



Konzepte und Betriebsstrategien für die Nutzung von Rapsölen in Verbrennungsmotoren für den Einsatz in Landmaschinen

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Volker Wichmann
geboren am 27. Juni 1963
in Halle an der Saale
wohnhaft in Schwaan
Rostock im April 2008

urn:nbn:de:gbv:28-diss2008-0125-6

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf, Universität Rostock
Prof. Dr.-Ing. habil. Egon Hassel, Universität Rostock
Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Hiereth, Stuttgart

Tag der Verteidigung: 22. Oktober 2008

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzung- und Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaften und Problemstellung	3
3 Zielsetzung der Arbeit	5
4 Grundlagen, Lösungswege und eingesetzte Messverfahren	6
4.1 Grundlagen und Lösungswege	6
4.2 Versuchsziele, Messverfahren und Auswertungsmethoden in den Laboruntersuchungen	8
4.3 Versuchsziele, Messverfahren und Auswertemethoden in der Dauerlauferprobung (Feldtest).....	21
5 Ergebnisse der Prüfstandtests und des Dauerlaufs	29
5.1 Eigenschaften von Rapsölen als Kraftstoff	29
5.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Rapsöl im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff.....	29
5.1.2 Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff	35
5.1.3 Qualität der Rapsöle im Dauerlauftest	37
5.2 Einspritzung, Strahlzerfall und Gemischbildung im Rapsölbetrieb.....	42
5.2.1 Kraftstoffsysteme im Rapsölbetrieb.....	42
5.2.2 Hochdruckeinspritzsysteme und Strahlausbreitung im Rapsöleinsatz.....	45
5.2.3 Langzeituntersuchungen von Hochdruckeinspritzsystemen im Rapsölbetrieb	48
5.3 Energieumsetzung im Brennraum (Verbrennung)	51
5.4 Abgasemissionen.....	62
5.4.1 Abgasnormen für den Betrieb von Motoren mit Rapsöl	62
5.4.2 Abgasemissionsmessungen auf Prüfständen	65
5.4.3 Langzeituntersuchungen des Abgasverhaltens.....	72
5.5 Langzeitverhalten, Dauerfestigkeit und Verschleiß	87
5.5.1 Langzeitverhalten der Motorleistung	87
5.5.2 Verschleiß an den brennraumumschließenden Bauteilen	98
5.5.3 Luft- und Abgassystem im Rapsöleinsatz.....	104
5.5.4 Zusätzliche Erkenntnisse aus den Dauerlaufuntersuchung	108
6 Interpretation der Forschungsergebnisse und Ableitung von Motorenkonzepten für den Rapsöleinsatz.....	111

6.1	Niederdruckkraftstoffsysteme	111
6.2	Hochdruckkraftstoffsystem und Einspritzung.....	115
6.3	Energieumsetzung im Brennraum und Verbrennungsabgase	118
7	Zusammenfassung.....	122
8	Literaturverzeichnis.....	126
9	Anhänge	132

Danksagung

Mein Dank gilt zunächst dem viel zu früh verstorbenen Herrn Prof. Dr. Ing. K. Prescher für die Idee zur Erforschung regenerativer Kraftstoffe, für welche er die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. zur finanziellen Unterstützung gewinnen konnte.

Herrn Professor Dr.-Ing. H. Harndorf danke ich für seine unermüdliche Diskussionsbereitschaft und seine konstruktive Kritik, die mir insbesondere auch bei der Abfassung der vorliegenden Forschungsarbeit eine wertvolle Unterstützung war.

Herr Professor Dr.-Ing. habil. E. Hassel hat der Forschungsarbeit stets großes fachliches Interesse entgegengebracht und mich in der Vorlage dieser Dissertation bestärkt.

Meinen Kollegen, Frau Dipl.-Ing. E. Flügge und Herrn Dipl.-Ing. W. Harkner danke ich herzlich für die unermüdliche Unterstützung bei der Durchführung des Dauerlauftests.

Zu besonderem Dank bin ich den Kolleginnen und Kollegen des Betriebsstofflabors und des Maschinenlabors des Lehrstuhls für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock für die Anfertigung der umfangreichen chemischen Analysen und den Aufbau der experimentellen Anlagen verpflichtet.

Dank gilt schließlich auch meiner Familie, ohne deren Verständnis – insbesondere auch die Geduld meiner beiden Töchter – der Abschluss der Forschungstätigkeit neben meiner vollen Berufstätigkeit nicht möglich gewesen wäre.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fahrzeug-Reichweite	3
Abbildung 2:	Darstellung der eingesetzten Messtechnik	12
Abbildung 3:	Definition von Zündpunkt und Durchbrennpunkt	15
Abbildung 4:	Anlagenschema Teilstromverdünnungstunnel	21
Abbildung 5:	Hersteller der umgerüsteten Motoren	27
Abbildung 6:	Leistungsverteilung der Motoren gem. Richtlinie 97/68/EG, Artikel 9	27
Abbildung 7:	Siedeverhalten von Rapsöl, RME und Dieseldieselkraftstoff	34
Abbildung 8:	Oberflächenspannung von Rapsöl, RME und Dieseldieselkraftstoff	34
Abbildung 9:	Abweichungen vom RK-Standard bei Lagertankproben	39
Abbildung 10:	Grenzwertüberschreitungen bei einzelnen Kennwerten von allen Lagertankproben zwischen 2001 und 2005	39
Abbildung 11:	einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung	43
Abbildung 12:	einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung und Zusatzpumpe	43
Abbildung 13:	einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung, Zusatzpumpe und Nutzung der Reibungswärme des Einspritzsystems	44
Abbildung 14:	einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung Zusatzpumpe, Nutzung der Reibungswärme des Einspritzsystems und Zusatzfiltern	44
Abbildung 15:	Stromversorgung für elektrisch beheizte Einspritzdüsen und Injektoren	44
Abbildung 16:	2-Tank-System mit 3 Wegeventilen	45
Abbildung 17:	2-Tank-System mit 2 Wegeventilen	45
Abbildung 18:	Einspritzbeginn in Abhängigkeit von der Motorlast Motor 1VDS18/15	47
Abbildung 19:	Einspritzbeginn in Abhängigkeit von der Motorlast Motor 1NVD18	47
Abbildung 20:	Vergleich des Einspritzdruckes und der Einspritzmenge ermittelt am Einspritzprüfstand nach [72]	48
Abbildung 21:	Rapsölstrahl bei $n = 500 \text{ 1/min}$; 1,5 ms nach Einspritzbeginn nach [72]	48
Abbildung 22:	Dieseldieselkraftstoffstrahl bei $n = 500 \text{ 1/min}$; 1,5 ms nach Einspritzbeginn nach [72]	48
Abbildung 23:	Vergleich der Brennverläufe bei Nulllast am Motor 1NVD18	52
Abbildung 24:	Vergleich der Brennverläufe bei Teillast am Motor 1NVD18	52
Abbildung 25:	Vergleich der Brennverläufe bei $\frac{3}{4}$ Last am Motor 1NVD18	53

Abbildung 26:	Vergleich der Brennverläufe bei Volllast am Motor 1NVD18	53
Abbildung 27:	Vergleich der Brennverläufe bei Nulllast am Motor 6VDS24/24	54
Abbildung 28:	Vergleich der Brennverläufe bei unterer Teillast am 6VDS24/24	54
Abbildung 29:	Vergleich der Brennverläufe bei Teillast am Motor 6VDS24/24	55
Abbildung 30:	Vergleich der Brennverläufe bei oberer Teillast am 6VDS24/24	55
Abbildung 31:	Vergleich der Brennverläufe bei Volllast am Motor 6VDS24/24	55
Abbildung 32:	Vergleich der Brennverläufe bei Nulllast am Motor 1VDS18/15	56
Abbildung 33:	Vergleich der Brennverläufe bei unterer Teillast am 1VDS18/15	56
Abbildung 34:	Vergleich der Brennverläufe bei Teillast am Motor 1VDS18/15	57
Abbildung 35:	Vergleich der Brennverläufe bei oberer Teillast am 1VDS18/15	57
Abbildung 36:	Vergleich der Brennverläufe bei Volllast am 1VDS18/15	57
Abbildung 37:	Zündverzug 1NVD18 in Abhängigkeit von der Motorlast	59
Abbildung 38:	Zündverzug 6VDS24/24 in Abhängigkeit von der Motorlast	59
Abbildung 39:	Zündverzug 1VDS18/15 in Abhängigkeit von der Motorlast	59
Abbildung 40:	Durchbrennpunktverzug Motor 1VDS18/15 in Abhängigkeit von d. Motorlast	59
Abbildung 41:	max. Brennraumdruck des Motor 6VDS24/24	60
Abbildung 42:	max. Druckanstieg des Motor 6VDS24/24	60
Abbildung 43:	Vergleich der Druckanstiege Motor 6VDS24/24	60
Abbildung 44:	Brennfunktionen Motor 6VD14,5/12-1 SRL	61
Abbildung 45:	Brennfunktionen bei Gemischkraftstoffen am Motor 6VDS24/24	62
Abbildung 46:	Stickoxidemissionen am Motor 6VDS24/24	66
Abbildung 47:	Stickoxidemissionen am Motor 1VDS18/15	66
Abbildung 48:	Stickoxidemissionen am Motor 1NVD18	66
Abbildung 49:	Stickoxidemissionen am Motor 6068 HL 473	67
Abbildung 50:	HC-Emissionen am Motor 1VDS18/15	68
Abbildung 51:	HC-Emissionen am Motor 1NVD18	68
Abbildung 52:	HC-Emission am Motor 6VDS24/24	68
Abbildung 53:	Kohlenwasserstoffemissionen am Motor 6068 HL 473	69
Abbildung 54:	CO-Emissionen am Motor 6VDS24/24	69
Abbildung 55:	CO-Emissionen am Motor 1VDS18/15	70
Abbildung 56:	CO-Emissionen am Motor 1NVD18	70
Abbildung 57:	Kohlenmonoxidemissionen am Motor 6068 HL 473	70
Abbildung 58:	Partikelemissionen am Motor 1VDS18/15	71
Abbildung 59:	Partikelemissionen am Motor 6068 HL 473	71
Abbildung 60:	Leistung im Rapsölbetrieb	97

Abbildung 61:	Leistungsentwicklung	98
Abbildung 62:	Kolben des Motors Tre 17	99
Abbildung 63:	Zylinderlaufbuchsen des Motor Tre 17	99
Abbildung 64:	Zylinderlaufbuchsen des Motor Tre 18	99
Abbildung 65:	Zylinderkopfunterseite des Motor Tre 18	99
Abbildung 66:	Zylinderkopfunterseite Gesamtbild des Motors Tre 18	100
Abbildung 67:	Kipphebelbereich des Motors Tre 18	100
Abbildung 68:	Kolbenoberseite Zylinder 1 und 2 des Motor Tre 18	100
Abbildung 69:	Kolbenoberseite Zylinder 5 und 6 des Motors Tre 18	100
Abbildung 70:	Zylinderlaufbuchse des Motor Tre 1	101
Abbildung 71:	Kolbenboden des Motors Tre 1	101
Abbildung 72:	Zylinderkopfunterseite des Motors Tre 1	101
Abbildung 73:	Kipphebelhalterraum des Motor Tre 1	102
Abbildung 74:	Ventilraum des Motors Tre 1	102
Abbildung 75:	Zylinderlaufbuchse des Motor Tre 87	102
Abbildung 76:	Kolbenboden des Motors TRE 87	102
Abbildung 77:	Unterseite Zylinderkopf des Motors Tre 87	103
Abbildung 78:	Oberseite Zylinderkopf des Motors Tre 87	103
Abbildung 79:	Ansaugkanäle des Motors Tre 17	104
Abbildung 80:	Einlass- und Auslassventile des Motors Tre 17	104
Abbildung 81:	Auslassventile des Motors Tre 18	105
Abbildung 82:	Einlasskanal (links); Auslasskanal (rechts) des Motors Tre 18	105
Abbildung 83:	Einlassventil des Motors Tre 18	105
Abbildung 84:	Einlass und Auslasskanäle des Motor Tre 1	106
Abbildung 85:	Einlassventil des Motor Tre 1	106
Abbildung 86:	Auslassventil des Motors Tre 1	106
Abbildung 87:	Auslasskanal (links) Einlasskanal (rechts) des Motor Tre 87	107
Abbildung 88:	links Einlassventile, rechts Auslassventil des Motor Tre 87	107
Abbildung 89:	Kennfeldbereiche, die problematisch für den Rapsölbetrieb sind	109
Abbildung 90:	Eintanksystem	115
Abbildung 91:	Zweitanksystem	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Analyseverfahren zur Bestimmung der Rapsölparameter	9
Tabelle 4.2:	Optische Messverfahren am Einspritzstrahl ohne Verbrennung	10
Tabelle 4.3.1:	Analyseverfahren zur Bestimmung der Schmierölparameter	26
Tabelle 4.3.2:	Analyseverfahren zur Bestimmung der Rapsölparameter nach DIN V 51605	26
Tabelle 4.3.4:	Umrüster der Motoren in alphabetischer Reihenfolge	28
Tabelle 5.1.1:	Mittlere Werte der Fettsäurezusammensetzung in Abhängigkeit v. d. Rapssorte	30
Tabelle 5.1.2:	Eigenschaften von Rapsölen und Dieselkraftstoff (beispielhaft)	31
Tabelle 5.1.3:	Temperaturabhängige Kraftstoffeigenschaften	35
Tabelle 5.1.4:	Parameter der Norm DIN V 51605 Stand Juni 2006	37
Tabelle 5.1.5:	Probenahme nach ISO 3170, DIN 51750 Teil 1 und 2	38
Tabelle 5.4.3.1:	Abgasmessungen an den Motoren 1; 44; 98; 103; 115	87
Tabelle 5.5.4.1:	Wartungsmaßnahmen an Rapsölmotoren	110

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasturbolader
Bh	Betriebsstunden
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und
BK	Brennstoffkonstante
BTL	Bio To Liquid
°C	Grad Celsius
C-Gehalt	Kohlenstoffgehalt
CFPP	Cold filter plugging point
CO	Kohlemonoxid
DR	Destillationsrückstand
DK	Dieselmotoren
E85	Kraftstoff mit 85% Ethanol
EAW	Elektro Anlagen Westenfeld
FSM	Filter Smoke Number
G _{DIL}	Verdünnungsluftstrom
G _{TOT}	Gesamtluftstrom
G _{SAM}	Abgasprobenstrom
GVS	Gesamtverschmutzung
H-Gehalt	Wasserstoffgehalt
HC	Kohlenwasserstoffe

HFRR	High Frequency Reciprocating Rig
ICP	Inductively Coupled Plasma
m	Masse
MP	Probenmasse Partikel
MSI	Dräger Safety MSI
NO _x	Stickoxide
KI	Klopintensität
KOH	Kaliumhydroxid
KT	Kalendertage
KW	Kurbelwinkel
O-Gehalt	Sauerstoffgehalt
O ₂	Sauerstoff
OEM	Original-End-Manufacturer (Bedeutung im Maschinenbau)
Q	Wärme (Energie)
p	Druck
PD	Pumpe-Düse
PLD	Pumpe-Leitung-Düse
RME	Rapsmethylester
RK	Rapsölqualität
TC	Technik Center
TBN	Total Base Number
TR	Technische Richtlinie
u	innere Energie
V	Volumen
VP	Verteilerpumpe
VwVws	Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe
α	Kurbelwinkel
φ	Berechnungswinkel

1 Einleitung

Durch Verbrennungsmotoren angetriebene Fahrzeuge ermöglichen heute den preiswerten Transport von Personen und Waren. Sie sind eine wesentliche Grundlage des erreichten Lebensstandards in der arbeitsteiligen Welt. Dabei haben sich flüssige Energieträger für den benutzerfreundlichen und kostengünstigen Betrieb von Motoren grundsätzlich durchgesetzt. Flüssige Kraftstoffe erlauben eine einfache Betankungslogistik und sind auch innerhalb der Infrastruktur „Fahrzeug – Motor“ durch Pumpen gut zu fördern und zu dosieren. Die hohe spezifische Energiedichte der heutigen flüssigen Kraftstoffe ermöglicht den Fahrzeugen große Reichweiten. Konventionelle Dieselmotorenkraftstoffe auf Mineralölbasis erfüllen derartige Anforderungen an einen Motorenkraftstoff in äußerst hohem Maße. Auf Grund des weltweit wachsenden Bedarfs an Dieselmotorenkraftstoff und der nicht gleichermaßen steigenden verfügbaren Erdölressourcen, erhöhen sich die Preise für flüssige Kraftstoffe aus Erdöl permanent. Entsprechend wird weltweit nach regenerativen flüssigen Kraftstoffen und Motoren für deren Anwendung unter gleichen oder sogar besseren Nutzungsbedingungen gesucht. Verstärkt wird diese Suche durch die verbreitete Erkenntnis, dass Erdöl als Rohstoff nur noch in begrenzten Mengen zur Verfügung steht. Erdöl und dessen Produkte (z. B. Diesel) sollen sogar noch umfangreicher besteuert werden, um der mit ihrem Einsatz verbundenen Kohlendioxidemission entgegenzuwirken.

Rapsöl besitzt grundlegende Eigenschaften für einen regenerativen Motorenkraftstoff: Es ist flüssig, hat eine sehr hohe Energiedichte und emittiert nicht mehr Kohlendioxid, als bei seinem Anbau aus der Atmosphäre entnommen wurde. Damit erfüllt es gesellschaftliche Anforderungen an einen zukünftigen Kraftstoff, sein Einsatz wird allgemein stark gewünscht. Die Verwendung von Pflanzenölen als Treibstoff ist bereits seit mehr als 100 Jahren in der Diskussion. Schon Rudolf Diesel dachte an deren Einsatz. Bislang ist die Herstellung von Dieselmotorenkraftstoff jedoch preisgünstiger als die Herstellung von Rapsöl, wobei der Preisvorteil für Dieselmotorenkraftstoff kontinuierlich sinkt. Da aber für Kraftstoffe auf Mineralölbasis eine sehr hohe Energiesteuer erhoben wird, liegt der Preis für Dieselmotorenkraftstoff bereits jetzt ca. 30 % über dem Preis von Rapsöl. Diese Tatsache forciert eine rege Nachfrage nach Technologien, mit denen Rapsöl in Motoren verlässlich eingesetzt werden kann. Die deutsche Gesetzgebung hat festgelegt, dass Pflanzenöl als Kraftstoff für die Landwirtschaft auch in Zukunft von der Steuer befreit bleibt. Die Besteuerung für den Einsatz in Straßenfahrzeugen soll sich ab 2008 Jahr für Jahr deutlich erhöhen. Die Nachfrage nach Technologien für Verbrennungsmotoren, die mit Pflanzenölen betrieben werden können, wächst zudem in den Teilen der Welt, in denen Pflanzenöle zum Beispiel Palmöl oder Jatropha kostengünstiger erzeugt werden

können, als Dieselkraftstoff aus importiertem Erdöl. Die Gewinnung von anderen flüssigen Kraftstoffen (z.B. BTL-Kraftstoffe) aus festen nachwachsenden Rohstoffen wie Holz oder Getreide ist mit erheblichen Umwandlungsverlusten behaftet und zurzeit noch nicht im Industriemaßstab verfügbar. Da hingegen die Produktion von Rapsöl mit dem Koppelprodukt Rapskuchen – einem wertvollen Eiweißfutter für die tierische Ernährung – verbunden ist, kann man auch künftig davon ausgehen, dass in Deutschland Rapsöl im größeren Maßstab produziert wird. Es kann somit als Kraftstoff für Nischenanwendungen, wie beispielsweise in der Landwirtschaft, zur Verfügung stehen. Dabei beträgt die in Deutschland produzierbare Rapsölmenge – unter Beachtung der Bodenkultur und Fruchtfolge – zurzeit lediglich ca. 2,2 Millionen Tonnen im Jahr. Diese Menge reicht zwar für Nischenanwendungen, wie zum Beispiel für Motoren in Landmaschinen aus, nicht aber für die Versorgung im Straßenverkehr. Hier werden sicherlich nachwachsende Kraftstoffe der zweiten Generation, wie BTL (**B**io **t**o **L**iquid), notwendig sein, um eine umfassende Ablösung des fossilen Dieselkraftstoffs zu ermöglichen.

Kraftstoffkosten stellen einen erheblichen Anteil der Betriebskosten in der Landwirtschaft dar. Daher besteht auch aus dieser Sicht ein deutlicher Bedarf, Rapsöl als Kraftstoff einsetzen zu können. Dieses gesamtgesellschaftliche Erfordernis verlangt, den Einsatz von Rapsöl als Motorenkraftstoff stärker zu erforschen. Landwirtschaftliche Betriebe sehen in dem Kraftstoff Rapsöl insbesondere deshalb Vorteile, weil sie die Rapssaaten selbst produzieren und nur das qualitätsgerechte Filtern und Pressen einkaufen müssen (Genossenschaft). Sie können den Preis für den Kraftstoff deutlich beeinflussen, außerdem verbleibt die Wertschöpfung im ländlichen Raum. Da sich diese ökonomische Konstellation in Teilen der EU erst jüngst in dieser Form herausgestellt hat, gibt es bisher keine umfangreichen Forschungsarbeiten international tätiger Motorenhersteller für Motoren in Landmaschinen auf diesem Gebiet. Der Einsatz von alternativ empfohlenem, reinen Rapsmethylester (RME) ist keine wirtschaftliche Alternative für die Landwirtschaft, da der Preis von RME mit zurzeit ca. 30 %, deutlich über dem Rapsölpreis liegt.

Einen weiteren Aspekt für die wissenschaftliche Erarbeitung von Motorenkonzepten stellt schließlich die Umweltverträglichkeit des Kraftstoffs Rapsöl dar, bezogen auf Grundwasser und Boden. Rapsöl gilt als „nicht wassergefährdender Stoff“ (Kennnummer 760 der VwVwS vom 27. Juli 2005) [91], weshalb es sich als Kraftstoff für Motoren bei Arbeiten in Trinkwasserschutzgebieten und Umweltschutzzonen anbietet.

2 Stand der Wissenschaften und Problemstellung

Flüssige Energieträger werden wegen ihrer guten Verteilbarkeit und Dosierbarkeit durch gesteuerte Strömungsvorgänge in Verbrennungsmotoren mit nicht stetiger Verbrennung eingesetzt. Dabei soll der Energieträger eine sehr hohe Energiedichte unter allen Einsatzbedingungen besitzen. Dies ermöglicht die einfache Lagerung in dünnwandigen leichten Tanks und sehr hohe Reichweiten der Fahrzeuge. Rapsöl besitzt von allen verfügbaren alternativen Kraftstoffen die höchste Energiedichte und kommt dabei der von Dieselmotoren sehr nahe **Abbildung 1**. Alle bisherigen weltweiten Versuche, staub-

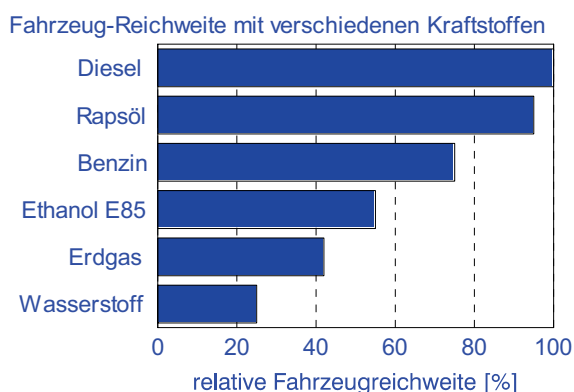


Abbildung 1: Fahrzeug-Reichweite

förmige Energieträger für diese Motoren einzusetzen, sind im Labormaßstab gestoppt worden. Die dominierende Stellung des Erdöles als Primärenergieträger für flüssige Kraftstoffe ergibt sich aus umfangreichen preiswerten Vorkommen. Sie ließen bis dato (2005) jährlich wachsende Fördermengen bei annähernd konstanten Preisen (inflationsbereinigt) zu.

So war Anfang der 60er-Jahre des letzten Jahrhunderts Erdöl billiger als deutsche Steinkohle (bezogen auf den Heizwert). Entsprechend ist die Entwicklung sowohl von Otto-, als auch von Dieselmotoren seit vielen Jahren auf die Verwendung von Kraftstoffen auf Erdölbasis ausgerichtet. Diese Kraftstoffe werden in zentralen großen Raffinerien hergestellt; ihre Qualitätsanforderungen werden zwischen den Produzenten und den Motorenherstellern ständig abgestimmt. So wird die Dieselmotorennorm ca. alle zwei Jahre den Anforderungen der modernen Brennverfahren und den Abgasnachbehandlungsstrategien angepasst.

Seit dem starken Anstieg des Erdölpreises 2003 wird intensiv nach alternativen flüssigen Kraftstoffen gesucht. Gleichzeitig ist festzustellen, dass kein anderer flüssiger Primärenergieträger jährlich in so großen Mengen zur Verfügung steht. Somit müssen künftig unterschiedliche flüssige Energieträger nebeneinander verwendet werden. Dabei ist zu erörtern, ob es nur wenige Arten von flüssigen Kraftstoffen (Benzin, Dieselmotoren, Kerosin) für alle Motoren, einschließlich aller Nischenanwendungen, geben soll oder ob es eine Vielzahl von Kraftstoffarten geben wird, von denen sich einige in Nischenanwendungen etablieren werden.

Rapsöl als eine weitere Primärenergiequelle für flüssigen Kraftstoff ist seit Ende der 80er-Jahre in der Diskussion [1;2;4;6;31]. Es kann mit drei Strategien in flüssigen Kraftstoff umgewandelt werden.

1. Direkte Verwendung als Kraftstoff nach V-DIN 51605 ohne Umwandlungsverluste, ohne weite Transporte als dezentraler Kreislauf beim Landwirt.
2. Umwandlung zu Rapsmethylester nach DIN EN 14 214 mit entsprechenden Kosten für Transporte, Umesterung und Management des Aufkaufes und Vertriebes.
3. Umwandlung zu Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 durch Zumischung zum Mitteldestillat bei der Erdölverarbeitung mit entsprechenden Kosten für Transporte, Veredelung und Management des Aufkaufes und Vertriebes. Die zuletzt genannte Variante wird noch nicht praktiziert, da trotz des hohen Erdölpreises Mitteldestillat aus Erdöl billiger ist als das Äquivalenzprodukt Rapsöl [25].

Mit welchem Anteil das vorhandene Rapsöl in den einzelnen Strategien genutzt wird, ist neben der technischen Machbarkeit hauptsächlich eine Frage der politischen Randbedingungen – insbesondere der Besteuerung von Kraftstoffen. Unter den momentanen wirtschaftspolitischen Bedingungen ist Rapsöl für die Landwirtschaft bei dezentraler Herstellung 40 Cent pro Liter preiswerter als Dieselkraftstoff (bezogen auf den gleichen unteren Heizwert). Eine in Deutschland und Europa sich ständig ändernde Politik führte dazu, dass bisher keine umfangreichen systematischen Forschungsarbeiten zum Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff nach V-DIN 51605 für Motoren vorliegen.

Um einen neuen Kraftstoff als Serienkraftstoff in Motoren einsetzen zu können, sollte eine Vielzahl von Untersuchungen, Entwicklungen und Erprobungen für einen störungsfreien Motorbetrieb erfolgen. Dass betrifft die Kraftstoffzufuhr, die Kraftstoffeinspritzung, die Energieumsetzung im Brennraum, den Verschleiß des Laufzeuges, die Abgasemission, Abgasnachbehandlungssysteme, die Verträglichkeit mit dem Schmieröl usw.. In wissenschaftlichen Artikeln zur Beschreibung o. g. Arbeiten [2; 4; 8; 13; 87] wird jeweils von sehr hohen technischen Aufwendungen berichtet, so dass der wirtschaftliche Einsatz für wenige Motoren nicht gegeben scheint. Bei den bisherigen Umrüstungen von Großserienmotoren wurden bei den Nutzern vorhandene Motoren mit einem spezifizierten Niederdruckkraftstoffsystem (Rapsölvorwärmung) ausgerüstet und dann im Feld getestet, ob ein Betrieb möglich ist. Bei auftretenden Schwierigkeiten im Rapsölbetrieb wurde im Nachhinein nach Lösungsmöglichkeiten gesucht oder der Betrieb mit Rapsöl beendet.

In der Literatur sind daher viele Beschreibungen zu finden, in denen geringfügig oder gar nicht angepasste Motoren mit Rapsöl betrieben wurden [17; 21; 24; 62; 63; 74; 77]. In diesen

Arbeiten wurde oft das Leistungs-, Abgas-, und Verschleißverhalten dargestellt, ohne auf die innermotorischen Vorgänge beim Rapsöleinsatz einzugehen und neuartige Zusammenhänge zu erarbeiten. Daneben gibt es einige Untersuchungen zum Einspritzverhalten von Rapsöl ohne umfassende Dokumentation der weiteren Wirkungskette [2; 4; 18; 70, 72]. Bei den bisher veröffentlichten Verbrennungsuntersuchungen [2; 12; 40, 46; 50; 58; 66] wurden meist nur die äußeren Motordaten ermittelt und kaum Indiziermessungen in Brennräumen durchgeführt. Nur durch Auswertung von Indizierdaten ist es möglich, die Vorgänge im Motor physikalisch belegt zu beschreiben. Um eine langfristige Nutzung des Kraftstoffes Rapsöl nach V-DIN 51605 zu ermöglichen, sind die komplexen Vorgänge im Motor beim Rapsöleinsatz in ihren Kausalitäten beginnend beim Tanksystem über die Verbrennung, das Abgassystem bis hin zum Triebwerk zu ermitteln. Weiterhin werden Optimierungsstrategien für das Gesamtsystem Motor benötigt. Eine umfassende, auf physikalischen und chemischen Vorgängen basierende Motorentheorie sowie Motorenkonzepte für den Rapsölbetrieb sind umso erforderlicher, da die Motorenentwicklung unter sehr hohem Kosten- und Zeitdruck stattfindet. Mit Motorenkonzepten, die mit dieser Arbeit vorgelegt werden, können die Voraussetzungen für den Betrieb mit Rapsöl bereits in einer sehr frühen Phase der Motorenentwicklung berücksichtigt und damit Kosten und Zeit gespart werden. Mit der auf physikalischen und chemischen Grundsätzen basierenden Motorentheorie für den Rapsölbetrieb und darauf aufbauenden Motorenstrategien ist eine Ablösung der „Versuch und Fehler-Methode“ bei der Entwicklung von Rapsölmotoren möglich.

Als nachwachsender flüssiger Kraftstoff hat Rapsöl die größte Verbreitung in Mitteleuropa und ist deshalb auch die am meisten untersuchte Ölsorte. Neben dem Raps gibt es noch eine ganze Anzahl weiterer Ölpflanzen [6; 10; 15]. Daraus ergibt sich die Frage, ob die mit Rapsöl als Kraftstoff gewonnenen Erkenntnisse auf andere Ölssorten übertragbar sind, oder weitere Untersuchungen für jede einzelne Ölpflanze erfolgen müssen.

3 Zielsetzung der Arbeit

Für die dauerhafte Nutzung von Rapsöl werden geeignete Motoren und Motorenausrüstungen benötigt. Das Ziel der Arbeit besteht in der zusammenfassenden Systematisierung und Bewertung des derzeitigen Einsatzes von Rapsöl in Motoren. Abgeleitet werden daraus Konzepte zur Lösung rapsöltypischer Probleme in Verbrennungsmotoren. Die praxisnahen Konzepte sollen in zukünftigen Motoren umgesetzt werden können. Die Entwicklung der Konzepte erfolgt unter Beachtung entstehender Kosten in einer künftigen Serienfertigung. Hierbei sind folgende Teilziele in die Forschungsarbeit einbezogen worden:

- Systematisierung des Kraftstoffes Rapsöl nach verschiedenen Herstellungsverfahren und Qualitätsstufen und deren Auswirkungen auf den Verbrennungsmotor insbesondere hinsichtlich seiner Lebensdauer.
- Systematisierung der Verbrennung von Rapsöl mit dem Ziel, Konzepte für eine optimale Verbrennung des Pflanzenöles mit einer dem Dieselbetrieb äquivalenten Energieumsetzung zu schaffen, um die thermische und mechanische Belastung der Bauteile in technisch beherrschbaren Grenzen zu halten.
- Systematisierung der gasförmigen und festen Abgasemissionen beim Rapsölbetrieb mit dem Ziel, Konzepte für eine schadstoffarme Verbrennung während der gesamten Motorenlebensdauer zu ermöglichen. Dabei sind die europäischen Abgasgrenzwerte und das Emissionsverhalten vergleichbarer Motoren im Betrieb mit Dieselmotoren Maßstab für die Bewertung der Emissionen.
- Systematisierung von Niederdruckkraftstoffsystemen für den Rapsölbetrieb mit dem Ziel, Konzepte für Systeme zu entwickeln, die den Besonderheiten des Pflanzenölbetriebs während der Motorenlebensdauer Rechnung tragen.
- Systematisierung von Hochdruckeinspritzsystemen mit dem Ziel, Konzepte für Systeme zu entwickeln, die den Besonderheiten des Rapsölbetriebs während der Motorenlebensdauer Rechnung tragen.
- Untersuchung, inwieweit die an heutigen Motoren eingesetzten Laufzeuge für den dauerhaften Betrieb mit Rapsöl geeignet sind.
- Untersuchung und Beurteilung der Gaswechselsysteme von Motoren insbesondere der Abgasturbolader, Ladeluftkühler und AGR-Bauteile hinsichtlich ihrer Eignung für den Rapsölbetrieb.

Die Arbeit verfolgt außerdem das Ziel, die gewonnenen Konzepte hinsichtlich ihrer Übertragung auf andere Pflanzenöle zu bewerten und ggf. die Grenzen einer direkten Übertragbarkeit aufzuzeigen.

4 Grundlagen, Lösungswege und eingesetzte Messverfahren

4.1 Grundlagen und Lösungswege

Triebkraft für die Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff ist die hohe Preisdifferenz zwischen dem fossilen Dieselmotoren (hochversteuert) und dem nichtversteuerten Rapsöl. Da es international nur wenige Typen von Spezialmotoren für Rapsöle (Bremer Motorenwerke und EAW-Westenfeld für den BHKW-Einsatz) gibt und diese nicht für den PKW-, LKW- und Traktoreneinsatz bestimmt sind, erfolgte bisher die Herstellung von Rapsölmotoren

ausschließlich durch Umrüstungen von konventionellen Dieselmotoren als Einzelfertigung oder Kleinserie. Diese Produktion umgerüsteter Motoren für PKW, LKW, Traktoren, Baumaschinen usw. erfolgt bisher nicht durch die Motorenhersteller mit ihren umfangreichen und gut ausgerüsteten Entwicklungs- und Forschungsabteilungen, sondern durch externe Motorenumrüster mit nur wenigen Mitarbeitern (unter fünf) und häufig nur geringen technologischen Ressourcen. 56 Namen und Adressen von Umrüstfirmen finden sich bei Remmele [75] – allerdings ohne Bewertung und ohne Anspruch auf Vollständigkeit, u.a. wegen ständiger Neugründungen auf Grund hoher Nachfrage, aber auch wegen häufiger Liquidationen.

Die Anpassung der Motoren an den Rapsölbetrieb beschränkt sich meist auf Maßnahmen am Niederdruckkraftstoffversorgungssystem und auf den Einbau einer elektrischen Motorblockheizung. Unter Punkt 5.2.1 „Niederdruckkraftstoffsystem im Rapsöleinsatz“ wird auf ausgewählte Umrüstkonzepte vertieft eingegangen. Einige wenige Umrüster verändern zudem die Einspritzdüsen mit ihren Komponenten Lochzahl, Lochgeometrie, Spritzwinkel und Höhenwinkel, um die Gemischbildung dem Rapsölbetrieb anzupassen. Prüfstandtests der Rapsölmotoren (umgerüstete Dieselmotoren) fanden bisher vor dem Verkauf nicht statt. Getestet wurden bisher einzelne Rapsölmotoren und Umrüstungen an verschiedenen Hochschulen, wobei auch nur der erreichte Stand der Motoren dokumentiert wurde, was Leistung, Verbrauch, Abgasemissionen und Verschleiß betrifft, Optimierungsschritte fehlen. Über diese Arbeiten wird in der Literatur umfangreich berichtet [4; 8; 54; 55; 62; 64; 74; 77; 86]. Bei vielen Hochschularbeiten werden Verbindungen zum Motorinnenprozess (Indizierung und deren Auswertung) hergestellt. Es fehlen jedoch Ansätze wie sich Kraftstoffförderung und Einspritzung zur Optimierung der Rapsölverbrennung beeinflussen lassen.

Eine Zusammenarbeit oder Organisation der Umrüster zur Bearbeitung von vorwettbewerblichen Grundlagen des Rapsöleinsatzes in Motoren findet bisher nicht statt. Eine technische Darstellung der Arbeiten von Umrüstern ist in der Literatur nur sehr vereinzelt zu finden [24; 28; 29, 33; 45; 51]. Die meisten Veröffentlichungen der Umrüster sind reine Verkaufshinweise ohne belastbare technische Hintergründe und Informationen.

Der umfassendste objektive Überblick zum Stand der Entwicklung von Rapsölmotoren ergibt sich aus dem Vorhaben „**Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöлтаuglichen Traktoren**“ [88] (100-Traktoren-Programm) des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). In diesem Vorhaben wurden 105

Rapsölmrüstungen über fünf Jahre wissenschaftlich begleitet. Hierbei wurden erstmalig auch Langzeiterfahrungen gewonnen, die in kurzzeitigen Prüfstandtests nicht zu ermitteln waren.

Um Verbrennungsmotorenkonzepte und Betriebsstrategien für den Rapsölbetrieb entwickeln zu können, wurden in der hier dokumentierten Forschungstätigkeit folgende Leistungen erbracht:

1. Analyse von Rapsölen in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie Untersuchungen zu vorhandenen Herstellungsstrategien und theoretisch verfügbaren Qualitäten. Hierbei wurde die umfangreiche Literatur [3; 13; 27; 39; 60; 61, 77] als Informationsquelle benutzt und durch Laboruntersuchungen ergänzt.
2. Durchführung von Prüfstandsuntersuchungen im Kurzzeitmaßstab mit dem Ziel, die grundlegenden Vorgänge der Gemischbildung, Verbrennung und Abgasemission zu klären und geeignete Einspritz- und Brennverfahren für Rapsöl abzuleiten.
3. Durchführung von Langzeituntersuchungen an Motoren im Rapsöleinsatz mit dem Ziel, detaillierte Informationen über Leistungs-, Abgas- und Verschleißverhalten der Rapsölmotoren zu erhalten. Weiterhin wurden Kenntnisse über das Betriebsverhalten der Schmieröle mit den zurzeit marktüblichen Rapsölqualitäten gewonnen.

Die Analyse der gewonnenen Informationen bildet die Grundlage für die Herausarbeitung von Handlungsempfehlungen, Entwicklungsstrategien und Motorenkonzepten.

4.2 Versuchsziele, Messverfahren und Auswertungsmethoden in den Laboruntersuchungen

Bei Einführung eines neuen Kraftstoffes – hier Rapsöl – wird sein Betriebserhalten zunächst im Labormaßstab untersucht, getestet und bewertet, um es im Gesamtsystem Verbrennungsmotor kennen zu lernen. Auf der Basis dieser Ergebnisse und Erfahrungen, die in Kurzzeitversuchen gewonnen werden, können dann erste Konzepte für zukünftige Motoren abgeleitet werden. Die Laboruntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit hatten folgende Ziele:

- Bestimmung der chemischen und physikalischen Eigenschaften, Strukturen von Rapsölen als Kraftstoff sowie der Vergleich mit bereits bekannten und erprobten Kraftstoffen durch Analytik im Betriebsstofflabor,
- Untersuchung von Kraftstoffproben, die zu unterschiedlichen Zeiten und an verschiedenen Orten gewonnen wurden, mit dem Ziel, Kenntnisse über die auf dem deutschen Markt verfügbaren Kraftstoffqualitäten für den motorischen Einsatz zu gewinnen,
- Ermittlung des Gemischbildungsverhaltens von Rapsölen bei der dieselmotorischen Einspritzung in den Brennraum durch Untersuchungen an Einspritzprüfständen,

- Einsatz des Kraftstoffes Rapsöl in Verbrennungsmotoren auf Motorprüfständen zur umfassenden Analyse und Bewertung der motorischen Verbrennung, der Bauteilbelastung und der Abgasemissionen.

Messmethoden und Verfahren zur Ermittlung der chemischen und physikalischen Eigenschaften

Zur Bestimmung der Eigenschaften des Rapsöles als Kraftstoff werden erstens die grundlegenden Parameter, deren Prüfverfahren genormt sind, entsprechend **Tabelle 4.1** bestimmt und die Ergebnisse mit den Daten von Dieselmotorkraftstoff verglichen.

Zweitens werden Parameter bestimmt, die den chemischen Aufbau des Rapsöles als Kraftstoff beschreiben, wie Elementar- und Strukturanalyse. Für das Rapsöl wird insbesondere das Fettsäuremuster bestimmt. Dieses unterscheidet Rapsöl von anderen Pflanzenölen und ist für einige wichtige chemische Eigenschaften wie die Oxidationsstabilität und das Kälteverhalten verantwortlich.

Tabelle 4.1: Analyseverfahren zur Bestimmung der Rapsölparameter

Parameter	Maßeinheit	Prüfverfahren
Flammpunkt	°C	DIN EN ISO 2719
Stockpunkt	°C	DIN ISO 3016
CFPP	°C	DIN EN 116
Heizwert	kJ/kg	DIN 51 900-1,-3
Wassergehalt	% (m/m)	EN ISO 12937
Phosphorgehalt	mg/kg	DIN EN 14107
Gesamtverschmutzung	mg/kg	DIN EN 12662
Säurezahl	mg KOH/g	DIN EN ISO 14104
Dichte (15 °C)	kg/m ³	DIN EN ISO 12185
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm ² /s	DIN EN ISO 3104
Verkokungsneigung	% (m/m)	DIN EN ISO 10370
Jodzahl	g/100 g	DIN EN 14111
Schwefelgehalt	mg/kg	DIN EN ISO 20846
Calcium- /Magnesiumgehalt	mg/kg	DIN EN 14538
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	DIN EN 14112
Aschegehalt	% (m/m)	DIN EN ISO 6245
Cu-Stabilität	h	DIN EN ISO 2160
Schmierfähigkeit HFRR	µm	ISO 12156
Molare Masse	g/mol	berechnet

Drittens werden Eigenschaften bestimmt, die spezielle Anforderungen des dieselmotorischen Einsatzes betreffen. Diese Eigenschaften sind nicht durch einen einzelnen Wert, sondern mittels Kennlinien zu beschreiben und umfassen folgende Größen:

- Siedeverhalten,
- Oberflächenspannung,
- Mischbarkeit mit Dieseldieselkraftstoff,
- Mischbarkeit mit Schmieröl,
- Verträglichkeit zu Kunststoffen,
- Kompressibilität.

Die auf diese Weise vor den Motorversuchen gewonnenen umfangreichen Daten werden mit den Parametern konventioneller Kraftstoffe verglichen, in Bezug auf die bekannten Anforderungen an Dieselmotoren bewertet und schließlich genutzt, um Lösungswege zur Anpassung der Motoren zu finden. Diese werden in Motorentwicklungskonzepten umgesetzt sowie auf Prüfständen getestet und weiterentwickelt.

Die Gemischbildung als zentrales Element des dieselmotorischen Brennverfahrens wird in Einspritzprüfständen untersucht, in denen einzelne Einspritz- und Verdampfungsvorgänge ohne Zündung vollzogen und dabei optisch beobachtet werden. Dafür gibt es eine Vielzahl von Verfahren, in **Tabelle 4.2** sind die wesentlichen aufgeführt.

Tabelle 4.2: Optische Messverfahren am Einspritzstrahl ohne Verbrennung

Verfahren	Messgrößen und Zielfunktionen
Extinktionsmessverfahren	Tropfengrößenverteilung, Tropfendichte
Schlierenoptik	Strahllänge, Strahlkegelwinkel, Strahlrichtung, Dampfphase
Streulichtmessung	Strahllänge, Strahlkegelwinkel, Strahlrichtung, Strahlgleichmäßigkeit
Laserinduzierte Fluoreszenz	Strahllänge, Strahlkegelwinkel, Dampfphase
Laser-Doppler-Anemometrie	Lokale Messungen im Einspritzstrahl von Messgrößen wie Tropfengeschwindigkeit, Tropfendichte
Phasen-Doppler-Anemometrie	Lokale Messungen im Einspritzstrahl von Messgrößen wie Tropfengrößenverteilung, Tropfengeschwindigkeit

Eine umfangreiche Beschreibung dieser sowie weiterer optischer Verfahren sind in verschiedenen Forschungsberichten [70, 71, 72; 73, 93; 94] zu finden. Bei diesen Untersuchungen findet die Auswertung vorrangig als Vergleich der Messinformationen mit bereits bekannten Daten aus der dieselmotorischen Gemischbildung statt. Folgende, den Einspritzvorgang beschreibende Parameter werden vertieft betrachtet:

- Einspritzstrahlkegelwinkel,
- Einspritzstrahllänge,
- Erfasstes Volumen des Einspritzstrahls,
- Einspritzdruck in der Einspritzdüse,
- Einspritzverzugszeiten,
- Einspritzvolumen (Einspritzmasse) pro Einspritzung,
- Symmetrie der Einspritzung bei Mehrlochdüsen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen, können die Einspritzpumpen (bei COMMON-Rail-Systemen der Raildruck und die Bestromungszeiten) und die Einspritzdüsen für den Einsatz in Rapsölmotoren vor dem ersten Motorversuch mit Rapsöl optimiert werden. Ziel der Optimierung ist es, im Vergleich zum Dieselmotorbetrieb die gleiche Menge Kraftstoff optimal zu zerstäuben und mit Luft gemischt der Verbrennung zur Verfügung zu stellen.

Wenn bei den zuvor beschriebenen Untersuchungen keine grundlegenden Fakten gegen den Einsatz im Motor sprechen, wird in der nächsten Untersuchungsstufe der Einsatz des Kraftstoffes Rapsöl im befeuerten Versuchsmotor bewertet.

Für die von mir durchgeführten Verbrennungs- und Abgasuntersuchungen sind die Motoren 6VDS 24/24 AL-1 (Direkteinspritzung), 1VDS18/15 (Direkteinspritzung) und 1NVD18 eingesetzt worden, deren technische Daten im **Anhang 1** dargestellt sind. Diese drei Motoren sind für den Betrieb mit Schwerölen, d.h. für hochviskose, hochsiedende und schlecht zündende Kraftstoffe ausgelegt. Sie besitzen eine Kraftstoffvorwärmung (elektrisch oder mit Dampf) und haben entsprechend angepasste Einspritzsysteme (z. B. Düsenkühlung, um Verkokungen der Einspritzdüse zu verhindern).

Das messtechnische Konzept der Motorprüfstände ist schematisch in **Abbildung 2** dargestellt. Die an den Versuchsmotoren installierte Messtechnik ist auf eine „mittelschnelle“ sowie eine hochtransiente Messwerterfassung aufgeteilt. Die „mittelschnelle“ Komponente beinhaltet die Betriebsmesstechnik und erfasst folgende Daten, die für betriebstechnische Zwecke genutzt wurden und zur Dokumentation des „äußeren“ Betriebsverhaltens der Motoren mit den unterschiedlichen Kraftstoffen dienen:

- Belastung des Motors,
- Kraftstoffmassenstrom,
- die mittlere Drehzahl,
- Ladeluftdruck,
- Abgasgegendruck,
- Schmieröl-, Brennstoff- und Kühlwasserdruck,
- Temperaturen von Ladeluft, Brennstoff, Kühlwasser,
- Schmieröl und Abgas,
- Luftmassenstrom durch den Motor (mittels Venturidüse);

Die hochtransiente Komponente der Messtechnik dient der Erfassung relevanter Messgrößen für die thermodynamische Versuchsauswertung. Die Aufnahme schnellveränderlicher

Messgrößen und deren Synchronisation erfolgt über das Motorindiziersystem. Folgende schnellveränderliche Größen werden erfasst:

- Brennraumdruck,
- Düsennadelhub,
- Einspritzdruck.

Der Brennraumdruck wird mit einem piezoelektrischen wassergekühlten Quarzdruckgeber Kistler 7061 aufgenommen. Der Düsennadelhub (Düsennadelstellung) wird mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers ermittelt. Die Information der induktiven Halbbrückenschaltung wird einem Trägerfrequenzmessverstärker (AVL 3076) zugeführt. Die Erfassung des Einspritzdruckes erfolgt über einen Einspritzdruckgeber Kistler 4067A2000A0. Der Drucksensor ist unmittelbar vor der Einspritzdüse angeordnet.

Zur Synchronisation der Messwerte mit der Kolbenstellung ist am freien Kurbelwellenende ein Kurbelwinkelgeber installiert. Der Kurbelwinkelgeber liefert 360 Signale pro Umdrehung und ein Triggersignal. Das Kurbelwinkelsignal wird elektronisch auf 0,25 KW geteilt. Die genaue Zuordnung von Kurbelwellenstellung und Drucksignalen setzt eine korrekte Totpunktbestimmung voraus. Schon geringe Abweichungen des gemessenen oberen Totpunktes von der realen Totpunktlage des Kolbens (falsche Zuordnung von Volumina) führen zu großen Fehlern bei der Berechnung des indizierten Mitteldruckes bzw. der pro Zeiteinheit umgesetzten Brennstoffmasse [89]. Der obere Totpunkt wird in der vorliegenden Arbeit aus der Kompressionsdruckkurve unter Einbeziehung des thermodynamischen Verlustwinkels bestimmt. Dessen Ermittlung erfolgt bei betriebswarmem Motor und Nenndrehzahl über mehr als 1000 Arbeitsspielen sowie einer anschließenden Mittelung der aus den Einzelarbeitsspielen gewonnenen OT-Werte.

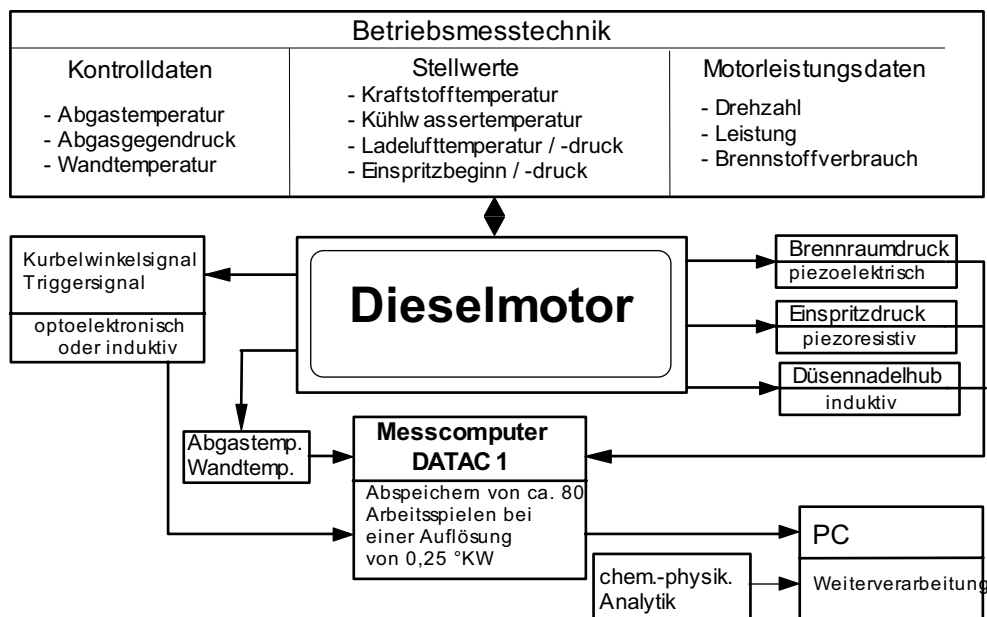


Abbildung 2: Darstellung der eingesetzten Messtechnik

Die Auswertung des Zylinderinnendruckverlaufs (Indizierung) bildet den Schwerpunkt der durchgeführten Verbrennungsanalyse bei Einsatz von alternativen Kraftstoffen. Bei den Indiziermessungen werden die schnellveränderlichen Daten von 80 Arbeitsspielen mit einer Auflösung von $0,25^\circ$ KW aufgenommen und abgespeichert und bilden dann die Grundlage für die Berechnung aussagefähiger Kenngrößen bzw. Verläufe wie:

- indizierter Mitteldruck,
- Zündverzug,
- Einspritzbeginn,
- Durchbrennpunkt,
- Zündpunkt,
- Durchbrennpunktverzug,
- Fourieranalyse der Druckschwingungen,
- Schwerpunkt der Verbrennung,
- Bestimmung der in der Vorverbrennungsphase eingebrachten Wärmemenge und Winkelzuordnung.
- maximaler Brennraumdruckanstieg und Winkelzuordnung,
- maximaler Brennraumdruck und Winkelzuordnung,
- Kennwert zur Charakterisierung der Druckschwingungen (KI),
- Brennverlauf (umgesetzte Kraftstoffmenge je Grad KW),
- maximale Brenngeschwindigkeit und Brennende,
- Temperatur im Brennraum berechnet aus dem 1-Zonen-Modell,
- Druck, Temperatur und Druckanstieg im Zündpunkt,
- maximale Brenngeschwindigkeit in der Vorverbrennung,

Da sich die meisten Motorenbrennräume bei gleichen Brennverfahren geometrisch ähnlich sind und die Pleuelstangenverhältnisse ebenfalls keine großen Abweichungen haben, wird im praktischen Motorenbau meist auf die Umrechnung der Kurbelwinkelinformation auf das Brennraumvolumen verzichtet. Die gemessenen Parameter werden als Funktion des Kurbelwinkels dargestellt. Diese Darstellung über dem Kurbelwinkel erlaubt es, die Ergebnisse von Motoren unterschiedlicher Größe miteinander zu vergleichen.

Da die Induktivität der Messspulen der Düsennadel nicht über eine längere Zeit konstant ist, kann nicht mit einem konstanten Signalwert für den Düsennadelhub gearbeitet werden, sondern für jede Messreihe ist die Frequenz-Spannungs-Wandlung neu festzulegen. Der erzielte Spannungswert des Düsennadelhubes bei Nennlast, wenn die Düse längere Zeit ($>10^\circ$ KW) am oberen Anschlag ist, wird zu 100 % gesetzt. Für die Versuche ist als Einspritzbeginn das erstmalige Ansteigen des Düsennadelhubsignals auf ca. 10 % des so ermittelten 100 % Hubwertes definiert worden. Zusammen mit dem Einspritzdrucksignal (Beginn der Kraftstoffförderung) ist dadurch der Einspritzverzug sehr exakt bestimmbar.

Die Parameter indizierter Mitteldruck, maximaler Brennraumdruck sowie maximaler Brennraumdruckanstieg werden durch einfache mathematische Funktionen direkt aus dem Druckverlaufssignal gewonnen. Eine sinnvolle Bestimmung dieser Parameter setzt eine

geeignete Glättung der Zylinderdruckverläufe voraus [41]. In den durchgeführten Messungen wurde die Methode der Fensterglättung mit einer Wichtung der einzelnen Messwerte in Abhängigkeit vom Abstand zur Fenstermitte angewandt [41].

Eine wesentliche Größe zur Beschreibung der dieselmotorischen Verbrennung ist der Zündverzug. Er ist als der Abstand zwischen Einspritzbeginn und Zündpunkt des Kraftstoffes im Brennraum definiert. Für die Bestimmung des Zündpunktes gibt es eine Vielzahl von Verfahren [41; 73], beispielsweise aus dem Brennverlauf (z.B. 2 % Umsatzpunkt) oder die ersten Differenz zur idealen Schleppkurve. Sehr häufig, insbesondere bei OTTO-Motoren und Dieselmotoren mit Zündpunkten nach dem oberen Totpunkt, wird die Methode „2 % des Brennumsatzes“ angewendet. Diese Methode kann auch auf dem schnellen Heizgesetz basieren, wodurch die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wandwärmeübergangs entfallen.

Bei Motoren mit Zündpunkten vor dem oberen Totpunkt, wie bei den hier eingesetzten, hat sich die Bestimmung des Zündpunktes über den Differenzenquotienten des Zylinderinnendruckes ($dp/d\phi$) als zeitlich schnelle und exakte Methode erwiesen und ist für alle Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit angewendet worden. Der Differenzenquotient des Zylinderinnendruckes kann nach **Gleichung 4.2.1** bestimmt werden. In der Schleppkurve hat der Differenzenquotient des Zylinderinnendruckes vor dem oberen Totpunkt einen Maximalwert und einen Nulldurchgang im oberen Totpunkt.

$$\omega(\alpha_i) = \frac{p_{\phi_{i+1}} - p_{\phi_i}}{\phi_{i+1} - \phi_i} \quad 4.2.1$$

Durch die einsetzende Verbrennung kommt es zu einem starken Anstieg des Differenzenquotienten des Zylinderinnendruckes und damit zu einer deutlichen Abweichung von dem Differenzenquotienten in der Schleppkurve. Der Differenzenquotient des Zylinderinnendruckes ist im oberen Totpunkt deutlich größer Null sowie größer als das lokale Maximum in der Verdichtung. Das sich damit ergebende erste lokale Minimum nach dem lokalen Maximum in der Kompressionsphase wird zur Festlegung der Lage des Zündpunktes genutzt. Diese Vorgehensweise ist in der folgenden **Abbildung 3** grafisch dargestellt.

Da sich bei bestimmten alternativen Kraftstoffen die Verbrennung nach der Zündung – nicht wie bei Dieselmotoren üblich – sofort ausbreitet, wird das Kriterium Durchbrennpunkt verwendet, um den Beginn der schnellen zylinderdrucksteigernden Kraftstoffumsetzung zu erkennen. Der Durchbrennpunkt ist definiert als der Punkt, bei dem der Differenzenquotient des Druckverlaufes nach der Zündung (Zündpunkt) gerade so hoch wird, wie der vor der Zündung maximal auftretende Differenzenquotient des Druckverlaufes. Der

Durchbrennpunktverzug wird als der Abstand in Grad Kurbelwinkel zwischen dem Zündpunkt und dem Durchbrennpunkt angegeben. Für die Verbrennung von Rapsölen sind der Zündpunkt und der Durchbrennpunktverzug bei höheren Lasten nicht von wesentlicher Bedeutung, da diese Kraftstoffe, wenn sie gezündet haben, sehr schnell entflammen. Die Bestimmungsverfahren für Kennwerte zur Charakterisierung der Druckschwingungen (KI) sind in [41; 73] ausführlich erläutert.

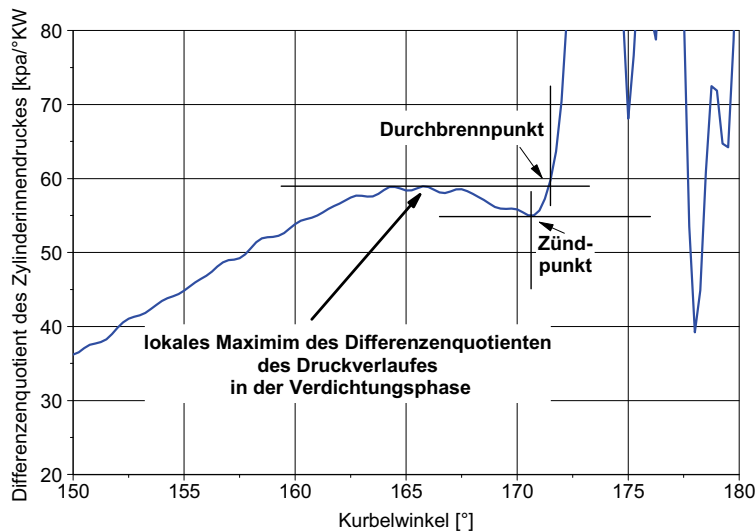


Abbildung 3: Definition von Zündpunkt und Durchbrennpunkt

Die bis hier erläuterten Parameter werden aus den einzelnen Arbeitsspielen bestimmt und im Anschluss gemittelt. Über die Schwankungsbreite der errechneten Werte ist es möglich, Betriebspunkte und Kraftstoffe zu ermitteln, in denen starke Belastungen durch einzelne Arbeitsspiele auftreten. Die eben erläuterten Parameter sind einfach und sehr schnell (online) berechenbare Größen, die es ermöglichen, die Effekte der Energieumsetzung im Brennraum online zu dokumentieren.

Eine umfassende und vertiefte Dokumentation der Unterschiede zwischen Kraftstoffen kann mittels der thermodynamischen Auswertung der Zylinderdruckverläufe durchgeführt werden. Für einen ersten schnellen Überblick kann der sogenannte Heizverlauf (ideales Gas, kein Wandwärmeübergang) eingesetzt werden. Für eine exakte Beschreibung der Verbrennungsvorgänge ist aber die Brennfunktion mit Beachtung der Eigenschaften der realen Gase und Wärmeübergänge anzuwenden **Gleichung 4.2.2**. Für die Beurteilung des Kraftstoffes Rapsöl ist diese genauere Beurteilungsmethode eingesetzt worden.

$$Q'_{\text{Brenn}} = Q'_{\text{Heiz}} + Q'_{\text{Wand}} \quad 4.2.2$$

Die Brennfunktion im Brennraum selbst kann nicht gemessen, sondern kann nur modelliert werden. Für diese Brennfunktionsberechnung gibt es eine Vielzahl von Ansätzen; erwähnt

seien hier Ein-, Zwei- und Viel-Zonen-Modelle. Durch die Erhöhung der Zonenzahl der Modelle soll deren Genauigkeit, d.h. die Widerspiegelung der Vorgänge im Brennraum, verbessert werden. Diese ist aber mit der Aufgabe verbunden, die Stoff- und Energieübertragung zwischen den Zonen exakt zu modellieren. Für Dieselmotoren mit einer realen vierteiligen Verbrennung ist die Modellierung der Stoff- und Energieübertragung wesentlich schwieriger als bei klassischen OTTO-Motoren mit einer Flammenfrontverbrennung. Die Modellbildung für den Dieselmotor ist nach wie vor Gegenstand vieler Forschungsarbeiten und noch nicht umfassend gelöst.

Für den Vergleich von Kraftstoffen untereinander ist es ausreichend, ein nulldimensionales Ein-Zonen-Modell anzuwenden und damit die Brennfunktion und den Verlauf der Brennraumgastemperatur bei den unterschiedlichen Kraftstoffen zu berechnen. Dieses Modell verwendet räumliche Mittelwerte für Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung im Brennraum. Es tritt eine wesentliche Vereinfachung gegenüber der realen Verbrennung im Dieselmotor mit starken örtlichen Temperaturgradienten auf. Daher ist dieser Modellansatz nicht für die Abgasmodellierung geeignet. Der große Vorteil des Ein-Zonen-Modells gegenüber Mehr-Zonen-Modellen ist seine physikalische (mathematische) Bestimmtheit, da es keine weiteren Stoff- und Energieübertragungsfunktion zwischen den Zonen benötigt.

Für die Berechnungen sollte von der kurbelwinkelbezogenen Zuordnung der Zustandsgrößen auf eine zylindervolumenbezogene Zuordnung umgestellt werden. Das aktuelle Zylindervolumen kann aus dem Kurbelwinkel (bei bekanntem Verdichtungsverhältnis ε und bekanntem Hubvolumen) nach **Gleichung 4.2.3** berechnet werden.

$$V(\varphi) = V_H \left(\frac{1}{\varepsilon - 1} + \frac{\sigma(\varphi)}{2} \right) \quad 4.2.3$$

$$\text{mit: } \sigma(\varphi) = \left(1 + \frac{1}{\lambda_s} \right) - \left(\cos \varphi + \frac{1}{\lambda_s} \sqrt{1 - \lambda_s^2 \sin^2 \varphi} \right) \quad 4.2.3a$$

Das für die Untersuchungen eingesetzte nulldimensionale Ein-Zonen-Modell basiert auf der Energiebilanz für den Brennraum (**Gleichung 4.2.4**), der Massenbilanz für Luft und für Abgas (**Gleichung 4.2.5**) sowie der Zustandsgleichung für Gase (**Gleichung 4.2.6**). Als Eingangsgrößen für das Modell werden die unabhängigen Größen Zylinderinnendruck und Zylindervolumen als Funktionen des Kurbelwinkels benötigt.

Die Anfangsbedingungen für die Berechnung Luftmasse (m_L), Luftdruck (p_L) und Restgasmasse (m_R) im Zylinder werden für den Zeitpunkt des Schließens der Einlassventile vorgegeben. Zur Bestimmung dieser beiden Anfangsbedingungen gibt es verschiedene Verfahren [89]. Hier wird das Verfahren über den Saugrohrdruck und das Arbeitsvolumen bei

„Einlassventil schließt“ angewendet. Die Genauigkeit dieser Methode ist sehr gut bekannt. Als Randbedingung wird weiterhin die Temperatur der brennraumumschließenden Bauteile als Funktion des Ortes und der Zeit benötigt. Da die exakte zeitliche Bestimmung der Bauteiltemperaturen (Kolben, Laufbuchse, Ventile usw.) technisch sehr aufwendig ist, wird in den Modellrechnungen eine räumliche und zeitliche Konstanz der Bauteiltemperatur über das einzelne Arbeitsspiel angenommen. Die Bauteiltemperatur ist in den Modellrechnungen nur vom Betriebspunkt abhängig. Diese Bauteiltemperatur wird oft auch als Wandtemperatur bezeichnet und stellt eine der Größen dar, die für jeden einzelnen Motor und Lastpunkt bestimmt werden muss, zum Beispiel über die Energiebilanz am Ende der Verdichtungsphase.

$$m'_B h_{BE} + m'_U H_u + m'_E h_E - m'_A h_A - m'_{AL} h - pV' - Q'_W = U' = U'_B + m'_G u + m'_G u' \quad 4.2.4$$

$$\text{Luft: } m'_L = (1 - BK) m'_U + r_E m'_E - r_A m'_A - r m'_{AL} \quad 4.2.5a$$

$$\text{Rauchgas: } m'_R = BK \cdot m'_U + (1 - r_E) m'_E - (1 - r_A) m'_A - (1 - r) m'_{AL} \quad 4.2.5b$$

$$u' = \frac{\partial u}{\partial p} p' + \frac{\partial u}{\partial v} v' + \frac{\partial u}{\partial r} r' \quad 4.2.6$$

Der Einfluss der Kraftstoffqualität auf die Niederdruckphase der Arbeitsspiele ist gering. Diese geringen Einflüsse werden messtechnisch erfasst und durch die Anfangsbedingungen in der Berechnung der Hochdruckphase berücksichtigt. Für den Vergleich der Brennfunktion zwischen den Kraftstoffen ist es daher ausreichend, nur die Hochdruckphase, bestehend aus Kompressionsphase, Verbrennungsphase und Expansionsphase, zu berechnen - also den Abschnitt des Arbeitsspiels, in dem die Gaswechselorgane geschlossen sind. Damit werden folgende Vereinfachungen des Ein-Zonen-Modells möglich:

- Einlassmassenstrom $m_e = 0$,
- Auslassmassenstrom $m_A = 0$,
- Leckverluste sind sehr gering und werden nicht berücksichtigt $m_{LA} = 0$.

Weiterhin wird die Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffes vernachlässigt. Diese Herangehensweise ist notwendig, da einerseits der zeitliche Verlauf dieser Größen nur sehr schwer messbar ist, andererseits ist ihr Einfluss auf die zu modellierende Energieumsetzung eher gering. Diese Modellbegrenzung wird durch eine minimale negative Brennfunktion kurz nach der Einspritzung ersichtlich.

Durch Einsetzen der **Gleichungen 4.2.5** und **4.2.6** in die Energiebilanz (**Gleichung 4.2.4**) und die Nutzung der angegebenen Vereinfachungen ergibt sich für die umgesetzte Kraftstoffmenge pro Zeiteinheit die folgende **Gleichung 4.2.7**.

$$m'_u = \frac{m_G \left(\frac{\partial u}{\partial p} p' \right) + \frac{\partial u}{\partial v} V' - Q'_W + pV'}{H_u + \frac{\partial u}{\partial v} V - u - \frac{\partial u}{\partial r} (1 - BK - r)} \quad 4.2.7$$

Die Lösung der Gleichung 4.2.7 erfordert Berechnungsgleichungen für:

- die spezifische Energie,
- den Wandwärmestrom,
- die Brennstoffkonstante.

Die spezifische innere Energie u wird mit Hilfe des Polynomansatzes für die kalorische Zustandsgleichung nach Zacharias [90] in Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung (Luftanteil R), dem spezifischen Volumen und dem Zylinderdruck angenähert. Aus dieser Berechnungsgleichung werden die benötigten partiellen Ableitungen der spezifischen inneren Energie gebildet.

Der Wandwärmestrom von den Brennraumgasen an die Brennraumwand wird nach dem Ansatz von Newton berechnet (**Gleichung 4.2.8**).

$$Q'_W = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T) \quad 4.2.8$$

Die Fläche für den Wärmeübergang wird aus der Geometrie des Verbrennungsraumes, das heißt aus der jeweiligen Kolbenstellung und den Abmessungen der Bauteile, ermittelt. Da der Wärmeübergang im Spalt des Feuersteiges nur etwa 30 % des Wertes im Brennraum erreicht, wird die Fläche des Feuersteiges nach dem Ansatz von Hohenberg [89] mit dem Faktor 0,3 multipliziert.

Der zeitlich und örtlich veränderliche Wärmeübergangskoeffizient zwischen Brenngas und Brennraumwand wird wesentlich von der örtlichen Gasgeschwindigkeit sowie weiteren instationären Parametern, wie zum Beispiel der Strahlung und der Gaszusammensetzung bestimmt. Diese Parameter unterliegen zeitlichen und örtlichen Veränderungen, wobei ihre exakte Bestimmung selbst lokal nur mit sehr großem messtechnischem Aufwand möglich ist. Bei den Vergleichsberechnungen mittels des nulldimensionalen Ein-Zonen-Modells wird daher auf empirische Modelle zurückgegriffen, die einen örtlich konstanten, von den Brennraumgasbedingungen abhängigen Wärmeübergangskoeffizienten, ermitteln. Der Wärmeübergangskoeffizient kann nach verschiedenen Ansätzen aus der Literatur wie folgt ermittelt werden:

1. Nach Nusselt [92]:

$$\alpha(\varphi) = \frac{0,421}{T - T_W} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_W}{100} \right)^4 \right] + 1,66 \sqrt[3]{p^2 \cdot T} (1 + 1,24 c_m) \quad \text{in } W / (m^2 \cdot K) \quad 4.2.9$$

2. Nach Eichelberg [92]:

$$\alpha(\varphi) = 0,00779 \cdot c_m^{0,33} (T \cdot p)^{0,5} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad 4.2.10$$

3. Nach Hohenberg [93]:

$$\alpha(\varphi) = 130 v^{-0,06} \cdot p^{0,8} \cdot T^{0,4} \quad \text{in } W/(m^2 \cdot K) \quad 4.2.11$$

Die empirischen Ansätze für den Wärmeübergang wurden mit experimentellen Untersuchungen durch die Verfasser abgesichert und validiert.

Hohenberg hat seine Untersuchungen auch an kleineren drallarmen Dieselmotoren vorgenommen, während Eichelberg an nicht aufgeladenen hubraumstarken Zweitaktmotoren arbeitete. Nusselt hat seine Gleichungen auf der Grundlage von Experimenten an Explosionsgefäßen aufgestellt. Die neuesten Ansätze für den Wandwärmeübergang von Bargende sind für Motoren mit hohen Drall- und Tumbelzahlen (moderne PKW-/ Dieselmotoren) erstellt und haben eine Vielzahl von Parametern, die nicht geschlossen hergeleitet werden können und durch einzelne Messungen abgesichert werden sollten. Auf Grund der Art der experimentellen Validierung der Modelle für den Wandwärmeübergang bietet sich für den vorliegenden Anwendungsfall die **Gleichung 4.2.11** nach Hohenberg an.

