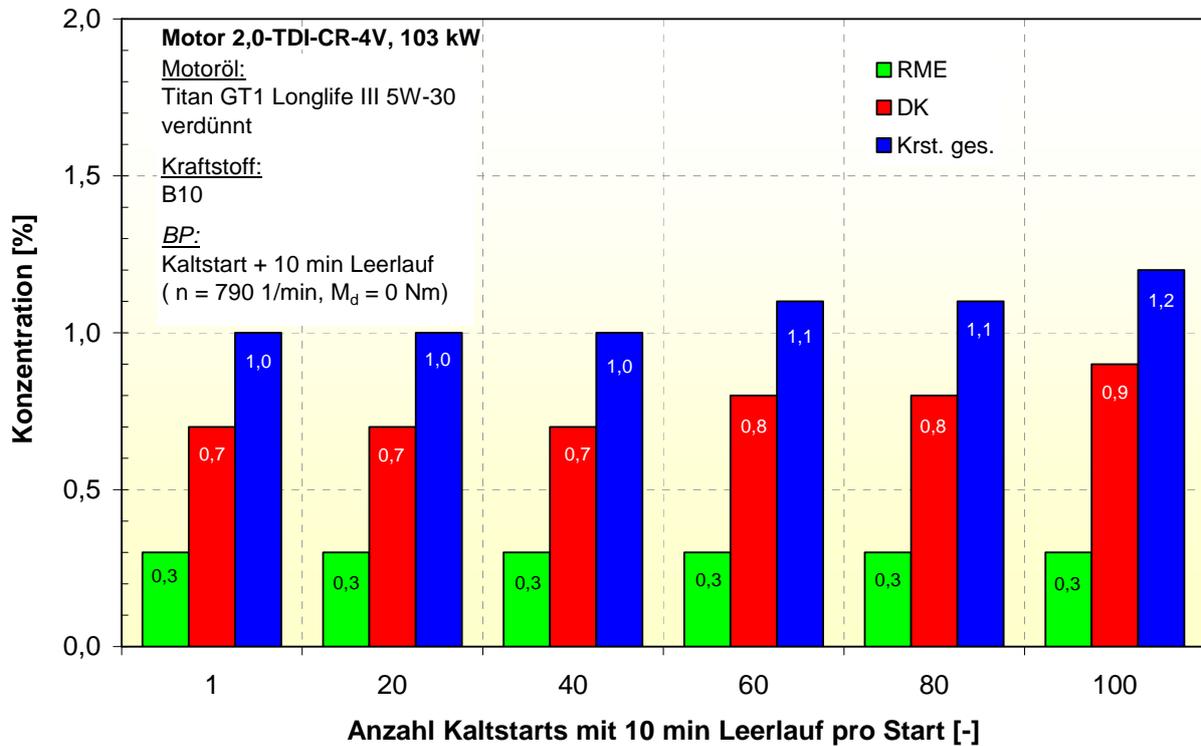


Bild 6-14: Gemessene Kraftstoffkonzentration von RME, DK und Gesamtkraftstoff in Abhängigkeit von der Anzahl der Kaltstarts mit 10 min Leerlauf pro Start mit B10

