Universität Hohenheim
Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen (740), 70593 Stuttgart
Dipl.-Ing. Karl Maurer
Tel. 0711 459-2683
E-mail: LA740@uni-hohenheim.de

Motorprüflauf mit Rapsöl-Diesel-Mischungen

Schlussbericht

Auftraggeber: **Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V., Hofplatz 1, 18276 Gülzow**

Förderkennzeichen: FNR 22026800

Hohenheim, im September 2003

Motorprüflauf mit Rapsöl-Diesel-Mischungen

Schlussbericht

Verfasst von:

Karl Maurer, Universität Hohenheim

unter Verwendung der Befundungsergebnisse von:

Firma Svendsen, Fellbach

Firma Deutz AG, Köln und

ASG Analytik-Service, Täfertingen

Inhaltsverzeichnis **Seite**

Teil I

1. Aufgabenstellung 4
2. Voraussetzungen zur Durchführung des Motorprüflaufs 4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 4
4. Wissenschaftlich-technischer Kenntnisstand 6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6

Teil II

1. Versuchsmotoren 7
2. Versuchskraftstoffe 8
3. Motorkennlinien 11
4. Durchführung des Prüflaufs 17
5. Ergebnisse der Motorbefundung 17
   - 5.1 Beeinflussung des Schmieröls 17
   - 5.2 Düsenverkokung 21
   - 5.3 Zylinderkopf und –block 28
   - 5.4 Ventile 33
   - 5.5 Kolben und –ringe 38
   - 5.6 Zusammenfassende Bewertung des Motorzustandes 49
6. Verwertbarkeit der Ergebnisse 50
7. Literatur 51
8. Anhang 52

Teil I:

1. Aufgabenstellung:

In der Landwirtschaft besteht an der Nutzung von naturbelassenem Rapsöl als Kraftstoff für Traktoren Interesse. Für die praktische Umsetzung sind jedoch aufgrund der von handelsüblichem Diesel abweichenden chemisch-physikalischen Eigenschaften von Rapsöl für einen störungsfreien Dauerbetrieb motor- und fahrzeugtechnische Umrüstmaßnahmen erforderlich. Um die damit verbundenen erheblichen Kosten zu umgehen, wird verschiedentlich in der Praxis versucht, Dieselkraftstoff mit Rapsöl zu mischen.

Mit dem Motorprüflauf sollte geklärt werden, ob die Zumischung von Rapsöl zu Dieselkraftstoff ohne fahrzeug- oder motorseitige Anpassungsmaßnahmen unbedenklich ist. Dabei sollte die Auswirkung der Beimischung unterschiedlicher Anteile von kaltgepresstem Rapsöl zu Diesel auf das Betriebsverhalten und den Verschleiß eines modernen Schleppermotors überprüft werden.

Über das Ergebnis der Untersuchungen soll die Landwirtschaft informiert werden und auf mögliche Auswirkungen bei der Anwendung von Rapsöl-Diesel-Mischungen und damit verbundenen Risiken hingewiesen werden.

2. Voraussetzungen zur Durchführung des Motorprüflaufs:

Zur Klärung, ob Rapsöl als Mischkomponente zu Dieselkraftstoff auch längerfristig Zukunftschancen hat, sollte der Versuchsmotor dem neuesten technischen Entwicklungsstand von Schleppermotoren entsprechen. Deshalb wurde ein Motor gewählt, der bereits die zu erwartenden verschärften Abgasemissionsgrenzwerte erfüllt. Die Motorleistung war durch den am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim vorhandenen Prüfstand auf 100 kW bei einer Nenndrehzahl von 2.500 U/min begrenzt. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde ein Motor von der Firma Deutz AG, Köln von der Baureihe 2012 in COM2 Ausführung gewählt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens:

Die Planung des Motorprüflaufs erfolgte in Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem Motorenhersteller. Als Prüfdauer wurde vom Motorhersteller je Kraftstoffvariante eine Zeit von 300 Stunden für eine Beurteilung als ausreichend angesehen. Es sollte jeweils ein 300-Stunden-Prüflauf mit zunächst Tankstellendieselkraftstoff, danach mit

Rapsöl-Diesel-Mischungen mit einem Rapsölanteil von zunächst 25 %, danach von 50 % und wenn möglich mit 75 % erprobt werden. Die Prüfläufe fanden vom 19.02.2002 bis 27.03.2002 mit reinem Dieselkraftstoff, vom 28.05.2002 bis 19.06.2002 mit 25 % Rapsölanteil im Kraftstoff und vom 06.11.2002 bis 08.12.2002 mit 50 % Rapsölanteil statt. Der Prüflauf mit 75 % Rapsöl und 25 % Diesel wurde am 19.03.2003 begonnen und musste nach 67 Stunden infolge eines Schadens am Motorprüfstand abgebrochen werden.

Für die Durchführung des Vorhabens wurden 9 Monate (01.10.2001 bis 30.06.2002) beantragt. Die Arbeiten waren wegen der Verlagerung der Begutachtung ins Motorherstellerwerk erheblich zeitaufwendiger, so dass eine Verlängerung der Laufzeit für das Vorhaben bis 30.11.2002 bzw. bis 31.03.2003 notwendig war (vgl. Zwischenbericht vom 02.12.2002).

Die Dauerläufe wurden entsprechend der Verordnung 79/68/EG vom 16.12.1997 gefahren. Diese beinhaltet für mobile Geräte und Schlepper den 8-Punkte-Stufenzyklus C1 nach ISO 8178. Das darin festgelegte Lastkollektiv wird als repräsentativ für Schlepper der mittleren Leistungsklasse angenommen. Die Zeitdauer, in welcher die einzelnen Laststufen gefahren werden, ist frei wählbar. Ausgehend von im praktischen Schleppereinsatz nicht auszuschließenden Motorleerlaufbetriebszeiten von 15 bis 30 Minuten wurde im Prüfzyklus eine Motorleerlaufzeit von 30 Minuten berücksichtigt, so dass ein Prüfdurchgang jeweils 3 Stunden und 20 Minuten betrug.

Für jede Kraftstoffvariante wurde jeweils eine Motorvolllastkennlinie aufgenommen und daraus für den anschließenden Prüfzyklus die Bremslast ermittelt. Während des 300-Stunden-Prüflaufs sind jeweils nach 50 Stunden eine Motorschmierölprobe gezogen und analysiert worden. Vor Beginn einer neuen Kraftstoffvariante (nach 300 Stunden) ist das Motoröl gewechselt worden.

Nach jedem Prüflauf erfolgte eine Befundung des Motors, um die Einflüsse der Pflanzenölzumischung festzustellen. Dazu wurde der Motor vom Prüfstand abgebaut und in einer Deutz-Werkstätte zerlegt. Einzelne Motorkomponenten wurden ins Herstellerwerk zur Begutachtung gesandt. Anschließend wurde der Motor mit neuen Verschleißteilen bestückt, um für die nächste Kraftstoffvariante vergleichbare Ausgangsbedingungen zu haben.

Als Versuchskraftstoff wurde neben Tankstellendiesel ausschließlich Rapsöl als Zumischkomponente verwendet, dessen Qualität dem Rapsöl-RK-Standard vom Mai 2000 entsprach.

4. Wissenschaftlich-technischer Kenntnisstand:

Mit Rapsöl wurde bei der Firma Porsche ein Prüfstandsversuch mit mehreren Seriendieselmotoren durchgeführt [1]. Dabei wurde bestätigt, dass Kammermotoren als pflanzenöltauglich angesehen werden können, jedoch direkteinspritzende Seriendieselmotoren für Rapsölbetrieb nicht geeignet sind. Spätere Versuche in der Schweiz mit additiviertem Rapsöl ließen aufgrund des kurzen Versuchseinsatzes keine ausreichend sichere Beurteilung zu [2]. Eigene Versuche führten aufgrund der unzureichenden Verbesserung des Rapsölkraftstoffes zu keinem Erflg [3]. Bei Abgasuntersuchungen zeigten sich bei Verwendung von additiviertem Rapsöl mit zunehmender Betriebsdauer deutliche Verschlechterungen [4]. Erste, erfolgversprechende Rezepturen zur Additivierung wurden im Rahmen von weiteren Prüfstandsuntersuchungen gefunden [5]. Für das notwendige Anschlussvorhaben fehlte eine Finanzierungsmöglichkeit.

Die untersuchten Rapsöl-Mischkraftstoffe hatten einen Rapsölanteil von 50 bis 80 Vol.-%.

In jüngster Zeit wird versucht, Dieselkraftstoff durch Zumischen von Rapsöl zu strecken. Ein erfolgversprechender Praxistest mit Schleppern älterer Bauart unter Erprobung von 30 % Rapsölbeimischung liegt vor [6]. Mögliche Motorstörungen bzw. –schäden werden bei diesem Test bewusst in Kauf genommen. Es soll die Langzeittauglichkeit nachgewiesen werden.

Motortests mit Rapsöl-Diesel-Mischungen auf dem Motorprüfstand mit anschließender Motorzerlegung zur Befundung wurde bisher an keiner anderen Stelle durchgeführt.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

In das Projekt waren drei weitere Partner eingebunden. Die Aufgaben waren wie folgt verteilt:

Motorinstallation auf dem Prüfstand und Durchführung der Prüfläufe:

Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen
Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart-Hohenheim
Herr Dipl.-Ing. Karl Maurer (Tel. 0711/459-2683)
Herr Helmut Gehrung (Tel. 0711/459-2685)
Herr Zbigniew Czaczyk (Tel. 0711/459-2846)

Motorzerlegung und -montage mit erster Begutachtung und Teildokumentation:

Firma Hans Svendsen, Max-Planck-Str. 30, 70736 Fellbach
Herr Lutz Ilgner (Tel. 0711 / 95753-35)

Begutachtung Einspritzdüsen, Kolben, Kolbenringe, Zylinderkopf und Durchführung der Schmierölanalysen:

Firma Deutz AG, Motorentwicklung, Ottostr. 1, 51149 Köln
Herr Dr. Lingens (Tel. 0221 / 8224529)
Herr Dr. H.-W. Knuth (Tel. 0221 / 8224234)
Herr Seif (Tel. 0221 / 8224519)

Kraftstoffanalysen:

Firma ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH
Trentiner Ring 30, 86345 Täfertingen
Herr Dr. Thomas Wilharm (Tel. 0821 / 4862518)

Teil II:

1. Versuchsmotoren

Für die Versuche wurde von der Firma Deutz AG, Köln ein Motor der Baureihe 2012 ausgewählt. Diese Motoren werden in Baumaschinen, Kompressoren, Aggregaten, Flur- und Förderzeugen sowie in der Landtechnik eingesetzt. Es handelt sich um schnelllaufende 4-Takt-Dieselmotoren mit Abgasturboaufladung und Flüssigkeitskühlung, die als 4- und 6-Zylinder-Reihenmotoren gebaut werden. Für erhöhte Motorleistung werden sie mit Ladeluftkühlung zusätzlich ausgestattet.

Die Motorbaureihe deckt den Leistungsbereich von 70 bis 160 kW im Standardprogramm ab. Die Baureihe 2012 arbeitet mit 2-Ventil-Technik. Besonderes Merkmal ist ein Niedrigdrall-Brennverfahren in Verbindung mit Einzelpumpen-Hochdruckeinspritzung bis 1600 bar. Die Einspritzdüsen sind mittig über dem Kolben im Zylinderkopf senkrecht angeordnet. Um die Abgasgrenzwerte nach COM2 einzuhalten, wurde der Kraftstoffförderbeginn und das Förderende um ca. 4 bis 6° Kurbelwinkel nach später eingestellt. Die als Versuchsträger dienenden beiden 4-Zylinder-Dieselmotoren stammten aus der Vorserie und hatten folgende Daten:

Versuchsmotor	BF4M2012C	BF4M2012
Leistung	84 kW bei 2300 U/min	70 kW bei 2500 U/min
Bohrung	101 mm	
Hub	126 mm	
Hubraum	4,04 dm³	
Verdichtung	1 : 19	
Einspritzdüsen	Sechs-Loch-Düse, lecköllos Öffnungsdruck 250 bar	
Regler	Mechanischer Fliehkraftregler	
Kraftstoffförderpumpe	Mechanische Rotorpumpe	

Mit dem ladeluftgekühlten Motor BF4M2012C wurden Prüflauf 1 und 2, mit dem Motor BF4M2012 der Prüflauf 3 durchgeführt.

2. Versuchskraftstoffe:

Als Kraftstoff für den Prüflauf 1 (Diesel) wurde handelsüblicher Winterdiesel verwendet, für Prüflauf 2 (25 Vol.-% Rapsöl/75 Vol.-% Diesel) wurde Rapsöl von der Ölmühle Speidel, Proßmarke zugemischt. Ab 170 Stunden des Prüflaufs 2 wurde Sommerdiesel als Basiskraftstoff verwendet. Für den Prüflauf 3 (50 Vol.-% Rapsöl/50 Vol.-% Diesel) wurde Rapsöl von der Ölmühle Unsöld, Gültstein eingesetzt. Die Ergebnisse der durchgeführten Kraftstoffanalysen sind in Tafeln 1 bis 6 aufgelistet.

Tafel 1

Rapsöl (kaltgepresst, gefiltert , Ölmühle Speidel)

Prüfparameter	Einheit	**Prüfergebnis**	min.	max	Methode
Dichte bei 15° C	kg/m³	919,5	900	930	DIN EN ISO 3675
Flammpunkt P.-M.	°C	223	220	-	DIN EN 22719
Heizwert, unterer	kJ/kg	36724	35000	-	DIN 51 900-2
Kin. Viskosität bei 40°C	mm²/s	34,75	-	38	DIN EN ISO 3104
Koksrückstand n. C.	Gew.-%	0,35	-	0,40	DIN EN ISO 10370
Jodzahl	g Jod/100g	112	100	120	DIN 53241-1
Schwefelgehalt	mg/kg	4	-	20	ASTM D 5453-93
Gesamtverschmutzung	mg/kg	33*/7	-	25	EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g	2,62	-	2,0	DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität 110°C	h	5,92	5	-	ISO 6886
Phosphorgehalt	mg/kg	3	-	15	ASTM D 3231-99
Aschegehalt	Gew.-%	0,009	-	0,01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt K.-F.	Gew.-%	0,051	-	0,075	prEN ISO 12937

*) Diese Rapsölcharge wurde einer zusätzlichen Feinfilterung unterzogen, um die Gesamtverschmutzung von ursprünglich 33 mg/kg auf 7 mg/kg (Grenzwert max. 25 mg/kg) zu senken.

Tafel 2

Diesel (handelsüblicher Winterdiesel nach EN 590)

Prüfparameter	Einheit	**Prüfergebnis**	min.	max.	Methode
Cetanzahl	-	56,4	51	-	EN ISO 5165
Cetanindex	-	49,2	46	-	EN ISO 4264
CFPP	°C	- 27	- 20	-	EN 116
Cloudpoint	°C	- 6,3	-	-	DIN EN 23015
Dichte bei 15°C	kg/m³	837,8	820	845	EN ISO 12185
Destillationsverlauf	-				ISO 3405: 1998
Destillationsbeginn	°C				
% (V/V) aufgefangen bei 250°C	% (V/V)	44,5	-	65	
% (V/V) aufgefangen bei 350°C	% (V/V)	94,9	85		
95 % Punkt	°C	350,1	-	360	
Flammpunkt P.-M.	°C	67	55	-	DIN EN 22719
Gesamtverschmutzung	mg/kg	11	-	24	EN 12662
Kin. Viskosität bei 40°C	mm²/s	2,43	2,0	4,5	DIN 51 562-1
HFRR bei 60°C	µm	411	-	460	ISO CD 12156
Koksrückstand (10% D.)	Gew.-%	0,1	-	0,3	ISO 10370
Korrosionswirkung auf Kupfer	Korr.Grad	1	1		DIN EN ISO 2160
Schwefelgehalt	Gew.-%	0,003	-	0,005	EN 24260
Wassergehalt K.-F.	mg/kg	27	-	200	prEN ISO 12937
Oxidasche	Gew.-%	0,001	-	0,01	DIN EN ISO 6245
Aromatengehalt	Gew.-%				IP 319/95

Tafel 3
Diesel (handelsüblicher Sommerdiesel nach EN 590)

Prüfparameter	Einheit	**Prüfergebnis**	min.	max.	Methode
Cetanzahl	-	61	51	-	EN ISO 5165
Cetanindex	-	52,1	46	-	EN ISO 4264
CFPP	°C	-4	-	-20	EN 116
Cloudpoint	°C	+ 0,8	-	-	DIN EN 23015
Dichte bei 15°C	kg/m³	831,8	820	845	EN ISO 12185
Destillationsverlauf					prEN ISO 3405
Destillationsbeginn	°C	175	-	-	
% (V/V) aufgefangen bei 250°C	% (V/V)	42,9		65	
% (V/V) aufgefangen bei 350°C	% (V/V)	93,7	85	-	
95 % Punkt	°C	355,6	-	360	
Flammpunkt P.-M.	°C	75	55	-	DIN EN 22719
Gesamtverschmutzung	mg/kg	15	-	24	EN 12662
Kin. Viskosität bei 40°C	mm²/s	2,59	2,00	4,00	DIN 51 562-1
HFRR bei 60°C	µm	270	-	460	ISO CD 12156
Koksrückstand (10% D.)	Gew.-%	0,06	-	0,3	EN ISO 10370
Korrosionswirkung auf Kupfer	Korr.Grad	1	1		EN ISO 2160
Schwefelgehalt	mg/kg	85	-	50	EN 24260
Wassergehalt K.-F.	mg/kg	47	-	200	EN ISO 12937
Oxidasche	Gew.-%				DIN EN ISO 6245
Aromatengehalt	Gew.-%	2,4	-	11	IP 391/95

Tafel 4
Rapsöl (kaltgepresst, gefiltert, Ölmühle Unsöld)

Prüfparameter	Einheit	**Prüfergebnis**		RK Standard		Methode
		1. Lieferung 25.08.2002	2. Lieferung 24.11.2002	min.	max.	
Dichte bei 15°C	kg/m³	920,9	918,6	900	930	EN ISO 12185
Flammpunkt P.-M.	°C	255	208,5	220	-	DIN EN 22719
Heizwert, unterer	J/g	35.230	36.470	35.000	-	DIN 51 900-2
Kin.Viskosität bei 40°C	mm²/s	34,80	34,45	-	38	EN ISO 3104
Cetanzahl FIA	-	-	51	-	-	FIA 100/3
Koksrückstand n.C.	Gew.-%	0,25	0,28	-	0,4	EN ISO 10370
Jodzahl	g Jod/100g	112	110	-	120	prEN 14111
Schwefelgehalt	mg/kg	15,9	40	-	20	ASTM D 5453
Gesamtverschmutzung	mg/kg	14	12	-	25	EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g	2,78	2,54	-	2	ISO 660
Oxidationsstabilität 110°C	h	4,4 [1)]	10,3	5	-	prEN 14112
Oxidasche	Gew.-%	0,005	0,005	-	0,01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt K.-F.	mg/kg	659	695		750	EN ISO 12937
Phosphorgehalt	mg/kg	7,4	13		15	ASTM D 3231-99

[1)] bei 120°C

Das im Versuch verwendete Rapsöl entsprach den wichtigsten bei der Gewinnung zu beeinflussenden Kenngrößen, nämlich der Gesamtverschmutzung und dem Phosphorgehalt, den

Vorgaben des derzeit gültigen Qualitätsstandards. Die leicht erhöhte Neutralisationszahl war in der Mischung unbedenklich (vgl. Tafel 5).

