

CLEAN II

Emissionsarme Schiffsantriebsanlage

Projekt

Instationäre Ruß-/Partikelemission von Schiffsdieselmotoren

**MAN B&W Diesel AG
Augsburg**

**BMBF-Forschungsbericht 18 S 0085 C
(Schlußbericht)**



**MAN B&W Diesel AG
Augsburg**

2002



**Abschlußbericht
zum Forschungsvorhaben**

**"Instationäre Ruß- / Partikelemission
von Schiffsdieselmotoren (CLEAN II)"**

MAN B&W Diesel AG Augsburg

Förderkennzeichen:

18 S 0085 C

Laufzeit des Vorhabens:

01.06.1999 bis 31.05.2002

Antragsteller:

MAN B&W Diesel AG Augsburg

Projektleiter:

Fritz Fleischer

Bearbeiter:

Kurt-Wolfgang Gratza
Peter Holand
Peter Lauer

	Seite
1. <u>Gesamtrahmen des Vorhabens</u>	9
2. <u>Vorhabensbeschreibung des MAN B&W-Teilprojektes</u>	10
2.1. Gesamtziel	10
2.2. Ablauf des Vorhabens	12
2.3. Ausgangssituation sowie wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	13
2.3.1 Problemdarstellung	13
2.3.2 Arbeitsziele	13
2.3.3 Versuchsdurchführung allgemein	14
2.3.3.1. Tabellen orientiertes Steuerprogramm (MANpilot)	14
2.3.3.2. Speicher programmierbare Steuerung (SPS)	15
2.3.3.3. Mehrkanal-Mess-System (μ -MUSYCS)	15
2.3.3.4. Rußmeßverfahren (Kurzübersicht)	16
3. <u>Ergebnisse</u>	17
3.1. Variation der Einspritzintensität	17
3.1.1. Modifikation einer nockenbetätigten Einspritzpumpe	17
3.1.1.1. Zielsetzung	17
3.1.1.2. Lösungskonzept	17
3.1.1.3. Vorversuche	18
➤ Am Komponentenprüfstand	18
➤ Mit konventionellem Einspritzsystem zur Simulation der Förderintensität am Vollmotor	19
3.1.1.4. Ergebnisse: Modifikation einer nockenbetätigten Einspritzpumpe	19
3.1.2. Common Rail	20
3.1.2.1. Zielsetzung	20
3.1.2.2. Lösungskonzept	20
3.1.2.3. Stationäre Vorversuche am Vollmotor 16/24	21
➤ Vergleich CR-System mit konventioneller Einspritzung	21
➤ Einfluß des Raildruckes	21
➤ Voreinspritzung	21
➤ Nacheinspritzung	22

	Seite	
3.1.2.4.	Instationäre Versuche an einem Vollmotor 16/24	22
3.1.2.5.	"Boost-Injection"	23
3.1.2.6.	Abschließende Bewertung des Common Rails	23
3.2.	Querschnittsänderung der Einspritzdüse beim Hochfahren	24
3.2.1.	Freigabe eines zusätzlichen Querschnitts (KOAX-Düse)	24
3.2.1.1.	Zielsetzung	24
3.2.1.2.	Lösungskonzept	24
3.2.1.3.	Vorversuche am Vollmotor 58/64 mit "Einnadel-Düse"	25
3.2.1.4.	Stationäre Versuche am Vollmotor 58/64 mit KOAX-Düse	25
3.2.1.5.	Vorversuche am Vollmotor 48/60 mit "Einnadel-Düse"	26
3.2.1.6.	Stationäre Versuche am Vollmotor 48/60 mit KOAX-Düse	26
3.2.1.7.	Abschließende Bewertung der KOAX-Düse	27
3.2.2.	Umschalten auf einen anderen Querschnitt (seitliche Teillastdüse)	28
3.2.2.1.	Zielsetzung	28
3.2.2.2.	Lösungskonzept	28
3.2.2.3.	Vorversuche am Komponentenprüfstand	29
3.2.2.4.	Vorversuche am Vollmotor 48/60	29
3.3.	Kraftstoff-Wasser-Emulsion	31
3.3.1.	Konstante Wasserkonzentration beim Hochfahren	31
3.3.1.1.	Zielsetzung	31
3.3.1.2.	Lösungskonzept	31
3.3.1.3.	Aufbau eines KWE-Moduls	32
3.3.1.4.	Vorversuche Wassergehalts-Meßeinrichtung (WGM)	32
3.3.1.5.	Adaption der Prüfstände und Vorversuche zur Funktions-sicherheit	33
3.3.1.6.	KWE in Verbindung mit konventioneller Einspritzung	34
	➤ Vorversuche an Vollmotoren 6L48/60 und 9L32/40 (stationäre Messungen)	34
	➤ Instationäre Versuche am 6L48/60 mit KWE	34
	▪ Instationäre Belastung im Generator-Mode	34
	▪ Instationäre Belastung im Combinator-Mode	35