Der in der Massenbilanz verwendete Parameter Brennstoffkonstante BK entspricht dem Rauchgewicht, das sich aus der Summe aller Gasmengen - einschließlich Stickstoff - ergibt, die bei der Verbrennung einer Einheit Kraftstoff entstehen. Die Berechnung erfolgt für jeden zu untersuchenden Kraftstoff nach Sadowski [41] unter Berücksichtigung der atomaren Zusammensetzung (Elementaranalyse des Kraftstoffes); **Gleichung 4.2.12**,

$$BK = K[1,963 + 0,804\rho + 2,858\xi + 1,256v + 4,722\sigma] \quad 4.2.12$$

mit

$$K = 1,85345c \quad 4.2.11a$$

$$\rho = \frac{5,95734 h + 0,666 w}{c} \quad 4.2.11b$$

$$\xi = 0,37461 \frac{s}{c} \quad 4.2.11c$$

$$v = 0,426491 \frac{h}{c} \quad 4.2.11d$$

$$\sigma = 1 + \frac{2,97867h + 0,37461s - 0,375312o}{c} \quad 4.2.11e$$

Hierbei stellt c den Kohlenstoffgehalt, h den Wasserstoffgehalt, s den Schwefelgehalt, o den Sauerstoffgehalt und w den Wassergehalt des Kraftstoffes dar.

Die differenzielle **Gleichung 4.2.7** wird in eine messwertäquivalente Differenzengleichung überführt. Nach Eingabe der entsprechenden kurbelwinkelbezogenen Messwerte sowie der Berechnung der partiellen Ableitungen der inneren Energie wird die zwischen zwei Messpunkten (Winkelschritte) umgesetzte Kraftstoffmenge bestimmt.

Um die Brennfunktion (Energieumsatz) in der üblichen Form als Funktion der Wärmefreisetzung pro Zeiteinheit oder pro Winkeleinheit zu erhalten, ist es nach Erhalt der Funktion $m_U(\varphi)$ lediglich erforderlich, diese mit dem unteren Heizwert des untersuchten Kraftstoffes zu multiplizieren. Die Verwendung der Einheit $\text{kJ}/^\circ\text{KW}$ für den Energieumsatz hat den Vorteil, dass damit Heizwertunterschiede der Kraftstoffe berücksichtigt werden und die Brennfunktionen in einem Lastpunkt direkt miteinander vergleichbar sind. Abschließend erfolgt die Berechnung der mittleren Gastemperatur im Brennraum mittels des Realgasansatzes nach Zacharias [90] mit einer Polygongleichung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung (Luftanteil R), dem spezifischen Volumen, dem Zylinderdruck und der inneren Energie des Brennraumes.

Abgasmessungen

Bei den Abgasmessungen auf dem Prüfstand wurden die gasförmigen und festen Emissionen bestimmt. Die gasförmigen Emissionen werden in den einzelnen Lastpunkten unverdünnt vermessen. Als Messgerät wurde der Abgasanalysator SESAM 2 eingesetzt, der die simultane Erfassung von 24 gasförmigen Abgaskomponenten im Sekundentakt nach der FTIR-Methode (Fourier-Transformations-Infrarot-Michelson-Einstrahlinterferometer) erlaubt. Eine umfassende Beschreibung dieses optischen Messverfahrens einschließlich der Berechnung der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen ist in [76] dargestellt. Die Messung des Sauerstoffgehaltes im Abgas erfolgte über einen Oximaten.

Die Partikelemissionen sind parallel zu den gasförmigen Emissionen bei den festgelegten Laststufen mittels der Partikelmessanlage „AVL Smart Sampler“ gemessen worden. Diese Anlage ist ein Teilstromverdünnungstunnel mit konstantem Abgasteilmassenstrom im gesamten Messzeitraum (Constant-Volume-Sampling-Verfahren; CVS-Verfahren). Das Anlagenschema entsprechend EU-Richtlinie 97/68 EG basierend auf der Environmental Protection Agency (EPA)-Norm und ist in **Abbildung 4** dargestellt.

Die Partikelmessungen sind für jeden Versuchspunkt separat durchgeführt worden und bestehen aus mindestens zwei Einzelmessungen, die nicht mehr als 10 % voneinander differieren dürfen. Abgasentnahmestrom und Verdünnungsluftstrom waren so gewählt worden, dass die Abgase ausreichend mit Luft verdünnt wurden, um die Kondensation von Wasser auszuschließen (Verdünnungsluftverhältnis 8). Die Entnahmezeit war aus Erfahrung

Teilstromverdünnungstunnel

The diagram illustrates a partial flow dilution tunnel system. At the top, a **Motor** drives a **Bremse** (brake) and a **Kraftstoffverbrauchsmessung und Verbrennungsluftmessung** (fuel consumption and combustion air measurement) unit. The **Abgas** (exhaust gas) from the engine is drawn into a **beheizte Entnahmeleitung max. Länge 1m** (heated extraction duct, max. length 1m). This duct leads into the **Verdünnungstunnel** (dilution tunnel), which is shown as a red horizontal tube. The dilution tunnel is surrounded by **Verdünnungsluft Konditionierung** (dilution air conditioning) and **Verdünnungsluft** (dilution air) at **25°C**. The flow rate of the dilution air is measured by a **Durchflussmassenmesser und Regler** (flow mass meter and controller). The **Abgas** flow rate is labeled **G_{SAM}**. The dilution tunnel leads to a **Partikelfilter** (particulate filter) and a **MP** (manifold pressure) sensor. The temperature at the filter is **51,7°C**. The total flow rate is labeled **G_{TOT}**. The system is controlled by a **Pumpe** (pump) and a **Regler** (controller) connected to a **Durchflussmassenmesser** (flow mass meter).

4.3 Versuchsziele, Messverfahren und Auswertemethoden in der Dauerlauferprobung (Feldtest)

Feldtests können direkt beim Motorenhersteller oder unter günstigen Bedingungen bei ausgewählten Motorenbetreibern vorgenommen werden. Die Feldtests beim Hersteller haben den Vorteil, dass ein schneller direkter Rückfluss von Erkenntnissen in die Konstruktionsabteilungen gesichert ist. Nachteilig sind bei diesen herstellernahen Untersuchungen die hohen Kosten, die allein vom Hersteller zu tragen sind, da die Motoren in ihren typischen Anwendungen betrieben werden, deren Arbeit aber in der Regel nicht ökonomisch verwertbar ist (Betrieb im Testgelände). Die Feldtests bei den Betreibern (Feldtest in der Praxis) haben den Vorteil, dass die Motoren in ihren typischen Anwendungen in die Produktion eingebunden sind und ökonomisch genutzt werden. Nachteilig ist hier die

indirekte Rückkopplung bei Problemen und Störungen. Die Dauerlauferprobung, die der vorliegenden Arbeit als Datenbasis dient, erfolgte mit Motoren im Rapsölbetrieb, die hauptsächlich in Traktoren eingesetzt waren (vereinzelt in Häckslern u.ä.). Die Tests fanden bei den Motorenbetreibern statt, um die Kosten gering zu halten, da sich die Motorenhersteller nicht finanziell beteiligten. Im Zeitraum April 2001 bis September 2005 wurden 107 Motoren im Rapsölbetrieb erprobt und wissenschaftlich begleitet. Folgende wissenschaftliche Versuchsziele wurden mit den Dauerlaufuntersuchungen (Feldtests) und deren Auswertung verfolgt:

1. Über einen Zeitraum von ca. 2.400 Stunden sollte das Leistungsverhalten der Motoren im Rapsöleinsatz beurteilt werden. Motoren im Betrieb mit Rapsöl sollten die gleichen Leistungsparameter im Vergleich zum Dieselmotorbetrieb erbringen. Mindestens einmal pro Jahr (spätestens nach 800 Betriebsstunden) wurden die Motoren einer Leistungsvermessung unterzogen, um ihr Leistungsverhalten zu beurteilen. Die Motoren verblieben dabei in ihren Einsatzmaschinen (Traktoren), die Leistung wurde nach dem Getriebe ausgekoppelt und gemessen. Weiterhin bestand das Teilziel, bei Typengleichheit der Ausgangsmotoren die verschiedenen Umrüstkonzeppte in ihrer Leistungsentwicklung untereinander zu vergleichen. Die auf die Ausgangsmessungen bezogenen Leistungsmessungen über die Laufzeit des Vorhabens erlaubten es, Veränderungen an den Motoren und deren Komponenten zu erkennen. Dazu gehören zum Beispiel sich zusetzende Kraftstoffsysteme, starke Ablagerungen in den Gaskanälen oder verändernde Einspritzmengen.
2. Daneben sollte das Abgasemissionsverhalten der Motoren im Rapsöleinsatz ebenfalls über einen Zeitraum von ca. 2.400 Stunden beurteilt werden. Dabei sollten Veränderungen innerhalb der Motorenlaufzeit festgestellt werden. Hierzu wurden die Motorenabgase bei den regelmäßigen Leistungsmessungen bezüglich ihrer gasförmigen und festen Bestandteile (Abgastrübung) analysiert.
3. Auftretende Störungen und Fehler an den Motoren im Rapsölbetrieb sollten erfasst, systematisiert und bewertet werden. Mögliche Ursachen für die Fehler sollten aufgezeigt und praktische Gegenmaßnahmen vorgeschlagen werden.
4. Die notwendige Qualität des Motorenschmieröls, das heißt die Einhaltung von Anforderungen der Motorhersteller an das Schmieröl, sollte über dessen Wechselintervall in Rapsölmotoren erfasst und gesichert werden. Um eine ausreichende Schmierung der Motoren zu sichern, sollte das Schmieröl bestimmte Qualitätsanforderungen während des Einsatzzeitraumes erfüllen. Durch den Eintrag von Kraftstoff (Rapsöl) und Ruß in das

Schmieröl werden wichtige Schmierölparameter verschlechtert. Für den Betrieb von Rapsölmotoren gab es bisher keine gesicherten Ölwechselintervalle. Auf der Basis sehr regelmäßiger Analysen des Schmieröles sollte daher festgelegt werden können, wann die Schmieröle gewechselt werden müssen, wenn die Schmierölparameter ihre zulässigen Grenzwerte erreichen. Ziel der Arbeiten war es weiterhin, Zusammenhänge zwischen Motorbetriebsparametern (Einsatzstrategien) und Ölwechselintervallen voraussagen zu können, um bei guten Einsatzbedingungen die Ölwechselintervalle zu verlängern.

5. Die Qualität des Rapsöles sollte für den Einsatz in Motoren quantifiziert werden. Da es im Herbst 2000 zu Beginn der Arbeiten noch keine Norm für Rapsöl als Kraftstoff gab, sondern nur den „RK-Qualitätsstandard Mai 2000“, war es eine wichtige Aufgabe im Feldtest, die Rapsölqualität zu überwachen. Für das Projekt wurde Rapsöl aus den verschiedensten Quellen und mit unterschiedlichen Reinigungsstufen eingesetzt. Hier war eine regelmäßige Überprüfung der Rapsölqualität bei den Motorenbetreibern durch entsprechende chemische Analysen notwendig. Probleme, die auf eine schlechte Rapsölqualität zurückzuführen waren, sollten so als solche erkannt und dokumentiert werden. Da die Motorenbetreiber für die Kraftstoffversorgung Eigenverbrauchstankstellen nutzten, wurde – wenn möglich – die Rapsölqualität im Lagertank direkt bei den Motorenbetreibern überwacht.

Messverfahren und Auswertungsmethoden im Feldtest:

Jeder Motor im Dauerlaufversuch wurde umfassend dokumentiert. Dabei wurden alle technischen Veränderungen, wie die Umrüstung auf den Rapsölbetrieb, technische Probleme und deren Lösung, die Leistungs- und Emissionsmessungen, die Ergebnisse der chemischen Analytik und der Schriftverkehr mit dem Betreiber sowie dem Umrüster chronologisch dokumentiert. Diese Akte umfasst auch die Dokumentation über den Basismotor vor der Anpassung an den Rapsölbetrieb. Dieser Datenbestand bildete die Grundlage für die statistischen Auswertungen der Versuche, insbesondere für die Arbeitsaufgabe „Störungen und Fehler an den Motoren im Rapsölbetrieb“.

Die Leistungsmessung der Rapsölmotoren erfolgte über die Zapfwelle der Traktoren, die dafür ausgelegt ist, die gesamte Motorleistung zu übertragen. Die Belastung der Zapfwelle erfolgte über eine Gelenkwelle durch eine luftgekühlte Wirbelstrombremse. Das zwischen Motor und Zapfwelle liegende Traktorengetriebe und weitere traktoreninterne Verbraucher verursachen jedoch Leistungsverluste. Diese können je nach Getriebeaufbau (rein mechanische Kopplung oder über Strömungswandler) bis zu 10 % der Motorleistung betragen. Daher war es notwendig, die Leistungen der neuen Motoren im Dieselmotorbetrieb

(maximal 300 Bh) über die Zapfwelle zu messen und nicht mit Motorenkatalogwerten zu arbeiten, die auf Prüfständen ohne Motorenanbauten (Getrieben usw.) ermittelten wurden.

Zur Leistungsbestimmung wurde die Volllastkennlinie der Motoren vermessen. Die Auswertung beruht auf dem Vergleich der Leistungsmessung vor und nach der Umrüstung sowie auf dem Vergleich mit den Wiederholungsmessungen über den Beobachtungszeitraum 2001 bis 2005. Die Vermessung im Dieselmotorbetrieb vor der Umrüstung wird als Ausgangskurve verwendet. Die so bestimmte Nennleistung (bei Nenndrehzahl) wird als Referenzwert (100 %) gesetzt. Alle danach gemessenen Leistungswerte werden darauf bezogen.

Die Abgasanalytik bezüglich der Stickoxide, des Kohlenmonoxids und des Restsauerstoffs wurde mit dem Messgerät MSI 5600 und dessen Gaskonditionierung MC 600 durchgeführt. Dieses Messgerät arbeitet auf der Basis von elektrochemischen Analysatoren für die einzelnen Komponenten. Die Abgasschwärzung (Filter Smoke Number [FSN]) wurde mit dem Rauchwertmessgerät 415 S der AVL und die Abgastemperatur mit einem NiCrNi-Thermoelement erfasst. Die Abgasentnahmesonde und der Temperaturfühler wurden direkt im Abgasstrom nach dem Hauptschalldämpfer im Auspuff installiert. Dieser Montageort erlaubte eine im Feldtest notwendige schnelle Anbringung der Messsonden. Der Transfer der Abgase zu den Messgeräten erfolgte durch eine beheizte Saugleitung bei einer Betriebstemperatur von 180° Celsius.

Gemessen wurden die Emissionen im stationären Betrieb der Motoren entlang der „Generatorkennlinie“ bei Nenndrehzahl der Motoren. Die zum Zeitpunkt der Vermessung erzielbare Volllast wurde vor den Abgasmessungen bestimmt (als Teil der Volllastkennlinie) und als Basis für die Berechnung der Teillastpunkte verwendet. Neben der Volllast und der Nulllast wurden drei Teillastpunkte (Viertel-, Halb-, Dreiviertellast) vermessen. Die Motoren wurden vor den Versuchen bei Mittellast warmgefahren, d. h. auch bei geringen Motorleistungen waren die Betriebsstoffe (Kraftstoff, Kühlwasser, Schmieröl) auf optimalen Betriebstemperaturen. Bestimmt wurden bei den Emissionsmessungen die Abgaskomponenten und Abgasparameter:

- CO, • NO, • O₂, • FSN (Filter Smoke Number), • Abgastemperatur.

Die Auswertung beruht auf dem Vergleich der Abgasemissionen vor und nach der Umrüstung sowie auf dem Vergleich mit den Wiederholungsmessungen im Beobachtungszeitraum 2001 bis 2005. Als Referenz dient auch hier die Vermessung im Dieselmotorbetrieb vor der Umrüstung, mit der die Besonderheiten der einzelnen Motoren erfasst werden konnten. Die Umrechnung der Abgasemissionen auf einen normierten Restsauerstoffgehalt von fünf Volumenprozenten ermöglicht den Vergleich der Motoren in den gleichen Laststufen (0 bis 100 %). Die

Umrechnung auf die für Motoren übliche Einheit Gramm je Kilowattstunde war bei der Feldvermessung nicht möglich, da der Verbrennungsluftmassenstrom nicht genau genug bestimmt werden konnte. Mit diese Verfahren können das Emissionsverhalten der verschiedenen Motoren über die Laufzeit und das der unterschiedlichen Umrüstkonzepte miteinander verglichen und bewertet werden.

Bei den vertieften Emissionsmessungen von fünf Motoren innerhalb des Dauerlauftests im Maschinenlabor der Universität Rostock kamen die gleichen Messgeräte und Ausrüstungen wie bei den Labortests zum Einsatz, siehe Kapitel 4.2.

Zur Kontrolle und Bewertung der Qualität des Motorenschmieröles wurden die wichtigen Parameter, die in **Tabelle 4.3.1** mit ihren Prüfmethoden aufgestellt sind, bestimmt. Gleichzeitig dienten die kontinuierlichen Analysen während der Projektlaufzeit dem Schutz der Motoren vor einer Schmierölpolymerisationsgefahr beim Betrieb mit Rapsöl.

Da es für die Ölwechsel im Rapsölbetrieb keine gesicherten betriebsstundenabhängigen Schmierölwechselintervalle gibt, wurden diese auf Basis der Ölanalysen durchgeführt. Bei der Grenzwertfestlegung der Schmierölparameter für die Motoren im Rapsölbetrieb wurden die bis dahin (2001) einzigen veröffentlichten Empfehlungen eines Motorenherstellers (Deutz AG TR 0199-99-1199, 3. Austausch) für den RME-Betrieb berücksichtigt. Der Grenzwert für den Rapsölgehalt im Schmieröl wurde nach Erfahrungen der Universität Rostock mit dem Rapsölbetrieb am Prüfstand festgelegt.

Bei Überschreitung folgender Grenzwerte wurde im Feldtest ein Ölwechsel durchgeführt:

- Rußgehalt Der Rußgehalt sollte maximal 3,0 Masseprozent betragen.
- Total Base Number (TBN) Die Verringerung der TBN darf maximal 50 % der Frischölbasenzahl betragen.
- Viskosität: Die Änderung der Viskosität bei 100° C darf maximal eine SAE Klasse betragen.
- Rapsölgehalt Der Rapsölgehalt sollte maximal 30 Masseprozent betragen, bestimmt mittels Verseifungszahl. Die Verseifungszahl sollte kleiner als 50 mg KOH/g sein.

Direkt nach der Umrüstung erfolgten die Probenahme und die Analyse der Motorenschmieröle in einem Zeitintervall von jeweils 60 bis 80 Betriebsstunden, um den Zeitpunkt des notwendigen Ölwechsels für jeden Motor einzeln experimentell exakt festlegen zu können. Im Laufe des Untersuchungszeitraumes, als die Größenordnung des Ölwechselintervalls für den einzelnen Motor bekannt war, erfolgte eine zeitlich dichtere Beprobung nur in der Nähe des Ölwechselzeitpunktes. Aus der Ölanalyse zum Zeitpunkt x

wurde immer eine verbleibende Laufzeit bis zum Ölwechsel bestimmt, die dem Betreiber mitgeteilt wurde. Zu diesem Zeitpunkt wurde dann das Schmieröl gewechselt und eine weitere Analyse durchgeführt, um die Vorausberechnung des Wechselintervalls zu kontrollieren und zu verbessern. Die Analysewerte der Schmieröle wurden statistisch ausgewertet, um Abhängigkeiten des Betriebsverhaltens der Motorenschmieröle vom Motorentyp, dem Umrüstkonzept, dem Einsatzspektrum des Motors oder der eingesetzten Schmierölsorte zu ermitteln.

Tabelle 4.3.1: Analyseverfahren zur Bestimmung der Schmierölparameter

Stoffwertbezeichnung	Maßeinheit	Prüfmethode
Rußgehalt	% (m/m)	DIN 51452
TBN	mg KOH/g	ISO 3771
Kinematische Viskosität	mm ² /s	DIN EN ISO 3104
Verseifungszahl	mg KOH/g	DIN 51559 T1

Die Rapsölkraftstoffe wurden bei den Betreibern in Eigenverbrauchstankstellen gelagert. Zur Beurteilung der Qualität des Kraftstoffes wurden aus diesen Tankanlagen innerhalb des Untersuchungszeitraumes 890 Lagertankproben gezogen. Hiermit wurde nicht die Qualität bei Anlieferung erfasst, sondern die Qualität, mit der der Motor betankt wird. Eventuelle Qualitätsveränderungen bei Transport und Lagerung in der Eigenverbrauchstankstelle konnten so ermittelt werden. Die Probenentnahme erfolgte als Mittelschicht- oder Zapfhahnprobe entsprechend ISO 3170 und DIN 51750 Teil 1 und 2.

Tabelle 4.3.2: Analyseverfahren zur Bestimmung der Rapsölparameter nach DIN V 51605

Parameter	Maßeinheit	Grenzwert min.	Grenzwert max.
Wassergehalt	% (m/m)		0,075
Phosphorgehalt	mg/kg		15
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0
Summe	mg/kg		20
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	5	

Die Überführung der Proben zur Analytik erfolgte gekühlt in 2 dm³ PE-Behältern bei 281 Kelvin. In der **Tabelle 4.3.2** sind die zur Beurteilung herangezogenen Grenzwerte gemäß „RK-Qualitätsstandard 05/2000“ zusammengestellt (Prüfmethode entsprechend **Tabelle 4.2.1**). Die Kennwerte (variable Größen) wurden von jeder Probe bestimmt, weitere Parameter entsprechend **Tabelle 4.2.1** bei Bedarf. Die gewonnenen Analysewerte wurden

statistisch ausgewertet, um Veränderungen über die Projektlaufzeit oder regionale Besonderheiten festzustellen.

Statistische Daten der Felduntersuchung

115 Motoren sind für die Dauerlaufuntersuchungen (Feldtest) vom 15. April 2001 bis zum 30. September 2005 untersucht worden. Auf Wunsch der Betreiber (ohne technische Notwendigkeit) wurde für acht Motoren bereits nach kurzer Zeit der Feldtest beendet, so dass im Rahmen des Feldtestes **107 Motoren** wissenschaftlich begleitet, dokumentiert und ausgewertet wurden.

Die 107 Motoren für den Dauertest stammen von verschiedenen Motorenherstellern. **Abbildung 5** zeigt, dass die Firma DEUTZ mit den Baureihen 1013 und 2013, die in der Abbildung separat aufgeführt werden, im Feldtest am stärksten vertreten ist, gefolgt von Motoren der Firmen SISU und JOHN DEERE. Diese Motorenverteilung widerspiegelt jedoch nicht die Verteilung verkaufter Motoren für die Landwirtschaft im Jahr 2001/2002. Der Leistungsbereich der 107 Motoren lag zwischen 53 kW und 306 kW, wie in **Abbildung 6** veranschaulicht wird, wobei die drei Leistungskategorien nach der Richtlinie 97/68/EG, Artikel 9 festgelegt worden sind. Somit sind innerhalb der Dauerlaufuntersuchungen vorrangig die Einsatzspektren und Besonderheiten „mittelgroßer“ Motoren repräsentiert, wie sie auch für Traktorenmotoren in Süddeutschland typisch sind.

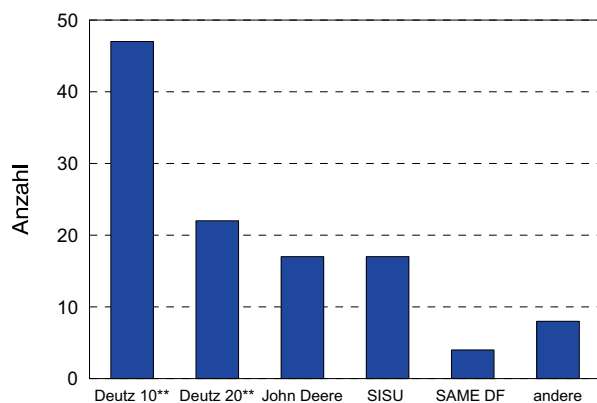


Abbildung 5: Hersteller der umgerüsteten Motoren nach [88]

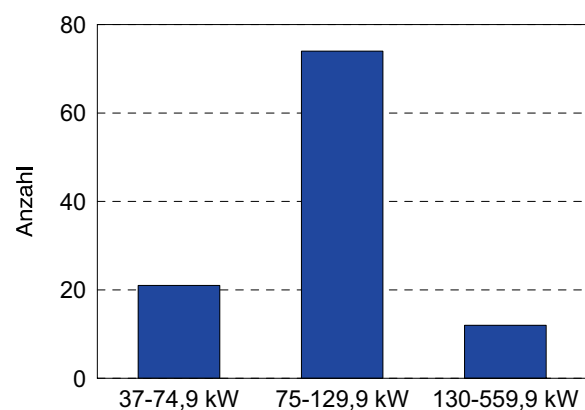


Abbildung 6: Leistungsverteilung der Motoren gem. Richtlinie 97/68/EG nach [88]

Im **Anhang 2** sind die wichtigsten Parameter der beteiligten Motoren (sortiert nach Motorentyp) zusammengestellt sowie der dazugehörige Umrüster benannt. Die Umrüstung der Motoren erfolgte durch sieben Firmen, die auch die Auswahl der Motoren bzw. deren Betreiber vorgenommen hatten. Letztere hatten die Finanzierung der Versuchsmotoren sicherzustellen. Damit hatten die Motorenhersteller selbst keinen Einfluss auf die Auswahl der beteiligten Motoren. In **Tabelle 4.3.4** ist die Summe der erreichten Betriebstunden im Rapsölbetrieb den Umrüstern zugeordnet:

Tabelle 4.3.4: Umrüster der Motoren in alphabetischer Reihenfolge

Umrüster	Anzahl der umgerüsteten Motoren	Gesamtbetriebsstunden
Gruber KG	10	29.921
IGL	1	3.368
Hausmann	32	75.034
LBAG Lüchow	5	10.606
Stangl	2	4.161
TC Bastorf	5	3.610
VWP	56	121.769

Die vorangegangene Aufstellung verweist auf besondere Randbedingungen der durchgeführten Dauerlaufuntersuchungen (Feldtest):

1. Die Umrüster unterschieden sich hinsichtlich der Anzahl der von ihnen umgerüsteten Motoren. So haben TC Bastorf, Stangl-Landtechnik und IGL-Landtechnik nur ein bis fünf Motoren umgerüstet.
2. Die Umrüster unterschieden sich auch hinsichtlich der von ihnen umgerüsteten Motorentypen. Sie hatten sich auf bestimmte Motorentypen spezialisiert. Somit kamen sieben unterschiedliche Umrüstkonzepte an unterschiedlichen Motorentypen zum Einsatz. Daraus folgt, dass eine direkte eins zu eins Vergleichbarkeit der Beständigkeit der jeweiligen Umrüstkonzepte nur begrenzt möglich ist. So wurden durch den Umrüster VWP 41 DEUTZ-Motoren der 10er-Baureihe umgerüstet. Dagegen wurden durch die Firmen Lackiererei-Karosserie-Hausmann und LBAG Lüchow vorrangig DEUTZ-Motoren der 20er-Baureihe an den Rapsölbetrieb angepasst. Die Firma Gruber KG rüstete innerhalb des Vorhabens ausschließlich SISU-Motoren der Motorbaureihen 420 und 620 um. Die Umrüster Fa. Max-Stangl-Landtechnik und IGL-Landtechnik hatten sich auf JOHN-DEERE-Motoren spezialisiert.

Die Betriebsstunden der Motoren im Dauerlauftest sind durch die Einsatzbedingungen bestimmt worden. Im **Anhang 2** sind die Betriebsstunden der einzelnen Motoren dargestellt. Aufgeführt ist auch die Anzahl der Kalendertage (**KT**), während der die Betriebsstunden erreicht wurden, was Rückschlüsse zur Einsatzdichte der Motoren zulässt. Diese lag zwischen 0,9 und 3,9 Betriebsstunden pro Tag. Die folgende Übersicht veranschaulicht die erreichten Laufzeiten der Motoren über den gesamten Projektzeitraum. Die Mehrzahl der Motoren ist im Untersuchungszeitraum mehr als 2000 h mit Rapsöl betrieben worden.

erreichte Betriebsstunden Bh	Anzahl der Motoren	Prozentualer Anteil
> 5000 Bh	2	1,87 %
4000 bis 5000 Bh	3	2,80 %
3500 bis 4000 Bh	7	6,54 %
3000 bis 3500 Bh	13	12,15 %
2500 bis 3000 Bh	13	12,15 %
2000 bis 2500 Bh	29	27,10 %
1500 bis 2000 Bh	21	19,63 %
< 1500 Bh	19	17,75 %

Bei der Umrechnung auf die jährlich erreichten Betriebsstunden der Motoren zeigt sich folgender Stand:

Betriebsstunden. pro Jahr	Anzahl der Motoren	Prozentualer Anteil
> 800 Bh	38	35,5 %
600 bis 800 Bh	29	27,1 %
400 bis 600 Bh	21	19,6 %
< 400 Bh	19	17,75 %

Es ist festzustellen, dass das Dauerlaufziel von 800 Betriebsstunden pro Jahr nur von 35% der Motoren erreicht worden ist. Die hohe Anzahl an Motoren mit Laufzeiten unter 800 Betriebsstunden pro Jahr ist mit den häufig mittelständischen Betriebsgrößen der teilnehmenden landwirtschaftlichen Betriebe zu begründen. Insgesamt sind die 107 Motoren im Rahmen des vierjährigen Projektes 250.000 Stunden mit Rapsöl betrieben worden. Das ist zusammen mit der Vielzahl von Untersuchungen und Messungen innerhalb der Erprobung eine gute und aussagekräftige Grundlage für Erkenntnisse zur Entwicklung von Motorenkonzepten und Strategien zur Nutzung von Rapsöl in Motoren.

5 Ergebnisse der Prüfstandtests und des Dauerlaufs

5.1 Eigenschaften von Rapsölen als Kraftstoff

5.1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff

Rapsöl ist ein Ester des Glycerins, dessen drei Hydroxylgruppen mit unterschiedlichen Fettsäuren verestert sind. Man nennt solche Verbindungen auch Triglyceride. Daraus folgt, dass Rapsöl im Gegensatz zum Dieselkraftstoff ein ringfreier Kohlenwasserstoff mit einer relativ einheitlichen chemischen Struktur ist. Dieselkraftstoff besteht dagegen aus Paraffinen mit Beimengungen von Olefinen, Naphthenen, 1-Kernaromaten und geringen Anteilen von Mehrkernaromaten.

Die klassischen Rapssorten vor 1970 enthielten Erucasäure und Glucosinolaten. Rapssorten, die frei von diesen beiden Verbindungen sind, werden als Doppelnul-Raps (00-Raps)

bezeichnet. In **Tabelle 5.1.1** sind die Fettsäuremuster einer alten Rapsorte sowie einer modernen, für die menschliche Ernährung geeigneten Sorte, dargestellt. Das Fettsäuremuster innerhalb ein und derselben Sorte kann mit dem Erntejahr und dem Anbaugebiet der jeweiligen Ölpflanze mit geringer Streuung variieren [60; 61]. Raps wird zurzeit in Mitteleuropa nur als 00-Raps angebaut, während in Osteuropa für technische Zwecke auch noch 0-Raps angebaut wird, der noch Glucosinolate enthält aber auch keine Erucasäure.

In den Untersuchungen wurden nur 00-Rapsöle aus 00-Raps eingesetzt, da diese den Markt in Deutschland beherrschen. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass bei gleichbleibend hoher Nachfrage nach Rapsöl als Energieträger spezielle Rapsorten mit hohen Erträgen, gutem Kälteverhalten, aber nicht so guter Eignung für die menschliche Ernährung gezüchtet werden.

Tabelle 5.1.1: Mittlere Werte der Fettsäurezusammensetzung in Abhängigkeit v. d. Rapsorte

Struktur	Fettsäurename (Handelsname)	Raps alte Sorte	00-Raps moderne Sorte
C 16:0	Palmitinsäure	2,5 % (m/m)	4 % (m/m)
C 18:1	Ölsäure	15 % (m/m)	63 % (m/m)
C 18:2	Linolsäure	13,5 % (m/m)	20 % (m/m)
C 18:3	Linolensäure	8% (m/m)	9 % (m/m)
C 22:1	Erucasäure	48 % (m/m)	0,5 % (m/m)

Aus der chemischen Struktur ergeben sich unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften. In **Tabelle 5.1.2** sind als ein Beispiel die Eigenschaften zweier Rapsöle aus 00-Raps (vollraffiniert und kaltgepresst) und einer Dieselmotortreibstoffprobe gegenübergestellt. Man sieht hier deutliche Unterschiede zwischen beiden Kraftstoffen in fast allen Parametern, wie z.B. Viskosität, Heizwert, Schwefelgehalt, Verkokungsneigung und Flammpunkt. Die höhere Dichte und Viskosität von Rapsöl bewirkt ein schlechteres Trennverhalten im Falle von Verunreinigungen, insbesondere durch Wasser oder organische Schwebstoffe, da die Sinkgeschwindigkeit der Verunreinigungen im Vergleich zu Dieselmotortreibstoff deutlich abnimmt. Der Einsatz verbesserter Filtersysteme zur Reinigung ist daher erforderlich. Positiv ist die höhere Dichte dagegen bei der Bestimmung der zu installierenden Tankvolumina für benötigte Energiemengen.

Die höhere Viskosität (eine Zehnerpotenz) hat eine wesentlich schlechtere Pumpfähigkeit, Filtrierbarkeit und Einspritzung (siehe Kapitel 5.2) zur Folge. Durch eine Temperaturerhöhung des Rapsöles im System auf ca. 70° C wird dies üblicherweise ausgeglichen. Weiterhin werden die Einspritzsysteme angepasst.

Der massebezogene Heizwert des Rapsöles ist u. a. aufgrund des Sauerstoffgehaltes von ca. 15 % geringer als der von Dieselmotortreibstoff. Auf Grund des Wirkprinzips moderner Dieselmotortreibstoffeinspritzsysteme ist das eingespritzte Volumen maßgebend für die erzielbare

Zylinderleistung. Durch die höhere Dichte von Rapsöl und die konstanten geometrischen Verhältnisse des Einspritzsystems lässt sich das massebezogene Heizwertdefizit teilweise kompensieren. Der volumenbezogene (volumetrische) Heizwert von Rapsöl liegt nur ca. 6 % unter dem von Dieselmotorkraftstoff.

Tabelle 5.1.2: Eigenschaften von Rapsölen und Dieselmotorkraftstoff (beispielhaft)

Wert	Dimension	Norm	Dieselmotorkraftstoff	Rapsöl-raffinat	Rapsöl kalt gep.
Dichte (15 °C)	kg/m ³	DIN EN ISO 12185	835	920	919
Viskosität (40°C)	mm ² /s	DIN EN ISO 3104	2,6	35	35
Heizwert	kJ/kg	DIN 51900-1,-3	42607	37668	37013
Schwefel	mg/kg	DIN EN ISO 20846	5	3	7
Phosphor	mg/kg	DIN EN 14107	0	2	10
Flammpunkt P.M.	°C	DIN EN ISO 2719	64	232	227
Asche	% (m/m)	DIN EN ISO 6245	0,001	0,001	0,005
Wasser	mg/kg	EN ISO 12937	40	113	680
Verkokungsneigung	% m/m	EN ISO 10370	0,08 10 % DR	0,29	0,37
Oxidationsstabilität	g/m ³	für DK EN ISO 12205	5,3		
	h	Für Rapsöl DIN EN 14112		9,0	8,5
Stockpunkt	°C	DIN ISO 3016	-27	-8	-9
Siedebeginn	5 % bei °C	EN ISO 3405	148	198	167
Siedeverlauf	ml bei 250 °C	EN ISO 3405	39	2	2
Siedeverlauf	ml bei 350 °C	EN ISO 3405	96	-	-
Siedeende	95 % bei °C	EN ISO 3405	357	Crackpunkt bei 55%	Crackpunkt bei 55%
C-Gehalt	%(m/m)		85,9	76,3	77,8
H-Gehalt	%(m/m)		14,1	11,75	11,8
O-Gehalt	%(m/m)		0	11	10,4
Molmasse	g/mol		234	772	770
Gesamtverschmutzung	mg/kg	DIN EN 12662	2	2	9
Neutralisationszahl	Mg KOH/g Probe	DIN EN 14104	-	0,12	1,50

Der Schwefelgehalt von kalt gepresstem Rapsöl liegt in etwa bei 10 ppm und bei Rapsöl-Raffinat nahe an der Nachweisgrenze der üblichen ICP-Messverfahren. Damit ermöglicht

Rapsöl-Raffinat in Bezug auf den Schwefelgehalt den Einsatz modernster Abgasnachbehandlungsverfahren.

Eine Gegenüberstellung der Oxidationsstabilitäten von Rapsöl und Dieselmotorenkraftstoff ist nicht ohne weiteres möglich, da sich die jeweiligen Prüfnormen deutlich unterscheiden. Die Prüfnorm für Dieselmotorenkraftstoff (EN ISO 12205) beschreibt eine infolge von Alterung (Oxidation bei 95 °C) entstandene Masse unlöslicher Stoffe in Dieselmotorenkraftstoff, die durch einen definierten Filter zurückgehalten wird oder durch Wandanhaftung zurückbleibt. Die Prüfnorm für Rapsöl (DIN EN 14112) hingegen beschreibt eine Zeitspanne, in der es infolge von Alterung (Oxidation bei 110 °C) zu einem deutlichen Anstieg der Leitfähigkeit des beprobten Rapsöls kommt. Die unterschiedlichen chemischen Strukturen beider Stoffe lassen eine Übertragung der jeweils gültigen Prüfnorm auf den anderen Stoff nicht zu.

Langzeitlagertests haben ergeben, dass sich unter den jeweils günstigsten Lagerbedingungen die Werte zur Oxidationsstabilität des beprobten Dieselmotorenkraftstoffes sehr viel länger konstant verhalten als die von Rapsöl. Aus diesem Grund sollte Rapsöl auch unter guten Bedingungen nicht langfristig (mehrere Jahre) gelagert werden. Auf der anderen Seite ist die geringe Oxidationsstabilität Ursache für die bessere biologische Abbaubarkeit von Rapsöl verglichen mit Dieselmotorenkraftstoff. Für kalt gepresstes Rapsöl wird eine maximale Lagerdauer von einem Jahr empfohlen (von Ernte bis Ernte), während Vollraffinat unter Schutzgas bis zu zwei Jahre haltbar ist.

Der Flammpunkt des Rapsöls liegt deutlich über dem von Dieselmotorenkraftstoff, wodurch eine hohe Transport- und Lagersicherheit gegeben ist. Andererseits gibt es Probleme beim Betrieb von Standheizungen mit Rapsöl. Hier lässt sich das bei Dieselmotorenkraftstoff übliche Verfahren des Zündens an einer heißen Oberfläche nicht anwenden. Standheizungen benötigen demzufolge ein dem Siede- und Zündverhalten von Rapsöl angepasstes neues Gemischbildungsverfahren. Das Rapsöl sollte mechanisch zerstäubt werden, wozu eine entsprechende Pumpe und eine angepasste Zerstäuberdüse erforderlich sind.

Die Neutralisationszahl gilt als Maß für den Gehalt an freien Fettsäuren im Pflanzenöl und ist stark vom Raffinationsgrad und dem Alterungsgrad des Öles abhängig. Freie Fettsäuren entstehen infolge der Spaltung der Triglyceride durch Wasser im Öl (Hydrolyse) sowie auf Grund von Mikroorganismen (Lipolyse). Zu viele freie Fettsäuren greifen metallische Oberflächen an und können damit das Einspritzsystem schädigen.

Der Verkokungsrückstand gibt an, wie stark ein Kraftstoff dazu neigt, bei der Verbrennung kohlenstoffhaltige Ablagerungen zu bilden. Besonders organische Nitrate im Kraftstoff führen

zu hohen Koksrückständen. Ein hoher Anteil kurzkettiger Fettsäuren vermindert den Koksrückstand, da diese leichter flüchtig sind.

Auf Grund der unmittelbaren Wechselwirkungen zwischen Wassergehalt, Neutralisationszahl sowie der Haltbarkeit des Rapsöles ist bei der Lagerung pflanzlicher Öle grundsätzlich ein möglichst geringer Wassergehalt anzustreben. Durch die Verarbeitung von zu feuchter Ölsaate, durch feuchte Witterungsbedingungen sowie Temperaturschwankungen (Kondensation) kommt es zum Eintrag von Wasser in das pflanzliche Öl.

Phosphor kommt in Pflanzenölen in Form von Phospholipiden vor, die zur Hydratisierung (Quellung in Wasser) neigen. In Abhängigkeit von der Intensität sowie der Art und Weise der Pressung, die zur Gewinnung der pflanzlichen Öle verwandt werden, ergeben sich unterschiedliche Zerstörungen der Samenschale. Je nach Grad dieser Zerstörung gelangt mehr oder weniger Phosphor in das Öl. Eine Folge davon sind beispielsweise Kraftstofffilterverstopfungen. Außerdem wird in der Literatur [62; 64] davon berichtet, dass Phosphor zu Ablagerungen im Brennraum sowie verändertem Emissionsverhalten führen kann. Zudem weisen Oxidationskatalysatoren eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Phosphorverbindungen auf. Bei der Raffination wird der Phosphor vollständig aus dem Rapsöl entfernt.

Der Aschegehalt beschreibt den anorganischen Rückstand, der nach dem Veraschen des Kraftstoffs übrigbleibt. Er wird insbesondere durch Alkalimetalle (Natrium, Kalium und Calcium) verursacht. Ein sehr niedriger Aschegehalt ist für den Betrieb von geschlossenen Partikelfiltern zwingend erforderlich.

Die Gesamtverschmutzung ist bei destillierten Kraftstoffen ein Parameter, der den nachfolgenden Schmutzeintrag (Rost, Staub) beschreibt. Diese Kraftstoffe sind in der Regel weit vom Grenzwert gem. DIN EN 590 entfernt. Für nicht destillierte Kraftstoffe, wie kalt gepresstes Rapsöl, ist dagegen die Gesamtverschmutzung ein sehr kritischer Parameter, der durch Filtern reduziert werden kann. Für den Einsatz von kalt gepressten Rapsölen sind entsprechend größere Filterflächen vorzusehen. Man kann den Kraftstoff bereits im Lagertank sehr gut filtern, wobei hier das Problem der Erwärmung (Energiekosten) vor der Filterung besteht. Dieses Filtern verringert aber den Schmutzeintrag in die direkten Motorfilter.

Das Siedeverhalten von Rapsöl unterscheidet sich sehr deutlich von dem des Dieselmotorkraftstoffes. Dieselmotorkraftstoff hat einen fast gleichmäßigen Siedebereich von 180 °C bis 360 °C, während Rapsöl auf Grund seiner homogenen chemischen Struktur an einem Siedepunkt in die Gasphase übergeht (**Abbildung 7**). Charakteristisch für reines Rapsöl ist diesbezüglich die Tatsache, dass es bei Temperaturen ab 320 °C bzw. ab 330 °C (je nach

Rapsölart) zu Umwandlungsprozessen innerhalb der Molekülstruktur kommt. Diese Eigenschaften sind insbesondere bei der motorischen Verbrennung zu berücksichtigen. Daraus resultiert ein starker Unterschied beim Strahlzerfall im Brennraum mit all seinen Folgen für die Entflammung und Verbrennung.

Die Oberflächenspannung von Rapsöl ist deutlich größer als die von Dieseldieselkraftstoff, wie aus **Abbildung 8** hervorgeht. Durch die vergrößerte Oberflächenspannung wird wesentlich mehr Energie zur Zerstäubung des Kraftstoffes benötigt. Diese kann thermisch (Brennraumtemperatur) oder mechanisch (Einspritzstrahlimpuls) aufgebracht werden.

Die Unterschiede zwischen beiden Kraftstoffen werden nochmals deutlich, wenn man die momentan gültige Kraftstoffnorm für Dieseldieselkraftstoff DIN EN 590 (2002) und die Norm für Rapsöl als Kraftstoff V DIN 51605 (2006) vergleicht (siehe Kapitel 5.1.2)

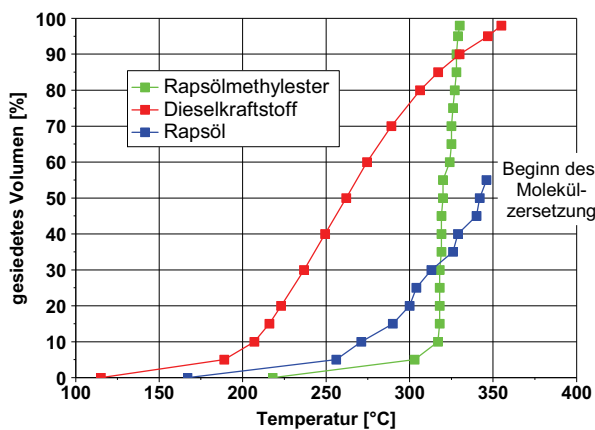


Abbildung 7: Siedeverhalten von Rapsöl, RME und Dieseldieselkraftstoff

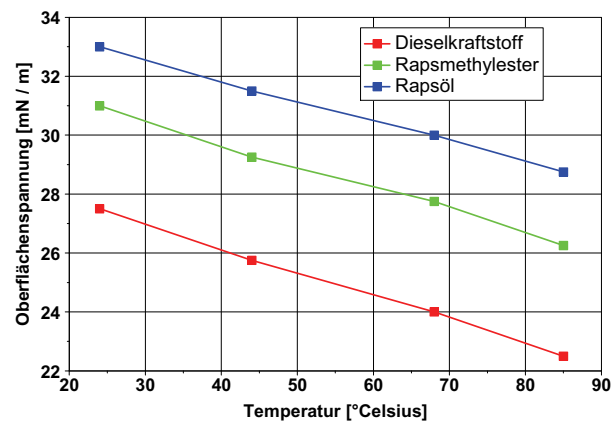


Abbildung 8: Oberflächenspannung von Rapsöl, RME u. Dieseldieselkraftstoff nach [2]

In **Tabelle 5.1.3** wurden einige temperaturabhängige Kraftstoffeigenschaften bei -10 ° und +80 °C gegenübergestellt. Dieselmotoren für den Einsatz in Mitteleuropa müssen für den Start und Betrieb bei -10 °Celsius oder darunter ausgelegt sein, d.h. sie müssen zumindest kurzzeitig Dieseldieselkraftstoff mit diesen geringen Temperaturen verarbeiten können. Rapsöl hat mit einer Temperatur von 80 °C sehr ähnliche motorische Eigenschaften insbesondere der Gemischbildung wie kalter Dieseldieselkraftstoff

bei -10 °C. Darin besteht der technische Hintergrund, weshalb viele Dieselmotoren kurzzeitig mit Rapsöl betrieben werden können.

Rapsöl mit seinen Eigenschaften für den motorischen Betrieb stellt unter den Pflanzenölen in Mitteleuropa einen guten Kompromiss zwischen Kälteverhalten (Stockpunkt, Viskosität) und Oxidationsstabilität (Lagerfähigkeit, Verlackungen) dar und wird auch daher als wichtigster potentieller Kraftstoff aus Ölpflanzen gesehen. Die Verbesserung des Kälteverhaltens wäre durch den Einsatz von Pflanzenölen mit mehr Doppelbindungen möglich, hätte aber die drastische Verringerung der Lagerfähigkeit zur Folge. Nach Widmann [61] vermindert eine

Doppelbindung zwischen den Kohlenstoffatomen der Fettsäurekette die Oxidationsstabilität um den Faktor 20, zwei Doppelbindungen um den Faktor 200 und drei um den Faktor 1000. Mit mehr Doppelbindungen steigt gleichzeitig die Gefahr der Polymerisation des Rapsöles im Motorenöl, weil dafür ebenfalls reaktive Doppelbindungen verantwortlich sind.

Tabelle 5.1.3: temperaturabhängige Kraftstoffeigenschaften

Wert	Dimension	Dieselmotorkraftstoff bei -10 °C	Rapsölraffinat bei 80 °C
Dichte	kg/m ³	0,8542	0,874
Viskosität (40 °C)	mm ² /s	9,35	11,4
Oberflächenspannung	mN/m	32	30

5.1.2 Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff

Definierte Qualitäten von Kraftstoffen sind notwendiger Stand der Technik und stellen eine wesentliche Voraussetzung dar, die zeitgemäße Arbeitsteilung und Zusammenarbeit zwischen Kraftstoffproduzenten, Kraftstoffvertrieb, Motorenentwicklern, Motorenherstellern und Motorenbetreibern (Nutzern) zu ermöglichen.

Auf Grund der besonderen Klima- sowie Bodenverhältnisse in Mitteleuropa wird in Deutschland insbesondere Rapsöl der 00-Züchtung (00-Raps) als Pflanze zur Energiegewinnung angebaut. Wie in Kapitel 5.1.1 erläutert, wird aus der Vielfalt der Pflanzenöle 00-Raps wegen seines Fettsäuremusters den Anforderungen für den motorischen Einsatz in Mitteleuropa am besten gerecht. Aus diesen beiden Gründen steht 00-Rapsöl im Mittelpunkt vielfältiger und umfangreicher Untersuchungen hinsichtlich seiner Eignung für den motorischen Betrieb. Seit Anfang der 90er Jahre wird an einer Qualitätsrichtlinie für Rapsöl als Kraftstoff gearbeitet. Federführend war der LTV-Arbeitskreis Dezentrale Pflanzenölgewinnung Weihenstephan, seit 2002 ist es der Arbeitsausschuss NMP 632.2 „Prüfung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Motoren“ im Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung des Normenausschusses Materialprüfung. Im Ergebnis dieser Arbeiten wurden veröffentlicht:

- im August 1996 eine Empfehlung „Vorläufiger Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff“,
- im Mai 2000 die Handlungsrichtlinie „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)“,
- im Februar 2005 die E DIN 51605,
- im März 2006 die DIN V 51605 „Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren-Rapsölkraftstoff-Anforderungen und Prüfverfahren“.

Neben dieser deutschen Vornorm gibt es auch eine österreichische Vornorm, die sich in ihren Parametern an den „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (Mai 2000)“ anlehnt.

Für die Dauerlaufuntersuchungen im Zeitraum von 2001 bis 2005 diente der „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)“ vom Mai 2000 als Richtlinie für die Beurteilung der Kraftstoffqualität. Die im Feldtest genutzten Parameter dieser Richtlinie sind in **Anhang 3** dargestellt. Dieser RK-Qualitätsstandard war im Jahr 2000 noch nicht durch umfassende Motorenversuche und Feldtests abgesichert, sondern wurde als Kompromiss zwischen den Lieferqualitäten der dezentralen Ölmühlen und den Wünschen des Umrüsters VWP insbesondere bezüglich des Phosphorgehaltes festgelegt.

Aufbauend auf diesem „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)“ vom Mai 2000 sowie den Betriebserfahrungen aus den Jahren 2001 bis 2004, insbesondere dem Feldtest, ist von den oben genannten Arbeitskreisen ein Normentwurf erarbeitet worden, der mittlerweile als Vornorm DIN V 51605 vorliegt. In dieser Vornorm (siehe **Tabelle 5.1.2.1**), die sich ausschließlich auf 00-Rapsöl bezieht, da nur mit diesem ausreichende Erfahrungen im motorischen Einsatz vorliegen, gibt es zwei Hauptgruppen von Parametern:

1. Parameter, so genannte charakteristische Eigenschaften, die in der Summe nur von Rapsöl aus 00-Rapssaaten erfüllt werden können und damit die Norm auf diese Sorte begrenzen. Diese sind vor allem die Parameter Dichte; Viskosität, Jodzahl. Diese charakteristischen Eigenschaften sind durch das Fettsäuremuster (prozentualer Anteil der einzelnen Fettsäuren wie Eruca-, Linolen-) des Rapsöles festgelegt und unterliegen nur geringen Schwankungen. Die Bestimmung des Fettsäuremusters der Öle selbst ist technisch aufwendig und teuer. Deshalb wurden in die Norm oben genannte charakteristische Parameter aufgenommen, da diese wesentlich einfacher und billiger zu bestimmen sind und in der Summe den selben Zweck erfüllen. Mit dieser Normwertefestlegung werden alle anderen Öle und Fette, für die bis jetzt keine umfangreichen Erfahrungen als Kraftstoff vorliegen, nicht durch die V DIN 51605 erfasst und als Kraftstoff einstweilen ausgeschlossen.

2. Parameter, so genannte variable Eigenschaften, die die variablen Eigenschaften des Rapsöles begrenzen und von Anbau, Ernte, Lagerung und Ölgewinnung deutlich beeinflusst werden. Diese Parameter sind wichtig für den störungsfreien Betrieb des Motors und wurden deshalb in die Norm aufgenommen. Die nachfolgenden genannten acht gehören zu dieser Gruppe:

- Wassergehalt, • Aschegehalt, • Koksrückstand, • Oxidationsstabilität,
- Phosphorgehalt, • Schwefelgehalt, • Neutralisationszahl, • Gesamtverschmutzung.

Tabelle 5.1.4: Parameter der Norm DIN V 51605 Stand Juni 2006

Parameter	Maßeinheit	Prüfverfahren	Grenzwert min.	Grenzwert max.
Visuelle Begutachtung			Frei von sichtbaren Verunreinigungen und Sedimenten sowie freiem Wasser	
Dichte	kg/m ³	DIN EN ISO 12185 o. DIN EN ISO 3675	900	930
Flammpunkt	°C	DIN EN ISO 2719	220	
Kinematische Viskosität	mm ² /s	DIN EN ISO 3104		38
Heizwert	kJ/kg	DIN 51900-3	35000	
Zündwilligkeit		berechnet	39	
Koksrückstand	% (m/m)	DIN EN ISO 10370		0,4
Jodzahl	g/100 g	DIN 53241-1	100	120
Schwefelgehalt	mg/kg	DIN EN ISO 20884		20
Gesamtverschmutzung	mg/kg	DIN EN 12662		25
Säurezahl	mg KOH/g	DIN EN 14104		2,0
Oxidationsstabilität	h	IDIN EN 144112	6	
Phosphorgehalt*	mg/kg	DIN EN 14107		15
Calcium- / Magnesiumgehalt	mg/kg	DIN EN 14538		20
Aschegehalt	% (m/m)	DIN EN ISO 6245		0,01
Wassergehalt	mg/kg	EN ISO 12937		0,075

5.1.3 Qualität der Rapsöle im Dauerlauftest

Mit der Einführung eines neuen Kraftstoffes besteht immer die Fragestellung – unabhängig vom Vorhandensein einer DIN-Norm – ob preiswerter Kraftstoff in entsprechender Qualität und ausreichender Menge für eine marktübliche Anzahl von Motoren vorhanden ist. Die Qualität der Rapsölkraftstoffe im Test wurde dementsprechend bewertet. Als Vergleichsbasis diente der in Kapitel 5.1.2 erläuterte „RK-Qualitätsstandard 05/2000“.

1152 Rapsölkraftstoffproben, davon 1084 kaltgepresste Öle und 68 Proben Raffinate, sind in den vier Jahren des Feldtests untersucht worden.

Für die Beurteilung der Rapsölqualität für den motorischen Einsatz ist es wichtig, die Probe möglichst nah am Motor z. B. Fahrzeugtank und nicht bei der Ölmühle zu entnehmen. Die Kraftstoffnormen – auch für Dieselmotorkraftstoff – beziehen sich meist auf den Lieferzustand d. h. beim Betanken des Fahrzeugtanks oder bei der Anlieferung zur Eigenverbrauchstankstelle. Daher sind in der vorliegenden Forschungsarbeit hauptsächlich Proben aus den Lagertanks

entnommen worden, um Aussagen über den Anlieferungszustand zu erhalten und die Betreiber verlässlich über ihre Bezugsqualitäten zu informieren, da sie für die qualitätsgerechte Beschaffung der Rapsölkraftstoffe verantwortlich waren. Die Motorenbetreiber in der Landwirtschaft waren in der Regel nicht darauf eingerichtet, direkte Lieferproben zu ziehen. Dies ist im DK-Betrieb mit seinem zentralen Kraftstoffqualitätsmanagement und Qualitätsreserven auch nicht üblich. Zusätzliche Beprobungen und Analysen wurden mit den in **Tabelle 5.1.5** aufgeführten Zielstellungen durchgeführt.

Die 1152 untersuchten Rapsölkraftstoffproben setzen sich wie folgt zusammen:

- 890 Lagertankproben,
- 63 Motorentankproben,
- 199 Sonderproben (Lagertanksumpfproben, Lieferantenproben usw.).

Tabelle 5.1.5: Probenahme nach ISO 3170, DIN 51750 Teil 1 und 2

Art der Probenahme	Beprobungsziel
Lagertankprobe (Zapfhahn- oder Mittelschichtprobe)	Kontrolle der Lieferqualität; Kontrolle der Qualität für das Betanken der Motoren
Lagertankprobe Bodenprobe	Kontrolle der Lagertanksauberkeit (Reinigungsintervalle der Lagertanks)
Motorentankprobe (Mittelschicht- oder Bodenprobe)	Nachweis unzulässiger Beimischungen (DK) und Motorentanksauberkeit
Lieferprobe Lieferstrom- oder Mittelschichtprobe	Kontrolle der Lieferqualität (Reklamation und Wechsel der Ölmühle)

Die statistischen Auswertungen zur Rapsölqualität basieren auf den 890 Lagertankproben, die als Mittelschicht- oder Zapfhahnprobe gezogen worden waren. Als Referenz für diese Proben sind die Qualitätsparameter des Lieferstandards (s. 5.1.2.) verwendet worden.

Es ist zusammenfassend festzustellen, dass von den 890 Lagertankproben nur 335 dem RK-Qualitätsstandard entsprachen; dies sind knapp 40 %. Der hohe Anteil von Kraftstoffen, die nicht den vereinbarten Lieferbedingungen entsprachen, ist über den gesamten Beobachtungszeitraum fast konstant, wie auch **Abbildung 9** verdeutlicht. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind ebenfalls gering. Mit Verwendung der neuen Ernte im September nimmt die Qualität für das 4. Quartal geringfügig zu.

Die schlechte Qualität ist von den Motorenbetreibern allerdings nicht deutlich wahrgenommen worden. Eine Umfrage im Dezember 2004 ergab, dass 76 % der Motorenbetreiber keine Schwierigkeit darin sahen, normgerechten Kraftstoff zu erwerben. Von der schlechten Rapsölqualität waren fast alle Motoren betroffen. Nur zwei der 107 Motoren sind durchgängig mit normgerechten Kraftstoffqualitäten betrieben worden.

Die Gesamtverschmutzung ist der Parameter mit den meisten Abweichungen (292), gefolgt von der Oxidationsstabilität mit 152 Überschreitungen und dem Wassergehalt mit 140 Grenzwertverletzungen (**Abbildung 10**).

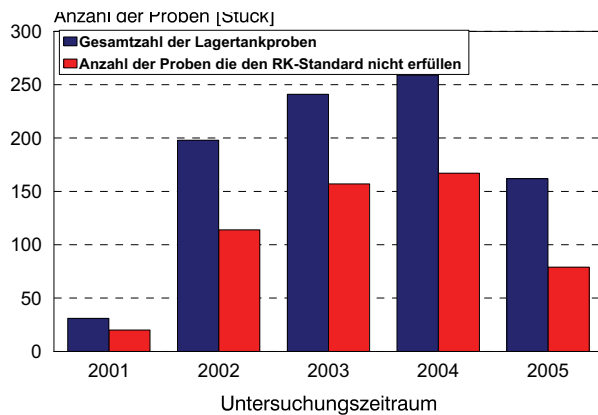


Abbildung 9: Abweichungen vom RK Standard bei Lagertankproben nach [88]

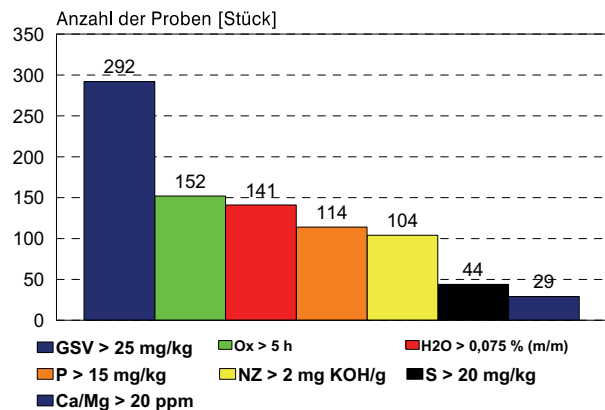


Abbildung 10: Grenzwertüberschreitungen bei einzelnen Kennwerten von allen Lagertankproben nach [88]

Die durchgeführte Informationsarbeit bei den Motorenbetreibern führte bei einzelnen Parametern der Rapsölqualität zu einer Verbesserung während der Projektlaufzeit: Die Analysewerte für Phosphorgehalt, Neutralisationszahl und Wassergehalt zeigten einen positiven Trend. Weniger als 10 % aller Proben hatten im Jahr 2004/2005 noch erhöhte P-Gehalte bzw. Neutralisationszahlen gegenüber 20 bis 30 % Grenzwertüberschreitungen zu Beginn des Feldtestes.

Die Ergebnisse der einzelnen Phosphorbestimmungen sind für alle 890 Lagertankproben und 63 Motorentankproben im **Anhang 4 (Abb. 1)** dargestellt. In den Jahren 2004/2005 gab es deutlich weniger Proben, die den Grenzwert überschritten haben, die Schwere der Abweichungen hat ebenfalls abgenommen. Die Mittelwerte der Lagertank- und Motorentankproben unterscheiden sich kaum und liegen bei 10,1 mg/kg bzw. 10,4 mg/kg Phosphor. Dies ist eindeutig ein positiver Trend.

Für die Neutralisationszahl ist ein positiver Trend im Projektzeitraum zu erkennen; siehe auch **Anhang 4 (Abb. 2)** Die größten Abweichungen gab es auch hier im Jahr 2003 mit 7 mg KOH/g. Die Unterschiede zwischen den Lager- und Motorentankproben sind nur sehr gering. Die Mittelwerte liegen bei 1,26 mg bzw. 1,24 mg KOH/g, was auf keine großen Veränderungen dieses Parameters im Fahrzeugtank beim Betrieb des Motors hinweist.

Im **Anhang 4 (Abb. 3)** ist der Wassergehalt aller Lager- und Motorentankproben dokumentiert. Die Mittelwerte der Proben liegen bei 0,063 % im Lagertank und 0,058 % im Motorentank. Auffällig ist, dass weniger Proben mit extremen Grenzwertüberschreitungen in

den Jahren 2004 - 2005 gemessen wurden, was auf eine verbesserte Lagerung und Logistik hindeutet.

Bei den Parametern Oxidationsstabilität und Gesamtverschmutzung konnte keine Verbesserung über die Laufzeit des Feldtests erzielt werden, trotz aller Informationen an die Nutzer.

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen der Oxidationsstabilität sind für alle Lager- und Motorentankproben im **Anhang 4 (Abb. 4)** dargestellt. Der Mittelwert der Lagertankproben liegt mit 6,4 h über dem Minimumgrenzwert der Norm. Die Motorentankproben liegen mit 5,1 h deutlich unter dem Minimumgrenzwert der Norm. Ursache für diese Differenz ist, dass stark thermisch beanspruchtes Rapsöl über den Kraftstoffrücklauf in den Tank zurückgepumpt wird. Die Beanspruchung besteht aus starken mechanischen Scherspannungen und einer Erhitzung an Motorenteilen. Dieser Verlust an Oxidationsstabilität im Motorentank ist unkritisch, solange der Motor ständig eingesetzt wird und das Rapsöl weniger als eine Woche im Tank ist. Kritisch ist es, wenn ein Motor mit einem Rapsöl geringer Oxidationsstabilität über diesen Zeitraum hinaus abgestellt wird und biologische Abbauprodukte während dieser Stillstandszeit entstehen. Bei Wiederinbetriebnahme setzen diese die Kraftstofffilter zu oder greifen Metalloberflächen an. Eine Verbesserung der Oxidationsstabilität über den Erprobungszeitraum war nicht festzustellen.

Die Gesamtverschmutzung ist der kritischste Qualitätsparameter bei den untersuchten Lagertankproben. Abweichungen vom Grenzwert der Gesamtverschmutzung sind in der Größenordnung von 21 % im Jahr 2002, 38 % im Jahr 2003 und 41 % im Jahr 2004 festzustellen. Nur im Jahr 2005 ging diese Zahl geringfügig auf 28 % zurück. Die Gesamtverschmutzung aller Lager- und Motorentankproben ist im **Anhang 4 (Abb. 5)** zusammengefasst. Die meisten Proben weisen zwischen 10 und 24 mg/kg Gesamtverschmutzung auf und ca. 30 % der Proben liegen über dem Grenzwert. Im Gegensatz dazu haben die meisten Proben von Dieselmotorkraftstoff, einem Destillatkraftstoff, eine Gesamtverschmutzung deutlich unter 5 mg/kg und nur wenige Proben kommen in den Bereich des Grenzwertes von 24 mg/kg. Demzufolge bewirkt die Gesamtverschmutzung deutlich stärkere Ablagerungen im Kraftstofffilter (Filterwechselintervalle) – auch bei normgerechtem Rapsölmotorkraftstoff – und einen erhöhten Verschleiß im Einspritzsystem.

Bei den 68 untersuchten Vollraffinat-Ölproben ist dagegen nur eine Grenzwertüberschreitung festgestellt worden, die auf einen stark verschmutzten Lagertank zurückzuführen war. Bei den Raffinaten ist die Gesamtverschmutzung dementsprechend unproblematisch.

Der Schwefelgehalt aller Lager- und Motorentankproben ist im **Anhang 4 (Abb. 6)** zusammengefasst. Der Grenzwert des RK-Standards Mai 2000 wird von den meisten Proben

eingehalten, während die strengeren Anforderungen der V-DIN 51605 mit 10 ppm Schwefel eine noch schonendere Pressung mit hohen Restölgehalten und eine sehr gute Reinigung erfordern.

Die Bildung von festen Ablagerungen an den brennraumumschließenden Bauteilen ist ein wesentliches Problem beim Einsatz von Kraftstoffen. Deshalb ist bei allen Kraftstoffen der Metallgehalt sehr stark begrenzt. Seit April 2004 sind von allen Rapsölproben der Calcium- und Magnesiumgehalt ermittelt worden. Während von den Motorenherstellern bzw. Umrüstern ein Grenzwert für die Summe von Ca/Mg von deutlich unter 5 ppm (vgl. DIN EN 14214) angestrebt wird, verlangen die dezentralen Ölmühlen einen höheren Grenzwert, um kostengünstig produzieren zu können. In der Norm V-DIN 51605 beträgt der Grenzwert zurzeit 20 ppm. Dieser Grenzwert wird von ca. 89 % aller Proben eingehalten (**Anhang 4 (Abb. 7)**). Der jetzige Grenzwert für den Metallgehalt ist für Motoren mit geschlossenen Partikelfiltern nicht verträglich und wird deshalb im DIN-Normungsausschuss bearbeitet werden müssen, um ihn deutlich auf ca. 1 ppm (Grenze der Messbarkeit mit bisherigen Standardverfahren) abzusenken.

Da kaltgepresste Rapsöle im Vergleich zu destillierten Kraftstoffen, wie oben erwähnt, relativ hohe Werte bei der Gesamtverschmutzung haben, kommt es zu Setzvorgängen in Lagertanks auch bei den Motorenbetreibern. Fremdstoffe, Calcium- und Phosphorverbindungen sammeln sich im Tanksumpf der Eigenverbrauchstankstellen an. Ergebnisse von Ölanalysen aus Tanksumpfproben sind im **Anhang 4 (Abb. 8 bis 11)** dargestellt. Die Abbildungen verdeutlichen, dass sich insbesondere Phosphorverbindungen und feste Fremdstoffe (Gesamtverschmutzung) im Tanksumpf anreichern. Es sind Spitzenwerte von 3,2 % Gesamtverschmutzung sowie 155 mg/kg Phosphor ermittelt worden. Das ist mehr als der zehnfache Grenzwert. Die Parameter Neutralisationszahl, Wasser und Oxidationsstabilität haben sich ebenfalls verschlechtert, aber nicht in so extremem Maße. Wird eine neue Rapsöllieferung auf eine Restölmenge mit derartigen Phosphor- und Fremdstoffgehalten aufgefüllt, führt das sofort zu Qualitätseinbußen bzw. zum Gebrauchswertverlust der neuen Charge. Zusätzlich können reaktive Zwischenprodukte im Tanksumpf die Lagerstabilität des Rapsöles extrem herabsetzen. Eine regelmäßige Kontrolle (Tanksumpfproben!) und zumindest eine jährliche Reinigung der Lagertanks sind deshalb unerlässlich. Konzepte für Rapsöltankanlagen sollten daher eine untere Ablassmöglichkeit vorsehen, die bei Dieseltanks nicht üblich sind. Die sehr günstige Einstufung des Rapsöles bezüglich der Wassergefährdung ermöglicht diese Lösung. Die verstärkte Lagertankpflege im Rapsölbetrieb bedeutet aber auch zusätzliche Kosten, die bei Dieselmotorkraftstoffbetrieb nicht anfallen.

5.2 Einspritzung, Strahlzerfall und Gemischbildung im Rapsölbetrieb

5.2.1 Kraftstoffsysteme im Rapsölbetrieb

Das Kraftstoffsystem von Dieselmotoren besteht aus einem Hochdruckteil und einem Niederdruckteil. Die Aufgabe des Niederdruckkraftstoffsystems ist die Bereitstellung von Kraftstoff an der Hochdruckeinspritzpumpe mit dem benötigten Vordruck (um Kavitation zu vermeiden), in der benötigten Menge (um die Volllast zu erreichen) und mit der benötigten Viskosität (um Einspritzpumpenschäden zu vermeiden). Des Weiteren hat das Niederdruckkraftstoffsystem die Aufgabe, nicht benötigten Kraftstoff (Leckkraftstoff, Abregelmengen der Einspritzpumpe) zum Kraftstofftank zurückzuführen.

Im Dieselmotor besteht das System meist aus dem Kraftstofftank, einer Niederdruckpumpe, einem Wasserabscheider, einem Kraftstofffilter, einem Kraftstoffkühler im Rücklauf und diversen Verbindungsleitungen. Der Kraftstoffkühler wird bei Hochdruckeinspritzsystemen mit hohen Bypassströmen benötigt.

Rapsöl besitzt – wie im Kapitel 5.1 erläutert – eine wesentlich höhere Viskosität, Siedelage und Schmierfähigkeit als Dieselkraftstoff. Daraus folgt die Notwendigkeit, die Viskosität des Rapsöls durch Vorwärmen zu verringern, wobei eine ausreichende Schmierfähigkeit sichergestellt werden sollte. Wegen seiner Polarität (Sauerstoffgehalt) besitzt Rapsöl auch bei hohen Temperaturen sehr gute Schmiereigenschaften. Die Vorwärmung wird von den meisten Umrüstungen als zentrale Aufgabe betrachtet. Als optimale Vorwärmtemperatur werden 70 °C als Erfahrungswert angegeben. Dagegen sollte die Rapsöltemperatur theoretisch vor Hochdruckpumpe bei 80 bis 90 °C liegen. Zukünftige Motorenkonzepte sollten diesen höheren Wert realisieren.