Tafel 5
Mischkraftstoff (50 Vol.-% Rapsöl + 50 Vol.-% Diesel)

Prüfparameter	Einheit	**Prüfergebnis**	Methode
Dichte bei 15°C	kg/m³	876,2	EN ISO 12185
Flammpunkt P.-M.	°C	82	DIN EN 22719
Kin. Viskosität bei 40°C	mm²/s	9,62	EN ISO 3104
Wassergehalt K.-F.	mg/kg	248	EN ISO 12937
Oxidationsstabilität	h	5,9	ISO 6886
Heizwert, unterer	J/g	38715	DIN 51 900-2
Neutralisationszahl	mg KOH/g	1,423	ISO 660

Tafel 6
Heizwertvergleich (Analysenwerte)

	unterer Heizwert KJ/kg	unterer Heizwert [1)] KJ/Liter	Dichte bei 15°C kg/m³
Diesel (typischer Wert)	42.780	35.841	837,8
Rapsöl 1	36.724	33.768	919,5
Rapsöl 2	35.230	32.443	920,9
Rapsöl 3	36.470	33.501	918,6
25 % ROE/75 % DK		35.323	858,2 [1)]
50 % ROE/50 % DK	38.715	33.922	876,2

[1)] errechnete Werte

Die Mischkraftstoffe haben volumenbezogen im Vergleich zu Diesel einen um 1,5 bis 5,4 % niedrigeren Energiegehalt.

3. Motorkennlinien

Mit jedem Versuchskraftstoff wurde vor Beginn des Prüflauf Volllastkennlinien aufgenommen.

In Abbildungen 1 bis 4 ist das Ergebnis für den Motor mit Ladeluftkühlung bei Dieselbetrieb und für den Mischkraftstoff mit 25 % Rapsölanteil dargestellt, Abbildungen 5 bis 8 zeigen das entsprechende Messergebnis für Dieselkraftstoff und bei Zumischung von 50 % Rapsöl zu Diesel für den Motor ohne Ladeluftkühlung.

Es wird deutlich, dass die erreichte Motornennleistung des ladeluftgekühlten Motors beim Mischkraftstoff 25 % ROE / 75 % DK um ca. 5 % niedriger ist. Bei weiter zunehmender Belastung liegt die erbrachte Motorleistung bei Drehzahlen unter 2000 U/min beim Mischkraftstoff jedoch über der Dieselleistung (bei 1500 U/min um + 2,45 %). Dieses Verhalten weist auch der nur aufgeladene Motor beim Mischkraftstoff 50

% ROE / 50 % DK auf. Hier liegt die Motornennleistung um 3,2 % unter dem Dieselwert und bei Drehzahlen unterhalb 2300 U/min liegt die Leistung beim Mischkraftstoff ebenfalls höher, im Punkt des höchsten Drehmoments (1500 U/min) liegt der Wert um 5,6 % über dem Dieselwert.

Eine Begründung ist aus Untersuchungen zum Einspritzverhalten von Rapsöl am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock abzuleiten. Diese zeigten Veränderungen des Einspritzspitzendrucks bei gleichzeitigem Anstieg der Einspritzdauer, woraus ein Anwachsen des eingespritzten Kraftstoffvolumens resultieren kann. Für Rapsöl wurde eine Erhöhungen des Einspritzvolumens von bis zu 20 % festgestellt [7].

Die Änderungen in der Motorleistung spiegeln sich entsprechend im jeweiligen Drehmomentverlauf wider.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist bei den Mischkraftstoffen deutlich höher als bei Diesel, was sich im stündlichen Kraftstoffverbrauch ebenfalls widerspiegelt.

Die Energieausnutzung des Motors ist wohl wegen des späteren Einspritzzeitpunkts des COM2-Motors bei 25 % Rapsölanteil im Kraftstoff insgesamt etwas schlechter als bei Diesel. Der Motorwirkungsgrad konnte bei Nenndrehzahl (2300 U/min) im Dieselbetrieb zu 36,2 % und bei 25 % Rapsölanteil zu 35,0 % ermittelt werden. Für den Betriebspunkt des höchsten Drehmomentes (1500 U/min) lag der Motorwirkungsgrad im Dieselbetrieb bei 40,0 % und bei 25 % Rapsölanteil im Kraftstoff nur bei 37,0 %. Dagegen wurde der Motorwirkungsgrad des nur aufgeladenen Motors beim Einsatz des Mischkraftstoffs 50 % ROE / 50 % DK geringfügig höher als bei reinem Dieselkraftstoff ermittelt (+ 1,8 … + 0,4 %).

Anmerkung: Die festgestellten Abweichungen bei der Energieausnutzung liegen im Bereich der möglichen Bandbreite als Folge von Fehlermöglichkeiten (Genauigkeit der Analysen und beim Ablesen der Werte am Prüfstand).

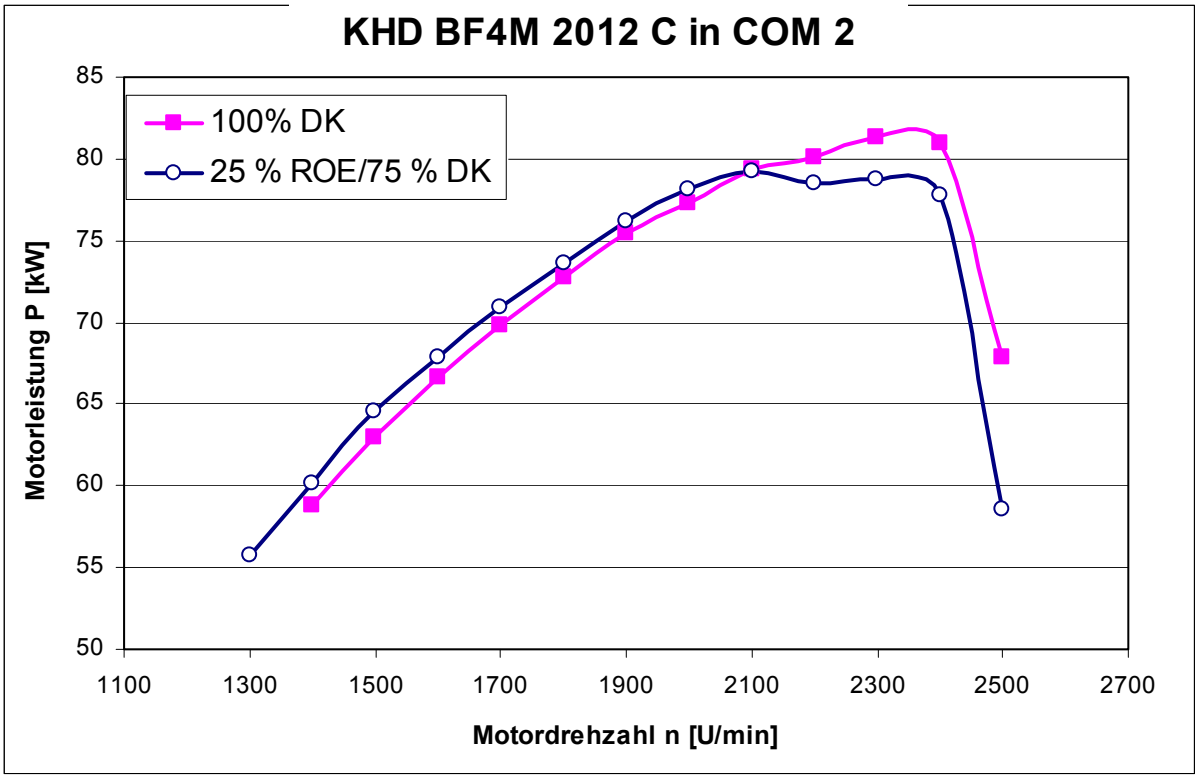


Abbildung 1: Motorleistung bei Dieselbetrieb (DK) und bei Zumischung von 25 Vol.-% Rapsöl (25 % ROE/75 % DK)

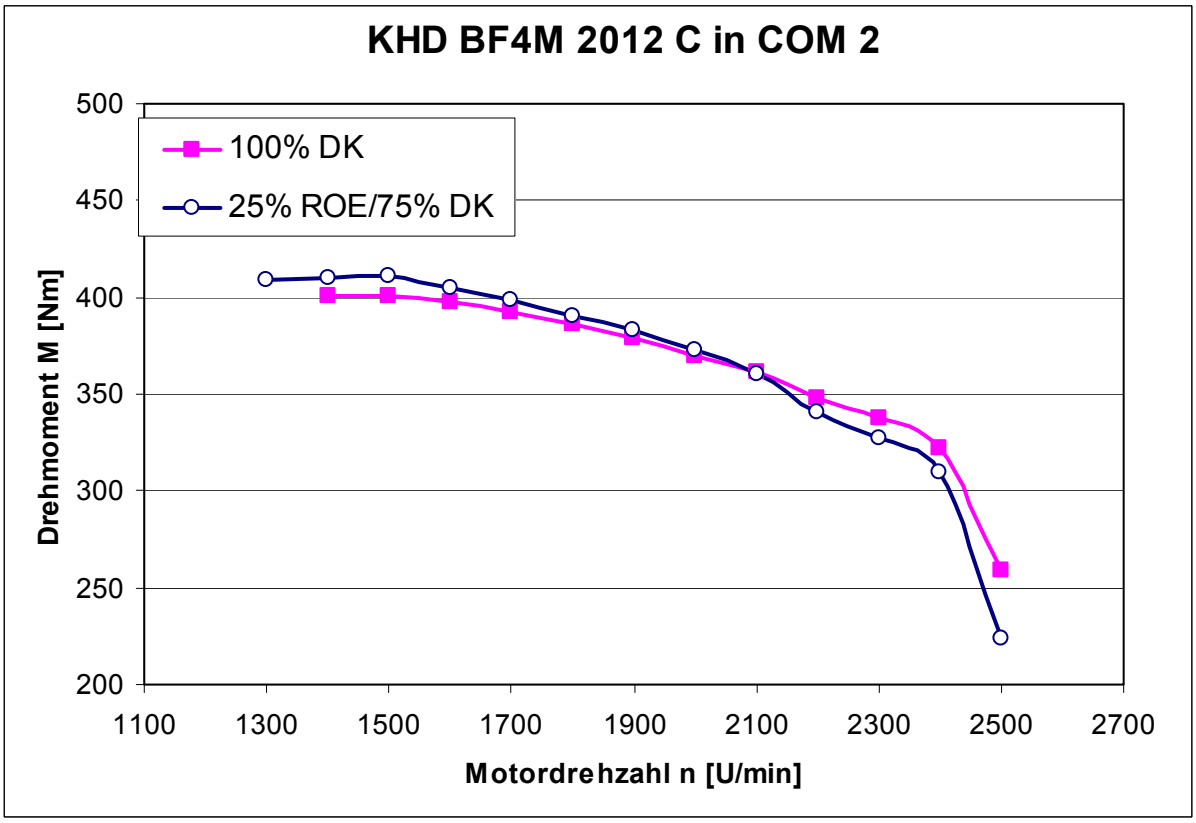


Abbildung 2: Drehmomentverlauf bei DK und Mischkraftstoff 25 % ROE/75 % DK

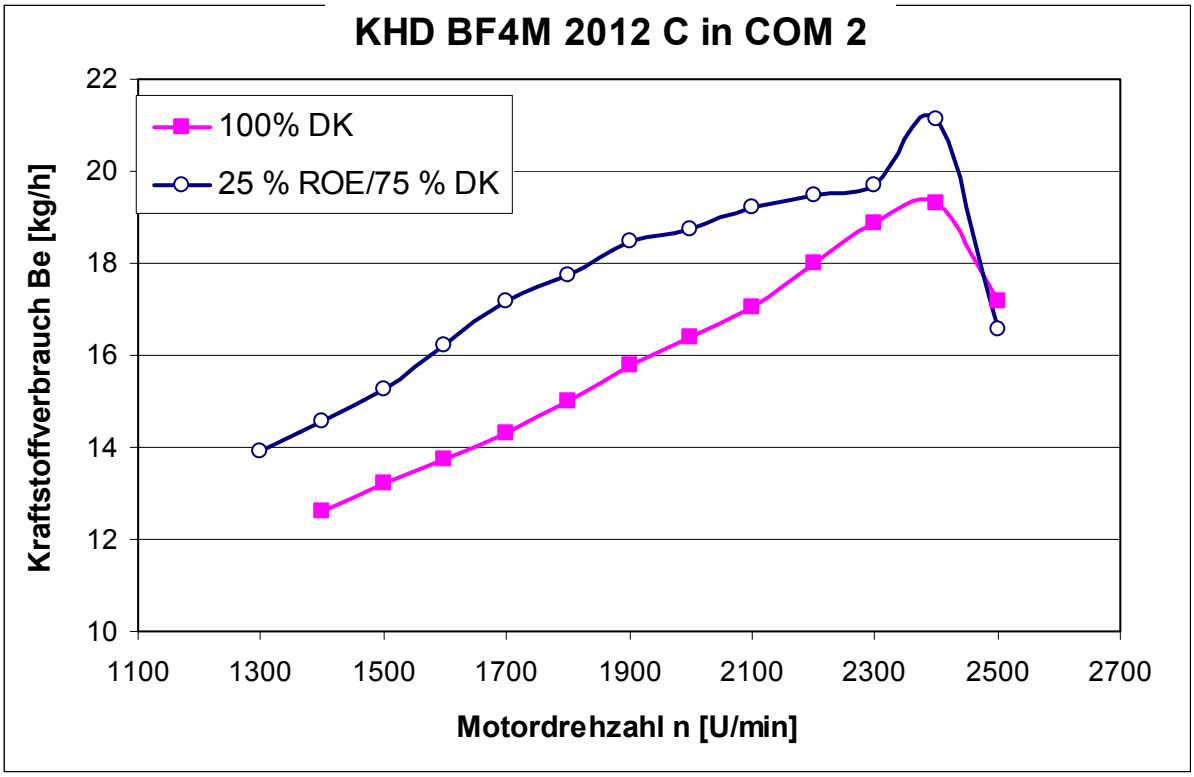


Abbildung 3: Kraftstoffverbrauch bei DK und Mischkraftstoff 25 % ROE/75 % DK

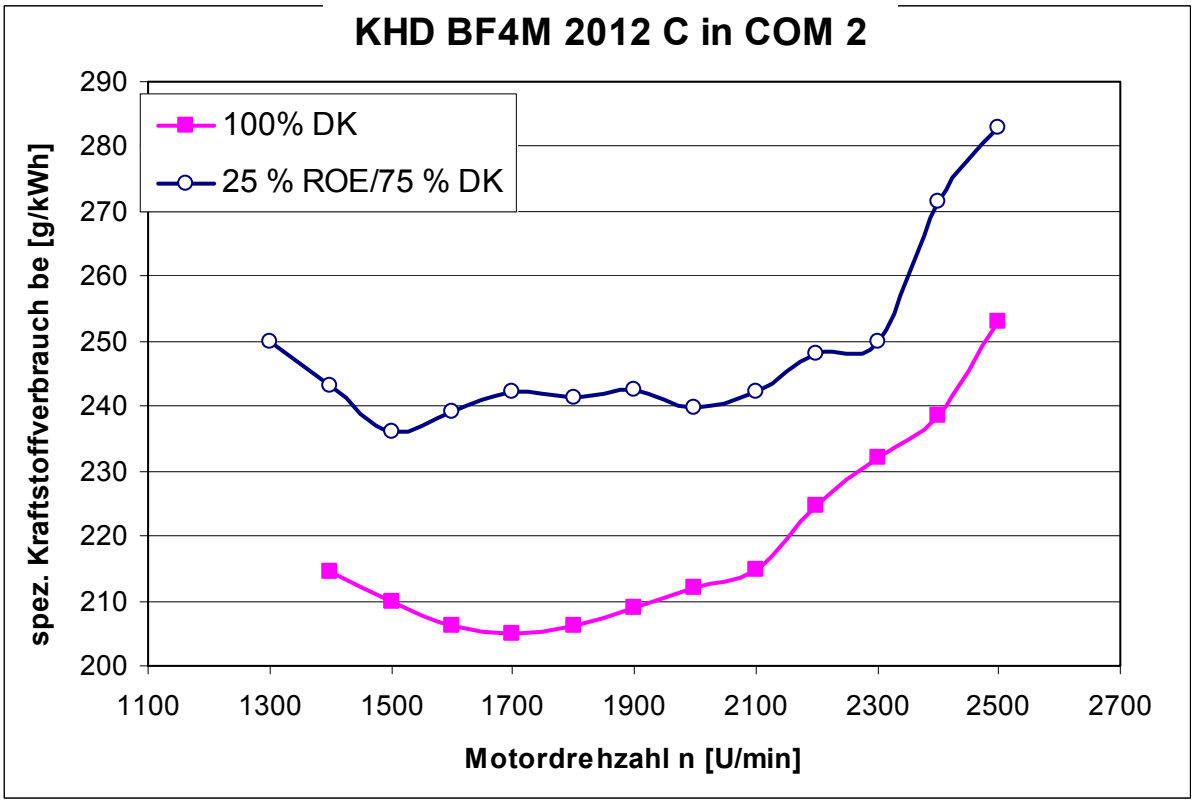


Abbildung 4: spez. Kraftstoffverbrauch bei DK und Mischkraftstoff 25 % ROE/ 75 % DK