	Seite
3.3.1.7. KWE in Verbindung mit Common-Rail (CR)	35
➤ Vorversuche am 7L16/24 CR mit KWE (stationäre Messungen)	35
➤ Instationäre Versuche am 7L16/24 CR mit KWE	36
3.3.1.8. Abschließende Bewertung von KWE mit konstantem Wassergehalt	36
3.3.2. Variable Wasserkonzentration beim Hochfahren	37
3.3.2.1. Zielsetzung	37
3.3.2.2. Lösungskonzept	37
3.3.2.3. Regelung eines gewünschten Wassergehaltes bei transienten Motorzuständen	37
3.3.2.4. Verstellgeschwindigkeit des Wassergehaltes bei konstantem Motorbetrieb	38
3.3.2.5. Abschließende Bewertung von KWE mit variablem Wassergehalt	38
3.4. Verbesserte Luftversorgung mit Zusatzluft	39
3.4.1. Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)	39
3.4.1.1. Lösungskonzept	39
3.4.1.2. Versuche am Vollmotor 7L 16/24	40
➤ Lastaufschaltung mit und ohne Jet-Assist	40
➤ Anlassen mit und ohne Jet-Assist	40
➤ Variation des Jet-Druckes	41
➤ Variation der Startzeit des Jet-Assist	41
3.4.1.3. Versuche am Vollmotor 8L 27/38	42
➤ Lastaufschaltung mit und ohne Jet-Assist	42
➤ Variation des Jet-Druckes	42
➤ Geometrie-Variationen der Jet-Assist-Bohrungen	42
3.4.1.4. Versuche am Vollmotor 6L 48/60	43
➤ Lastaufschaltung mit und ohne Jet-Assist	43
➤ Variation der Steuerzeiten des Jet-Assist	44
3.4.2. Zusatzluft im Bereich Verdichter (Hilfsluftgebläse)	44

	Seite
3.4.3. Zusatzluft direkt in den Zylinder	45
3.4.3.1. Lösungskonzept	45
3.4.3.2. Vorversuche zur Darstellung der Steuerung	45
3.4.3.3. Versuche am Vollmotor 6L 32/40	46
3.4.4. Abschließende Bewertung einer verbesserten Luftzufuhr	46
3.5. Verbesserte Luftversorgung mit veränderter Turbolader-Charakteristik	48
3.5.1. Teillast-Turbolader	48
3.5.1.1. Vorversuche (stationär) am Vollmotor 6L 32/40	48
3.5.1.2. Beschleunigungsversuche am Vollmotor 6L 32/40	49
3.5.2. Varianten der Turboladergeometrie	49
3.5.2.1. Versuche am Vollmotor 8L 27/38	49
➤ Stationäre Vorversuche	50
➤ Instationäre Beschleunigungsversuche	50
3.5.2.2. Versuche am Vollmotor 6L 48/60	50
➤ Stationäre Vorversuche	51
➤ Instationäre Versuche im Generatorbetrieb	51
➤ Instationäre Versuche im Kombinatorbetrieb	51
3.5.3. Verstellbarer Düsenring / Variable Turbine Area (VTA)	51
3.5.3.1. Lösungskonzept VTA	52
3.5.3.2. Vorerprobung am Vollmotor 6L 48/60	52
➤ Wirkungsgradvergleich VTA mit festem Düsenring	52
➤ Vergleich stationärer Betriebswerte VTA mit festem Düsenring	53
➤ Verstellgeschwindigkeit VTA	53
3.5.3.3. Hochfahrverhalten mit gleichzeitiger Verstellung des VTA	53
3.5.4. Abschließende Beurteilung einer veränderten Turbolader-Charakteristik	54

	Seite
3.6. Variation der Ladelufttemperatur	55
3.6.1. Vorversuche (stationär) am Vollmotor 6L 48/60	55
3.6.1.1. Ladeluftvorwärmung bei konstanter Niedriglast	55
3.6.1.2. Zeitlicher Verlauf des Ladeluftvorwärm-Vorgangs	56
3.6.2. Instationäre Versuche am Vollmotor 6L 48/60	56
3.6.2.1. Verhalten bei Lastaufschaltung bei Nenndrehzahl	56
➤ ohne Hilfsmaßnahmen	57
➤ mit Hilfsmaßnahmen	57
3.6.2.2. Verhalten bei Hochfahren entlang Kombinatorikurve	57
3.6.3. Abschließende Beurteilung der Ladelufttemperaturvariation	58
3.7. Optimierung eines Gesamt-Motormanagementsystems	59
3.7.1. Problemdarstellung / Zielsetzung	59
3.7.2. Lösungskonzept	59
3.7.3. Stationäre Versuche am Vollmotor 6L48/60	60
3.7.4. Instationäre Versuche am Vollmotor 6L48/60	61
3.7.4.1. Steuerung und Parametrierung der Einzelmaßnahmen	61
3.7.4.2. Beschleunigungsversuche entlang Kombinatorikurve	62
3.7.4.3. Lastaufschaltung bei konstanter Drehzahl	63
3.7.5. Instationäre Motorversuche am 14V48/60	63
3.7.6. Abschließende Beurteilung Gesamt-Motormanagement	64
3.8. Vergleich von Ruß- / Partikel-Messeinrichtungen	65
3.8.1. Problemdarstellung / Zielsetzung	65
3.8.2. Partikelmessmethode	65
3.8.3. Auswertung einer Partikelmessung aus stationärem Betrieb	66
3.8.4. Rußmessverfahren	67
3.8.4.1. Rußmessverfahren für stationären Motorbetrieb	67
➤ BOSCH ETD 202.00 / ETD 020.50	67
➤ AVL 415	68