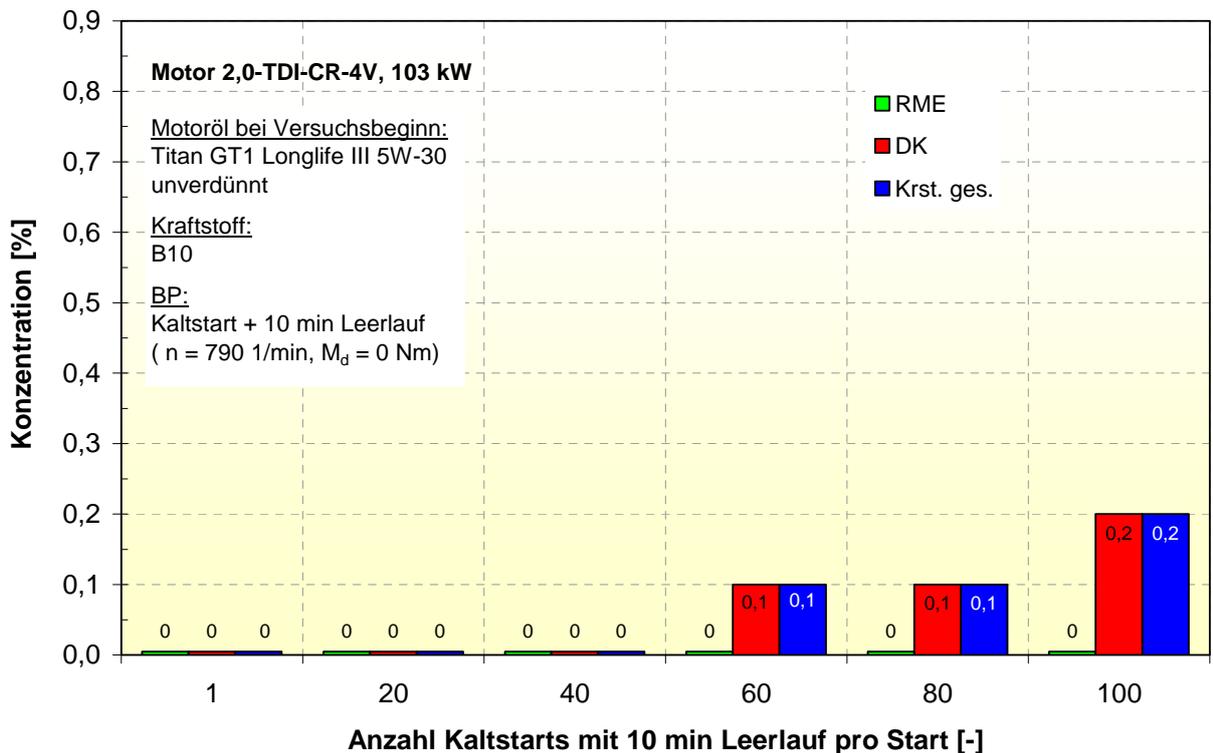


Bild 6-15: Zunahme der Kraftstoffkonzentration von RME, DK und Gesamtkraftstoff in Abhängigkeit von der Anzahl der Kaltstarts mit 10 min Leerlauf pro Start mit B10

6.4.2 Einfluss des Kraftstoffeintrags auf die Motorölviskosität

Das folgende **Bild 6-16** zeigt den Verlauf der bei Öltemperaturen von 40 °C und 100 °C gemessenen Viskositäten in Abhängigkeit von der Anzahl der Kaltstarts mit 10 min Leerlaufbetrieb pro Start mit dem Kraftstoff B10.