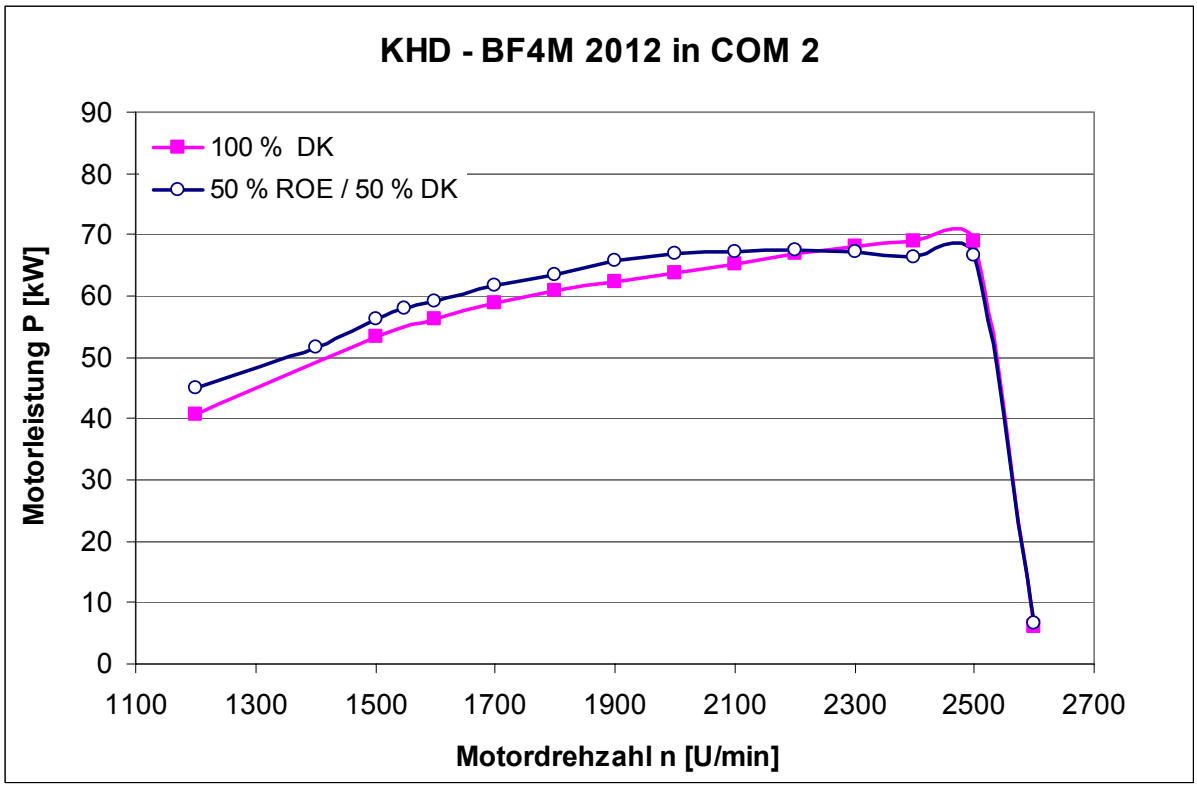


Abbildung 5: Motorleistung bei Dieselbetrieb (DK) und Zumischung von 50 Vol.-% Rapsöl (50 % ROE/50 % DK)

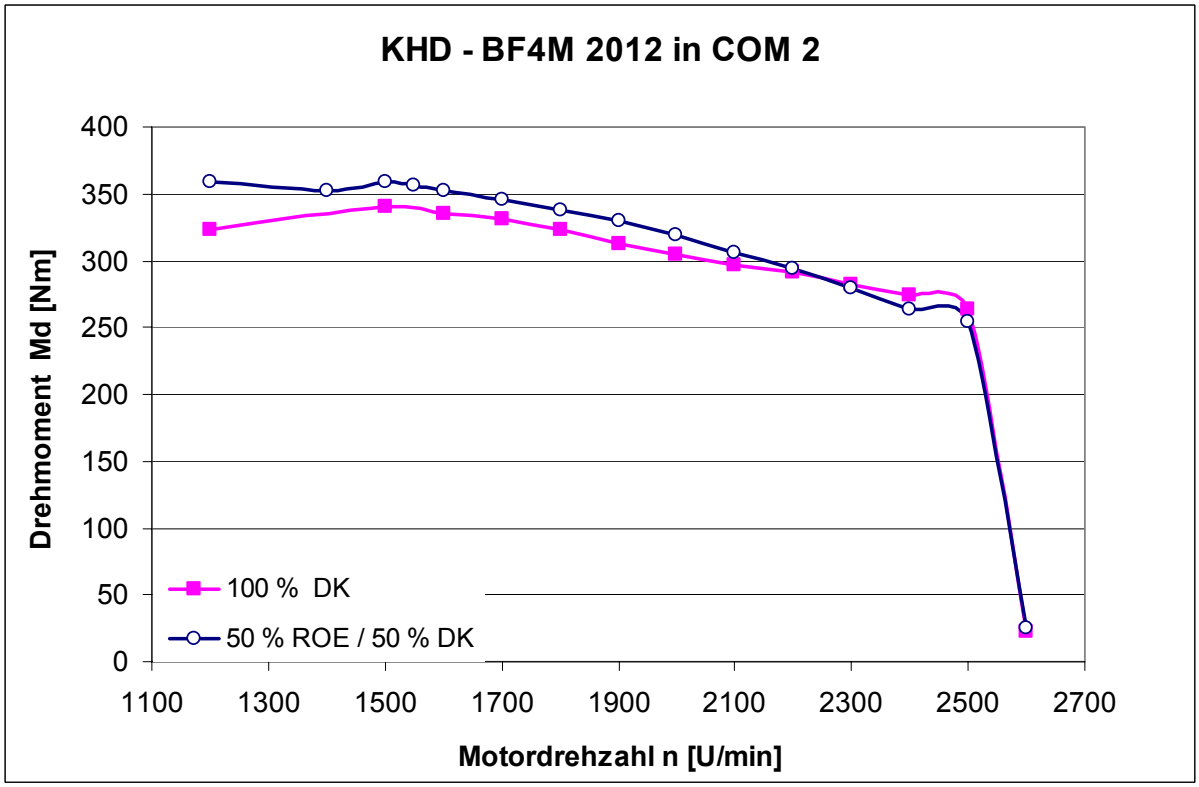


Abbildung 6: Drehmomentverlauf bei DK und Mischkraftstoff 50 % ROE/50 % DK

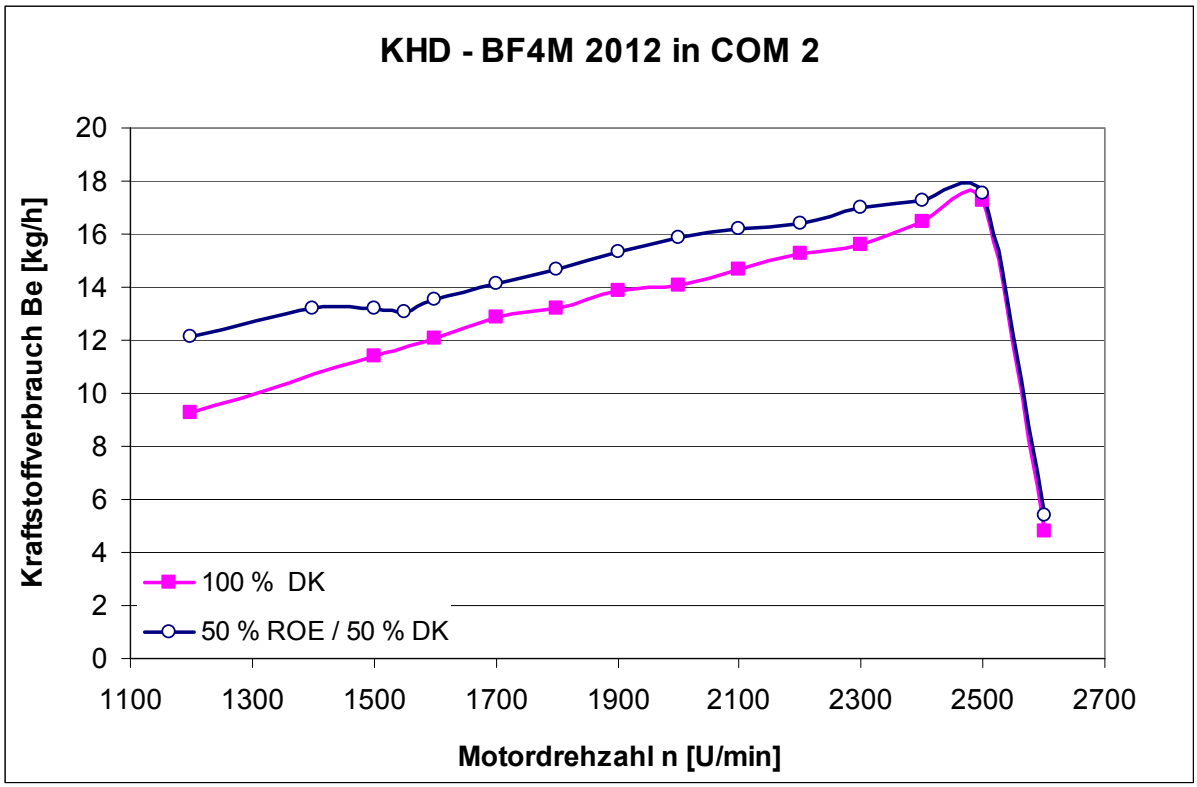


Abbildung 7: Kraftstoffverbrauch bei DK und Mischkraftstoff 50 % ROE/50 % DK

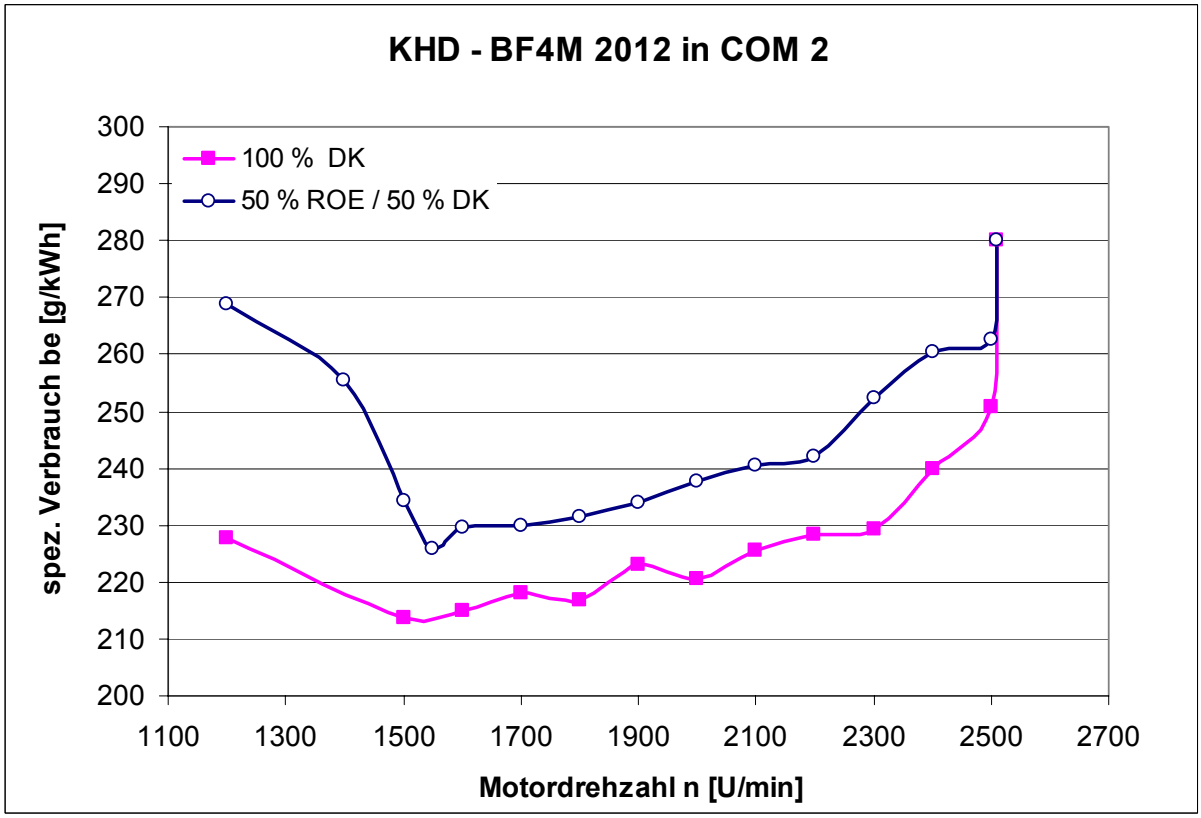


Abbildung 8: spez. Kraftstoffverbrauch bei DK und Mischkraftstoff 50 % ROE/ 50 % DK

4. Durchführung des Prüflaufs

Die Prüfläufe wurden im 8-Punkte-Stufenzyklus C1 nach ISO 8178 durchgeführt. Mit den bei der Aufnahme der Volllastkennlinien ermittelten Daten wurden die einzelnen Laststufen festgelegt. Diese sind aus Tabelle 7 für die durchgeführten Prüfläufe ersichtlich.

Bei der Durchführung der Prüfläufe wurden täglich zwischen 3 und 6 Durchgänge gefahren, d.h. der Prüfstandsbetrieb lag zwischen 10 und 20 Stunden fortlaufend. Am Ende des täglichen Motorbetriebs wurde die Leerlaufzeit auf 15 Minuten begrenzt und beim nächsten Start lief der Motor zunächst 15 Minuten im Leerlauf.

Die Kraftstoffversorgung des Motors erfolgte jeweils aus einem 1000-Liter-Container, in dem auch die Mischungen hergestellt wurden. Die Kraftstofftemperatur wurde nicht geregelt, so dass sich die Temperatur des Kraftstoffs bei abnehmendem Behälterinhalt und längerer Motorbetriebszeit erhöhte. Die Kraftstofftemperatur bewegte sich hauptsächlich im Bereich zwischen 35 und 46°C (Höchstwert 52°C).

Tafel 7
8-Punkte-Stufenzyklus C1 nach ISO 8178
und Einstellwerte

				Prüflauf 1 und 2		Prüflauf 3		
Last-stufe	Drehzahl	Last %	Faktor	Drehzahl U/min	Last kg	Drehzahl U/min	Last kg	Zeit Minuten
1	Nenndrehzahl	100	0,15	2.300	48,2 [1)]	2.500	36,0	30
2	Nenndrehzahl	75	0,15	2.300	36,15	2.500	27,0	30
3	Nenndrehzahl	50	0,15	2.300	24,1	2.500	18,0	30
4	Nenndrehzahl	10	0,10	2.300	4,8	2.500	3,6	20
5	n bei Md_{max}	100	0,10	1.500	57,0	1.500	48,4	20
6	n bei Md_{max}	75	0,10	1.500	42,7	1.500	36,3	20
7	n bei Md_{max}	50	0,10	1.500	28,5	1.500	24,2	20
8	Leerlauf	0	0,15	900	0	900	0	30

[1)] bei Prüflauf 2 (25 % ROE/75 % DK) wurde bei Stufe 1 die jeweils erreichbare Last eingestellt (Mittelwert 46,3 kg)

5. Ergebnisse der Motorbefundung

5.1 Beeinflussung des Schmieröls

Regelmäßige, möglichst tägliche Kontrolle des Schmierölfüllstands ist beim Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff oder –komponente zwingend, da ein plötzlicher Anstieg der Füllmenge einen „meist gefährlichen“ Rapsöleintrag bedeutet. Bei den durchgeführten Prüfläufen ist dies nicht aufgetreten. Die Schmierölmenge blieb annähernd

gleich, d.h. der üblicherweise geringe Verbrauch wurde durch den Kraftstoffeintrag „ausgeglichen“.

Aus den Schmierölanalysen sind erste Bewertungen zur Beurteilung der Folgen bei Rapsölzumischung zu Dieselkraftstoff möglich. Von den vollständig ermittelten Analysenwerten (siehe Anhang) werden als besonders relevant die Verschmutzung durch den Kraftstoff- und den Russeintrag sowie die Zunahme des Gehalts an Eisen als wichtigstem Verschleißmetall während der Motorlaufzeit betrachtet. Die festgestellten Werte sind in Tafel 8 aufgelistet und in den Abbildungen 9 bis 11 grafisch dargestellt.