	Seite
3.8.4.2. Rußmessverfahren für instationären Motorbetrieb	68
➤ AVL 439	69
➤ SBS 1000	69
➤ Sick OMD 41-02	69
3.8.4.3. Korrelation der einzelnen Rußmessverfahren	69
➤ Filterpapiermethode (Bosch zu AVL 415)	69
➤ Opazität (AVL 439 zu SBS 1000 zu Sick OMD 41-02)	70
➤ Filterpapiermethode zu Opazität	70
3.8.5. Einfluß der Kraftstoffart auf die Korrelation Sick – RB	70
3.8.6. Korrelation Partikel- zu Ruß-Messverfahren	70
3.8.7. Fazit Partikel- / Ruß-Messverfahren	71
4. <u>Zusammenfassung</u>	72
4.1. Aufgabenstellung	72
4.2. Durchführung	72
4.3. Ergebnisse	73
4.3.1. Untersuchung von Einzelmaßnahmen	73
4.3.2. Optimierung eines Gesamt-Motormanagement	74
4.3.3. Vergleich von Ruß- / Partikel-Messverfahren	74
4.4. Verwertung der Ergebnisse	74
5. <u>Literaturverzeichnis</u>	75

Anhang:

Anlagen 2.1. – 2.4.
Anlagen A1 / 1 – 3; A2 / 1 – 9
Anlagen B1 / 1 – 6; B2 / 1 – 4
Anlagen C / 1 – 11
Anlagen D1 / 1 – 16; D2 / 1 – 13
Anlagen E / 1 – 8
Anlagen F / 1 – 10
Anlagen G / 1 – 6

1. Gesamtrahmen des Vorhabens

Neben der Reduzierung der Stickoxidemission gehört die Verringerung der Partikelemission zu den großen Herausforderungen bei der Dieselmotorenentwicklung. Sowohl Straßenfahrzeuge wie auch offroad-Anwendungen müssen insbesondere in den USA und in der EU immer strengeren Anforderungen genügen. Von anderen Dieselmotoren-Anwendungsbereichen wie der Schifffahrt werden adäquate Anstrengungen erwartet.

Fahrzeug- und offroad-Motoren werden in der Regel mit asche- und schwefelarmen Kraftstoffen betrieben; neben innermotorischen Maßnahmen zur Emissionsverringerung können daher auch Abgasnachbehandlungsverfahren (SCR-Katalysatoren zur Stickoxidverringerung, Filter zur Partikel-/Rußminderung) in Betracht gezogen werden. Demgegenüber sind in der Hochseeschifffahrt Kraftstoffe üblich, die bis zum 1000-fachen höhere Schwefelgehalte und bis zum 100-fachen höhere Aschegehalte aufweisen; es handelt sich dabei um Rückstandsöle aus dem Raffinerieprozeß, die immerhin 2-3% des eingesetzten Erdöls von jährlich ca. 3,5 Mrd. t ausmachen.

Im BMBF-geförderten Projekt CLEAN wurde aufgezeigt, daß im oberen Lastbereich eines mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotors die Emission der rein kraftstoffbedingten Partikel (Asche, Sulfate) etwa zwei Drittel der Gesamtpartikelemission ausmachen (/1/); dieser Anteil kann mit innermotorischen Maßnahmen nicht beeinflusst werden; Abgasnachbehandlungsverfahren sind für solche Anwendungen noch nicht verfügbar. Es wurde aber auch aufgezeigt, mit welchen Methoden die Verbrennung so weit verbessert werden kann, dass die Rußemission bei Konstantlastbetrieb, selbst bei den prinzipiell kritischeren niedrigen Lasten, auf ein unsichtbares Niveau gedrückt wird. Dabei wurde auch deutlich, dass manche Maßnahmen nur in einem begrenzten Lastbereich förderlich sind und in anderen Lastbereichen sogar zu Verschlechterungen führen.

Bei instationärem Motorbetrieb werden nacheinander verschiedene Lasten durchfahren. Zusätzlich ist das Zusammenwirken der für die Luftversorgung zuständigen Strömungsmaschine „Abgasturboladers“ mit der Kolbenmaschine „Motor“ nicht optimal. Andererseits tritt diese Betriebsweise vornehmlich in Hafennähe, bei Revierfahrt, auf, also in besiedelten Regionen. Bereits bei der Konzeption des Vorgängervorhabens CLEAN in 1994 wurde daher die spätere Untersuchung dieses Aspekts als notwendig erkannt.