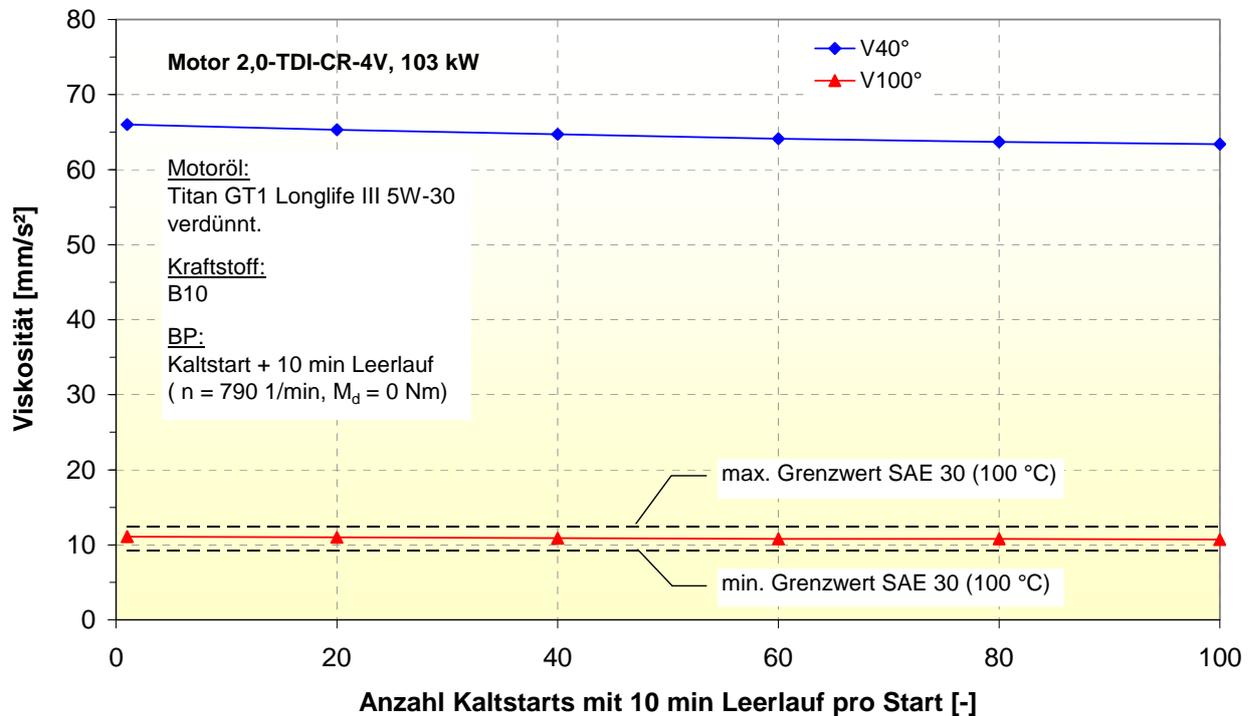


Bild 6-16: Ölviskosität in Abhängigkeit von der Anzahl der Kaltstarts mit 10 min Leerlauf pro Start mit B10

Aufgrund der schon nach dem ersten Motorstart in der Ölprobe gemessenen hohen Konzentrationen von RME mit 0,3 % und DK mit 0,7 % (Bild 6-14) begann der Versuch bereits mit verdünntem Motoröl. Diese Verdünnung ist darauf zurückzuführen, dass die Prüfläufe mit später Nacheinspritzung, die dieser Untersuchung vorangegangen sind, einen hohen Öleintrag aufgewiesen haben und durch den Ölwechsel ohne Motorspülung die im Motor verbliebene Kraftstoffmenge nicht vollständig entfernt worden ist.

Die Viskosität bei 40 °C wurde nach dem ersten Start und 10 min Leerlaufbetrieb mit 66,0 mm²/s gemessen. Da nur wenig Kraftstoff während der 100 Starts und des Leerlaufbetriebs in das Öl gelangte, erfolgte auch nur eine geringe Viskositätsverringering, die zum Schluss 63,4 mm²/s betrug.

Die bei 100 °C gemessenen Viskositätswerte verringerten sich von anfangs 11,1 mm²/s bis auf 10,7 mm²/s und somit um 3,6 %. Der in der SAE 30-Norm festgelegte Grenzwert für die minimal zugelassene Viskosität wurde aufgrund des geringen Kraftstoffeintrags nicht unterschritten.

6.5 Vergleich des Kraftstoffeintrags in den verschiedenen Betriebsarten

6.5.1 Zunahme der Kraftstoffkonzentration pro Stunde

Da die Prüfläufe zum Kraftstoffeintrag unterschiedlich lange Laufzeiten hatten, wurde die Zunahme der Kraftstoffkonzentration von Beginn bis zum Ende der Prüfläufe durch Bezug auf die gleiche Zeiteinheit für die verschiedenen Betriebsarten des Motors vergleichbar gemacht. Im folgenden **Bild 6-17** ist für den Betrieb mit dem Kraftstoff B10 die stündliche Konzentrationszunahme in der Maßeinheit Prozent pro Stunde für die Prüfläufe mit später Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1, für die Startuntersuchung mit Leerlaufbetrieb und für den Schwachlastbetrieb im Betriebspunkt BP2 dargestellt.