Tafel 8

Laufzeit [h]	2	50	100	150	200	250	300
Russ [Gew.-%]							
100 % DK	< 0,01	0,03	0,07		0,21	0,30	0,30
25 % Rapsöl		0,20	0,50	0,87	1,14		1,84
50 % Rapsöl		0,2	0,41	0,69	0,88	1,17	1,57
Kraftstoff [Gew.-%]							
100 % DK	0,00	0,00	1,30		2,30	1,83	1,92
25 % Rapsöl		0,80	2,80	7,20	8,10		10,2
50 % Rapsöl		1,9	3,9416	5,6056	7,17	8,66	10,23
Eisen [mg{kg]							
100 % DK	7,70	13,20	21,00		40,00	52,00	57,00
25 % Rapsöl		32,00	46,00	58,00	76	100	116
50 % Rapsöl		21,6	35,7	54,7	68,2	88,3	110,5

Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, erhöht sich bei der Zumischung von Rapsöl zu Diesel der Kraftstoffgehalt im Schmieröl nach 300 Betriebsstunden um den Faktor 5. Bei den Versuchen mit Rapsöl-Diesel-Mischungen ist als Kraftstoff im Schmieröl nur der Rapsöleintrag berücksichtigt, d.h. der höchstens zulässige Wert von 10 Gew.-% Rapsöl im Schmieröl ist nach 300 Stunden schon erreicht. So ist anstelle des bei Dieselbetrieb üblichen Wechselintervalls von 500 Stunden dieser auf 300 Stunden zu verkürzen.

Der Rapsöleintrag erfolgt hauptsächlich beim Kaltstart des Motors und im Leerlaufbetrieb. Bei Motorleerlauf liegt die gemessene Abgastemperatur bei nur 85 bis 90°C.

Für die starke Erhöhung des Rapsölanteils im Schmieröl zwischen 100 und 150 Stunden Laufzeit beim Mischkraftstoff mit 25 % Rapsöl fehlt eine schlüssige Erklä-

rung. Der Rapsöleintrag ins Schmieröl scheint bei höher eingestellter Motornennleistung (2012C) trotz der geringeren Rapsölbeimischung zu Diesel in etwa gleich zu sein wie beim Motor mit niedrigerer Nennleistung und höherer Rapsölzumischung.

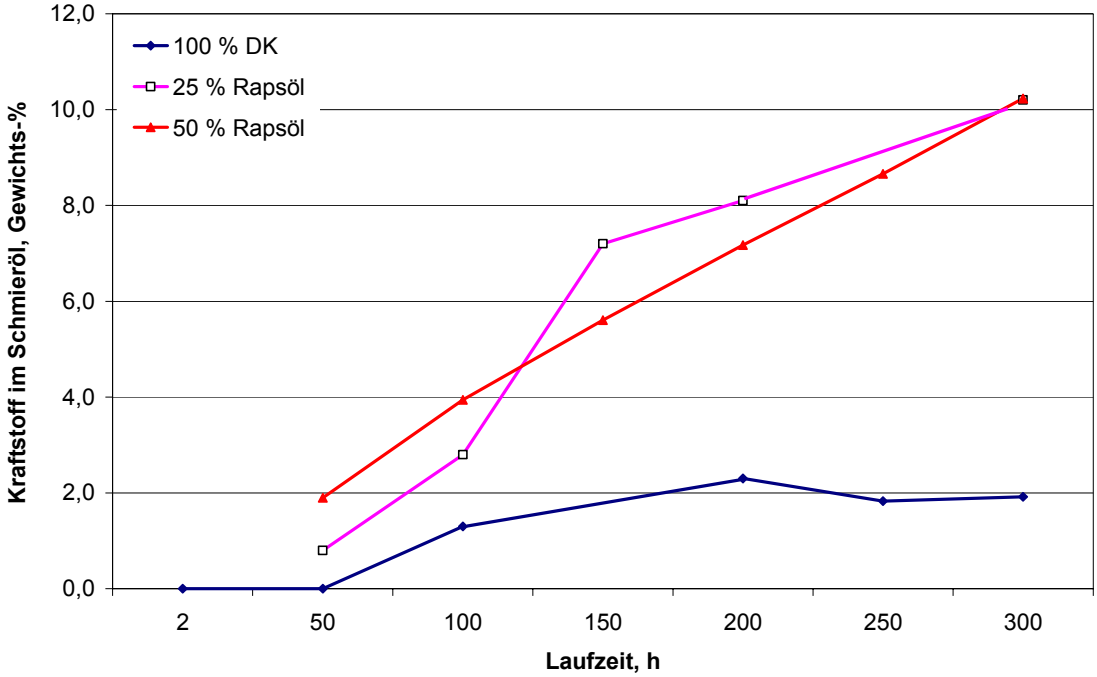


Abbildung 9: Kraftstoffeintrag in das Schmieröl bei den durchgeführten Prüfläufen

Der ermittelte Russgehalt im Schmieröl (Abbildung 10) ist um den Faktor 5 bis 6 höher als beim reinen Dieselbetrieb und liegt bei leistungstärkeren Motor trotz geringerem Rapsölanteil in der Mischung insgesamt höher. Das verbliebene Schmutztragevermögen des Schmieröls ist noch ausreichend. Der zulässige Grenzwert für den Russgehalt beträgt maximal 3 Gew.-%.

Der gegenüber Dieselbetrieb höhere Russeintrag liegt in der etwas schlechteren Verbrennung des Rapsölanteils in der Mischung als Folge der veränderten Strahllängenentwicklung und der Düsenverkokung. Bei den nicht angepassten Einspritzdüsen kommt es zudem vermutlich wegen des vermehrten Wandfilmauftrag von flüssigem Kraftstoff zu einem stärkeren Rapsöleintrag in das Schmieröl [7].

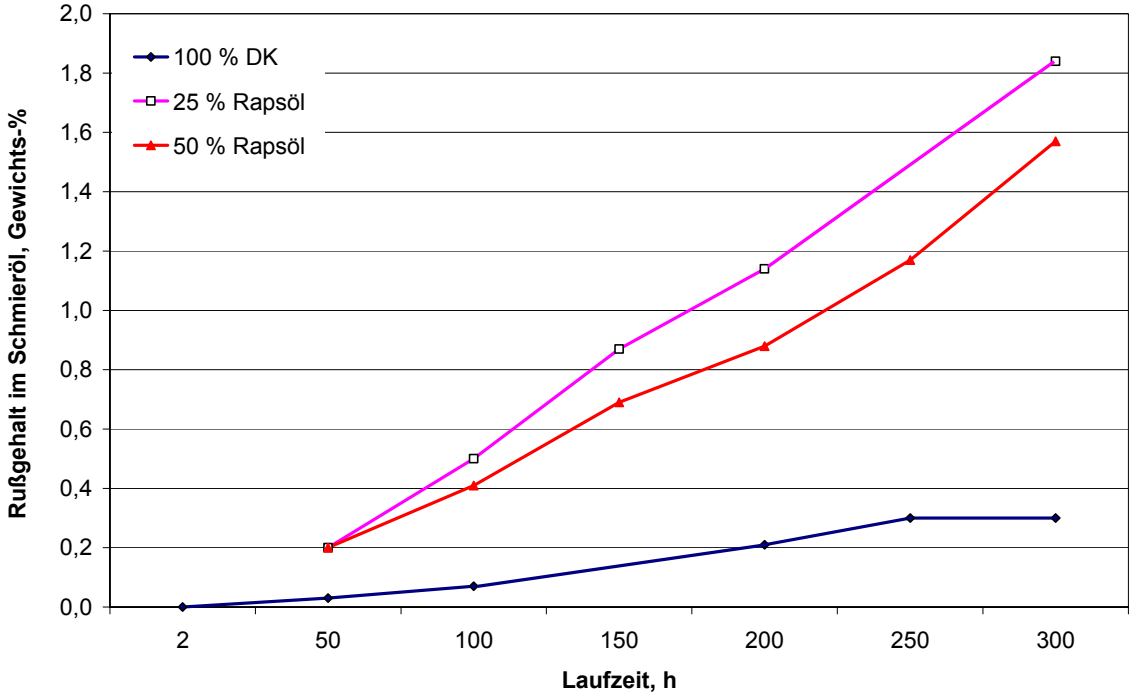


Abbildung 10: Rußgehalt im Schmieröl bei den durchgeführten Prüfläufen

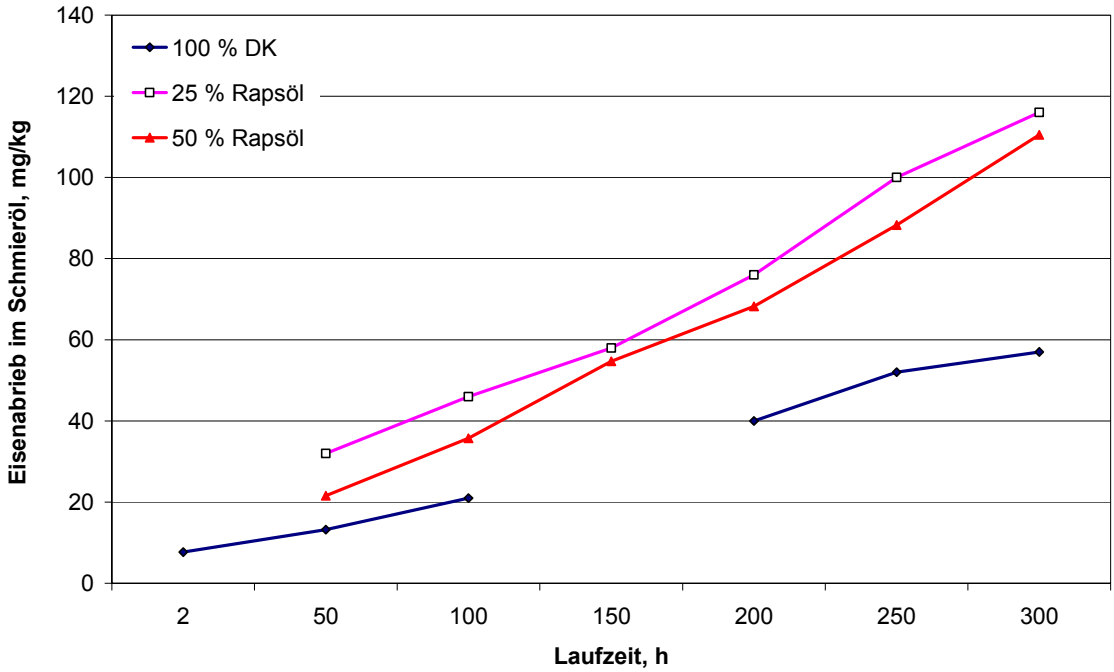


Abbildung 11: Eisenabrieb im Schmieröl bei den durchgeführten Prüfläufen

Der Eisenabrieb (Abb. 11) hat sich bei beiden Rapsöl-Diesel-Mischungen annähernd verdoppelt. Er lässt den Schluss zu, dass sich die Lebensdauer des Motors infolge größerem Verschleiß entsprechend verkürzt, wenn nicht andere rapsölbedingte Gründe zu noch früherem Motorversagen führen.

5.2 Düsenverkokung

Der Einfluss zunehmender Rapsölbeimischung zu Diesel zeigt sich besonders an der Düsenverkokung. Nach 300 Stunden Prüflauf liegt die Verkokung der Düsen im Mittel bei der Zumischung von 25 % Rapsöl bei 9,5 mg und bei 50 % Rapsöl in der Mischung bei 15,7 mg gegenüber 2 bis 5 mg bei reinem Diesel (vgl. Tafel 9).

Tafel 9

		Verkokung mg	Ascheanteil %
25 % Rapsöl	Düse 1	10,6	47,2
	Düse 2	7,3	27,4
	Düse 3	8,7	48,3
	Düse 4	11,2	39,3
	Mittelwert	9,5	40,5
50 % Rapsöl	Düse 1	17,4	25,9
	Düse 2	14,8	25,0
	Düse 3	15,6	27,6
	Düse 4	14,9	25,5
	Mittelwert	15,7	26,0
Diesel (typisch)	Mittelwert	2 … 5	

Die Überprüfung der Düsen ergab ein als mäßig einzustufendes Spritzbild, der Abspritzdruck lag bei 231 bar ± 8 bar.

Die folgenden Fotos (Abbildungen 12 bis 23) zeigen die Düsen aus dem Prüflauf mit dem Mischkraftstoff 50 % ROE / 50 % DK. Die umfangreichen Ablagerungen von Verbrennungsrückständen um die Spritzlöcher und das teilweise Abplatzen der Verkokungen ist erkennbar. Die vorhandene Düsenverkokung hat auf die Verbrennung mit Sicherheit bereits einen nachteiligen Einfluss, was bei der weiteren Betrachtung des zerlegten Motors auch noch ersichtlich wird.

Anmerkung: *Beim leistungstärkeren Motor wurde vermutlich als Folge der Düsenverkokung die erreichbare Nennleistung bei der Mischung 25 % ROE / 75 % DK nach 140 Stunden Laufzeit kontinuierlich zunehmend bis zu 7 % geringer. Danach wurde vermutlich infolge des Abplatzens von Verkokungen (vor Verschluss der Spritzlöcher ?) die ursprüngliche Leistung wieder erreicht. Sie nahm beim weiteren Prüflauf dann wieder leicht ab.*

Abbildung 12: Einspritzventile nach dem Prüflauf mit 50 % ROE/50 % Diesel

Abbildung 13: Verkokung an Düse 1 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

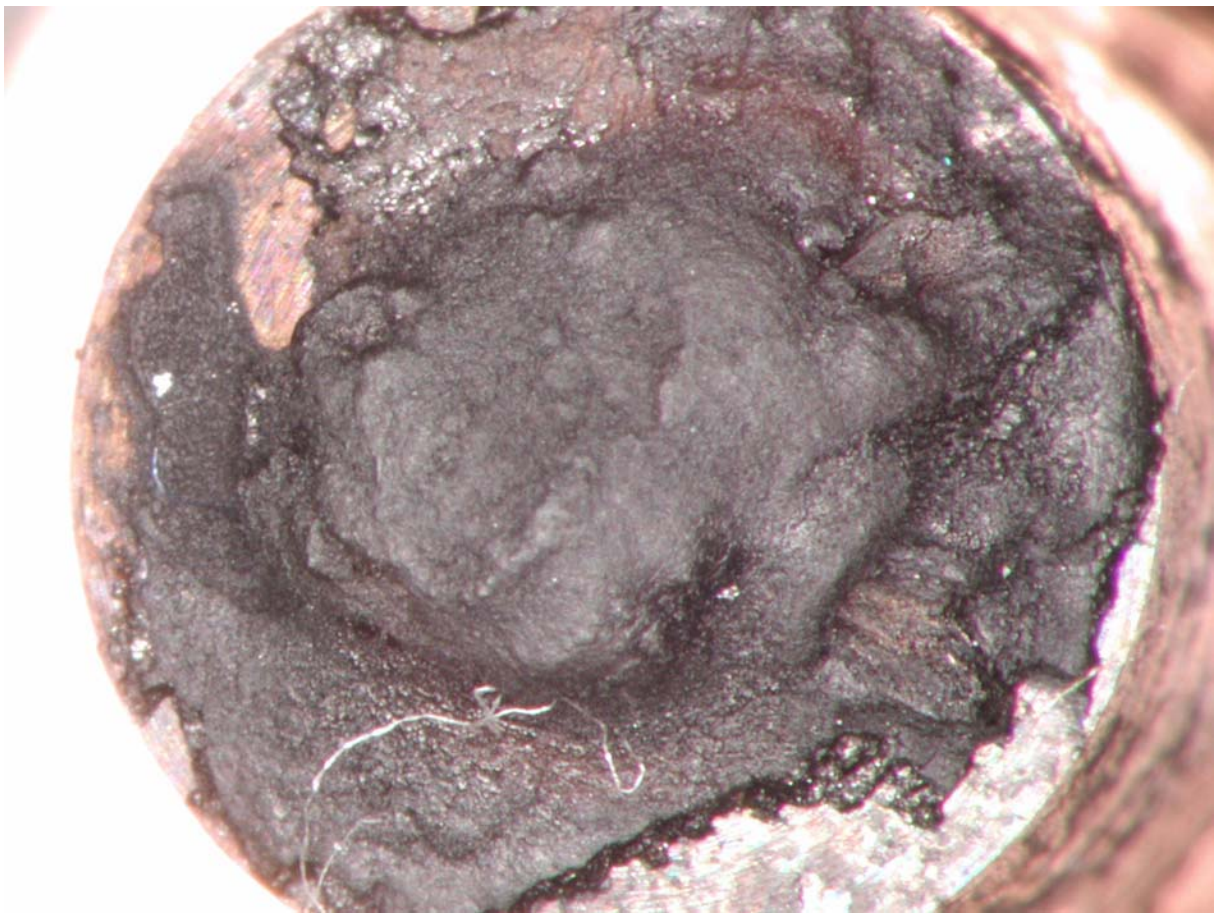


Abbildung 14: Verkokung an Düse 1 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 15: Verkokung an Düse 1 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