Als Energiequellen für die Vorwärmung werden das Motorkühlwasser, die Abwärme des Einspritzsystems und elektrische Energie des 12-Volt-Bordnetzes verwendet. Beispiele solcher Niederdruckkraftstoffsysteme sind in den **Abbildungen 11 und 12** dargestellt. Um die erhöhten Druckverluste in den vergrößerten Leitungen und Kraftstofffiltern auszugleichen, erhalten einige Niederdruckkraftstoffsysteme zusätzliche Kraftstoffpumpen, die über einen Elektromotor angetrieben werden. Die Nutzung von Abwärme aus den Hochdrucksystemen ist die einfachste und effizienteste Methode, das Öl anzuwärmen. Bei mechanischen PLD-Einspritzsystemen, mit der in den Motorblock integrierten Kraftstoffzufuhr, reicht diese für die Vorwärmung des Rapsöls bei betriebswarmen Motoren aus. Bei Systemen, die die Abwärme der Hochdruckpumpe ausnutzen, wird ein Regelmechanismus integriert, um die Rapsöltemperaturen auf die gewünschte Vorwärmtemperatur (70 °C) begrenzen zu können, siehe **Abbildung 13 und 14**. Diese Regelung besteht meist aus Kapillardrosseln, die bei

höheren Temperaturen (niedrigen Viskositäten) mehr Kraftstoff zum Tank oder zum Kühler fließen lassen. Da bei vielen Umrüstkonzepten auch Motorkühlwasser zur Vorwärmung des Rapsöles genutzt wird, haben die meisten der Motoren zusätzlich eine elektrische Vorwärmung des Motorkühlwassers durch netzstrombetriebene Widerstandsheizungen im Motorblock. Diese Heizleistung beträgt ca. 1000 Watt, während die elektrische Vorwärmung des Rapsöles durch das 12-Volt-Bordnetz mit 150 bis 250 Watt Leistung betrieben wird. Die Vorwärmung des Motorblocks wirkt sich sehr positiv auf das Verschleißverhalten und Betriebsverhalten des gesamten Motors aus.

Da die niedrige Viskosität des Rapsöles hauptsächlich in der Einspritzdüse zur Zerstäubung benötigt wird, hat ein Umrüster (Firma Hausmann) eine elektrische, vom Bordnetz betriebene, Düsen- oder Injektorvorwärmung entwickelt und eingesetzt **Abbildung 15**. Mit der elektrischen Vorwärmung der Einspritzdüsen (3 Minuten vor dem Start) wird erreicht, dass sofort niedrigviskoses Rapsöl eingespritzt werden kann, das dann gut zerstäubt. Die elektrische Heizleistung an der Düse wird mit zunehmender Erwärmung des Motorblocks reduziert und ist bei 70° C Kühlwassertemperatur vollständig abgeschaltet. Vorteil dieses Vorwärmungsprinzips ist eine örtlich sehr genaue Energiezufuhr, so dass die Energie der Bordbatterie ausreicht, um den Motor auch bei tiefen Temperaturen im Rapsölbetrieb sicher zu starten. Dieses Konzept ist auch bei Common-Rail-Injektoren mit ihren sehr engen Steuerbohrungen erfolgreich anwendbar, während die anderen Eintankumrüstkonzepte hier auf die Aufheizung des gesamten Motorblocks mit Strom aus dem Festnetz setzen.

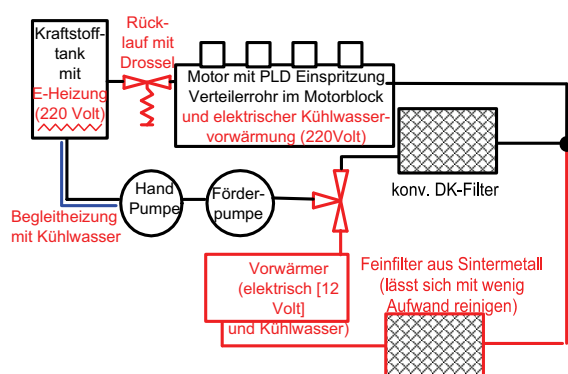


Abbildung 11: Einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung nach [88]

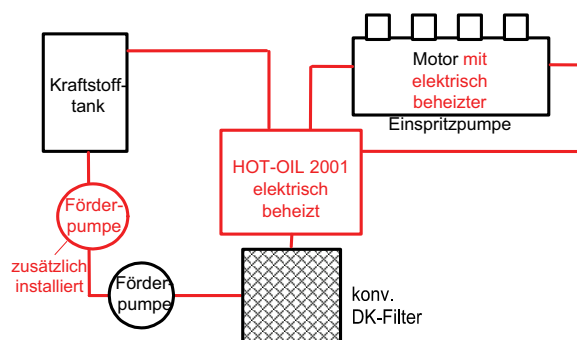


Abbildung 12: Einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung und Zusatzpumpe nach [88]

Die modernen Verteilereinspritzpumpen (Bosch VP44), die oft in den Jahren Jahre 2001 bis 2003 in Motoren eingebaut wurden, sind mit Temperaturüberwachungen für die Kraftstofftemperatur ausgerüstet. Diese begrenzt die maximale Einspritzmenge bei zu hohen Kraftstoffvorlauftemperaturen, wodurch ein Interessenkonflikt zwischen der Vorwärmung des Rapsöles auf 70 °C und der maximalen Kraftstoffvorlauftemperatur auftrat. In den

Niederdruckkraftstoffsystemen für diese Hochdruckpumpe wird daher die Vorlauftemperatur niedriger eingestellt. Dieses elektronisch geregelte nockengetriebene Hochdruckeinspritzsystem wurde in aktuellen europäischen Motoren ab dem Jahr 2006 durch Common-Rail-Systeme ersetzt. Motoren mit der Verteilereinspritzpumpe (Bosch VP44) sollten nicht mit diesen Einspritzpumpen auf den Rapsölbetrieb angepasst werden, sondern das Motorenkonzept sollte einen Einspritzpumpentausch vorsehen.

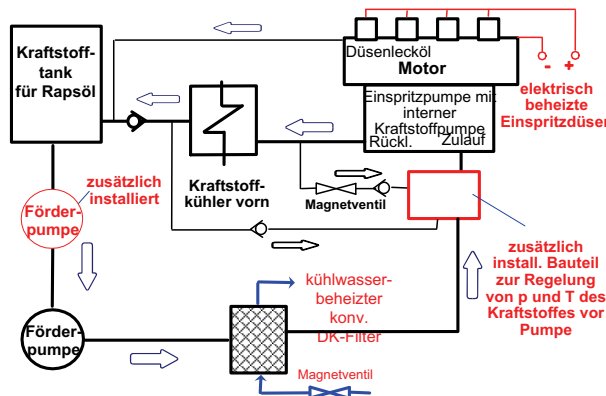


Abbildung 13: Einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung, Zusatzpumpe und Nutzung der Reibungswärme des Einspritzsystems nach [88]

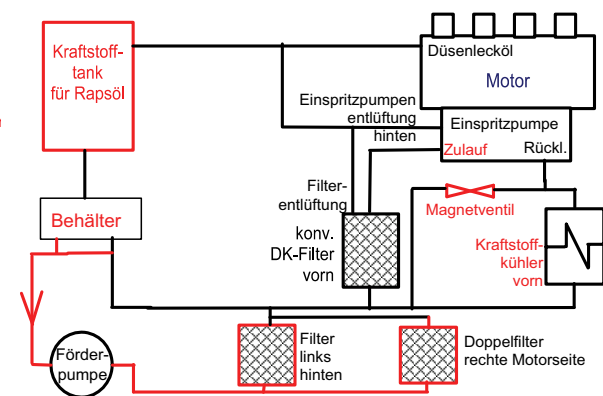


Abbildung 14: Einfaches Niederdruckkraftstoffsystem mit Vorwärmung, Zusatzpumpe, und Zusatzfiltern nach [88]

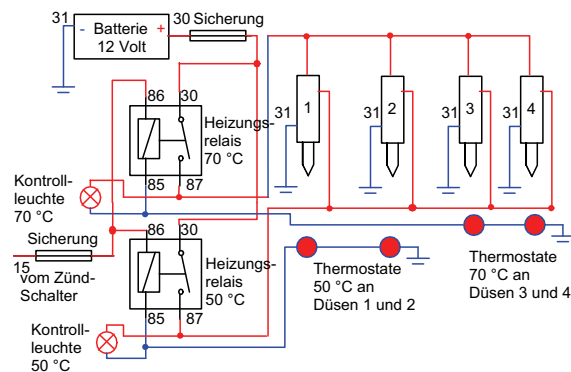


Abbildung 15: Stromversorgung für elektrisch beheizte Einspritzdüsen und Injektoren nach [88]

Um Motoren nicht mit elektrischer Energie aus dem Festnetz vorwärmen zu müssen, haben sich 2-Tank-Systeme für den Rapsöleinsatz weit verbreitet. Bei diesen wird der Dieselmotor im Niedriglastbereich und zum Starten mit Dieselmotorkraftstoff betrieben. Um zum Starten Dieselmotorkraftstoff im Hochdrucksystem zur Verfügung zu haben, werden diese Motoren kurz vor dem Abstellen ebenfalls mit Dieselmotorkraftstoff

betrieben. Dieses Zurückstellen auf den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff ist ein Nachteil dieses Betriebsregimes, da es aktiv vom Betreiber eingeleitet werden muss. Diese Umrüstsysteme besitzen daher in der Regel ein Warnsystem, das den Motorenbetreiber informiert, wenn der Motor mit Rapsöl angehalten wurde. Der betriebswarme Motor kann mit Rapsöl ohne Zusatzmaßnahmen sofort problemlos gestartet werden. Nachteilig am 2-Tank-System ist weiterhin die Unterbringung des zweiten Betriebstoftanks und dessen Füllstandsüberwachung, da Dieselmotorkraftstoff für das Starten und Stoppen benötigt wird.

Vorteile gegenüber dem Eintanksystem bestehen in der sofortigen Start- und Leistungsbereitschaft des Motors ohne langfristige Motorblockvorwärmung und in der Möglichkeit, im Niedriglastgebiet mit Dieseldieselkraftstoff zu arbeiten. Diese Umschaltung auf Dieseldieselkraftstoff bei Niedriglast verringert den Eintrag von Rapsöl in das Schmieröl deutlich und verringert auch Ablagerungen von unverbrannten Rapsölfractionen in den Gaskanälen. Weiterer Vorteil dieser 2-Tank-Technologie ist, dass keine Startschwierigkeiten an Common-Rail-Systemen auftreten, denn zum Start ist Dieseldieselkraftstoff in den Injektoren mit ihren Steuerbohrungen vorhanden und die Reinigungsadditive des Dieseldieselkraftstoffs verhindern in den langen Stillstandszeiten negative Ablagerungen.

Wie in den **Abbildungen 16 und 17** zu erkennen, sind die zentralen Bauteile der 2-Tank-Systeme die Umschaltventile. Diese können als 2- oder 3-Wegeventile ausgeführt werden und sollten möglichst nah an der Einspritzpumpe installiert sein, um die Spülmengen gering zu halten. Das Dieseldieselkraftstoffsystem wird meist sehr seriennah belassen und ein zusätzliches Kraftstoffsystem für Rapsöl mit vergrößerten Leitungen, beheizten Kraftstofffiltern und Zusatzpumpen installiert. Zur Vorwärmung des Rapsöles wird meist das Kühlwasser des Motors verwendet, das bei Betriebstemperatur mindestens eine Temperatur von 80 °C aufweist und das Rapsöl auf 70 °C vorwärmt.

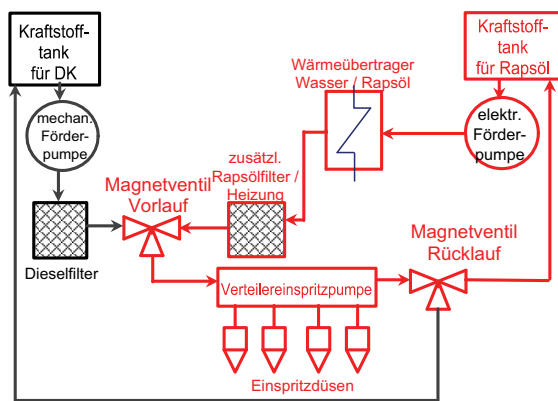


Abbildung 16: 2-Tank-System mit 3-Wegeventilen nach [88]

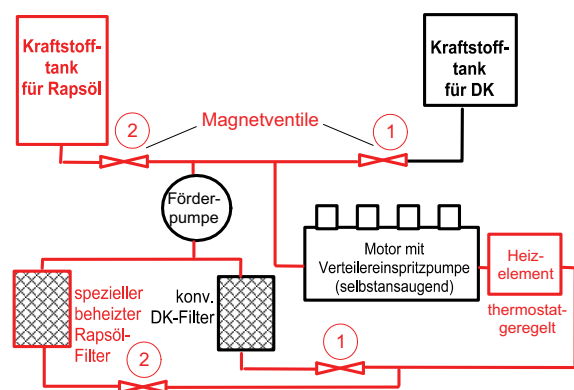


Abbildung 17: 2-Tank-System mit 2-Wegeventilen nach [88]

5.2.2 Hochdruckeinspritzsysteme und Strahlausbreitung im Rapsöleinsatz

Die zweite Komponente der Kraftstoffzufuhr zum Brennraum ist das Hochdruckeinspritzsystem. Die Hauptaufgabe des Hochdruckteils ist die zeit- und mengengenaue Einbringung des Kraftstoffes in den Brennraum mit einer hohen Strahlgeschwindigkeit. Die hohe Einspritzstrahlgeschwindigkeit bei direkteinspritzenden Dieselmotoren liefert die Energie für die Gemischbildung (Strahlzerfall) und zum Teil für die

Durchmischung mit der Verbrennungsluft. Die Energie für die Verdampfung des Kraftstoffes wird aus der verdichteten, turbulent strömenden Luft entnommen.

In Vorkammermotoren mit geringen Einspritzdrücken wird die Energie zur Gemischbildung neben der Einspritzstrahlgeschwindigkeit als thermische Energie durch die hohe Gastemperatur in der Vorkammer zur Verfügung gestellt. Als Hochdruckeinspritzsystem sind im Dieselmotor unterschiedliche Systeme im Einsatz. Sie unterscheiden sich bezüglich der Mengenregelung (mechanisch oder elektronisch), der Steuerung der Einspritzdüsenadel (druck- oder weggesteuert), der Hochdruckerzeugung (Axial- oder Radialpumpen) und der Schmierung der Hochdruckpumpe (Kraftstoff- oder Schmierölschmierung).

In neuen Motoren für Landmaschinen (ab 2006), die strengeren Abgasvorschriften unterliegen, werden keine Systeme mit rein mechanischer Regelung mehr eingesetzt. Nur Kleinstmotoren unter 18 Kilowatt mechanischer Leistung werden in Europa noch mit rein mechanischen Hochdrucksystemen (Pumpe und Regler) hergestellt. Diese Kleinstmotoren mit einem oder zwei Zylindern haben meist Steckpumpen oder kleine Verteilerpumpen und sind nicht selten noch Vorkammermotoren.

Alle Motoren, die den Abgasvorschriften ab dem Jahr 2006 unterliegen, haben elektronisch gesteuerte Einspritzsysteme. Gleichzeitig kam es in den letzten Jahren zu einer kontinuierlichen Anhebung des Einspritzdruckes, zur Erhöhung der Spritzlochanzahl und Verkleinerung der Spritzlochdurchmesser. Dies bewirkte eine deutlich verbesserte Gemischbildung, durch z. B. kleinere Tropfen und schnellere Verdampfung. Mit diesen Maßnahmen und der AGR wird im Dieselmotor die innermotorische Einhaltung der Abgasvorschriften für Motoren in landwirtschaftlichen Maschinen (in Europa Stufen Euro 1 bis 3a bzw. in den USA Stufen TIER I bis III) ermöglicht. Analoges gilt natürlich auch für PKW- und LKW-Motoren.

Für den Betrieb mit Rapsöl bewirkt diese Anhebung des Einspritzdruckes mit dem erhöhten Strahlimpuls ebenfalls eine deutliche Verbesserung der Gemischbildung. Darin ist ein wesentlicher Unterschied zu den Motoren zu erkennen, die um 1990 auf dem Markt angeboten wurden. Die damaligen direkteinspritzenden Motoren hatten meist 4-Loch-Düsen und Reiheneinspritzpumpen mit maximalen Einspritzendrücken bis 900 bar. Diese Einspritzsysteme waren nicht geeignet, hochsiedende, höherviskose Kraftstoffe so einzuspritzen, dass eine ausreichende Gemischbildung realisiert werden konnte.

Ein Wechsel der Einspritzsysteme beim Einsatz von Rapsöl an vorhandenen Motoren findet bisher nicht statt. Für die Kraftstoffzufuhr zum Brennraum werden die üblichen für den Dieselmotor entwickelten Technologien eingesetzt. Daher wird der Einfluss von

erwärmtem Rapsöl (Einspritzviskosität wie nicht vorgewärmter Dieselmotorkraftstoff) auf die Einspritzung und Gemischbildung untersucht.

Der Einspritzverzögerungszeit, d. h. der Abstand zwischen Förderbeginn der Hochdruckpumpe und dem Einspritzbeginn, verkürzt sich beim Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff. Ursache hierfür ist die geringere Kompressibilität von Pflanzenölen im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Dies wirkt sich insbesondere im Einspritzsystem mit langen Hochdruckleitungen aus, bei Pumpe-Düse-Systemen lässt sich dieser Effekt fast vernachlässigen. In den **Abbildungen 18 und 19** ist dieser Effekt an den Motoren 1 VDS 18/15 und 1 NVD 18 deutlich zu erkennen.

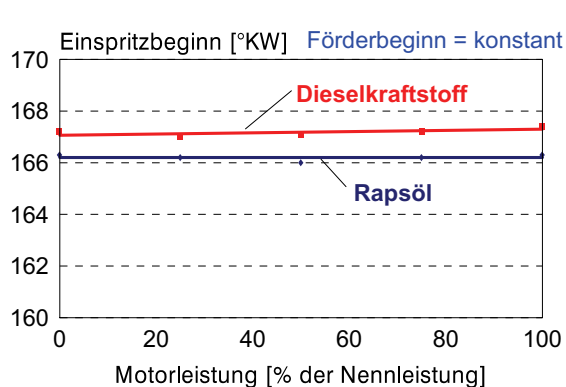


Abbildung 18: Einspritzbeginn in
Abhängigkeit von der Motorlast
Motor 1 VDS 18/15

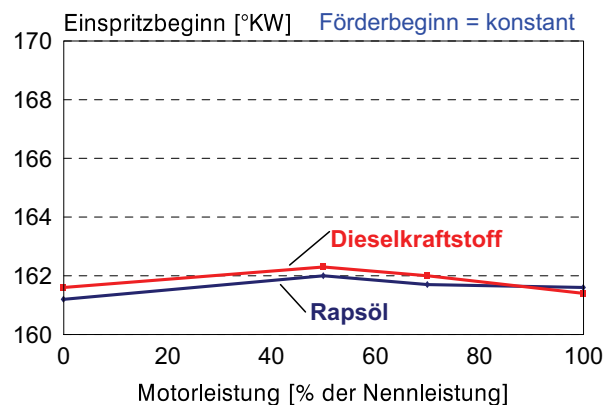


Abbildung 19: Einspritzbeginn in
Abhängigkeit von der Motorlast
Motor 1 NVD 18

Durch die geringere Kompressibilität des Rapsöles wird zum Druckaufbau in den Hochdruckleitungen der Einspritzsysteme weniger Energie benötigt als bei Dieselmotorkraftstoff. Die über den Einspritznocken eingebrachte Energie bewirkt daher einen schnellen Druckanstieg in der Düse und höhere Einspritzdrücke bei ansonsten gleichen konventionellen Einspritzsystemen, siehe auch **Abbildung 20**. Gleichzeitig kommt es zu einer Zunahme der Fördermenge in klassischennockengetriebenen Einspritzsystemen. Diese kann bei Einspritzsystemen mit hohen Volumina zwischen Hochdruckpumpe und Einspritzdüse (Reihenpumpen) bis zu zwölf Volumenprozent betragen. Damit wird unter Beachtung des geringeren volumetrischen Heizwertes bis zu 6 % mehr Energie pro Einspritzung in den Brennraum gefördert. Daraus kann eine höhere thermische und mechanische Bauteilbelastung bei Volllast resultieren. Das ist gleichzeitig die Ursache dafür, dass von einigen Motoren berichtet wird, die im Rapsölbetrieb mehr Leistung als im Dieselmotorkraftstoffbetrieb erreichen. Bei Motoren mit PD- und PLD-Systemen tritt dieser Effekt kaum auf, da die Volumina zwischen Einspritzpumpe und Düse sehr klein sind. Bei COMMON-Rail-Systemen kann dieser Effekt systembedingt nicht auftreten.

Bei dem Strahlzerfall nach der Einspritzdüse ist für erwärmtes Rapsöl, dessen Viskosität auf die von nicht vorgewärmten Dieselmotorkraftstoff eingeregelt wurde, festzustellen, dass der

Strahlkegelwinkel etwas geringer, dafür aber die Eindringtiefe etwas größer ist. Dies bedeutet, die Gemischbildung ist im Rapsölbetrieb bei gleichen Randbedingungen etwas schlechter als im Dieselkraftstoffeinsatz. Dieser unterschiedliche Strahlzerfall ist in den **Abbildungen 21 und 22** zu sehen.

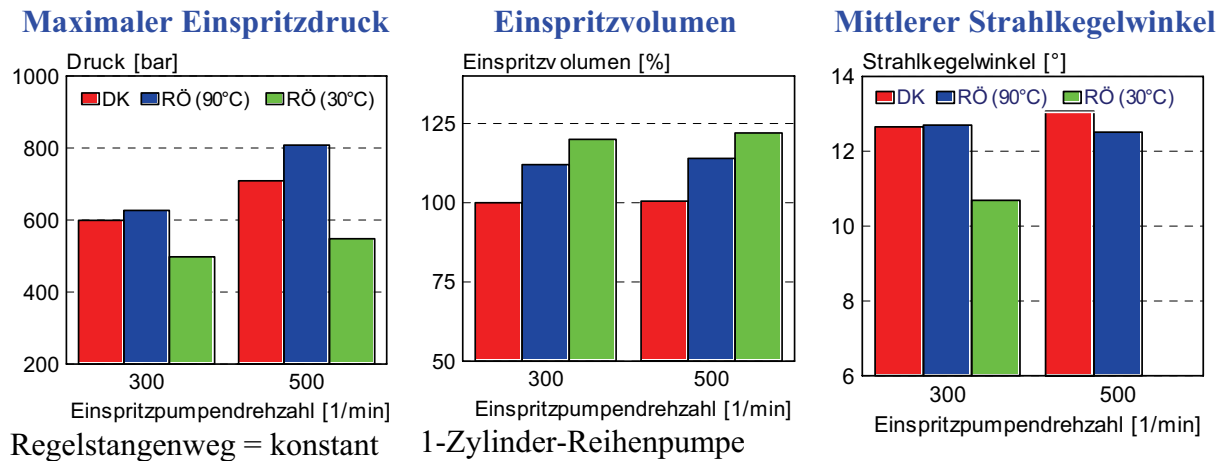


Abbildung 20: Vergleich des Einspritzdruckes und der Einspritzmenge ermittelt am Einspritzprüfstand nach [72]

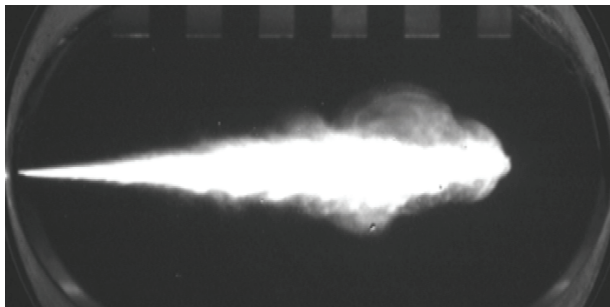


Abbildung 21: Rapsölstrahl bei $n = 500$ 1/min; 1,5 ms nach Einspritzbeginn nach [72]

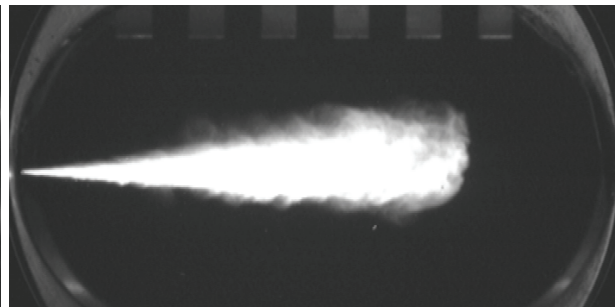


Abbildung 22: Dieselkraftstoffstrahl bei $n = 500$ 1/min; 1,5 ms nach Einspritzbeginn nach [72]

Die Unterschiede im Strahlzerfall sind bei großen Einspritzmengen und hohen Einspritzdrücken nicht so stark wirksam, dass es zu einer umfangreichen Veränderung der Verbrennung (Energieumsatz) kommt. In diesem Lastbereich kann eine einfache Applikation für den Rapsölbetrieb erfolgen (Einspritzzeitpunkt, Einspritzmenge). Im Niedriglastgebiet sind dagegen beinockengetriebenen Einspritzsystemen mit ihren geringen Einspritzdrücken deutliche Unterschiede im Strahlzerfall festzustellen, die sich deutlich auf die Verbrennung auswirken. Für Motoren, die oft im Niedriglastbereich betrieben werden, ist eine umfangreiche Applikation für den Rapsölbetrieb (Einspritzlöcheranzahl, Nockengeschwindigkeit, Einspritzzeitpunkt, Einspritzmenge) notwendig.

5.2.3 Langzeituntersuchungen von Hochdruckeinspritzsystemen im Rapsölbetrieb

In den Dauerlaufuntersuchungen sind nachfolgend aufgeführte 107 Einspritzsysteme zum Einsatz gekommen, deren Typ mit der Konstruktion des Motors prinzipiell festgelegt war und

die mit der Umrüstung bis auf eine Ausnahme nicht geändert wurden. Im Motor TRE2 ist eine Stanadyne-Verteilerpumpe gegen eine Bosch-Reihenpumpe ausgetauscht worden.

- Bosch PLD in 69 Motoren,
- Bosch Reiheneinspritzpumpe in 6 Motoren,
- Bosch Verteilerpumpe VP 44 in 12 Motoren,
- Stanadyne Verteilerpumpe in 14 Motoren,
- Lucas Verteilerpumpe in 2 Motoren,
- Sonstige Einspritzsysteme in 4 Motoren.

Die hohe Anzahl von PLD-Einspritzsystemen beruht darauf, dass dieses Einspritzsystem in den Motorenbaureihen BF 2013 und BF 1013 der Firma Deutz verbaut worden ist. Insgesamt waren 368 PLD-Einspritzpumpenelemente im Einsatz. Dieses Einspritzsystem inklusive Kraftstoffzufluss ist in den Motorblock integriert. So werden die Einspritzpumpe und der Kraftstoff vorgewärmt, sobald das Motorkühlwasser erwärmt ist. Die elektrische Vorwärmung des Motorblocks kann optimal genutzt werden. Weiterhin weist dieses Einspritzsystem sehr kurze Einspritzleitungen mit geringen Volumina auf. Aus diesen Konstruktionsmerkmalen resultieren die großen Vorteile der PLD- und PD-Systeme für den Rapsölbetrieb gegenüber Einspritzsystemen, die außen am Motor montiert sind, wie Verteilereinspritzpumpen oder Reihenpumpen.

Von den 368 PLD-Einspritzpumpenelementen sind in den vier Jahren Dauererprobung drei Elemente wegen eines Defektes ausgetauscht worden. Nur in zwei Fällen kam es zum Ende der Dauerlaufzeit nach ca. 2200 Betriebsstunden zu Störungen bzw. Schäden am Pumpenelement. Im ersten Fall war ein Pumpenstempel durch einen Gewaltbruch zerstört worden. Im zweiten Fall wurde durch ein Pumpenelement kein Einspritzdruck aufgebaut. Die Bemerkungen im Motorentagebuch und die Aussagen des Betreibers ergaben keine Klärung über vorausgegangene Filterverstopfungen und eine Kraftstoffunterversorgung der Einspritzpumpen. Diese Pumpenschäden könnten zeitversetzt mit dem Einsatz von nicht normgerechtem Kraftstoff zusammenhängen. Im Zeitraum des Demonstrationsvorhabens wurden von dem betroffenen Betreiber mehrmals Rapsölkraftstoffproben mit einer deutlich erhöhten Gesamtverschmutzung analysiert. In weiteren zwei Fällen mussten die Abdichtungen (O-Ringe) der Einzelpumpen im Motorblock gegen rapsölbeständige Dichtungen ausgetauscht werden.

Die Einspritzdüsen dieses Einspritzsystems bereiteten ebenfalls nur selten Probleme. Es hat sich im Dauerlauf bewährt, alle 1200 bis 1500 Betriebsstunden die Einspritzdüsen zu überprüfen und das vom Hersteller vorgegebene sichere Wechselintervall von 3000 Stunden einzuhalten. Damit ist das Wechselintervall dieser Düsen im Rapsölbetrieb praktisch deutlich geringer als im DK-Betrieb, wo real 5000 Betriebsstunden erreicht werden. Dieser erhöhte Verschleiß ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die erhöhte Gesamtverschmutzung des

Kraftstoffes Rapsöl siehe Kapitel 5.1.3 zurückzuführen. Ablagerungen im Innern der Einspritzorgane waren bei den Untersuchungen der Düsen und Einspritzpumpen zum Abschluss des Dauerlaufens nicht festzustellen. Zusammenfassend ist zu vermerken, dass PLD-Einspritzsysteme mit dem Kraftstoff Rapsöl störungsfrei über einen langen Zeitraum betrieben werden können.

Die klassische Reiheneinspritzpumpe mit mechanischer Regelung lief in den sechs Einsatzfällen ebenfalls anstandslos. Dieser Einspritzpumpetyp wird aber in Neukonstruktionen von Motoren nicht mehr eingesetzt.

Die Bosch Verteilerpumpe VP 44 wurde als elektronisch geregelte Verteilereinspritzpumpe entwickelt, um über ein preiswertes Hochdruckeinspritzsystem mit elektronischen Steuermöglichkeiten für Menge und Einspritzbeginn zu verfügen. Diese Pumpe ist in verschiedenen Motorentypen unterschiedlicher Hersteller im Dauereinsatz gewesen. Für dieses Einspritzsystem muss festgestellt werden, dass die Einspritzpumpe bei zu hohen Kraftstofftemperaturen, wie sie für Rapsöl von Vorteil wären, die Einspritzmenge automatisch reduziert. Weiterhin ist in dieser Verteilerpumpe der gesamte Pumpeninnenraum mit Kraftstoff gefüllt und es kommt zum konstruktiv gewollten direkten Kontakt von Rapsölkraftstoff mit der Elektronik. Dieses Einspritzsystem ist für Rapsölbetrieb nicht dauerhaft geeignet. Nach einer Betriebszeit von 200 bis 300 Stunden kommt es meist zu Leistungseinbrüchen auf Grund von Funktionsstörungen der Einspritzpumpe. Von den 14 Einspritzpumpen vom Typ VP 44 wurden im Dauerlaufversuch alle Pumpen einmal oder mehrmals ausgetauscht. Die Ursache dafür sind hauptsächlich Probleme mit der Pumpenelektronik in der Einspritzpumpe selbst. Als weitere Störquelle wurde auch der Spritzversteller mit Regelschieber ausgemacht. Seine Störanfälligkeit war auch ein Grund zum Austausch dieser Pumpenart im Betrieb mit Dieselmotoren. Innerhalb des Dauerlauftests ist es keinem Umrüster gelungen, für dieses Einspritzsystem ein dauerhaftes Umrüstkonzept zu entwickeln. Anzumerken ist hierzu, dass diese Pumpe auch im RME-Einsatz nicht problemlos lief und der Hersteller, die Robert Bosch GmbH, weder für RME noch Rapsöl eine Freigabe erteilt hat. Bei den meisten Motorenherstellern für Anwendungen in Landmaschinen ist dieses Einspritzsystem mittlerweile durch Common-Rail-Systeme abgelöst worden.

Stanadyne-Verteilerpumpen zeigten in den Umrüstkonzepten zu Beginn der Dauerlauferprobung ebenfalls mechanische Dauerfestigkeitsprobleme beim Betrieb mit Rapsöl. Von den 14 Einspritzpumpen sind bis zum Ende des Jahres 2004 nur zwei ohne Ausfall bzw. Reparatur gelaufen. Eine deutliche Optimierung der Niederdruckkraftstoffanlage

(verbesserte Druckregelung) durch den Umrüster Fa. Gruber KG, der hauptsächlich Motoren mit Stanadyne-Verteilerpumpe umrüstete, zeigte im Jahr 2005 positive Wirkungen. Danach kam es dann zu keinen nennenswerten Störungen mehr an den Stanadyne-Verteilereinspritzpumpen. Die beiden Lucas-Verteilerpumpen zeigten in ihren Umrüstungen ebenfalls Schwierigkeiten (mechanische Überbelastung von Pumpenteilen) beim Dauerbetrieb mit Rapsöl.

Die Einspritzdüsen bei den Verteilereinspritzpumpen bereiteten wenige Probleme. So hat es sich bewährt, alle 1000 bis 1400 Betriebsstunden die Einspritzdüsen zu überprüfen und das vom Hersteller vorgegebene sichere Wechselintervall von 2000 Stunden einzuhalten. Damit ist das Wechselintervall dieser Düsen im Rapsölbetrieb praktisch deutlich kürzer als im DK-Betrieb, wo real 4000 bis 5000 Betriebsstunden erreicht werden. Dieser erhöhte Verschleiß ist auch bei diesen Einspritzdüsen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die erhöhte Gesamtverschmutzung des Kraftstoffes zurückzuführen.

Vereinzelt gab es Ausfälle von Einspritzdüsen, die die Firma Hausmann mit einer Düsenheizung versehen hatte. Das Einbringen der Bohrungen in den Stahlmantel des Düsenhalters führte bei nur drei von 142 Düsen zur übermäßigen Schwächung des Materials, was das Reißen der Düsenhalter zur Folge hatte. Die defekten Düsen wurden ausgetauscht. Ihre prinzipielle Dauerhaltbarkeit haben die von der Firma Hausmann gefertigten Einspritzdüsenhalter im Dauerlauf nachgewiesen.

5.3 Energieumsetzung im Brennraum (Verbrennung)

Die Unterschiede beim Strahlzerfall zwischen Dieselkraftstoff und Rapsöl haben ihre Auswirkungen primär auf die Verbrennung. Hierzu wurden in der Vergangenheit an verschiedenen Instituten eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt [50; 46; 40; 12; 58; 66; 72]. Schlussfolgernd ist festzustellen, dass hierbei kaum Indiziermessungen in Brennräumen durchgeführt und veröffentlicht wurden. Die vorgelegten Erkenntnisse entstanden auf der Basis eigener Messungen an drei verschiedenen, für höhere Viskositäten (d. h. auch für Rapsöl) geeigneten Motoren, wie:

- 6VDS24/24 AL1,
- 1NVD18,
- 1VDS18/15.

Die technischen Daten der Motoren und die Messtechnik sind im Abschnitt 4.2 beschrieben. An den Motoren 6VDS24/24 und 1NVD18 sind die Kraftstoffe Diesel und Rapsöl roh eingesetzt worden entsprechend **Tabelle 5.1.2** Spalte 4 und 6. Am 1VDS18/15 kamen Dieselkraftstoff sowie vollraffiniertes Rapsöl (Vollraffinat) entsprechend **Tabelle 5.1.2** Spalte 4 und 5 zum Einsatz. Bei allen Versuchen wurde das Rapsöl vorgewärmt, so dass die Viskosität vor der Einspritzpumpe ca. 10 mm²/s betrug (Auslegungviskosität der drei

Einspritzsysteme). Die Testläufe wurden deshalb an verschiedenen Motoren mit unterschiedlichen Rapsölen durchgeführt, um die Einflüsse der einzelnen Motorenkonstruktionen und der Ölchargen beurteilen zu können.

Um die Verbrennungseigenschaften von Rapsöl und Dieseldieselkraftstoff an Verbrennungskennwerten zu quantifizieren, wurden die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Kennlinien und Kennzahlen während der Forschungsarbeit aus den Druckverläufen ermittelt. Für den Motor 1NVD18 (Wirbelkammermotor) sind die Brennverläufe bei verschiedenen Drehmomenten (Motorlasten) entlang der Generatorkennlinie (Nennndrehzahl) in den **Abbildungen 23 bis 26** dargestellt. Der Förderbeginn der Einspritzpumpe wurde konstant gehalten und der Motor hat keine äußere AGR. Der spätere Bennisbeginn(1 bis 2 °Grad KW)

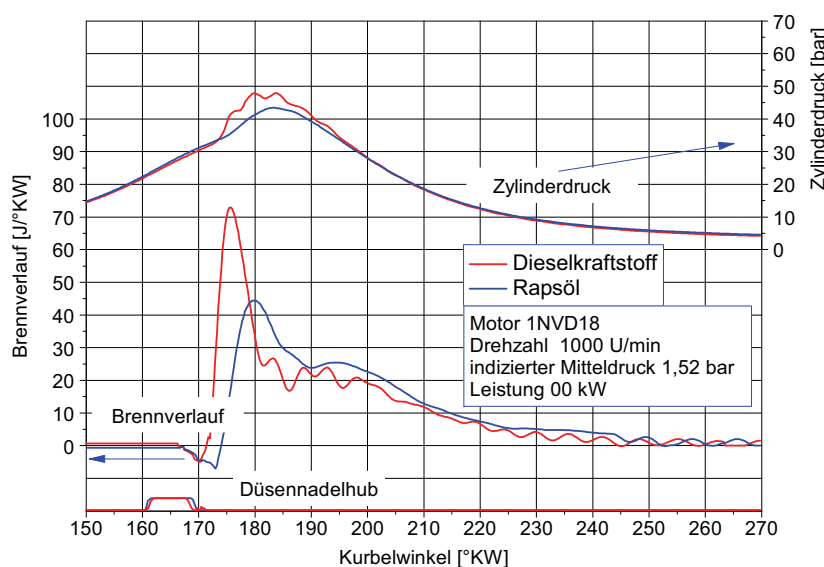


Abbildung 23: Vergleich der Brennverläufe bei Nulllast am Motor 1NVD18

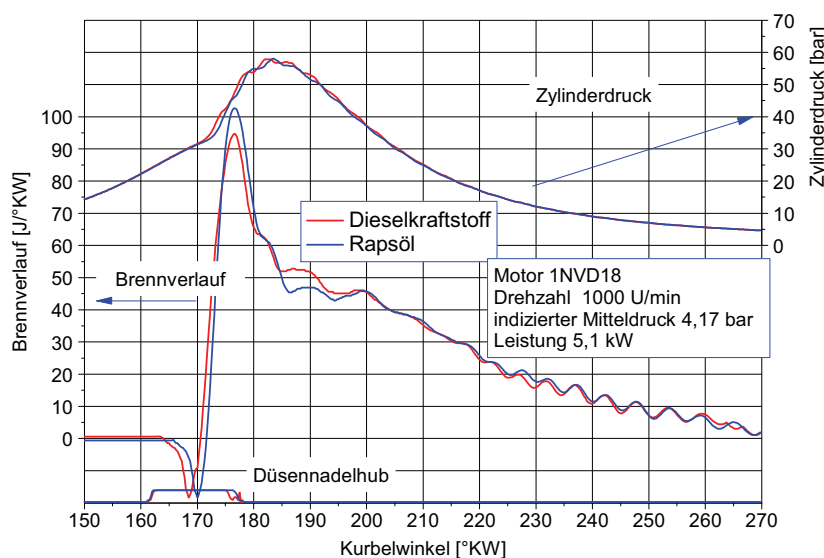


Abbildung 24: Vergleich der Brennverläufe bei Teillast am Motor 1NVD18

bei Rapsölbetrieb ist in allen Lastpunkten deutlich zu erkennen. Bei Leerlauf kommt es im Rapsölbetrieb zu einer sehr schleppenden Verbrennung mit spätem Brennende, weshalb sich hier die Energieumsetzung am deutlichsten von der Verbrennung im Dieseldieselkraftstoffbetrieb unterscheidet. Der Maximalwert

Energieumsatz liegt später (ca. 10 ° Kurbelwinkel) und erreicht nur ca. zwei Drittel des Niveaus von Dieseldieselkraftstoff. Ursache hierfür sind die relativ niedrigen Prozess-temperaturen in diesem Lastpunkt, die eine schnelle Entflammung des Rapsöles verhindern.

Bei den mittleren Lasten kommt es im Rapsölbetrieb zu einer verstärkten Ausbildung der vorgemischten Verbrennung, da in der Zündverzugszeit mehr Kraftstoff im Brennraum (Wirbelkammer) aufbereitet wurde. Durch die etwas stärkere Vorverbrennung wird die Prozesstemperatur angehoben, was die weitere Verbrennung des Rapsöles im Hauptbrennraum begünstigt, so dass es im weiteren Verlauf der Verbrennung keine größeren Unterschiede zwischen Rapsöl und Dieselkraftstoff gibt.

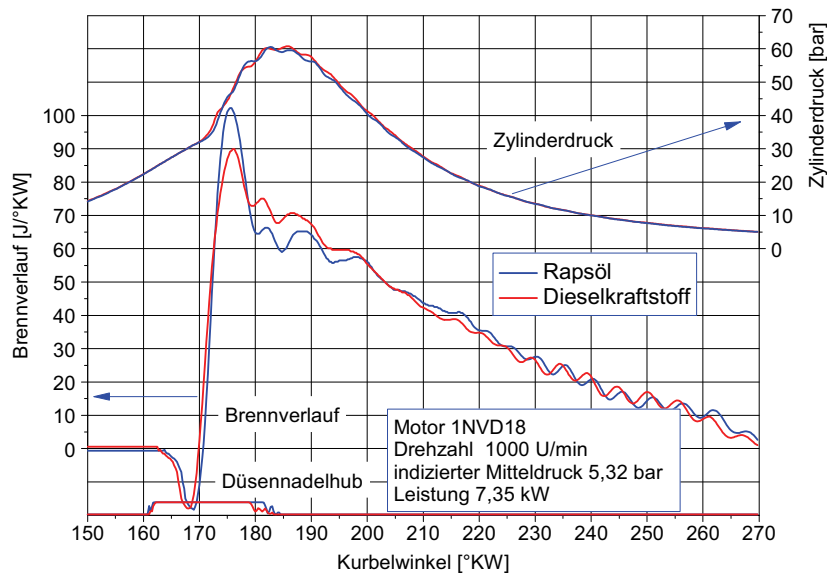


Abbildung 25: Vergleich der Brennverläufe bei $\frac{3}{4}$ Last am Motor 1NVD18

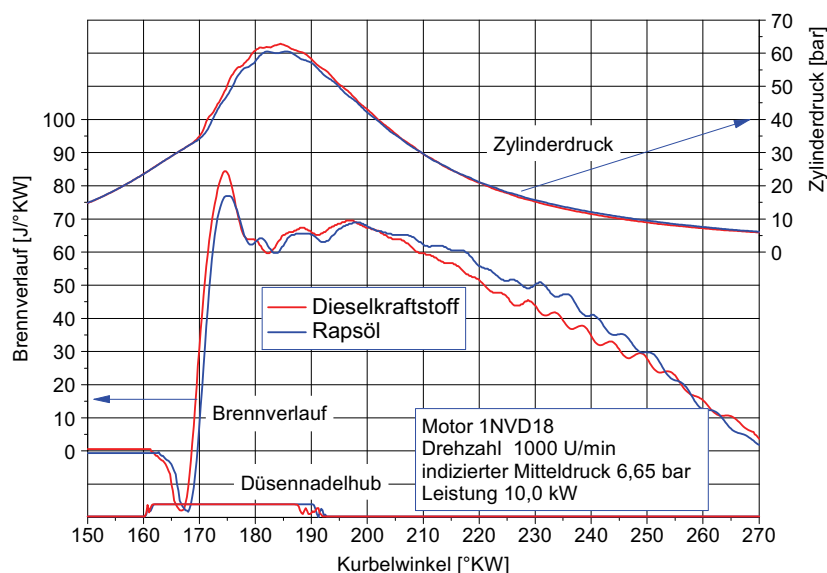


Abbildung 26: Vergleich der Brennverläufe bei Volllast am Motor 1NVD18

Bei Volllast ist der Unterschied zwischen Rapsöl und Dieselkraftstoff im Brennverlauf gering. Festzustellen sind ein etwas späterer Beginn der Verbrennung, eine minimal schwächere Vorverbrennung (in der Wirbelkammer) und eine etwas verstärkte spätere Hauptverbrennung im Hauptbrennraum beim Rapsölbetrieb. Das Brennende ist bei den beiden Kraftstoffen nahezu identisch.

Für den Motor 6VDS24/24 (Direkteinspritzung; schweröлтаuglich) sind die Brennfunktionen bei verschiedenen Drehmomenten (Motorlasten) entlang der Generatorkennlinie in den **Abbildungen 27 bis 31** dargestellt. In den unteren Lastpunkten (Viertellast und Halblast) kommt es zu einem deutlich verzögerten Verbrennungsbeginn. Die dann einsetzende

Verbrennung (Vorgemischverbrennung) erreicht eine Intensität, die die Verbrennung von Dieseldraftstoff deutlich übersteigt. Dies ist insbesondere im Halblastpunkt festzustellen, womit dann auch höhere Verbrennungstemperaturen und höhere Stickoxidemissionen als bei Dieseldraftstoff verbunden sind. Damit einher geht zumeist auch eine Verstärkung des

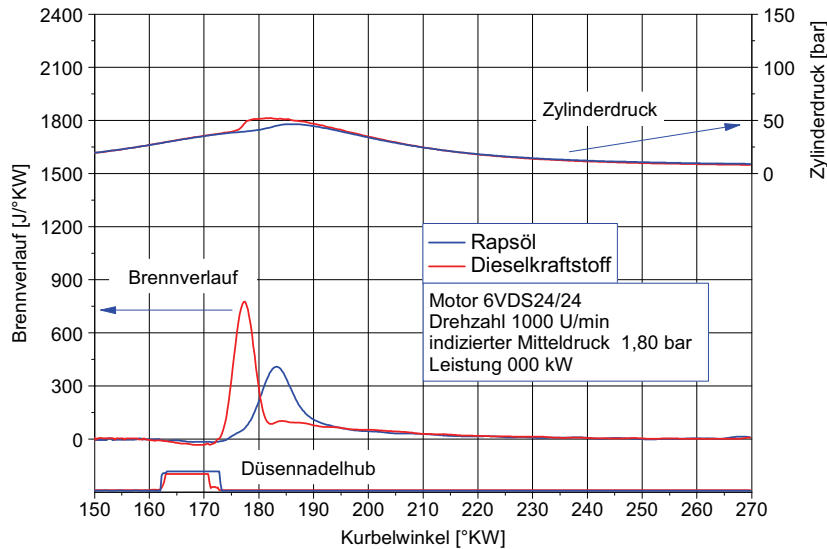


Abbildung 27: Vergleich der Brennverläufe bei Nulllast am Motor 6VDS24/24

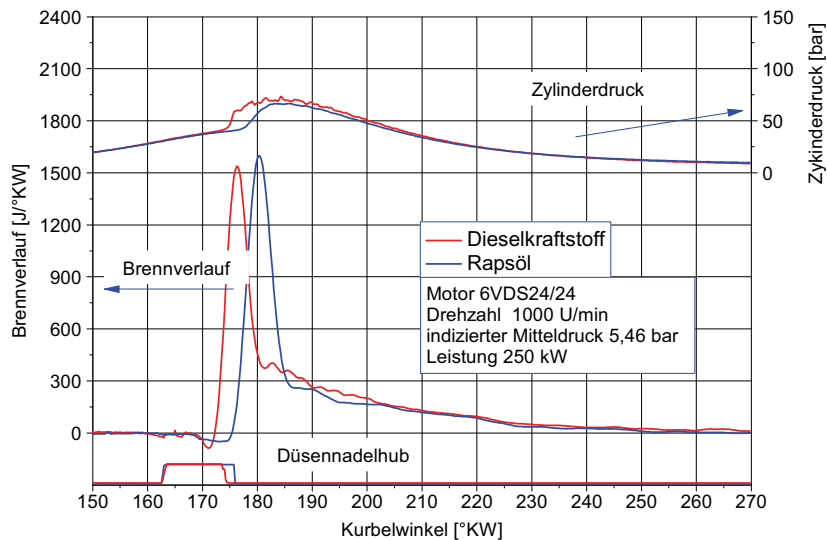


Abbildung 28: Vergleich der Brennverläufe bei unterer Teillast am Motor 6VDS24/24

Verbrennungsgeräusches.

Hier kommt es nicht zu einer diffusionsgesteuerten Hauptverbrennung, wie sie bei Dieseldraftstoff zu erkennen ist. Im hohen Lastbereich (Dreiviertellast und Vollast) gibt es kaum Unterschiede im Brennverlauf zwischen Rapsöl

Sehr deutliche Unterschiede gibt es dagegen im Leerlauf. Die Verbrennung von Rapsöl ist hier sehr stark verzögert. Sie erreicht nur die Hälfte der Intensität von Dieseldraftstoff mit der Gefahr, am Beginn der verstärkten Expansionsphase (ab ca. 50 °KW nach ZOT), nicht vollständig abgeschlossen zu sein.

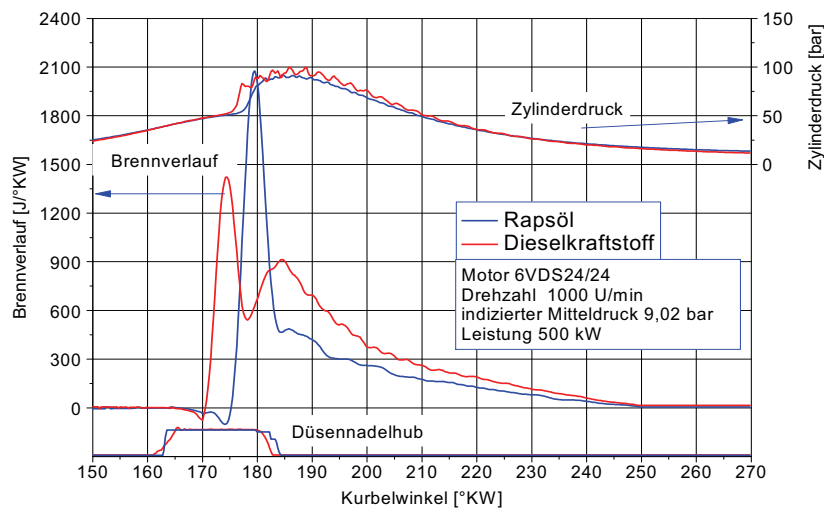


Abbildung 29: Vergleich der Brennverläufe bei Teillast am Motor 6VDS24/24

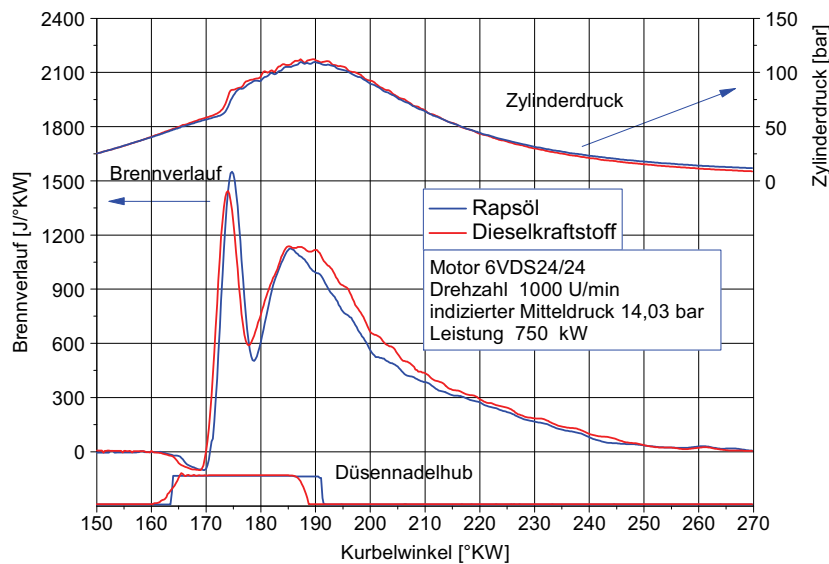


Abbildung 30: Vergleich der Brennverläufe bei oberer Teillast am Motor 6VDS24/24

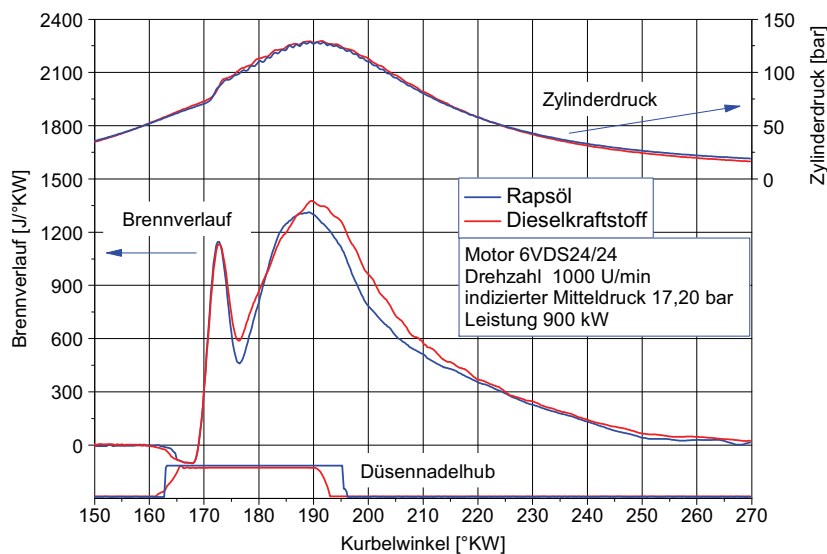


Abbildung 31: Vergleich der Brennverläufe bei Vollast am Motor 6VDS24/24

Für den Motor 1VDS18/15 (Direkteinspritzung, schweröлтаuglich) sind die Brennfunktionen bei verschiedenen Drehmomenten (Motorlasten) entlang der Generatorkennlinie in den **Abbildungen 32 bis 35** dargestellt. Der Motor besitzt ein relativ „hydraulisch weiches“ Einspritzsystem (lange Einspritzleitung), wodurch es beim Einsatz von Rapsöl mit seiner geringeren Komprimierbarkeit im Vergleich zu Dieselkraftstoff zu deutlich früheren Einspritzzeitpunkten (ca. 1,5 °KW) kommt. Dementsprechend liegt der Beginn der Energieumsetzung beim Rapsölbetrieb in den höheren Lastpunkten vor dem von Dieselkraftstoff. Wie in den **Abbildungen 33 bis 36** zu erkennen, gibt es im Verlauf der Energieumsetzung bei Motorlasten, die größer sind als 25 %, kaum Unterschiede zwischen Dieselkraftstoff und Rapsöl. Im Gegensatz dazu gibt es wesentliche Differenzen im Leerlaufbereich. Die Verbrennung von Rapsöl im Leerlauf ist stark verzögert und erreicht

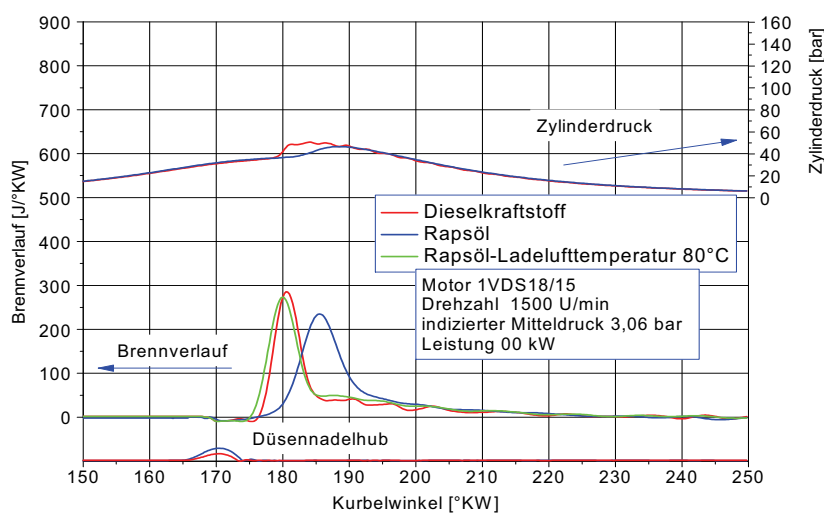


Abbildung 32: Vergleich der Brennvorgänge bei Nulllast am Motor 1VDS18/15

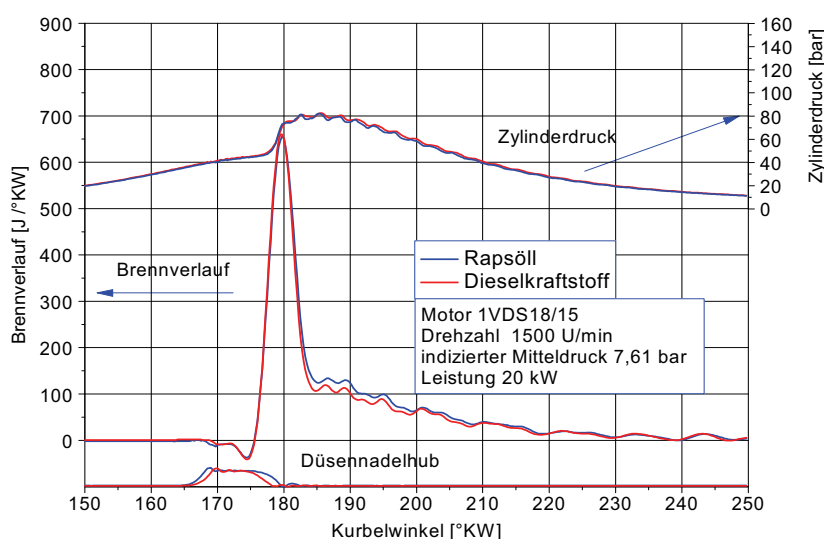


Abbildung 33: Vergleich der Brennvorgänge bei unterer Teillast am Motor 1VDS18/15

nicht den maximalen Energieumsatz von Dieselkraftstoff. Die dritte Linie in **Abbildung 32** zeigt die Brennfunktion von Rapsöl im Leerlaufpunkt bei deutlich vorgewärmter Ladeluft. Die Ladelufttemperatur betrug hier 80 °C mit dem Effekt, dass sich die Energieumsetzung aus Rapsöl kaum von der mit Dieselkraftstoff unterscheidet. In üblichen Motoren ohne Ladeluftvorwärmung (mit Luft-Luft-Ladeluftkühlern) liegt die Ladelufttemperatur im Betriebspunkt Leerlauf geringfügig über der Motorumgebungstemperatur.

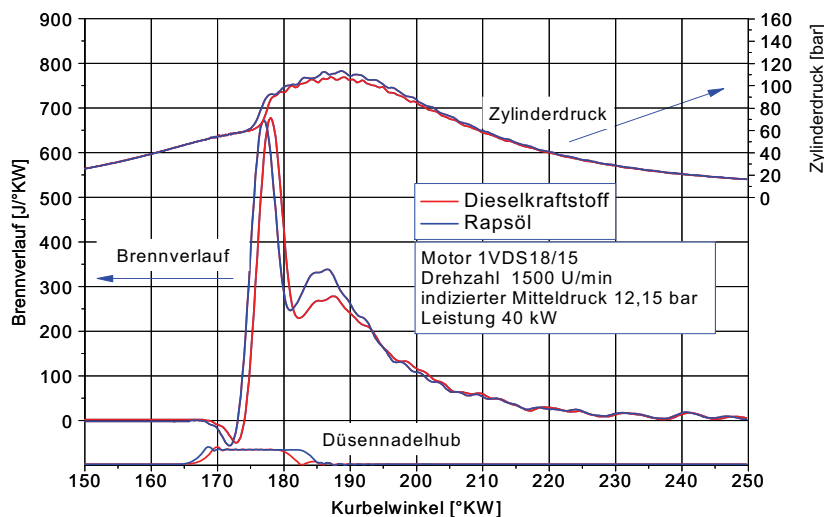


Abbildung 34: Vergleich der Brennverläufe bei Teillast am Motor 1VDS18/15

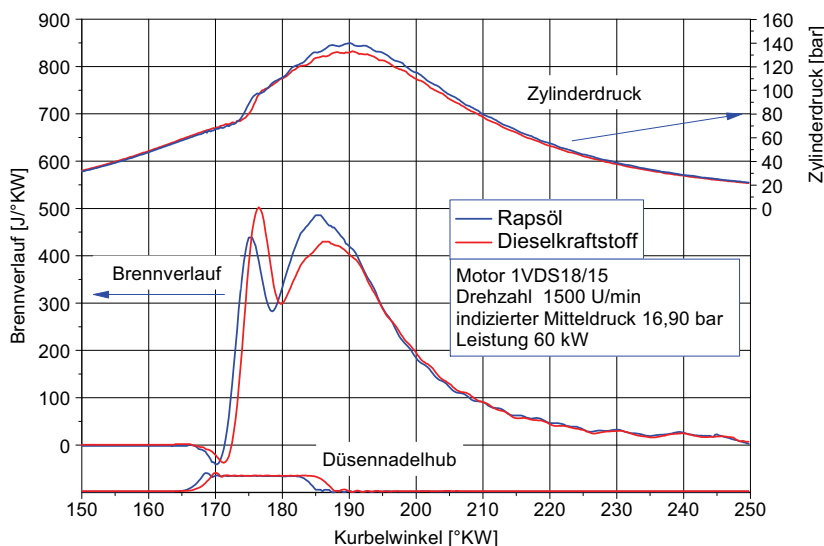


Abbildung 35: Vergleich der Brennverläufe bei oberer Teillast am Motor 1VDS18/15

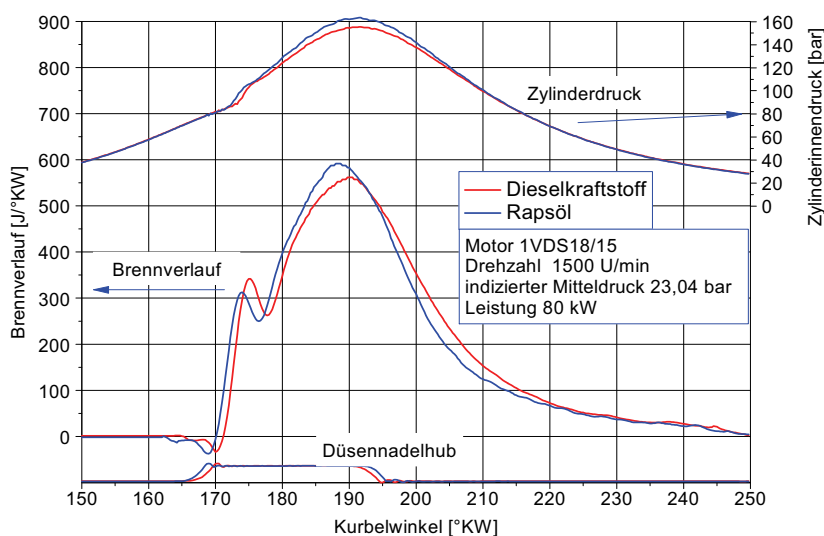


Abbildung 36: Vergleich der Brennverläufe bei Volllast am Motor 1VDS18/15

Aus den Brennverläufen im Leerlauf der drei Motoren erkennt man deutlich, dass Rapsöl eine längere Zeit und höhere Energiemenge zur Gemischbildung vor der Zündung benötigt als Dieselkraftstoff. Im Hochlastbereich wird diese bei modernen Motoren durch die thermische Energie der verdichteten Verbrennungsluft und die Energie des Einspritzstrahls bereitgestellt. Die einfachste Art, diese im Niedriglastbereich bereitzustellen, ist eine Anwärmung der Ladeluft über das Motorkühlwasser. Es ist zu empfehlen, für Motoren im Rapsöleinsatz die Ladeluftkühlung nicht über Umgebungsluft, sondern über das Motorkühlwasser mit elektrischer Umwälzpumpe vorzunehmen. Damit lassen sich eine gute Kühlung bei Volllast und eine Anwärmung im unteren Lastbereich auf 60 bis 70 °C bei Kühlwasser-

temperaturen um die 90 °C erreichen. In Verbindung mit einer elektrischen Vorwärmung des Kühlwassers im Motorblock führt dies auch zu einer Anhebung der Ladelufttemperatur beim Kaltstart. Eine verbesserte Kaltstartfähigkeit ermöglicht auch eine Anhebung des Verdichtungsverhältnisses, womit allerdings bei gleicher Aufladung auch höhere Spitzendrücke, Spitzentemperaturen und damit höhere Bauteilbelastungen auftreten.

Zündverzug

Der Zündverzug ist beim Betrieb mit Rapsöl größer als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Am Wirbelkammermotor 1 NVD 18 verlängert sich der Zündverzug um rund 25 % über den gesamten Lastbereich. Eine überproportionale Zunahme im Leerlauf ist nicht festzustellen. Hier wirkt sich die bei betriebswarmem Motor auch im Leerlauf die hohe Temperatur (thermische Energie) der Wirbelkammer positiv aus, da sie ein übermäßiges Ansteigen des Zündverzuges verhindert (**Abbildung 37**). Für den Kaltstart des Motors gilt diese Aussage nicht. Hier treten sehr lange Zündverzüge auf, die durch den optimalen Einsatz der Vorglüheinrichtungen und die Motorblockvorwärmung verkürzt werden müssen.

Am 6VDS24/24 (Konstruktionsjahr 1984) ist der Zündverzug bei Rapsölbetrieb im höheren Lastbereich ca. 30 % länger (1,5 °KW). Beim Betrieb im Teillastbereich wird diese Differenz deutlich größer und erreicht Werte von 40 bis 50 % (4 °KW) beim betriebswarmen Motor (**Abbildung 38**). Diese Erhöhung im hohen Lastbereich von 1,5 °KW ist deutlich unproblematischer als die Verlängerung von 4 °KW im Teillastgebiet. Dies führt dazu, dass – wie oben zu sehen – die Verbrennung erst nach dem oberen Totpunkt in der Expansionsphase beginnt. Dafür verantwortlich sind die niedrigen Prozesstemperaturen und die niedrigen Einspritzdrücke im Leerlauf. Diese Motoren besitzen ein geringeres Verdichtungsverhältnis, um den maximalen Brennraumdruck bei Vollast zu begrenzen und ein konventionelles Nockeneinspritzsystem. Bei zukünftigen Motoren ist es daher sinnvoll, für niedrig verdichtende Motoren ($\epsilon = 13$) eine Verstelleinrichtung für den Einspritzbeginn sowie eine Ladelufttemperaturregelung vorzusehen.

Am modernen Schwerölmotor VDS18/15 mit seiner sehr guten Gemischbildung auf Grund des hohen Einspritzdruckes (155 MPa) und der hohen Verdichtungsendtemperatur im Auslegungspunkt ist der Unterschied im Zündverzug zwischen Dieselkraftstoff und Rapsöl im höheren Lastbereich sehr gering (**Abbildung 39**). Mit abnehmender Motorlast und entsprechend geringeren Verdichtungsendtemperaturen nimmt der Zündverzuges im Rapsölbetrieb deutlich zu. Das gilt ebenfalls für den Dieselkraftstoffbetrieb jedoch in geringerem Maße. Im Leerlauf ist der Zündverzug bei Rapsöl 35 bis 40 % höher als bei Dieselkraftstoff und beträgt 12 °KW, eine Verlängerung um 4 °KW.

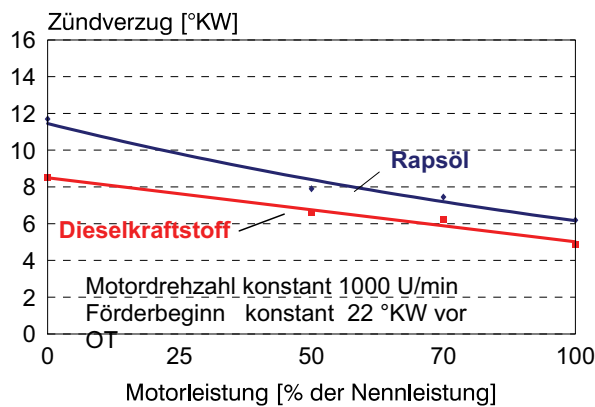


Abbildung 37: Zündverzug 1NVD18
in Abhängigkeit von der Motorlast

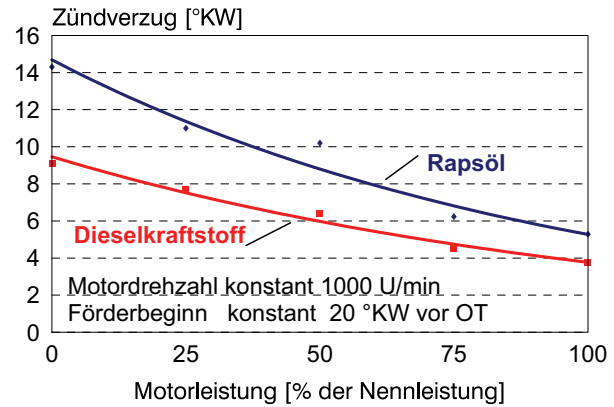


Abbildung 38: Zündverzug 6VDS24/24
in Abhängigkeit von der Motorlast

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Zündverzug beim Einsatz von Rapsöl wesentlich stärker von der Verdichtungsendtemperatur und der Gemischbildung abhängig ist, als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Die Einspritzeinrichtungen von Pflanzenölmotoren sollten diesem Umstand Rechnung tragen und mit einer lastabhängigen Einspritzzeitpunktverstellung ausgerüstet sein, um immer eine optimale Lage der Energieumsetzung zu ermöglichen. Moderne Motoren z. B. mit zeitgesteuerten Einspritzsystemen ermöglichen diese notwendigen Anpassungen mittels Software, wobei die wesentlichen Randbedingungen, Abgasemissionsvorschriften und die Zielfunktion „niedriger Verbrauch“ entsprechend zu berücksichtigen sind.

Durchbrennpunktverzug

Der Durchbrennpunktverzug als Kriterium für die vollständige Entflammung nach der Zündung ist bei höheren Lasten beim Betrieb mit Rapsöl ähnlich dem von Dieselkraftstoff. Dies zeigt, dass der Kraftstoff Rapsöl bei einem entsprechenden Temperaturniveau sehr gut brennt und nicht wie einige Schweröle nach einem kurzen Zündverzug nur langsam vollständig entflammt. Bei Teillast kommt es dagegen zu einer sehr deutlichen Erhöhung, fast zu einer Verdoppelung des Durchbrennpunktverzuges (**Abbildung 40**).