2. Vorhabensbeschreibung des MAN B&W – Teilprojektes

2. 1. Gesamtziel

Zu dem vorliegenden Projekt CLEAN II wurde im Zeitraum August 1995 bis Juli 1998 bereits das Vorgängervorhaben CLEAN ("Emissionsarme Schiffsantriebe") abgewickelt.

MAN B&W Diesel hatte in diesem Vorhaben CLEAN u.a. motorische Möglichkeiten zur Verringerung der Ruß- / Partikelemission bei schwerölbetriebenen, mittelschnelllaufenden Viertakt-Dieselmotoren unter Konstantlastbedingungen erarbeitet. Damit kann im gesamten Lastbereich eine praktisch unsichtbare Abgasfahne erzielt werden.

Angesichts des Umfangs und des Erfolgsrisikos dieser Forschungsarbeiten wurde damals nur die stationäre, d.h. ohne ausgeprägte Lastwechsel ablaufende, Betriebsweise betrachtet.

Insbesondere in Häfen und in Küstennähe erfordern Manoviervorgänge häufige und oft relativ starke Lastwechsel, die heute wegen der damit verbundenen Rußstöße ein zunehmendes Ärgernis und eine Belastung von Bevölkerung und Natur darstellen.

Die Untersuchungen im Vorgängervorhaben CLEAN zeigten, dass sowohl Betriebsparameter wie Luftangebot, Ladelufttemperatur usw. als auch die Betriebsweise, wie z.B. Zu-/Abschalten von Düsenquerschnitten geeignete Maßnahmen sein können, bei Konstantlastbetrieb die Rußemission zu verringern.

Bei Hochfahr- und Lastaufschaltvorgängen besteht die Gefahr des allseits bekannten Rußstoßes. Dies resultiert vor allem daraus, dass die im stationären Betrieb optimierten Randbedingungen (Luftangebot, Kraftstoffeinspritzung, Gemischbildung) bei einem Lastwechsel zeitweise nicht so vorliegen.

Eine plötzliche Lastanforderung beim Manövrieren führt zu einem Drehzahleinbruch, auf den dann der Drehzahlregler mit einem Füllungsanstieg reagiert. Durch die Trägheit des Turboladers ändert sich der Ladedruck in den ersten Sekunden nur wenig. Im Brennraum steht während dieser Zeit nicht genügend Luft für eine vollständige Verbrennung zur Verfügung und somit kommt es zu einem Anstieg der Abgastrübung. Ist das Motormoment größer als das geforderte Lastmoment, so steigt die Drehzahl wieder an. Als Reaktion darauf nimmt der Drehzahlregler die Füllung wieder zurück. Es wird weniger Kraftstoff in den Brennraum eingespritzt. Dieser verbrennt nun wieder vollständig, und die Abgastrübung geht auf den ursprünglichen Wert zurück.

Im vorliegenden CLEAN II – Projekt werden nun die bereits aus den o.g. statischen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zunächst in technisch realisierbare Komponenten umgesetzt und diese dann auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich dynamischer Vorgänge untersucht. Dabei sollen auch die Verbesserungspotentiale der einzelnen Maßnahmen untereinander quantifiziert werden.

Wie das Vorgängervorhaben CLEAN bereits zeigte, gibt es Maßnahmen, die in bestimmten Lastbereichen positiv wirken, in anderen dagegen sogar schädlich sein können. Aus den o.g. technisch realisierbaren Einzel-Maßnahmen mit ausreichendem Verbesserungspotential muß somit als Gesamtkonzept eine Auswahl ermittelt und das Zusammenspiel bzw. die Abfolge der einzelnen Vorgänge entwickelt und erprobt werden.

Ziel ist es, die Maßnahmen zu erproben, die für einen instationären Motorbetrieb eine unsichtbare Abgasfahne sicherstellen, wobei auch die Anforderungen an ein zugehöriges Motormanagement dargestellt und erprobt werden sollen.

Bei Lastwechseln werden Bereiche durchfahren, die Umschaltvorgänge zwischen den einzelnen Maßnahmen und somit Eingriffe des Motormanagements erfordern. Auch die Abläufe dieser Übergänge bzw. Umschaltvorgänge zwischen den einzelnen Maßnahmen müssen hinsichtlich Betriebssicherheit und Schadstoffemission optimiert werden.

Das Motormanagement muß also Einzelmaßnahmen zu- und abschalten, sowie Betriebsparameter variieren, wenn solche Bereichsgrenzen überschritten werden. Andererseits muß bei längerem Betrieb in der Nähe solcher Bereichsgrenzen durch vorsehen einer Hysterese etc. ein gleichmäßiger Motorbetrieb ohne ständiges Hin- und Herschalten sichergestellt sein.

Als weitere Aufgabe des vorliegenden CLEAN II – Projektes wurde die Ermittlung der bei instationärem Motorbetrieb auftretenden Partikelemissionen definiert. Wegen langer Filterbeladungszeiten bei Meßmethoden wie "EPA-Methode" oder "tube sampling method" können diese bekannten Verfahren bei instationären Belastungsvorgängen nicht angewandt werden.