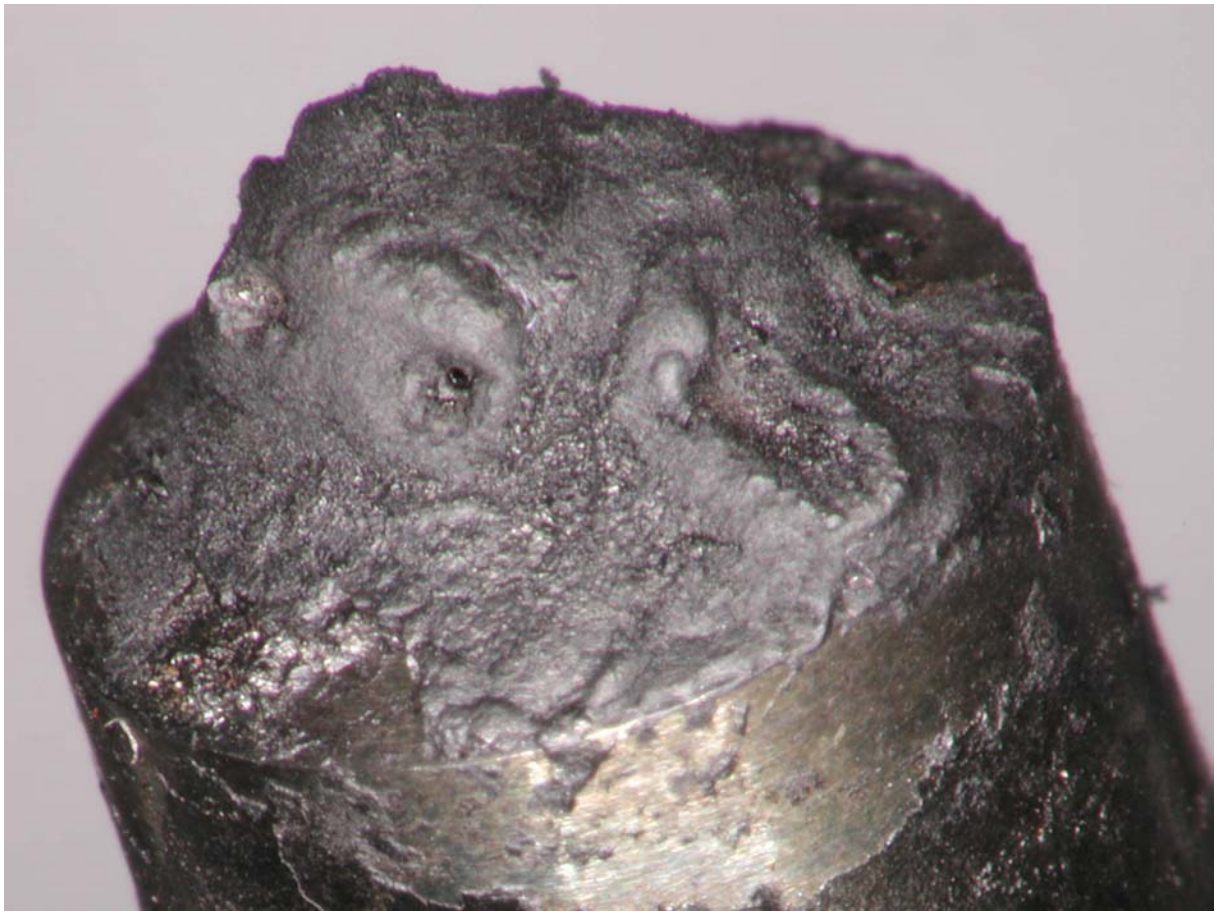


Abbildung 16: Verkokung an Düse 2 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 17: Verkokung an Düse 2 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 18: Verkokung an Düse 2 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 19: Verkokung an Düse 3 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 20: Verkokung an Düse 3 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 21: Verkokung an Düse 3 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

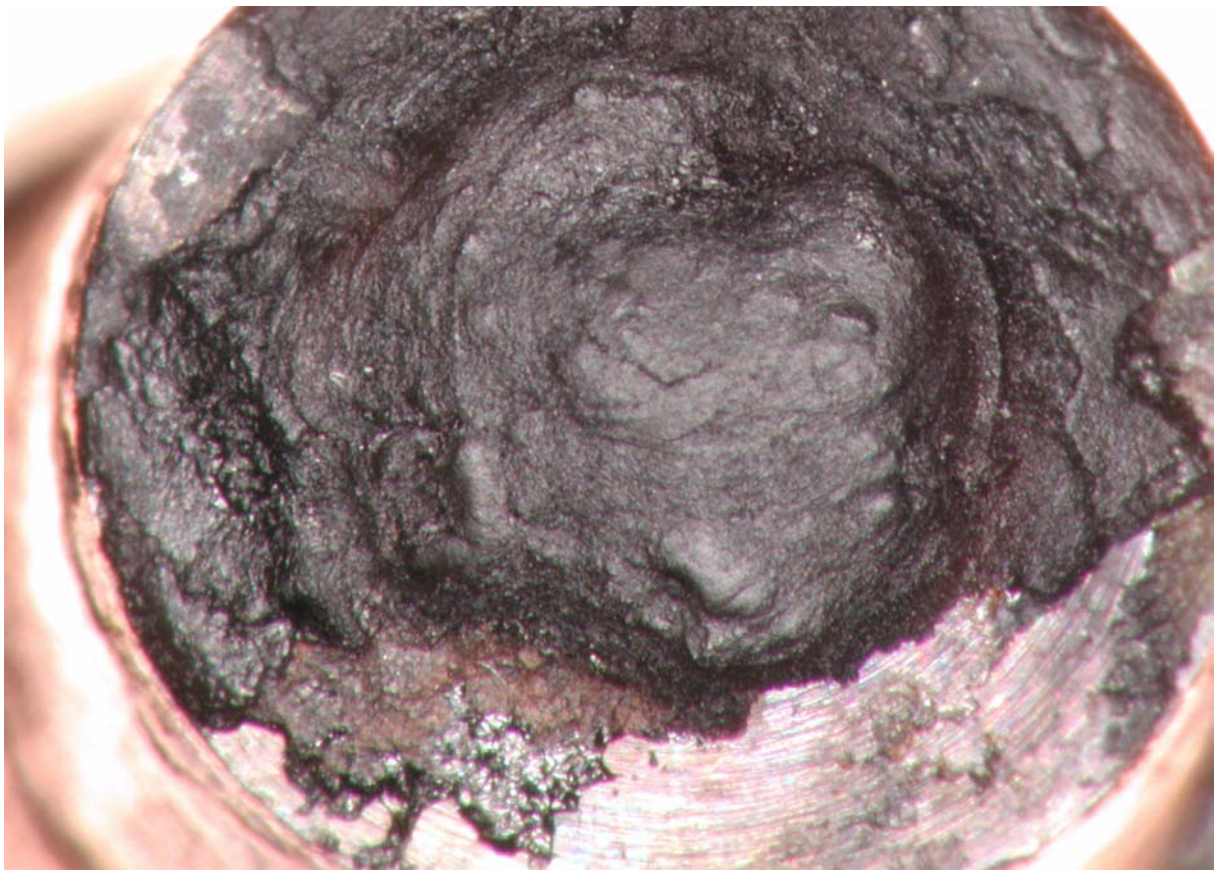


Abbildung 22: Verkokung an Düse 4 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

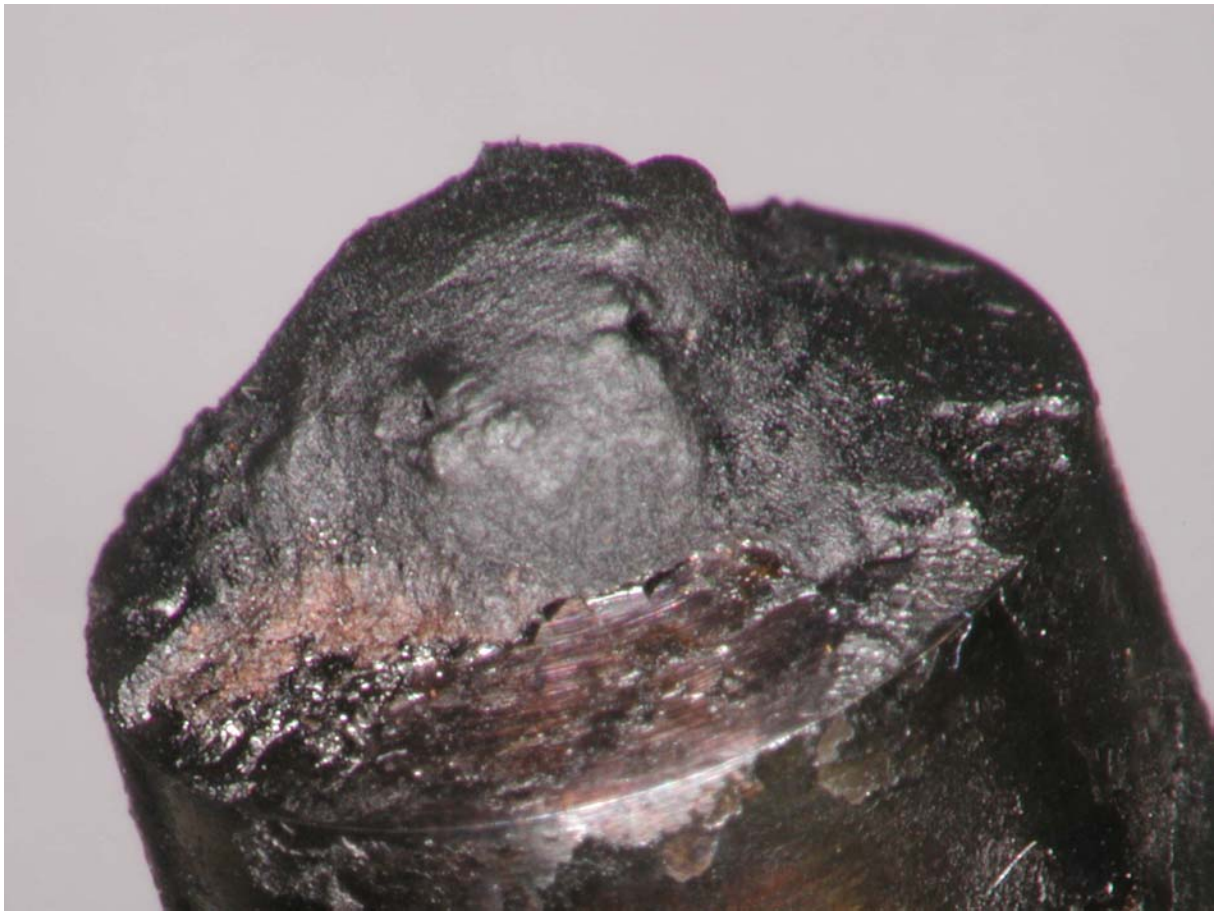


Abbildung 23: Verkokung an Düse 4 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

5.3 Zylinderkopf und –block

Der Zylinderkopf und –block zeigte nach dem Prüflauf mit Diesel keine Auffälligkeiten. Die üblichen Dieselrussschwärzungen am Kopf (Abb. 24) und die Abbildung des Spritzbildes an den Kolben (Abb. 25) sowie saubere Zylinderwände ohne feste Kruste oberhalb des obersten Kolbenrings (Abb. 26) bestätigen die erwartet gute Verbrennung.

Bei 25 % Rapsöl im Dieselkraftstoff zeigen sich am Zylinderkopf bereits deutliche Spuren örtlicher Anlagerungen von Verbrennungsrückständen, welche durch verändertes Abspritzen des Kraftstoff infolge der Düsenverkokung verursacht wurden (Abb. 27 und 28). Aus Abbildung 28 wird außerdem deutlich, dass sich Ablagerungen entlang der Zylinderwand bis zum Zylinderkopf gebildet haben. Es ist ersichtlich, dass ein Teil davon bei der Demontage entlang der Zylinderkopfdichtung abgebrochen ist (siehe Randbereich in Abbildung 28 rechts unten).

Noch deutlicher ist der Einfluß der Düsenverkokung bei 50 % Rapsölanteil im Kraftstoff. Abbildung 29 und 30 zeigen die Beeinflussung des Spritzbildes des Kraftstoffstrahls in Richtung „zu flach“ und bei Zylinder 4 (Abbildung 30) sind großflächig Verbrennungsrückstände vorhanden, die auf größere Ablagerungen im Auslaßkanalbereich hinweisen.