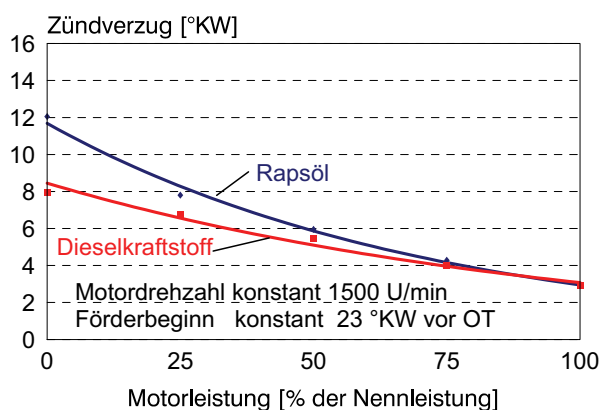


Abbildung 39: Zündverzug 1VDS18/15
in Abhängigkeit von der Motorlast

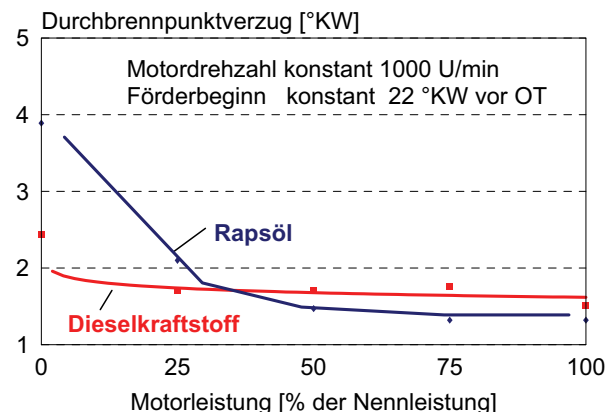


Abbildung 40: Durchbrennpunktverzug
1VDS18/15 in Abhängigkeit von d. Motorlast

Zusammen mit dem bereits langen Zündverzug führt dies zu einer sehr stark verschleppten Verbrennung im Leerlauf mit hohen Kohlenwasserstoff-Emissionen und weist auf mögliche Kaltstartprobleme hin. Die Ergebnisse wurden ohne Vorwärmung der Ladeluft ermittelt. Eine Vorwärmung der Ladeluft verkürzt den Durchbrennpunktverzug deutlich.

Maximaler Brennraumdruck und maximaler Brennraumdruckanstieg

Der maximale Brennraumdruck im Rapsölbetrieb unterscheidet sich kaum vom Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff; er liegt geringfügig darunter (**Abbildung 41**). Die maximalen Druckanstiege bei der Verbrennung von Rapsöl liegen unter denen von Dieselmotorkraftstoff (**Abbildung 42**). Dementsprechend ist die mechanische Belastung der brennraumumschließenden Bauteile an den untersuchten Motoren nicht größer als bei Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff.

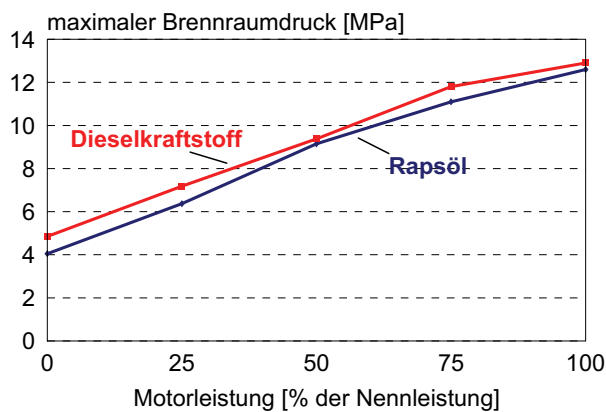


Abbildung 41: max. Brennraumdruck des Motors 6VDS24/24

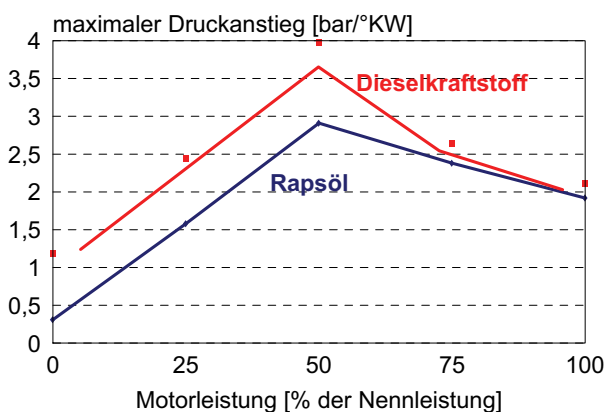


Abbildung 42: max. Druckanstieg des Motors 6VDS24/24

Die **Abbildung 43** zeigt ein Beispiel für die Druckanstiege aufgetragen über dem Kurbel-

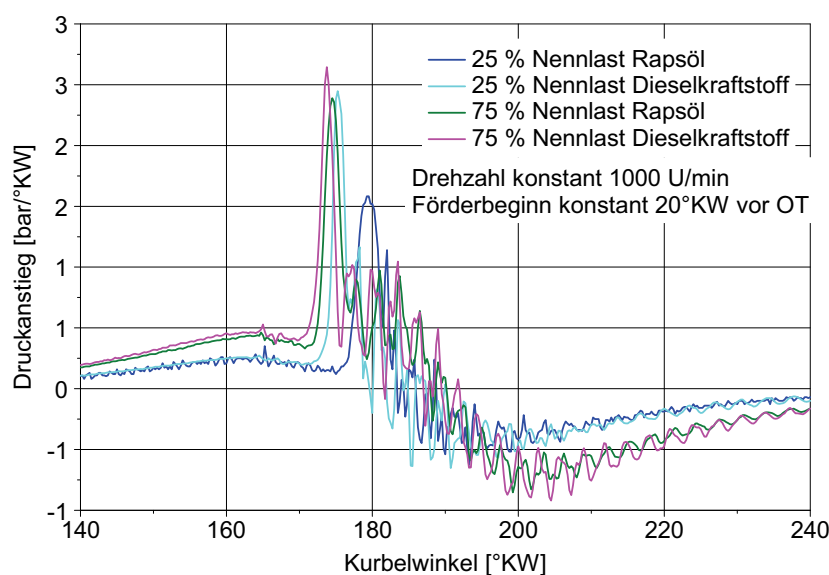
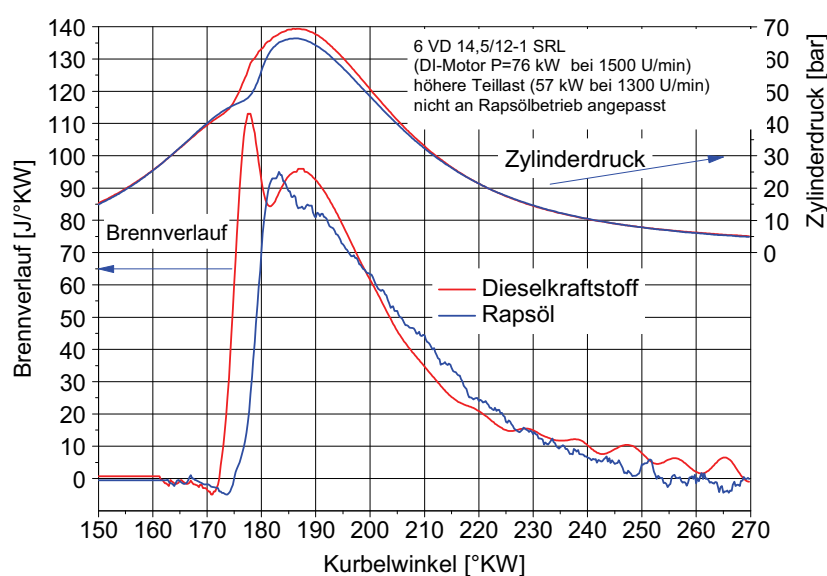


Abbildung 43: Vergleich der Druckanstiege 6VDS24/24

winkel. Sehr deutlich ist darin die Lastabhängigkeit und Kraftstoffabhängigkeit der zeitlichen Position des maximalen Druckanstieges zu erkennen. Mit höheren Lasten und früherem Brennbeginn liegt auch im Rapsölbetrieb der maximale Druckanstieg früher.

Die bisher vorgestellten Vergleiche der Verbrennung von Rapsöl und Dieseldieselkraftstoff wurden an Motoren, die für den Betrieb mit hochviskosen, hochsiedenden und schlechter zündenden Kraftstoffen konstruiert wurden, durchgeführt. Als konstruktive Besonderheiten verfügen diese Motoren unter anderem über ein für diese höherviskosen Kraftstoffe geeignetes Einspritzsystem: Eine Abstimmung der Strahlausbreitung auf diese Kraftstoffe, gekühlte Düsen, um Verkokungen zu vermeiden, beschichtete Kolbenringe und keine Abgasrückführung. Auf diese Weise konnte ein sicherer Motorbetrieb mit einem geringen Rapsöleintrag in das Schmieröl ermöglicht werden.

Beim Einsatz von Rapsöl in Motoren älterer Bauarten, die nur für den Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff konstruiert wurden, kann die Verbrennung wesentlich schlechter sein. In **Abbildung 44** ist eine solche problematische Verbrennung dargestellt. Man sieht hier, dass der Motor im Rapsölbetrieb eine sehr spät beginnende Verbrennung (langer Zündverzug) aufweist, obwohl er in einem hohen Lastpunkt betrieben wird. Die maximale Brenngeschwindigkeit erreicht nicht das Niveau der von Dieseldieselkraftstoff. Weiterhin zieht sich die Verbrennung weit in die Expansionsphase hinein. Daraus folgen ein niedriger Wirkungsgrad und eine hohe Abgastemperatur. Ursache ist eine völlig unzureichende Gemischaufbereitung mit zu großen Kraftstofftropfen, die nur langsam verdampfen und zur Rußbildung neigen. Dieser Motor ist mit einer 4-Loch-Düse ausgerüstet, die schräg im Brennraum angeordnet ist und nur einen maximalen Einspritzdruck von 800 bar aufweist, was für eine ausreichende Gemischbildung im Rapsölbetrieb nicht ausreicht. Für die Umrüstung solcher Motoren auf den Rapsölbetrieb ist ein Wechsel des Einspritzsystems erforderlich, um den Einspritzdruck und die Anzahl der Düsenlöcher zu erhöhen sowie den Einspritzbeginn



variabel anpassen zu können. Da diese Maßnahme, verglichen mit dem Wert der älteren Motoren, mit hohen Kosten verbunden ist, empfiehlt sich der komplette Austausch der Motoren gegen moderne meist als ökonomisch günstigere Variante.

Abbildung 44: Brennfunktionen Motor 6VD14,5/12-1 SRL

Für den Betrieb mit Mischkraftstoffen (insbesondere bei einem Rapsölanteil von 50 % im Dieseldkraftstoff) kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich lineare Verhältnisse bezüglich der Energieumsetzungsraten zwischen reinem Dieseldkraftstoff- und reinem Rapsölbetrieb ergeben. Es gibt Quellen [50], die überdurchschnittlich hohe Energieumsätze und damit hohe Bauteilbelastungen usw. belegen. In **Abbildung 45** ist zu erkennen, dass der Energieumsatz je Grad Kurbelwinkel des Gemisches aus Rapsöl und Dieseldkraftstoff viel höher ist und zeitlich näher am oberen Totpunkt liegt. Dies führt zu deutlich höheren

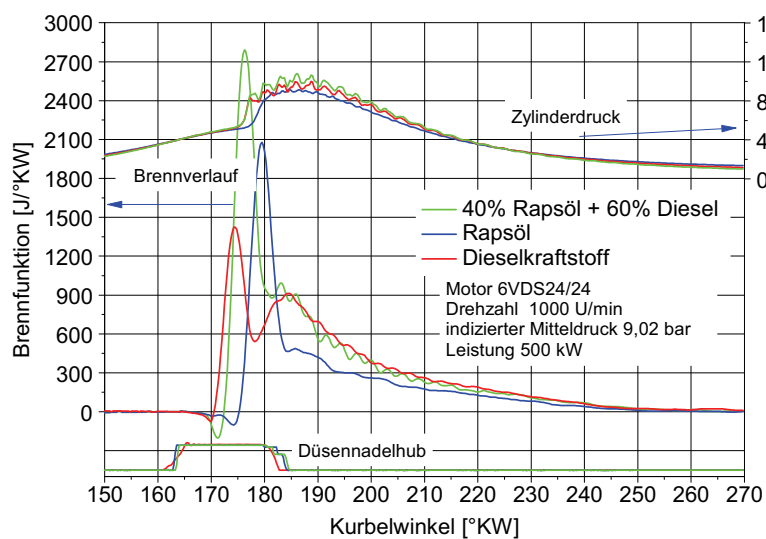


Abbildung 45: Brennfunktionen bei Gemischkraftstoffen am Motor 6VDS 24/24

Druckanstiegen (50 % über dem von Dieseldkraftstoff), höheren Zylinderinnen- drücken und vor allem zu verstärktem Wärmeeintrag in die brennraumum- schließenden Bauteile. Dies kann zu einer mechanischen Schädigung der entsprechenden Bau- teile führen.

Auf dem Gebiet des Motorbetriebes mit Mischungen aus Dieseldkraftstoff und Rapsöl über 10 % gibt es wenig verwertbare Veröffentlichungen über den Motorinnenprozess, zumal in der Praxis sehr unterschiedliche Mischungsverhältnisse eingesetzt werden können. Dadurch existiert ein weiterer freier Parameter und die Anzahl der notwendigen Messpunkte steigt deutlich. Für Mischungen aus RME und Rapsöl gilt Analoges.

5.4 Abgasemissionen

5.4.1 Abgasnormen für den Betrieb von Motoren mit Rapsöl

Verbrennungsmotoren unterliegen – in Abhängigkeit vom Einsatzspektrum – Abgasnormen, die durch die Gesellschaft (Regierung) zum Schutz der Umwelt festgelegt werden. Diese Vorschriften sind ein politischer Kompromiss. Einerseits soll von den Motoren keine Umweltbelastung ausgehen, andererseits muss die Motorkonstruktion physikalisch, technisch und ökonomisch realisierbar sein. In den letzten zwölf Jahren hat die Abgasgesetzgebung die Motorenentwicklung dominiert. Die klassischen Entwicklungsziele wie geringer Kraftstoffverbrauch und Erhöhung der Leistungsdichte waren eher von untergeordneter Bedeutung. Je nach Einsatzgebiet und Stückzahl der produzierten Motoren unterscheiden sich

die Abgasnormen deutlich in ihren Grenzwerten. Die Auswirkungen der einzelnen Abgasnormen auf die Entwicklungskonzepte der Rapsölmotoren werden nachfolgend erläutert.

Für stationäre Anlagen (BHKW) gilt die TA-Luft in der Ausführung vom 24. Juni 2002 mit folgenden Grenzwerten:

- 1000 mg/m³ Stickoxide,
- 300 mg/m³ Kohlenmonoxid,
- 20 mg/m³ Staub bei 180 °C (keine Partikel),
- 60 mg/m³ Formaldehyd.

Die Abgaswerte der TA-Luft sind auf einen Restsauerstoffgehalt von 5 % und Normkubikmeter (1 bar; 0 °C) bezogen. Kohlenwasserstoffe sind nicht extra aufgeführt, da deren Emissionen meist mit den Kohlenmonoxidemissionen korrelieren. Diese Grenzwerte müssen mit dem eingesetzten Betriebsstoff (Rapsöl) bei betriebswarmem Motor in allen Lastpunkten eingehalten werden. Sie gelten für alle Motoren ab einer Brennstoffwärmeleistung von 1 MW (Kupplungsleistung ca. 350 kW). Motoren kleinerer Leistung unterliegen in Europa keinen Vorschriften, d. h. hier können auch ältere Motorentechnologien eingesetzt werden, wie Wirbelkammermotoren. In anderen Teilen der Welt, z.B. den USA, gibt es diese untere Leistungsgrenze der Abgasnorm nicht, d.h. dort sind auch für Motoren mit einer Kupplungsleistung unter 18 kW wirksame Abgasgrenzwerte festgelegt.

Für Motoren in mobilen Maschinen und Geräten, die nicht den Kategorien Personenkraftwagen, Lastkraftwagen, Eisenbahn oder Schiff zugeordnet sind, gilt die EU-Richtlinie 97/68/EG. Diese wird zeitlich fortschrieben durch die EU-Richtlinie 2004/26/EG mit weiteren Stufen von Abgasgrenzwerten. In diesen Richtlinien werden die Motoren in Leistungsgruppen unterteilt. Der Abgastest selbst erfolgt mit einem Testbrennstoff nach Anlage 4 der EU-Richtlinie 97/68/EG. Dieser ähnelt einem Dieselmotortreibstoff nach DIN EN 590 (2005), jedoch nicht Rapsöl. Eine Abgasuntersuchung mit dem realen zukünftigen Betriebsstoff ist durch den Gesetzgeber bisher nicht vorgesehen. **Im Anhang 5** sind die Grenzwerte der einzelnen Stufen (Entwicklungsschritte) dargestellt. Der Zeitpunkt, ab dem die Grenzwerte eingehalten werden müssen, ist vom Einsatzgebiet der Motoren abhängig und unterscheidet sich geringfügig zwischen den Motoren, zum Beispiel für Baumaschinen und Traktoren. **Im Anhang 5** sind die Daten für die Inverkehrbringung von Motoren von Baumaschinen (EU Richtlinie 2004/26/EG) aufgeführt. Das Datum für die Typgenehmigung ist jeweils ein Jahr davor. Die Einführungsstermine für die Abgasstufen von Traktorenmotoren sind in der EU-Richtlinie 2005/13/EG gesondert festgelegt. Für mobile Motoren mit Kupplungsleistungen unter 18 kW sind keine Grenzwerte in der EU festgelegt. In den USA

müssen die Motoren unter 18 kW Kupplungsleistung ebenfalls Abgasgrenzwerte einhalten, die in der Größenordnung für die Motoren des Leistungsbereiches 18 bis 37 kW der EU liegen. Dies bedeutet, zukünftige Rapsölmotoren müssen die Abgaszertifizierung mit dem Destillatbrennstoff nach Anlage 4 der EU Richtlinie 97/68/EG durchführen. Die Motoren müssen damit, neben Rapsöl, auch für diesen Prüfkraftstoff abgasoptimiert werden.

Die Abgasgrenzwerte für LKW über 3,5 Tonnen und die für PKW-Dieselmotoren sind im **Anhang 6** aufgeführt. Die Abgastests für PKW und LKW unterscheiden sich deutlich vom Abgastest für mobile Maschinen und Geräte (stationäre Tests). Diese Tests müssen mit den Kraftstoffen durchgeführt werden, mit denen das Fahrzeug betrieben werden soll. Die Abgasgrenzwerte für LKW und PKW ab dem Jahr 2008 erfordern in der Regel umfangreiche Abgasnachbehandlungseinrichtungen (Partikelfilter, Maßnahmen zur Stickoxidreduktion). Da eine äußere Abgasnachbehandlung bei diesen Motoren auch im Rapsölbetrieb notwendig wird, steigt der Entwicklungsaufwand erheblich an. So lassen sich einige mit Dieselmotoren mögliche Technologien zur Partikelfilterregeneration auf den hochsiedenden und schlechter zündenden Kraftstoff Rapsöl nicht direkt übertragen.

Aus den Randbedingungen „Abgasemissionsvorschriften“ kann für zukünftige Verbrennungsmotorenkonzepte für den Rapsölbetrieb folgendes abgeleitet werden: Für Motoren in Landmaschinen ist neben der Applikation des Verbrennungsprozesses auch eine umfangreiche Weiterentwicklung der nachgeschalteten Abgasnachbehandlung für den Zeitraum nach 2010 erforderlich. So ist die Erzeugung der notwendig hohen Abgastemperatur zur Partikelfilterregeneration im Rapsölbetrieb höchstwahrscheinlich nur durch Nacheinspritzung in den Abgaskrümmer und eine katalytische Verbrennung erreichbar. Sowohl Rapsölkraftstoff als auch Motorenschmieröl sollten nur sehr geringe Anteile an Aschebildnern aufweisen, um den geschlossenen Partikelfilter nicht zu verunreinigen. Der Calcium- und Magnesiumgehalt im Rapsölkraftstoff sollte daher deutlich gesenkt werden. Damit verbunden ist eine Anpassung der Kraftstoffnorm für Rapsöl an die neuen Abgasnachbehandlungsverfahren.

Verglichen mit den Anforderungen an LKW- und PKW-Motoren sind die Grenzwerte für mobile Maschinen und Geräte moderat bzw. für kleine Motoren nicht vorhanden. Die für LKW- und PKW-Motoren im Dieselmotoren betrieb entwickelten innermotorischen Technologien (AGR usw.) zur Abgasemissionsreduzierung (NO_x) für die Abgasstufe Euro 3 können auch für den Rapsölbetrieb eingesetzt werden. Erst ab 2013 werden von Landmaschinenmotoren Grenzwerte gefordert, die bereits heute für LKW-Motoren gelten. So steht genügend

Entwicklungszeit zur Verfügung, um Abgasnachbehandlungstechnologien auf den Rapsölbetrieb zu übertragen.

Durch die Festlegung des Gesetzgebers, den Abgastest für mobile Maschinen und Geräte nur mit dem Testkraftstoff laut Anlage 4 der EU-Vorschrift durchzuführen, ist es möglich, dass im realen Betrieb die Grenzwerte geringfügig, in der Größenordnung von ca. 10 %, überschritten werden. Der Gesetzgeber in Europa akzeptiert auf diese Art leicht erhöhte Stickoxidemissionen durch den Einsatz von RME bzw. Rapsöl. Eine deutliche Überschreitung der Abgasnormen durch Anwendung älterer Motorentechnologien (Abgasstufe Euro 1 oder 2 ohne AGR) und softwaremäßiges Umschalten bei Betrieb mit Dieselkraftstoff ist strategisch nicht sinnvoll. Die Motorenkonzepte für den Rapsölbetrieb sollten sich an den gültigen Abgasnormen orientieren und diese bestmöglich einhalten, um die Akzeptanz der Technologie in der Gesellschaft nicht zu gefährden.

5.4.2 Abgasemissionsmessungen auf Prüfständen

Beim Einsatz von Rapsölen bzw. Pflanzenölen in Motoren treten grundsätzlich die gleichen Abgaskomponenten wie beim Betrieb mit Dieselkraftstoff auf. Die Hauptbestandteile des Abgases sind Stickstoff, Wasser (dampfförmig) und Kohlendioxid. Die Konzentration der in geringen Mengen im Abgas enthaltenen Abgasschadstoffe kann sich im Rapsölbetrieb von der im Dieselkraftstoffbetrieb unterscheiden. Der Gehalt an Schwefel ist in beiden Kraftstoffen sehr gering, dementsprechend sind die Schwefeldioxidemissionen in beiden Betriebsarten minimal.

Für die grundsätzlichen Untersuchungen über die Emissionen bei Rapsöl- bzw. Dieselkraftstoffbetrieb werden dieselben Motoren wie in Abschnitt 5.3 (Verbrennung) verwendet. Da diese Motorentypen erst seit wenigen Jahren (1998) in ihren Emissionen begrenzt sind, sind die Emissionen der drei Versuchsmotoren noch sehr hoch. Zuvor wurden fast ausschließlich verbrauchsoptimierte Motoren mit vergleichsweise hohen Stickoxidemissionen gebaut. Dazu zählen sowohl der 6VDS24/24 als auch der 1VDS18/15. Die Abgasmassenströme sind in den entsprechenden Betriebspunkten im Rapsölbetrieb und im Dieselbetrieb gleich (im Rahmen der Messgenauigkeit). Dadurch können die Emissionen ohne Umrechnung auf den Abgasmassenstrom und die Motorleistung miteinander verglichen werden. Diese Darstellung der Rohkonzentrationen lässt die Zusammenhänge zwischen Abgasemission und Verbrennung leichter deutlich werden. Weitere Abgasemissionsmessungen im Rapsölbetrieb wurden an einem schnelllaufenden, an den Rapsölbetrieb angepassten 6-Zylinder-Motor 6068 HL 473 Abgasnorm Euro II für den

Einsatz in Traktoren durchgeführt. An diesem Motor wurden die direkten Abgasmesswerte der Kraftstoffe Rapsöl und Dieseldieselkraftstoff in acht Betriebspunkten miteinander verglichen.

Stickoxide (NO_x)

Die Stickoxidemissionen sind im Rapsölbetrieb in den höheren Lastpunkten, wo – wie oben dargestellt – die Energieumsetzungen vergleichbar sind, geringfügig höher als im Dieseldieselkraftstoffbetrieb. Die Ursache hierfür sind lokal höhere Verbrennungstemperaturen in der Flamme, die durch den bereits im Rapsöl enthaltenen Sauerstoff verursacht werden. Dieser beschleunigt die Verbrennung, behindert die Rußbildung und fördert die Rußoxidation. Die erhöhten Stickoxidemissionen werden auch in der Literatur festgestellt [3; 12; 24; 52; 54] und treten in der gleichen Größenordnung wie beim Wechsel von Dieseldieselkraftstoff zu RME auf.

Im unteren Teillastbereich, wo die Verbrennung des Rapsöles verzögert ist, sind die Stickoxidemissionen im Rapsölbetrieb kleiner als bei Dieseldieselbetrieb. Dies ist auf die geringeren Spitzentemperaturen infolge der nach spät verlagerten Energieumsetzung zurückzuführen (**Abbildungen 46, 47 und 48**).

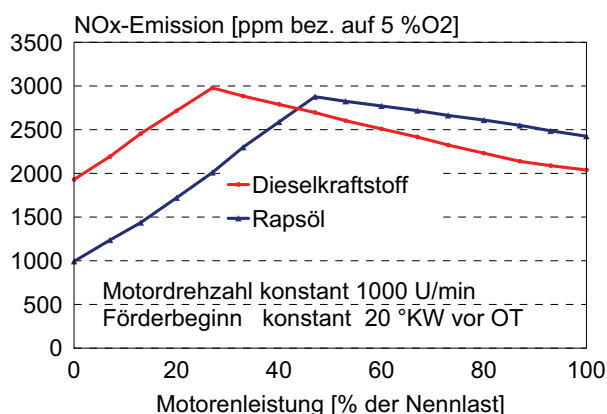


Abbildung 46: Stickoxidemissionen am Motor 6VDS24/24

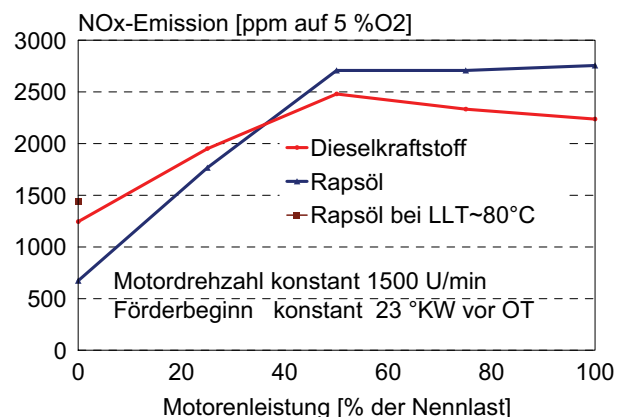


Abbildung 47: Stickoxidemissionen am Motor 1VDS18/15

Beim Rapsölbetrieb des Wirbelkammermotors 1 NVD 18 kommt es im Rapsölbetrieb zu einer geringfügigen Reduzierung der Stickoxidemissionen in sämtlichen Lastpunkten (**Abbildung 5.4.2.3**). Hier wirkt sich der geteilte Brennraum aus. In der Wirbelkammer, wo die Zündung und erste unterstöchiometrische Verbrennung stattfindet, ist nicht genügend Sauerstoff für die Stickoxidbildung vorhanden. Dies hat den Effekt, dass eine verstärkte, vorgemischte Verbrennung, wie sie beim Rapsölbetrieb auftritt, nicht zu höheren Stickoxidemissionen führt. Bei Leerlauf und Teillast sind die Verbrennungsvorgänge im Rapsölbetrieb etwas nach spät verlagert, wodurch die Verbrennungshöchsttemperaturen geringfügig sinken und die Stickoxidemissionen abnehmen.

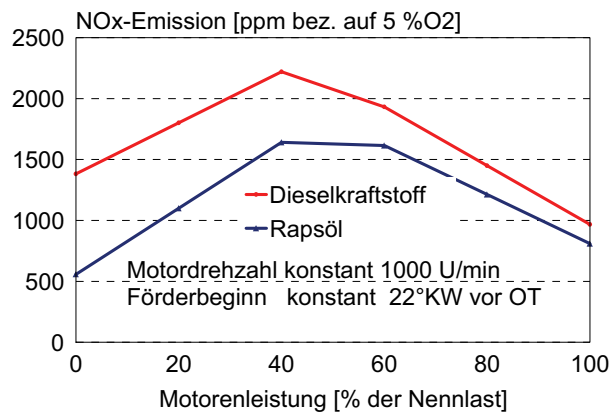


Abbildung 48: Stickoxidemissionen am Motor 1NVD18

Der Motor 6068 HL 473 wurde als Motor für landwirtschaftliche Maschinen nach dem 8-Phasen-Zyklus entsprechend dem C1-Zyklus der ISO-Norm 8178-4 vermessen. In den Betriebspunkten mit hoher Drehzahl (1 bis 4) liegt die Stickoxidemission im Rapsölbetrieb geringfügig über der von Dieseldkraftstoff. Bei mittleren Drehzahlen ist das Verhalten indifferent und im Leerlauf liegt die Stickoxidemission geringfügig über der von Dieseldkraftstoff, aber insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau. Insgesamt ist festzustellen, dass die Emissionen am Motor 6068 HL 473 auf einem Niveau von ca. 30 % der anderen Motoren liegt. Die Ursache hierfür ist eine deutlich nach spät verlagerte Verbrennung. Die Stickoxidemissionen werden wesentlich mehr vom dem Betriebspunkt und der Lage der Verbrennung beeinflusst, als vom Kraftstoff Rapsöl bestimmt **Abbildung 53**.

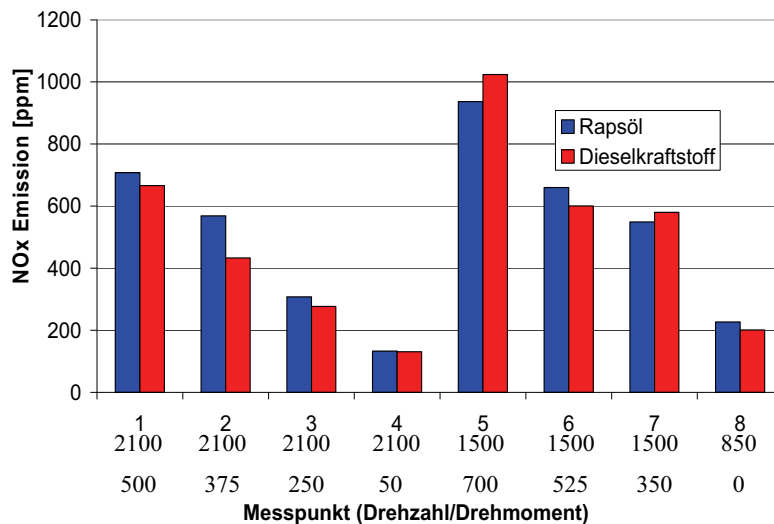


Abbildung 53: Stickoxidemissionen am Motor 6068 HL 473

Kohlenwasserstoffe (HC)

Die Kohlenwasserstoffemissionen in Dieselmotoren sind ebenfalls stark betriebspunktabhängig. Dies gilt auch für den Betrieb mit dem Kraftstoff Rapsöl. Deutlich ausgeprägt ist daher an den Motoren 1VDS18/15 und 1NVD18 der Anstieg der HC-Emission

mit abnehmender Last. Während am Wirbelkammermotor kaum Unterschiede in der Höhe der HC-Emissionen zwischen den beiden Kraftstoffen zu verzeichnen sind, ist dies bezüglich die Differenz am 1VDS18/15 am größten. Hier erreichen die HC-Emissionen im Rapsölbetrieb nur ca. 50 % des Dieselmotorkraftstoffbetriebes (**Abbildungen 50 und 51**). Insgesamt liegen die Emissionen auf einem für Dieselmotoren typisch niedrigen Niveau. Die Ursache für die Reduzierung der HC-Emissionen ist im Sauerstoffgehalt des Rapsöles zu finden, der die HC-Oxidation befördert.

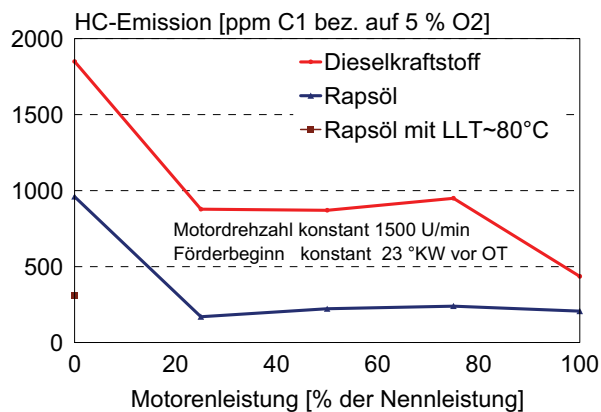


Abbildung 50: HC-Emissionen am Motor 1VDS18/15

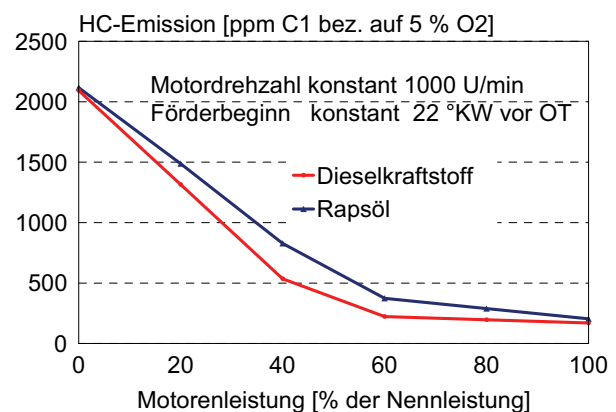


Abbildung 51: HC-Emissionen am Motor 1NVD18

Anders gestaltet sich die Situation am Motor 6 VDS 24/24. Hier ist die HC-Emission im Dieselmotorkraftstoffbetrieb nahezu unabhängig von der Last auf einem sehr hohen Niveau. Demgegenüber kommt es durch den Einsatz von Rapsöl zu einem deutlichen Anstieg der Emissionswerte mit abnehmender Last. Im unteren Teillastbereich erreichen diese das fast

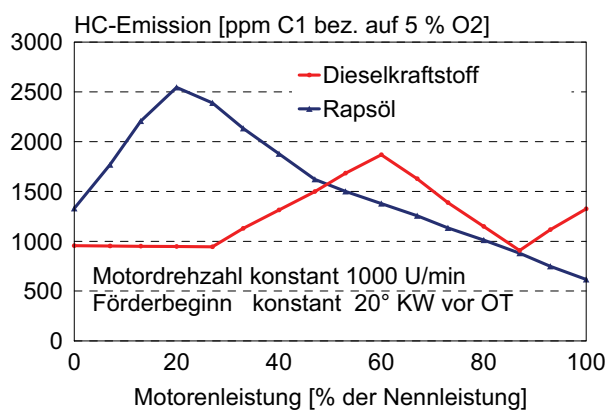


Abbildung 52: HC-Emission am Motor 6VDS24/24

2,5-fache des Dieselmotorkraftstoffbetriebes. Ursache ist die Ladeluftkühlung mit Seewasser an diesem Motor, die die Ladeluft vor dem Motor und damit die Prozesstemperaturen in Teillast sehr stark absenkt. Im Volllastbetrieb mit seinen hohen Prozesstemperaturen unterscheiden sich die HC-Emissionen zwischen beiden Kraftstoffen kaum noch (**Abbildung 52**).

Beim Motor 6068 HL 473 kommt es im Rapsölbetrieb zu einer Absenkung der HC-Emissionen in fast allen Betriebspunkten bei der Anpassung an den Rapsölbetrieb. Bei mittleren Motordrehzahlen ist diese Absenkung am stärksten ausgeprägt. In diesem Motor ist der typische Anstieg der Kohlenwasserstoffemissionen im Leerlauf nicht festzustellen. Die Emissionen beider Kraftstoffe liegen in diesem Betriebspunkt auf einem Niveau (**Abbildung**

53). Eine Ursache für diese niedrigen HC-Emissionen im Leerlauf ist in der Anhebung der Ladelufttemperatur im Ladeluftkühler durch das warme Motorkühlwasser zu sehen. Der Motor ist mit einem Ladeluft-Kühlwasser-Wärmeübertrager ausgerüstet, der sich sehr positiv auf die Verbrennung und Abgasemissionen bei Nulllast auswirkt.

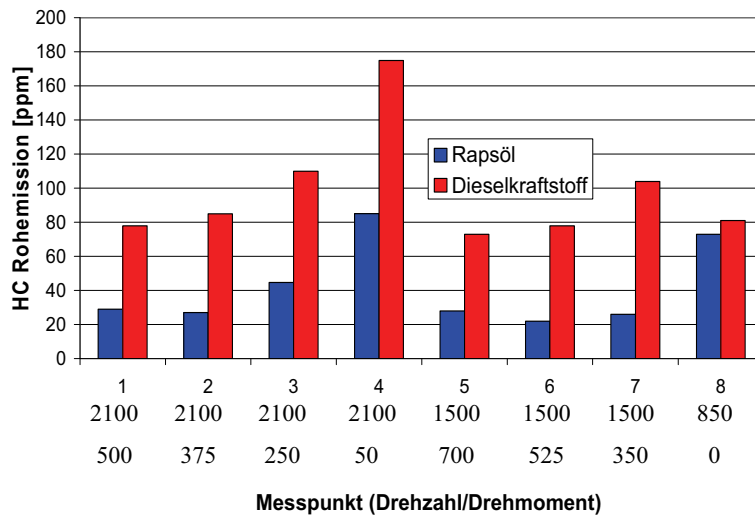


Abbildung 53: Kohlenwasserstoffemissionen am Motor 6068 HL 473

Kohlenmonoxid (CO)

Die Kohlenmonoxidemissionen bei Rapsölbetrieb sind bei höheren Lasten vergleichbar mit denen des Dieseldkraftstoffbetriebes. Dies ist auch zu erwarten, da in diesen Lastpunkten genügend hohe Temperaturen bei ausreichendem Sauerstoffangebot vorhanden sind. Der für den Dieselmotor typische Anstieg der Kohlenmonoxidemissionen im Leerlauf ist bei Betrieb mit Rapsöl in den konventionellen Motoren noch stärker ausgeprägt. Die Verbrennung von Rapsöl erfolgt im Betriebspunkt Leerlauf noch später. Dadurch ist die notwendige Temperatur zur Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid in der sich anschließenden Expansions-

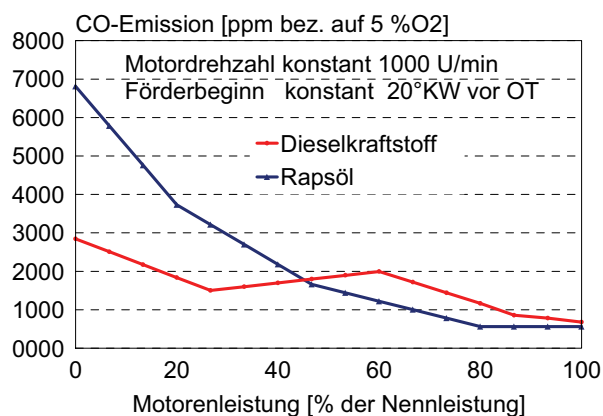


Abbildung 54: CO-Emissionen am Motor 6VDS24/24

phase dann nicht mehr gegeben. Eine deutliche Verbesserung der Kohlenmonoxidemissionen im Leerlauf ist durch eine Erhöhung der Ladelufttemperatur möglich. Im Motor 6068 HL 473 kommt es beim Einsatz von Dieseldkraftstoff zu keiner Erhöhung der Kohlenmonoxidemissionen im Leerlauf. Hier wirkt sich die Anhebung der Ladelufttemperatur vor den Zylindern auf 60 °C schon positiv aus.

Diese Temperaturanhebung reicht aber für die optimale Verbrennung von Rapsöl in Bezug auf die Kohlenmonoxidemissionen im Leerlaufpunkt noch nicht aus. In den **Abbildungen 54 bis 57** sind die Kohlenmonoxidemissionen der vier Motoren dargestellt.

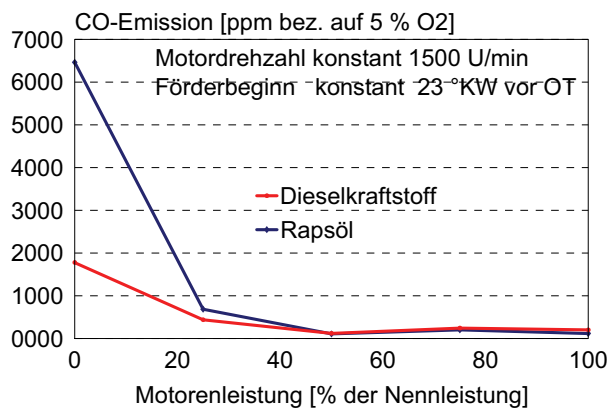


Abbildung 55: CO-Emissionen am Motor 1VDS18/15

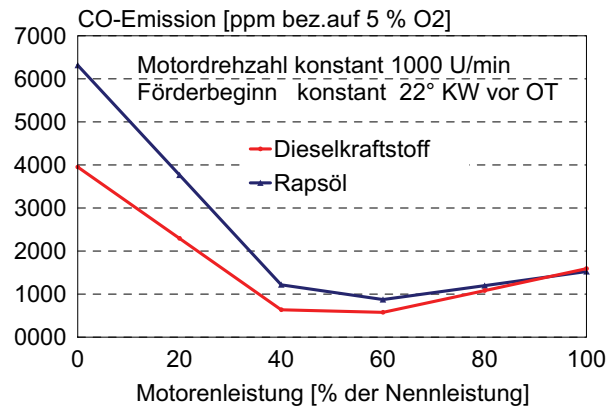


Abbildung 56: CO-Emissionen am Motor 1NVD18

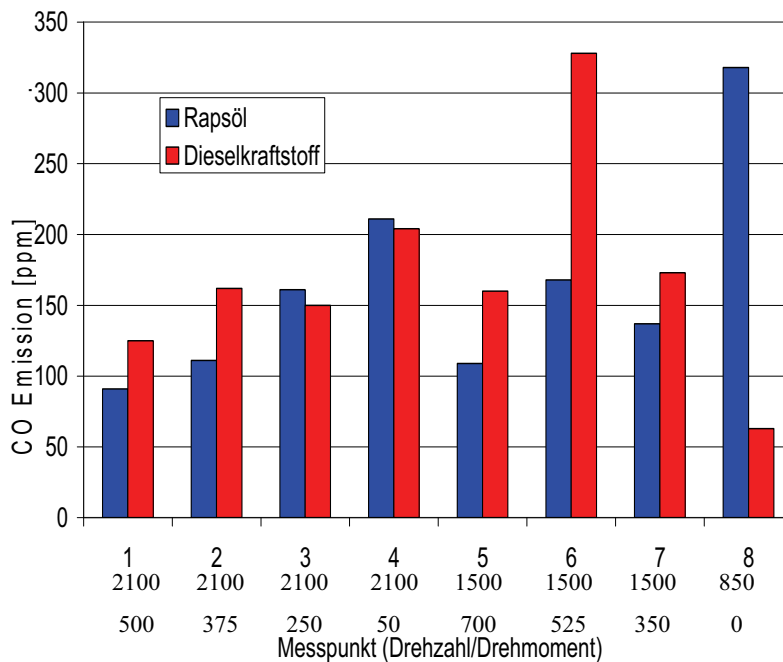


Abbildung 57: Kohlenmonoxidemissionen am Motor 6068 HL 473

Partikelemissionen

An zwei der vier Versuchsmotoren wurden die zeitlich sehr aufwendigen Partikelmessungen entsprechend Kapitel 4.2 durchgeführt. Am Motor 1VDS18/15 liegt die Partikelemission bei Betrieb mit Rapsöl im unteren Lastbereich deutlich und im mittleren Lastbereich nur geringfügig über der von Dieselkraftstoff. Im Volllastpunkt wird die Partikelemission des Dieseldetriebes am Motor 1VDS18/15 durch den Einsatz von Rapsöl sogar unterschritten. Hierbei kommt der Sauerstoffgehalt des Rapsöles positiv zur Wirkung, der die schlechteren Verdampfungseigenschaften kompensiert. Bei Leerlauf kommt es zu einem starken Anstieg

der Partikelemission. Hier wirkt sich die sehr schleppende Verbrennung negativ aus (**Abbildung 58**). Der Anstieg der Partikelemission im unteren Lastbereich, am VDS18/15,

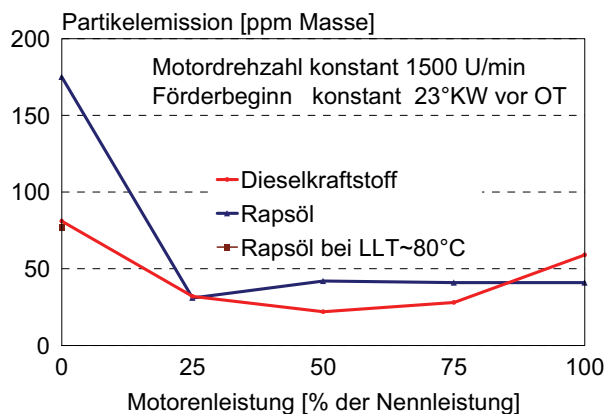


Abbildung 58: Partikelemissionen am Motor 1VDS18/15

ist nicht auf eine Zunahme der Rußanteile zurückzuführen, sondern auf einen stark gestiegenen Gehalt an hochsiedenden nicht vollständig verbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas des Motors. Der Rußanteil an der Partikelmasse im Betriebspunkt Leerlauf ist sehr gering. Die Zunahme der Partikelemission im Leerlauf korreliert hier mit zunehmenden CO- und HC-Emissionen.

Eine Erhöhung der Ladelufttemperatur im Leerlaufpunkt auf 80 °C senkte beim Rapsölbetrieb die Partikelemissionen auf das Niveau von Dieselmotorkraftstoff, weil die Verbrennung früher und vollständiger stattfand. (**Abbildung 58** und **Abbildung 32**).

Am Motor HD 6068 liegen die Partikelemissionen im Rapsölbetrieb in allen höheren Lastpunkten deutlich unter denen im Dieselmotorkraftstoff auf einem sehr geringen Niveau. Ursache hierfür ist die effektive Gemischbildung in Verbindung mit dem Sauerstoffgehalt des Rapsöles, die die Rußentstehung minimiert und die Rußoxidation fördert. (**Abbildung 59**). Die erhöhte Ladelufttemperatur bei Leerlauf bewirkt bei beiden Betriebsstoffen eine deutliche Absenkung der Partikelemission.

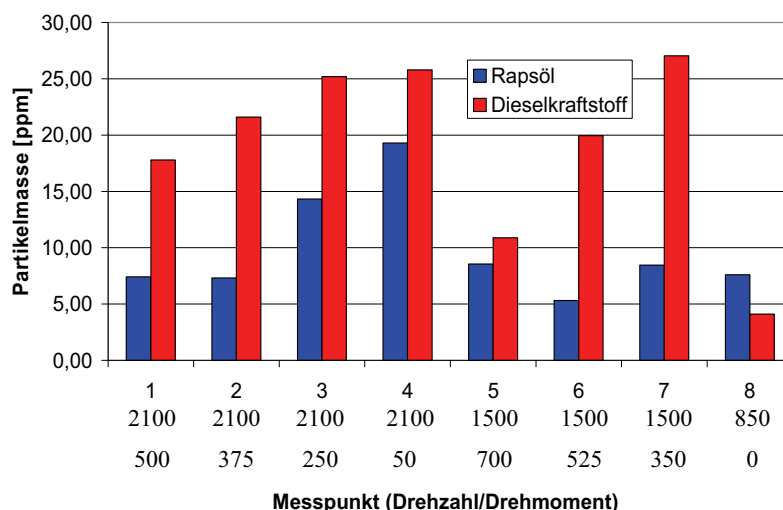


Abbildung 59: Partikelemissionen am Motor 6068 HL 473

5.4.3 Langzeituntersuchungen des Abgasverhaltens

Die Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Abgasemissionen wurden am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock auf zwei verschiedenen Wegen durchgeführt:

1. Abgasmessungen bei den 107 Motorenbetreibern unter feldmäßigen Bedingungen
2. Abgasmessungen ausgewählter 5 Motoren aus der Motorenflotte unter normähnlichen Bedingungen im Maschinenlabor des LKV (Messung im Labor)

Abgasmessungen bei den Motorenbetreibern unter feldmäßigen Bedingungen

Das Messverfahren und die Auswertungsmethoden sind in Kapitel 4.3 dargestellt. Die Sortierung der Motoren für die Auswertung erfolgte, wie auch bei der Bewertung der Leistungen, nach Motorbaureihen, beginnend mit der kleinsten Leistung des Motors innerhalb der Motorbaureihe. Bezüglich des Emissionsverhaltens dieser Motoren erfolgte die Beurteilung und Diskussion der Abgaskomponenten CO, NO_x und der FSN-Zahl. Diese Abgaskomponenten geben in hohem Maße Auskunft über Veränderungen bei der motorischen Verbrennung, die sich aus dem Kraftstoff Rapsöl und dem jeweiligen Umrüstumfang über eine Betriebszeit von maximal 5000 Stunden ergeben. Im **Anhang 7 (Abbildungen 1 bis 16)** sind die innerhalb des Feldversuches vermessenen Abgasemissionen der Rapsölmotoren für zwei Betriebspunkte, an denen hohe Emissionen erwartet wurden, dargestellt.

CO-Emissionen entstehen bei Dieselmotoren im Rapsölbetrieb auf Grund des geringeren Brennraumtemperaturniveaus zum Ende der Energieumsetzung im unteren Teil- und Nulllastbetrieb. Aus diesem Grund wurde der Betriebspunkt Nulllast bei Nenndrehzahl von den fünf vermessenen Betriebspunkten für den Vergleich der CO-Messwerte verwendet. Bei höheren Lasten und Betriebstemperaturen sinken sowohl im Dieselmotoren- als auch im Rapsölbetrieb die CO-Emissionen unter normalen Betriebsbedingungen auf einen geringeren Wert, solange das für Dieselmotoren typische Luftverhältnis nicht unterschritten wird.

Demgegenüber steigt die NO_x-Emission mit dem Brennraumtemperaturniveau mit der Folge, dass die Maximalwerte im oberen Teil- und Volllastbereich eintreten. Der Volllastpunkt wurde als Vergleichspunkt für die NO_x-Messungen verwendet.

CO-Emissionen bei Nulllast und Nenndrehzahl

Deutz-Motor Baureihe BF 4 M 1012 EC

Diese Motorbaureihe ist zehnmal von der Firma VWP und einmal von der Firma LBAG Lüchow auf den Rapsölbetrieb umgerüstet worden. Technische Daten sind:

- 4 Zylinder,
- Ladeluftkühlung mittels Umgebungsluft,
- Verdichtungsverhältnis ε von 17,5,
- 2-Ventiltechnik,
- Mitteldruck von 10,6 bis 12,5 bar,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,22.

Die CO-Emissionen dieser Motoren erhöhten sich in den ersten 2000 Betriebsstunden des Untersuchungszeitraums im Nulllastpunkt nicht signifikant. Es wurden bei den Messungen CO-Emissionseinzelwerte von 197 ppm bis 500 ppm gemessen. Die durchschnittliche CO-Emission im Betrieb mit Dieselmotoren vor der Umrüstung betrug 290 ppm und in den ersten 2000 Betriebsstunden im Rapsölbetrieb durchschnittlich 240 ppm. Bei der Abschlussmessung nach ca. 2400 Betriebsstunden lagen die CO-Emissionen ebenfalls auf einem Durchschnittswert von 240 ppm.

Dagegen musste zum Ende des Untersuchungszeitraumes an Motoren mit 2000 und mehr Betriebsstunden beim Rapsölbetrieb im Lastbereich zwischen 50 und 100 % Nennleistung ein Anstieg der CO-Emissionen auf niedrigem Niveau registriert werden. Der Emissionsanstieg war im oberen Lastbereich mit erhöhten FSN-Werten (Filter Smoke Number), einem sinkenden Sauerstoffgehalt im Abgas (unter 10,0 Vol. %) und erhöhten Abgastemperaturwerten verbunden. Die Anstiege dieser Parameter signalisierten eine Verbrennung mit einem Verbrennungsluftverhältnis unter den Ausgangswerten. Weiterhin muss festgestellt werden, dass auch im Niedriglastbereich fünf der zehn Motoren ihre höchsten CO-Emissionswerte bei der Abschlussmessung nach ca. 2400 Betriebsstunden aufwiesen.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1012 E

Die drei Motoren dieser Motorenbaureihe mit einer Nennleistung von 75 kW sind vom Umrüster VWP für den Betrieb mit Rapsöl angepasst worden. Technische Daten sind:

- 6 Zylinder,
- keine Ladeluftkühlung,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,22,
- 2-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ε von 17,5,
- Mitteldruck von 9,0 bar.

Die gemessenen CO-Emissionswerte lagen in dieser Motorenbaureihe bei zwei Motoren schon während der DK-Referenzmessung auf einem Niveau von 197 bis 230 ppm. Dieses Emissionsniveau setzte sich über den Untersuchungszeitraum fort. Auch bei dieser Motorenbaureihe wurden hohe CO-Emissionen im Lastbereich von 50 % bis 100 % Nennlast schon ab einer Betriebsstundenzahl von ca. 1200 registriert. Diese hohen Emissionen gingen ebenfalls mit einem 50 Kelvin höheren Abgastemperaturniveau, einem geringeren Sauerstoffgehalt im Abgas (unter 10 Vol.%) und höheren FSN-Werten einher. Alle drei

Motoren hatten ihre höchste CO-Emission (im Nulllastbetrieb) bei der letzten Vermessung nach 2400 Betriebsstunden im Rapsöleinsatz.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1013 E

25 Motoren dieser Motorenbaureihe mit Leistungsspektrum von 88 bis 120 kW sind von der Firma VWP für den Betrieb mit Rapsöl angepasst worden. Technische Daten sind:

- 6 Zylinder Reihomotor,
- keine Ladeluftkühlung,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,2,
- 2-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ϵ von 17,6,
- Mitteldruck von 6,7 bis 9,2 bar.

25 Motoren dieser Baureihe sind mit Leistungsabstufungen von 88 KW bis 120 KW im Rapsölbetrieb untersucht worden. Die gemessenen CO-Emissionswerte lagen im Nulllastpunkt während des Projektzeitraumes zwischen 150 und max. 350 ppm.

In den ersten 2000 Betriebsstunden betrugen die CO-Emissionen im Rapsölbetrieb im Nulllastpunkt durchschnittlich 165 ppm und lagen damit rund 35 ppm unter dem Durchschnitt der DK-Vergleichsmessung.

Ab einer Laufzeit der Motoren von 2000 Betriebsstunden und mehr war auch hier eine Zunahme der CO-Emissionen im oberen Lastbereich zu beobachten. Wie bei der Motorbaureihe BF 6 M 1012 E beschrieben, wurden hier ebenfalls erhöhte Abgastemperaturen über den gesamten Lastbereich des Motors, ein geringerer Restsauerstoffgehalt im Abgas im oberen Lastbereich bis deutlich unter 10,0 Vol. % und erhöhte FSN-Werte gemessen. Ursache hierfür sind Probleme mit der Verbrennungsluftversorgung und gealterte Einspritzdüsen. Weiterhin muss festgestellt werden, dass auch im Niedriglastbereich 18 der 25 Motoren ihre höchsten CO-Emissionswerte bei der Abschlussmessung nach ca. 2400 Betriebsstunden aufwiesen. Der Durchschnittswert für die CO-Emission für diese Betriebsstundenzahl stieg dadurch auf 260 ppm an.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1013 EC/FC

Die fünf Motoren dieser Motorenbaureihe wurden von der Firma VWP (vier Stück) und Firma Hausmann (ein Stück) umgerüstet. Mit dieser Motorenbaureihe wird für Traktoren mit schweren Feldarbeiten ein Leistungsspektrum von 147 bis 190 kW abgedeckt. Technische Daten sind:

- 6 Zylinder Reihomotor,
- Luft-Luft-Ladeluftkühler,
- Hub/Bohrungsverhältnis v. 1,2,
- 2-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ϵ von 17,6,
- Mitteldruck von 9,9 bis 13,4 bar (hohe Aufladung).

Die gemessenen Emissionen der vier Motoren lagen im Nulllastpunkt zwischen 140 ppm und im Höchstwert bei 380 ppm. Ein Motor (Tre 22) konnte nach mehreren Störungen und Schäden zum Ende der Projektzeit wieder optimal an den Rapsölbetrieb angepasst werden. Ab einer Betriebsstundenzahl von 3000 h wurde bei der Vermessung dieser Motorenbaureihe auch eine verhaltene Zunahme der CO-Emissionen, der Abgastemperaturen auf höherem Niveau, der FSN-Werte und ein sinkender Restsauerstoffgehalt im Abgas im oberen Lastbereich beobachtet. Auch der Motor (Tre 105), der schon die Abgasnorm Euro Stufe II erfüllt, wies bei hohen Lasten nach 2400 h etwas erhöhte CO-Emissionen auf, entsprach aber auch dann noch deutlich den Anforderungen der Abgasnorm Stufe II.

Deutz-Motor Baureihe BF 4 M 2013 C

Die zehn Motoren dieser Motorenbaureihe mit einem Leistungsspektrum von 74 kW bis 90 kW sind von den Firmen VWP (1), Hausmann (8) und LBAG (1) umgerüstet worden. Diese Motoren sind exklusiv in Fendt-Traktoren der 4xx Baureihe montiert. Technische Daten sind:

- 4 Zylinder,
- Luft-Luft-Ladeluftkühler,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,286,
- 4-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ϵ von 18,0,
- Mitteldruck von 11,1 bis 13,1 bar.

Die Vermessung der Motoren aus dieser Baureihe zeigte über den gesamten Projektzeitraum bei den CO-Emissionen im Nulllastpunkt Messwerte von 80 bis 250 ppm im Rapsölbetrieb mit Ausnahme des Motors (TRE 49). Die durchschnittliche CO-Emission im Betrieb mit Dieselkraftstoff vor der Umrüstung betrug 230 ppm, in den ersten 2000 Betriebsstunden im Rapsölbetrieb durchschnittlich 140 ppm. Bei der Abschlussmessung nach ca. 2400 Betriebsstunden lagen die CO-Emissionen der zehn Motoren auf einem Durchschnittswert von 170 ppm. Die Baureihe Deutz 2013 hat niedrigere CO-Emissionen als die Baureihe 1013.

Aber auch bei dieser Motorenbaureihe war zu beobachten, dass nach ca. 4000 Betriebsstunden ein Anstieg der CO-Emissionen im oberen Lastbereich auftrat.

Die hohen CO-Emissionen am Motor (TRE 49) nach ca. 4300 Betriebsstunden sind wahrscheinlich auf Ablagerungen im Gaswechselsystem zurückzuführen, die die Luftzufuhr zum Brennraum behindern und somit das Verbrennungsluftverhältnis stark absinken lassen. Die hohen CO-Emissionen sind verknüpft mit einem niedrigen Sauerstoffgehalt im Abgas von 6,2 Vol. %, einem für diesen Motortyp hohen FSN-Wert von 2,48 und einer hohen Abgastemperatur von 471 °C im Volllastpunkt. Ein Wechsel der Einspritzdüsen bei 4300 Betriebsstunden an dem Motor brachte keine Verbesserung der CO-Emissionen.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 2013 C

Die 13 Motoren dieser Baureihe mit vier Leistungsstufen von 85 bis 132 kW sind von den Firmen Hausmann (11) und VWP (2) dem Rapsölbetrieb angepasst worden. Diese Motoren sind exklusiv in Fendt-Traktoren der 7xx-Baureihe montiert und stellen die 6-Zylinderausführung der Motorenbaureihe BF 4 M 2013 C dar. Technische Daten sind:

- 6 Zylinder Reihomotor,
- mit Luft-Luft Ladeluftkühler,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,286,
- 4-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ϵ von 18,0,
- Mitteldruck von 9,1 bis 13,9 bar.

Es wurden über die Projektzeit bei dieser Motorenbaureihe CO-Emissionen von 70 bis 340 ppm im Nulllastpunkt gemessen. Bei vier Motoren wurden ab einer Betriebsstundenzahl von 2500 bis 3000 h während der jährlichen Leistungs- und Emissionsmessungen erhöhte CO-Emissionen über dem DK-Messwert im Nulllastpunkt registriert. Die durchschnittliche CO-Emission im Betrieb mit Dieselmotortreibstoff vor der Umrüstung betrug 230 ppm, in den ersten 2000 Betriebsstunden im Rapsölbetrieb durchschnittlich 150 ppm. Bei der Abschlussmessung nach ca. 2400 Betriebsstunden lagen die CO-Emissionen bei einem Durchschnittswert von 190 ppm.

Beispielhaft sei hier auf den Motor Tre 78 verwiesen, der bei der Leistungsmessung nach 3672 Betriebsstunden einen Anstieg der CO-Emissionen, der Abgastemperaturen, der FSN-Werte und ein Absinken des Restsauerstoffgehaltes im Abgas unter 10 Vol. % aufwies. Auch hier brachte ein Wechsel der Einspritzdüsen keine Verbesserung der CO-Emissionen. Wenn sich nach einem Wechsel der Einspritzdüsen die CO-Abgasemissionswerte nicht deutlich verbessern, hat bei Motoren ein Zusetzen des Gaswechselsystems (Luftmangel) begonnen. Dagegen zeigte der Motor Tre 1, der 5000 Stunden mit Rapsöl betrieben wurde und über saubere Gaskanäle verfügte, keinen Anstieg in den CO-Emissionen.

Zwei Motoren dieser Baureihe (Tre 114 und Tre 115) mit Leistungen von 125 bzw. 139 kW erfüllten die Abgasnorm Euro Stufe II. In den ersten beiden Überprüfungen nach ein bzw. zwei Jahren wurden sowohl CO-Emissionen (zwischen 100 ppm bis 200 ppm) als auch NO_x -Emissionen entsprechend der Norm Stufe II gemessen. Die Abschlussmessung nach drei Jahren (zum Ende des Untersuchungszeitraumes) zeigte über den gesamten Lastbereich der beiden Motoren Abgaswerte, die typische Anzeichen für eine unvollkommene Verbrennung (basierend auf Luftmangel) aufweisen. Das sind hohe CO-Emissionen, hohe Abgastemperaturen, ein Restsauerstoffgehalt im Abgas unter 10 Vol.% und hohe FSN-Werte im oberen Lastbereich. Bei diesen Motorenbaureihen sollte zweijährig der Zustand der Gaskanäle überprüft werden.

John Deere-Motor Baureihe CD 6068 HLA 71/72/73

Die zehn Motoren dieser Baureihe mit Nennleistungen von 99 bis 118 kW wurden von den Firmen Hausmann (3), Stangl (1) und VWP (6) an den Rapsölbetrieb angepasst. Die Motoren haben als Einspritzanlage eine vollelektronisch gesteuerte Verteilereinspritzpumpe VP 44 der Firma Bosch und 6-Loch-Einspritzdüsen, die schräg und dezentral im Zylinderkopf angeordnet sind. Technische Daten sind:

- 6 Zylinder,
- Luft-Wasser- Ladeluftkühlern
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,19,
- 2-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ε von 16,5,
- Mitteldruck von 8,3 bis 9,9 bar.

Die Messungen zeigen schwankende CO-Emissionswerte bei Nulllast über den gesamten Projektzeitraum von 100 bis zu 500 ppm. Eine mögliche Ursache für die Schwankungen sind unterschiedliche Betriebszustände der an dieser Motorenbaureihe eingesetzten störanfälligen Verteilereinspritzpumpe. Bei den Motoren, die bis 30. September 2005 im Programm waren, sind mit zunehmender Betriebsstundenzahl auch erhöhte CO-Emissionen in allen fünf vermessenen Leistungspunkten des Motors festgestellt worden.

Die durchschnittliche CO-Emission im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff vor der Umrüstung betrug 290 ppm. In den ersten 2000 Betriebsstunden im Rapsölbetrieb wurden durchschnittlich 250 ppm erreicht. Bei der Abschlussmessung nach ca. 2400 Betriebsstunden lagen die CO-Emissionen bei einem Durchschnittswert von 390 ppm. Auch hier ist eine leichte Zunahme zum Ende der Feldüberwachung festzustellen.

John Deere-Motor Baureihe CD 6081 TRW 03 und TRW 12

Die Firmen Stangl, VWP und Hausmann rüsteten jeweils einen Motor dieser Motorenbaureihe mit Nennleistungen von 118 bis 129 kW für den Betrieb mit Rapsöl um. Diese John Deere-Motoren verfügen über eine Reiheneinspritzpumpe der Firma Bosch und schräg im Zylinderkopf angeordnete Einspritzdüsen. Technische Daten sind:

- 6 Zylinder,
- mit Ladeluftkühlung,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,11,
- 2-Ventiltechnik,
- Verdichtungsverhältnis ε von 17,0,
- Mitteldruck von 8,2 bis 9,0 bar.

Über den Untersuchungszeitraum wurden CO-Emissionen von 120 bis 280 ppm gemessen. Es sind bei diesen Motoren keine großen Streuungen der Messwerte zu verzeichnen. An zwei Motoren der Baureihe 6081 TRW 12 (Tre 95 und Tre 64) waren nach 1500 bzw. 2100 h eine sprunghafte Zunahme der CO-Emissionen im Volllastpunkt, eine erhöhte Abgastemperatur und erhöhte FSN-Werte zu beobachten.

Sisu-Motor Baureihen 420.83 – 420.88 und 620.83 – 620.94

Diese Motoren sind von den Umrüstern Gruber KG (10), IGL Landtechnik (1) und Hausmann (3) an den Rapsölbetrieb angepasst worden. Zwölf Motoren verfügen über Verteilereinspritzpumpen des Herstellers Stanadyne mit „langen hydraulischen Wegen“ zwischen Einspritzpumpe und Einspritzdüsen. Dieses „weiche“ Einspritzsystem kann unter Rapsöleinsatz zu Effekten führen, die sich in einer erhöhten Maximalleistung widerspiegeln. In Kapitel 5.2 wird auf dieses Phänomen eingegangen. Mit Bosch-Reihen-Einspritzpumpe waren zwei Motoren (Tre 9 und Tre 2 nach Reparatur) der 6-Zylinder-Motorenbaureihe ausgerüstet. In allen Motoren sind die Einspritzdüsen schräg im Zylinderkopf angeordnet.

Der Motor 420.83 (Tre 42) mit 68 kW Nennleistung ist von der Firma Hausmann mit einem 1-Tank-System an den Rapsölbetrieb angepasst worden. Der Motor 420.88 (Tre 4) mit 69 kW Nennleistung wurde von der Firma Gruber KG mit einem 2-Tank-System umgerüstet. Technische Daten dieser zwei Motoren sind:

- 4 Zylinder,
- 2-Ventiltechnik,
- keine Ladeluftkühlung,
- Mitteldruck von 7,0 bis 9,9 bar,
- Verdichtungsverhältnis ϵ von 16,0,
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,11.

Die zwölf Motoren der Baureihen 620.83 – 620.94 mit Nennleistungen von 86 kW bis 125 kW sind von den Firmen Gruber KG mittels 2-Tank-System (10) und der Firma Hausmann nach dem 1-Tank-System (2) für den Betrieb mit Rapsöl umgerüstet worden. Die technischen Daten sind:

- 6 Zylinder,
- Mitteldruck in Abhängigkeit der Leistungsstufe von 7,0 bis 9,9 bar,
- Verdichtungsverhältnis ϵ von 16,0,
- 2-Ventiltechnik,
- mit Ladeluftkühlung (620.87-620.89) keine Ladeluftkühlung (620.92–620.94),
- Hub/Bohrungsverhältnis von 1,11.

Diese Motorbaureihen sind mit dem 2-Tank-System an den Rapsölbetrieb angepasst worden (Ausnahme Motor (TRE 2)). Zum direkten Vergleich konnten hier die Messungen sowohl im Diesel- als auch im Rapsölbetrieb durchgeführt werden.

Auffällig ist das gegenüber anderen Motorentypen geringe CO-Emissionsniveau im DK-Betrieb vor der Umrüstung von max. 260 ppm und einem Durchschnittswert von 170 ppm. Die CO-Emissionswerte im Rapsölbetrieb schwanken von 120 bis 240 ppm auf einem ähnlichen Niveau wie die Deutz-Motoren, aber mit einer starken Streuung. Die zeitgleich vorgenommene Messung im DK-Betrieb zeigt annähernd gleiche Werte der CO-Emissionen im Nulllastpunkt.

Starke Abweichungen in den CO-Emissionen traten auf, wenn sich ein Defekt an der Verteilereinspritzpumpe ankündigte (Tre 60). Dieser Anstieg der CO-Emissionen auf über

600 ppm bei Nulllast ist mit einem Schaden an der Verteilereinspritzpumpe zu begründen. Nach der Reparatur der Verteilereinspritzpumpe lag die CO-Emission wieder bei 195 ppm. Interessant waren auch die gemessenen Emissionswerte an dem Motor Tre 2, der mit einem Eintanksystem umgerüstet wurde. Nach dem Wechsel der Verteilereinspritzpumpe in eine Bosch-Reiheneinspritzpumpe (sechs Monate nach der ersten Umrüstung) war über die gesamte Projektlaufzeit keine signifikante Abweichung der CO-Emissionen festzustellen. Die CO-Emissionen im Rapsölbetrieb lagen sehr niedrig und reichten von 100 bis 190 ppm.

Sonstige Motor-Baureihen

Neben den mehrmals vertretenen Motorentypen wurden noch Motorentypen mit nur ein oder zwei Motoren im Feldtest betreut. Auf Grund der geringen Motorenanzahl sind die Aussagen bezüglich der Emissionen nicht ausreichend für eine Auswertung. Die Messwerte sind in **Anhang 7 Abbildung 8** aufgeführt.

Fazit zu den Messungen der CO-Emissionen:

Die CO-Emissionswerte der 107 Motoren zeigten in den fünf vermessenen Betriebspunkten bei den Erstvermessungen im DK-Betrieb insgesamt niedrige Emissionswerte mit sehr hohen Schwankungen zwischen baugleichen Motoren. Die Werte wichen bei gleicher Motorbaureihe mitunter 200 bis 250 ppm voneinander ab. Das sind Differenzen von 50 %, bezogen auf den maximalen Messwert. Die Differenzen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf stark unterschiedliche Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte), die bei einem Feldversuch nicht zu beeinflussen sind, zurückzuführen. Die Umgebungstemperaturen bei den Messungen schwankten zwischen minus 10 °C und plus 38 °C. Auch die CO-Messungen im Rapsölbetrieb wiesen ähnliche Schwankungen, wie die Ausgangsmessung mit Dieseldieselkraftstoff, auf. Diese Streuung war zu erwarten, da auch diese Messungen den meteorologischen Randbedingungen unterlagen.

Die jährlichen Wiederholungsmessungen bzw. nach ca. 800 und 1600 Stunden zeigten in den ersten 30 Monaten des Untersuchungszeitraumes eine Verringerung der CO-Emissionen bei über zwei Drittel der Motoren. Diese Reduzierung der CO-Emissionen bei den Motoren lag über 15 %, ist aber auf Grund der hohen Schwankungsbreite nicht genauer quantifizierbar. Die CO-Emissionen der Motoren sowohl im Diesel- als auch im Rapsölbetrieb sind sehr gering und liegen, wenn man sie auf den Abgastest nach Richtlinie 2000/25/EG vom 22. Mai 2000 hochrechnet, weit unter dem festgelegtem Grenzwert.

Bei längerem Betrieb der Motoren mit Rapsöl – mehr als 30 Monate oder mehr als 2400 Betriebsstunden – und in Abhängigkeit des Einsatzspektrums der Motoren ist eine minimale Zunahme der Kohlenmonoxidemissionen bei ca. 50 % der Feldtestmotoren festzustellen.