Es kommt hier die Benutzung optischer Meßeinrichtungen in Betracht. Derartige Meßeinrichtungen sollen beschafft und evtl. adaptiert werden. Es muß dann eine Korrelation zwischen den mit diesen Einrichtungen gewonnenen Messdaten und den Partikelemissionswerten bekannter Verfahren im Stationärbetrieb ermittelt werden.

Um Anhaltswerte für künftige Limitierungen zu erhalten, sollen mit den optischen Verfahren außerdem bei instationärem Motorbetrieb der Zustand heutiger Serienmotoren sowie der verbesserte Zustand bei Anwendung der o.g. Maßnahmen miteinander verglichen werden.

2. 2. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben erstreckte sich über einen Zeitraum von drei Jahren, vom 01.06.1999 bis zum 31.05.2002. Eine detaillierte zeitliche Darstellung der einzelnen Arbeitspakete ist aus dem Ablaufplan (Anlage 2.1.) zu ersehen

Für die motorischen Untersuchungen standen hauptsächlich folgende Versuchsmotoren zur Verfügung:

- 7L 16/24 (7-Zyl-Motor) mit den technischen Daten
 - Kolbendurchmesser 160 mm
 - Kolbenhub 240 mm
 - Motordrehzahl 1200 $1/\text{min}$ (Nenndrehzahl)
 - Nennleistung 700 kW
- 8L 27/38 (8-Zyl-Motor) mit den technischen Daten
 - Kolbendurchmesser 270 mm
 - Kolbenhub 380 mm
 - Motordrehzahl 750 $1/\text{min}$ (Nenndrehzahl)
 - Nennleistung 2560 kW
- 6L 32/40 (6-Zyl-Motor) mit den technischen Daten
 - Kolbendurchmesser 320 mm
 - Kolbenhub 400 mm
 - Motordrehzahl 750 $1/\text{min}$ (Nenndrehzahl)
 - Nennleistung 2880 kW
- 6L 48/60 (6-Zyl-Motor) mit den technischen Daten
 - Kolbendurchmesser 480 mm
 - Kolbenhub 640 mm
 - Motordrehzahl 500 $1/\text{min}$ (Nenndrehzahl)
 - Nennleistung 6300 kW

Weitere Einzelversuche wurden an verschiedenen Serienmotoren durchgeführt.

2. 3. Ausgangssituation sowie wissenschaftliche, technische Arbeitsziele

2. 3. 1. Problemdarstellung

Die Rußemission eines Dieselmotors ist das Endergebnis von 2 gegenläufigen Prozessen während der Verbrennung:

- Rußbildung bei hohen Temperaturen und gleichzeitig fettem Kraftstoff-Luft-Verhältnis
- Abbrand von vorhandenem Ruß, wenn ausreichend Verbrennungsluft in die Reaktionszone gelangt und die Temperaturen hoch genug sind.

Da im Dieselmotor gerade bei größeren Brennraumvolumina ein inhomogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch vorliegt, das sich auf Grund von Turbulenzen auch noch ständig ändert, laufen an verschiedenen Stellen im Brennraum beide Prozesse meist gleichzeitig ab.

Eine Optimierung kann, wie bereits im Vorgängervorhaben CLEAN ermittelt, durch eine Anpassung von verschiedenen Parametern z.B. Einspritzintensität, Spritzlochquerschnitt, Luftversorgung usw. erreicht werden, wobei die jeweils günstigsten Spezifikationen bei verschiedenen Laststufen unterschiedlich sein können.

Hier tritt die Notwendigkeit auf, zwischen verschiedenen Maßnahmen und Parametern während des Betriebes bzw. beim Übergang auf andere Lastzustände umschalten zu können.

Durch instationäre Belastungsvorgänge kommt es zusätzlich noch zu undefinierbaren Verbrennungszuständen, bei denen der Motor trotz optimaler stationärer Abstimmung von z.B: Brennraum, Aufladung, Einspritzung, Füllungsbegrenzung usw. zeitweise Bereiche durchfährt, in denen die Gemischbildung und anschließende Verbrennung vom Optimalzustand weit entfernt ist. In derartigen zeitlich begrenzten Betriebszuständen kommt es dann zu mehr oder weniger starken Rußentwicklungen bis sich der vorher optimierte stationäre Fahrzustand wieder eingestellt hat.

Als weiteres Problem stellt sich der Mangel an geeigneten Meßmethoden dar, die bei instationären Belastungsvorgängen definitive Aussagen über die Partikelemission geben könnte.

2. 3. 2. Arbeitsziele

Die o.g. Umschaltbarkeit verschiedener Optimierungsmaßnahmen und damit das Verhalten während instationärer Belastungsvorgänge wurde im vorliegenden Projekt CLEAN II untersucht.