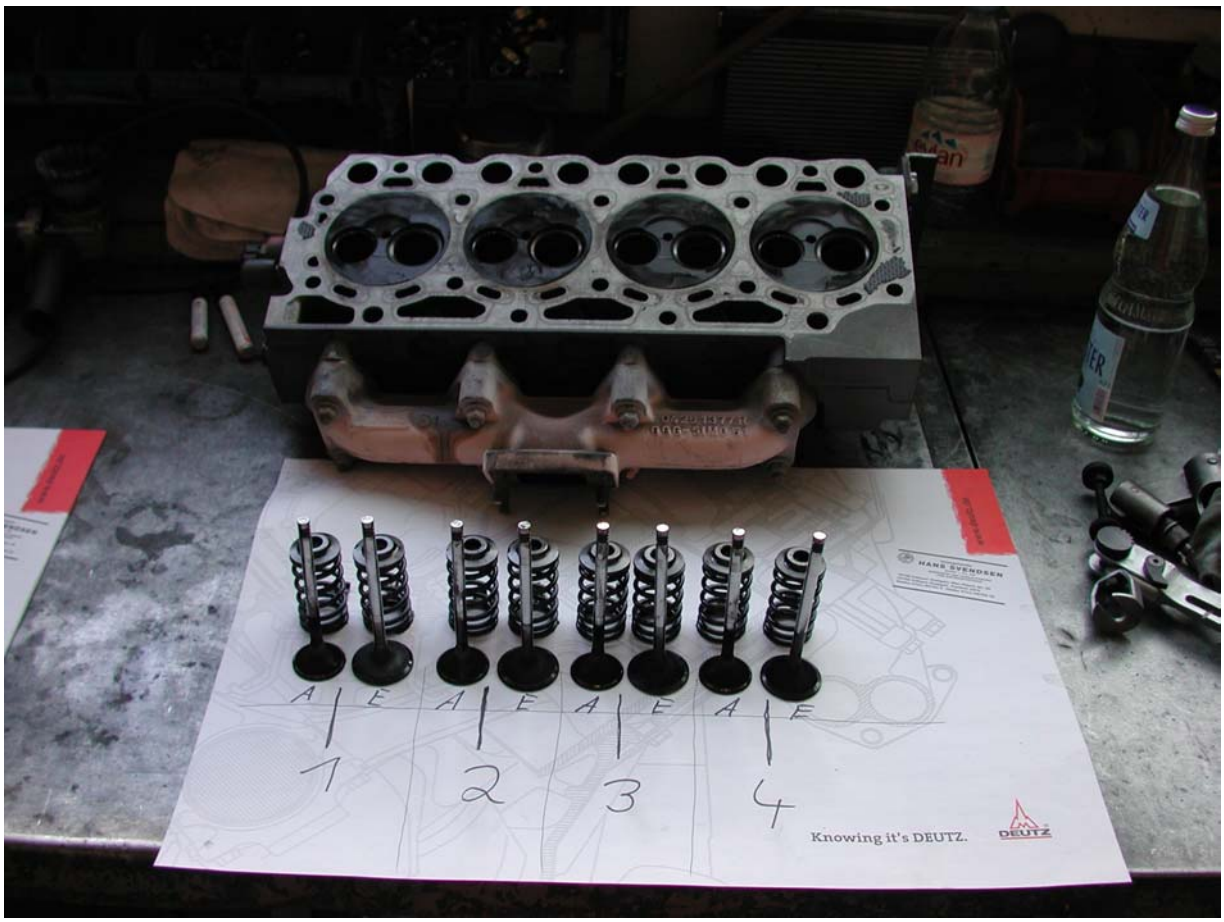


Abbildung 24: Zylinderkopf und Ventile nach Prüflauf mit Diesel

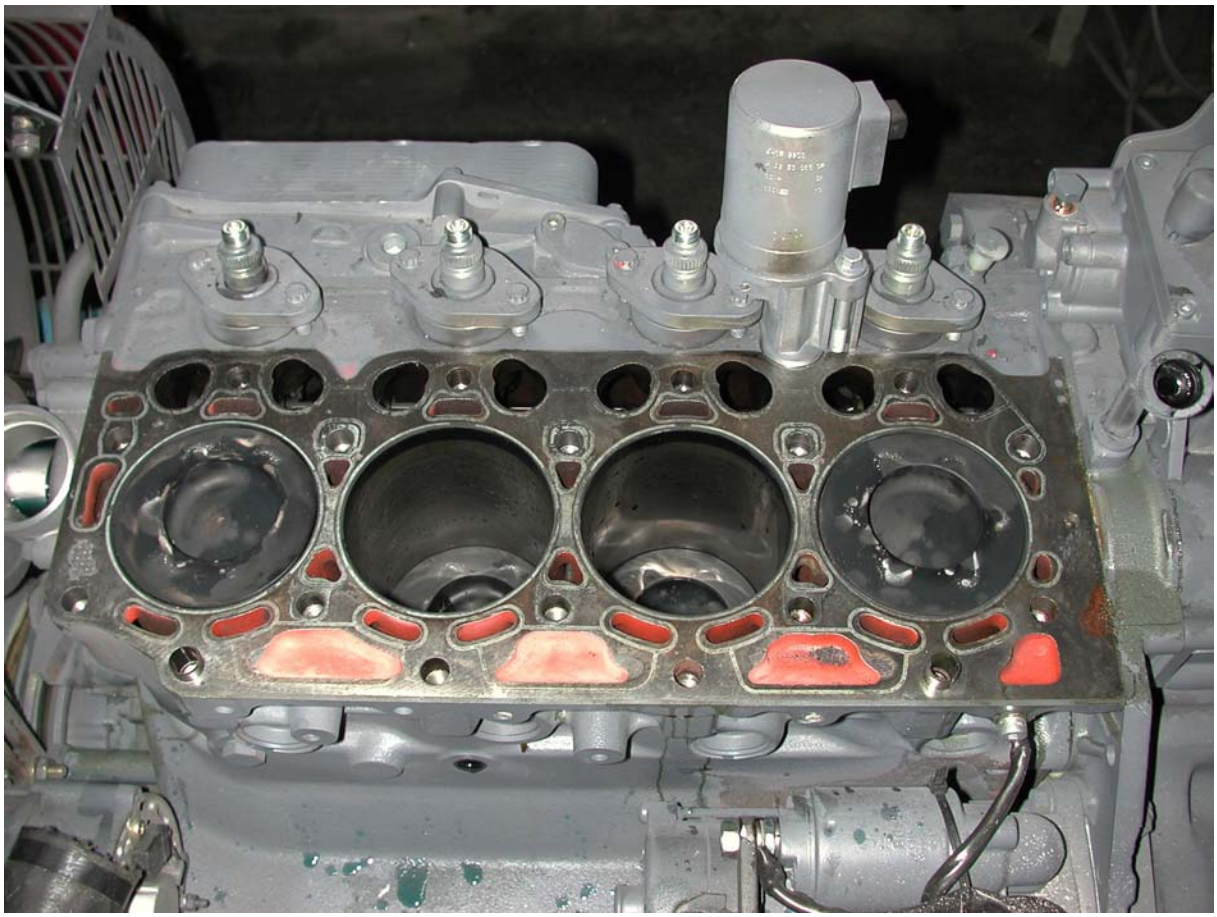


Abbildung 25: Motorblock nach Prüflauf mit Diesel

Abbildung 26: Zylinderlauffläche nach Prüflauf mit Diesel

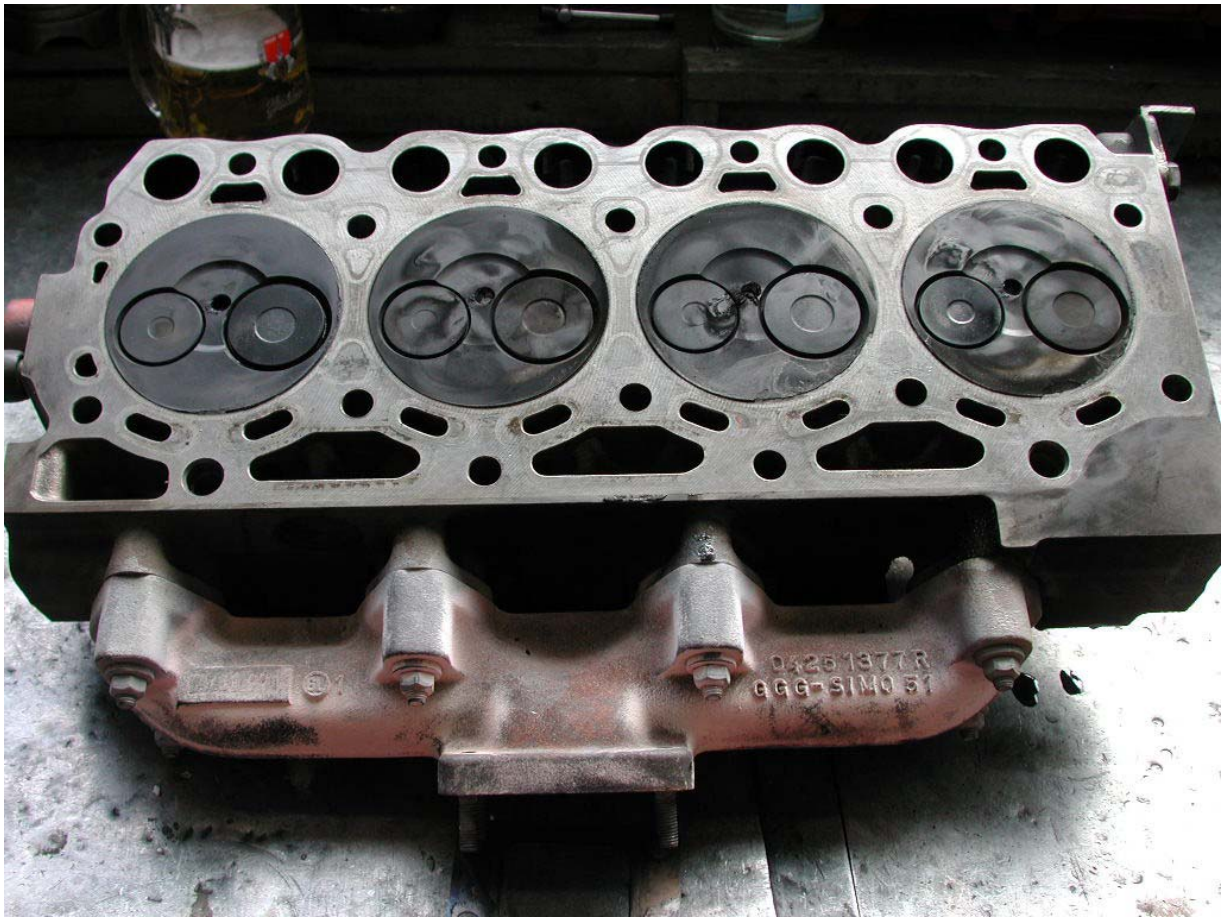


Abbildung 27: Zylinderkopf nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

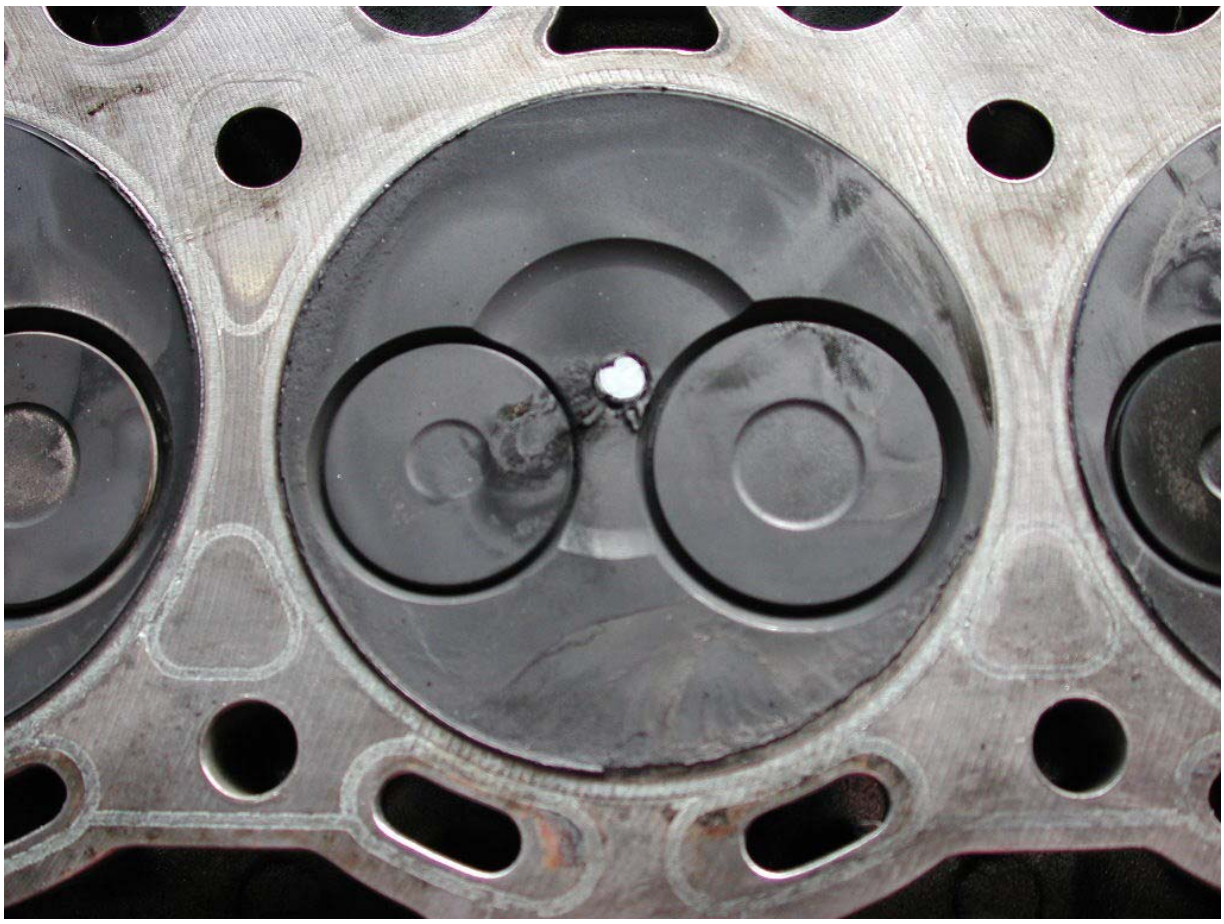


Abbildung 28: Ausschnitt Zylinderkopf nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

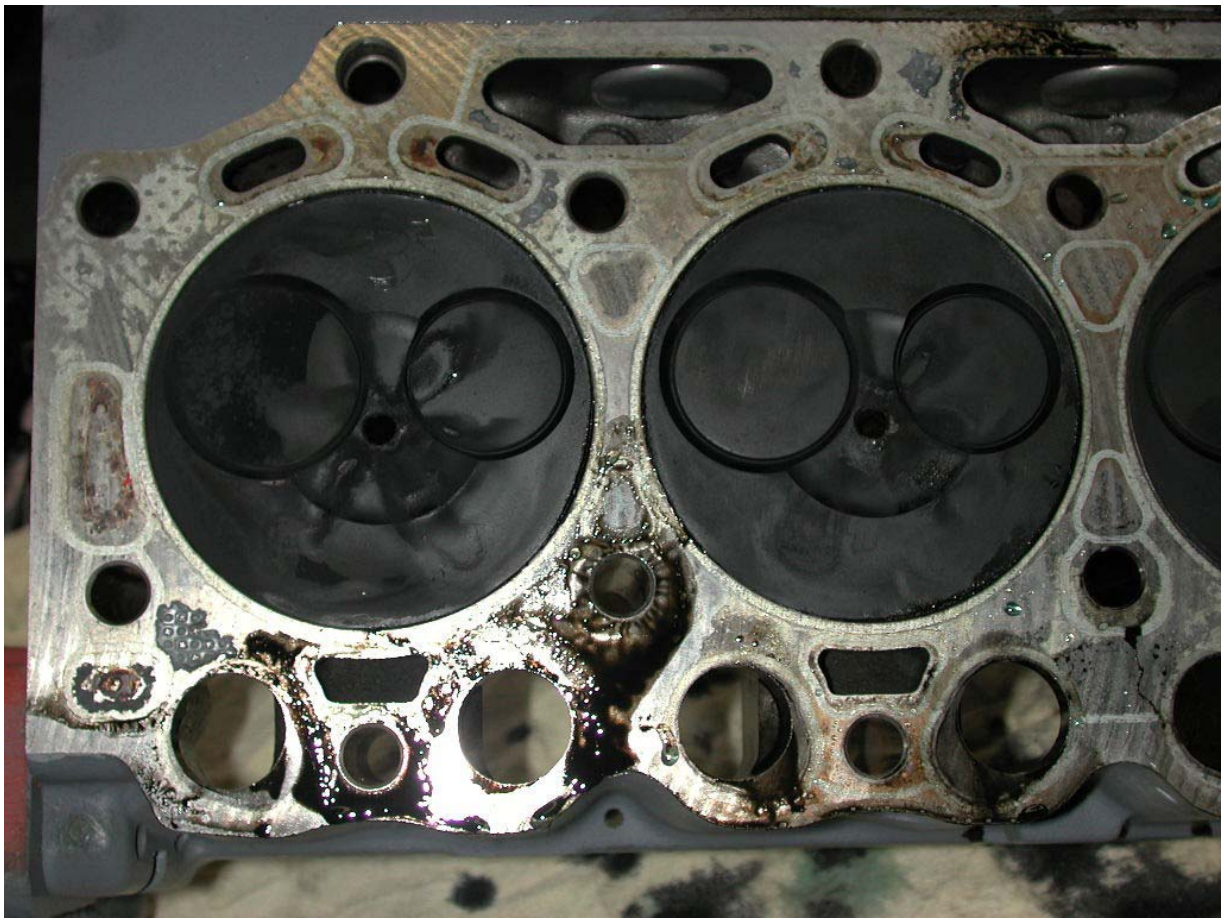


Abbildung 29: Ausschnitt Zylinderkopf nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

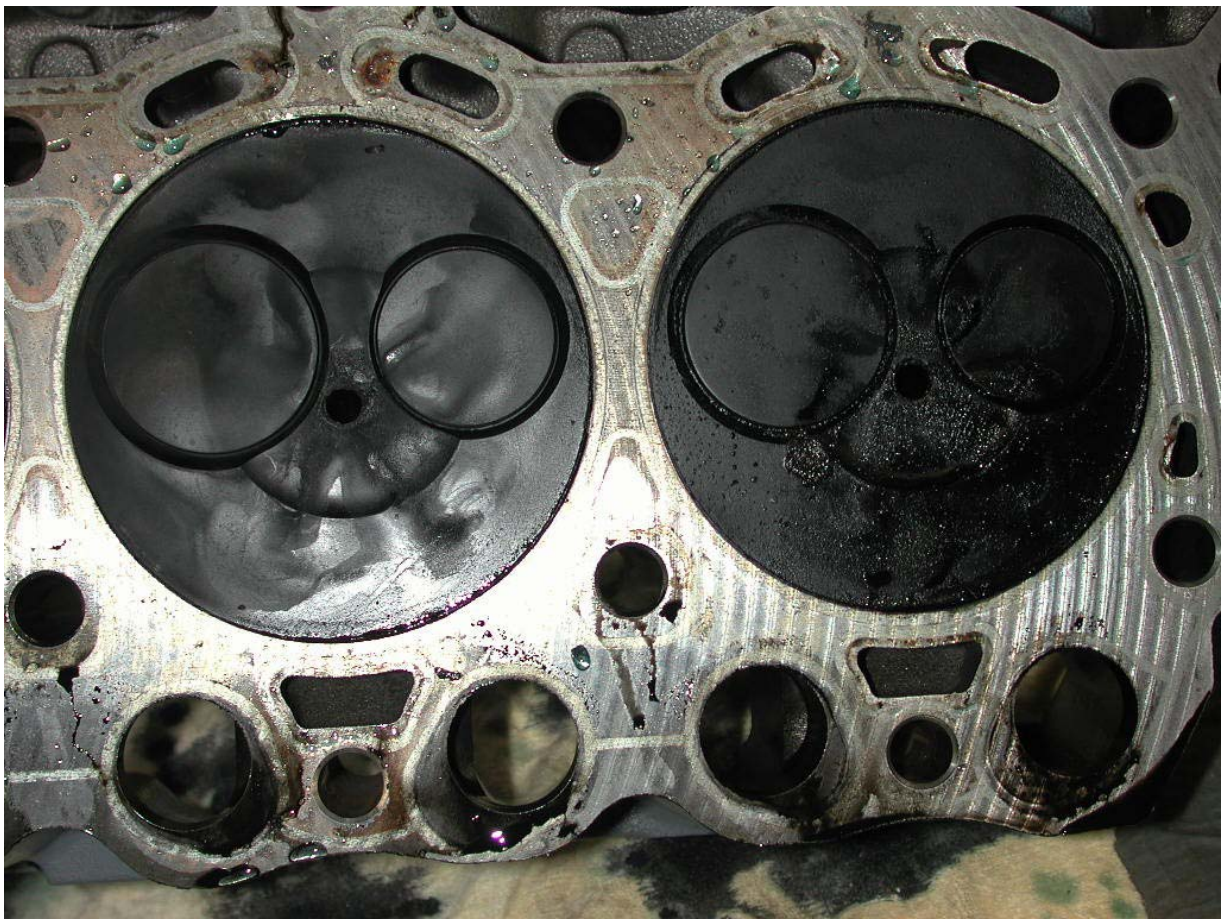


Abbildung 30: Ausschnitt Zylinderkopf nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

Zylinderlaufflächen

Die erfolgte Ausmessung der Zylinderbohrung brachte bei allen Prüfläufen keinen signifikanten Verschleiß. In Tabelle 10 ist das Ergebnis der Vermessung der Zylinderlauffläche nach dem Prüflauf mit 50 % Rapsölanteil im Kraftstoff wiedergegeben.

Tabelle 10

Bohrung [mm]	Zylinder			
	1	2	3	4
Brennraum	100,77	100,77	100,77	100,76
Lauffläche oben	100,64	100,65	100,65	100,65
Lauffläche Mitte	100,64	100,66	100,65	100,65
Lauffläche unten	100,64	100,66	100,65	100,65

5.4 Ventile

Bei Dieselkraftstoff waren alle Ventile ausnahmslos ohne nennenswerte Ablagerungen auf den Ventiltellern. Die Schäfte der Einlass- und Auslassventile waren insgesamt sauber, bei den Auslassventilen war der im Abgasbereich liegende Teil des Ventilschafts etwas mit Ölkohle behaftet (Abbildungen 31 und 32). Dies ist für Dieselmotoren als normal anzusehen.

Der Einsatz des Mischkraftstoffes (25 % ROE / 75 % DK) bewirkte dagegen erhebliche Ölkohleablagerungen auf den Einlassventilrücken, weniger bei den Auslassventilen. Die Ventilschäfte waren im Führungsbereich ohne nennenswerte Anlagerungen. Abbildung 33 macht dies deutlich. Es ist auch ersichtlich, dass die Ablagerungen am Einlassventilrücken teilweise abgeplatzt waren. Dies kann, wenn ein „Ölkohlebrocken“ auf dem Kolbenboden außerhalb der Mulde zu liegen kommt, auch schädlich sein. In Abbildung 34 sind die Ablagerungen in Ansaug- und Auslasskanälen ersichtlich. Bei Querschnittsverengung und zunehmender Oberflächenrauigkeit wird die Motorleistung und die Abgasqualität schlechter.

Als bereits bedenklich sind die Ablagerungen an den Ventilen bei 50 % Rapsölanteil im Kraftstoff anzusehen. Die Abbildung 35 und 36 zeigen die vier Ventilpaare seitlich, Abbildungen 37 und 38 schräg von oben. Die Ablagerungen auf den Rücken der Einlassventile sind erwartungsgemäß kräftig, es zeigten sich aber erste Anlagerungen von Ölkohle im Führungsbereich der Schäfte. Besonders gefährlich für ein Festklemmen der Ventile sind die deutlichen Ablagerungen an den Auslassventilschäften (zähe Masse) und die sich bereits gebildeten Wulste am Übergang des freien Schaftteils zu dem in der Führung bewegten Teils. Diese Ablagerungen können jederzeit zum Festklemmen der Auslassventile führen. Folge ist dann ein Bruch oder Materialdeformationen im Bereich der Ventilsteuerung.