Diese Zunahme betraf alle Motorenfabrikate in den fünf gemessenen Lastpunkten auf der Generatorkennlinie, also nicht nur den Nulllastpunkt. Die Abgastemperaturen bewegten sich bei den betroffenen Motoren in allen Lastpunkten auf einem 30 bis 50 °C höherem Temperaturniveau gegenüber der Ausgangsmessung. Gleichzeitig wurden höhere FSN-Zahlen und geringere Sauerstoffkonzentrationen im Abgas gemessen. Eine Verbesserung der CO-Emissionen bei diesen Motoren durch Austausch der Einspritzdüsen war nicht festzustellen. Die Ursache liegt m.E. in Ablagerungen in den Gaskanälen der betroffenen Motoren, die sich nach 2000 Stunden angesammelt haben. Eine geschlossene Nachweiskette über Entstehung und Auswirkungen von Ablagerungen innerhalb des Ansaugsystems im Rapsölbetrieb wurde aus ökonomischen Gründen bislang nicht erstellt. Auch mit diesen gestiegenen CO-Emissionen liegen die Motoren sehr deutlich unter dem Grenzwert (50% des Grenzwertes). Vergleichswerte von Maschinen im reinem Dieselmotorbetrieb nach 2400 bzw. 3000 Stunden sind bisher nicht veröffentlicht worden und können daher nicht als Referenz benutzt werden.

Diese Veränderungen waren unabhängig von der Motorenbaureihe, sind aber höchstwahrscheinlich abhängig vom Einsatzspektrum der Motoren. Es waren hauptsächlich Motoren betroffen, die saisonal vorwiegend für leichte Arbeiten (Niedriglast) eingesetzt worden waren.

Stickoxidemissionen bei Volllast

Wie schon zuvor erläutert, wird der Volllastpunkt der Motoren als Vergleichspunkt für die Bewertung verwendet, da an diesem Betriebspunkt die höchsten Brennraumtemperaturen und NO_x-Emissionen auf der Messkurve auftreten sollten.

Deutz-Motor Baureihe BF 4 M 1012 EC

Über den gesamten Projektzeitraum wurden an neun von zehn Motoren dieser Motorenbaureihe fast konstante NO_x-Emissionen im Rapsölbetrieb mit Maximalwerten um die 1000 ppm gemessen. Eine Ausnahme bildete Motor TRE 24, bei dem an vier aufeinander folgenden Messungen (0 bis 2400 Betriebsstunden) NO_x-Werte in der Größenordnung von 1400 ppm festgestellt wurden. Die Ursache für den Anstieg der NO_x-Emissionen durch die Umrüstung konnte über den Versuchszeitraum weder ermittelt noch behoben werden. Bei den weiteren acht Umrüstungen dieses Motortyps mit demselben Umrüstkonzept trat diese Schwierigkeit nicht auf.

Durch die Umrüstung dieser Motorenbaureihe auf Rapsölbetrieb kam es zu einem leichten Anstieg der NO_x-Emissionen. Sie lagen in der Ausgangsmessung mit Dieselmotor bei ca. 750 ppm, während direkt nach der Umrüstung bei den zehn Motoren durchschnittlich 1030 ppm gemessen wurden. Die NO_x-Emissionen dieser Motorenbaureihe haben sich bei den

Wiederholungsmessungen über den Beobachtungszeitraum gegenüber der ersten Vermessung im Betrieb mit Rapsöl nicht signifikant verändert.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1012 E

Diese Motorenbaureihe ist mit der obigen Baureihe baugleich, aber als 6-Zylinder-Motor ohne Ladeluftkühlung ausgeführt. Die drei untersuchten Motoren sind für eine Leistung von 75 kW ausgelegt. Für die Unterschiede im Emissionsverhalten gilt ebenfalls das im zuvor genannten Abschnitt Gesagte, das bei gleichen Konstruktions- und Betriebsparametern pro Zylinder auch zu erwarten war.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1013 E

25 Motoren dieser Baureihe ohne Ladeluftkühler sind mit Leistungsabstufungen von 88 bis 120 KW im Rapsölbetrieb betrieben und untersucht worden. Die durchschnittliche NO_x-Emission dieser Motorenbaureihe betrug bei der Referenzmessung mit Dieselkraftstoff 920 ppm. Direkt nach der Umrüstung kam es zu einem leichten Anstieg der NO_x-Emission auf den Durchschnittswert von 1130 ppm. Die erhöhten Werte konnten durch Anpassungsmaßnahmen bis zu den Folgemessungen (bei ca. 800 und ca. 1600 Betriebsstunden) auf durchschnittlich 950 ppm reduziert werden.

Die vor Beendigung der Projektlaufzeit durchgeführten NO_x-Emissionsmessungen zeigten bei fünf Motoren dieser Baureihe einen geringfügigen Anstieg der Emissionen in dem Betriebszeitraum von 1600 bis 2400 Betriebsstunden.

Innerhalb dieser Motorenbaureihe ist bei Motoren mit verschiedenen Nennleistungen kein signifikanter Unterschied im Emissionsverhalten der Motoren festzustellen. Es gab bei jeder Nennleistung einen Motor der 25 untersuchten, der in seinem Emissionsverhalten gegenüber den Durchschnittswerten nach oben merklich abwich.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1013 FC

Die Motoren im Leistungsbereich von 135 bis 175 KW sind mit einem Ladeluftkühler ausgerüstet. Die NO_x-Emissionen der fünf untersuchten Motoren im Volllastpunkt bewegten sich von 510 bis 1030 ppm und sind damit messbar niedriger als beim Motor BF 6 M 1013 E ohne Ladeluftkühler. Der Ladeluftkühler bewirkt eine Reduzierung der Temperatur der Frischladung, eine größere Frischgasmenge und damit eine Verringerung der Prozesstemperaturen im Brennraum.

Motor Tre 105, der schon die Abgasnorm Euro Stufe II erfüllen muss (Erstzulassung nach dem 1. Juli 2003), hat NO_x-Emissionswerte im Rapsölbetrieb von 500 ppm bis max. 650 ppm über die gesamte Projektzeit. Hier wird die Stickoxidreduzierung der Abgasstufe EURO II gegenüber der Abgasstufe EURO I deutlich.

Deutz-Motor Baureihe BF 4 M 2013 C

Zehn Motoren dieser Baureihe kamen mit Leistungsabstufungen von 74 bis 90 kW in der Felderprobung zum Einsatz. Die Motoren verfügen über einen Luft-Luft-Ladeluftkühler.

Die durchschnittliche NO_x-Emission dieser Motorenbaureihe betrug bei der Referenzmessung mit Dieselkraftstoff 970 ppm. Direkt nach der Umrüstung kam es zu einem leichten Anstieg der NO_x-Emission auf den Durchschnittswert von 1100 ppm. Die Schwankungsbreite der NO_x-Emissionen zwischen den Motoren ist bei dieser Motorenbaureihe, verglichen mit den zwei Ventilmotoren BF XM 1012 und 1013, wesentlich geringer. Die durchschnittlichen NO_x-Emissionen der zehn Motoren waren bei diesen verbrauchsgünstigen Maschinen im Rapsöl- und Dieselpetrieb etwas höher als bei den Zweiventilmotoren. Die gemessenen Spitzenwerte der NO_x-Emission dieser Motoren waren demgegenüber aber deutlich kleiner als die Spitzenwerte der zwei Ventilbaureihen BF X M 1012 und 1013 begründet durch eine geringere Serienstreuung.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 2013 C

13 Motoren dieser Baureihe kamen mit Leistungsabstufungen von 92 bis 118 kW in der Dauerlauferprobung zum Einsatz. Die Motoren verfügen über einen Luft-Luft Ladeluftkühler. Zwei der 13 Motoren unterlagen der Abgasnorm Stufe II.

Die durchschnittliche NO_x-Emission dieser Motorenbaureihe der Abgasstufe 1 betrug bei der Referenzmessung mit Dieselkraftstoff 1030 ppm. Direkt nach der Umrüstung kam es zu einem leichten Anstieg der NO_x-Emission auf den Durchschnittswert von 1200 ppm. Damit liegt die NO_x-Emission der 6-Zylinder-Variante dieser Baureihe über den Werten der 4-Zylinder-Variante. Die NO_x-Emissionswerte dieser Motoren veränderten sich über den Beobachtungszeitraum kaum; der Durchschnittswert lag zum Abschluss wiederum bei 1200 ppm. Die Schwankungsbreite zwischen den Motoren ist ähnlich gering wie bei der 4-Zylinder- Variante.

Zwei Motoren (Tre 114 und Tre 115) dieser Baureihe erfüllten die Abgasnorm Euro, Stufe II. Die Emissionsmessungen über einen Zeitraum von zwei bzw. drei Jahren ergaben NO_x-Werte von 620 bis 835 ppm, also nahezu 200 bis 400 ppm niedriger als bei den Motoren der Abgasnorm Euro, Stufe I. Veränderungen der Emissionen während der Laufzeit traten auch hier nicht auf.

John Deere-Motor Baureihe 6068 HLA 71/72/73

Acht Motoren dieser Baureihe mit Leistungen von 99 bis 118 kW sind untersucht worden. Die Motoren sind mit Luft-Wasser- Ladeluftkühlern ausgerüstet.

Die durchschnittliche NO_x-Emission dieser Motorenbaureihe betrug bei der Referenzmessung mit Dieseldieselkraftstoff 1050 ppm. Direkt nach der Umrüstung kam es zu einem leichten Anstieg der NO_x-Emission auf den Durchschnittswert von 1100 ppm. Die NO_x-Emissionswerte dieser Motoren veränderten sich über den Beobachtungszeitraum kaum; der Durchschnittswert lag zum Abschluss wiederum bei 1100 ppm. Die Werte der NO_x-Emissionen dieser Motorbaureihe im Rapsölbetrieb schwankten von 850 bis 1250 ppm im Beobachtungszeitraum, mit Ausnahme des Motors Tre 108.

Der Motor Tre 108 verzeichnete stark ansteigende NO_x-Emissionen über die Laufzeit von 1000 ppm auf 1800 ppm. Diese Veränderungen sind auf Maßnahmen am Einspritzsystem zurückzuführen. An dem Einspritzsystem dieses Motors (Verteilereinspritzpumpe VP44) wurden mehrere Anpassungsmaßnahmen durchgeführt, um die Motorleistung zu garantieren. Diese Anpassungsmaßnahmen wurden ohne gleichzeitige Abgasmessungen durchgeführt.

John Deere-Motor Baureihe 6081 TRW 03/12

Die über die Projektzeit gemessenen NO_x-Emissionen sind für diese Baureihe sehr differenziert zu betrachten. Die Emissionswerte nehmen bei einem Motor von 880 auf moderate 1140 ppm zu. Beim nächsten Motor verringern sich die Werte von 880 auf 760 ppm, um dann bei der Endvermessung wieder auf 1250 ppm anzusteigen. Beim dritten Motor dieser Baureihe nehmen die NO_x-Emissionen im Rapsölbetrieb von 890 auf 755 ppm ab. Bei drei Motoren sind statistische Auswertungen wegen der Vielzahl von Einflussgrößen auf die NO_x-Messungen nicht sinnvoll. Schwerwiegende Ausfälle an den Reiheneinspritzpumpen der drei Motoren, die als Ursache angesehen werden könnten, gab es über die gesamte Projektzeit nicht.

Sisu-Motor Baureihe 620. 82 – 620.94 und 420.83

14 Motoren dieser Motorbaureihen mit einer Leistungsbreite von 88 bis 120 kW sind bewertet worden. Diese Motorbaureihen sind mit dem 2-Tank-System an den Rapsölbetrieb angepasst worden (Ausnahme Motor TRE 2). Zum direkten Vergleich konnten hier die Messungen sowohl im Dieseldieselbetrieb als auch im Rapsölbetrieb durchgeführt werden.

Bei diesen Motoren ist eine unerwartet starke Schwankung der NO_x-Emissionen vor der Umrüstung festzustellen. Zehn Motoren liegen in der DK-Messung im normalen Bereich für diese Motorenklasse mit Werten um die 1000 ppm. Vier Motoren haben dagegen schon im Dieseldieselkraftstoffbetrieb Emissionen von über 1400 ppm, die absoluten Ausnahmen in dem Dauerlauf. Diese vier Motoren, Tre 42, Tre 59, Tre 60, Tre 112 wurden, da anscheinend Änderungen am Motor bereits vor der Umrüstung stattfanden, für die weitere Auswertung nicht mit herangezogen.

Die NO_x-Emissionen können bei dieser Motorenbaureihe erstens an drei baugleichen Motoren Tre 87, Tre 110, Tre 111 (mit wenigen Störungen und Ausfällen an den Verteilereinspritzpumpen) bewertet werden. Die Emissionswerte schwankten bei diesen drei Motoren von 920 bis 1490 ppm. Zum Ende der Projektzeit sind die NO_x-Emissionen bei den drei Motoren auf 830 bis 740 ppm gesunken.

Zweitens konnten ähnlich positive NO_x-Emissionen auch an zwei Motoren (Tre 2, Tre 9) mit der Reiheneinspritzpumpe an unterschiedlichen Umrüstsyste men gemessen werden. Die Messwerte schwankten über die Projektzeit von 950 aufsteigend über 1000 ppm und wieder unter 1000 ppm abfallend. Für diese Motorenbaureihen sind diese Werte also als moderat anzusehen.

Drittens muss festgestellt werden, dass es an den Motoren Tre 4, Tre 11, Tre 38, Tre 30 Störungen in dem Einspritzsystem gegeben hat. Die extrem hohen NO_x-Emissionen und deren Schwankungen lassen sich nur durch die häufigen Ausfälle und Reparaturen an den Verteilereinspritzpumpen und die nachfolgenden Veränderungen am Einspritzsystem erklären, die eine heißere stickoxidreichere Verbrennung zur Folge hatten.

Sonstige Motor-Baureihen

Neben den mehrmals vertretenen Motorentypen wurden noch Motorentypen mit nur ein oder zwei Motoren im Feldtest betreut. Auf Grund der geringen Motorenanzahl sind die Aussagen auch bezüglich der NO_x-Emissionen nicht ausreichend für eine Auswertung. Die Messwerte sind in **Anhang 7 Abbildung 16** aufgeführt.

Fazit zu den Messungen der NO_x-Emissionen:

Bei baugleichen Motoren sind bereits bei der Grundvermessung vor der Umrüstung im Dieselmotortreibstoffbetrieb stärkere Schwankungen der NO_x-Emissionen festgestellt worden. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf stark unterschiedliche Umgebungsbedingungen, die bei einem Feldversuch nicht zu beeinflussen sind, zurückzuführen. Die NO_x-Emissionen der Motoren im DK-Betrieb lagen im Vollastpunkt um die 1000 ppm, mit Ausnahme der 4-Zylindermotoren mit zwei Ventilen und kleiner Leistung. Bei diesen lagen die Werte bei 750 ppm.

Durch die Umrüstung auf den Rapsölbetrieb kam es im Verhältnis zum Betrieb mit Dieselmotortreibstoff zu einer Erhöhung der NO_x-Emissionen. Die Zunahme der Emissionen schwankt von Baureihe zu Baureihe, beträgt aber mindestens 100 ppm, also ca. 10 % des Ausgangswertes.

Die NO_x-Emissionen im Rapsölbetrieb, als Mittelwert über die Motoren einer Baureihe, waren während des Untersuchungszeitraums bei den Motoren ohne Störungen am

Einspritzsystem fast konstant. Die Schwankungen der NO_x-Emissionen zwischen den Motoren einer Baureihe waren bei den 2-Ventilmotoren größer als bei den 4-Ventilmotoren.

Die fünf Motoren der Untersuchung, die laut Gesetz bereits die Abgasstufe II einhalten müssen, zeigten deutlich geringere NO_x-Emissionen. Diese lagen auch im Rapsölbetrieb ca. 40 % unter den Werten der Motoren mit Abgasstufe I.

Durch Veränderungen an den Einspritzsystemen nach der Umrüstung bzw. während der Projektzeit kam es bei einigen Motoren zu deutlich erhöhten Emissionen gegenüber der Ausgangsmessung mit Dieselkraftstoff. Diese Veränderungen wurden durch die Umrüster ohne Zustimmung oder Rückkopplung mit dem Motorenhersteller vorgenommen. Dies betrifft insbesondere Sisu-Motoren und John-Deere-Motoren mit Verteilereinspritzpumpen. Die Bewertung der NO_x-Emissionen zeigt den starken Einfluss der Einspritztechnik zur optimalen Einstellung von Einspritzbeginn, Einspritzdauer und Einspritzmenge. Genauso wie auf dem Prüfstand (Kapitel 5.4.2) ist auch im Feldtest festgestellt worden, dass die Stickoxidemissionen im Wesentlichen vom Betriebspunkt und dem Einspritzzeitpunkt abhängen und nur geringfügig durch den Einsatz von Rapsöl erhöht werden. Diese Erhöhung kann durch eine sehr geringe Spätverschiebung des Einspritzbeginns und damit der Verbrennung kompensiert werden.

HC-Emissionen

Wurden die Feldtestmotoren längere Zeit im Leerlauf betrieben, wurde im Dauertest bei den 107 Motoren festgestellt, dass das Abgas den typischen „Fritten-Geruch“ aufwies. Der typische „Fritten-Geruch“ ist auf aromatische Kohlenwasserstoffe und Aldehyde zurückzuführen. Durch Einsatz eines Oxidationskatalysators können Kohlenwasserstoffemissionen und Kohlenmonoxidemissionen deutlich gesenkt werden. Die Emissionen nach dem Katalysator liegen dann bei einigen wenigen ppm. Damit verbunden wird auch der typische Abgasgeruch bis unter die Wahrnehmungsschwelle reduziert. Zukünftige Rapsölmotorenkonzepte sollten eine oxidative Abgasnachbehandlungsstufe enthalten.

Normnahe Abgasmessungen während der Dauererprobung nach Richtlinie 97/68/EG

Während der Dauererprobung im Feld wurden vertiefte Abgasmessungen an fünf Motoren unter „normähnlichen“ Bedingungen durchgeführt. So konnte ein Vergleich der Abgaswerte von unterschiedlichen und gleichen Motorentypen zahlenmäßig am stärksten vertretenen Umrüster erfolgen. Außerdem konnten die feldmäßigen Abgasmessungen der Motoren mit den „normähnlichen“ Abgasmessungen verglichen werden. Hierfür wurden die Motoren in das Maschinenlabor der Lehrstühle LKV/LTT überführt. Bei der normgerechten Messung

erfolgt die Messung des ausgebauten Motors auf einem Motorenprüfstand mit sehr exakter Leistungsmessung. Bei den Versuchen in der Dauerlauferprobung wurden die Motoren in den Arbeitsmaschinen (Traktoren) belassen und die Leistung über eine Zapfwelle abgenommen und gemessen, daher die Bezeichnung „normähnliche“ Bedingungen. Die Messtechnik bei den durchgeführten Abgasuntersuchungen entsprach den Anforderungen der Norm. Folgende fünf Motoren wurden umfangreich vermessen:

- | | | | |
|-----------------|--------------|--------|------------------------|
| • Motor Tre 44 | BF 6M 1013 E | 113 kW | Umrüstkonzept VWP |
| • Motor Tre 98 | 6068 HLA 73 | 118 kW | Umrüstkonzept VWP |
| • Motor Tre 1 | BF 6M 2013 C | 118 kW | Umrüstkonzept Hausmann |
| • Motor Tre 103 | BF 6M 2013 C | 118 kW | Umrüstkonzept VWP |
| • Motor Tre 115 | BF 6M 2013 C | 132 kW | Umrüstkonzept Hausmann |

Die Messung der Abgasemissionen erfolgte im stationären Betrieb der Motoren nach dem Prüfzyklus entsprechend Anhang III der Richtlinie 2000/25/EG vom 22. Mai 2000 und deren Basis Richtlinie 97/68/EG. Diese Prüfzyklen wurden nach dem 8-Phasen-Zyklus (identisch mit dem C1-Zyklus des Entwurfs für die ISO-Norm 8178-4) gefahren und nach Vorschrift gewichtet und ausgewertet; siehe auch Abschnitt 4.2.

Die Motoren Tre 1, Tre 44, Tre 98, Tre 103 liegen in der gleichen Leistungskategorie II und in der gleichen Abgasstufe [Typgenehmigungsstufe] EURO I (Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme), klassifiziert nach den Richtlinien 2000/25/EG und 97/68/EG. Alle vier Motoren halten die Grenzwerte der Stufe I ein, wobei die NO_x-Werte aller Motoren im oberen Bereich des Grenzwertes liegen. Der NO_x-Wert ist auch im DK-Betrieb der kritische Wert bei der Einhaltung der Abgasnorm. Diese Motoren würden im Rapsölbetrieb und im DK-Betrieb die Grenzwerte für die NO_x-Emission der Stufe II der EG-Richtlinie (Inbetriebnahme der Motoren ab 01. Juli 2003) erwartungsgemäß überschreiten.

Der Motor Tre 115 Deutz BF 6M 2013 C mit einer Leistung von 132 kW liegt eine Leistungsklasse höher und wurde wegen seiner Erstinbetriebnahme nach dem 1. Juli 2003 in die Typgenehmigungsstufe II eingestuft. Der Motor erfüllt die Grenzwerte der Abgasstufe EURO II im Rapsölbetrieb. Wie schon bei den vorgenannten Motoren der Stufe I, so liegt auch dieser Motor im oberen Bereich des Grenzwertes bei den NO_x-Emissionen. Der Betrieb der Motoren nahe am Stickoxidgrenzwert ist auch im Betrieb mit Dieselmotoren zu beobachten. Ursache hierfür ist der seit Jahrzehnten bekannte Effekt, dass niedrige Partikel-, HC- und CO-Emissionen mit einem niedrigen Kraftstoffverbrauch korrelieren, während es durch die innermotorische Stickoxidabsenkung zu einer Absenkung der Temperatur bei der

Energiezufuhr kommt, was in der Regel mit einem erhöhten Verbrauch verbunden ist. Da dies unerwünscht ist, werden die Stickoxidemissionen nur soweit abgesenkt, bis die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten sind und der Verbrauch nur minimal ansteigen muss.

Die Abgasemissionen Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Partikel liegen sowohl bei dem Betrieb mit Rapsöl als auch bei vergleichbarem Betrieb mit Dieselkraftstoff bei einem Bruchteil des Grenzwertes. Die Abgasmesswerte dieser 5 Motorenmessungen sind in der **Tabelle 5.4.3.1** aufgeführt.

Tabelle 5.4.3.1: Abgasmessungen an den Motoren 1; 44; 98; 103; 115 nach [88]

Abgasemissionsmessung Motoren 1, 44 ,98 und 103 am 02.07.2003 und
 Abgasemissionsmessung Motor 115 am 06.12.2004

laut Richtlinie 97/68/EG vom 16. Dezember 1997 und laut Richtlinie 2000/25/EG
 vom 22. Mai 2000

Prüfverfahren: 8-Phasen-Zyklus,
 identisch mit dem C1-Zyklus des Entwurfs der ISO-Norm 8178-4

Grenzwerte

		Stufe 1	Stufe 2
CO	g/kWh	5,00	3,50
HC	g/kWh	1,30	1,00
NOx	g/kWh	9,20	6,00
Partikel	g/kWh	0,70	0,20

Testergebnisse

		Motor 1	Motor 44	Motor 98	Motor 103	Motor 115
		Stufe 1	Stufe 1	Stufe 1	Stufe 1	Stufe 2
		BF	BF	6068 HLA	BF 6M 2013	BF
		6M 2013 C	6M 1013 E	73C	C	6M 2013 C
CO	g/kWh	1,565	0,460	0,315	0,452	1,077
HC	g/kWh	0,040	0,075	0,056	0,053	0,027
NOx	g/kWh	8,875	8,251	8,967	8,724	6,052
Partikel	g/kWh	0,098	0,184	0,118	0,063	0,058

5.5 Langzeitverhalten, Dauerfestigkeit und Verschleiß

5.5.1 Langzeitverhalten der Motorleistung

Die Langzeitstabilität der Motorleistung ist ein wesentlicher Punkt bei der Einführung eines neuen Kraftstoffes. Zunächst gilt es hierbei zu untersuchen und zu bewerten, inwieweit der neue Kraftstoff im Dauereinsatz Einfluss auf die Leistung der umgerüsteten Motoren ausübt. Die Leistungsmessungen an den 107 Dauerlaufmotoren (Messverfahren Kapitel 4.3) sind vor

und unmittelbar nach der Umrüstung sowie nach jeweils 800 Betriebsstunden oder einmal jährlich durchgeführt worden. So bestand die Möglichkeit, Veränderungen, die sich aus dem Rapsölbetrieb hinsichtlich der Motorleistung ergaben, während der Dauerlaufuntersuchungen festzustellen und zu dokumentieren. Alle Motoren sind mindestens drei- bis viermal im Rapsölbetrieb vermessen worden. Die Motorleistungen im Rapsölbetrieb bezogen auf die Motorleistung vor der Umrüstung im Betrieb mit Dieselkraftstoff sind im **Anhang 7 Abbildungen 1 bis 8** dargestellt. Da die Messungen im Feldversuch durchgeführt worden sind, ergaben sich vielfältige Einflüsse auf die Motorleistung, die sich dann in den Messwerten widerspiegeln, wie:

- unterschiedliche Außenlufttemperaturen von -5 °C bis +30 °C,
- unterschiedliche Luftfeuchtigkeiten und Luftdrücke,
- veränderliche Lüfterdrehzahlen (in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur),
- veränderliche Getriebeöltemperatur bei luftgekühlten Getriebeölkühlern.

Die wissenschaftliche Auswertung der Leistungs- und Emissionsmessungen wurde nach eingesetzten identischen Motorenbaureihen, dann aufsteigend nach der angegebenen Leistung geordnet, vorgenommen. So konnte das Leistungs- und Emissionsverhalten innerhalb einer Motorenbaureihe mit seinen Leistungsabstufungen bewertet werden. Analysiert wurden folgende Motorenbaureihen:

- Deutz-Motoren,
- John Deere-Motoren,
- Sisu-Motoren,
- Same-Deutz-Fahr-Motoren.

Motorenbaureihen mit weniger als drei Motoren im Dauerlauftest wurden nicht ausgewertet, da keine ausreichenden Vergleichsmöglichkeiten bestehen. An dieser Stelle sei wiederholt erwähnt, dass im Dauerlauftest Motoren aus 24 Motorenbaureihen mit 58 unterschiedlichen Nennleistungen (Applikationen) betreut und ausgewertet worden sind. Die Motorenhersteller hatten keine offizielle Zustimmung zu dem Projekt „Einsatz von Rapsöl in Motoren“ gegeben. Die Umrüstungen haben das Ziel, dass die Nennleistung und die Drehmomentencharakteristik der Rapsölmotoren mit den Ausgangsmotoren im Dieselbetrieb identisch sind. Abweichungen unter zehn Prozent sind durch die meisten Motorenbetreiber in dem Projekt akzeptiert worden.

Deutz-Motoren

Die Leistungsmessungen der in Deutschland gefertigten Deutz-Motoren mit den Baureihen BF 1012, BF 1013 und BF 2013 sind im **Anhang 8 (Abb. 1 bis 5)** dokumentiert. Diese Deutz-Motoren der oben aufgeführten Baureihen haben in ihrem Konzept gemeinsam die kompakte Ausführung des Motorblocks, die Anordnung des Antriebes (Nockenwelle) der

Einzeleinspritzpumpen, die Unterbringung der Einspritzpumpen selbst im Motorblock und kurze Einspritzleitungen zu den Düsen. Die Baureihen 1012 und 1013 haben die 2-Ventiltechnik mit schräg in den Brennraum eingeführter Einspritzdüse mit der Konsequenz, dass die maximalen Strahllängen unterschiedlich sind. Die Baureihe 2013 hat dagegen die 4-Ventiltechnik, und die Einspritzdüse ist zentral mittig über der Kolbenmulde angeordnet, wodurch alle Einspritzstrahlen den gleichen Raum zur Strahlausbreitung besitzen (symmetrische Einspritzung). Die Einspritzdüsen sind bei allen drei Baureihen ungekühlte 6-Loch-Düsen.

Deutz-Motor Baureihe BF 4 M 1012 EC

Diese Motorbaureihe ist zehnmal von der Firma VWP und einmal von der Firma LBAG Lüchow auf den Rapsölbetrieb umgerüstet worden. Während zwei Motoren Leistungen von 110 bis 115 % der Dieselmotoren-Ausgangsleistung über den gesamten Beobachtungszeitraum aufwiesen, erreichten die anderen neun Motoren in der Vermessung direkt nach der Umrüstung nur 88 % der Leistung der DK-Ausgangsleistung. Durch Optimierungen der Umrüstung (Anpassung des elektronischen Regelstangenwertes an die reale Fördermenge im Rapsölbetrieb) während der ersten 800 Betriebsstunden konnte die Motorleistung angehoben werden. Die neun Motoren erreichten dann durchschnittlich 93 % der DK-Ausgangsleistung, und kein Motor lag mehr unter 85 %. Über die gesamte Projektzeit ist es nicht gelungen, die Motoren dieser Baureihe bezüglich der Motorleistung optimal auf den Rapsölbetrieb anzupassen. Da diese Motoren in Traktoren installiert sind, die fast nur im Teillastgebiet betrieben werden, konnten die Betreiber trotz der geringeren Leistung die notwendigen Arbeiten erbringen.

Beim Vergleich der Motoren Tre 15 (LBAG Lüchow) und Tre 45 (VWP) dieser Baureihe konnte kein Unterschied in der Motorleistung zwischen den unterschiedlich umgerüsteten Motoren erkannt werden. Beide Motoren erreichten über den gesamten Beobachtungszeitraum eine Motorleistung von 88 bis 95 % zur DK-Ausgangsleistung.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1012 E

Die Motoren dieser Motorenbaureihe mit einer Nennleistung von 75 kW sind vom Umrüster VWP für den Betrieb mit Rapsöl angepasst worden. Alle drei Motoren hatten nach der Umrüstung deutlich weniger Leistung als davor – 88 bis 94 % der DK-Ausgangsleistung. Ein Motor lief über die gesamte Beobachtungsdauer mit derartig geringer Leistung (90 %), während die beiden anderen Motoren durch eine optimierte Umrüstung (Anpassung des elektronischen Regelstangenwertes an die reale Fördermenge im Rapsölbetrieb) in der

Leistung angehoben wurden. Die beiden Motoren erreichten dann 106 bis 112 % der DK-Ausgangsleistung im Rapsölbetrieb (**Anhang 8 Abbildung 1**).

Bezüglich der Motorleistung im Rapsölbetrieb ist es dem Umrüster VWP über die gesamte Projektzeit nicht gelungen, alle drei Motoren dieser Baureihe konstant der Leistung im Dieselmotorbetrieb anzupassen. Die höhere Leistung ist nur durch eine veränderte Regelstangenkennlinie erreichbar, die vom Serienhersteller nicht vorgesehen ist. Bei Dieselmotorbetrieb würde die Motorleistung deutlich zunehmen – eine thermische Überlastung der brennraumumschließenden Bauteile wäre die Folge.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1013 E

25 Motoren dieser Motorenbaureihe mit Leistungsspektrum von 88 bis 120 kW sind von der Firma VWP für den Betrieb mit Rapsöl angepasst worden. Die mittlere erreichte Leistung nach der Umrüstung durch VWP betrug bei dieser Motorenbaureihe 98 %, bezogen auf die Ausgangsvermessung mit Dieselmotorstoff. Allerdings ist hierzu festzustellen, dass diese nicht zuletzt auf einer sehr langwierigen Umrüstung in mehreren Umbaustufen (in den Jahren 2001-2002) beruht. So mussten die Motoren nach einer gewissen Laufzeit (ca. 50 bis 100 Betriebsstunden) erneut zum Umrüster überführt werden (mit Kosten verbunden), um weitere Umrüstmaßnahmen vorzunehmen. Danach erreichten die 25 Motoren während der gesamten Projektlaufzeit gegenüber der Ausgangsmessung mit Dieselmotorstoff folgende Leistungsparameter:

- Leistungen von 98% bis 125 % bei 16 Motoren,
- Leistungen von 90% bis 100 % bei sechs Motoren,
- Leistung von 88 % bei einem Motor.

Auffallend ist bei dieser Motorenreihe (nur ein Umrüster) der große Leistungsunterschied zwischen den einzelnen Maschinen und über den Untersuchungszeitraum. Für den Motor Tre 101 wurde bei der Leistungsmessung nach 1600 Betriebsstunden 125 % der Leistung gegenüber der Dieselmotorstoff-Ausgangsvermessung registriert. Direkt nach der Umrüstung hatte dieser Motor auch nur 95 % der Leistung bezogen auf die Referenzmessung. Die Leistungsschwankungen über den Untersuchungszeitraum waren nicht auf einzelne Motoren begrenzt, sondern treten in jeder Leistungsklasse auf. Die Grafiken über die Motorleistung sind im **Anhang 8 Abbildung 2 und 3** dargestellt. Die deutlich erhöhten Leistungen einzelner Motoren nach 1600 bzw. 2400 Betriebsstunden sind in dieser Größenordnung nicht auf verstärkte Kraftstoffeinspritzung wegen geweiteter Düsenbohrungen (Verschleiß), sondern auf Anpassungsmaßnahmen in der Mengengrenzung des Motorsteuergerätes zurückzuführen.

Deutz-Motor Baureihe BF 6 M 1013 EC/FC

Die fünf Motoren dieser Motorenbaureihe wurden von der Firma VWP (vier Stück) und Firma Hausmann (ein Stück) umgerüstet. Von den Motoren erreichten während der gesamten Projektlaufzeit gegenüber der Ausgangsvermessung mit Dieselkraftstoff:

- 1 Motor eine Motorleistung von 86 bis 103 % aufsteigend (VWP),
- 2 Motoren eine Motorleistung von 97 bis 105 % (VWP),
- 1 Motor eine Motorleistung von 88 bis 96 % (Hausmann) ,
- 1 Motor eine Motorleistung von 104 bis 82 % stark abfallend. Dieser Motor wurde nur zweimal vermessen, da der Betreiber keine weiteren Untersuchungen zuließ (VWP).

Bezüglich der Motorleistung im Rapsölbetrieb konnte bei drei Motoren eine relativ konstante Leistung über den Untersuchungszeitraum festgestellt werden. Beim Vergleich zweier Motoren dieser Baureihe, die einerseits von dem Umrüstern VWP (Tre 40) und andererseits von dem Umrüster Hausmann (Tre 22) an den Rapsölbetrieb angepasst wurden, ist festzustellen, dass es VWP über die gesamte Projektzeit gelungen ist, diesen Motortyp konstant der Leistung im Dieselmotorbetrieb ohne nennenswerte Leistungsschwankungen anzupassen. Die Leistungen des anderen Motors, durch Firma Hausmann umgerüstet, schwankten zwischen 88 und 96 % gegenüber der Ausgangsmessung mit Dieselkraftstoff

Anhang 8 Abbildung 3.

Deutz-Motor-Baureihe BF 4 M 2013 C

Die zehn Motoren dieser Motorenbaureihe mit einem Leistungsspektrum von 74 kW bis 88 kW sind von den Firmen VWP (1), Hausmann (8) und LBAG (1) umgerüstet worden. Von den Motoren erreichten während der gesamten Projektlaufzeit gegenüber der DK-Ausgangsvermessung:

- 6 Motoren eine Motorleistung von 97 bis 109 % (keine signifikante Veränderung über die Zeit der Dauerlauferprobung),
- 3 Motoren eine deutlich steigende Motorleistung über die Zeit der Dauerlauferprobung von ca. 100% direkt nach der Umrüstung auf bis zu 135% nach ca. 2400 Betriebsstunden,
- 1 Motor eine Motorleistung von 99 auf 89 % über die Laufzeit fallend,
- 1 Motor eine Motorleistung von ca. 90 % über die gesamte Laufzeit. Dieser Motor musste durch einen Verkehrsunfall vorzeitig aus dem Projekt entlassen werden.

Bei den Umrüstungen dieser Motorenbaureihe ist festzustellen, dass alle Motoren direkt nach der ersten Umrüstung mehr als 90% gegenüber der Leistung der Ausgangsvermessung mit Dieselkraftstoff aufwiesen. Bei allen drei Umrüstern dieser Motorenbaureihe sind an den Motoren ohne bewusste Leistungserhöhung nur kleine Leistungsschwankungen innerhalb

einer Leistungsstufe nach dem Anpassen an den Rapsölbetrieb festzustellen, **Anlage 8 Abbildung 4**. Die deutlichen Leistungssteigerungen bei drei Motoren sind höchstwahrscheinlich auf Eingriffe bei der Mengengrenzung im Motorsteuergerät zurückzuführen. Insgesamt erforderte diese Motorkonstruktion und Applikation wenig Umrüstaufwand, um diese Ziele zu erreichen.

Deutz-Motor-Baureihe BF 6 M 2013 C

Die 13 Motoren dieser Baureihe mit vier Leistungsstufen von 85 bis 132 kW sind von den Firmen Hausmann (11) und VWP (2) dem Rapsölbetrieb angepasst worden. Von den Motoren erreichten während der gesamten Projektlaufzeit gegenüber der DK-Ausgangsvermessung:

- 9 Motoren eine Motorleistung von 90 bis 110 %, die über den Beobachtungszeitraum fast konstant blieb,
- 4 Motoren eine stark schwankende Motorleistung zwischen 95 und 128 %.

Für diese Motorenbaureihe ist festzustellen, dass direkt nach der ersten Umrüstung die Motoren mindestens 95 % der Leistung der Ausgangsmessung mit Dieselkraftstoff erreichten (Durchschnitt nach Umrüstung 105%). Sieben der elf Motoren hatten während des Untersuchungszeitraumes nur sehr geringe Leistungsschwankungen im Rapsölbetrieb (kleiner als 7 % der DK-Ausgangsmessung). Diese Schwankungen um einen Mittelwert sind auf die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen (Lufttemperatur) bei den Messungen zurückzuführen.

Leistungsunterschiede mit mehr als 15 % zwischen zwei Messungen im Rapsölbetrieb, die bei vier Motoren festgestellt wurden, sind nicht ausschließlich auf die Ansaugbedingungen oder ausgeweitete Düsenbohrungen (Verschleiß) zurückzuführen. Bei diesen Motoren ist anzunehmen, dass die Einspritzmengenbegrenzung im Steuergerät verstellt worden ist. Die Motorenbetreiber wissen, dass diese Motoren für die Landwirtschaft in unterschiedlichen Leistungsklassen angeboten werden und die „kleinen“ Motoren hauptsächlich durch einspritzmengenbegrenzende Maßnahmen aus den leistungsstarken Varianten abgeleitet werden. Im Gegensatz zum PKW- und LKW-Bereich werden kaum Änderungen an den Aufladegruppen oder an Kolben bei unterschiedlichen Leistungsstufen durchgeführt. Dementsprechend gibt es Tendenzen, die kostengünstigere Motorenvariante mit kleinerer Leistung zu erwerben und die Mengengrenzung dem Fahrerwunsch anzupassen.

Zwei Motoren dieser Baureihe (Tre 114 und Tre 115) mussten bereits die Abgasnorm Stufe II einhalten. An diesen weiterentwickelten Motoren traten bezüglich des Leistungsverhaltens im Rapsölbetrieb keine Störungen auf; ihre Leistungen lagen zwischen 92 und 103 % der

Ausgangsmessungen mit Dieselmotoren. Diese Motoren erhielten ebenfalls nur eine Umrüststufe.

John Deere-Motoren

Die Leistungsmessungen der in Frankreich und den USA gefertigten John Deere-Motoren mit den Baureihen CD 4045, CD 6068 und CD 6081 sind im **Anhang 8 Abbildung 6** dokumentiert.

John Deere-Motor Baureihe CD 4045 TLO 71

Die zwei Motoren dieser Baureihe mit Nennleistungen von 66 bzw. 88 kW wurden von der Firma Hausmann umgerüstet und kamen in zwei John Deere-Traktoren zum Einsatz. Die Motoren erreichten während ihrer Einsatzzeit im Rapsölbetrieb gegenüber der DK-Ausgangsleistung:

- 1 Motor eine Leistung von 92 bis 95 %,
- 1 Motor eine Leistung von 115 über die Zeit auf 83 % abfallend, **Anhang 8 Abbildung 6**.

Da es an den Einspritzsystemen sehr starke Probleme gab, sind beide Motoren vorzeitig aus den Untersuchungen herausgenommen und auf den Dieselmotor zurückgebaut worden. An diesen Motoren lag ein schwerwiegendes Problem an dem Einspritzsystem vor, das Dauerhaltbarkeits- und Verschleißuntersuchungen an den Motoren verhinderte.

John Deere-Motor Baureihe CD 6068

Die zehn Motoren dieser Baureihe mit Nennleistungen von 99 bis 118 kW wurden von den Firmen Hausmann (3), Stangl (1) und VWP (6) an den Rapsölbetrieb angepasst. An den Motoren waren, wie bei den Motoren CD 4045 TLO 71, wiederholt umfangreiche Reparaturen an den Verteilereinspritzpumpen notwendig, weshalb auch einige Motoren mit weniger als 1000 Betriebsstunden vorzeitig aus den Untersuchungen ausgeschieden sind. Keiner dieser Motoren erreichte im Untersuchungszeitraum mehr als 2000 Betriebsstunden.

Direkt nach der Umrüstung erreichten die Leistungen der Motoren 85 bis maximal 105 % der Vergleichsmessung vor der Umrüstung mit einem Durchschnittswert von 97 %.

Bei Wiederholungsmessungen an einzelnen Motoren waren starke Schwankungen der Motorleistungen festzustellen. Die Motorleistung sank bei zwei Maschinen in der ersten Wiederholungsmessung auf Werte von ca. 80 % und stieg dagegen bei anderen Motoren dieser Bauart an. Wegen der o. g. Störungen und geringer Betriebsstunden liegen von sechs Motoren nur zwei Messungen im Rapsölbetrieb vor. Diese reichen für belastbare Aussagen in Bezug auf Dauerhaltbarkeit und Verschleiß an diesen Motoren nicht aus.

John Deere-Motor Baureihe CD 6081 TRW 03 und TRW 12

Die Firmen Stangl, VWP und Hausmann rüsteten jeweils einen Motor dieser Motorenbaureihe mit Nennleistungen von 118 bis 129 kW für den Betrieb mit Rapsöl um. Die Leistungen dieser drei Motoren betrugen nach der Umrüstung 97 bis 120 % gegenüber der Motorleistung vor der Umrüstung. Bei weiteren Messungen im Untersuchungszeitraum schwankten die Leistungen zwischen 115% und 150%, **Anhang 8 Abbildung 6**.

Der Motor mit 150 % Motorleistung wurde durch den Umrüster Stangl direkt genutzt und betreut. Dies könnte auch die Ursache für das hohe Leistungsmessergebnis an diesem Motor sein. Der Umrüster ist schriftlich auf die Probleme und Folgen der ständig überhöhten Motorleistung hingewiesen worden. Die Reiheneinspritzpumpen der Firma Bosch und die sehr robusten John Deere-Motoren haben bis zum Ende des Versuchszeitraumes (mehr als 2000 Betriebsstunden) diese hohen Motorleistungen ohne schwerwiegende Ausfälle überstanden.

Sisu-Motor Baureihen 420.83 – 420.88 und 620.83 – 620.94

Das Leistungsverhalten der Motoren des finnischen Herstellers Sisu dokumentiert **Abbildung 7 im Anhang 8**. Diese Motoren sind von den Umrüstern Gruber KG (10), Igl Landtechnik (1) und Hausmann (3) an den Rapsölbetrieb angepasst worden. Direkt nach der Umrüstung zeigten die 14 Motoren im Rapsölbetrieb fast das gleiche Leistungsverhalten wie in der Vergleichsmessung mit DK – ohne große Unterschiede zwischen den Motoren. Die minimale Leistung lag bei 95 %, die maximale bei 109 % und der Durchschnitt bei 101 % der Vergleichsmessungen mit Dieselmotoren.

Der 4-Zylinder-Motor 420.83 (Tre 4) mit dem 2-Tank-System zeigte im gesamten weiteren Beobachtungszeitraum sehr stark steigende Leistungen bis auf 130% der Vergleichsmessung mit Dieselmotoren. Hier lagen höchstwahrscheinlich Veränderungen an der Einspritzmengensteuerung vor. Im Gegensatz dazu fiel bei dem Motor 420.88 (Tre 42) mit dem 1-Tank-System die Motorleistung geringfügig von 96 % auf 88 % der Vergleichsmessung mit Dieselmotoren vor der Umrüstung. Dieser geringe Leistungsabfall kann auf die Messbedingungen und den minimalen Verschleiß zurückgeführt werden.

Sechs Motoren der Motorbaureihe 620 zeigten im weiteren Beobachtungszeitraum ähnliche Motorleistungen wie direkt nach der Umrüstung mit geringen Schwankungen zwischen den Messungen (>5 %). Davon sind drei Motoren ohne Störungen an der Verteilereinspritzpumpe über den gesamten Beobachtungszeitraum gelaufen.

Dagegen hatten die anderen sechs Motoren der Motorenbaureihe 620 stark schwankende Leistungen im weiteren Beobachtungszeitraum. Die Motorleistungen schwankten zwischen

88 und 130 % bezogen auf die Vergleichsmessungen mit Dieseldieselkraftstoff, was auf häufige Störungen, Reparaturen und Einstellarbeiten am Einspritzsystem zurückgeführt werden kann, bei denen die Einspritzmengensteuerung durch die Werkstätten und die Umrüster verändert wurde.

Zwei Motoren der 620-Motorenbaureihe sind mit Reiheneinspritzpumpen ausgestattet. Einer der Motoren Tre 2 wurde von der Firma Hausmann und ein Motor Tre 9 von der Firma Gruber KG umgerüstet.

Der Motor Tre 9 mit Zweitank-System der Firma Gruber erbrachte eine konstante Leistung im Rapsölbetrieb von 92 bis 96 %, bezogen auf die Leistung vor der Umrüstung. Der Motor Tre 2 mit Eintank-System der Firma Hausmann erreichte während der Projektzeit Leistungen von 104 bis 111 %, bezogen auf die Ausgangsmessung mit Dieseldieselkraftstoff. Die höheren Leistungen wurden in der zweiten Projekthälfte gemessen. Auffallend ist hier ein kleiner Leistungssprung von 8 % zwischen der zweiten und dritten Messung. Mit beiden Umrüstkonzepten sind die Motoren mit der Reiheneinspritzpumpe bis zum Ende des Überwachungszeitraumes problemlos gelaufen.

Same-Deutz-Fahr-Motor Baureihen 1000.6 WL, 1000.4 WTI

Im Untersuchungszeitraum der Dauerlauferprobung sind auch je ein Same-Motor 1000.6 WL und 1000.4 W 12 von der Firma Hausmann umgerüstet und wissenschaftlich begleitet worden, siehe auch **Anhang 8 Abbildung 8**. Die 6-Zylinderausführung dieser Baureihe hat eine Nennleistung von 96 kW, während die 4-Zylindervariante 65 kW Nennleistung aufweist. Der 4-Zylinder-Motor erreichte über den Beobachtungszeitraum konstante Leistungen von ca. 110 % gegenüber der Ausgangsvermessung mit Dieseldieselkraftstoff. Der 6-Zylinder-Motor hatte nach der Umrüstung 92 % und erreichte in der Abschlussmessung nach 2000 Betriebsstunden 115 % der Ausgangsleistung mit Dieseldieselkraftstoff. Diese Leistungssteigerungen von 25 % im Rapsölbetrieb sind nur durch Veränderungen der Regelung der Volllasteinspritzmenge möglich. Leistungssteigerungen durch vergrößerte Einspritzmengen auf Basis des Phänomens der langen hydraulischen Wege von den Einzelpumpen zu den Einspritzdüsen und der verringerten Kompressibilität des Rapsöles sollten sich bereits bei der ersten Leistungsmessung im Rapsölbetrieb gezeigt haben.

Sonstige-Motorenbaureihen

Die Einzel-Motorenbaureihen von MAN, Iveco und Cummins waren während des Beobachtungszeitraumes in der Leistungsabgabe sehr schwankend. Sie können auf Grund der vereinzelter Stückzahlen nicht statistisch ausgewertet werden, sind aber der Vollständigkeit halber im **Anhang 8 Abbildung 8** aufgeführt.

Fazit zu den Leistungsmessungen

Die Auswertung der Leistungsmessungen zeigte bei den einzelnen Motorentypen über die gesamte Projektlaufzeit ein differenziertes Leistungsverhalten. So wurden bei gleichen Motorenbaureihen – unabhängig vom Umrüster – sowohl geringe Abweichungen gegenüber der DK-Ausgangsleistung als auch größere Schwankungsbreiten in den abgegebenen Leistungen gemessen.

Die geringsten bzw. keine nennenswerten Schwankungsbreiten in den abgegebenen Leistungen wurden bei den Deutz-Motorenbaureihen BF 4 M 2013C und BF 6 M 2013 C ermittelt. Diese Motorenbaureihen waren in den Fendt-Traktoren der Baureihen 4xx, 7xx und 8xx eingebaut worden.

Prozentual häufigere Leistungsschwankungen wurden während der Vermessungen der Deutz-Motorenbaureihen BF 4 M 1012 EC und BF 6 M 1012 E mit 2-Ventiltechnik registriert. Die Motoren der Deutz-Baureihe hatten nach mehreren Leistungsanpassungen während der Projektlaufzeit trotzdem noch Schwankungen in der Leistungsbreite zwischen 87 und 113 % zur DK-Ausgangsleistung.

Die John-Deere-Motorenbaureihen 6068 HLA 71/72/73 mit angebauten Verteilereinspritzpumpen zeigten über die gesamte Projektlaufzeit Leistungsschwankungen abfallend bis 70 % und aufsteigend bis 118 % zur DK-Ausgangsleistung, wobei gerade die abfallenden Leistungen dem Betreiber deutliche Probleme bereiteten. An den Sisu-Motorenbaureihe 420 und 620 wurden während der Vermessungen ebenfalls größere Leistungsschwankungen registriert.

Bei der Umrüstung der Motoren für den Rapsölbetrieb wurden Veränderungen durchgeführt, die Einfluss auf die Motorleistung hatten. In **Abbild 60** sind die Motorleistungen der 105 Motoren mit Zapfwelle direkt nach der Umrüstung im Rapsölbetrieb, bezogen auf die Messung mit Dieselkraftstoff, dargestellt. 97 % der Motoren haben Leistungen zwischen 80 und 112 % der DK-Leistung. Zwei Drittel der Motoren haben etwas geringere Leistungen als im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Der Mittelwert der Motorleistung, bezogen auf die Ausgangsmessung (DK) liegt bei 98%. Die etwas geringeren Leistungen sind technisch zu begründen mit dem geringeren volumetrischen Heizwert des Rapsöles bei ansonsten gleichen Fördermengen des Einspritzsystems. Leistungssteigerungen im geringen Umfang (bis zu 10 %) sind über die veränderte Kompressibilität des Rapsöls bei hydraulisch „weichen“ Einspritzsystemen zu erklären. Ein darüber hinaus gehender Leistungsanstieg direkt nach der Umrüstung ist auf jeden Fall auf gezielte Veränderungen am Mengenregler zurückzuführen. Zum Ende des Beobachtungszeitraumes hatte die Leistung der Motoren, bezogen auf die DK-

Messung vor der Umrüstung, statistisch zugenommen, siehe **Abbildung 60**. Der Mittelwert der Motorleistung lag schließlich bei 102 %, bezogen auf die Ausgangsmessung mit DK. Dieser durchschnittliche Zuwachs an Motorleistung über die Projektlaufzeit basiert leider nicht auf Leistungssteigerung bei jenen Motoren, die schon direkt nach der Umrüstung geringere Leistungen aufwiesen. Diese Motoren wurden durch die Umrüster und Betreiber

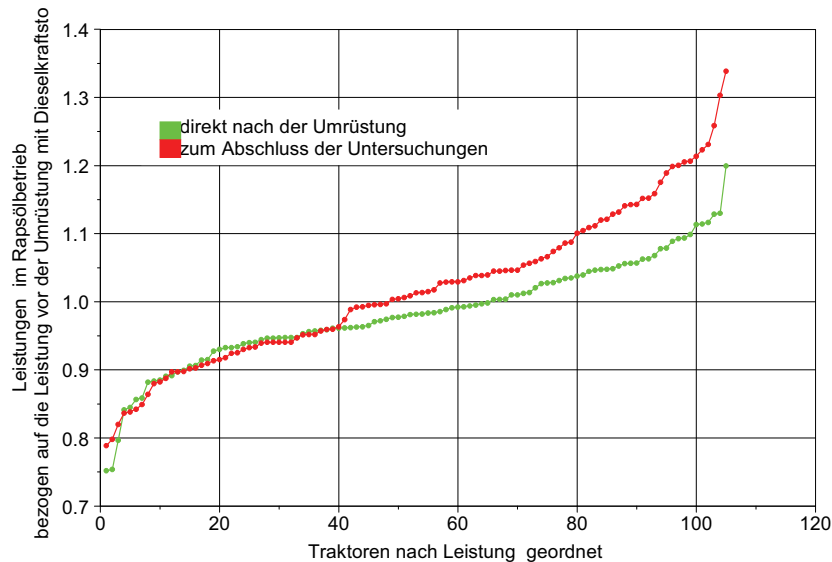
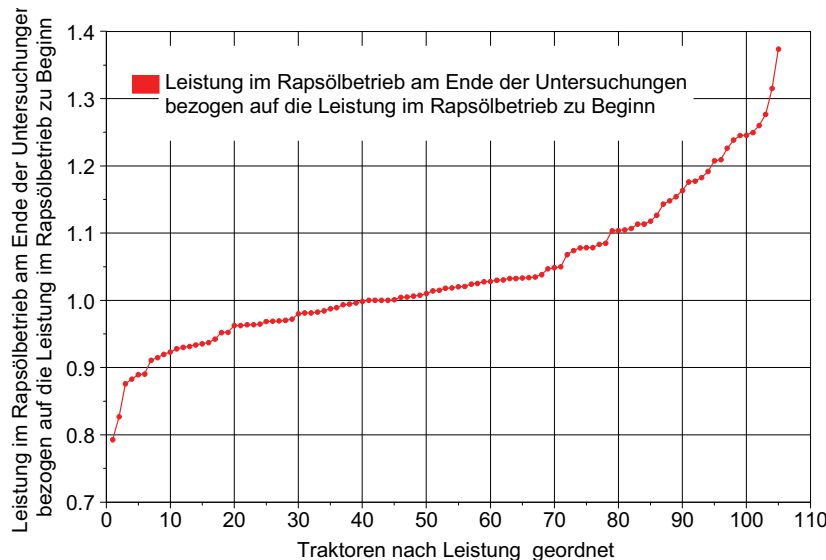


Abbildung 60: Leistung im Rapsölbetrieb

nicht in der Leistung angehoben. Die Motoren mit den Leistungssteigerungen hatten dagegen bereits nach der Umrüstung höhere Leistungen im Rapsölbetrieb als im Dieselfbetrieb, die über Veränderungen am Motor über die Projektlaufzeit weiter gesteigert wurden.

In **Abbildung 61** wird die Motorleistung eines jeden Motors vor und nach der Dauerlauferprobung im Rapsölbetrieb verglichen. Diese gesonderte Darstellung ist notwendig, da in den **Abbildung 60** die Motoren nach gemessener Leistung direkt nach der Umrüstung bezogen auf den DK-Vergleichswert geordnet sind, und die Zuordnung des Motorleistungsparameters zur Motorordnungsnummer in den beiden Diagrammen nicht identisch sein muss. 60 % der Motoren lagen zum Ende der Untersuchungen im Bereich von 95 % bis 105 % der Ausgangsleistung im Rapsölbetrieb. Leistungsschwankungen dieser Größenordnung können auf Messungenauigkeiten bei einer Dauerlauferprobung im Feld zurückgeführt werden. 15 % der Motoren hatten einen geringen Leistungsverlust von 5 bis 8 %. Bei zwei Motoren waren sehr deutliche Leistungsverluste festzustellen, die auf Probleme mit der Umrüstung hinweisen (Kraftstoffversorgung).

25 % der Motoren hatten zum Ende der Erprobung mehr Leistung als zu Beginn; gezählt wurden hierbei alle Motoren mit mehr als 5 % Leistungserhöhung. Leistungssteigerungen von einigen Prozent können aus den Rundungen von Düsenbohrungskanten und damit höheren Einspritzmengen über die Motorenlaufzeit resultieren.



Leistungssteigerungen von mehr als 15 % lassen sich so jedoch nicht erklären, hier ist höchstwahrscheinlich die Kennlinie der maximalen Einspritzmenge pro Arbeitsspiel verändert und damit die Einspritzmenge deutlich erhöht worden.

Abbildung 61: Leistungsentwicklung

Als Ergebnis der Dauerlauferprobung bezüglich der Motorleistung ist festzustellen, dass:

- Motoren im Rapsölbetrieb über mehrere tausend Betriebsstunden die gleiche Leistung wie im Dieselpbetrieb erzielen können.
- dauerhafte Minderleistungen auf Grund schleichenden Verschleißes im Einspritzsystem, Ablagerungen an den Düsen und Verschleiß am Laufzeug bei den 105 untersuchten Motoren nicht festzustellen sind.
- um die gleiche Leistung wie im Betrieb mit Dieselpkraftstoff zu erzielen, bei der Anpassung der Motoren das maximale Fördervolumen der Einspritzeinrichtungen nur gering verändert werden muss. Diese kleinen Einspritzvolumenveränderungen sind mit den Serienausführungen der Einspritzpumpen für den Betrieb mit Dieselpkraftstoff realisierbar.

5.5.2 Verschleiß an den brennraumumschließenden Bauteilen

Zum Ende der Dauerlauferprobung im Rapsölbetrieb wurden einige Motoren zerlegt und die Motorbauteile einer Befundung und Begutachtung unterzogen. Die Auswahl der Motoren erfolgte nach den Kriterien: Motorenbaureihe, Einsatzspektrum, Umrüstkonzept, erreichte Betriebsstunden unter der Voraussetzung, dass während der Erprobung keine Motorteile getauscht worden waren. In die Bewertung der brennraumumschließenden Bauteile wurden Zylinderkopf, Zylinderlaufbuchsen und Kolbenboden mit Brennraummulde einbezogen. Weiterhin wurde in Bezug auf die Verschmutzung durch Schmierölablagerungen der Kipphebelbereich auf der Zylinderkopfoberseite untersucht und bewertet. Nachfolgend werden vier Motoren beispielhaft dargestellt und die Bauteilbefunde und Besichtigungsergebnisse erläutert.

Motor Tre 17 nach 3447 Betriebsstunden (Deutz-Motor TD 226 B-4 – älterer Bauart)

Das Kolbenhemd war optisch sauber und mit einem leichten Ölfilm versehen. Die Ölabstreifringe waren in der Nut nicht mehr frei beweglich, sondern leicht gehemmt. Im Nutengrund begann der Aufbau von Ölkohleablagerungen. Asche- oder Koksablagerungen waren auf den brennraumumschließenden Bauteilen nicht zu erkennen. Der Motor wurde nach der Bestandsaufnahme ohne den Austausch von Teilen wieder zusammengebaut und wird seither weiterhin mit Rapsöl betrieben. Die Zylinderbuchsen zeigten immer noch das Honbild der Feinstbearbeitung.



Abbildung 62: Kolben
des Motors Tre 17 nach [88]



Abbildung 63: Zylinderlaufbuchsen
des Motors Tre 17 nach [88]

Motor Tre 18 nach 3075 Betriebstunden (Deutz-Motor BF 6 M 1013 E)

Der demontierte Motor zeigte insgesamt ein zufriedenstellendes Erscheinungsbild. Die Zylinderlaufbuchsen wiesen über den gesamten Umfang noch das Honbild der abschließenden Feinstbearbeitung während der Fertigung auf. Die Vermessung der Laufbuchsen ergab eine minimale Verschleißmasse von 1/1000 mm. Die Laufbuchsen hatten im Feuerstegbereich über den gesamten Umfang ca. 0,5 mm starke Koksablagerungen, die



Abbildung 64: Zylinderlaufbuchsen
des Motors TRE 18 nach [88]

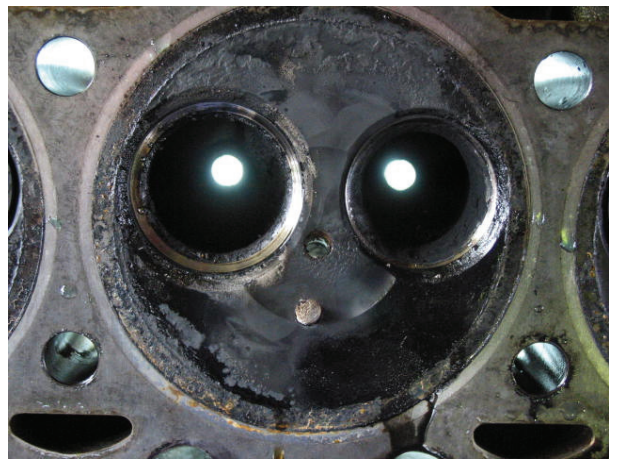


Abbildung 65: Zylinderkopfunterseite
des Motors TRE 18 nach [88]

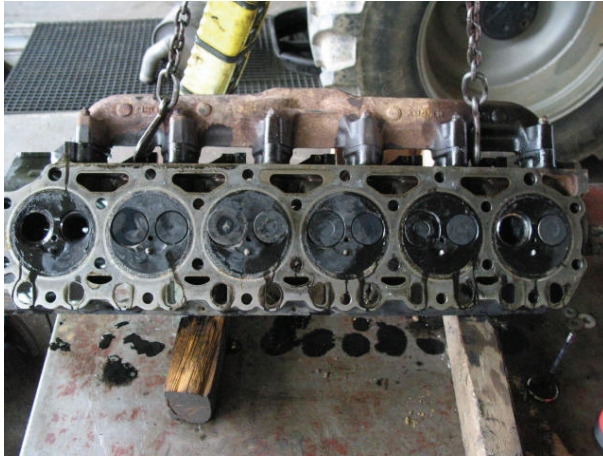


Abbildung 66: Zylinderkopfunterseite
Gesamtbild des Motors Tre 18 nach [88]

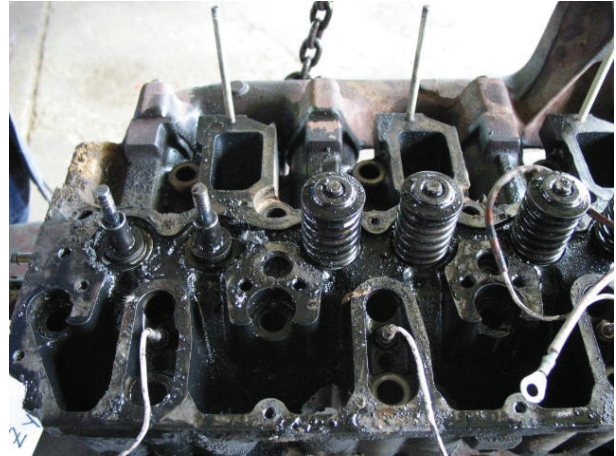


Abbildung 67: Kipphebelbereich
des Motors Tre 18 nach [88]

sich leicht entfernen ließen. Ascheablagerungen (Calcium) sind auf den brennraumumschließenden Bauteilen nicht zu erkennen. Der Motor wurde nach der Bestandsaufnahme ohne den Austausch von Teilen wieder zusammengebaut und wird seither weiterhin mit Rapsöl betrieben. An der Zylinderkopfunterseite kam es zu sporadischen Koksablagerungen auf der Brennraumseite von ca. 0,5 mm Stärke nach 3000 Betriebsstunden, die als unbedenklich einzustufen sind.

Im Kipphebelbereich mit Ventilantrieb zeigte sich eine beginnende Ölschlammbildung an den Ventildfedern von Zylinder 5 und 6. Am Kolbenboden von Zylinder 1 und 2 ist das Abspritzbild der Einspritzdüsen gut sichtbar. Das Abspritzbild auf dem Kolbenboden war von Zylinder 1 bis 4 optimal.

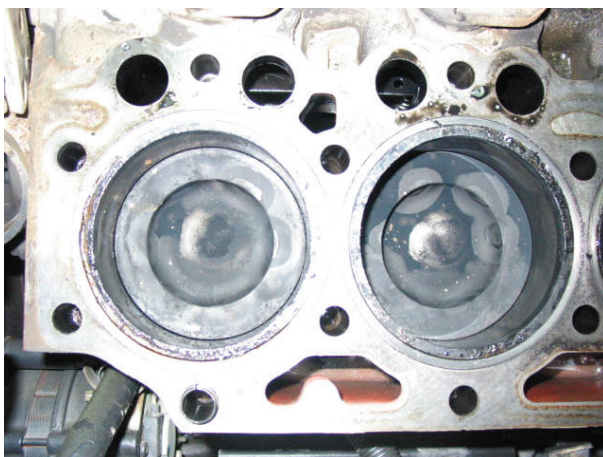


Abbildung 68: Kolbenoberseite Zylinder 1
und 2 des Motors Tre 18 nach [88]

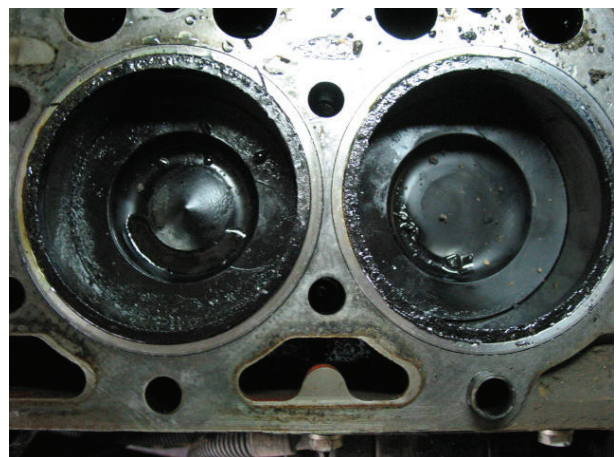


Abbildung 69: Kolbenoberseite Zylinder 5
und 6 des Motors Tre 18 nach [88]

Der Kolbenboden von Zylinder 5 und 6 ist feucht, das Abspritzbild ist nicht sichtbar. Die Einspritzdüse des Zylinder 5 zeigte erste Verschleißerscheinungen und hat beim Abdrücken einen um 20 bar geringeren Abspritzdruck zum Optimaldruck (260 bar). Das schlechte Abspritzbild ist auch auf dem Kolbenboden von Zylinder 5 gut zu sehen. Der Motor wurde

nach der Bestandsaufnahme mit neuen Einspritzdüsen wieder zusammengebaut und wird seither weiterhin mit Rapsöl betrieben.

Motor Tre 1 nach 5030 Betriebsstunden (Deutz-Motor BF 6 M 2013C)

Der demontierte Motor zeigte für seine hohe Einsatzzeit von über 5000 Stunden mit Blick auf mögliche Abnutzungserscheinungen ein sehr gutes Erscheinungsbild. Das Bearbeitungsbild der Zylinderlaufbuchse (Honbild) war gut erhalten und sichtbar. Die Verschleißmessung ergab einen Verschleiß von 1/1000 mm in Längs- und Querrichtung des Motors. Ascheablagerungen sind auf den brennraumumschließenden Bauteilen nicht zu erkennen. Der Motor wurde nach diesem Befund ohne den Austausch von Teilen wieder zusammengebaut und wird seither weiterhin mit Rapsöl betrieben. Die Kolbenböden aller 6 Zylinder sind trocken, die Abspritzbilder der Einspritzdüse (6-Loch-Düse) sind in der Brennraummulde gut



Abbildung 70: Zylinderlaufbuchse des Motors Tre1 nach [88]

sichtbar. Auf der Brennraumseite haben sich am Zylinderkopf in Fortsetzung vom Feuersteg Koksablagerungen ringförmig zur Zylinderbuchsenwandung von ca. 0,5 mm Dicke gebildet, die sich leicht entfernen lassen. Ein in seiner Stärke nicht messbarer Belag von Ascheablagerungen ist an einigen Stellen auf den Ventilen zu erkennen. Die Beläge und Ablagerungen sind als unbedenklich einzustufen.

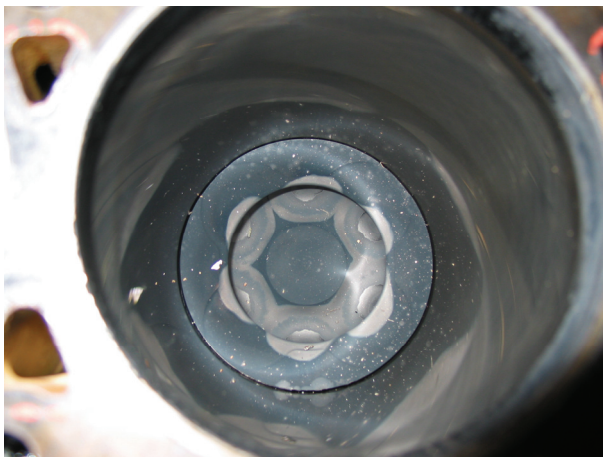


Abbildung 71: Kolbenboden des Motors Tre 1 nach [88]



Abbildung 72: Zylinderkopfunterseite des Motors Tre 1 nach [88]

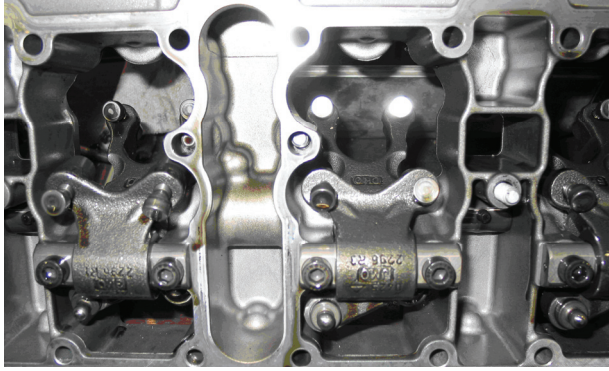


Abbildung 73: Kipphebelhalterraum des Motors Tre 1 nach [88]

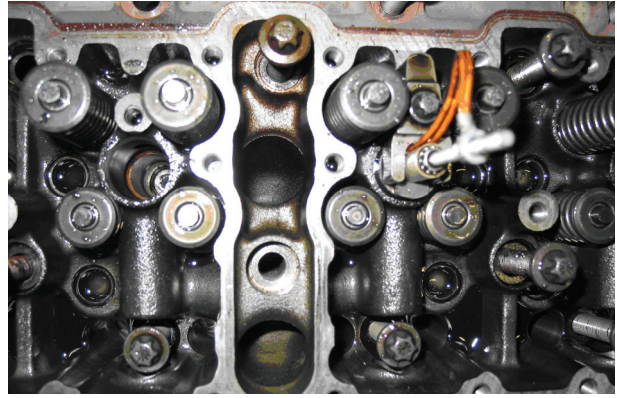


Abbildung 74: Ventilraum des Motors Tre 1 nach [88]

Der Kipphebelhalterraum (Oberseite des Zylinderkopfes) ist metallisch blank, sauber, nicht verschlammt und frei von Ablagerungen. Der Ventilraum des Zylinderkopfes war nicht verschlammt und frei von Ablagerungen

Motor Tre 87 nach 3660 Betriebsstunden (Sisu-Motor Typ 620.94)

Der Motor wurde nach dem 2-Tank-System für den Rapsölbetrieb umgerüstet und zeigte nach den 3660 Betriebstunden hinsichtlich möglicher Abnutzungserscheinungen ein sehr gutes Erscheinungsbild. Das Bearbeitungsbild (Honbild) der Zylinderlaufbuchsen ist noch gut erhalten und sichtbar. Die Verschleißaufmessung ergab einen Verschleiß von 1/1000 mm bis 2/1000 mm in Längs- und Querrichtung. Ascheablagerungen sind auf den brennraumumschließenden Bauteilen nicht zu erkennen. Der Motor wurde nach der Bestandsaufnahme ohne den Austausch von Teilen wieder zusammengebaut und wird seither weiterhin mit Rapsöl betrieben.