Dazu mußten zunächst technische Konzepte entwickelt und erprobt werden, um eine Spezifikationsänderung während des Betriebes vornehmen zu können. Dies betrifft die Themen:

- Einspritzdruck im Teillastbetrieb möglichst hoch, aber bei Vollast nicht über die zulässigen Grenzen.
Hierzu wurden die Konzepte untersucht:
 - ventilgesteuerte Einspritzpumpe
 - Common Rail
- Querschnittsänderung der Einspritzdüse beim Hochfahren.
Hierzu untersuchte Konzepte:
 - Freigabe zusätzlicher Spritzlöcher
 - Umschalten auf eine Düse mit anderer Spezifikation

Das Verhalten bereits bekannter Konzepte während instationärer Vorgängen wurde untersucht, wie:

- Verhalten einer Kraftstoff-Wasser-Emulsion und zwar mit konstanter und variabler Wasserkonzentration beim Hochfahren
- Eine verbesserte Luftversorgung (z.B. Zusatzluft, Jet-Assist, veränderbare Turbinengeometrie usw.)
- Variation der Ladelufttemperatur

Hieraus wurde ein Gesamtkonzept entwickelt und erprobt, bei dem die o.g. Maßnahmen zusammenspielen. Das dazu nötige Motormanagement wurde im Betrieb getestet.

2. 3. 3. Versuchsdurchführung allgemein

2. 3. 3. 1. Tabellen orientiertes Steuerprogramm (MANpilot)

Um reproduzierbare Belastungszustände mit den großen Motoren darstellen zu können, waren teilweise aufwendige Umrüstmaßnahmen an den Prüfständen nötig, wie z.B. Installation einer automatischen Belastungs- und Soll Drehzahlsteuerung und entsprechendes Monitoring usw.

Die Motoren werden auf den Prüfständen im Allgemeinen an einer Wasserbremse gefahren. Motordrehzahl und Bremslast können dabei unabhängig voneinander manuell eingestellt werden. Die Einstellung eines stationären Betriebspunktes erfolgt durch wechselseitiges Verstellen der Vorgabewerte für Drehzahl und Last von Hand, bis der gewünschte Fahrpunkt erreicht ist. Der zeitliche Verlauf von Last und Drehzahl beim Übergang von einem stationären Lastpunkt zum nächsten spielt im normalen Probestandsbetrieb keine Rolle.

Für eine Untersuchung des dynamischen Motorverhaltens muss zwischen den stationären Start- und Endpunkten ein fest definiertes Fahrprofil für Last und Drehzahl eingehalten werden. Mit der oben beschriebenen manuellen Verstel-

lung ist die Reduzierbarkeit der zu vergleichenden Beschleunigungsvorgänge nicht mit ausreichender Genauigkeit darstellbar.

Da aber für die Versuche im Projekt CLEAN II gerade diese Reproduzierbarkeit wichtig ist, wurde "MANpilot" /2/ entwickelt.

Damit hat man die Möglichkeit, ein beliebiges Zeitprofil für Bremslast und Motordrehzahl punktweise vorzugeben. Die Anzahl der möglichen Stützpunkte ist nicht begrenzt. Der zeitliche Abstand der einzelnen Punkte ist individuell einstellbar. Das Fahrprofil kann auf Datei abgespeichert werden.

Zur Überwachung der Abweichung zwischen dem vorgegebenen Soll-Fahrprofil und dem tatsächlichen Ist-Fahrprofil können Grenzwerte für Last-, Drehzahl- oder Leistungsdifferenz definiert werden. Beim Überschreiten der erlaubten Abweichung wird das Fahrprofil automatisch unterbrochen.

Die aktuellen Soll- und Istwerte werden online zahlenmäßig dargestellt. Außerdem wird der Verlauf der Soll- und Istkurven grafisch im Last-Drehzahl- und im Leistungs-Zeit-Diagramm aufgezeichnet. (s. Anlage 2.2.)

2. 3. 3. 2. Speicher Programmierbare Steuerung (SPS)

Um die verschiedenen Komponenten (wie z.B. Umblase- und Abblaseklappen) und auch die einzelnen Hilfseinrichtungen (wie z.B. Hilfsluftgebläse) in Abhängigkeit von vorgegebenen Parametern (wie z.B. Füllung oder Motordrehzahl) zum richtigen und reproduzierbaren Zeitpunkt während instationärer Beschleunigungsvorgänge ein- bzw. ausschalten zu können, ist eine spezielle komplexe Ansteuereinrichtung installiert worden.

Eine derartige Speicher-Programmierbare-Steuerung (SPS) wurde auf der Basis einer vorgegebenen Software der Fa. ABB im Hause MBD-Augsburg spezielle für diese Anwendung moduliert. Die fertige Anwendung hat die Bezeichnung AC 31 (s. Anlage 2.3)

In einer solchen Steuerung werden Kennfelder und Parameter abgelegt und während des Motorbetriebes ständig mit den aktuellen Betriebswerten verglichen. Erreichen diese aktuell, online gemessenen Werte die abgelegten Parameter, so werden die in der SPS definierten Steuerfunktionen für den Motor, Komponenten oder Hilfseinrichtungen ausgelöst.