Abbildung 31: Ventile nach Prüflauf mit Diesel

Abbildung 32: Ventile nach Prüflauf mit Diesel

Abbildung 33: Einlassventil (links) und Auslassventil (rechts) nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

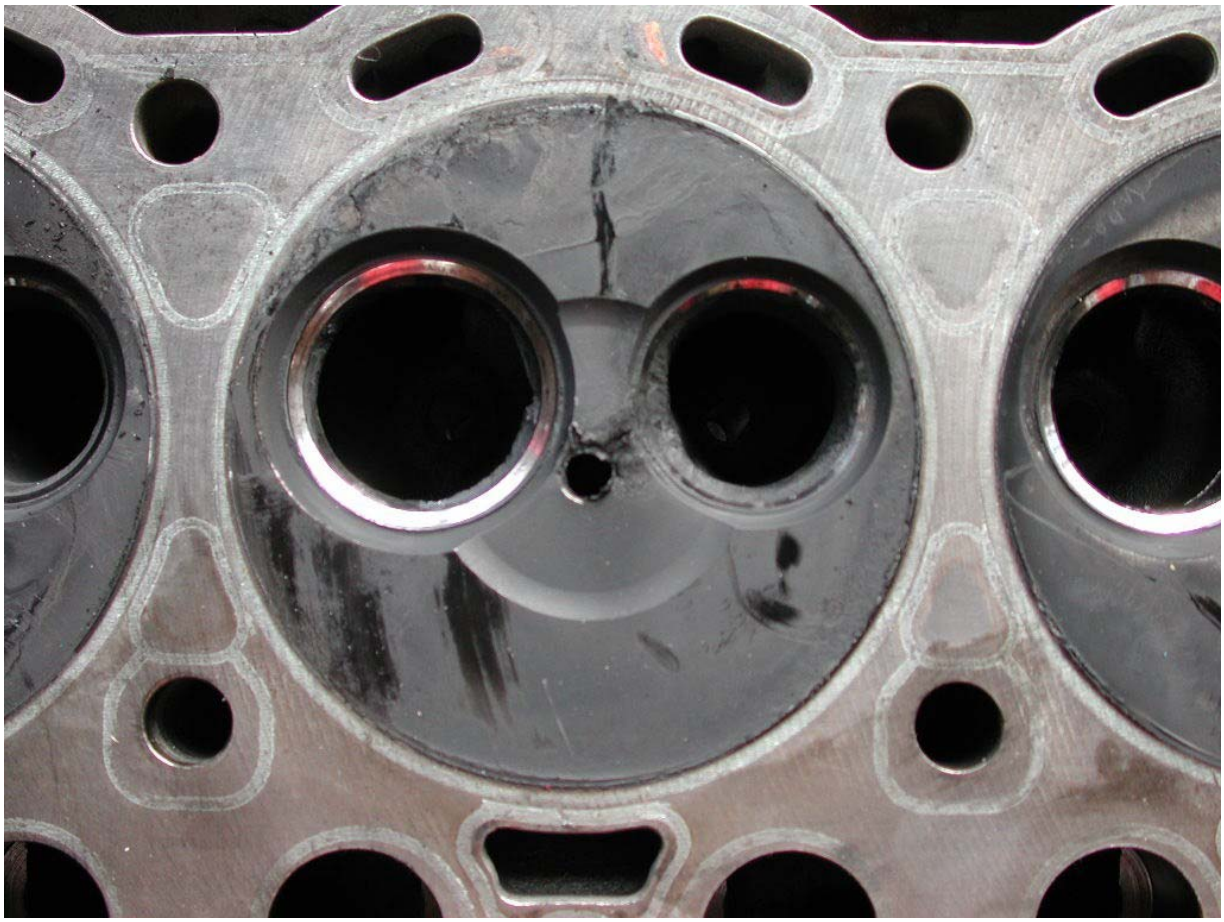


Abbildung 34: Ein- und Auslasskanäle nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

Abbildung 35: Ein- und Auslassventile nach Prüflauf 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 36: Ein- und Auslassventile nach Prüflauf 50 % ROE/50 % DK

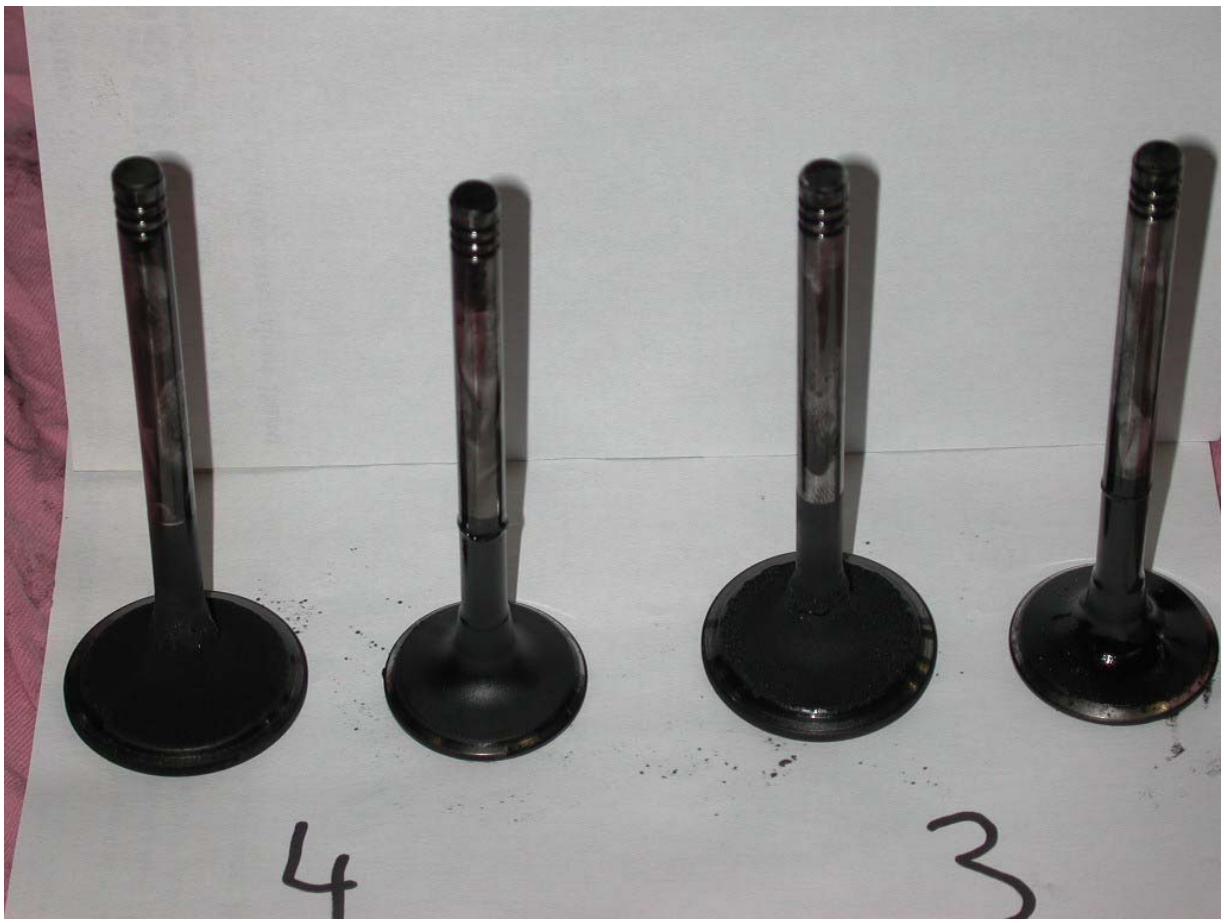


Abbildung 37: Ein- und Auslassventile nach Prüflauf 50 % ROE/50 % DK

Abbildung 38: Ein- und Auslassventile nach Prüflauf 50 % ROE/50 % DK

5.5 Kolben und –ringe

Die Kolben nach 300 Stunden Prüflauf mit Diesel sind in den Fotos Abbildung 39 bis 42 abgebildet. Die Anlagerungen auf der Kolbenoberfläche und am Feuersteg sind dieseltypisch, die Kolbenringnuten waren ohne Ölkohleeinlagerungen und alle Kolbenringe ohne Einschränkung beweglich.

Beim Mischkraftstoff mit 25 % Rapsölanteil sind die Kolbenoberflächen ohne nennenswerte Ablagerungen (Abbildung 43). Entlang der Kolbenkrone (Abbildung 44) und am Feuersteg (Abbildung 45) ist Ölkohle angelagert. Eine leichte Riefenbildung ist feststellbar, sie ist noch als unbedeutend anzusehen. Die geringe Ablagerung in der ersten Kolbenringnut ist noch nicht funktionshemmend. Die festgestellten Ablagerungen geben noch keinen Anlass zu der Annahme, dass innerhalb der ersten 1000 Betriebsstunden größere Motorprobleme zu erwarten sind.

Die nach dem Prüflauf mit 25 % Rapsölanteil im Kraftstoff in Zylinder 3 festgestellten zwei tiefen Längsriefen (Abbildung 52 im Anhang) waren Anlass, dass der Motor für weitere Prüfläufe nicht mehr verwendet wurde. Es stellte sich heraus, dass diese Riefen nicht rapsölbedingt waren. Bei der mikroskopischen Untersuchung des Kolbens wurde ein metallischer Einschluss gefunden, der diese Riefen verursachte. Dessen Herkunft konnte jedoch nicht geklärt werden.

Die Befundung der Kolben und –ringe nach Prüflauf 3 (Kraftstoffmischung 50 % Rapsöl / 50 % Dieselkraftstoff) hatte folgendes Ergebnis:

Feuersteg	belegt mit Ölkohle, ca. 180° Anlauf über die SR-Seite, gleichmäßig an allen Kolben
1. Ringsteg	Zyl. 1 + 2 sauber, Zyl. 3 + 4 auf SR-Seite leicht geschwärzt
Kolbenhemd	keine Auffälligkeit
1. Nut	der Innenwinkel-Bereich des 1. Ringes ist umlaufend mit Ölkohle aufgefüllt.
2. Nut	Zyl. 1 + 2 sauber, Zyl. 3+ 4 auf SR-Seite leicht geschwärzt
Kolbenringe	
1. Nut	Laufflächenverschleiß 70/70/70/60 %
2. Nut	Laufflächenverschleiß 40/50/50/50 %
Ringflanken	unauffällig

Besonders auffallend ist der hohe Verschleiß der Kolbenringe. Die Ablagerungen von Ölkohle in der 1. Nut hat die Beweglichkeit des Kolbenrings noch nicht beeinträchtigt. Bei weiterer Zunahme der Ablagerungen jedoch ist ein Festbacken des Kolbenrings die Folge. Bei dem dann folgenden Ausfall der Dichtwirkung ist ein erhöhter Rapsöleintrag in das Schmieröl zu befürchten. Die am Feuersteg angelagerte Ölkohle führt zu erhöhter Riefenbildung im Kolben und als Folge ist mit Kolbenfressern zu rechnen. In Abbildung 46 bis 50 sind die Kolben und in Abbildung 51 die Kolbenringe abgebildet.

Abbildung 39: Kolbenboden Zylinder 1 + 2 nach Prüflauf mit Diesel

Abbildung 40: Kolben Zylinder 1 + 2 nach Prüflauf mit Diesel

Abbildung 41: Kolbenboden Zylinder 3 + 4 nach Prüflauf mit Diesel

Abbildung 42: Kolben Zylinder 3 + 4 nach Prüflauf mit Diesel

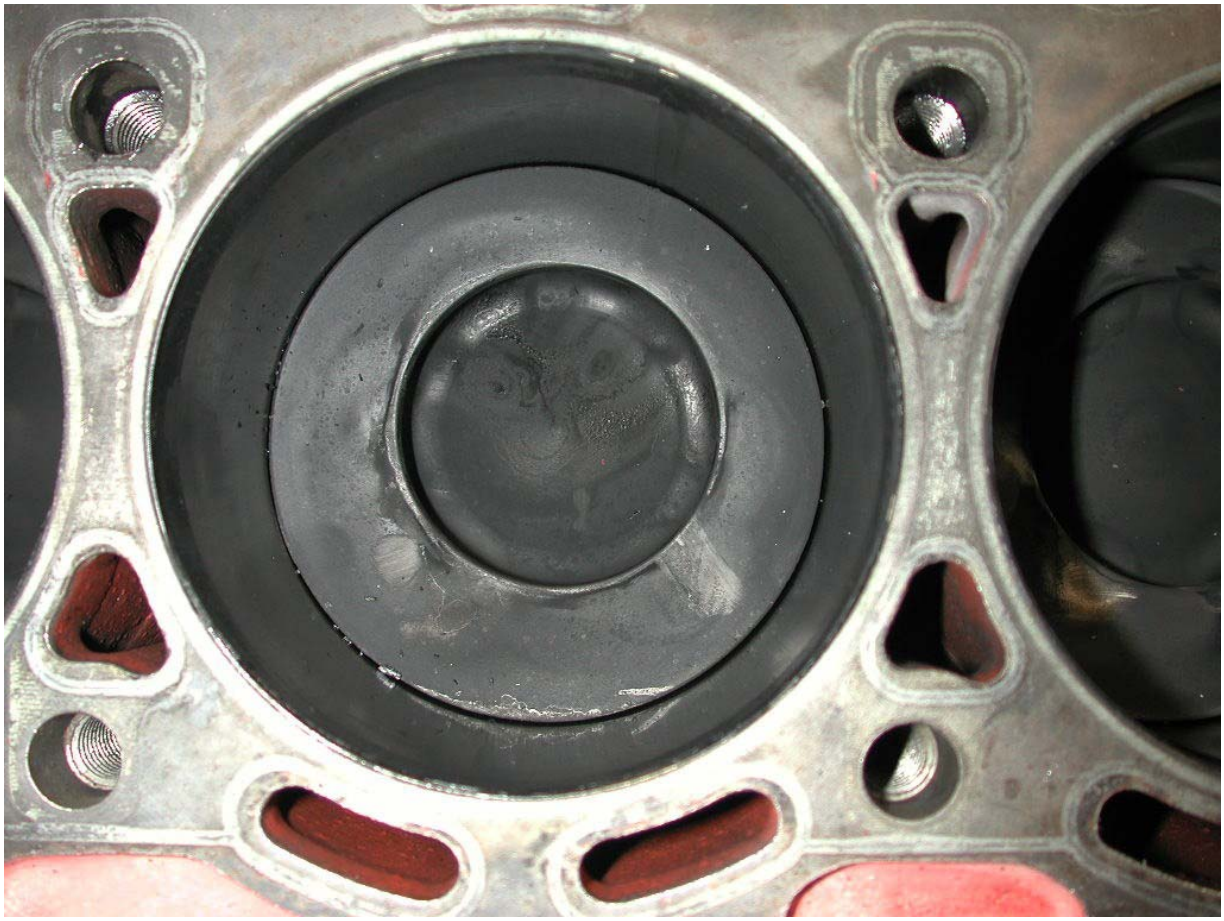


Abbildung 43: Zylinderlauffläche und Kolbenboden nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

Abbildung 44: Kolben (Feuersteg und Kolbenringe) nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

Abbildung 45: Kolben nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK

BF4M2012 / MN 0628092 Rapsöl

Rapsöl_092.ppt TK-VA1, Seif, 13.2.03 2

Abbildung 46: Kolben (Draufsicht) nach Prüfung mit 50 % ROE/50 % DK

BF4M2012 / MN 0628092 Rapsöl

Rapsöl_092.ppt TK-VA1, Seif, 13.2.03 5

Abbildung 47: Seitenansicht Kolben nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

BF4M2012 / MN 0628092 Rapsöl

Rapsöl_092.ppt TK-VA1, Seif, 13.2.03 3

:

Abbildung 48: Seitenansicht Kolben nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

BF4M2012 / MN 0628092 Rapsöl

Rapsöl_092.ppt TK-VA1, Seif, 13.2.03 6

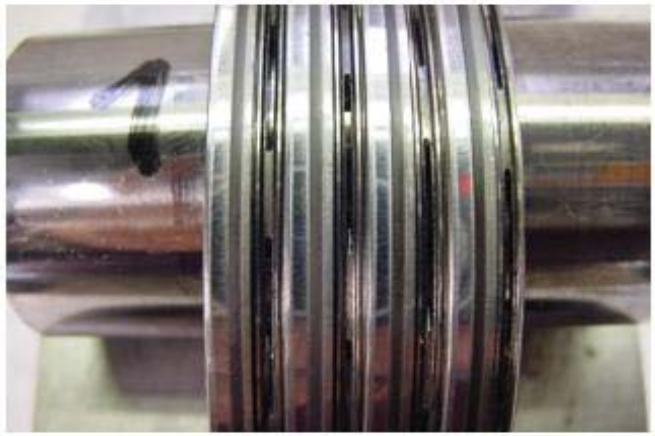
Abbildung 49: Seitenansicht Kolben nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

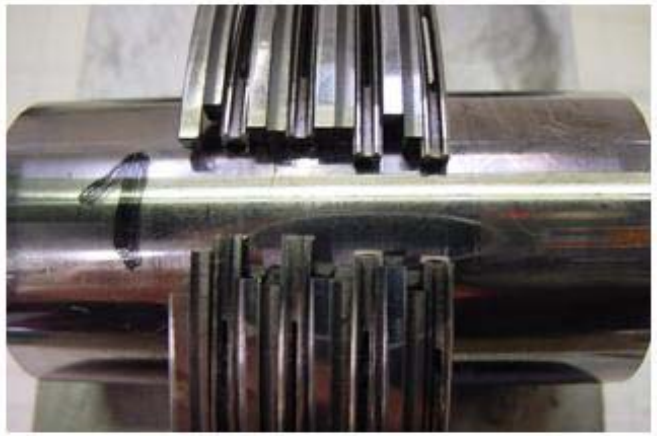
BF4M2012 / MN 0628092 Rapsöl

Rapsöl_092.ppt TK-VA1, Seif, 13.2.03 4

Abbildung 50: Seitenansicht Kolben nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

BF4M2012 / MN 0628092 Rapsöl





Rapsöl_092.ppt TK-VA1, Seif, 13.2.03 10

Abbildung 51: Kolbenringe der Zylinder 1- 4 nach Prüflauf mit 50 % ROE/50 % DK

5.6 Zusammenfassende Bewertung des Motorzustandes

Mit den durchgeführten Prüfläufen konnte nachgewiesen werden, dass sich bei der Verwendung von Rapsöl-Diesel-Mischungen mit 25 bzw. 50 Vol.-% Rapsölanteil als Kraftstoff in modernen Dieselmotoren verbrennungsbedingte Nachteile ergeben. Folgende Details sind nach 300 Stunden Prüflauf auffällig:

- Ablagerung Verkokung an den Ventiltellern der Einlassventile
- Ablagerung (zähe Masse) an den Ventilschäften der Auslassventile.
- Verkokung an den Einspritzventilen, Spritzbild und Drücke i.O.
- Ablagerungen am Kolbenboden.
- Feuersteg mit Ölkohle belegt.
- Oberster Kolbenring abgenutzt.
- Zylinderlaufflächen ohne Befund.
- Pleuel- und Hauptlager keine abnormale Abnutzung.