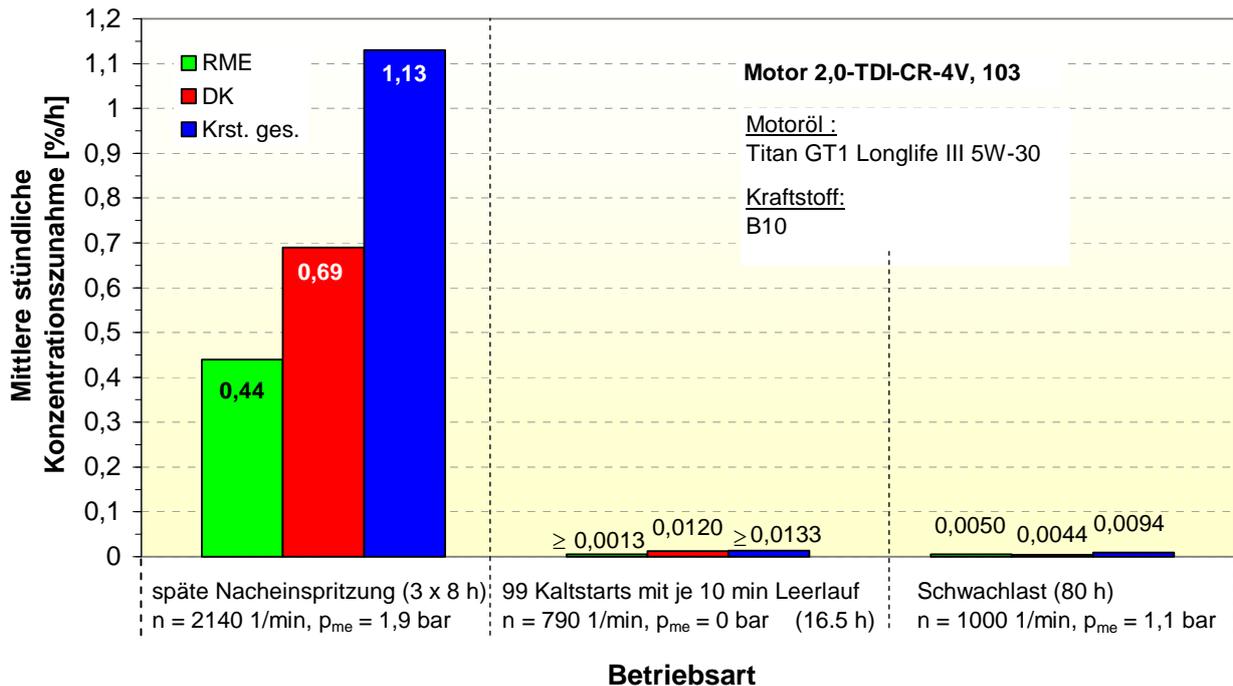


Bild 6-17: Mittlere stündliche Konzentrationszunahme von RME, DK und Krst. ges. mit dem Kraftstoff B10 bei verschiedenen Betriebsarten

Deutlich ist zu erkennen, dass der Motorbetrieb mit später Nacheinspritzung im Regenerationsmodus den größten Kraftstoffeintrag der durchgeführten Versuche bewirkte. Mit 1,13 %/h ergab sich durch die späte Nacheinspritzung für die Zunahme der Konzentration des Gesamtkraftstoffs im Motoröl etwa der 120-fache Wert der Konzentrationszunahme des Schwachlastbetriebs im Betriebspunkt BP2 und etwa der 85-fache Wert im Vergleich mit den bei den Startversuchen des Motors entstandenen Konzentrationszunahmen. Verglichen mit der Betriebsart im Regenerationsmodus scheinen die beiden anderen Betriebsarten, der Schwachlastbetrieb sowie die Motorstartversuche mit anschließendem Leerlaufbetrieb im Hinblick auf den Kraftstoffeintrag nahezu bedeutungslos zu sein.

6.5.2 Viskositätsverringung pro Stunde

Um die Viskositätsverringung in den verschiedenen Motorbetriebsarten vergleichen zu können, wurde die Zunahme der Kraftstoffkonzentration von Beginn bis zum Ende der Prüfläufe mit dem Kraftstoff B10 auf die gleiche Zeiteinheit bezogen. Im **Bild 6-18** ist die stündliche Viskositätsverringung in der Maßeinheit Prozent pro Stunde für die Prüfläufe mit später Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1, für die Startuntersuchung mit Leerlaufbetrieb und für den Schwachlastbetrieb im Betriebspunkt BP2 eingetragen.