In der SPS werden auch Verknüpfungen von verschiedenen Parametern oder Hysterese-Funktionen hinterlegt.

2. 3. 3. 3. Mehrkanal-Mess-System (μ -MUSYCS)

μ -MUSYCS ist ein universelles Messgerät, mit dem Spannungen, Ströme, Beschleunigungen oder Temperaturen gemessen werden können. μ steht für die kleine Messgeräteausführung und MUSYCS ist die Abkürzung für **MU**lti **SY**nchronous **C**hannel **S**ystem. Die Benutzerführung erfolgt über den PC, welcher über eine Ethernet-Schnittstelle mit dem Messgerät verbunden ist. (s. Anlage 2.4.)

Die Daten können auf einer internen Festplatte oder online auf dem PC angezeigt und dann auf diesem gespeichert werden. Durch die Kalibrierung der elek-

trischen Größen auf die physikalischen Messgrößen können diese direkt auf dem Bildschirm dargestellt werden (z.B. Ausgangsgröße Drehzahlsensor 0 - 10V, Zuordnung zu 0 - 800 rpm).

Die Abtastzeit kann für die Kanäle unterschiedlich eingestellt werden. Ein Online-Rechner ermöglicht es, aus zwei oder mehreren Messgrößen eine neue Größe berechnen und anzuzeigen. Aus Drehzahl und Bremsmoment kann somit z.B. die Leistung berechnet und angezeigt werden.

Die Anzeige erfolgt normalerweise über der Zeit. Es ist aber auch möglich, eine beliebige Messgröße als x-Achse zu verwenden und eine andere über dieser Messgröße auftragen zu lassen (s. Anlage 2.4., Diagramm rechts unten, Messgröße "rst" über Ladedruck "pL").

Eine weitere Messdatenbearbeitung ist mit der Auswertesoftware FAMOS möglich. Hier können die Messwerte geglättet, differenziert und integriert werden. Auch können Kennwerte wie Maximas, Minimas und weitere statische Kenngrößen ermittelt werden. Durch das Ablegen der Bearbeitungsschritte in einem Makro können die verschiedenen Messdurchläufe schnell nachbearbeitet werden. Außerdem können die Daten in Tabellen und Diagrammen optisch übersichtlich dargestellt werden.

2. 3. 3. 4. Rußmeßverfahren

Zur Darstellung des Rußverhaltens wurden unterschiedliche Meßverfahren (Optisch, Filterpapiermethode) vergleichend erprobt.
(Näheres dazu siehe Abschnitt 3.8.)

Hier zunächst als Übersicht, die benutzten Meßeinrichtungen:

- RB Rußmessung mit Filtermethode und Auswertung mit Fotozelle nach Vorschrift BOSCH / Nur für stationäre Betriebspunkte
- AVL 415 automatisch Rußmessung mit Filterpapier-Methode, ebenfalls für stationäre Betriebspunkte
- AVL 439 Opazitätsmessung mit Durchlicht im Bypass zur Auspuffleitung für instationäre Vorgänge
- SBS 1000 Opazitätsmessung quer durch die Auspuffleitung für instationäre Vorgänge
- Sick OMD 41 Opazitätsmessung quer durch die Auspuffleitung für instationäre Vorgänge
- AVL Smart-Sampler zur Partikelmessung

3. Ergebnisse

3.1. Variation der Einspritzintensität

Ein prinzipbedingtes Problem konventioneller Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsysteme ist, dass normalerweise mit abnehmender Last der Einspritzdruck (Druckmaximum) stark abfällt. Damit ist es schwierig, einen akzeptablen Kompromiß für den Trade-off aus Hochlastverbrauch (> kurze Einspritzdauer), NOx (> "weiche", nicht zu schnelle Verbrennung) und Teillastruss (> gute Gemischbildung / ausreichend hoher Einspritzdruck) zu realisieren.

Mit Rücksicht z. B. auf den technischen und kostenmäßigen Aufwand bei Nocken, Steuerwelle, Pumpe, Düse usw. läßt sich der Einspritzdruck bei Vollast nicht so hoch steigern, um bei Niedriglast noch einen ausreichenden Druck zur Verfügung zu haben.

3.1.1. Modifikation einer nockenbetätigten Einspritzpumpe

Die lastabhängige Variation der Förderintensität erscheint für dieses Problem als eine mögliche Lösung. Hierzu sollen hohe Stempelgeschwindigkeiten bei Niedriglast und geringe bei Hochlast dargestellt werden.

3.1.1.1. Zielsetzung

Bisher konnte eine lastabhängig unterschiedliche Förderintensität nur mit Kraftstoffnocken erreicht werden, die mit entsprechender Nockenkontur bei Förderbeginn eine höhere Stempelgeschwindigkeit als bei Förderende erzeugten.

Mit einer Kombination aus Nocken für unterschiedliche Stempelgeschwindigkeiten, einer relativ zur Nockenkontur bzw. zum Stempelhub automatischen Förderbeginnverstellung und einer ventilgesteuerten (statt schrägkantengesteuerten) Einspritzpumpe soll bei verschiedenen Lasten eine beliebige Förderintensität eingestellt werden.