Bei höherem Rapsölanteil im Kraftstoff verstärken sich die festgestellten Folgen.

Fazit:

Aufgrund der schon jetzt aufgezeigten Mängel an den Ein- und Auslassventilen ist davon auszugehen, dass bei einem längeren Betrieb oder höherem Rapsölanteil die Einlassventile noch stärker verkoken und die Auslassventile in der Ventilführung verkleben. Dies würde bedeuten, dass in bestimmten Zeitintervallen der Zylinderkopf getauscht und überholt werden muss.

Da auch die Einspritzventile stark verkoken, sollte hier der Wechselintervall verkürzt werden.

Aufgrund der verhältnismäßig starken Abnutzung der Kolbenringe muss, wenn der Verschleiß in gleichem Maße weiter ansteigt, mit Motorschäden (Kolbenfresser) gerechnet werden.

Die Prüfläufe geben Anlass zu der Feststellung, dass mit dem Einsatz von Rapsöl-Diesel-Mischungen ein erhöhter Motorverschleiß verbunden ist und sicher mit einem vorzeitigen, möglicherweise sehr frühen Versagen des Motors zu rechnen ist. Dies ist von der Motorbauart, dem Rapsölanteil im Kraftstoff, der Rapsölqualität und den Einsatzbedingungen des Motors mit abhängig. Für den untersuchten Motor in COM2-Ausführung sind bei einer Motorbeanspruchung entsprechend dem 8-Punkte-Test

ein störungsfreier Motorbetrieb von 1000 bis 1500 Stunden eine eher optimistische Einschätzung. Motoren der neuen Generation, welche die verschärften Emissionsnormen erfüllen, sind als besonders störanfällig bei der Verwendung von Rapsöl-Diesel-Mischungen anzusehen.

Nicht untersucht wurde die Beeinflussung der Einspritzpumpen bei Rapsöl im Kraftstoff. Deren Tauglichkeit für Rapsöl-Diesel-Mischungen wäre noch zu überprüfen.

Das mit der Verwendung von Rapsöl-Diesel-Mischungen verbundene Risiko kann gemindert werden, wenn die Einspritzventile (Düsen) nach ca. 300 Stunden und der Zylinderkopf alle 600 bis 800 Stunden gereinigt werden. Im übrigen ist auf die tägliche Schmierölfüllstandskontrolle und das Einhalten des verkürzten Ölwechselintervalls hinzuweisen.

6. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse bestätigen die von Fachleuten befürchteten Motorprobleme bei der Verwendung von Rapsöl-Diesel-Mischungen. Deshalb müssen interessierte Kreise auf die bestehenden Risiken und Folgen hingewiesen werden. Im Bereich der Landwirtschaft kann dies durch Veröffentlichungen in landwirtschaftlichen Fachzeitschriften und den regionalen Wochenblättern erfolgen. In diesem Zusammenhang ist auch auf den möglichen Einfluss bei der Verwendung von mangelhafter Rapsölqualität und die Auswirkung der Einsatzbedingungen von Schleppern hinzuweisen.

In diesem Zusammenhang wäre auch eine Befragung von Praktikern, die Rapsöl-Diesel-Mischungen einsetzen, interessant. Denn es wird inzwischen vereinzelt auch schon von Motorproblemen und –schäden berichtet.

7. Literatur:

[1] RICHTER, H., N. HEMMERLEIN u. V. KORTE:
Rapsöl als Kraftstoff für Dieselmotoren (BMFT-Vorhaben TV 8837). Lehrgang über Biokraftstoffe für Dieselmotoren, Technische Akademie Esslingen, 10. und 11. Juni 1991

[2] RINALDI M., E. STADLER, I. SCHIESS u. H.W. JÄCKLE:
Pflanzenölgemische als Dieseltreibstoff, FAT-Berichte Nr. 502, 1997

[3] KÖNIG, W., K. MAURER u.a.:
Untersuchungen zum Einsatz von Rapsöl und Rapsölprodukten im landwirtschaftlichen Betrieb, Abschlußbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben des BML, Bonn und MLR Baden-Württemberg, September 1996

[4] MAY H., u. P. KLEE:
Bericht über Prüfstandsuntersuchungen mit TESSOL-NADI, Kaiserslautern, Juli 1994 (unveröffentlicht)

[5] REISER, W.:
Ermittlung von motor- und verbrennungstechnischen Kenndaten an einem Dieselmotor mit Direkteinspritzung bei Betrieb mit unterschiedlich aufbereitetem Rapsöl, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 316, 1997

[6] JAENISCH, D., H.-H. MAACK, W. SCHUMANN u. O. WAHL:
Tankstelle Rapsfeld – Einsatz von Rapsöl-Dieselkraftstoff-Gemischen in Traktoren, Neue Landwirtschaft Nr. 5, 2002

[7], PRESCHER, K., J. GOLISCH, M. HOPP u. V. WICHMANN:
Der Betrieb von Dieselmotoren mit Rapsöl als Kraftstoff, Vortrag 10. OTTI-Symposium „Energie aus Biomasse – Biogas, Rapsöl, Festbrennstoffe“, 22./23.11.2001, Kloster Banz, Tagungsband S. 245-250

8. Anhang:

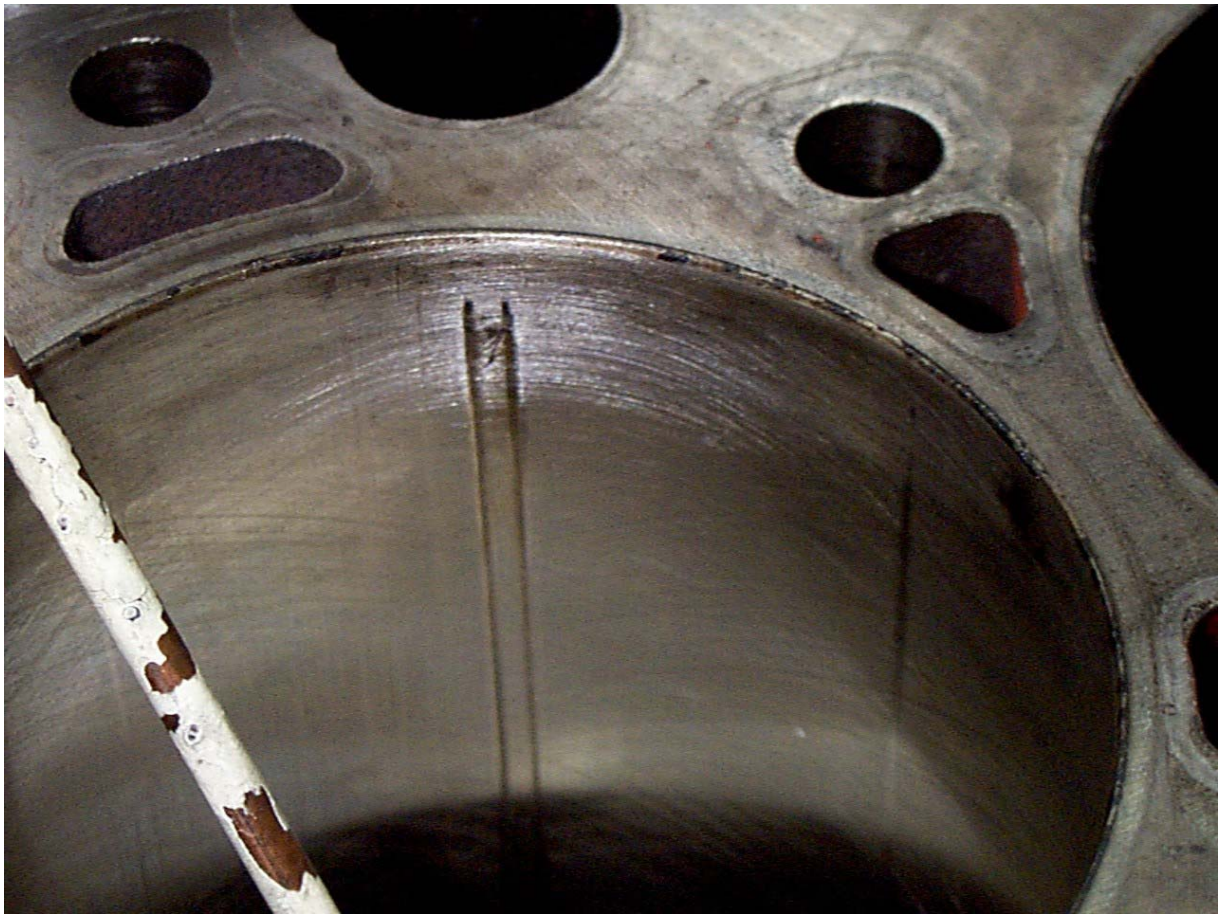
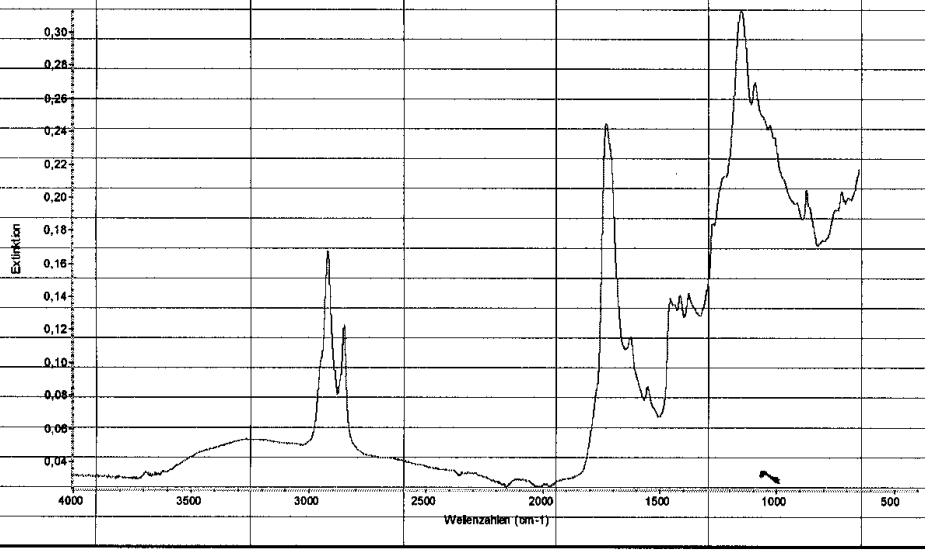


Abbildung 52: Riefen nach Prüflauf mit 25 % ROE/75 % DK in Zylinder 3 des Motors BF4M 2012C, die durch Einschluss eines Metallpartikels im Kolben verursacht wurden.

Untersuchung der Düsenverkokung							
Düsen nach 300 h Diesel mit 25 % Rapsöl							
	Tiegel leer	Tiegel mit Verkokung	Tiegel nach Veraschung	Verkokung	Veraschbarer Anteil	Ascheanteil	Ascheanteil
	g	g	g	mg	mg	mg	%
25 % Rapsöl							
Düse 1	22,6077	22,6183	22,6127	10,6	5,6	5,0	47,2
Düse 2	19,746	19,7533	19,748	7,3	5,3	2,0	27,4
Düse 3	19,4428	19,4515	19,447	8,7	4,5	4,2	48,3
Düse 4	19,292	19,3032	19,2964	11,2	6,8	4,4	39,3
Mittelwerte				9,5	5,6	3,9	40,5
50 % Rapsöl							
Düse 1	12,4983	12,5157	12,5028	17,4	12,9	4,5	25,9
Düse 2	12,3724	12,3872	12,3761	14,8	11,1	3,7	25,0
Düse 3	12,7784	12,794	12,7827	15,6	11,3	4,3	27,6
Düse 4	13,219	13,2339	13,2228	14,9	11,1	3,8	25,5
				15,7	11,6	4,1	26,0
Schaft	12,3373	12,3522	12,3377	14,9	14,5	0,4	2,7
Gummiartige Schicht auf dem Schaft der Einspritzdüse, sicherlich Rapsöl-Polymerist,							
IR-Spektrum von dieser Schicht:							
	HC-Banden bei 2900 und 1400 cm-1 nur noch unbedeutend.						
	Dominierend ist die CO-Bande von 1730 cm-1, bei 1100 cm-1 sind wohl auch Oxidations-Banden.						



Untersuchungsergebnis der Einspritzventile (Düsen)

DEUTZ AG, Ottostr. 1, 51149 Köln
Labor für Kraftstoff- und Ölanalytik
Dr. H.W. Knuth
Tel: 0221-822-4234, Fax: 0221-822-4982
Email: Knuth.h@deutz.de

Schmierstoffanalyse

Datum
#########

Motor	*Motornummer*	*Herkunft*
BF4M2012C, COM2		Universität Hohenheim

0,122
1,2688

		Betrieb mit Dieselkraftstoff						Betrieb mit 25 % Rapsöl + 75 % Dieselkraftstoff						Betrieb mit 50 % Rapsöl + 50 % Dieselkraftstoff					
	Probenummer	0421/2002	0422/2002	0443/2002	0515/2002	0554/2002	0555/2002	0912/2002	0929/2002	0940/2002	0969/2002	984/2002	996/2002		1940/2002	1935/2002	2028/2002	2039/2002	2030/2002
	Öl Bh / km	2	50	100	200	250	300	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250	300
Analysenparameter	***Prüfmethode***																		
Viskosität 100°C [mm²/s]	DIN EN ISO 3104	12,33	12,20	12,04	12,20	11,00	12,60	13,50	13,30	13,30	13,30	13,52	13,48	13,42	13,42	13,50	13,62	13,79	14,04
TBN [mg KOH/g]	DIN ISO 3771	11,80	12,20	12,30	11,40	11,50	11,50	12,80	12,40	12,10		10,90	10,90	15,35			15,67	14,84	11,00
Verschmutzung																			
Wassergehalt [%(m/m)]	DIN 51777	0,05	0,04	0,05		0,03	0,03		0,19	0,17	0,11		0,05	0,04					
Rußgehalt [%(m/m)]	DIN 51452	< 0,01	0,03	0,07	0,21	0,30	0,30	0,20	0,50	0,87	1,14		1,84	0,20	0,41	0,69	0,88	1,17	1,57
Kraftstoffgehalt [%(m/m)]	DIN 51356			1,3	2,3	1,8	1,9	0,8	2,8	7,2	8,1		10,2	1,9	3,9	5,6	7,2	8,7	10,2
Silizium [mg/kg]	DIN 51396-1	13,9	23,5	24,0	21,0	28,0	26,0	9,0	9,0	9,0		10,0	9,0	7,4	7,9	8,9	10,0	9,4	10,1
Abriebmetalle																			
Eisen [mg/kg]	DIN 51396-1	7,7	13,2	21,0	40,0	52,0	57,0	32,0	46,0	58,0	76,0	100,0	116,0	21,6	35,7	54,7	68,2	88,3	110,5
Blei [mg/kg]	DIN 51396-1	4,3	4,9	5,1	6,0	5,0	5,0	4,0	3,0	4,0	5,0	3,0	5,0	6,7	6,8	7,1	7,0	7,3	8,1
Kupfer [mg/kg]	DIN 51396-1	5,4	7,9	8,5	10,0	12,0	11,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,9	6,9	7,9	8,5	9,3	10,2
Chrom [mg/kg]	DIN 51396-1	0,7	0,9	1,1	< 2	2,0	2,0	6,0	5,0	4,0	5,0	4,0	4,0	1,6	2,4	3,4	3,5	3,9	4,2
Aluminium [mg/kg]	DIN 51396-1	3,9	4,0	4,3	< 10	< 10	< 10	3,0	3,0	4,0	5,0	< 10	< 10	3,2	4,3	6,2	6,8	7,6	8,6
Zinn [mg/kg]	DIN 51396-1	2,3	5,4	6,2	11,0	13,0	14,0	4,0	5,0	7,0	9,0	< 10	11,0	5,6	7,8	9,5	9,1	9,5	10,0
sonstige Analysen																			
Natrium [mg/kg]	ASTM D5185	7,8	8,3	8,8	< 30	15,0	13,0					< 10	< 10	1,2	5,9	6,5	2,0	2,3	2,7

Ergebnis der Schmierölanalysen