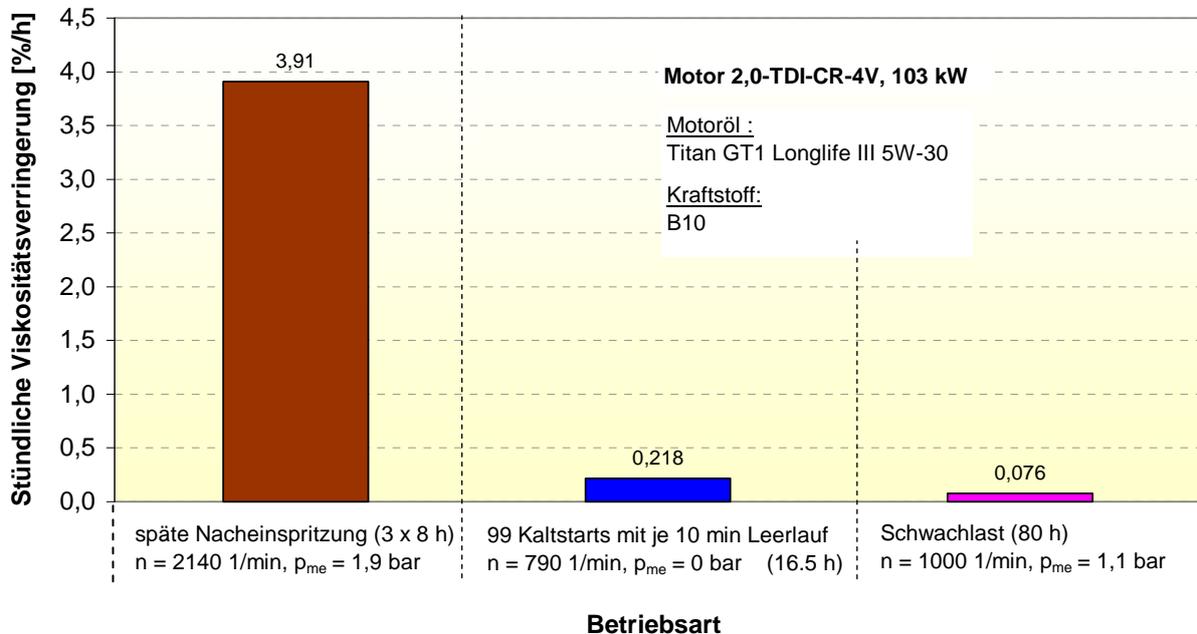


Bild 6-18: Stündliche Viskositätsverringung des Motoröls bei Betrieb mit dem Kraftstoff B10 in verschiedenen Betriebsarten

Das Bild zeigt, dass der Motorbetrieb mit später Nacheinspritzung den stärksten Einfluss auf die Viskositätsveränderung ausübte. Im Vergleich mit dem Schwachlastbetrieb hatte die Verringerung der Viskosität durch die späte Nacheinspritzung etwa den 51-fachen und im Vergleich zu den Motorstartversuchen mit Leerlaufbetrieb etwa den 18-fachen Wert.

Diese Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass die Ölverdünnung bei dem Motorbetrieb mit dem Mischkraftstoff B10 hauptsächlich durch den Betrieb im Regenerationsmodus auftritt und dass die anderen Betriebsarten für die Ölverdünnung nur eine untergeordnete Rolle spielen.

7 Zusammenfassung

Im Institut für Mobile Systeme IMS, Lehrstuhl Kolbenmaschinen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde an einem von der Volkswagen AG bereitgestellten Pkw-Dieselmotor 2,0 I-TDI mit Common-Rail-System, Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter auf dem Motorprüfstand der Einfluss des Mischkraftstoffs B10 auf den Kraftstoffeintrag in das Motoröl und den Kraftstoffaustrag sowie auf die Veränderung der Ölviskosität untersucht.