Abbildung 75: Zylinderlaufbuchse des Motors Tre 87 nach [88]



Abbildung 76: Kolbenboden des Motors Tre 87 nach [88]

Von Zylinder 1 bis Zylinder 6 sind die Kolbenböden trocken – ohne sichtbaren Einbrand, das Düsenabspritzbild ist abschnittsweise sehr gut zu erkennen.

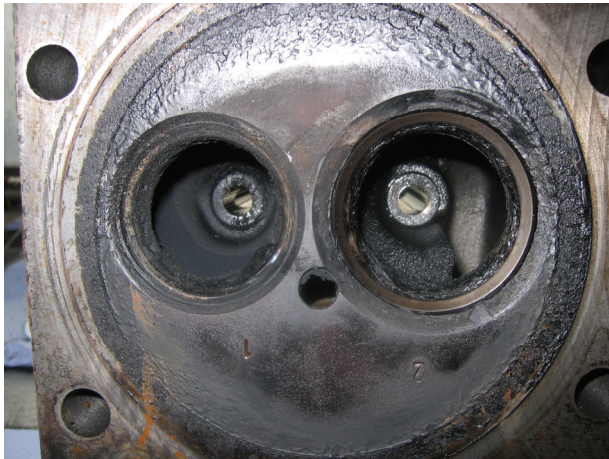


Abbildung 77: Unterseite Zylinderkopf
des Motors Tre 87 nach [88]



Abbildung 78: Oberseite Zylinderkopf
des Motors Tre 87 nach [88]

Auf der Unterseite des Zylinderkopfes (Brennraumseite) hatte sich an allen Zylindern örtlich eine ca. 0,3 mm bis 0,5 mm dicke Ölkohleschicht gebildet. Eine weitere Verstärkung der Ölkohleschicht würde die Wärmeabfuhr vom Verbrennungsraum in den wasserdurchströmten Zylinderkopf behindern. Auf der Oberseite des Zylinderkopfes im Bereich der Ventilsteuerung und Ventildfedern war der Kopf sauber, ohne jegliche Anzeichen von Ölschlammabbildung.

Zusammenfassend kann resümiert werden, dass keine schwerwiegenden Ablagerungen in den Brennräumen der Motoren im Dauertest feststellbar sind. Die Ausnahme bildeten jene Ablagerungen, die als Sekundärschaden nach Störungen an der Hochdruckeinspritzung usw. auftraten. Genauso wenig ist ein überproportionaler Verschleiß an den Laufbuchsen der Zylinder über den Prüfzeitraum festzustellen. Die hohe Gesamtverschmutzung und der Gehalt an Aschebildnern (Calcium) des Kraftstoffes führten – entgegen der Erwartung – zu keinem erhöhten Verschleiß am Laufzeug. Eine ungenügende Schmierung der Kolbenring-Laufbuchsen-Paarung durch den Rapsölgehalt im Schmieröl konnte nicht festgestellt werden. Ablagerungen von Ölschlamm im Zylinderkopfbereich traten nur sehr vereinzelt auf. Zur Eindickung und zum Verlust der Schmierfähigkeit von Ölen kam es an sehr heiß arbeitenden, luftgekühlten Motoren oder wenn die vorgeschriebenen Ölwechselintervalle deutlich überschritten wurden.

Probleme gab es nach mehr als 1000 Betriebsstunden bei einigen Motoren mit der Schmierung der Einlassventilschaftführung. Dieser Effekt trat bei SISU-Motoren und 2-Ventilmotoren von Deutz auf. Durch eine Vergrößerung des Spiels an der Einlassventilschaftführung konnte dieses Problem allerdings bei den beiden Motorenbaureihen gelöst werden.

Probleme mit Lagern (Grundlager, Pleuellager, Nockenwellenlager) traten im Dauerlauf mit rapsölbetriebenen Motoren nicht auf.

5.5.3 Luft- und Abgassystem im Rapsöleinsatz

Um eine optimale Verbrennung im Zylinder zu ermöglichen, muss dieser ausreichend mit Sauerstoff (Verbrennungsluft) versorgt werden. Dies geschieht mithilfe des Ansaugluft- und Abgassystems. Alle Motoren im Dauertest besitzen einen Abgasturbolader (ATL), um die Motoren zur Leistungssteigerung aufzuladen, wie es Stand der Technik ist.

Erfolgt die Verbrennung in einem Motor nicht optimal, kann es zu Rußablagerungen im Abgaskanal und zu Ablagerungen im Absaugkanal kommen. Dieser Effekt ist bei früheren Untersuchungen zum Rapsölbetrieb, Anfang der 90-er Jahre, sehr stark aufgetreten [46; 77]. Dementsprechend sind die Gaskanäle der Motoren im Dauerlauf test systematisch untersucht worden, sodass nachstehend neue Erkenntnisse anhand von vier Beispielen erläutert werden:

Motor Tre 17 nach 3447 Betriebsstunden (Deutz-Motor TD 226 B-4 älterer Bauart)

Der Zylinderkopf zeigte stark zugewachsene Einlasskanäle mit pastösen bis plastischen Ölkohleablagerungen von 3 max. 7 mm Dicke; der Einlasskanal von Zylinder 1 war bis auf eine Öffnung von 12 mm Durchmesser fast zugewachsen. Die Auslasskanäle zeigten außerdem bis max. 1,5 mm starke Ölkohleablagerungen. Durch diese Einlasskanäle war eine ausreichende Luftzufuhr nicht mehr gegeben, was sich unter anderem in einer ansteigenden Abgastemperatur bemerkbar machte. Die Kanäle sind vor der Montage gereinigt worden, wodurch die Abgastemperatur nach der Überholung (Reinigung) deutlich sank.

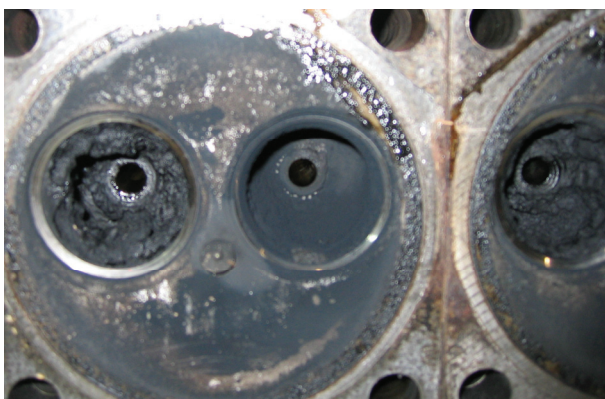


Abbildung 79: Ansaugkanäle des Motors Tre 17 nach [88]

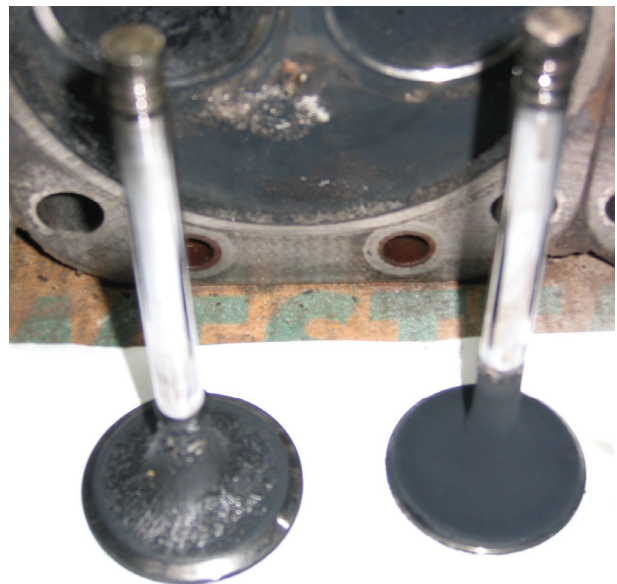


Abbildung 80: Einlass- und Auslassventile des Motors Tre 17 nach [88]

Die Auslassventile waren mit einer dünnen, kaum messbaren Rußschicht belegt. Die Einlassventile zeigten einen Koksauflauf vom Ventilkegel zum Ventilschaft, grießig und leicht entfernbar. Der Einlassventilschaft war ohne Verschleißspuren, die Ventile sind gereinigt worden und werden weiter eingesetzt.

Motor Tre 18 nach 3075 Betriebsstunden (Deutz-Motor BF 6 M 1013 E)

Die Einlasskanäle dieses modernen Motors (besseres Einspritzsystem, 2 Ventiltechnik) waren kaum verunreinigt. Die Einlasskanäle waren mit einem ca. 0,5 mm dicken feuchten Koksaufbau versehen. Die Auslasskanäle waren rußig und trocken, ohne messbare Beläge. Nach geringfügiger Reinigung des Zylinderkopfes wird dieser weiter genutzt **Abbildung 5.5.3.5**. Bei den Einlassventilen kam es zum feuchten und leicht griesigen Koksaufbau im Bereich vom Ventilkegel bis zum Ventilschaft max. 1,0 mm dick, der sich leicht entfernen ließ. Die Auslassventile waren mit einer dünnen kaum, messbaren Rußschicht versehen.



Abbildung 81: Auslassventile des Motors Tre 18 nach [88]

An diesem Motor gab es damit insgesamt keine wesentlichen Ablagerungen, die auf Rapsöl zurückzuführen waren (**Abbildung 81 und Abbildung 83**).



Abbildung 82: Einlasskanal (links); Auslasskanal (rechts) des Motors Tre18 n.[88]



Abbildung 83: Einlassventil des Motors Tre 18 nach [88]

Motor Tre 1 nach 5030 Betriebsstunden (Deutz Motor BF 6 M 2013 C)

Die Einlasskanäle dieses modernsten, am Projekt teilnehmenden Motors waren kaum verunreinigt. Die Einlasskanäle waren feucht, ohne messbare Ölkohleablagerungen. Die Auslasskanäle waren rußig und trocken, ohne Ablagerungen. Nach geringfügiger Reinigung des Zylinderkopfes wird dieser weiter genutzt. Im Übergangsbereich der Einlassventile vom

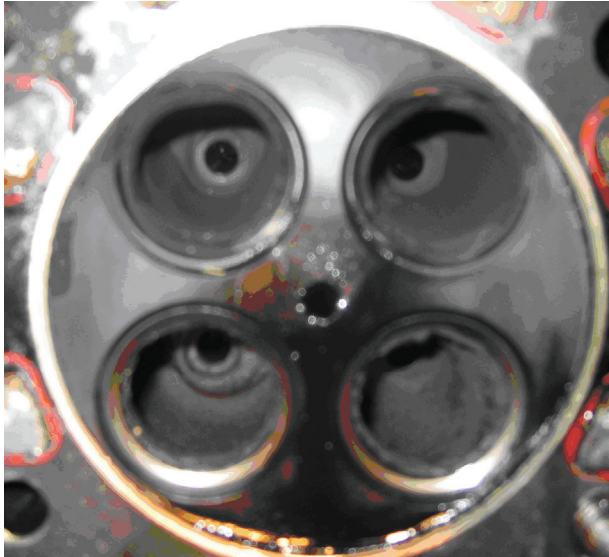


Abbildung 84: Einlass- u. Auslasskanäle des Motors Tre 1 nach [88]

Ventilteller zum Ventilschaft hatte sich ein feuchter bis pastöser Ölkohlebelag pilzartig aufgebaut. Dieser ließ sich manuell leicht entfernen. Die Auslassventile waren vom Ventilteller bis zum Ventilschaft trocken und mit einer dünnen, nicht messbaren Rußschicht belegt. Der Motor wird mit den Originalteilen weiter mit Rapsöl betrieben.

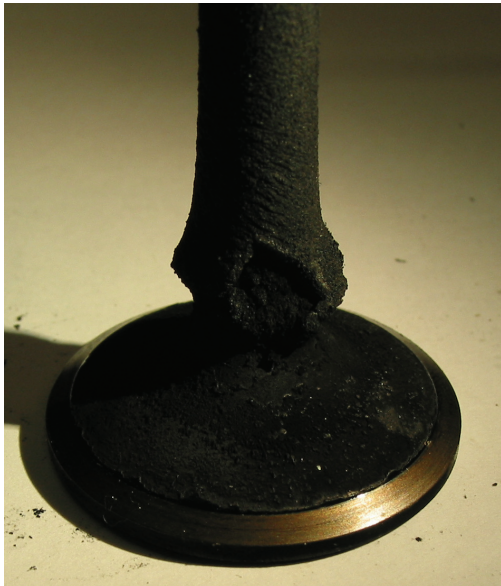


Abbildung 85: Einlassventil des Motors Tre 1 nach [88]



Abbildung 86: Auslassventil des Motors Tre 1 nach [88]

Motor Tre 87 nach 3660 Betriebsstunden (SISU-Motor vom Motortyp 620.94)

Nur an den Einlasskanälen in der Nähe des Ventilsitzes hatte sich ein harzartiger bis fester Belag von unverbranntem Kraftstoff aufgebaut. In den übrigen Bereichen waren die Gaskanäle metallisch sauber. Die positive Wirkung der Drallnase zur Luftführung im Einlasskanal war sehr gut sichtbar. Bei den Auslasskanälen von Zylinder 1 bis 6 zeigte sich in der Nähe der Ventilsitzfläche ein fester Koksansatz von ca. 1-2 mm Stärke, der sich nur mechanisch entfernen ließ. Diese Ablagerungen waren deutlich kleiner als am Motor 17 (oben zuerst beschriebener Zylinderkopf). Der Zylinderkopf ist gereinigt worden und wird weiter verwendet.

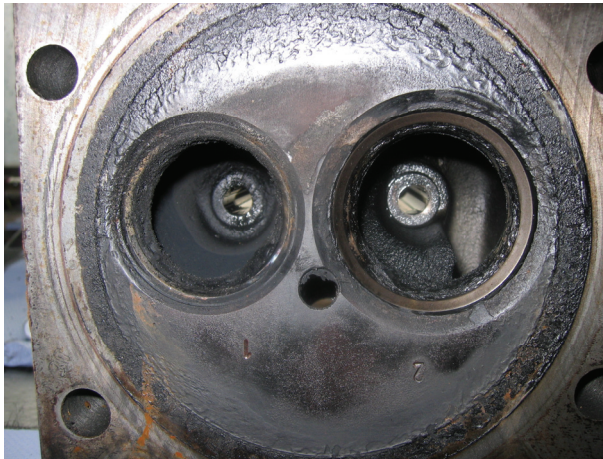


Abbildung 87: Auslasskanal (links)
Einlasskanal (rechts) des Motors TRE87 n.[88]



Abbildung 88: links Einlassventile,
rechts Auslassventil des Motors TRE87 n.[88]

Die Einlassventile zeigten einen grießigen Koksaufbau im Bereich vom Ventilteller bis zum Ventilschaft auf ca. 40 % der Fläche, der sich leicht entfernen ließ. Im Hubbereich des Ventilschaftes war kein Belag sichtbar. Auf allen Ventilen war die Wirkung der Drallnase zur Luftführung sehr gut erkennbar.

Die Auslassventile zeigten eine rußige, trockene Oberfläche, einen schwachen Belagaufbau im Hubbereich des Ventilschaftes, aber nicht über den gesamten Umfang (**Abbildung 88**).

Es ist festzustellen, dass bei den 107 Dauerlaufmotoren die Probleme der vergangenen Jahre mit Ablagerungen in den Abgaskanälen bereits nach 200 Betriebsstunden nicht mehr aufgetreten sind. Ursache hierfür sind die verbesserten Brennverfahren, die die Entstehung von Partikeln und von Kohlenwasser bei der Verbrennung durch optimierte Gemischbildung und Verbrennung sehr stark eingeschränkt haben.

Zu Ablagerungen in den Ansaugkanälen ist es hauptsächlich in den Motoren gekommen, die viel im Teillastgebiet betrieben worden sind. Durch die in diesem Lastbereich noch nicht vorhandene oder sehr geringe Abgasturboaufladung liegt in der Zeit der Ventilüberschneidung kein positives Spülgefälle vor. Dadurch können Abgase kurzfristig in den Ansaugkanal gelangen und Ablagerungen bilden, welche durch geringste kondensierende Restmengen Rapsöl aus dem Abgas im Ansaugkanal gebunden werden. Auffällig ist, dass diese Ablagerungen nur direkt über dem Ventil zu finden waren, nicht dagegen an weiter entfernten Stellen des Ansaugkrümmers.

Im Dauerlaufversuch gab es bei keinem der 107 Motoren Probleme mit dem Turbolader durch Ruß- oder Ascheablagerungen. Der Metallgehalt von maximal 20 ppm Calcium im Kraftstoff

föhrte nicht zu Ascheablagerungen in den Gaskanälen, genauso wenig wie der Calciumgehalt von 2000 ppm im nicht aschebildnerreduzierten Motorenschmieröl. Für zukünftige Abgasnachbehandlungssysteme wird man den Metallgehalt im Kraftstoff Rapsöl deutlich verringern müssen (ein ppm ist in der Diskussion), um den Betrieb von geschlossenen Partikelfiltern zu ermöglichen. Entsprechende Reinigungstechnologien für Rapsöl sind bereits entwickelt worden und stehen bei Bedarf mit Kosten von 1 bis 3 Cent je Liter Kraftstoff zur Verfügung.

5.5.4 Zusätzliche Erkenntnisse aus den Dauerlaufuntersuchung

Neben den zuvor aufgezeigten Ergebnissen sind weitere für zukünftige Rapsölmotorenstrategien signifikante Erkenntnisse aus den Dauerlaufuntersuchungen gewonnen worden.

So ist das Einsatzspektrum des Motors ein wesentliches Kriterium dafür, ob ein reibungsloser Betrieb mit Rapsöl möglich ist:

- Wenige Probleme traten auf, wenn Rapsölmotoren mit mittleren bis hohen Lasten bei höheren Drehzahlen betrieben wurden.
- Bewährt haben sich Motoren mit Leistungen über 100 kW, die jährlich eine hohe Betriebsstundenzahl erreichen und wenig Kurzzeitbetrieb im Winter ausweisen.

Motoren mit kleiner Leistung (unter 60 kW), Kurzzeitbetrieb und häufigem Einsatz im niedrigen Teillastgebiet sollten nicht auf Rapsöl im Ein-Tankkonzept bisherigen technischen Standes umgerüstet werden. Für diese Einsatzfälle ist es sinnvoll, über ein 2-Tank-System nachzudenken, so dass diese Motoren in den niedrigen Teillastbetriebspunkten mit Dieselmotorkraftstoff betrieben werden.

Vor der Anschaffung eines Rapsölmotors bisherigen Konstruktionsstandes sollte der Betreiber die Leistungsbreite für das spätere Einsatzspektrum festlegen. So war im Dauerlaufest festzustellen, dass „kleine“ 4-Zylindermotoren, die im unteren bis mittleren Drehzahlbereich mit hoher Last betrieben worden waren, sehr schnell an die Leistungsgrenze kommen. Diese Motoren sind so ausgelegt, dass sie an der Obergrenze der Leistungsausbeute pro Liter Hubraum mit einer hohen thermischen Belastung der Bauteile arbeiten. Ursache hierfür ist, dass die Aufladung von 4-Zylindermotoren nicht so optimal wie von 6-Zylindermotoren gestaltet werden kann, wegen der ungünstigen gasdynamischen Kopplung der Abgasstränge. Dieser Effekt ist sowohl im Rapsöl- als auch im Dieselmotrieb zu beobachten. Der Betrieb desselben Motors im Rapsölbetrieb, mit seiner minimal späteren Verbrennung föhrt zu einer geringfügigen weiteren Erwärmung der Bauteile. Folgeerscheinungen können defekte Zylinderkopfdichtungen und im Extremfall ein Versagen der Zylinderbuchsensmierung mit

beginnendem Kolbenfressen sein. An baugleichen Motoren mit einer geringeren Leistungsauslegung durch Begrenzung der Einspritzmenge traten diese Schäden nicht auf.

Diese untere und obere Einschränkung des Betriebsbereiches für den Dauerbetrieb von derzeit umgerüsteten Rapsölmotoren weist auf geringfügig unterschiedliche Brennabläufe besonders in den oben genannten Arbeitspunkten hin. Die momentane Auslegung der Dieselmotoren (mit druckgeregelten Einspritzsystemen) für den Leerlauf- und Volllastbereich bei **niedrigen Drehzahlen** erlaubt keinen dauerhaften Betrieb mit Rapsöl (**Abbildung 89**). Ursächlich hierfür ist die Auslegung der Gemischbildung der untersuchten Motoren, mit

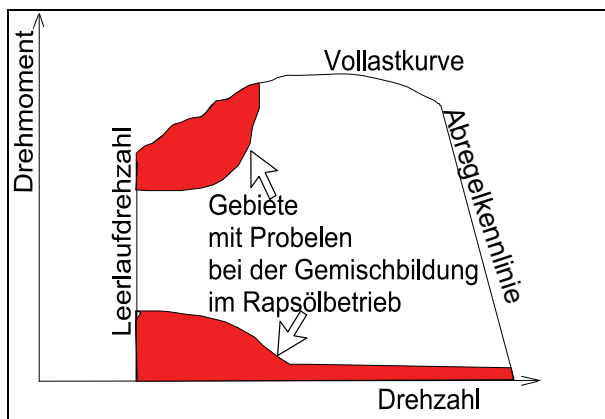


Abbildung 89: Kennfeldbereiche, die problematisch für den Rapsölbetrieb sind.

nockengetriebenen Hochdruckeinspritzsystemen, die den Dieselbetrieb in diesen Betriebspunkten grenzwertig standfest (dauerlauffähig) realisiert, aber keine Reserven für den Rapsölbetrieb aufweist, um dessen höheren Energiebedarf für die Gemischbildung abzudecken. Diese Aussage gilt nicht für Common-Rail-Systeme, wie sie ab Baujahr 2006 verstärkt genutzt werden.

An den bisherigen Motoren im Rapsölbetrieb müssen die Überprüfungen, Kontrollen und erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen zu einem früheren Zeitpunkt als im Dieselbetrieb eingeplant und durchgeführt werden. Daraus folgt bei derzeitigem Stand der Umrüstungen auf den Rapsölbetrieb ein höherer Wartungsaufwand. Zu diesen zurzeit notwendigen Mehraufwendungen für den Rapsölbetrieb können folgende Maßnahmen gezählt werden:

1. Der Einsatz eines erfahrenen Stammfahrers, der die Besonderheiten des Rapsölbetriebes wahrnimmt und entsprechend reagiert. Dies verringert die Anzahl der kostenintensiven Störungen deutlich (Früherkennung von Störungen).
2. Die Motorblockvorwärmung, die den Motor auf Betriebstemperatur von min. 60 bis 70 °C bringt. Dies verringert den Rapsöleintrag in das Schmieröl deutlich und verlängert die Ölwechselintervalle. Zusammen mit der eventuell vorhandenen Einspritzdüsenvorwärmung (System Hausmann) ist der sichere und schnelle sägefreie Kaltstart des Motors möglich.
3. Den Ölstand im Motorölumlauf jeden Morgen vor Beginn der täglichen Arbeit zu messen, um Störungen im Einspritzsystem oder innere Leckagen innerhalb von 24 Stunden zu erkennen – bevor teure Sekundärschäden auftreten. Hintergrund hierfür ist, dass in Abhängigkeit vom Betriebsregime und vom Einsatzspektrum bei allen am Dauerlauf

beteiligten Motoren ein Rapsöleintrag von unterschiedlicher Intensität in das Schmieröl zu beobachten und zu messen war.

4. Bei jedem 3. Ölwechsel eine Spülung des Motors vorzunehmen, um die Kontamination mit hoch verseiftem Restschmieröl deutlich zu verringern und somit das Risiko der Schmierölpolymerisation zu verkleinern.

5. Die Führung eines ausführlichen Betriebstagebuches, um den Motorzustand beurteilen zu können. Das Betriebstagebuch sollte folgende Informationen umfassen: Gesamt-Betriebsstunden, tägliche Betriebsstunden, Ölstand des Motoröls, Angabe der Nachfüllmenge an Frischöl, Termine der durchgeführten Ölwechsel mit Angabe der Betriebsstunden, Termine der Kraftstofffilterwechsel, Termine der Luftfilterreinigung bzw. Luftfilterwechsel, Besonderheiten und Vorkommnisse während des Motorenbetriebes, Beobachtung der Abgastrübung und des Leistungsverhaltens.

6. Die Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen Wartungsintervalle und zusätzliche Inspektion der Einlass- und Auslasskanäle. Im Rapsölbetrieb wird das Einspritzsystem höher belastet als im Dieselmotor - insbesondere, wenn - wie im Dauereinsatz - Kraftstoffe mit zu hoher Gesamtverschmutzung eingesetzt werden. Dies führt zu einem höheren Verschleiß an den Einspritzdüsen. Die zurzeit im Dieselmotor übliche, großzügige Auslegung der Wartungsintervalle durch den Betreiber ist aus diesem Grund im Rapsölbetrieb nicht möglich. In der **Tabelle 5.5.4.1** sind beispielhaft die notwendigen Wartungsintervalle dargestellt, die in der Dauerläuferprobung ermittelt wurden.

Tabelle 5.5.4.1: Wartungsmaßnahmen an Rapsölmotoren

Motorentyp	Einspritzdüsen überprüfen	Zylinderkopf demonstrieren	Gaskanäle, Ventile reinigen
SISU Motoren	1200 Bh	3600 Bh	3600 Bh
Deutz 2 Ventilmotoren	1200 Bh	3600 Bh	3600-4000 Bh
Deutz 4 Ventilmotoren	2400 Bh	4800-5000 Bh	4800-5000
John Deere 2 Ventilmotoren	1200 Bh	3600 Bh	3600 Bh
Same Motoren	1200 Bh	3600 Bh	3600 Bh

Im Dauerläuftest hat sich das Motorkonzept mit folgenden Motorkonstruktionsprinzipien (bei druckgesteuerter Einspritzung) als bestgeeignetes Konzept für den Rapsölbetrieb herausgestellt:

- symmetrischer Brennraum
- 4-Ventil-Technik
- hohes Hub/Bohrungsverhältnis
- Einspritzdruck größer 1600 bar
- PLD (Pumpe-Leitung-Düse) Hochdruckeinspritztechnik
- zentral angeordnete Einspritzdüse mit mindestens sechs Bohrungen

Motoren mit zuvor genannten Konstruktionsprinzipien zeichnen sich aus durch:

- lange Ölwechselintervalle von größer 250 Bh,
- Abgasemissionswerte sind über einen langen Zeitraum niedrig und relativ konstant, d. h. mit geringen Schwankungen und verschlechtern sich erst ab einer hohen Betriebsstundenzahl oder bei einem vorzeitigen Defekt der Einspritzdüsen.

Diese Aussagen gelten für Motoren entsprechend Abgasnorm der EU Richtlinie 97/68/EG Stufe 1 und Stufe 2, welche im Dauertest umfangreich untersucht worden sind. Für Common-Rail-Motoren der nächsten Generation sind weitere Dauerlaufuntersuchungen und Feldtests notwendig, um die in dieser Arbeit dargestellten Erkenntnisse abzusichern.

6 Interpretation der Forschungsergebnisse und Ableitung von Motorenkonzepten für den Rapsöleinsatz

6.1 Niederdruckkraftstoffsysteme

Die Aufgabe des Niederdruckkraftstoffsystems ist die Bereitstellung von geeignetem Kraftstoff an der Hochdruckeinspritzpumpe mit dem benötigten Vordruck (um Kavitation zu vermeiden), mit der benötigten Menge (um die Volllast zu erreichen) sowie mit der benötigten Viskosität (Temperatur, um eine optimale Gemischbildung zu ermöglichen und Einspritzpumpenschäden zu vermeiden). Eine weitere Aufgabe des Niederdruckkraftstoffsystems ist die Rückleitung nicht benötigten Kraftstoffs (Leckkraftstoff, Abregelmengen der Einspritzpumpe) zum Kraftstofftank.

Auf Grund der Eigenschaften von Rapsöl ergeben sich wesentliche Unterschiede zum Niederdruckkraftstoffsystem für Dieselmotoren, welche nachfolgend hergeleitet werden.

Die höhere Viskosität von Rapsöl erfordert, die Leitungsquerschnitte zu vergrößern und die Vorpumpenleistung zu erhöhen, um letztlich die Druckverluste im Kraftstoffsystem insbesondere bei Temperaturen unter 10 °C begrenzen zu können. Hierbei kommt es nicht auf eine Erhöhung des Volumenstromes, sondern des Pumpendruckes an. Um eine Vorwärmung aller kraftstoffführenden Teile sicherzustellen (nicht nur des Rapsölvorwärmers), ist der Einsatz einer elektrischen Kraftstoffvorförderpumpe anstatt der mechanischen Pumpe im Kraftstoffkonzept vorzuziehen, die dann bereits vor dem Start des Motors den Kraftstoff im System umwälzen kann.

Die geringere Oxidationsstabilität von Rapsöl erfordert die Minimierung der mechanischen und thermischen Belastung des Kraftstoffes im Tank. Diese wird durch die Begrenzung der Rücklaufmengen aus dem Kraftstoffsystem in den Tank erreicht. Das bei Dieselmotoren angewendete System, Kraftstoffmengen in der Größenordnung des maximalen Verbrauchs zu Kühlzwecken zwischen Tank und Hochdruckpumpe zirkulieren zu lassen, ist im

Rapsölbetrieb kein optimales Konzept. Im Rapsölbetrieb hat es sich als günstig erwiesen, die Rücklaufmenge deutlich zu reduzieren oder Kraftstoff nur geregelt zurückströmen zu lassen. Auf die Rückströmung gänzlich zu verzichten ist unpraktikabel, da die Motoren auch weiterhin selbstentlüftend sein sollen. Als Lösungskonzept bietet sich daher an, einen Zentrifugalluftabscheider nach der Hochdruckpumpe (Rücklaufseite) anzuordnen und die Dichte- oder Viskositätsunterschiede als Steuersignal auszunutzen, um so das Rückströmen der Luft zu ermöglichen. Diese Form der Steuerung muss nicht elektronisch, sondern kann hier hydraulisch sein: Die hydraulische Steuerung basiert dann auf der Ausnutzung des Strömungsunterschieds zwischen Luft und Rapsöl in dünnen Rohren. Die Rücklaufmengen der Hochdruckpumpe und Leckmengen der Einspritzdüsen sollten der Vorpumpe über Drosseln direkt zugeführt werden.

Die deutlich höhere Gesamtverschmutzung des Kraftstoffes erfordert, dass das Kraftstofffiltersystem konzeptionell darauf ausgelegt wird. Der Grenzwert für die Gesamtverschmutzung ist zwar für Dieselmotorkraftstoff und Rapsöl in den Kraftstoffnormen gleich. Allerdings hat sich in den Untersuchungen gezeigt, dass sich der Mittelwert der untersuchten Proben deutlich unterscheidet. Der Mittelwert der im Betriebstofflabor untersuchten Dieselmotorkraftstoffproben lag bei 2 mg/kg und der der Rapsölproben bei 25,2 mg/kg. Dies bedeutet statistisch betrachtet, dass auf dem Filter im Rapsölbetrieb ca. die 14-fache Menge an Ablagerungen bei gleichem Energiedurchsatz (Menge Heizwertäquivalent) untergebracht werden muss, ohne dass am Filter ein unzulässig hoher Druckverlust aufgebaut wird. Dementsprechend sollte bei Einsatz von kaltgepressten Rapsölen eine deutliche Vergrößerung der Filteroberfläche erfolgen. Beim Einsatz von Vollraffinaten mit Gesamtverschmutzungen von 2 bis 4 mg/kg im Normalfall kann diese Maßnahme deutlich geringer ausfallen. Eine Überwachung des Druckes vor der Hochdruckpumpe ist demzufolge bei den jetzigen Kraftstoffqualitäten am Markt bei beiden Rapsölarten notwendig.

Die Vorwärmung des Kraftstoffes erfolgt am besten über das Motorkühlwasser, welches im Normalbetrieb den Motor mit ungefähr 90 °C verlässt. Da die Kühlwassertemperatur über einen Thermostaten geregelt wird, wird eine Überhitzung des Rapsöles vermieden. Diese Vorwärmstrategie hat sich im Dauertest in Kopplung mit der elektrischen Kühlwasservorwärmung bei vielen Motoren bewährt. Eine weitere Energiequelle zur Vorwärmung ist die Verlustleistung der Hochdruckpumpe (Hochdruckmengenregelung). Die hier zur Verfügung gestellte Energiemenge hängt wesentlich von der Mengenregelungsstrategie auf der Hochdruckseite ab. Bei modernen ansaugseitig geregelten, verbrauchoptimierten Common-Rail-Systemen ist diese nutzbare Wärmeenergie – verglichen

mit älteren Hochdrucksystemen – deutlich niedriger und reicht nicht für die Vorwärmung des Kraftstoffes aus. Zur Vorwärmung des Rapsöles und zur Minimierung der kühlenden Oberflächen des Einspritzsystems hat es sich als eine sehr gute Strategie erwiesen, die Kraftstoffleitungen und Hochdruckpumpen in den Motorblock oder den Zylinderkopf zu integrieren. Diese Integration geschieht zum Beispiel bei den PD- und PLD-Einspritzsystemen.

Über einen Kühlwasser-Rapsöl-Wärmeübertrager kann Rapsöl bei einer Temperaturdifferenz zwischen Motorkühlwasser und Rapsöl von 10 Kelvin auf 80 °C vorgewärmt werden. Für eine schnelle Vorwärmung des Rapsöles sollte möglichst warmes Kühlwasser (noch vor der Fahrgastraumheizung; Zylinderkopfkreislauf) genutzt werden und nicht das erst später warm werdende Wasser zum Wasser-Luft-Wärmeübertrager (Hauptkühlerkreislauf). Eine zusätzliche Wasserzirkulationspumpe in Verbindung mit der oben genannten elektrischen Motorvorwärmung unterstützt das Aufheizen insbesondere vor dem Kaltstart des Motors.

Die direkte Nutzung der Abgasenergie zur Vorwärmung des Rapsöles (Abgas-Rapsöl-Wärmeübertrager) ist aus folgenden Gründen nicht realisierbar.

- Die Abgastemperatur im Dieselmotor ist stark lastabhängig und damit gleichfalls der Wärmeeintrag in das Rapsöl. Dies erfordert eine umfangreiche Temperaturregelung.
- Vor dem Start steht keine Abgasenergie zur Verfügung, die Rapsölvorwärmung muss auf anderem Wege erfolgen.
- Die Abgastemperatur liegt über 160 °C (meist sogar über 250 °C), so dass es im Wärmeübertrager örtlich zu Erwärmungen des Rapsöles auf über 150 °C kommen kann, wodurch wiederum die Oxidationsstabilität des Rapsöles deutlich verschlechtert wird.
- Der Flammpunkt von Rapsöl liegt bei 220 °C. Es kann sich also bei einer Wärmeübertragerleckage an den heißen Abgasteilen selbst entzünden.

Die direkte elektrische Vorwärmung in einem Wärmeübertrager erfordert elektrische Energie, die aus der mechanischen Motorleistung entnommen wird und damit den spezifischen Verbrauch erhöht und Kosten verursacht. Im Gegensatz dazu ist die Nutzung der Motorkühlwasserenergie verbrauchsneutral. Durch den Einsatz entsprechend großer Übertragungsflächen lässt sich die Oberflächentemperatur in elektrischen Vorwärmern auf ein rapsöltaugliches Niveau von 100 °C reduzieren. Aus den großen Übertragungsflächen folgt jedoch, dass der Vorwärmer vom Bauraum nicht kleiner als der Wasser-Öl-Wärmeübertrager ausgeführt werden kann. Aus diesen beiden Gründen ist die vollständige elektrische Vorwärmung des Rapsöles im Niederdruckkraftstoffsystem nicht wirtschaftlich und wurde im Dauertest auch nicht realisiert.

Das Niederdruckkraftstoffsystem muss weiterhin so ausgelegt werden, dass ein Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff möglich ist, damit der Motor bei Rapsölmangel nicht stillgelegt werden müsste. Um wiederum an der Hochdruckpumpe Dieseldieselkraftstoff auf einem Temperaturniveau unter 55 °C zur Verfügung zu haben, ist es notwendig, die Kraftstoffvorwärmung bei diesen Motoren umgehen zu können. Eine erprobte Möglichkeit ist eine Kraftstoffbypassleitung an dem Vorwärmer und den Zusatzfiltern vorbei.

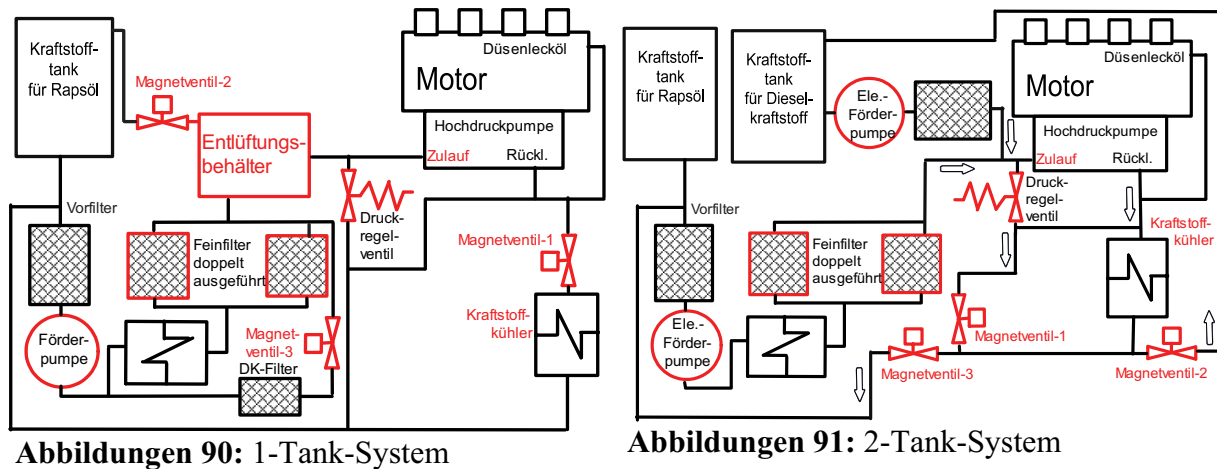
Eine Alternative zu dem 1-Tank-System ist das so genannte 2-Tank-System insbesondere für Nachrüstungen. Bei diesem System wird im unteren Teillastgebiet und im Leerlauf mit Dieseldieselkraftstoff gearbeitet, also in den Betriebspunkten, in denen die größten Brennverhaltensdifferenzen zum Dieseldieselkraftstoff bestehen. In den oberen Lastgebieten (hoher Verbrauch) wird beim 1-Tank-System dann mit Rapsöl gefahren. Für das Niederdruckkraftstoffsystem des 2-Tank-Systems gilt prinzipiell das oben Gesagte mit folgenden Ergänzungen:

- Im Dieseldieselkreislauf ist ein Rücklauf zum Tank für Entlüftungszwecke erforderlich. Dieser kann beim Teilsystem Rapsöl entfallen.
- Die Umschaltung sollte möglichst ortsnah vor der Hochdruckpumpe erfolgen, wobei auch das Zu- und Abschalten von Kraftstoffpumpen (Zahnradpumpen) als Stellorgan genutzt werden kann.
- Die Systeme Dieseldieselkraftstoff und Rapsöl sollten getrennte Kraftstofffilter besitzen.
- Der Druck im Rapsölsystem sollte geringfügig über dem DK-Systemdruck liegen, um eine gute Befüllung der Hochdruckpumpe zu ermöglichen.

Das 2-Tank-System ist im Niederdruckkraftstoffsystem deutlich aufwendiger und teurer als das 1-Tank-System. Diese Mehrkosten werden jedoch teilweise durch geringere Aufwendungen bei der Hochdruckeinspritzung und den weiteren Applikationen an den Rapsölbetrieb wieder eingespart. Das 2-Tank-System bietet sich insbesondere für Nachrüstungen an, wenn nur geringe Applikationen im Steuergerät an den Rapsölbetrieb möglich sind. Das 1-Tank-System ist für die OEM der kostengünstigere Ansatz, wenn diese die mögliche Rapsölbetriebsanwendung bei der Motorenkonzeption und Steuergerätebedatung berücksichtigen. Diese Bewertung gilt explizit für Motoren mit PLD-Hochdruckeinspritzsystemen. Bei Motoren mit Common-Rail-Einspritzsystemen hat das 2-Tank-System den großen Vorteil, dass die Injektoren nicht mit hohem Aufwand an den Betrieb mit kleinen Rapsöleinspritzmengen (Leerlauf, Teillast) angepasst werden müssen, weil dieser Kennfeldbereich durch den Dieseldieselbetrieb abgedeckt wird. Daher ist das 2-Tank-

System für Motoren mit Common-Rail-Einspritzsystemen, insbesondere bei kleinen Stückzahlen, die wirtschaftlichere Lösung.

In den **Abbildungen 90 und 91** ist für beide Varianten ein beispielhaftes System dargestellt:



6.2 Hochdruckkraftstoffsystem und Einspritzung

Die Aufgabe des Hochdruckkraftstoffsystems inklusive der Einspritzdüsen ist die korrekte Bemessung der Kraftstoffmenge für die einzelnen Arbeitsspiele und die optimale Gemischbildung im Brennraum zum richtigen Zeitpunkt.

An den heutigen Dieselmotoren werden fast nur noch Hochdruckeinspritzsysteme mit Einspritzdrücken über 1200 bar und Einspritzdüsen mit sechs und mehr Bohrungen verbaut. Nur in Motoren mit Kupplungsleistungen unter 18 kW werden noch Einspritzsysteme mit geringen Einspritzdrücken und Düsen mit geringer Bohrungszahl (4) installiert.

Als Hochdruckeinspritzsysteme kommen derzeit die bekannten, nachstehend aufgeführten Einzelhochdruckeinspritzpumpen für Motoren mit Leistungen größer als 18 kW zum Einsatz:

- Radialkolbenverteilereinspritzpumpen elektrisch gesteuert,
- Pumpe-Düse-Systeme (nur PKW),
- Pumpe-Leitung-Düse Systeme,
- Common-Rail-Systeme.

In Neukonstruktionen werden Reiheneinspritzpumpen nicht mehr eingesetzt. Für den Betrieb mit Rapsöl, einem flüssigen gut schmierenden Kraftstoff, werden prinzipiell keine anderen Einspritzsysteme als für konventionellen Kraftstoff benötigt. Im Kurzzeittest waren alle vier Einspritzsystemarten beim betriebswarmen Motor in der Lage, Rapsöl einzuspritzen und einen kurzzeitigen Motorbetrieb von ca. 25 Stunden zu realisieren.

Als notwendige Voraussetzung für den Rapsölbetrieb hat sich hierbei der hohe Einspritzimpuls (Energie des Einspritzstrahles) – basierend auf dem hohen Einspritzdruck herausgestellt. Dieser hohe Einspritzstrahlimpuls überträgt die benötigte Energie für die

Gemischbildung des Rapsöles. Diese Voraussetzung für den Rapsölbetrieb war bei früheren Untersuchungen, zuletzt um 1990, noch nicht flächendeckend vorhanden. Die PKW-Motoren arbeiteten damals mit Kammervorfahren und die LKW- und Traktorenmotoren mit Reiheneinspritzpumpen und 4-Loch-Düsen bei Einspritzdrücken bis 800 bar. Diese nicht ausreichende Gemischbildung war die Grundlage für die vielen negativen Testergebnisse beim Einsatz von Rapsöl in diesem Zeitraum.

Bei den Common-Rail-Einspritzsystemen ist festzustellen, dass diese besonders sensibel auf die Kraftstoff- und Motortemperatur reagieren. Die Ursache hierfür liegt in der Art der Steuerung für die Düsenadel. Die Zulauf- und Ablaufbohrungen zum Druckraum über der Düsenadelverlängerung sind extrem eng kalibriert und auch vom Durchmesser deutlich kleiner als die Kanäle in PD- und PLD-Systemen. Damit gerät die Viskosität der Flüssigkeit zu einem entscheidenden Einflussfaktor für das Ansprechverhalten der Common-Rail-Injektoren. Bei zu hohen Viskositäten (kalter Injektor) sind extrem lange Bestromungszeiten notwendig, um den Druckraum über der Düsenadel zu entspannen und den Injektor zu öffnen. Gleichzeitig ist bei Betrieb von kalten Injektoren eine große Streubreite zwischen den Injektoren und den einzelnen Einspritzungen festzustellen. Die Voreinspritzung ist wegen der langen Bestromungszeiten zum Öffnen des Injektors nur sehr weit vor der Haupteinspritzung möglich, wobei die Fähigkeit, kleinste Kraftstoffmengen definiert und reproduzierbar einzuspritzen, wie sie vom DK-Betrieb bekannt ist, bisher nicht erreicht wird. Für den Einsatz von Rapsöl müssen die Bestromungszeiten der Injektoren dem Rapsöleinsatz angepasst werden wie früherer Bestromungsbeginn usw. Diese Zeiten müssen wie auch im Dieselmotorbetrieb für jeden Motortyp (Injektortyp) einzeln bestimmt werden.

Aus obigen Gründen sollten die Injektoren von Common-Rail-Einspritzsystemen für den Rapsölbetrieb vor dem Start vorgewärmt werden. Dies geschieht am sichersten durch die Vorwärmung des gesamten Zylinderkopfes auf 50 bis 60 °C durch eine entsprechend umfangreich ausgelegte elektrische Vorwärmung des Motors oder des Zylinderkopfes. Möglich ist auch die direkte elektrische Beheizung des Injektoroberteils mit den Steuerbohrungen, in Anlehnung an das Verfahren „Umrüstung Hausmann“ [88]. Dadurch kann über gezielte lokale Einbringung von Wärme das Schaltverhalten der Injektoren im Rapsölbetrieb deutlich verbessert werden. Dieses Konzept ist insbesondere für 1-Tank-Systeme wichtig, die ohne Motorvorwärmung starten sollen. Durch den Einsatz eines 2-Tank-Systems vereinfacht sich die Anpassung bei Common-Rail-Einspritzsystemen wesentlich, da erst bei betriebswarmem Injektor und höheren Einspritzmengen auf Rapsöl umgeschaltet wird (Wegfall des Kaltstarts, Kleinstmengenfähigkeit).

Die anderen drei Hochdruckeinspritzverfahren sind in ihrer Mengenzumessung weniger von der Kraftstoffviskosität abhängig. Aber auch bei diesen verbessert die Vorwärmung des Kraftstoffes – insbesondere im Düsenbereich – die Gemischbildung und verringert den Kraftstoffeintrag ins Schmieröl. Motoren mit druckgesteuerten Einspritzsystemen starten allerdings ab Temperaturen von 5 °C ohne Schwierigkeiten, wie dies der Feldtest deutlich gezeigt hat. Bei niedrigeren Temperaturen ist auch bei diesen Einspritzsystemen eine Düsenvorwärmung zur Verbesserung der Einspritzung (Gemischbildung) erforderlich. Diese erreicht man durch eine Vorwärmung des gesamten Motors oder durch gezielte Wärmezufuhr zur Düse (System „Hausmann“ [88]).

Im Feldtest musste festgestellt werden, dass Verteilereinspritzpumpen der unterschiedlichen Hersteller nur den kurzzeitigen Betrieb mit Rapsöl zuließen. Nach einer Laufzeit zwischen 200 und 1000 Betriebsstunden traten insbesondere an den Verteilereinspritzpumpen verstärkte schwere Störungen auf, die einen Austausch der Pumpen erforderlich machten. Das Schadensbild war bei den unterschiedlichen Verteilereinspritzpumpen nicht einheitlich. Es ist aber festzuhalten, dass die Anzahl der Arbeitshübe des Pumpenplungers wesentlich höher ist als bei den anderen Hochdruckpumpen. Entsprechend sollte in Motorkonzepten für den Betrieb mit Rapsöl auf Verteilereinspritzpumpen verzichtet werden. Alternativ müssten sehr umfangreiche Entwicklungs- und Erprobungsarbeiten auf diesem Gebiet mit entsprechenden Kosten geleistet werden.

Im Dauerlauf test hat sich das Hochdruckeinspritzsystem – Pumpe-Leitung-Düse (PLD) als sehr gut für den Rapsölbetrieb geeignet gezeigt, welches sich wie folgt herleiten lässt:

- Die gute Vorwärmung des Rapsöles durch die Integration der Kraftstoffzufuhr in den warmen Motorblock mit über 80 °C Motorkühlwassertemperatur,
- Schmierung der Hochdruckpumpe durch Motorenschmieröl. Damit können hohe Kräfte sowie hohe Einspritzdrücke und Einspritzenergien übertragen werden. Die Energie des Einspritzstrahls, der für die Rapsölgemischbildung benötigt wird, ist -verglichen mit anderennockengesteuerten Systemen– bisher in diesem Einspritzsystem am höchsten,
- Geringe Leitungslängen im Hochdrucksystem, womit der Unterschied im Druckaufbau im Einspritzsystem, auf Grund der geringeren Kompressibilität des Rapsöles im Vergleich zum Dieselkraftstoff, vernachlässigt werden kann,
- Relativ große Steuerungsquerschnitte im System (verglichen mit CR-Systemen), wodurch die Einspritzmengenbemessung relativ unabhängig von der Viskosität ist,
- Kurze Leitungen zwischen Einspritzpumpe und Düse, in denen das Rapsöl nur geringfügig abkühlt.

Für die Entwicklung von Motoren zum Rapsöleinsatz in der Landwirtschaft bietet das PLD-System mit elektrischer Mengenregelung gute Voraussetzungen. Mit diesem System ist eine einfache mechanische Voreinspritzung realisierbar, späte Nacheinspritzungen werden bei dem Betrieb mit Rapsölkraftstoff bis zur Einführung der Abgasstufe TIER4 (2011) nicht eingesetzt (siehe Kapitel 6.3). Ein wesentlicher Vorteil des Common-Rail-Systems, die Vielfacheinspritzung, wird damit momentan für Rapsölmotoren in landwirtschaftlichen Maschinen nicht benötigt.

Für Motoren der nächsten Abgasstufen TIER4 (2011) ist aber auch festzustellen, dass sich Common-Rail-Einspritzsysteme durchsetzen und PLD-Systeme nicht weiter in Neukonstruktionen genutzt werden. Ursache hierfür sind erstens die größeren Freiheitsgrade der Einspritzverlaufsformung der Common-Rail-Systeme, die zur Steuerung einer schadstoffarmen Verbrennung benötigt werden. Zweitens fällt der Kostenvorteil der PLD-Systeme gegenüber den Common-Rail-Systemen durch deren zentralisierte Entwicklung bei den Einspritzgeräteherstellern weg. Bei Einsatz von 2-Tank-Systemen können diese Common-Rail-Systeme über reine Softwareapplikationen (Funktionsentwicklung und Bedatung) an den Rapsölbetrieb angepasst werden und ermöglichen damit einen Rapsölbetrieb zukünftiger Motorengenerationen bei vertretbarem Entwicklungsaufwand. Die Anpassung der Common-Rail-Systeme für 1-Tank-Systeme erfordert dagegen auch Anpassungen der Motorhardware, um einen Betrieb im gesamten Motorkennfeld zu ermöglichen, wodurch die Kosten insbesondere bei kleinen Stückzahlen sehr stark steigen.

6.3 Energieumsetzung im Brennraum und Verbrennungsabgase

Langkettige Rapsölmoleküle brennen ähnlich wie langkettige Paraffine. Nach der Zündung und Entflammung des Pflanzenöles lässt sich dessen Energieumsatz mit dem von Dieselmotoren vergleichen. Entsprechend sind die Unterschiede der Energieumsetzung zwischen Diesel- und Rapsölkraftstoff in vielen untersuchten Motoren in hohen Lastpunkten sehr gering.

Gerade dies ist die Grundlage der Idee, Rapsöl in Dieselmotoren einzusetzen. Es ist zudem der Grund für sehr positive Ergebnisse in Testläufen von Rapsöl in BHKW (Volllasteinsatz), besonders wenn diese auf hochviskose Kraftstoffe (Schweröle) eingestellt worden waren.

Der Unterschied zwischen Rapsöl und Dieselmotoren im Brennraum besteht nicht in der gezündeten Verbrennung, sondern in der zeitlich davor liegenden Gemischbildung und der sich anschließenden Selbstzündung. Diese beiden Prozesse wirken sich aber natürlich auf den Zeitpunkt und die Schwerpunktlage der Hauptverbrennung aus.

Die Gemischbildungs- und Zündungsunterschiede werden insbesondere im Teillastgebiet und Leerlauf deutlich, in denen Zündungsphänomene die Verbrennung stark beeinflussen. In diesen Betriebspunkten, in denen auch im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff Schwierigkeiten und höhere Emissionen von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid auftreten, liegen keine optimalen Bedingungen für die Gemischbildung des Dieselmotorkraftstoffes vor. Der Kompressionsenddruck ist im Vergleich zur Volllast gering. Mit dem geringen Druck fehlt der für die optimale Zerstäubung notwendige hohe Gegendruck (Gasdichte). Zudem ist die Kompressionsendtemperatur geringer als bei höheren Lasten, wodurch thermische Energie für die Verdampfung und Aufbringung der Aktivierungsenergie zur Zündung des Kraftstoffes fehlt. Hauptproblem ist allerdings bei den nocken gesteuerten Einspritzsystemen der geringe Einspritzdruck und damit der geringere Einspritzstrahlimpuls (Energie des Einspritzstrahls). Bei Common-Rail-Systemen tritt der Effekt des geringen Einspritzstrahlimpulses dagegen nicht auf, da dort der Einspritzdruck unabhängig von der Drehzahl und Last über Funktionen und Datensätze im Motorsteuergerät eingestellt werden kann.

Die Energie für die Gemischbildung wird bei direkteinspritzenden Motoren über den Einspritzdruck übertragen. Bei niedrigen Einspritznockengeschwindigkeiten und Einspritzdrücken sinkt daher das Energieangebot für die Gemischbildung. Dem gegenüber steht der höhere Energiebedarf für die Gemischbildung im Dieselmotorbetrieb verglichen mit dem Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Diese Differenz zwischen Energieangebot und Energiebedarf führt bei druck gesteuerten Einspritzsystemen, insbesondere im Teillastgebiet und Leerlauf, zu Problemen während der Gemischbildung. Der Zündverzug nimmt deutlich zu und die Hauptverbrennung selbst ist stark verschleppt. Hauptursache hierfür ist die schlechtere physikalische Gemischbildung, der chemische Zündverzug von Dieselmotorsöl ist nicht so stark betroffen, da Dieselmotorsöl mit seinen Doppelbindungen generell reaktionsfreudig ist [18]. Einspritzsysteme mit hohen Einspritzdrücken sind daher für den Dieselmotorbetrieb wie auch oben beschrieben, von Vorteil. Eine alternative, ergänzende Möglichkeit, die benötigte Energie für die Gemischbildung zu erhalten, ist eine deutliche Anhebung der Ansaugtemperatur in Teillastgebiet und Leerlauf. Die in diesen Betriebspunkten vorhandenen Verbrennungsluftverhältnisse (ohne Abgasrückführung [AGR]) erlauben deren geringe Absenkung, ohne dass es zu einer verstärkten Rußbildung kommt. Ein Betriebskostengünstiges Konzept ist die Ankopplung der Ladeluftkühlung an das Kühlwassersystem des Motors. Im Teillastgebiet mit geringen Luftmassenströmen kann so die Ladeluft auf 70 °C angewärmt werden. Bei Volllast kann hierbei die Ladeluft durch das Motorkühlwasser auf 90 °C gekühlt werden. Die Regelung der Ladelufttemperatur (Heizung im Niedriglastbereich)

ist eine effektive Methode, die Verdampfung und damit die Verbrennung von Rapsölkraftstoff der des Dieselkraftstoffes anzupassen. Ergänzt wird diese Anpassungsstrategie durch eine Vorwärmung des Motorkühlwassers, um diesen positiven Effekt auch beim Motorstart zu haben. Möglich sind die elektrische Vorwärmung oder die Anwendung von Latentwärmespeichern. Bei Motoren mit hohen AGR-Raten im Teillastgebiet und Leerlauf ist es möglich, die Kühlung der äußeren Abgasrückführung durch einen Bypass zu reduzieren und so die Gastemperatur vor dem Zylinder anzuheben. Alternativ kann bei Motoren mit veränderlichen Ventilsteuerzeiten die innere heiße Abgasrückführung erhöht werden. Diese beiden AGR-Optionen zur Anpassung setzen sehr gute Kenntnisse über die im Motorsteuergerät eingesetzten Funktionen voraus und müssen durch Indiziermessungen auf Motorprüfständen gesichert werden, um im jeweiligen Motor einen Anstieg der Stickoxidemissionen verglichen mit dem Dieselkraftstoffbetrieb zu verhindern.

Bei Einspritzsystemen, deren Beginn elektronisch geregelt wird, kann der Einspritzbeginn „nach früh“ verlegt werden, um den längeren physikalischen Zündverzug auszugleichen. Diese Maßnahme ist jedoch nicht so effizient wie die Anhebung der Ladelufttemperatur, da die Verdampfung des eingespritzten Rapsöles dabei nicht verbessert wird.

Insgesamt sind im Betriebsbereich Leerlauf und Teillast deutliche Anpassungen an den Rapsölbetrieb notwendig, andernfalls kommt es zu einer verschleppten unvollständigen Verbrennung mit zu hohen Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen. Außerdem kann nicht vollständig verbranntes Rapsöl zusammen mit dem immer in geringen Mengen vorhandenem Ruß zu einem Zusetzen der Abgaskanäle, der AGR-Kanäle und der ATL-Turbine führen. Da Landmaschinenmotoren in einigen Einsatzfällen häufig im Niedriglastbereich betrieben werden, ist bei diesen besonderer Wert auf die Gemischbildung und Zündung bei Leerlauf und Teillast zu legen, um oben genannte Langzeitschäden zu vermeiden.

Eine alternative Lösung für die Probleme der Gemischbildung im Leerlauf- und Teillastgebiet ist ein 2-Tank-System, welches bei Teillast oder Leerlauf automatisch auf Dieselkraftstoff umschaltet.

Nach der Entflammung sind, bezogen auf den Gesamtenergieumsatz in einem Arbeitsspiel, die Unterschiede in der Brennfunktion zwischen Rapsöl und Dieselkraftstoff nicht sehr hoch. Das Vorhandensein von Sauerstoff fördert die Verbrennung und führt, wie auch bei RME, zu höheren lokalen Temperaturen mit verstärkter Stickoxidbildung. Das lässt sich durch eine Erhöhung der AGR-Rate und oder eine minimale Spätverschiebung der Einspritzung verhindern, womit gleichzeitig auch die Abgasnormen (Stickoxide) im Rapsölbetrieb

eingehalten werden. Für diese Maßnahmen sind sehr gute Kenntnisse der im Motorsteuergerät eingesetzten Funktionen notwendig. Auch diese Optimierungsstrategien müssen durch Indizier- und Abgasmessungen für den konkreten Motor abgesichert werden, um die Reduzierung der Stickoxidemissionen in der Verbrennung nachzuweisen und zu dokumentieren.

Wenn die Verbrennung von Rapsöl optimiert ist, d. h. die Verbrennung mit den gleichen Umsatzraten wie bei Dieselkraftstoff erfolgt, sind die Emissionen dem des Dieselkraftstoffbetriebs sehr ähnlich. Die Emissionen im Rapsölbetrieb sind genauso betriebspunktabhängig wie bei Dieselkraftstoff. Durch das Vorhandensein von 10 % Sauerstoff im Rapsölkraftstoff wird die Partikelemission geringfügig reduziert. Gleichzeitig ist ein geringfügiger Anstieg der Stickoxidemissionen festzustellen: ca. 5 bis 10 % bei einem Betriebspunkt mit gleichem Mitteldruck im oberen Lastgebiet.

Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen liegen auf dem gleichen niedrigen Niveau wie beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Hier sind keine Anpassungen an den Rapsölbetrieb notwendig. Die im Dieselmotorenbetrieb erprobten Oxidationskatalysatoren können im Rapsölbetrieb, bei Phosphor freiem Kraftstoff also Raffinat, ohne Einschränkungen eingesetzt werden. Sie reduzieren die Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen entsprechend ihrem Betriebsverhalten im Dieselmotorenbetrieb. Ein sehr positiver Nebeneffekt der weiteren Kohlenwasserstoffoxidation im Katalysator ist das Verschwinden des Abgasgeruchs.

Erhöhte Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen sind bei Rapsölmotoren ein deutlicher Hinweis auf eine nicht optimale Anpassung der Gemischbildung und Zündung an den Rapsölbetrieb.

Die Partikelemission im angepassten Rapsölbetrieb ist eher geringer als bei Dieselkraftstoff. Ursächlich hierfür ist auch wieder der Sauerstoffgehalt im Kraftstoff. Wenn allerdings die Anpassung an den Rapsölbetrieb bei Teillast bzw. Leerlauf nicht optimal erfolgte, kommt es zu erhöhten Kohlenwasserstoffemissionen, die sich auf den Partikelfiltern ablagern und eine erhöhte Partikelemission bewirken.

Rapsöl als Kraftstoff ist kein destillierter Kraftstoff und kann chemisch gebunden Schwefel, Phosphor und Metalle wie Calcium und Magnesium enthalten. Besonders der Metallgehalt ist Ursache für Aschebildungsprozesse bei der Verbrennung. Diese Metallaschen können den Einsatz von geschlossenen Partikelfiltern verhindern. Bei der jetzigen Kraftstoffnorm können nur offene Dieselpartikelfilter dem Rapsölmotor nachgeschaltet werden, um eine weitere Reduzierung der Partikelemission zu erreichen. Werden nur Raffinate oder Teilraffinate als

Rapsölkraftstoffe eingesetzt, so können auch geschlossene Partikelfilter verwendet werden, da diese Öle frei von Schwefel, Phosphor und Metallen wie Calcium und Magnesium sind. Beim Einsatz von Partikelfiltern im Rapsölbetrieb ist es nicht möglich, durch eine späte Nacheinspritzung im Zylinder die Kohlenwasserstoffrohmissionen gezielt anzuheben, um im Oxidationskatalysator die Abgastemperatur auf Regenerationsniveau anzuheben. Das Einspritzverhalten und das Verdampfungsverhalten von Rapsöl würden zu einem nicht vertretbaren Eintrag von Kraftstoff – hier Rapsöl – in das Schmieröl führen.

Zur Erhöhung der Abgastemperatur im Dieseloxydationskatalysator kann im Rapsölbetrieb nur eine externe Zudosierung von Kraftstoff im Abgassystem selbst erfolgen. Hierbei sollte ein dem Rapsölbetrieb angepasster höherer Zerstäubungsdruck und eine vergrößerte Verdampfungsleistung eingesetzt werden. Wenn das Rapsöl fein zerstäubt und verdampft am Oxidationskatalysator vorliegt, wird es dort oxidiert und führt wie bei Dieselmotorkraftstoff zu einer Erhöhung der Abgastemperatur. Prinzipiell können beim Einsatz von Rapsölraffinat die gleichen Strategien und Technologien zur Abgasnachbehandlung wie bei Dieselmotorkraftstoff benutzt werden, also auch Speicherkatalysatoren und SCR-Systeme. Bei 2-Tank-Systemen kann die externe Zudosierung vor dem Dieseloxydationskatalysator auch mit Dieselmotorkraftstoff erfolgen, womit bereits erprobte Dosier- und Verdampfersysteme genutzt werden können.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Entwicklungsstrategien für Motoren zum Betrieb mit Rapsöl entwickelt. Die Ergebnisse basieren einerseits auf umfangreichen Untersuchungen an Motorprüfständen inklusive Kraftstoff- und Abgasanalytik und andererseits auf einem fünfjährigen Dauerlauftest.

Rapsöl besitzt zum einen ähnliche Eigenschaften wie Dieselmotorkraftstoff: Hohe Energiedichte, Dichte, Schwefelgehalt, Cetanzahl größer 39; Flammpunkt größer 60 °C. Allerdings unterscheidet sich Rapsöl vom Dieselmotorkraftstoff auch in Eigenschaften, die für die Verbrennung bedeutsamen sind: Viskosität, Oberflächenspannung, Siedeverhalten, Oxidationsstabilität, Metallgehalt (Calcium). Seit der zweiten Ölkrise Anfang der 80-er Jahre des vorigen Jahrhunderts wird in Deutschland versucht, Rapsöl als Kraftstoff zu etablieren und Motoren an diesen Kraftstoff empirisch anzupassen. Die Optimierung des Motors für den Kraftstoff Rapsöl umfasst eine Vielzahl von Motorenkomponenten. Sowohl das System der Kraftstofflagerung als auch das Niederdruckkraftstoffsystem, die Hochdruckeinspritzung und die Brennfunktion sowie – wenn vorhanden – das Abgasnachbehandlungssystem sollten auf den jeweils eingesetzten Kraftstoff abgestimmt werden. Wie Untersuchungen im Dauerlauftest gezeigt haben, sind dagegen keine Veränderungen am Triebwerk, an der

Ansaugluftanlage inklusive Abgasturboaufladung, an dem Kühlsystem und dem Schmierölsystem erforderlich.

Auf Grund der im Vergleich zum Dieselkraftstoff geringeren Lagerstabilität (Oxidationstabilität) ist bei der Lagerung von Rapsöl vor dem Fahrzeugtank auf eine dunkle und kühle Aufbewahrung zu achten. Bei der Konzipierung von neuartigen Kraftstoffsystemen sind Rückflüsse von erwärmten, scherbeanspruchten Rapsölen aus dem Motor zu vermeiden. Bei der Entwicklung von Niederdruckkraftstoffsystemen hat sich bestätigt, dass die Strömungsquerschnitte vergrößert und das Rapsöl durch Motorkühlwasser vorgewärmt werden sollte. Bei druckseitig geregelten Hochdruckeinspritzsystemen reicht die Verlustleistung allein aus, um die Vorwärmung zu realisieren. In älteren Einspritzsystemen (Drücke bis 1000 bar) und saugseitig geregelten Hochdruckeinspritzsystemen ist die Verlustleistung dagegen deutlich geringer, so dass eine weitere Wärmezufuhr im Niederdruckkraftstoffsystem unabdingbar ist. Hierbei ist die Wärmezufuhr über einen Öl-Wasser-Wärmeübertrager einer direkten elektrischen Heizung vorzuziehen.

Die zurzeit anzutreffenden Kraftstoffqualitäten für Rapsöl sind durch die Norm V DIN 516056 standardisiert, werden jedoch von den Lieferanten offensichtlich aus Gründen der Kostendämpfung häufig nicht eingehalten. Die Diskussion dieser Tatsache wurde in der vorliegenden Arbeit nicht vertieft. Im Feldtest erfüllten über die Hälfte der Rapsölproben den Qualitätsstandard nicht. Infolge dessen traten verstopfte Kraftstofffilter vermehrt auf. Im Ergebnis dieser Arbeit hat sich erwiesen, dass neben weiteren Maßnahmen auf dem Gebiet der Qualitätssicherung für Rapsöl (AGQM), die Kraftstofffiltersysteme Reserven für größere Schmutzmengen besitzen müssen, um ebensolche Filterstandzeiten wie bei Dieselkraftstoff zu ermöglichen. Ebenso ist eine Vorwärmung des Kraftstoffes vor dem Filtern zwingend erforderlich, zum Beispiel durch Beimischung von erwärmtem Rücklauföl, um die Druckverluste in den Filtern zu begrenzen und die Filterstandzeiten zu sichern.

Bei den Hochdruckeinspritzsystemen haben sich Pumpe-Leitung-Düse-Systeme im Rapsölbetrieb sehr gut bewährt. Da diese Einspritzsysteme an allen modernen Schwerölmotoren seit vielen Jahren verbaut worden sind, gibt es bei dieser Motorenart (inklusive Kraftstoffvorwärmung) keine Schwierigkeiten beim Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff. Verteilereinspritzpumpen haben im Feldtest wesentlich mehr Motorausfälle verursacht, weshalb sie nur bedingt für den Rapsöleinsatz geeignet sind. Entsprechend empfiehlt es sich, diese Pumpen künftig nicht mehr in Rapsölmotoren einzusetzen. Der Verschleiß der Einspritzdüsen ist im Rapsölbetrieb höher als beim Einsatz von

Dieselmotorkraftstoff. Die von den Herstellern vorgegebenen Wechsel- und Wartungsintervalle sind daher unbedingt einzuhalten.

Die Verbrennung von Rapsöl ist mit einem geringfügig längeren Zündverzug und einer stärkeren Vorverbrennung verbunden, insbesondere im Mittellastbereich. Im Hochlastbereich sind die Unterschiede kaum noch messtechnisch zu erfassen, wohingegen im Leerlauf und Kaltstartbereich die Zündverzugsverlängerung deutlich zutage tritt. Durch Anpassung der Zündbedingungen (Ladelufttemperatur, Einspritzdruck, Einspritzzeitpunkt) kann die Verbrennung des Rapsöles mit verfügbaren Technologien so optimiert werden, dass ein Unterschied zur Dieselerverbrennung nicht mehr feststellbar ist. Diese Anpassungen werden hauptsächlich und kostengünstig im Motorsteuergerät durchgeführt und sind kaum mit Veränderungen der Motorhardware verbunden.

Die Abgasemissionen bei Rapsölbetrieb unterscheiden sich im Nennbetriebspunkt kaum von denen im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff, was auf Grund der ähnlichen Brennfunktionen auch zu erwarten war. Bei den Prüfstandsuntersuchungen ohne Anpassung der Brennfunktion bzw. im Dauerlauftest war ein geringfügiger Anstieg (10 %) der Stickoxidemissionen festzustellen, der durch eine geringfügige Spätverschiebung der Einspritzung ausgeglichen werden kann. Das Emissionsverhalten der Motoren im Feldtest war über den Versuchszeitraum annähernd konstant und schwankte hauptsächlich in Abhängigkeit von den saisonalen Ansaugbedingungen. Bei wenigen Motoren gab es nach 2000 Betriebsstunden eine minimale Erhöhung der Kohlenmonoxidemissionen, der zulässige Grenzwert wurde aber bei weitem nicht erreicht. Mit einer Absenkung der Aschebildner und Katalysatorgifte unter 1 ppm im Kraftstoff Rapsöl sind auch die neuen Abgasnachbehandlungsverfahren wie geschlossene Partikelfilter, SCR-Systeme, usw. für zukünftige Rapsölmotoren nutzbar.

Der geringere Heizwert des Rapsöles muss durch eine Erhöhung der Einspritzmenge ausgeglichen werden, um die gleiche Motorleistung wie bei Dieselmotorkraftstoff zu ermöglichen. Diese wird in der Regel durch eine Verlängerung der Einspritzdauer in der Motorsteuersoftware oder eine Veränderung der Pumpenkennlinie bei mechanischen Einspritzreglern erzielt. Insbesondere bei Prüfstandsmessungen ist festgestellt worden, dass der Förderbeginn zur Korrektur des Verbrennungsschwerpunktes als Teil der Optimierungsstrategie ausgenutzt werden sollte. Im Feldtest wurden von mehr als drei viertel der Motoren über 95 % der Referenzleistung im DK-Betrieb erzielt. Leistungsverluste über den Untersuchungszeitraum gab es meist nur in Verbindung mit Störungen, wie z. B. Einspritzpumpenschäden oder sich zusetzenden Gaskanälen.