Die stationären Versuche zum Kraftstoffeintrag erfolgten bei Motorbetrieb mit dem Kraftstoff B10 über jeweils 80 Stunden ohne späte Nacheinspritzung in den drei Betriebspunkten BP1 mit der Drehzahl $n = 2140$ 1/min und dem Mitteldruck $p_{me} = 1,9$ bar, im BP2 mit $n = 1000$ 1/min, $p_{me} = 1,1$ bar und im BP3 mit $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 16,0$ bar, außerdem bei 100 Motorstarts bei Umgebungstemperaturen um 22 °C und anschließendem Leerlaufbetrieb über jeweils 10 Minuten pro Start sowie im Betriebspunkt BP2 im Regenerationsmodus mit später Nacheinspritzung. Die Untersuchung im Regenerationsmodus erfolgte durch drei Prüfläufe über jeweils 8 Stunden mit aktivierter später Nacheinspritzung.

Die Kraftstoffaustragsversuche wurden mit zwei Prüfläufen über 32 und 64 Stunden im Betriebspunkt BP3 mit einem Motoröl durchgeführt, das vor Versuchsbeginn mit 15 Volumenprozent des Mischkraftstoffs B10 verdünnt worden war. Als Kraftstoff kam bei diesen Prüfläufen Dieselmotoröl ohne RME-Anteile zum Einsatz.

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 bereitgestellt, die auch die gaschromatographischen Ölanalysen zur Bestimmung der Kraftstoffkonzentrationen in den 74 Ölproben und die Viskositätsbestimmungen durchgeführt hat.

Die höchsten Kraftstoffkonzentrationen im Gebrauchtmotoröl wurden beim Motorbetrieb mit dem Kraftstoff B10 im Regenerationsmodus mit später Nacheinspritzung im Betriebspunkt BP1 gemessen. Die Kraftstoffkonzentration nahm annähernd linear mit der Prüflaufzeit zu. Der Mittelwert der Konzentrationszunahme der drei Prüfläufe betrug $1,13$ % pro Stunde. Die im Öl gemessenen RME- und DK-Konzentrationen entsprachen einem B39-Kraftstoff. Der hohe Kraftstoffeintrag durch die späte Nacheinspritzung bewirkte auch eine erhebliche Viskositätsverringering des Motoröls. Die Schmierölviskosität wurde um $3,91$ % pro Stunde verringert. Der für ein SAE 30-Öl zulässige Viskositätsbereich von $9,3$ bis $12,45$ mm²/s für die Öltemperatur von 100 °C wurde nach der Prüflaufzeit von ca. 4 Stunden bei Konzentrationen des eingetragenen Kraftstoffs B39 über $4,9$ % unterschritten.

Bei den 80-Stunden-Prüfläufen ohne späte Nacheinspritzung in den drei Betriebspunkten BP1, BP2 und BP3 mit dem Kraftstoff B10 wurde nur bei den beiden Läufen in dem Schwachlastbetriebspunkt BP2 ein minimaler Kraftstoffeintrag festgestellt. Die ermittelte Zunahme der Kraftstoffkonzentration verlief in Abhängigkeit von der Prüflaufzeit annähernd linear und betrug $0,0094$ % pro Stunde. Der eingetragene Kraftstoff hatte die Zusammensetzung eines B39-Kraftstoffs. Die Viskositätsverringering betrug nur $0,076$ % pro Stunde.

Nach 100 Motorstarts mit dem Kraftstoff B10 und anschließendem Leerlauf über jeweils 10 Minuten wurde im Motoröl messtechnisch nur die Zunahme der DK-Konzentration um $0,2$ % in $16,5$ Stunden nachgewiesen. Der RME-Anteil in der eingetragenen Kraftstoffmenge B10 muss aber mindestens 10 % betragen haben. Die errechnete Konzentrationszunahme

betrug unter Berücksichtigung dieses RME-Anteils, der gaschromatographisch aufgrund seiner geringen Höhe nicht nachweisbar war, lediglich 0,0133 % pro Stunde. Die Viskosität wurde um 0,218 % pro Stunde verringert.

Die geringen Kraftstoffeinträge im Schwachlastbetriebspunkt BP2 und bei den Starts mit anschließendem Leerlauf stellen für einen störungsfreien Betrieb des Motors in der Praxis offensichtlich keine Gefahr dar. Diese beiden untersuchten Betriebsarten des Motors bewirkten nur eine äußerst geringe Viskositätsverringering. Der für ein SAE 30-Öl zulässige Viskositätsbereich wurde nicht unterschritten.