Da es kaum Unterschiede in den Zylinderdruckverläufen zwischen Dieseldieselkraftstoff und Rapsöl bei betriebswarmen Motoren gibt, ist auch die Belastung des Triebwerkes auf dem gleichen Niveau wie bei Dieseldieselkraftstoff. Dementsprechend gab es im Feldtest auch keine Ausfälle, die auf Überlastungen der Triebwerke zurückzuführen waren. Der Verschleiß an diesen Bauteilen ist vergleichbar mit jenem im Dieseldieselbetrieb. Bei den Motoren im Feldtest gab es, insbesondere bei länger währendem Teillastbetrieb, Ablagerungen auf den Ansaugkanälen, die durch Ruß und unvollständig verbranntes Rapsöl entstanden. Zur Vermeidung dieser Ablagerungen ist in diesen Ausführungen vorgeschlagen worden, in künftigen Konstruktionen die Temperatur der Verbrennung im Teillastgebiet und im Leerlauf durch Ladeluftvorwärmung und Optimierung der Verbrennungslage anzuheben. Insgesamt ist im Rapsölbetrieb ein wesentlich exakteres Temperaturmanagement des Motors (Kraftstofftemperatur, Lufttemperatur) notwendig und realisierbar, um einen störungsfreien Betrieb mit Rapsöl zu ermöglichen. Als Beispiel sei die so genannte „HOT-BOX“ erwähnt, in der das gesamte Kraftstoffsystem (außer dem Tank) untergebracht wird. Im Dauerlauftest stellten die genutzten Betriebspunkte einen wesentlichen Teil des Thermomanagements des Motors dar, d. h. die Betreiber waren angehalten worden, kritische Teillast und Niedriglastpunkte zu vermeiden.

Die Verwendung von Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist geeignet, einen nachhaltigen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen sowie zum Schutz von Umwelt und Klima zu leisten. Der Landwirtschaft in Europa kann darüber hinaus der Anbau nachwachsender Rohstoffe Produktions- und Einkommensperspektiven aufzeigen. Der verfügbare Ackerboden als ein Anbaumengen begrenzender Faktor sollte aus Gründen der Fruchtfolge für unterschiedliche Pflanzen genutzt werden. Raps als Basis für Rapsöl wird auch in Zukunft in der Fruchtfolge berücksichtigt werden können, so dass dementsprechend auch weiterhin Rapsöl als Treibstoff für Motoren zur Verfügung stehen wird. Durch die Nutzung dezentraler Systeme zur Gewinnung des Öls aus der Saat ist die Wirtschaftlichkeit insbesondere für die Landwirtschaft gegeben.

Die technische Basis für eine kostengünstige Entwicklung von umweltfreundlichen Rapsölmotoren bilden moderne, flexible Hochdruckeinspritzsysteme sowie die Möglichkeit, über Steuergerätefunktionen den Energieumsatz im Rapsölbetrieb gezielt beeinflussen zu können.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bader, J.: „Rapsölmethylester- Eine Kraftstoffalternative für Streitkräfte“, FUELS, 1st International Colloquium, 16-17 January 1997, Ed. Bartz, W. J., Technische Akademie Esslingen, S. 461 - 467
- [2] Birkner, M.: „Untersuchung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes“, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994
- [3] Bouché, T.; Hinz, M.; Hieber, D.; Tschöke, H.: „Einfluß verschiedener Pflanzenöleigenschaften auf Verbrennung und Schadstoffbildung in einem direkteinspritzenden Dieselmotor“, MTZ Motortechnische Zeitschrift Nr. 58, 1997, S. 148 – 154
- [4] Breuer, C.: „Rapsölkraftstoffe in direkteinspritzenden Dieselmotoren, Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen“, Würzburg, 11.01.1994, Hrsg. C.A.R.M.E.N. e.V., S. 99 – 108
- [5] Connemann, J.: “Modern Production of Diesel Fuels based on Vegetable Oils”, S. 385 – 407 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
- [6] Decker, G. ; Kossmehl S.-O. ; Heinrich, H.: „Potential alternativer Kraftstoffe und ausgeführte Konzepte“ S. 503 – 516 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
- [7] Demmelbauer-Ebner, W.: „Used Cooking Oil – an Alternative“, Fachgespräch Emission von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11. Januar 1994, Hrsg.: C.A.R.M.E.N. e.V., S. 94 - 98
- [8] Dicke, T.; Wichmann, V.: „Bericht über die Erprobung des Einsatzes von Rapsöl auf Binnenschiffen“, Institut für Thermische Maschinen und Anlagen der Universität Rostock, 1993 unveröffentlicht
- [9] Eckl, P. ; Stöss, W.: „Vergleich der Mutagenität von Diesel- und Rapsölmethylester-Abgasen“, FE S. 109 – 119 BMFT-Verbundprojekt "Kraftstoff aus Raps" 1994 FKZ 10618
- [10] Exner, P.; Vogel, J.: „Alternative Brennstoffe sowie optimierte Abgasreinigungssysteme für Dieselmotoren unter Tage“, Glückauf-Forschungshefte Nr. 57, 1996, S. 83 – 87
- [11] Frederiksen, P.: “Test of RAPE SEED OIL”, MAN B&W Diesel A/S, Holeby, 1995
- [12] Frederiksen, P.; Lauritsen, H.C.; Paradowski, J.: “Test of Palm Oil”, MAN B&W Diesel A/S, Holeby, 1998
- [13] Häntsche, J.: „Ergebnisse des Anwendungsprojektes „Pflanzenöl Sachsen-Anhalt“, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 279 - 304
- [14] Heineking, W.: „Erfahrungen mit Biodiesel“, S. 469 – 470 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
- [15] Henning, R.K.: „Produktion und Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff in Entwicklungsländern, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke“ – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 215 - 229

- [16] Hesse, A.; Krause, D.: „Ermittlung der Abhängigkeit motortechnischer Kenndaten von den Eigenschaften alternativer Brennstoffe“, Forschungsbericht MTK 02925, Universität Hannover, 1986
- [17] Höck, R.; Widmann, B.A.: „Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Motor- und Biodiesel)“, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 231 - 238
- [18] Jaskulla, N.: „Aspekte des motorischen Verhaltens von Kraftstoffen aus pflanzlichen Ölen“, FE S. 120 – 125 BMFT-Verbundprojekt "Kraftstoff aus Raps" 1994 FKZ 10618
- [19] Jurisch, C.; Meyer-Pitroff, R.: „Pflanzenölgeeignete Dieselmotoren deutscher Hersteller, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke“ – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 89 - 105
- [20] Kaltschmitt, M. ; Stelzer, Th.: „Ökologische Bilanzierung von Bioethanol im Vergleich zu fossilem Kraftstoff“, S. 481 – 491 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
- [21] Kampmann, H.-J.: „Abgaszusammensetzung von Pflanzenölmotoren der Baureihe P13,5, Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen“, Würzburg, 11.01.1994, Hrsg. C.A.R.M.E.N. e.V., S. 47 – 51
- [22] Kampmann, H.-J.: „Dieselmotor mit Direkteinspritzung für Pflanzenöl“, MTZ Motortechnische Zeitschrift Nr. 54, 1993, S. 378 – 383
- [23] Kampmann, H.-J. ; Bormann, K.: „Beeinflussung der Gemischbildung eines Dieselmotors mit direkter Einspritzung durch den Kraftstoff“, Kraftfahrzeugtechnik 1980, Berlin, Heft 8
- [24] Krahel, J.: „Motoremissionen durch Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselmotoren“, FE S. 54 – 58 BMFT-Verbundprojekt "Kraftstoff aus Raps" 1994 FKZ 10618
- [25] Baldauf, W; Balfanz, U: „Verarbeitung von Pflanzenölen zu Kraftstoff in Mineralöl-Raffinerieprozessen“ Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 153-168
- [26] Legien, G.: „Der Pflanzenöl-Motor für die Naturwirtschaft“, UMWELT-TECHNIK 2000. Ein Beitrag zum Schutz der Gesundheit, des Klimas und der Umwelt, Förderkreis ELSEBETT-UMWELT-Technik, Roth, 1998
- [27] Maurer, K.: „Standardisierung roher Pflanzenöle“, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 77 - 87
- [28] Maurer, K.: „Untersuchung zur Produktion von standardisiertem Pflanzenöl-Treibstoff und Ermittlung von motor- und verbrennungstechnischen Kenndaten bei auf Pflanzenölbetrieb umgerüsteten Dieselmotoren“. Kurzbericht über das Projekt NATURDIESEL, Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim, 2000
- [29] May, H.; Dietrich, W.; Hattingen, U.; Birkner, C.: „Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener Dieselmotoren, in VDI-Gesellschaft Energietechnik:

- Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke“ – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 183 - 204
- [30] May, H.: „Schadstoffemissionen an limitierten und nicht limitierten Komponenten bei Betrieb eines Vorkammer-Nutzfahrzeug Dieselmotors mit rohen und umgeesterten Pflanzenölen im Vergleich zu Dieselmotoren“, FE S. 59 – 67 BMFT-Verbundprojekt"Kraftstoff aus Raps“ 1994 FKZ 10618
 - [31] Menrad, H.; Weidmann, K.: „Rapsöl als Motorenkraftstoff“, in Mineralöltechnik Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Heft 5-6, Hamburg, 1989
 - [32] Ortmaier, E.: „Betriebswirtschaftliche Aspekte von Blockheizkraftwerken auf Pflanzenölbasis, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke“ – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 239 – 252
 - [33] Pak, Mjongsu; Alexi, A.: „Kaltgepresstes Rapsöl im Test“, Zeitschriftenaufsatz: Landtechnik, Band 47 (1992), S. 372-375
 - [34] Peschka, W.: “Hydrogen the Future Cryofuel in Internal Combustion Engines” S. 517 – 534 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
 - [35] Poitrat, E.: “Trials Programme on Engines with Rape Methyl Ester (RME) in France”,S. 409 – 415 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
 - [36] Pudol, F.: „Entwicklungsprojekte der ÖHMI Forschung und Ingenieurtechnik GmbH“, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 253 – 264
 - [37] Reinhardt, G. A. ; Borken, J.: “Life Cycle Assessment (LCA) of Liquid Biofuels versus conventional Fuels”, Methodology, Problems, Solutions, and Results,S. 471 – 479 „FUELS 3“ Esslingen 2001 TAE
 - [38] Reinhardt, G.A.: „Umweltauswirkungen der Kraftstoffsubstitution durch Pflanzenöle und seine Derivate, in VDI-Gesellschaft Energietechnik: Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke“ – Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Würzburg, 4. und 5.Juli 1994, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126 (1994), S. 169 - 182
 - [39] Remmele, E.; Glamser, S.: „Protokoll zur 5.Sitzung des LTV-Arbeitskreises „Dezentrale Pflanzenölgewinnung“ am 02.03.1999: Standardisierung von Pflanzenöl als Kraftstoff“, Freising-Weihenstephan, 1999
 - [40] Richter, H.: „Untersuchungen im Hause Porsche mit Rapsöl und Rapsölmethylester“, Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, Hrsg. C.A.R.M.E.N. e.V., S. 36 – 46
 - [41] Sadowski, S.: „Untersuchung der Zündeigenschaften von Schiffahrtsbrennstoffen für Dieselmotoren“, Dissertation, Universität Rostock, 1990
 - [42] Sagerer, R.: „Alternative Brennstoffe gefragt“, Wärmetechnik 2/1997, S. 67 – 76
 - [43] Sams, Th.; Tieber, J.: „Raps- und Altspeiseöl-Methylester im realen Fahrzeugbetrieb“, S. 431 – 444 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001

- [44] Scharmer, K.: "Enviromental impact of Biodiesel- Experience from an european Project" , S. 375 – 384 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
- [45] Schröder, H.; Häntsche, J.; Braungarten, G.; Puls, E.; König, W.: „ANWENDUNGSPROJEKT PFLANZENÖL SACHSEN-ANHALT“. Abschlußbericht, Calbe (Saale), 1994
- [46] Siedschlag, H.J.; Wischmann, U.: „Effektive Verwendung alternativer Kraftstoffe in Schiffen, die auf Binnenwasserstraßen, in Häfen und in Küstengewässern fahren“, Ingenieurzentrum Schiffbau GmbH, Rostock, 1993
- [47] Soyk, O.: „Eignung von aufbereiteten Altfetten zum Betrieb eines Dieselmotors“, Diplomarbeit am Fachbereich Maschinenbau der Universität der Bundeswehr München, München, 1999
- [48] Staiß, F.: „Jahrbuch Erneuerbare Energien 2000“, Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Biebertstein-Verlag, Radebeul, 2000
- [49] Stalder, K.; Gerhard, V.; Krah, J.: „Zur kanzerogenen Wirkung von Rußen aus Dieselmotoren im Betrieb mit Rapsöl, RME und Dieselkraftstoff“, Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, Hrsg. C.A.R.M.E.N. e.V., S. 30 – 35
- [50] Stieper, K. und Mitarbeiter: „Bericht über die Untersuchungen von Brennstoffmischungen aus Dieselkraftstoff (DK) und Rapsöl roh (RÖR) hinsichtlich des chemisch-physikalischen Verhaltens und der Eignung solcher Brennstoffe für die Binnenschifffahrt“, Universität Rostock, 1992
- [51] Strehler, A.: „Raps als Energieträger“, Zeitschriftenaufsatz: Landtechnik, Band 44 (1989), S. 408-410
- [52] Streit, A.; Frieß, H.: „Emissionsuntersuchungen an einem stationären Rapsöl-BHKW, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz“, Augsburg, 2000
- [53] Strobl, W. ; Fröchtenicht, R.: „Über Erdgas zum Wasserstoff, ein möglicher Ansatz zur Einführung der saubersten Kraftstoffe“, TAE S. 493 – 501 „FUELS 3“ Esslingen 2001
- [54] Syassen, O.: „Emissionen von Pflanzenöl-Kraftstoffen und ihre Umweltwirkungen“, FE S. 126 – 133 BMFT-Verbundprojekt "Kraftstoff aus Raps" 1994 FKZ 10618
- [55] Tschöke, H.: „Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren – Chance oder Irrweg?“, Fuels, 1st International Colloquium, 16 – 17 January 1997, Ed. Bartz, W.J., Esslingen, Germany
- [56] Tschöke, H.; Heinze, H.E.; Hieber, D.: „Rapsöl und Rapsölmethylester – wirklich eine Alternative zum Dieselkraftstoff aus Erdöl?“, Dieselmotorentechnik, Hrsg.: Essers, U.; Prescher, K.-H. 5. Symposium am 7. und 8.12.1995, Esslingen, S. 43 – 69
- [57] Walker, J.: "Application and technology of plant oil engines", High speed diesels & drives: the internat. engine drive systeme magazine, 1989, S. 22 –24
- [58] Weidmann, K.: „Anwendung von Rapsöl in Fahrzeug-Dieselmotoren“, Sonderdruck aus ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Heft 5, 1995
- [59] Weidmann, K.: „Einsatz von Rapsölmethylester in Volkswagen-Fahrzeugen“, FE S. 68 BMFT-Verbundprojekt "Kraftstoff aus Raps" 1994 FKZ 10618
- [60] Widmann, B.A.; Apfelbeck, R.; Gessner, B.H.; Pontius, P.: „Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener

- Hinsicht“. Gelbes Heft 40, Kurzfassung, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, 1992
- [61] Widmann, B.A.; Remmele, E.; Thuneke, K.: „Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW“. Gelbes Heft 69, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, 2000
 - [62] Widmann, B.A.; Thuneke, K.: „Erhebung des technischen Standes bei pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken im Alpengebiet“, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 2001
 - [63] Widmann, B.A.; Kern, C.: „Bewertung der Emissionen von Dieselmotoren bei Betrieb mit Kraftstoffen auf Pflanzenölbasis und mineralischem Dieselmotorkraftstoff – Datenauswertung der bisherigen Labor- und Flottenversuche“, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 2001
 - [64] Widmann, B.A.; Thuneke, K.: „Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW-Motoren in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und Eigenschaften der Pflanzenölkraftstoffe sowie Abgasreinigungssystemen“ – Literatur- und Technologieübersicht, Datenbank, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 1998
 - [65] Wilson, D.: “Improving the Quality of RME by the Use of Performance Chemicals”, S. 417 – 429 „FUELS 3“ TAE Esslingen 2001
 - [66] Wischmann, U.; Dicke, T.; Wichmann, V.: „Untersuchung alternativer Kraftstoffe im Praxiseinsatz auf Binnenschiffen“, Ingenieurzentrum Schiffbau GmbH, Rostock, 1994
 - [67] Wolfenberger, U.: „Rapsölmethylester als Treibstoff für Dieselmotoren“, FE S. 69 – 71 BMFT-Verbundprojekt "Kraftstoff aus Raps“ 1994 FKZ 10618
 - [68] Dreisbach, R.; Emmerling, G.: „Mögliche Wege zur Darstellung von EURO4 und EURO5 unter Berücksichtigung der dazu notwendigen Partikelmeßtechnik“, AVL. Partikelsymposium, Darmstadt, 2000
 - [69] Detlef Wendig, D.: „Untersuchungen zur Kraftstoffverteilung im Brennraum von Dieselmotoren mit Hilfe der Holographie“ Dissertation, WPU Rostock, 1985
 - [70] Krüger, G.: „Experimentelle Untersuchungen zur Zerstäubung von Kraftstoffstrahlen unter dieselmotorischen Einspritzbedingungen“, Dissertation, Universität Rostock, 1998
 - [71] Astachow, A.: „Untersuchung des Einspritzprozesses im Dieselmotor unter Beachtung des Einflusses der Brennstoffeigenschaften“, Dissertation, Universität Rostock, 1991
 - [72] Martin Hopp, M.: „Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor“, Dissertation, Universität Rostock, 2005
 - [73] Severin, T.: „Ein Beitrag zur experimentellen Untersuchung der dieselmotorischen Gemischaufbereitung und Verbrennung alternativer Kraftstoffe für den Schiffsmaschinenbetrieb“, Dissertation, WPU Rostock 1889
 - [74] Thuneke K.: „Erste Ergebnisse aus Emissionsmessungen an Pflanzenölmotoren“ Eigendruck des TFZ Straubing 2006
 - [75] Remmele, E.: „Hersteller und Umrüster pflanzenöлтаuglicher Motoren“ Eigendruck des TFZ Straubing 2006
 - [76] Stanev, A.: „Abgasemission I“ FVV Heft 552, 1994 Frankfurt Main

- [77] Körte, V.: „Experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren“; Abschlußbericht TV 8837 Porsche AG 1991
- [81] Klamann, D.: „Schmierstoffe und verwandte Produkte“, Weinheim, Verlag Chemie, 1982, S. 22
- [82] Möller, U.; Boor, U.: „Schmierstoffe im Betrieb“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987, S. 51
- [83] Mang, Ed. T.; Dresel, W.: „Lubricants and Lubrication“, WILEY GmbH, Weinheim, 2001,
- [84] Gairing, M.; Eberan-Eberhorst, Ch. v.: „Schmierung von Verbrennungskraftmaschinen“, 2., Auflage, Expert-Verlag, 2002,
- [85] N.N.: „Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für Pflanzenöltaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW“, Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung, Gelbes Heft 69 TFZ Straubing 2006
- [86] Thuneke, K.: „Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl“, Vortrag „11. Symposium Energie aus Biomasse – Biogas, Pflanzenöl, Festbrennstoffe“, 21./22. 11. 02, Kloster Banz
- [87] Wichmann, V.; Golisch, J.: „Stand der Nutzung von Pflanzenölen in internen Verbrennungsmotoren“ Forschungsbericht Uni-Rostock 2001 unveröffentlicht
- [88] Wichmann, V.; Hassel, E.; Schümann, U.; Berndt, S.; Harkner, W.; Flügge, E.; Sy, G.: „Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöлтаuglichen Traktoren“ Forschungsbericht Uni-Rostock 2006 unveröffentlicht
- [89] Pischinger, R.; Kraßnig, G.; Taucar, G.; Sams, T.: „Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine“ Band 5 der Reihe „Die Verbrennungskraftmaschinen“; Springer Verlag Wien New York 1989
- [90] Zacharias, F.: „Mollier Diagramme für Verbrennungsgase in der Datenverarbeitung“, MTZ 31 (1970) Heft 7
- [91] Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 27. Juli 2005 veröffentlicht am 30. Juli 2005 im Bundesanzeiger 142a Band 5
- [92] Pflaum, W.; Mollenhauer, K.: „Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschinen“ Band 3 der Reihe „Die Verbrennungskraftmaschinen“; Springer Verlag Wien New York 1977
- [93] Hohenberg, G.: „Berechnung des gasseitigen Wärmeübergangs in Dieselmotoren“ MTZ 41 (1980) Seite 321-326
- [94] Heinze, Schmidt; „Bestimmung des zeitlichen Anlaufs der Gemischbildung in einem Diesel-Einspritzstrahl durch spontane Ramanspektroskopie“ VDI Berichte Nr. 765 1989 Seite 505 ff.
- [95] Eifler, W.: „Untersuchungen zur Struktur des instationären Dieselöleinspritzstrahles im Düsennadelnahbereich mit Methoden der Hochfrequenz-Kinomatografie“ Dissertation Universität Karlsruhe 1990

9 Anhänge

1. Technische Daten der Versuchsmotoren für Prüfstandtest
2. Tabelle der wichtigsten Parameter der teilnehmenden Motoren und Betriebsstunden
3. „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (Stand 5/2000)“
4. Messergebnisse der Rapsölqualität in den Jahren 2001 bis 2005
5. Abgasnormen für mobile Motoren nach EU Richtlinie 97/68/EG
6. Abgasnormen für LKW- und PKW-Motoren
7. Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)
8. Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)
 - Lebenslauf
 - Selbstständigkeitserklärung
 - Strukturierte Zusammenfassung

Anhang 1: Technische Daten der Versuchsmotoren für Prüfstandstest

	6 VDS 24/24 AL-1	1 VDS 18/15	1 NVD 18
Gemischbildungsverfahren	Direkteinspritzung	Direkteinspritzung	Wirbelkammer
Aufladeverfahren	ATL + LLK	Fremdaufladung	Fremdaufladung
Hub s [mm]	240	180	125
Durchmesser D [mm]	240	150	180
Hubvolumen V_h [dm ³]	65,10	3,18	2,2
Verdichtungsverhältnis ε []	13	13 (15, 16)	18
effektive Leistung P_{me} [kW]	1000	80	10
Maximaldruck P_{max} [MPa]	14	17	70
effektiver Mitteldruck P_e [MPa]	1,80	2,0	0,65
Drehzahl n [min ⁻¹]	1000	1500	1000
Arbeitsverfahren	4-Takt	4-Takt	4-Takt
Ladeluftdruck p_L [MPa]	0,27	0,30	0,12
Ladelufttemperatur vor Kühler TLvK [°C]	170		
Ladelufttemperatur nach Kühler TLnK [°C]	50	50	56
Einspritzbeginn ESB [°KW vor OT]	16	variabel (14-6)	18
Düsennadelöffnungsdruck [MPa]	34,5	35,0	13
Abgastemperatur nach Zylinder [°C]	540	500	550
maximaler Einspritzdruck [MPa]	130	155	20
spezifischer Brennstoffverbrauch [g/kWh]	199	200	300
Einspritzdüsen	6x0,40x150	9x0,26x155	1 Lochdüse
Verbrennungsluftverhältnis λ_v	2,2	2,3	1,86

Anhang 2:**Tabelle der wichtigsten Parameter der teilnehmenden Motoren und Betriebsstunden**

Motor-Nr.	Motorhersteller	Motortyp	Leistung	Einspritzpumpe	Umrüster	Bh	KT
1	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	5030	1470
2	Sisu	Sisu 620.92	95 kW	LUCAS Delphin	Haus	1566	1167
3	Deutz	BF 6M 1013 E	88 kW	Bosch PLD	VWP	3605	1128
4	Sisu	Sisu 420.83	68 kW	Bosch Reiheneinspritzpumpe	Gruber	2052	1050
5	Cummins	359/ 59	122 kW	BOSCH PE	TCB	3368	1094
6	Cat	3196	306 kW	PLD	Haus	3165	1359
7	SAME DF	SAME DF	46 kW	Bosch PLD	VWP		
8	Deere	6068TL	103 kW	John Deere Verteilerpumpe	Stangl	2005	1213
9	Sisu	Sisu 620.83	89,8 kW	Bosch VP 44	Gruber	4340	1137
10	Deere	6081	118 kW	Bosch-Reihe	Stangl	2156	1241
11	Sisu	Sisu 620.93	112 kW	Reiheneinspritzpumpe 927 Bosch	Igl	3610	1292
12	Deutz	BF 4M 1012	63 kW	Bosch PLD	VWP	1857	1111
13	IVECO	IVECO	53 kW	STANADYNE Verteilerpumpe	VWP	2176	1285
14	Deutz	BF 4M 2013 C	87 kW	Bosch PLD	LBAG	3024	1208
15	Deutz	BF 4M 1012 EC	70 kW	Verteilerpumpe	LBAG	2159	1208
16	IVECO	804525*216	70 kW	Verteilerpumpe	LBAG	2166	853
17	Deutz	TD 226 B-4	70 kW	Verteiler - Einspritzpumpe	LBAG	3447	1260
18	Deutz	BF 6M 1013 E	114 kW	Bosch PLD	VWP	3075	1508
19	Deutz	BF 6M 1013 E	88 kW	Bosch PLD	VWP	1586	1165
20	Deutz	BF 6M 1013 FC	190 kW	Bosch PLD	VWP	3033	1223
21	Deutz	BF 4M 2013 C	80 kW	Bosch PLD	VWP	1913	1106
22	Deutz	BF 6M 1013 FC	190 kW	Bosch PLD	Haus	2030	1225
23	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	2768	1121
24	Deutz	BF 4M 1012 EC	73 kW	Bosch PLD	VWP	1508	1056
25	Deutz	BF 6M 1012 E	78 kW	Bosch PLD	VWP	1033	1432
26	Deutz	BF 4M 1012 EC	75 kW	Bosch PLD	VWP	2400	1187
27	Deutz	BF 6M 1013 EC	147 kW	Bosch PLD	VWP	2537	1327
28	Deutz	BF 6M 1013 E	88 kW	Bosch PLD	VWP	2348	1389
29	SAME DF	Premium 950 UT	80 kW	PLD	Haus	1027	1143
30	Sisu	Sisu 620.87	84 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	3226	1127
31	Deutz	BF 4L 913 H	70 kW	Bosch Reihenpumpe	TCB	569	
32	Deutz	BF 4M 2013 C	81 kW	Bosch PLD	Haus	2124	1278
33	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	1930	1207
34	Deutz	BF 6M 2013 C	103 kW	Bosch PLD	Haus	5317	1354
35	Deutz	BF 6M 1013 E	117 kW	Bosch PLD	VWP	3234	1283
36	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	2323	1246
37	SAME DF	1000. 6 W L	97 kW	Lucas Verteilerpumpe	Haus	2275	1164
38	Sisu	Sisu 620.89	96 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Haus	1380	1303
39	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	3222	1275
40	Deutz	BF 6M 1013 FC	190 kW	Bosch PLD	VWP	4039	1280
41	Deere	CD 6068	118 kW	Bosch Verteilerpumpe VP 44	Haus	1325	690
42	Sisu	Sisu 420.88	68 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Haus	2127	1229
43	Deutz	BF 6M 1013 E	115 kW	Bosch PLD	VWP	2310	1280
44	Deutz	BF 6M 1013 E	110 kW	Bosch PLD	VWP	2109	1274
45	Deutz	BF 4M 1012 EC	65 kW	Bosch PLD	VWP	2876	1218
46	Deutz	BF 6M 1013 E	115 kW	Bosch PLD	VWP	1501	1140

Anhang 2: teilnehmenden Motoren und Betriebsstunden

47	Deere	CD 4045	66 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Haus	1435	746
48	SAME DF	SAME DF	95 kW	Bosch PLD	Haus		
49	Deutz	BF 4M 2013 C	85 kW	Bosch PLD	Haus	4685	1277
50	Deutz	BF 6M 1013 E	95 kW	Bosch PLD	VWP	2640	1167
51	Deutz	BF 4M 1012 EC	73 kW	Bosch PLD	VWP	3204	1298
52	Case	Case Corp.6TAA-830	160 kW	PP 4M10P1J	Haus	1476	787
53	Deutz	BF 4M 2013 C	74 kW	Bosch PLD	Haus	1272	1166
54	Deutz	BF 4M 2013 C	74 kW	Bosch PLD	Haus	2118	1259
55	Deutz	BF 6M 1013 E	103 kW	Bosch PLD	VWP	1744	1048
56	Deutz	BF 6M 1013 E	95 kW	Bosch PLD	VWP	1762	1209
57	Deutz	BF 6M 1013 E	110 kW	Bosch PLD	VWP	2579	1181
58	Sisu	Sisu 620.90	80 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber		
59	Sisu	Sisu 620.88	130 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	2808	1043
60	Sisu	Sisu 620.93	100 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	3431	1212
61	Sisu	Sisu 620.88	95 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	2104	1252
62	Deere	CD 6068	110 kW	Bosch-Reihe, elektronisch geregelt	Haus	1827	780
63	Deutz	BF 6M 1013 E	95 kW	Bosch PLD	VWP	1633	1183
64	Deere	RG 6081	129 kW	Bosch Verteilerpumpe	Haus	2326	1213
65	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	BOSCH PLD	Haus	2409	1212
66	Deutz	BF 4M 2013 C	74 kW	Bosch PLD	Haus	3973	1178
67	Sisu	SISU183810 AG	80 kW	Bosch Reiheneinspritzppe RE 507	TCB		
68	Deere	CD 6081	105 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	TCB		
69				nicht besichtigt	Gruber		
70	Deutz	BF 4M 2013 C	85 kW	Bosch PLD	VWP	2179	1159
71	Deutz	BF 4M 2013 C	85 kW	Bosch PLD	Haus	1393	672
72	Deere	CD 6068	103 kW	Bosch Verteilerpumpe	Haus	1236	567
73	Deutz	BF 6M 1013 E	95 kW	Bosch PLD	VWP	2370	1149
74	Deere	CD 6068	103 kW	Bosch Verteilerpumpe	TCB		
75	Deutz	BF 4M 1012 EC	73 kW	Bosch PLD	VWP	3128	1183
76	Deutz	BF 6M 1013 E	115 kW	Bosch PLD	VWP	2449	1179
77	Deere	CD 6068	88 kW	Bosch Verteilerpumpe	Haus	928	539
78	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	3924	1193
79	Deutz	BF 6M 1013 E	95 kW	Bosch PLD	VWP	2443	1124
80	Deutz	BF 6M 1013 E	88 kW	Bosch PLD	VWP	1643	1137
81	Deutz	BF 6M 1013 E	120 kW	Bosch PLD	VWP	1079	1171
82	Deutz	BF 6M 1013 E	115 kW	Bosch PLD	VWP	2362	1171
83	Deutz	BF 6M 1012 E	75 kW	Bosch PLD	VWP	1472	1142
84	Deutz	BF 6M 1013 E	88 kW	Bosch PLD	VWP	1953	1150
85	MAN	DO 866	165 kW	Bosch Verteilerpumpe	LBAG	187	143
86	MAN	D 0836 LE 501	195 kW	Bosch Verteilerpumpe VP 44	Haus	2735	1130
87	Sisu	Sisu 620.94	85 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	3658	1105
88	Deutz	BF 6M 1013 E	95 kW	Bosch PLD	VWP	1600	1131
89	Deutz	BF 4M 1012 EC	65 kW	Bosch PLD	VWP	1964	1153
90	Deutz	BF 4M 1012 EC	65 kW	Bosch PLD	VWP	2375	1081
91	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	Haus	2689	1114
92	Deutz	BF 6M 1013 E	115 kW	Bosch PLD	VWP	2357	1097
93	Deere	6068 HLA 72	110 kW	Bosch VP 44	VWP	1452	1012
94	Deere	6068 HLA 71	99 kW	Bosch VP 44	VWP	1019	1137

Anhang 2: teilnehmenden Motoren und Betriebsstunden

95	Deere	6081 TRW 12	129 kW	BOSCH PLD	VWP	1698	1099
96	Deutz	BF 4M 1012 EC	65 kW	Bosch PLD	VWP	3275	914
97	Deutz	BF 4M 1012 EC	62 kW	Bosch PLD	VWP	2969	1122
98	Deere	6068 HLA 73	118 kW	Bosch VP 44	VWP	1888	1136
99	Deere	6068 HLA 73	118 kW	Bosch VP 44	VWP	802	978
100	Deutz	BF 4M 2013 C	91 kW	Bosch PLD	VWP	2056	1120
101	Deutz	BF 6M 1013 E	90 kW	Bosch PLD	VWP	2121	1128
102	Deutz	BF 6M 1012 E	75 kW	Bosch PLD	VWP	1590	1138
103	Deutz	BF 6M 2013 C	118 kW	Bosch PLD	VWP	2625	1044
104	Deutz	BF 6M 1013 E	90 kW	Bosch PLD	VWP	992	1072
105	Deutz	BF 6M 1013 FC	169 kW	Bosch PLD	VWP	2505	1064
106	Deutz	BF 6M 1013 E	81 KW	Bosch PLD	VWP	3679	1065
107	Deutz	BF 6M 2013 C	85 kW	Bosch PLD	VWP	1631	1085
108	Deere	6068 HLA 72	110 kW	Bosch Verteilerpumpe	VWP	1721	1097
109	Deere	6068 HLA 72	110 kW	Bosch VP 44	VWP	1855	1091
110	Sisu	Sisu 620.89	107 kW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	2481	1042
111	Sisu	Sisu 620.94	88 KW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	2068	1058
112	Sisu	Sisu 620.87	114 KW	Stanadyne Verteilerpumpe	Gruber	3753	1025
113	Deutz	BF 6M 1013 E	88 kW	Bosch PLD	VWP	999	1172
114	Deutz	BF 6M 2013 C	136 kW	Bosch PLD	Haus	2750	1030
115	Deutz	BF 6M 2013 C	137 kW	Bosch PLD	Haus	1323	679

Anhang 3 : „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (Stand 5/2000)“ nach [61]

Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min.	max.	
für Rapsöl charakteristische Eigenschaften				
Dichte (15 °C)	kg/m³	900	930	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220		DIN EN 22719
Heizwert	kJ/kg	35000		DIN 51900-3
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm²/s		38	DIN EN ISO 3104
Kälteverhalten				Rotationsviskosimetrie (Prüfbedingungen werden erarbeitet)
Zündwilligkeit (Cetanzahl)				Prüfverfahren wird evaluiert
Koksrückstand	Masse-%		0,40	DIN EN ISO 10370
Iodzahl	g/100 g	100	120	DIN 53241-1
Schwefelgehalt	mg/kg		20	ASTM D5453-93
variable Eigenschaften				
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25	DIN EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0	DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	5,0		ISO 6886
Phosphorgehalt	mg/kg		15	ASTM D3231-99
Aschegehalt	Masse-%		0,01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt	Masse-%		0,075	pr EN ISO 12937

Anhang 4: Messergebnisse der Rapsölqualität in den Jahren 2001 bis 2005

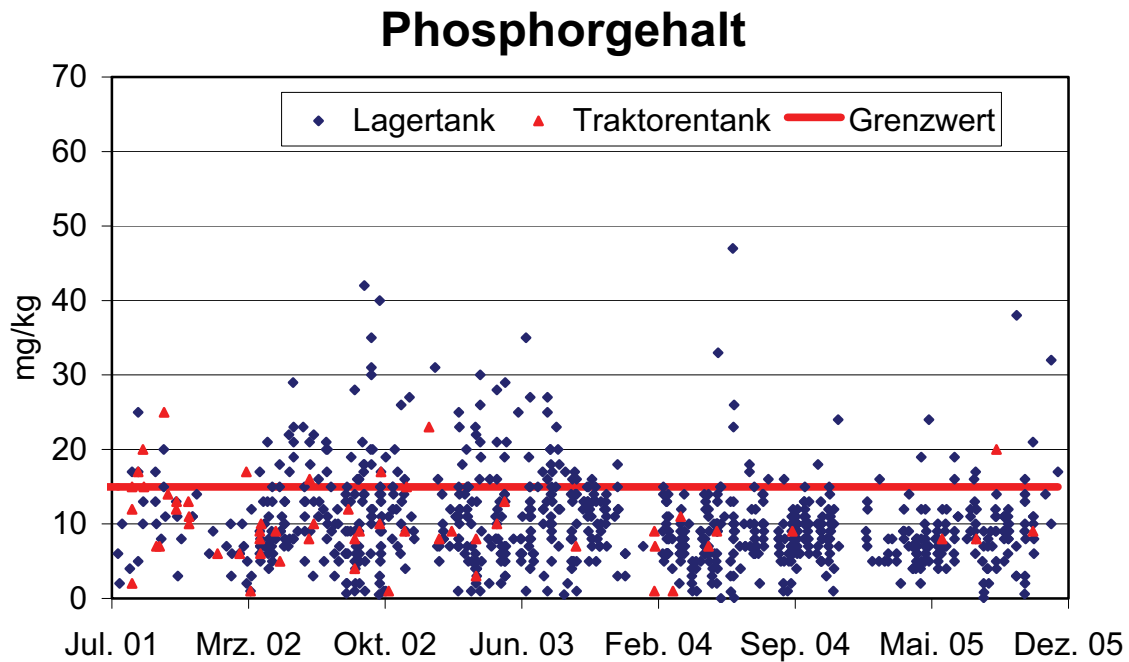


Abbildung 1: Phosphorgehalte der Rapsölproben 2001 bis 2005 aus Lager- und Motorentanks nach [88]

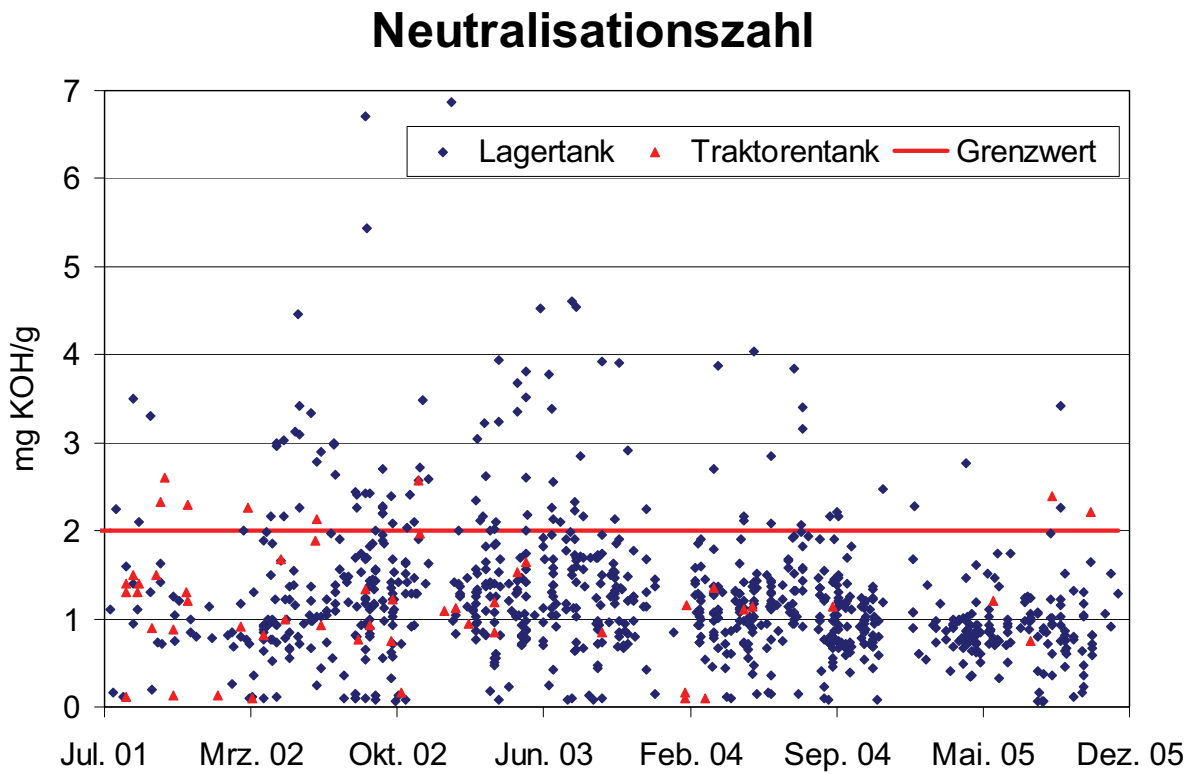


Abbildung 2: Neutralisationszahl der Rapsölproben 2001 bis 2005 aus Lager- und Traktorentanks nach [88]

Anhang-4- Messergebnisse der Rapsölqualität in den Jahren 2001 bis 2005

Wassergehalt

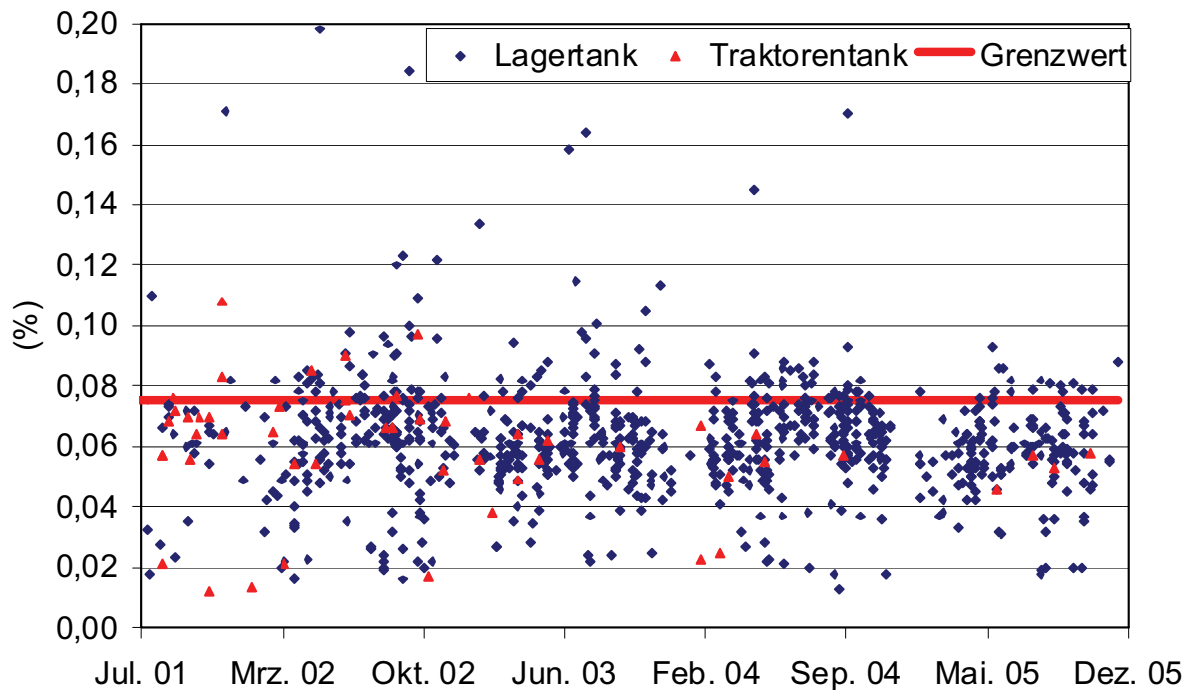


Abbildung 3: Wassergehalt der Rapsölproben 2001 bis 2005 aus Lager- und Traktorentanks nach [88]

Oxidationsstabilität

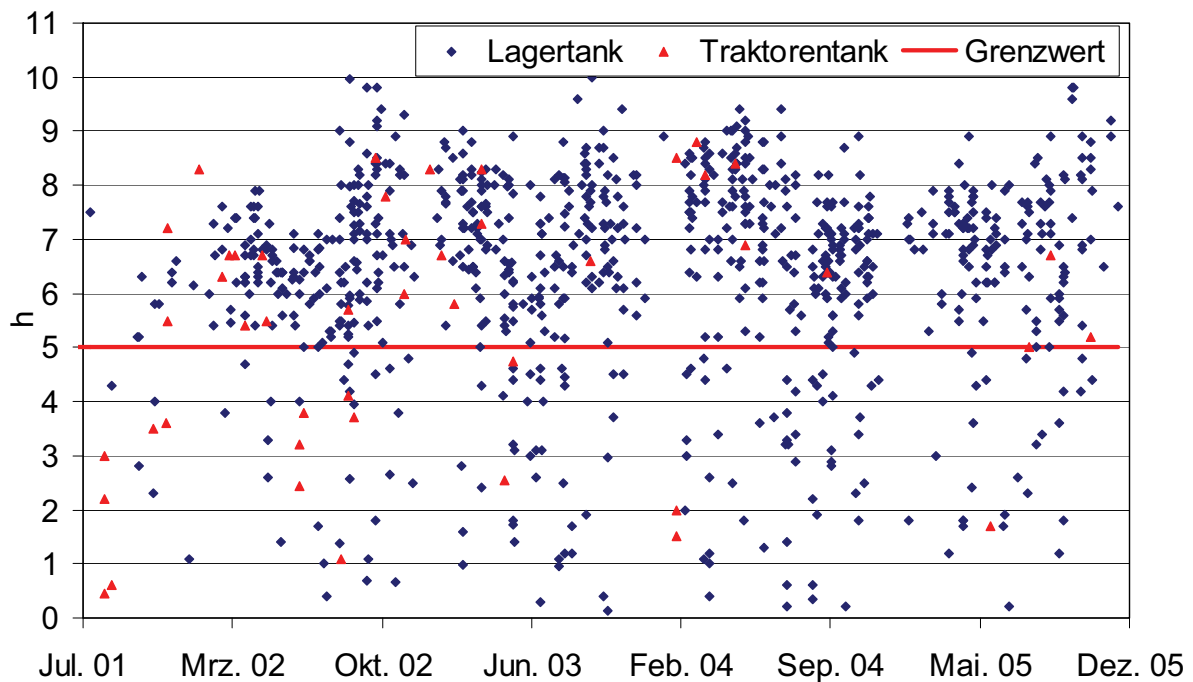


Abbildung 4: Oxidationsstabilität der Rapsölproben 2001 bis 2005 aus Lager- und Traktorentanks nach [88]

Anhang-4- Messergebnisse der Rapsölqualität in den Jahren 2001 bis 2005

Gesamtverschmutzung

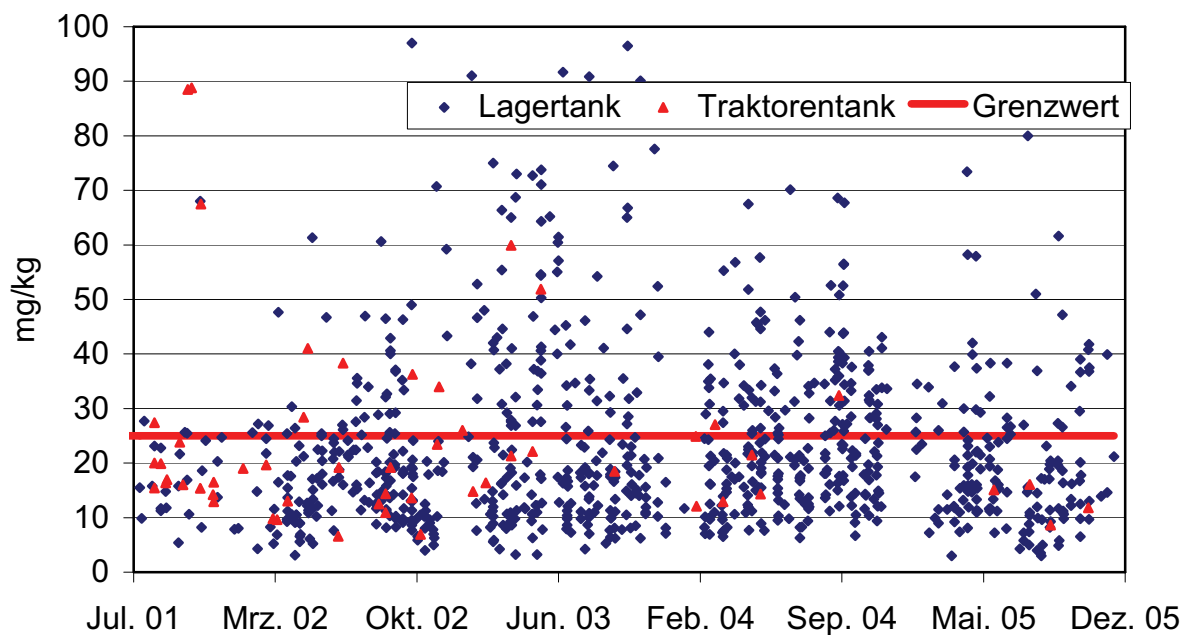


Abbildung 5: Gesamtverschmutzung der Rapsölproben 2001 bis 2005 aus Lager- und Traktorentanks nach [88]

Schwefelgehalt

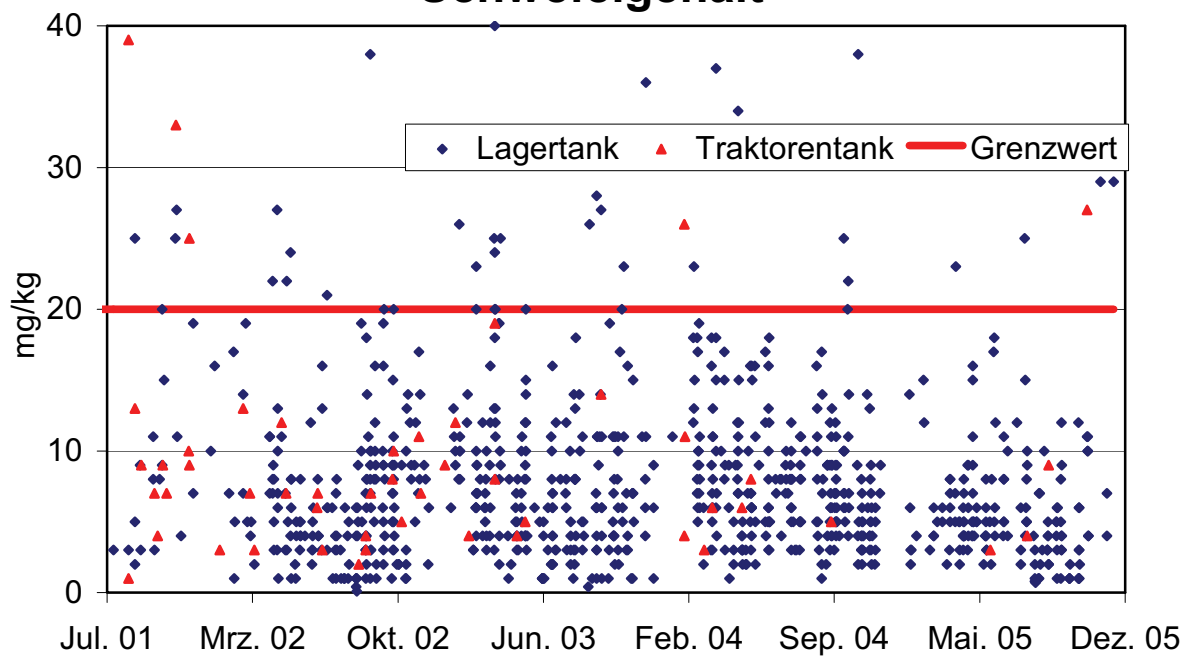


Abbildung 6: Schwefelgehalt der Rapsölproben aus Lager- und Traktorentanks nach [88]

Anhang-4- Messergebnisse der Rapsölqualität in den Jahren 2001 bis 2005

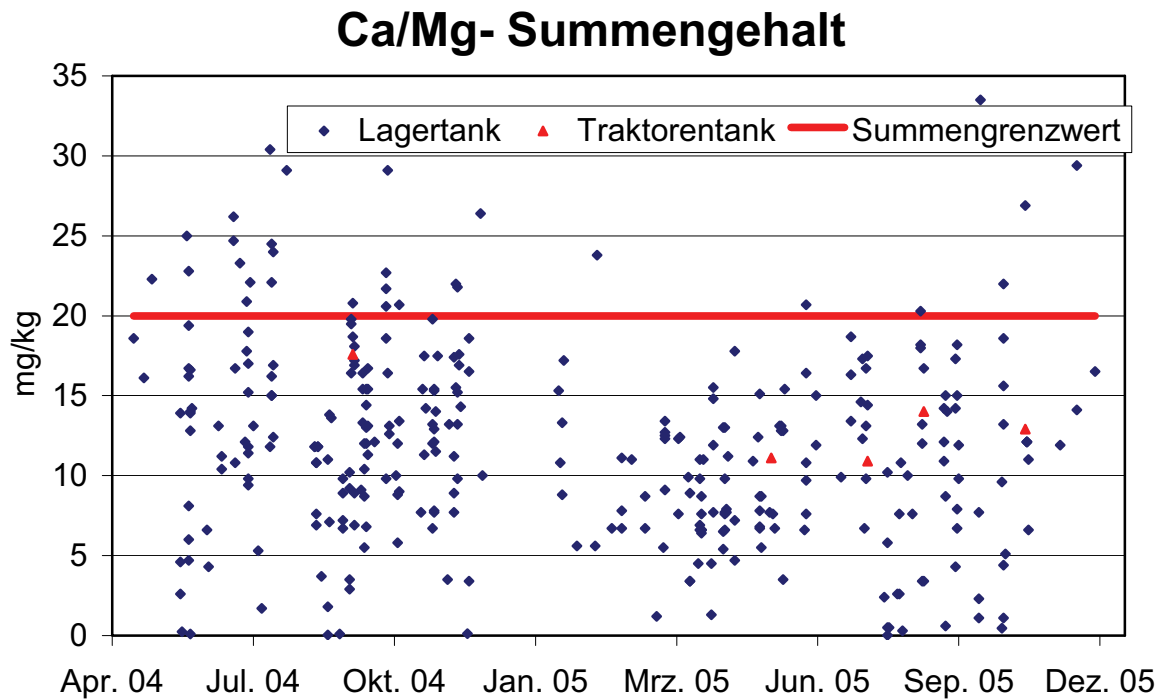


Abbildung 7: Summengehalt an Kalzium und Magnesium der Rapsölproben aus Lager- und Traktorentanks nach [88]

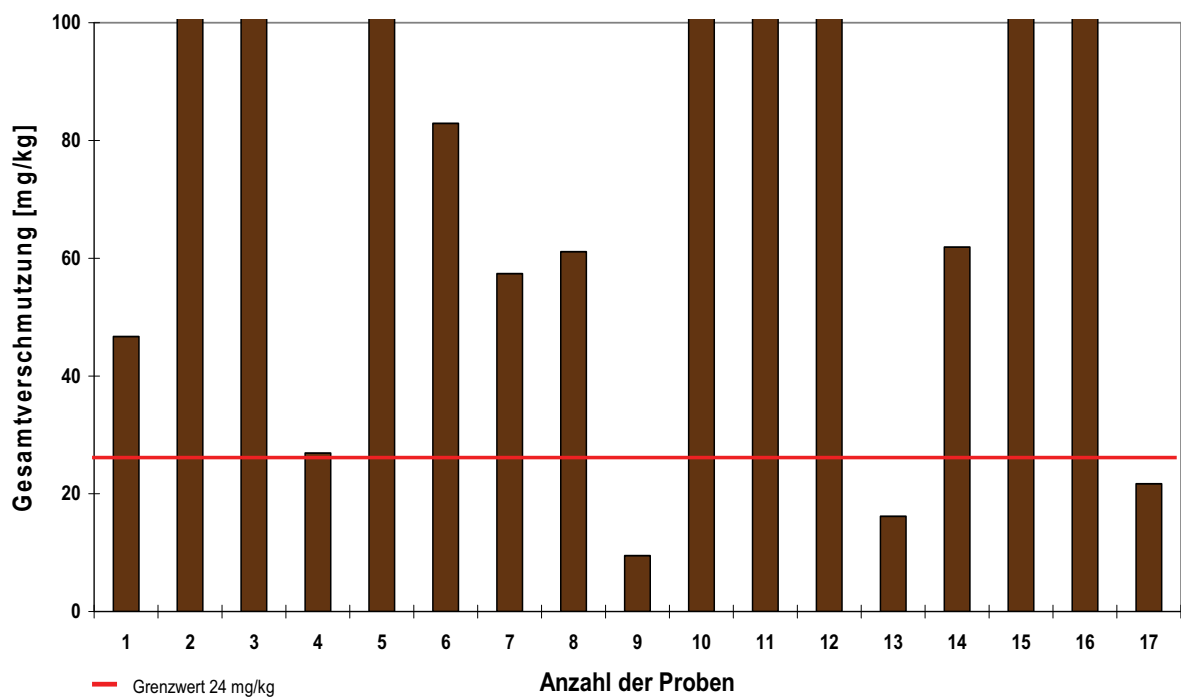


Abbildung 8: Gesamtverschmutzung von ausgewählten Tanksumpfpfproben nach [88]

Anhang-4- Messergebnisse der Rapsölqualität in den Jahren 2001 bis 2005

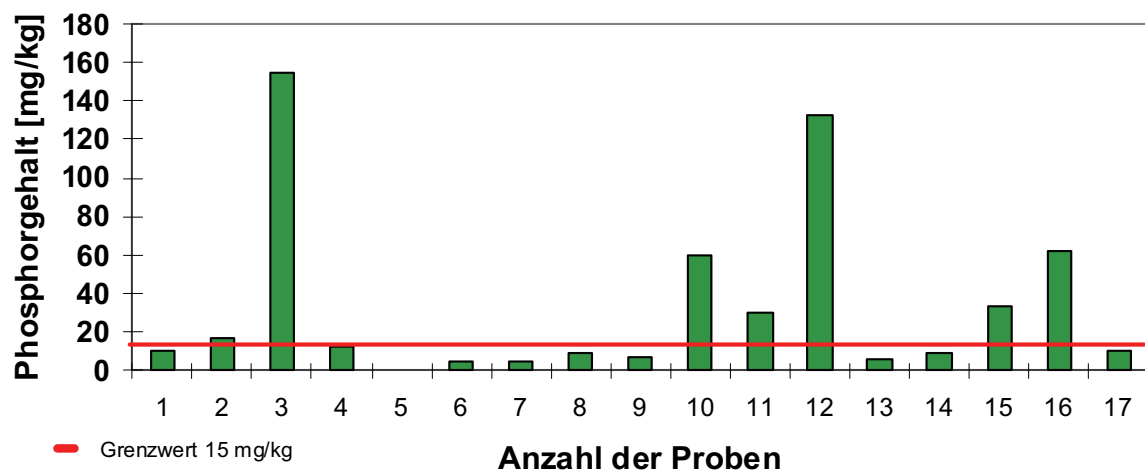


Abbildung 9: Phosphorgehalte von ausgewählten Tanksumpfproben nach [88]

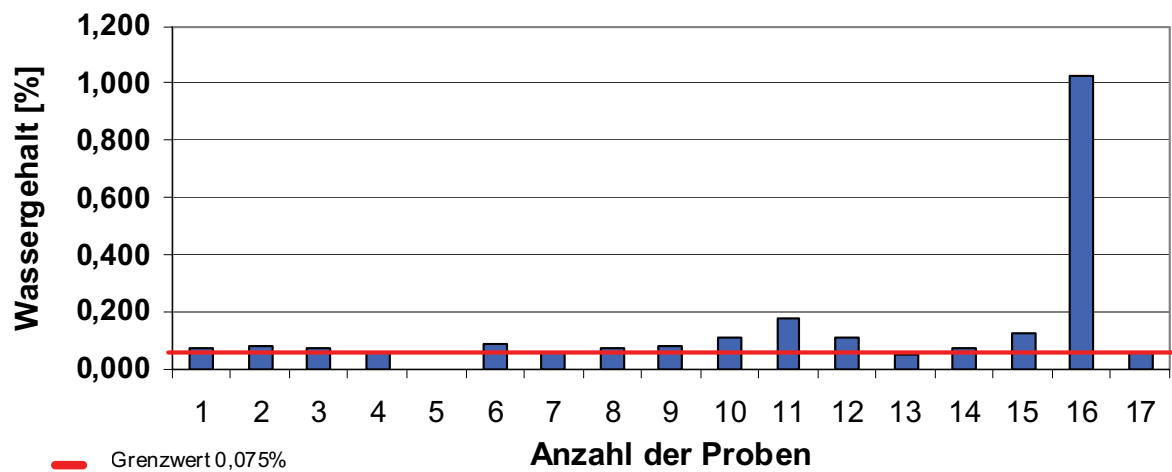


Abbildung 10: Wassergehalte von ausgewählten Tanksumpfproben nach [88]

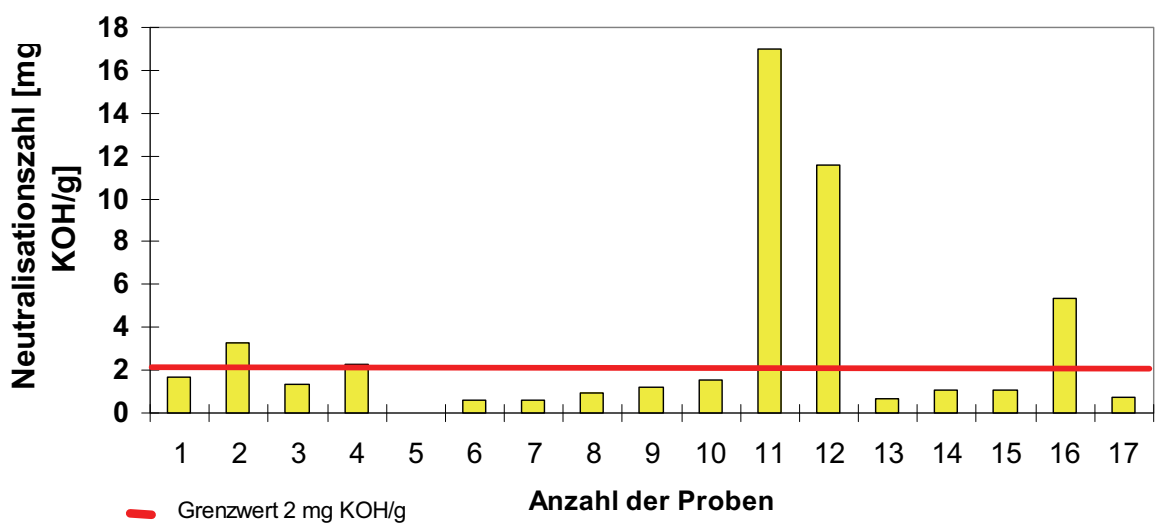


Abbildung 11: Neutralisationszahl von ausgewählten Tanksumpfproben nach [88]

Anhang 5: Abgasnormen für mobile Motoren nach EU Richtlinie 97/68/EG

Tabelle 1: Grenzwerte nach EU Richtlinie 97/68/EG bzw. 2004/26/EG für mobile M.