Im 64-Stunden-Kraftstoffaustragsversuch, der im Betriebspunkt BP3 bei der Motordrehzahl $n = 2000$ 1/min und dem Mitteldruck von $p_{me} = 16$ bar erfolgte, wurde aus dem Kraftstoff B10, der vor Versuchsbeginn im verdünnten Motoröl mit der Konzentration von 15 % enthalten war, bis zum Ende des Prüflaufs durch die Verringerung der RME- und der DK-Kraftstoffkonzentration im Motoröl ein B54-Kraftstoff mit einer Konzentration von 1,3 %. Es wurde nicht nur die DK-Konzentration von 13,5 % bis auf 0,6 % verringert, sondern auch die RME-Konzentration von 1,5 % bis auf 0,7 % reduziert und somit etwa halbiert. Der zu Beginn des 64-Stunden-Prüflaufs bei der Öltemperatur von 100 °C im verdünnten Motoröl gemessene Viskositätswert von 8,1 mm²/s wurde während des Prüflaufs bis auf 11,2 mm²/s erhöht. Bei einer Verlängerung der Prüflaufzeit über 64 Stunden ist aufgrund der zu erwartenden weiteren Verringerung der Kraftstoffkonzentration mit einer weiteren Erhöhung der Viskositätswerte zu rechnen.

Die Ergebnisse der stationären Prüfstandsuntersuchungen zeigten, dass

- der höchste Kraftstoffeintrag im Regenerationsmodus mit später Nacheinspritzung erfolgte,
- die Ölverdünnung durch die Nacheinspritzung erheblich war,
- der Motorbetrieb mit geringer Belastung sowie häufige Motorstarts mit längeren Leerlaufzeiten zu geringen Kraftstoffeinträgen führten, die für den Praxisbetrieb kaum Bedeutung haben,
- in diesen beiden Betriebsarten des Motors die Viskositätsverringering des Motoröls sehr gering war,
- bei hoher Motorbelastung Kraftstoff aus dem mit B10 verdünnten Motoröl ausgetragen wurde,
- bei diesem Kraftstoffaustrag der RME-Anteil im unverdampften Kraftstoff angestiegen war und
- hauptsächlich der DK-Anteil, aber in geringem Maße auch der RME-Anteil aus dem Motoröl ausgetragen wurde.

Neben dem Partikelfiltersystem mit aktiver Partikelfilterregeneration durch motorinterne Kraftstoffnacheinspritzung, das bei dem untersuchten Motor und z. Z. auch bei allen deutschen Pkw-Herstellern ohne Additivzusatz eingesetzt wird, gibt es auch additiv-unterstützte 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 [7]. 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 zukünftig bei einer weiteren Erhöhung des Biokraftstoffanteils im Dieselmotorkraftstoff die irreversible Motorschmierölverdünnung bei Pkw-Motoren mit motorinterner Nacheinspritzung zu vermeiden, muss versucht werden, den Kraftstoffeintrag vor allem im Regenerationsmodus durch Optimierung der späten Nacheinspritzung zu verringern. Dabei darf die Regeneration des Partikelfilters jedoch nicht beeinträchtigt werden.

8 Literatur

- [1] Keppler, S.: Nächste Generation Biokraftstoffe – Auf dem Weg zu höheren Biokraftstoffanteilen
ATZ/MTZ-Konferenz – Motor, 14. und 15. November 2007 Hamburg
„Kraft- und Schmierstoffe“
- [2] Darf´s ein bisschen mehr sein? Immer mehr Biokraftstoff in Diesel und Benzin
Rapsmagazin 2008, S. 18 ff, Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP)
- [3] Luther, R.: Alternative Kraftstoffe aus Sicht der Motorenschmierung
MTZ 03/2008 Jahrgang 69, S. 230 - 236
- [4] Effiziente TSI-Aggregate – neue Common-Rail-Technologie
Sonderausgabe von ATZ und MTZ, September 2007
- [5] http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/42433.php:
Bundeskabinett beschließt Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen
Pressemitteilung Nr. 228/08, Berlin
- [6] <http://www.ufop.de/3001.php>
Bundesregierung senkt die Biokraftstoffquoten
UFOP-Pressemeldung
- [7] 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