Leistung P _N	NO _X	HC	CO	Partikel	Datum *
kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	der Anwend.
Stufe 1					
37 ≤ P _N < 75	9,2	1,3	6,5	0,85	04. 1999
75 ≤ P _N < 130	9,2	1,3	5,0	0,70	01. 1999
130 ≤ P _N < 560	9,2	1,3	5,0	0,54	01. 1999
Stufe 2					
18 ≤ P _N < 37	8,0	1,5	5,5	0,8	01. 2001
37 ≤ P _N < 75	7,0	1,3	5,0	0,4	01. 2004
75 ≤ P _N < 130	6,0	1,0	5,0	0,3	01. 2003
130 ≤ P _N < 560	6,0	1,0	3,5	0,2	01. 2002
Stufe 3 A					
	NO _X +	NMHC			
18 ≤ P _N < 37	7,5		5,5	0,6	01. 2007
37 ≤ P _N < 75	4,7		5,0	0,4	01. 2008
75 ≤ P _N < 130	4,0		5,0	0,3	01. 2007
130 ≤ P _N < 560	4,0		3,5	0,2	01. 2006
Stufe 3 B					
37 ≤ P _N < 56	4,7 NO _X + NMHC		5,0	0,025	01. 2013
56 ≤ P _N < 75	3,3	0,19	5,0	0,025	01. 2012
75 ≤ P _N < 130	3,3	0,19	5,0	0,025	01. 2012
130 ≤ P _N < 560	2,0	0,19	3,5	0,025	01. 2011
Stufe 4					
56 ≤ P _N < 130	0,4	0,19	5,0	0,025	10. 2014
130 ≤ P _N < 560	0,4	0,19	3,5	0,025	2014

Anhang 6: Abgasnormen für LKW- und PKW-Motoren

Tabelle 1: Grenzwerte für LKW über 3,5 Tonnen Gesamtgewicht

Stufe	NO _x	HC	CO	Partikel	Datum
	g/ kWh	g/ kWh	g/ kWh	g/ kWh	
Euro 0	15,8	2,6	12,3	Keiner	1990
Euro 1	9	1,23	4,9	0,4	1992
Euro 2	7	1,1	4	0,15	1995
Euro 3	5	0,66	2,1	0,1	2000
Euro 4	3,5	0,46	1,5	0,02	2005
Euro 5	2	0,46	1,5	0,02	2008

Tabelle 2: Grenzwerte für PKW mit Dieselmotor Gesamtgewicht kleiner 3,5 Tonnen

Stufe	NO _x	HC+ NO _x	CO	Partikel	Datum *
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	
Euro 1		1130	3160	180	1. 7. 1992
Euro 2		700/900*	1000	80/100*	1. 1. 1996
Euro 3	500	560	640	50	1. 1. 2000
Euro 4	250	300	500	25	1. 1. 2005
Euro 5	180	230	500	5	1. 9. 2009
Euro 6	80	170	500		1. 9. 2014

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast

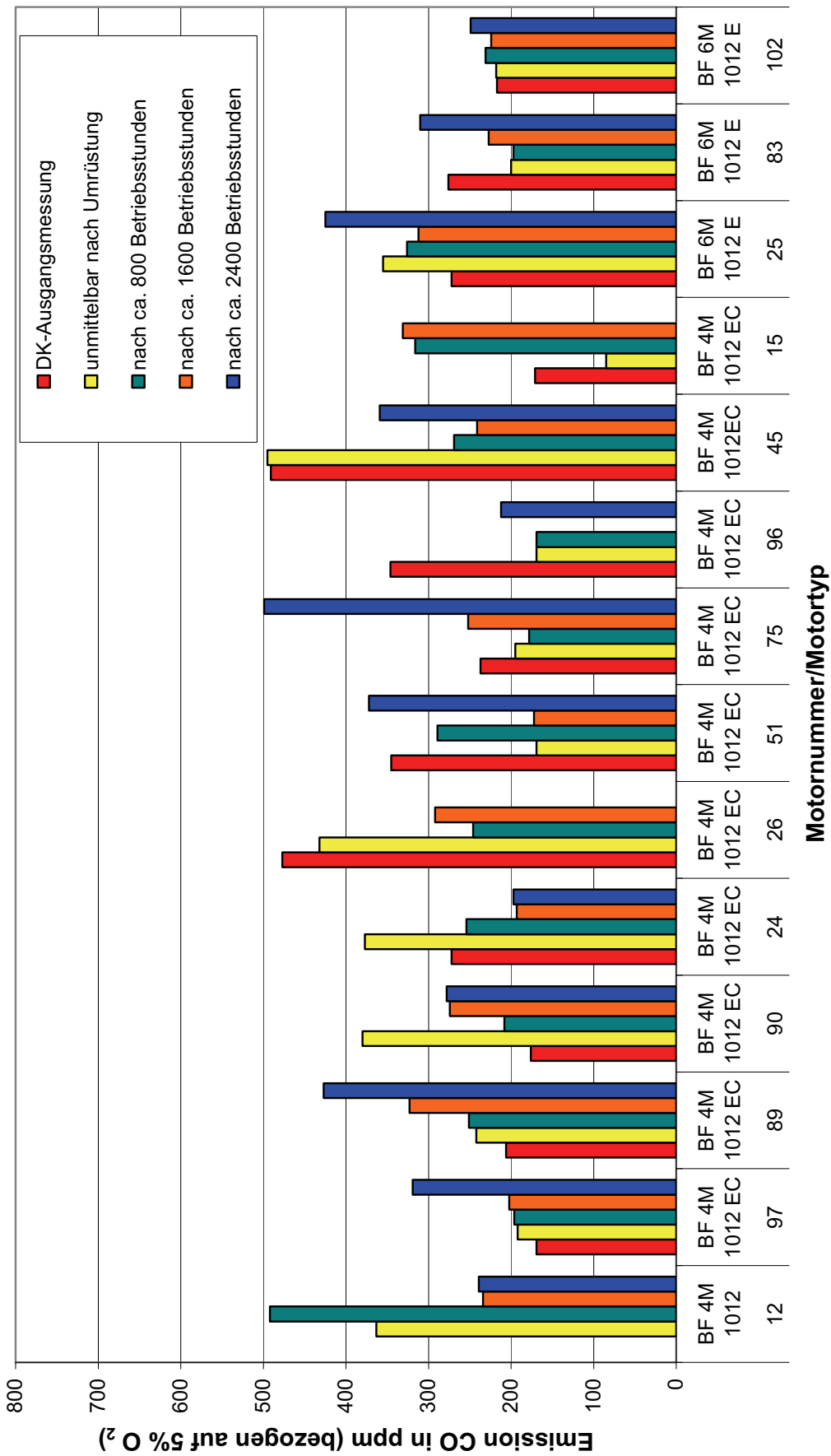


Abbildung 1: CO-Emissionen der Motorenbaureihen BF 4M 1012 EC und BF 6M 1012 E nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast

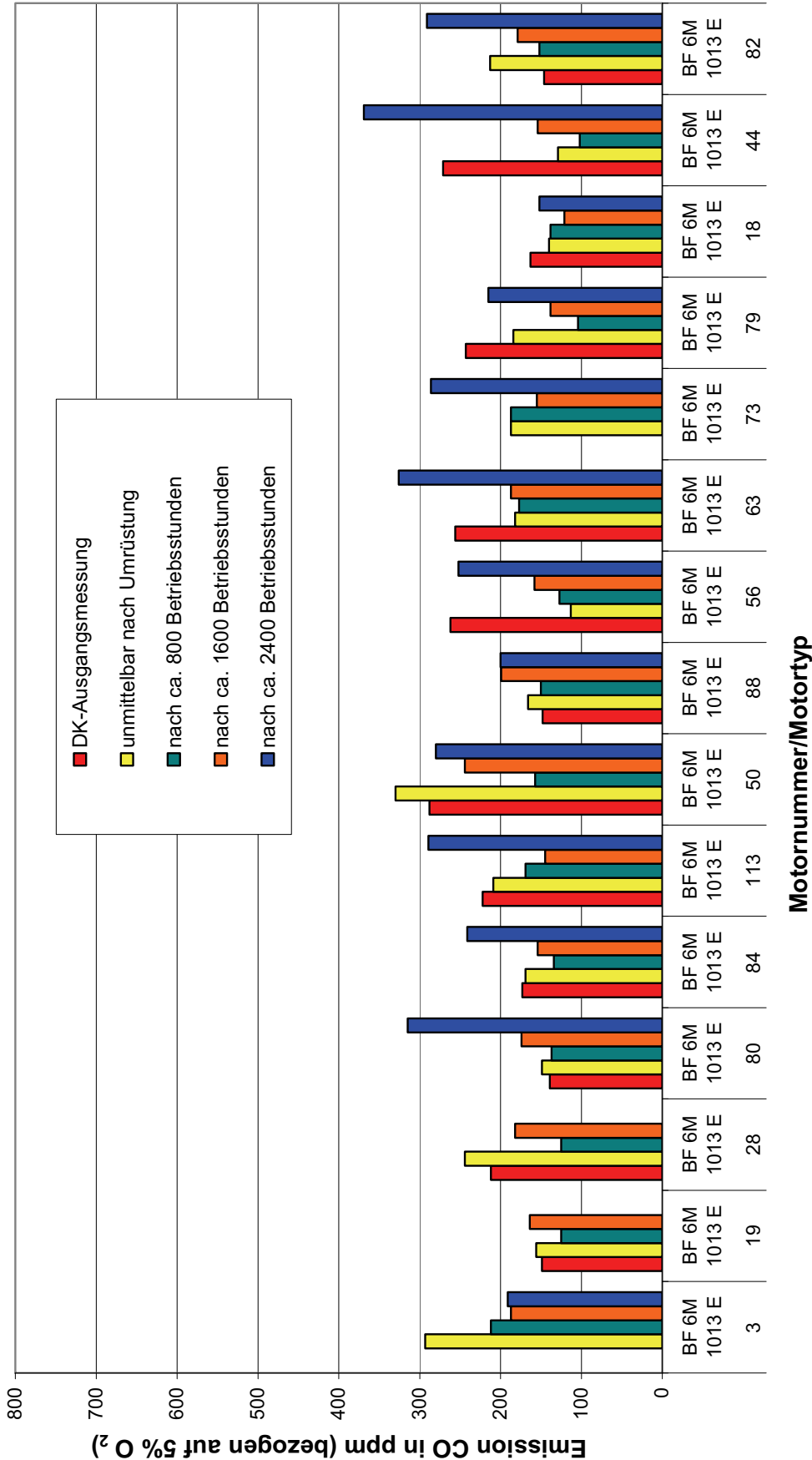
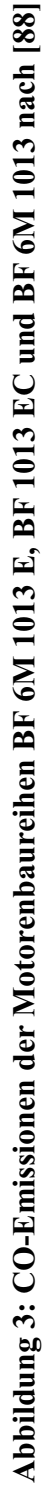


Abbildung 2: CO-Emissionen der Motorenbaureihen BF 6M 1013 E nach [88]

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast



Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast

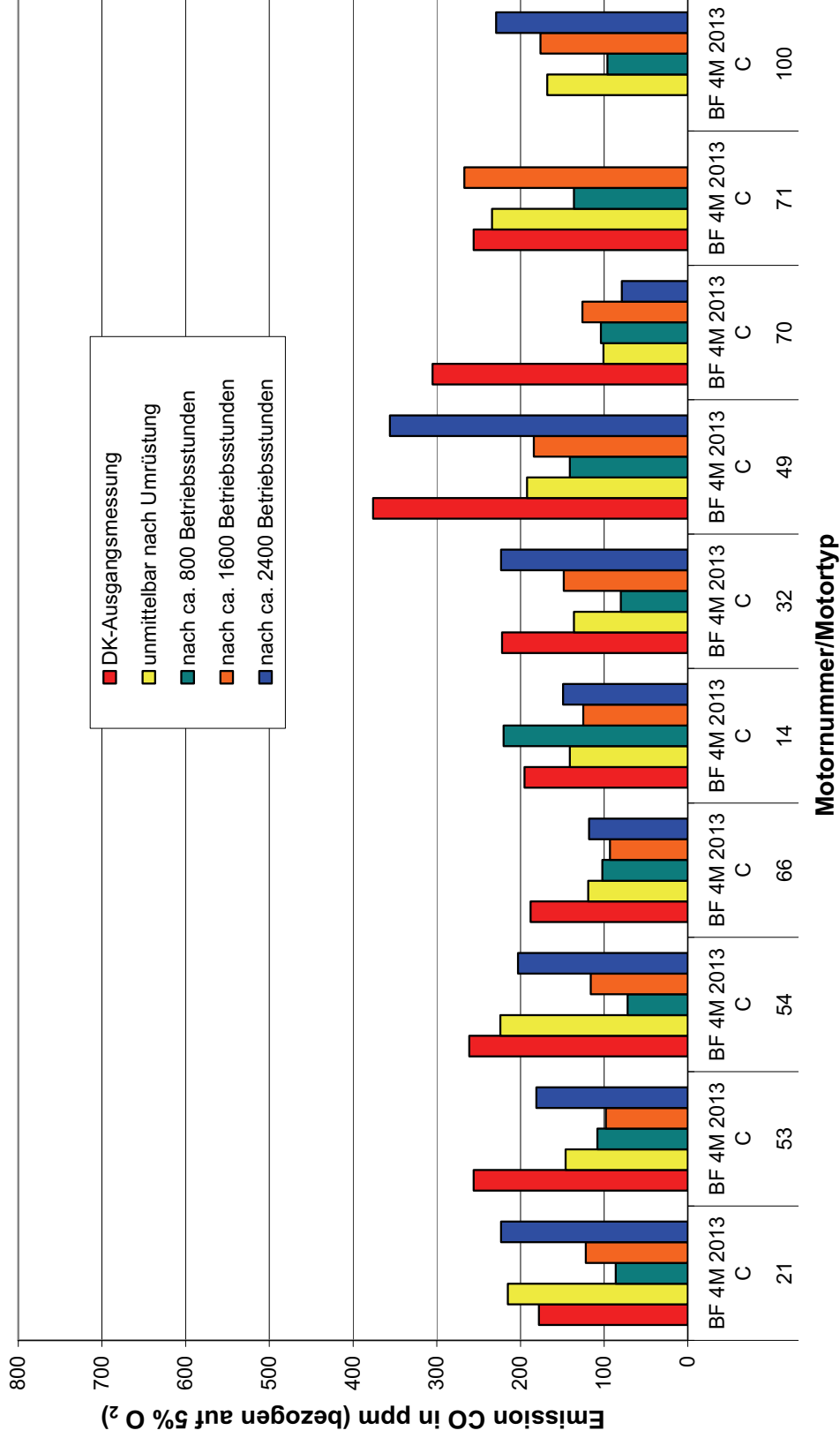


Abbildung 4: CO-Emissionen der Motorenbaureihen BF 4M 2013 C nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast

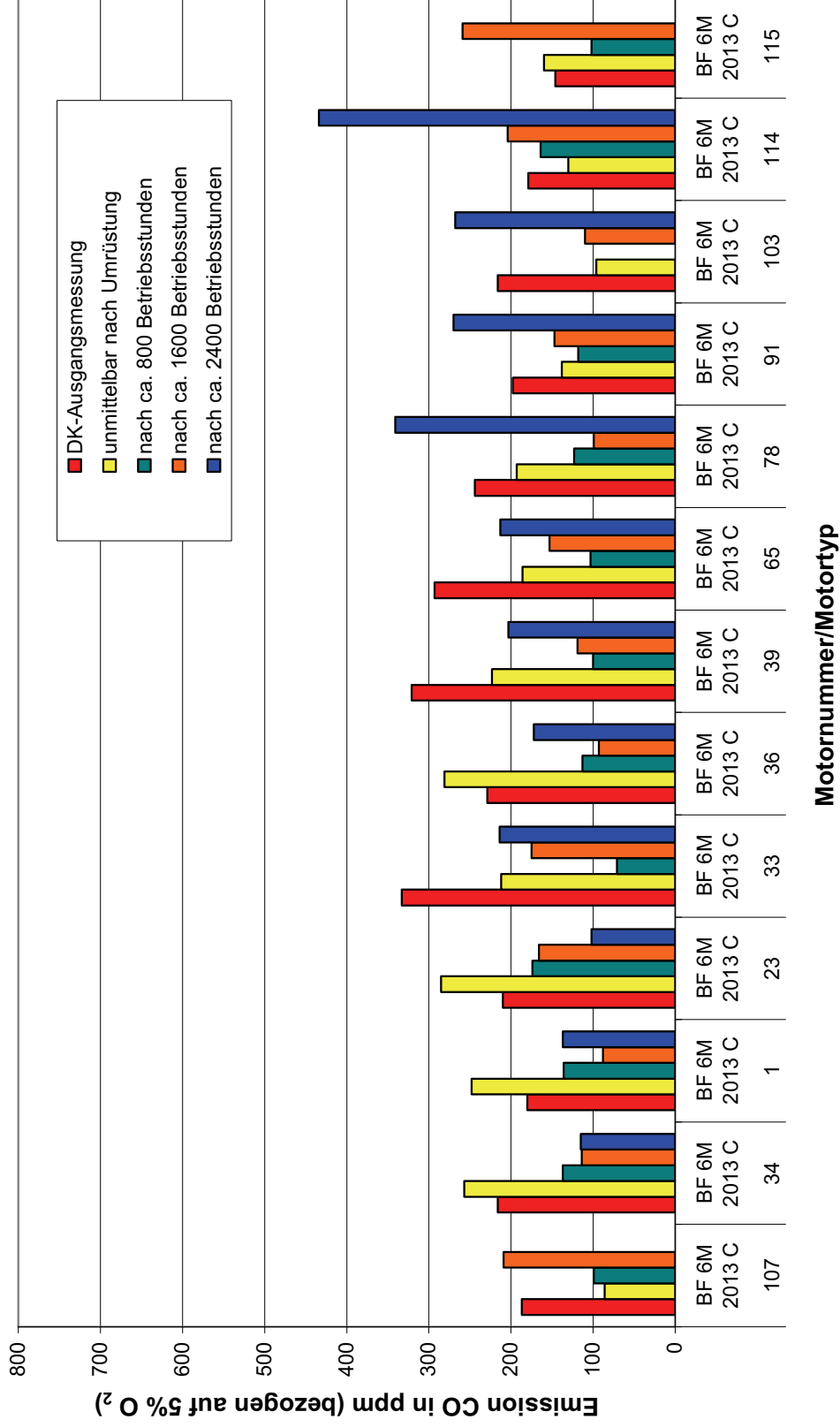


Abbildung 5: CO-Emissionen der Motorenbaureihen BF 6M 2013 C nach [88]

Emissionsmessung CO bei n=konstant: Nulllast



Abbildung 6: CO-Emissionen der Motorenbaureihen 4045, 6068 und 6081 nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast

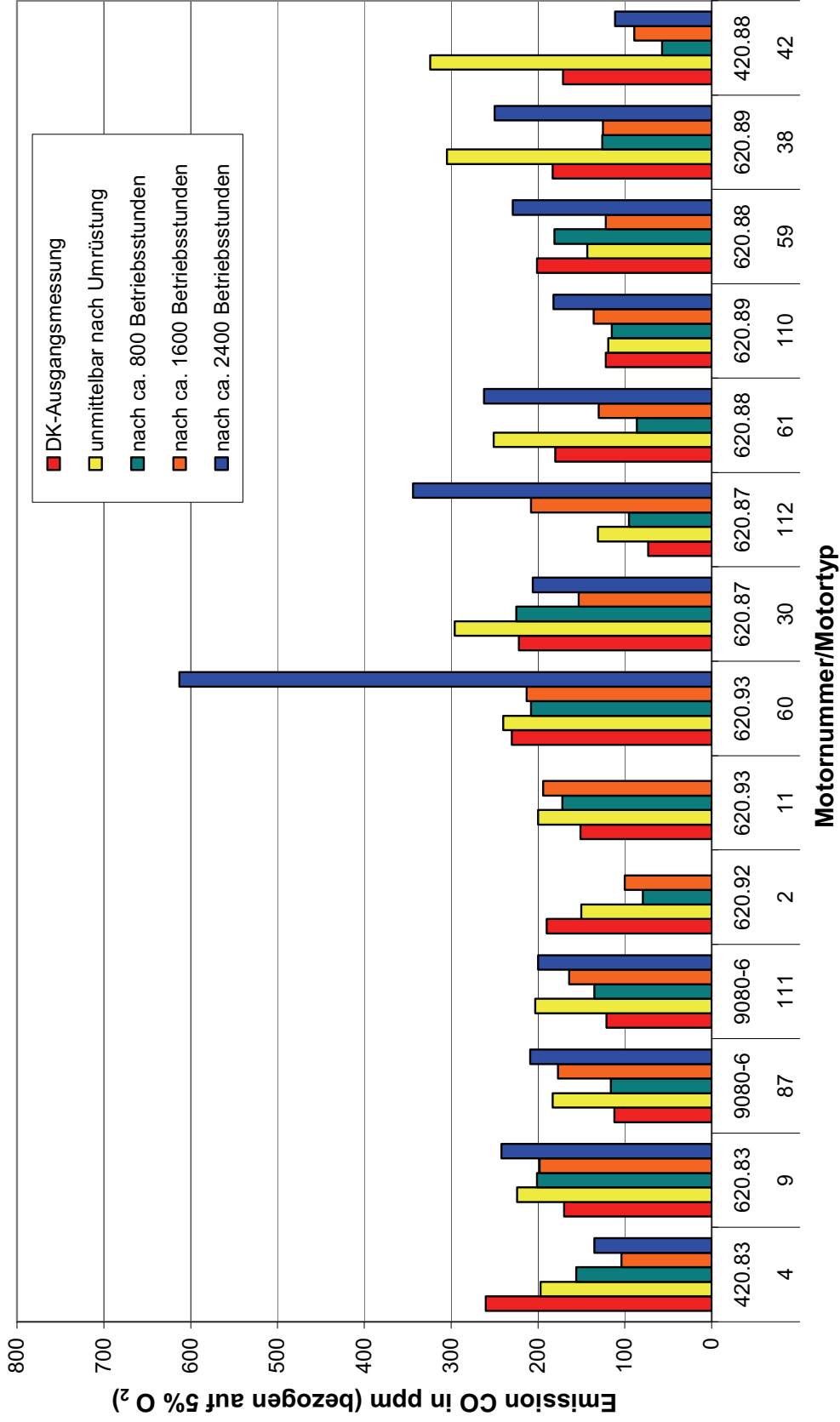


Abbildung 7: CO-Emissionen der Motorenbaureihen 420. u. 620. nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung CO bei n=konstant; Nulllast

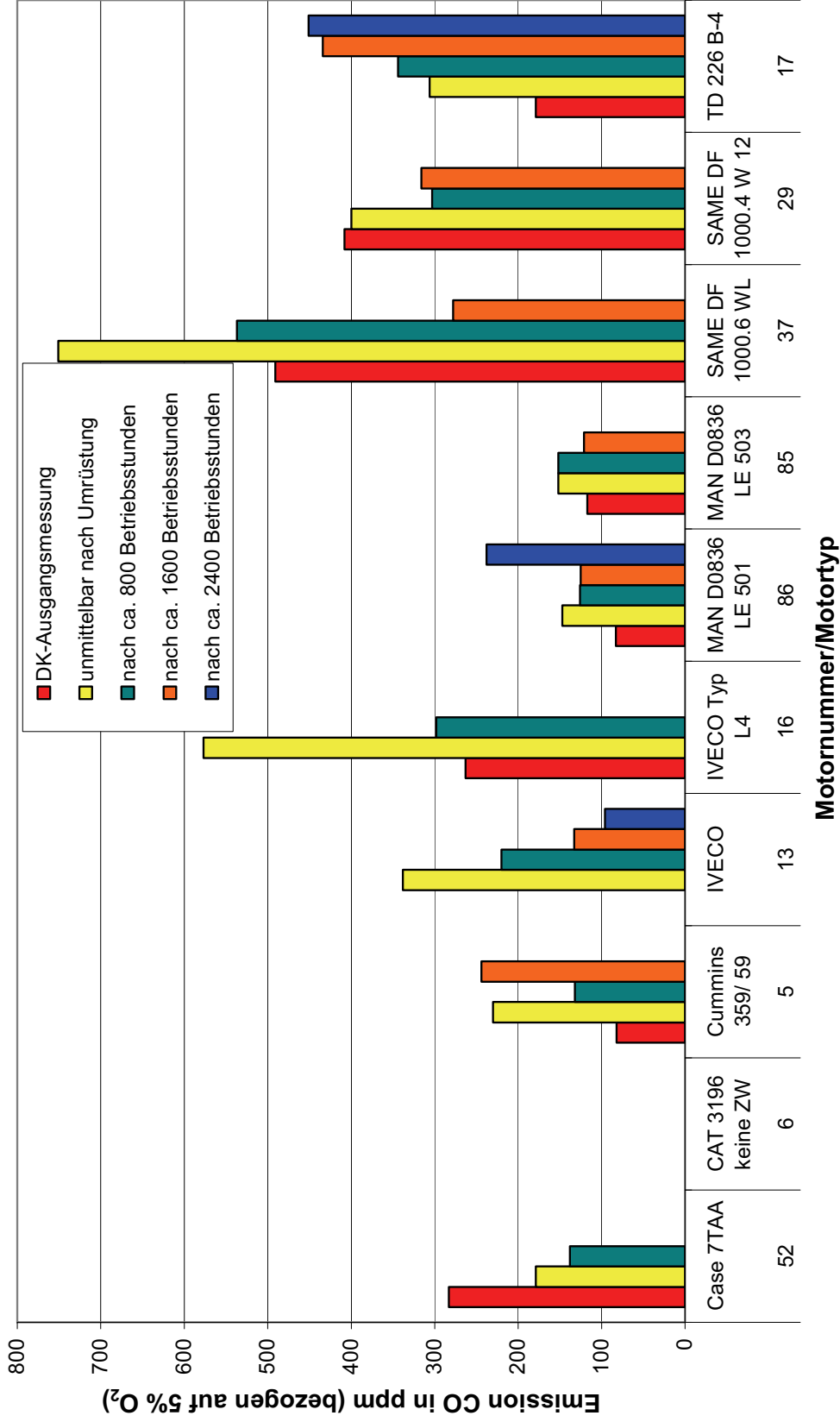


Abbildung 8: Bild 4.3.2.8: CO-Emissionen der Motorenbaureihen Same 1000 und Sonstiges nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

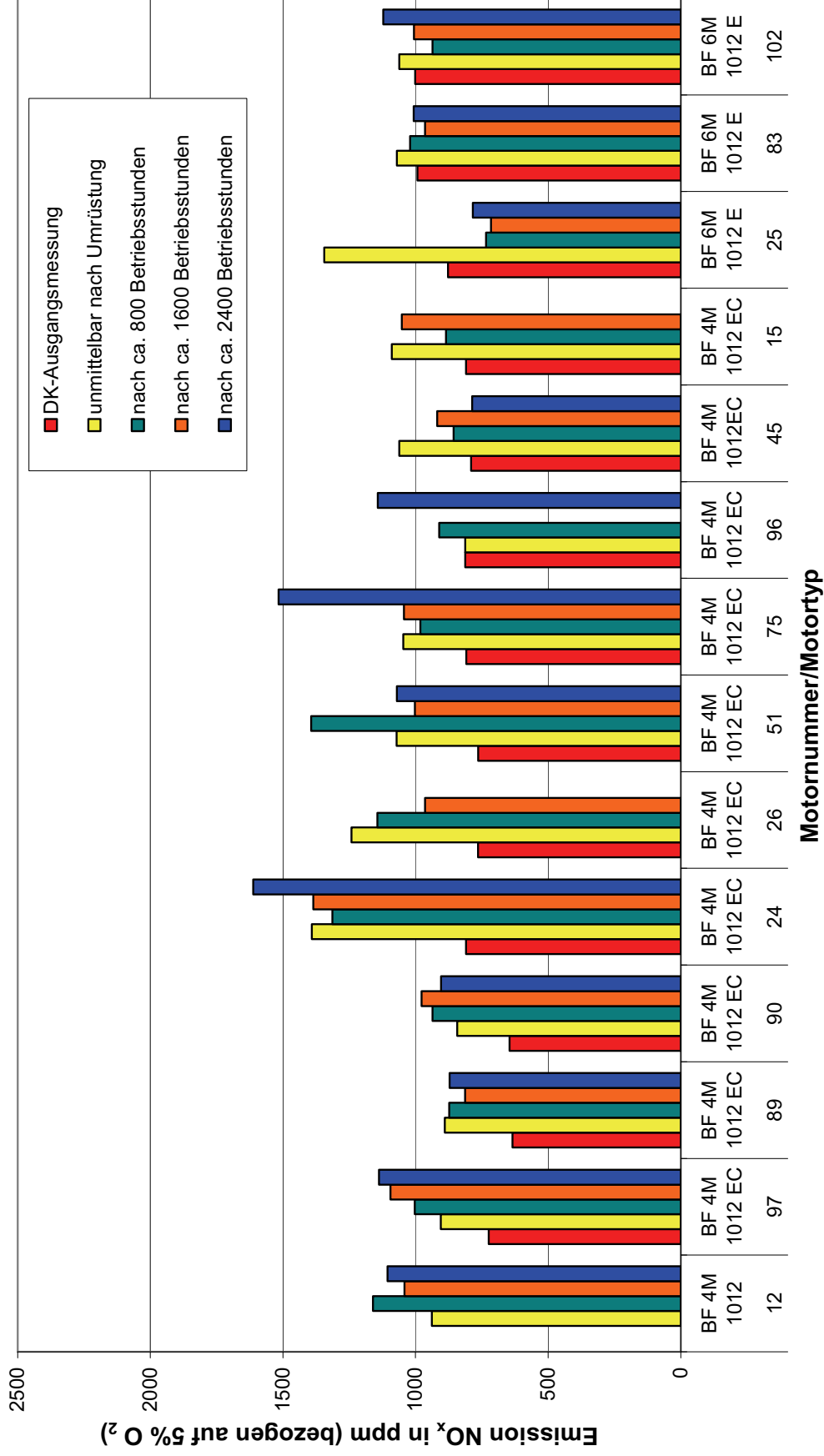


Abbildung 9: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen BF 4M 1012 EC und BF 6M 1012 E nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

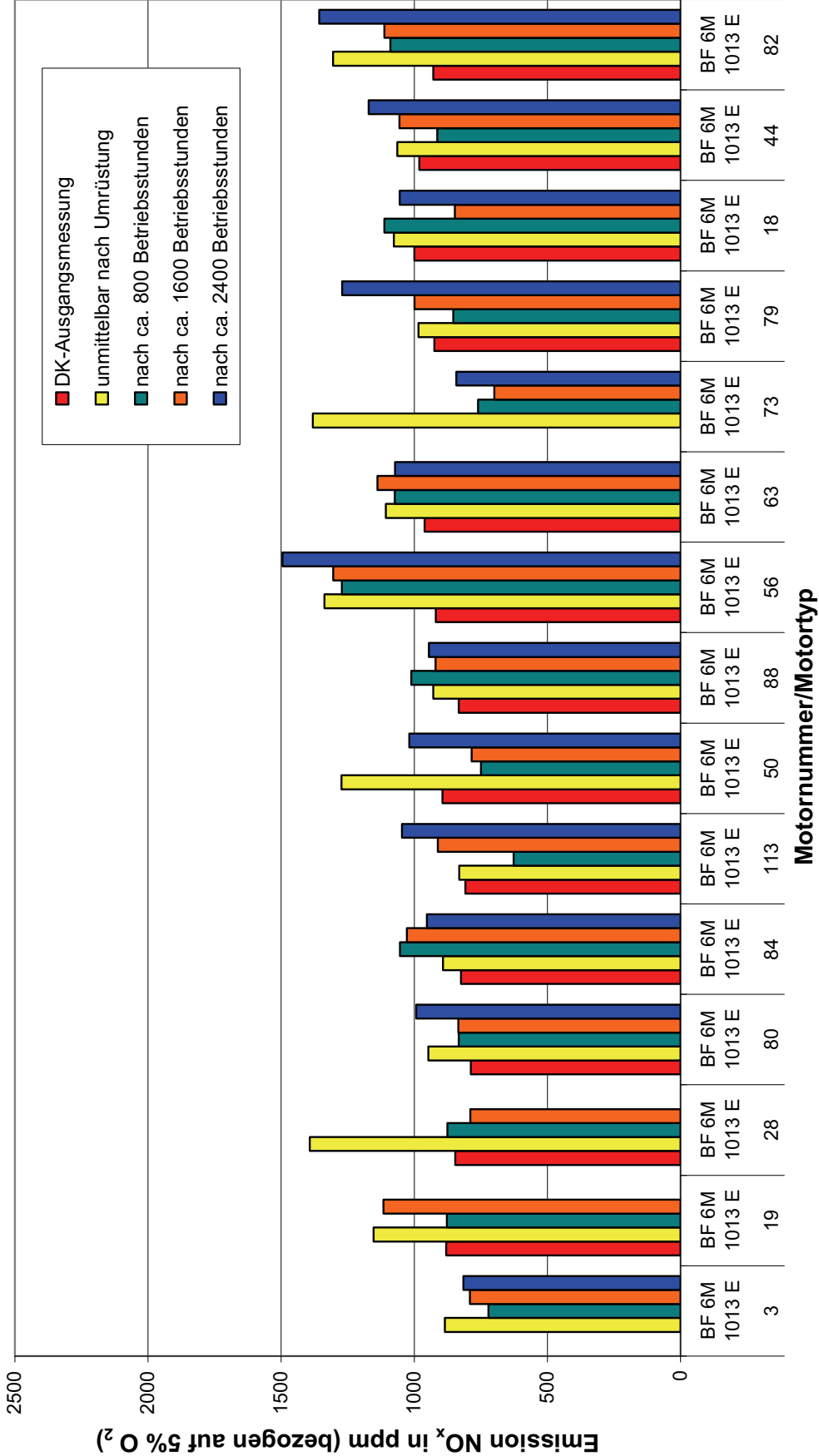


Abbildung 10: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen BF 6M 1013 E nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

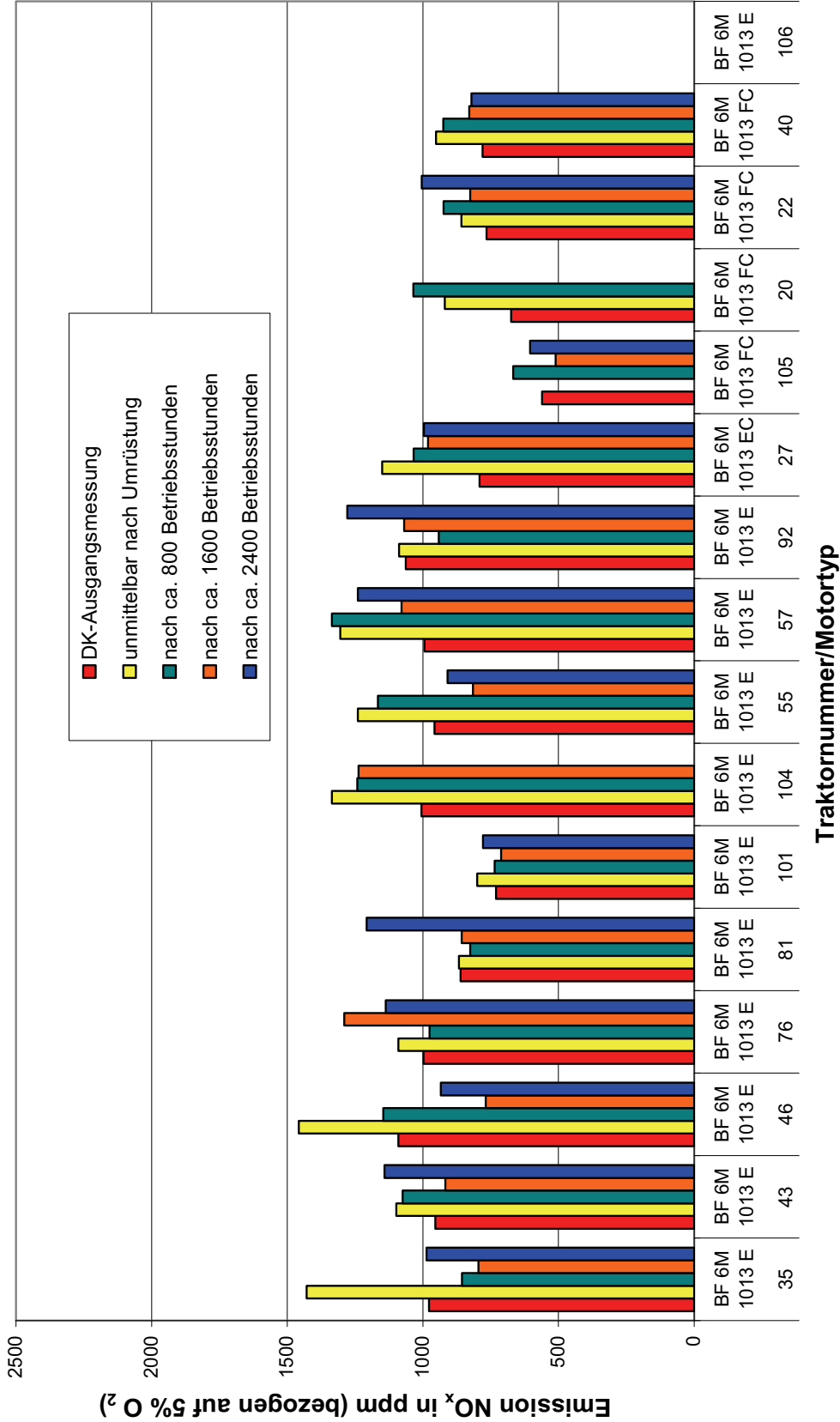


Abbildung 11: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen BF 6M 1013 E, BF 6M 1013 EC und BF 6M 1013 FC nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

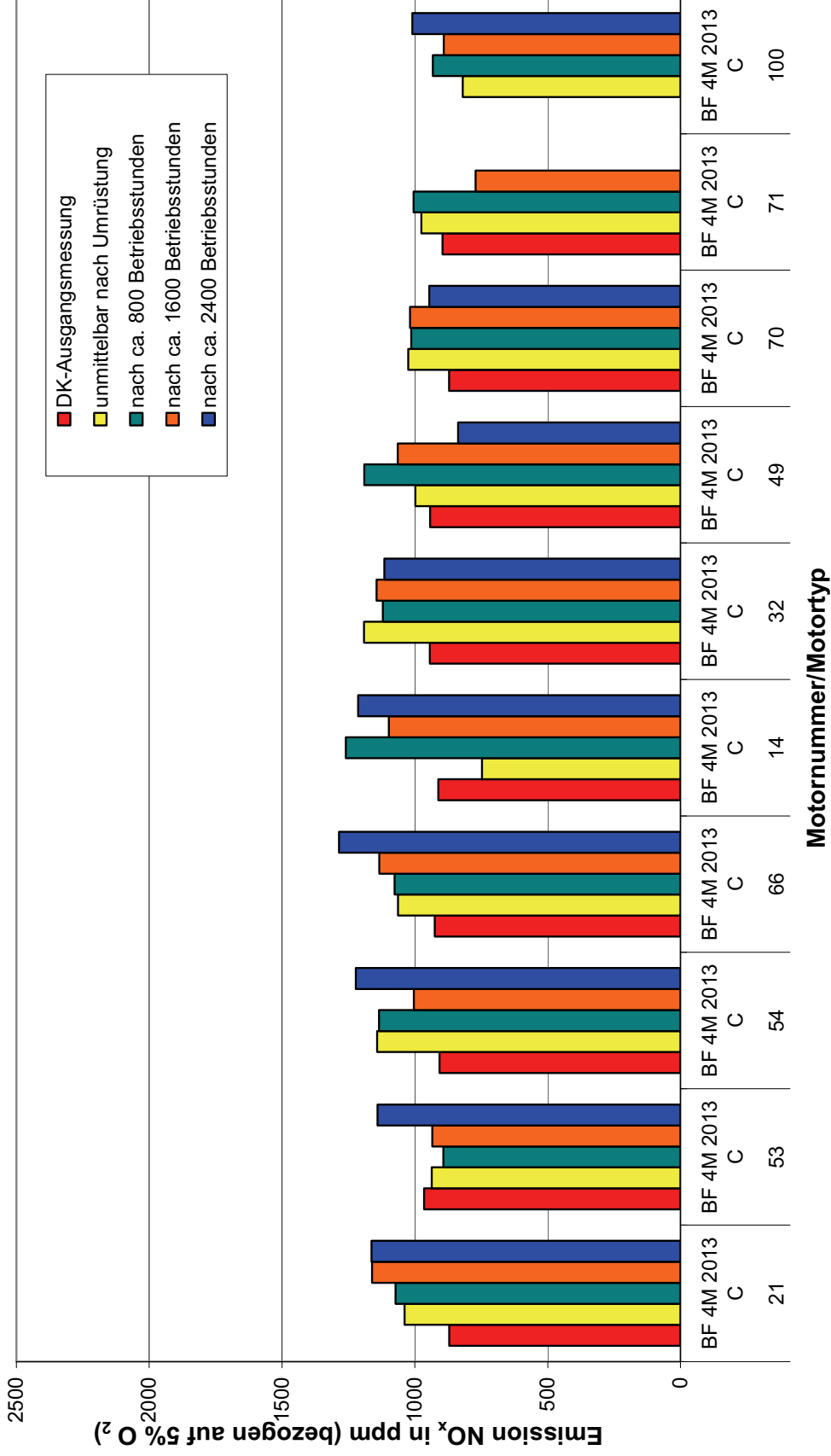


Abbildung 12: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen BF 4M 2013 C nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

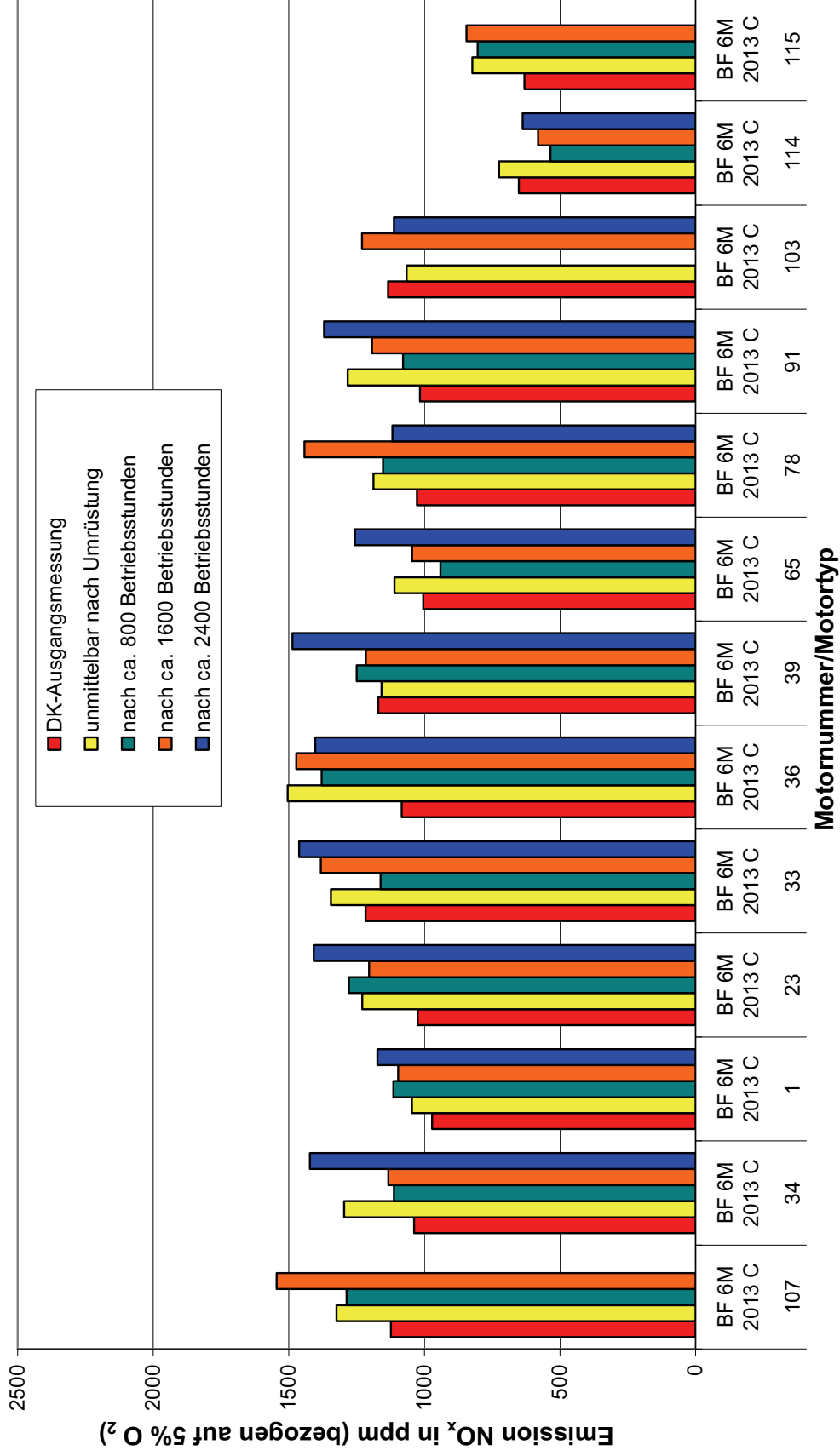


Abbildung 13: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen BF 6M 2013 C nach [88]

Emissionsmessung NO_x bei $n=\text{konstant}$; Vollast



Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

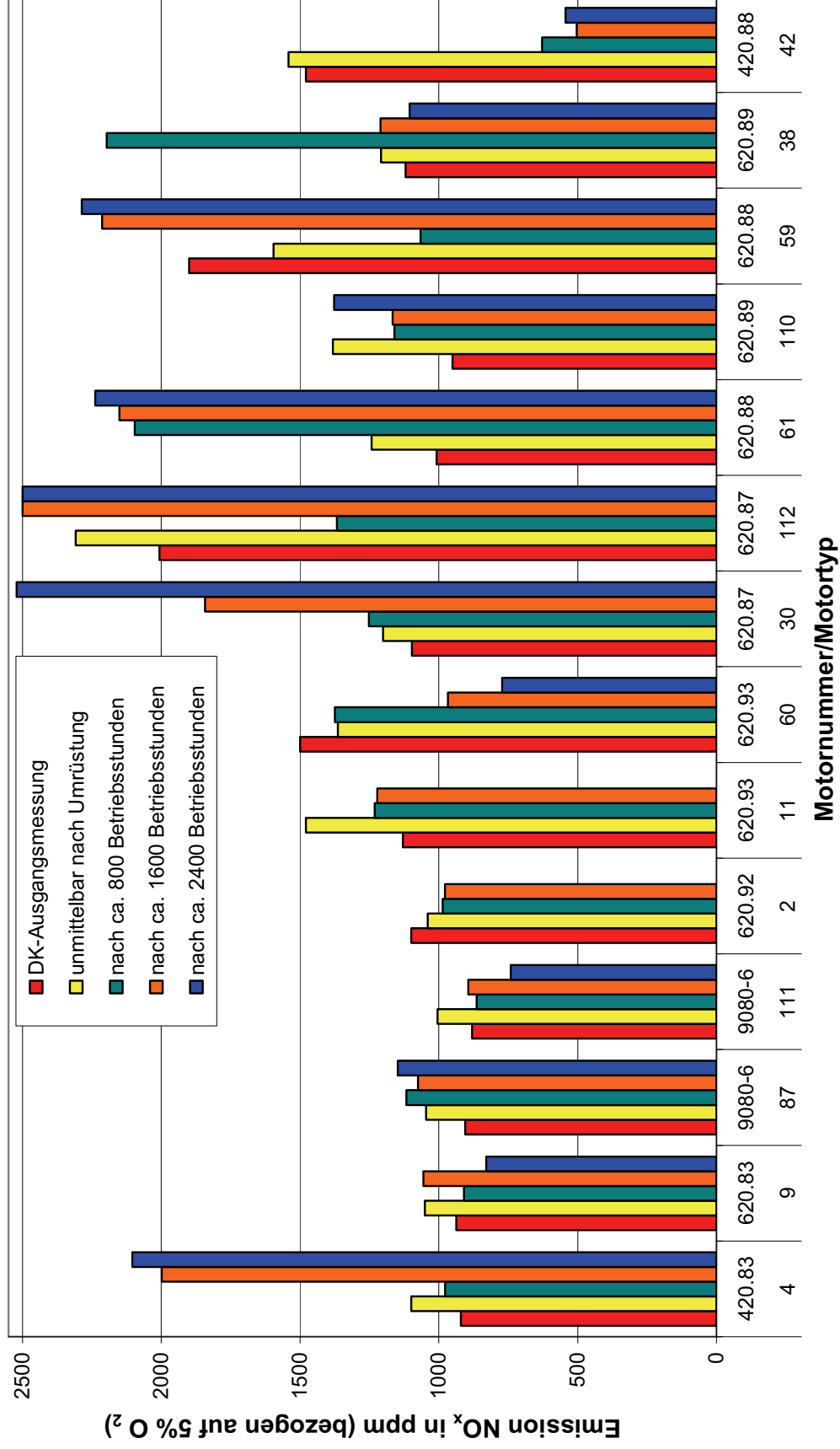


Abbildung 15: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen 420. u. 620. nach [88]

Anhang 7: Emissionsverhalten im Dauerlauf (Feldtest)

Emissionsmessung NO_x bei n=konstant; Volllast

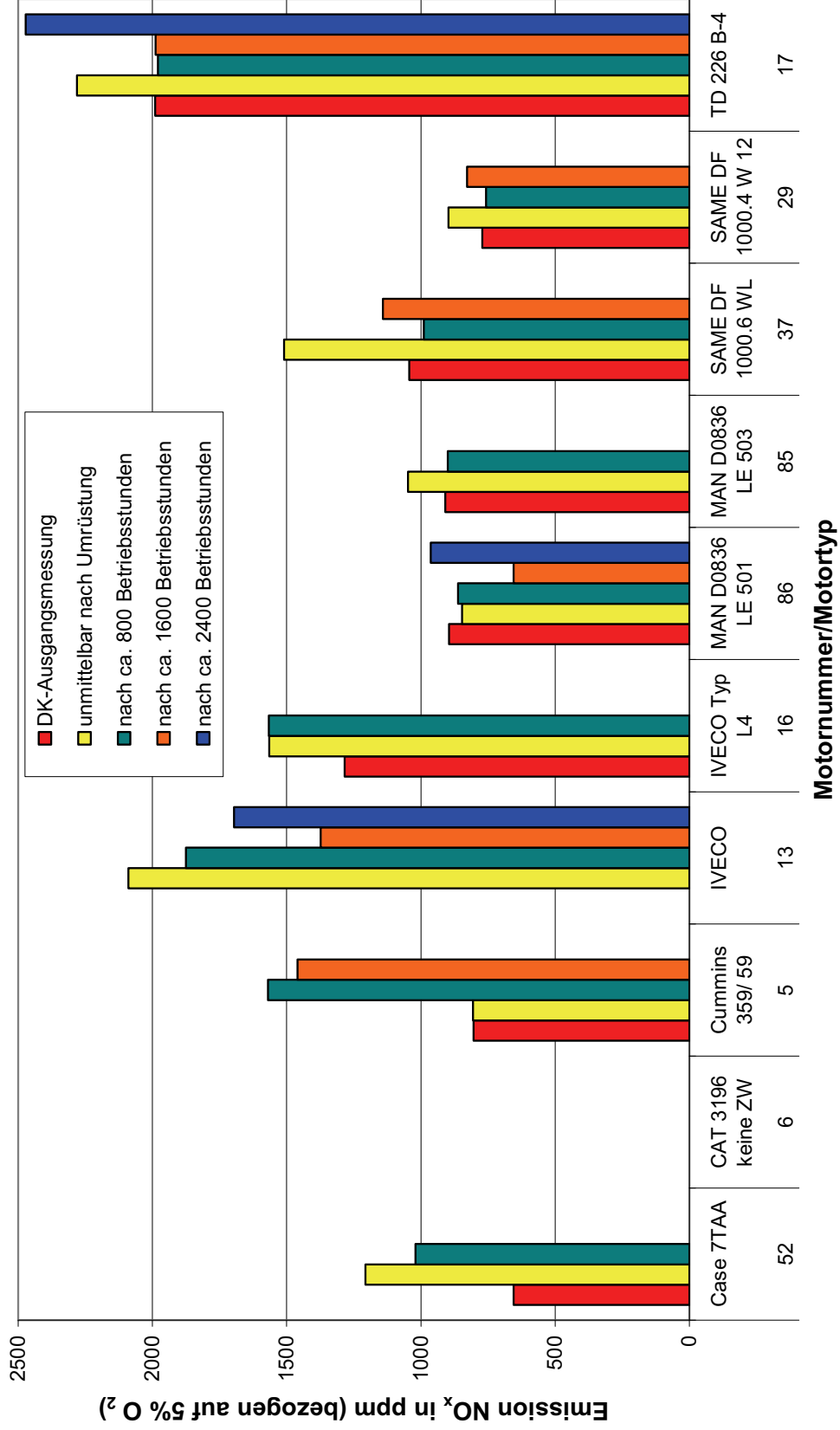


Abbildung 16: NO_x-Emissionen der Motorenbaureihen Same 1000 und Sonstiges nach [88]

Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

Leistungsvergleich Deutz-Motortypen

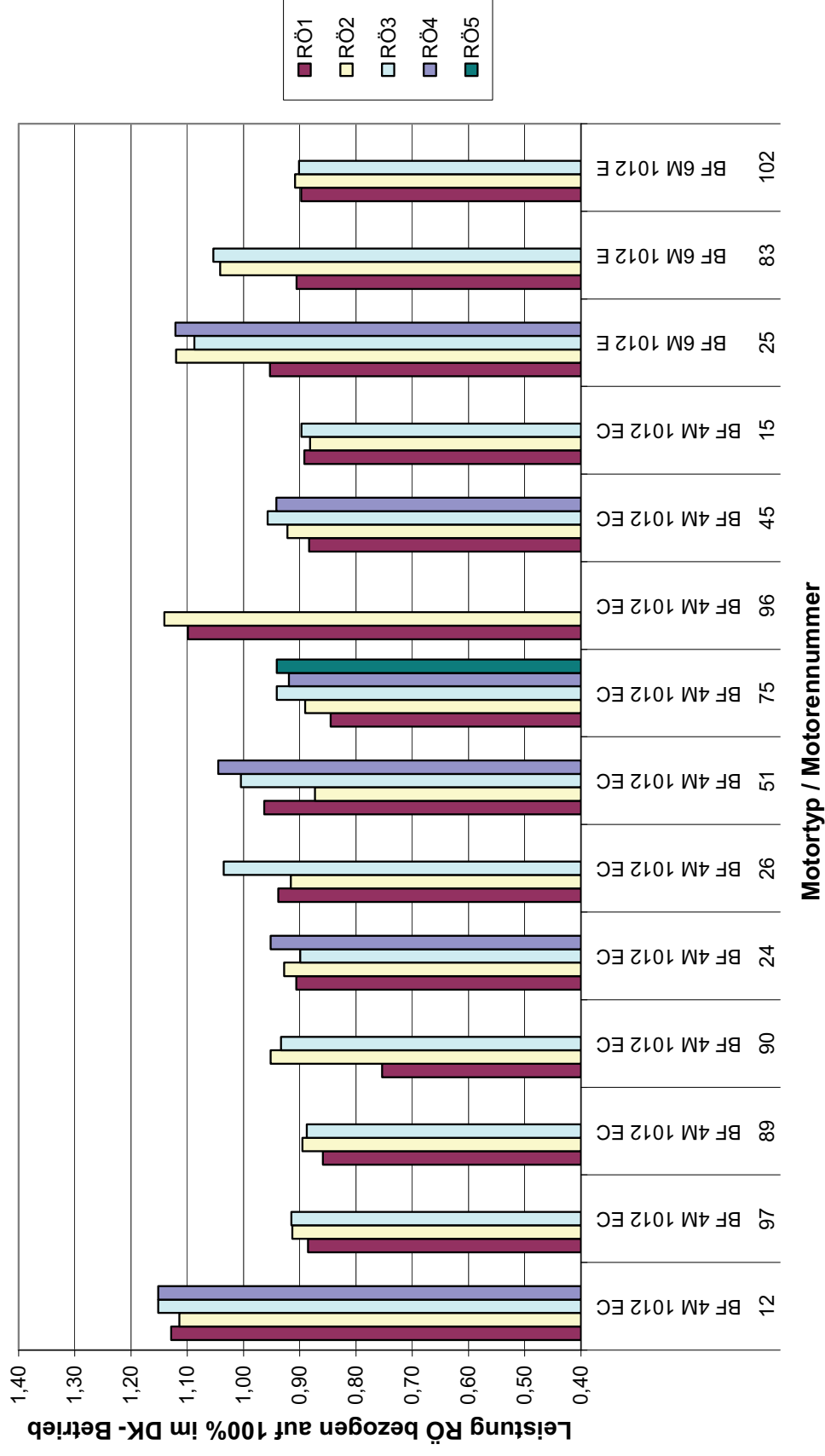


Abbildung 1: Leistung der Motoren der Motorenbaureihen BF 4M 1012EC und BF 6M 1012E nach [88]

Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

Leistungsvergleich Deutz-Motortypen

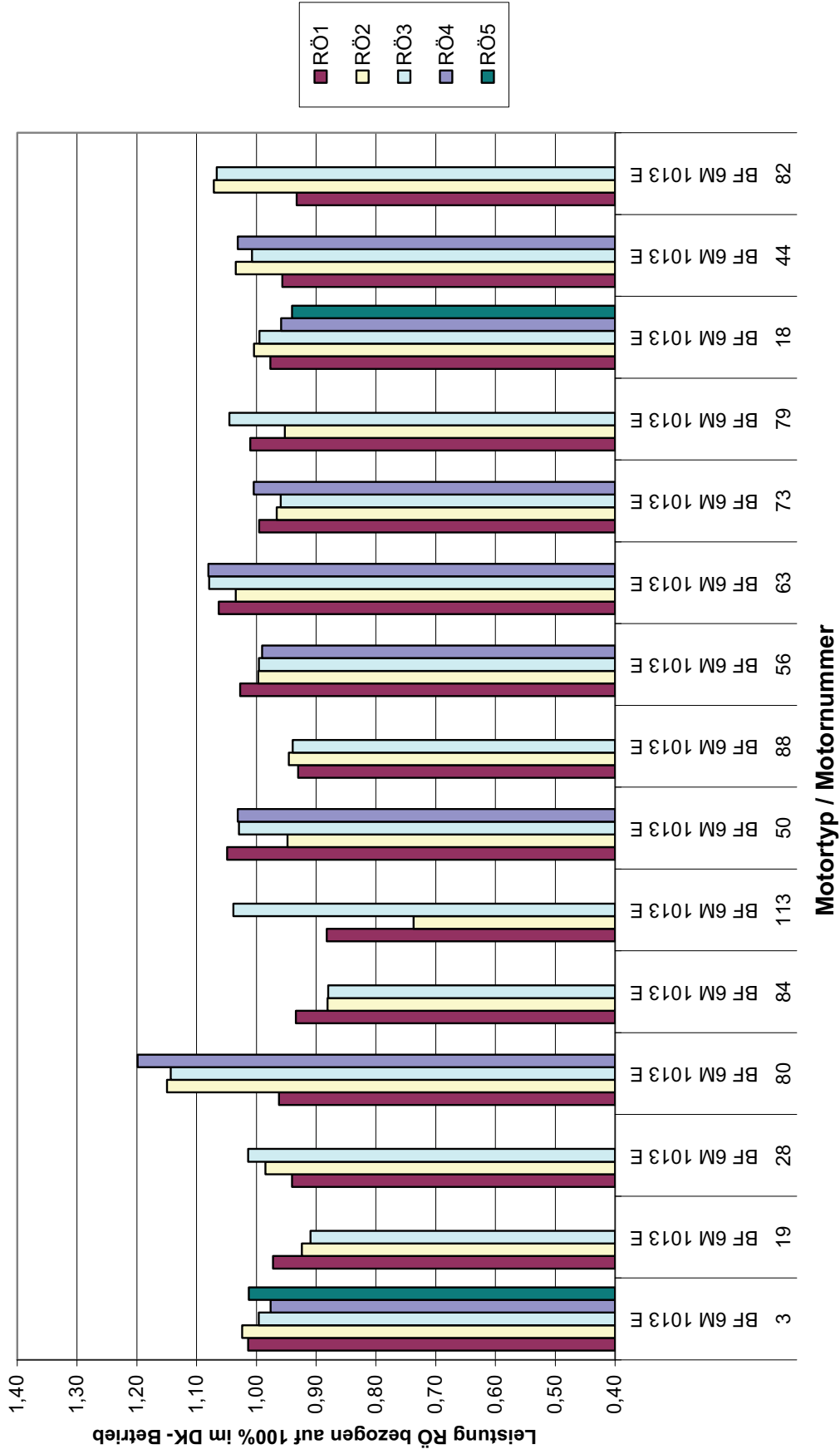
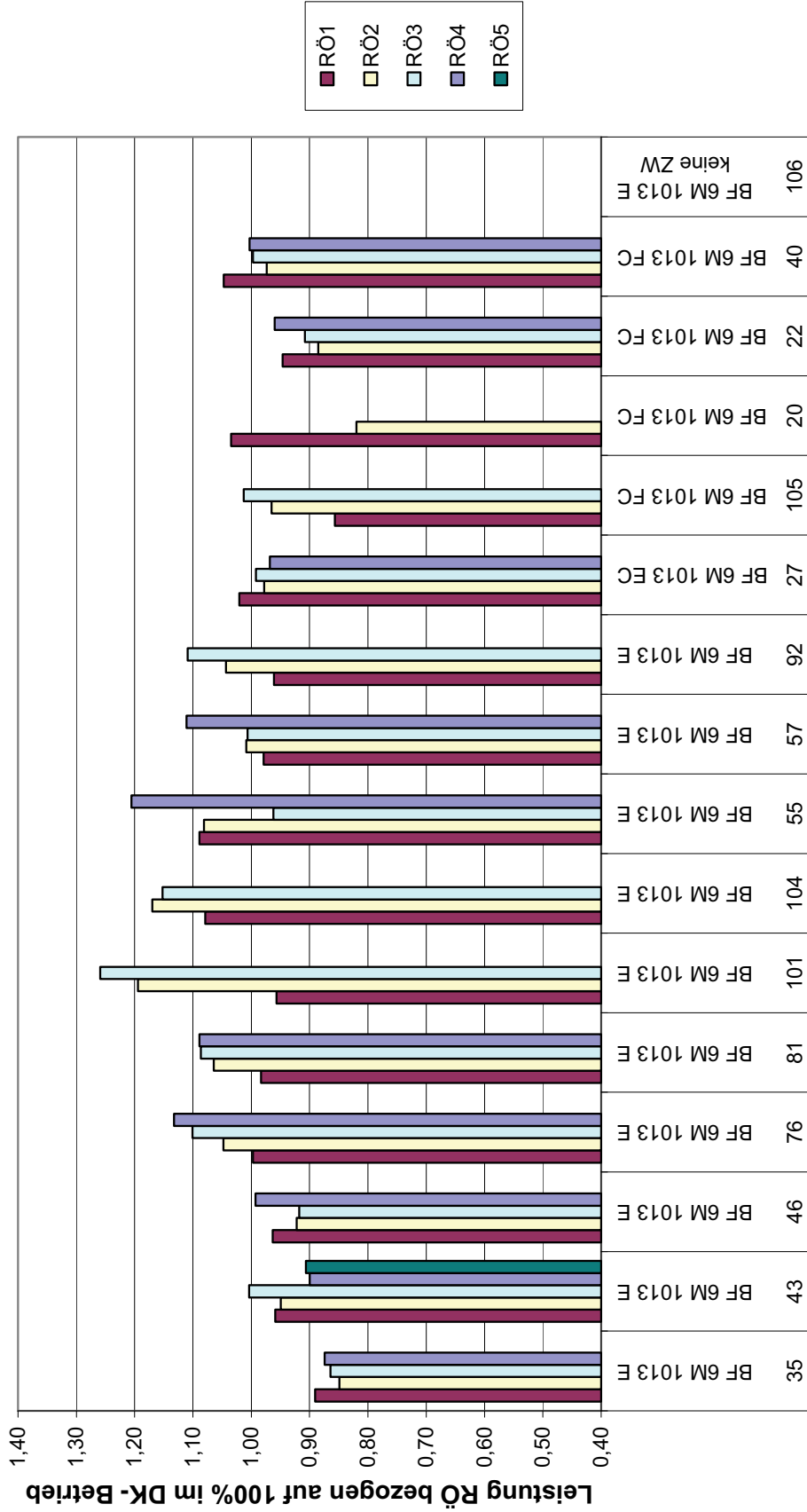


Abbildung 2: Leistung der Motoren der Motorenbaureihen BF 6M 1013 E nach [88]

Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

Leistungsvergleich Deutz-Motortypen



Motortyp / Motornummer

Abbildung 3: Leistung der Motoren der Motorenbaureihen BF 6M 1013 E, BF 6M 1013 EC und BF 6M 1013 FC 1 nach [88]

Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

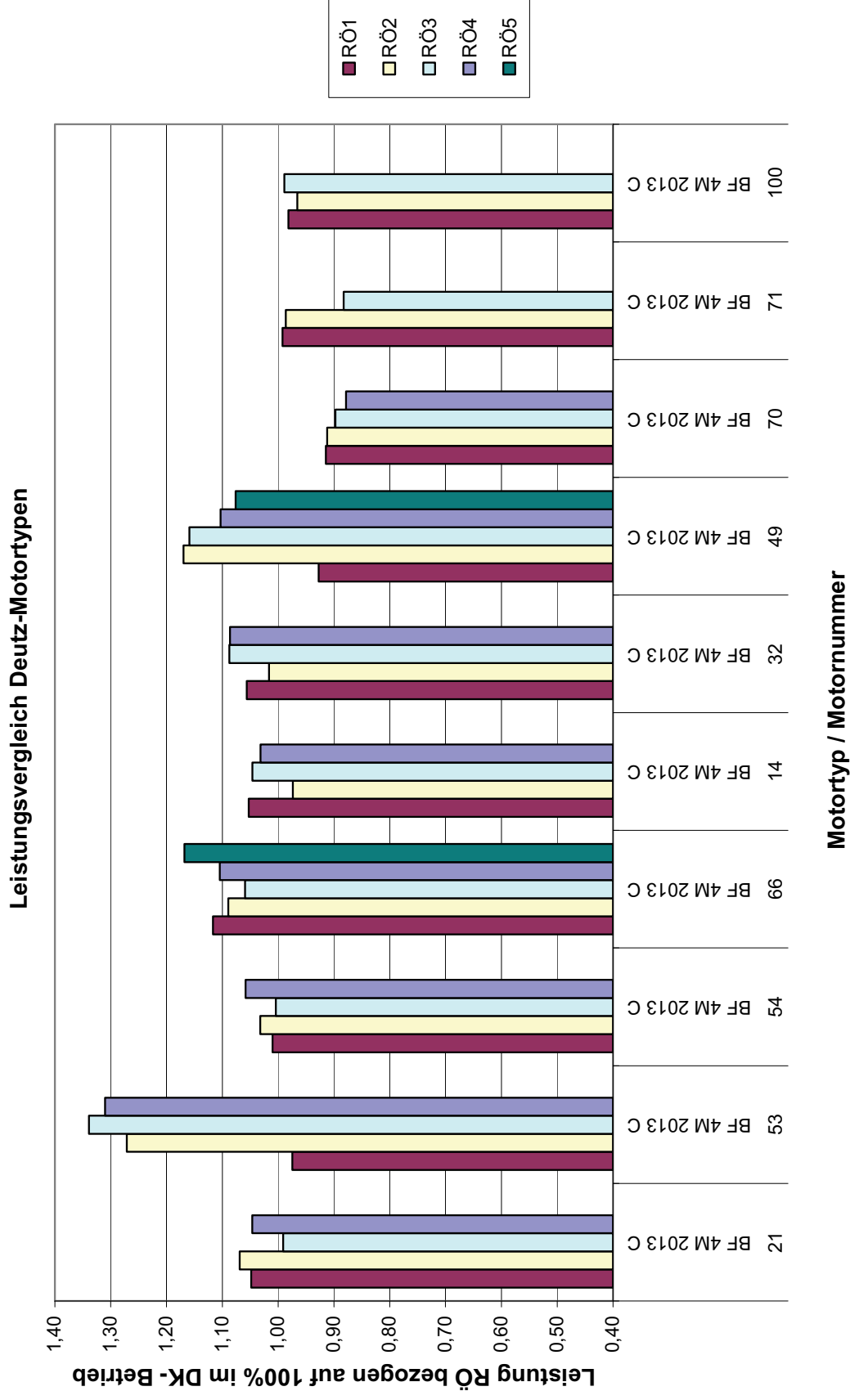


Abbildung 4: Leistung der Motoren der Motorenbaureihen BF 4M 2013 C1 nach [88]

Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

Leistungsvergleich Deutz-Motortypen

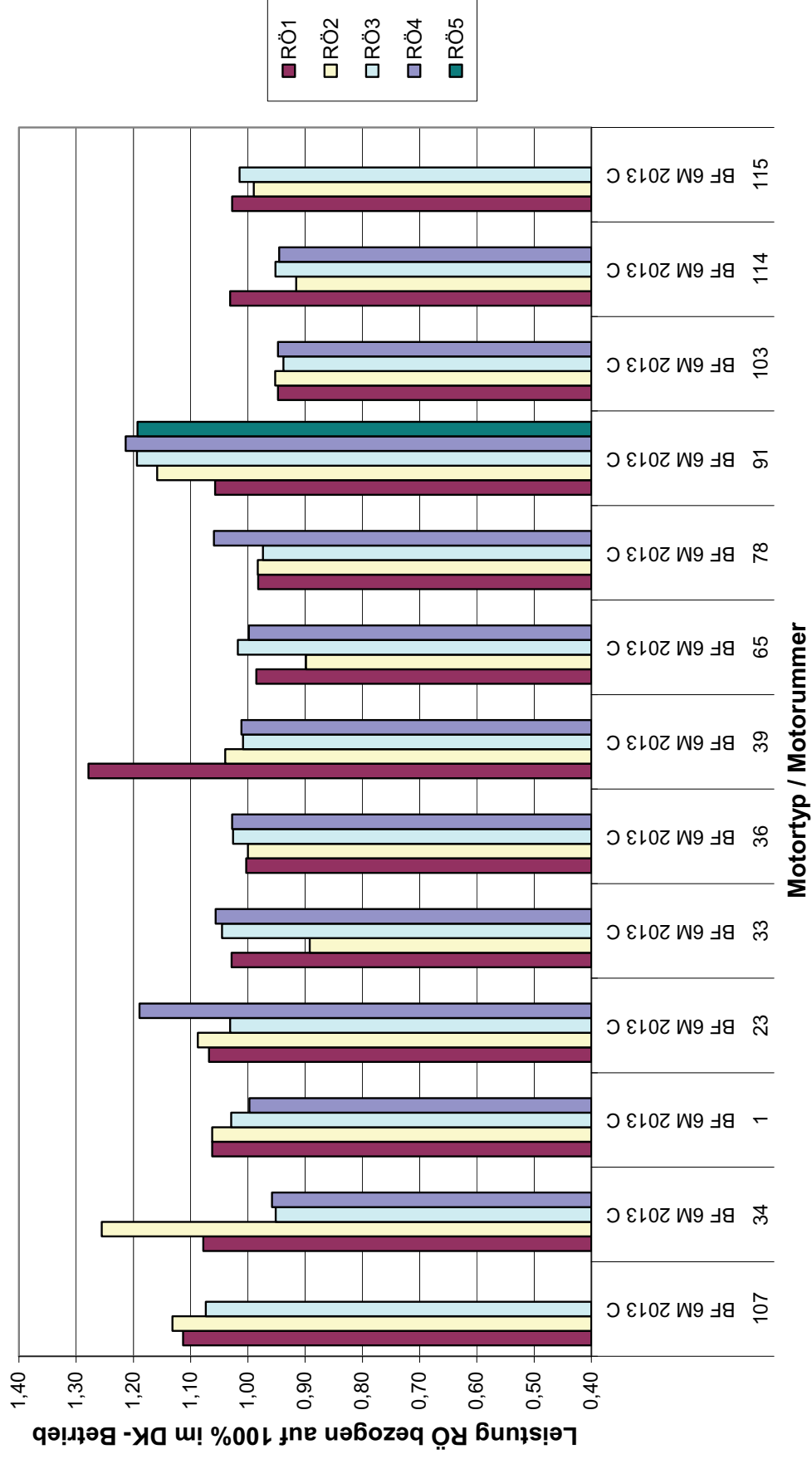


Abbildung 5: Leistung der Motoren der Motorenbaureihen BF 6M 2013 C nach [88]

Leistungsvergleich John Deere-Motortypen



Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

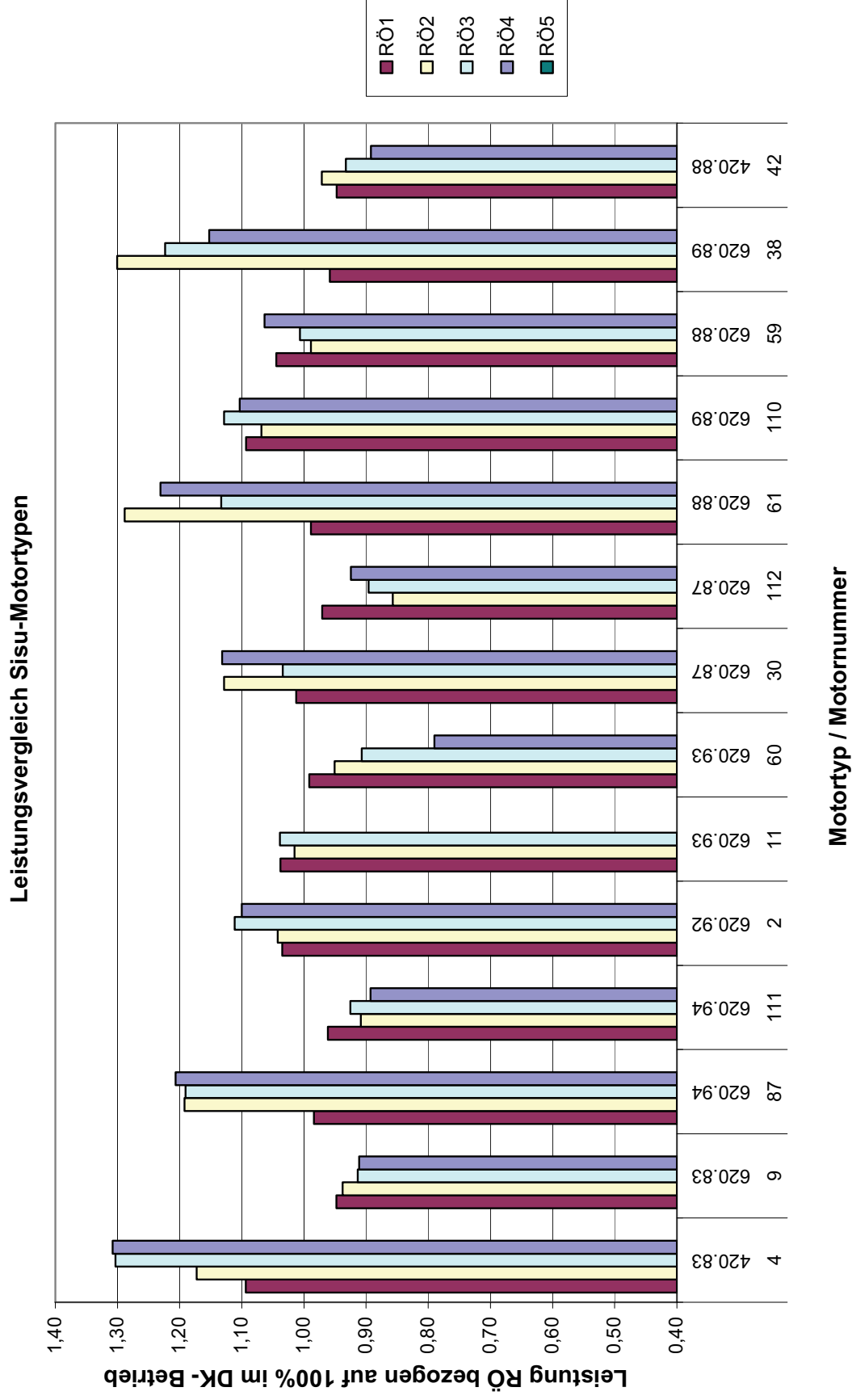


Abbildung 7: Leistung der Motoren der Motorenbaureihen 420 und 620 nach [88]

Anhang 8: Motorleistungen im Dauerlauf (Feldtest)

Leistungsvergleich sonstiger Motortypen

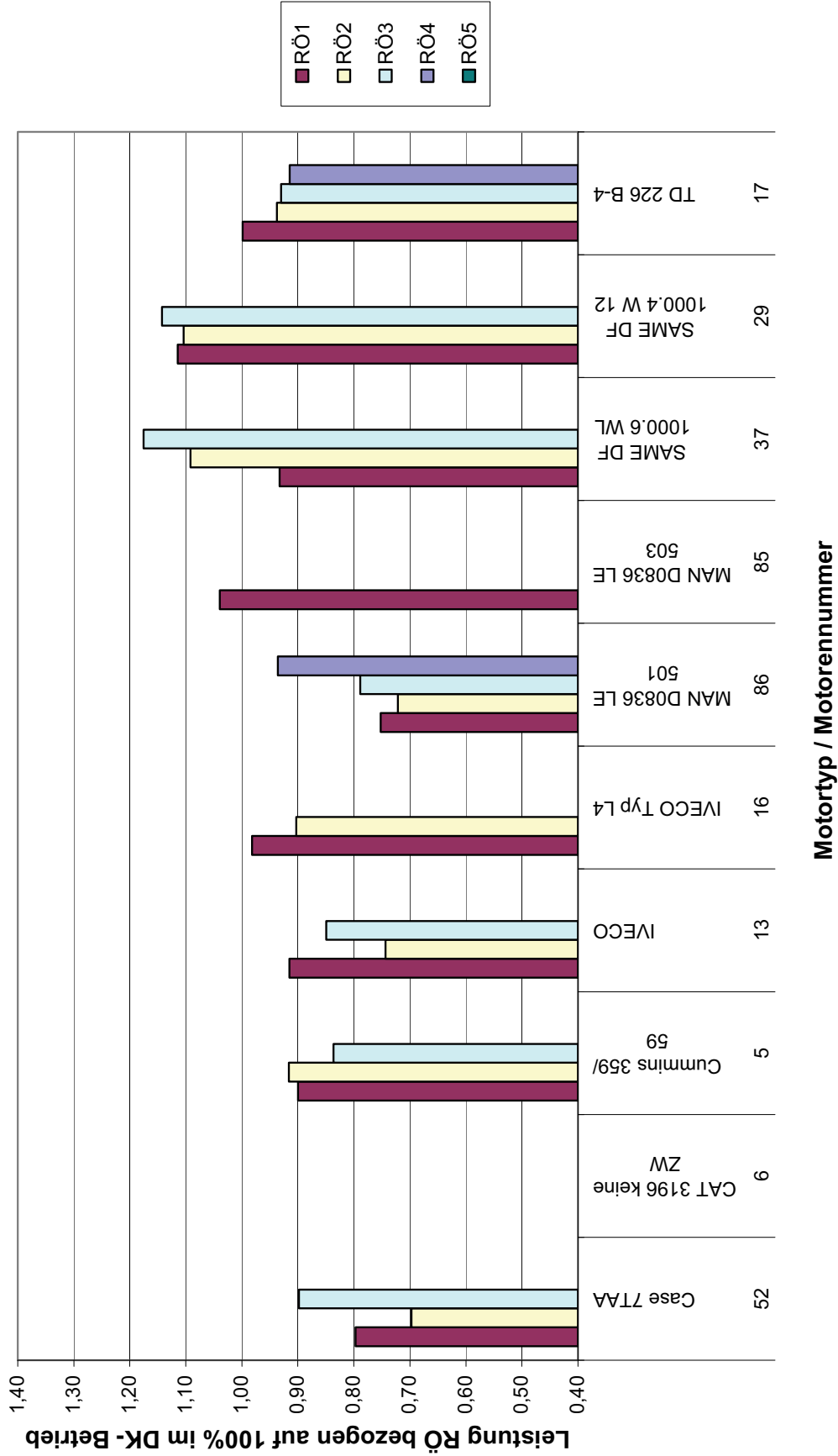


Abbildung 8: Leistung der Motoren der sonstigen Baureihen nach [88]