Das Verbesserungspotential für eine derartige Lösung sollte untersucht werden.

Nach Erprobung der einzelnen Komponenten, sollte bei ausreichender Verbesserungsmöglichkeit im Vergleich zum konventionellen System ein Regelkonzept am Kompletmotor auch mit Schweröl erprobt werden.

3.1.1.2. Lösungskonzept

Das Konzept einer sogenannten "Ventilgesteuerten Einspritzpumpe" sieht vor, dass die Einspritzpumpe nur zur Kraftstoffförderung dient und eine gerade Stempelkontur ohne Steuerkanten besitzt. Förderbeginn und -ende wird elektronisch über ein Magnetventil gesteuert, das den Kraftstoffablauf aus dem

Pumpendruckraum verschließt bzw. öffnet. Hier wird eine entsprechende Steuer- software entwickelt, die den mechanischen Drehzahlregler ersetzt.

Die Förderintensität wird nun variiert, indem man auf der Nocke den Bereich mit der gewünschten Hubgeschwindigkeit für die Einspritzung heraussucht. Förderbeginn und –dauer relativ zum Stempelhub ist ja mit der ventilgesteuerten Pumpe in gewissen Grenzen frei wählbar. Um den Zünddruck dabei auf dem ursprünglichen Wert zu halten, muß durch eine automatische "Schwinge" der Hubbeginn relativ zur Kolbenstellung entsprechend korrigiert werden. (siehe Anlage A1 / 1)

Um das volle Potential der ventilgesteuerten Pumpe in Verbindung mit einer au- tomatischen Schwinge ausnutzen zu können, ist ein entsprechend angepaßter Kraftstoffnocken mit unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten nötig.

3.1.1.3. Vorversuche

Vor den eigentlichen Versuchen an einem Vollmotor wurden entsprechende Vorerprobungen durchgeführt, die einerseits die Funktionssicherheit der neuen ventilgesteuerten Einspritzpumpe gewährleisten und andererseits das Verbes- erungspotential im Trade-off (Kraftstoffverbrauch, NOx-Emission, Teillastruß) gegenüber einem konventionellen System ausloten sollen.

> Vorversuche am Komponentenprüfstand

Im Vorfeld zu den eigentlichen Motorversuchen wurden Erprobungen der Ein- spritzpumpe im Schwerölbetrieb durchgeführt. Hier wurde schwerpunktmäßig ein entsprechendes Magnetventilsystem für die Anforderungen entwickelt und getestet.

Danach wurden an einer Einspritzpumpeneinheit die Charakteristik einzelner Steuerparameter untersucht und optimiert, wie z.B.:

- Ausführungen, Abmessungen und Toleranzen im Magnetventil
- Größe des Magnetventilhubes
- Abstimmung der Magnetraumpülung zur Kühlung / Heizung
- Varianten der Drosselbohrung zur Dämpfung von Druckstößen bei Förderen- de
- Varianten des Förderbeginns und Einfluß auf den Einspritzdruck
- Förderkennlinien bei verschiedenen vom Motorbetrieb her bekannten Rand- bedingungen

Zur Absicherung des Systems wurden "Fehlfunktionen" simuliert und deren Auswirkung auf die Kraftstoffförderung untersucht wie z.B.:

- Hängenbleiben des Ventils in halbgeöffneter Zwischenstellung
- Verhalten bei Überdrehzahl

Mit dem soweit optimierten System wurde ein Dauerlauf (ca. 250 h, davon 100 h mit Schweröl) auf einem eigens dafür eingerichteten Komponentenprüfstand durchgeführt. Dabei wurden weitere Untersuchungen vorgenommen, wie z.B.:

- Verhalten beim Umschalten von Schweröl auf Dieselöl
- Einfluß des Kraftstoffdruckes im Niederdrucksystems
- Ermittlung der Förderkennlinien mit Schweröl
- Einfluß von Einspritzpumpenleckagen
- mögliche Kavitationsanfälligkeiten
- Verschleißverhalten der Komponenten

Parallel dazu wurde ein Steuerungsprogramm entwickelt, das u.a. den serienmäßigen Drehzahlregler ersetzen sollte. Das Programm sollte sowohl Förderbeginn und Einspritzdauer der einzelnen Zylinder als auch die Stellung der Nockenposition steuern.

Es wurden die entsprechend dafür nötigen Meßwert-Aufnehmer für die Funktionsrückmeldung des Einspritzsystems konzipiert und getestet. Von einem Notebook aus sollte der Motor gestartet, überwacht, gestoppt und die Zünddrücke der einzelnen Zylinder verstellt werden.

Anschließend wurde an einer Pumpen-Düse-Einheit die Funktion der elektronischen Steuerung und der Software dafür wiederum auf einem Komponentenprüfstand erprobt und optimiert. Dabei wurde das Monitoring und Handling des Programms für den späteren Motorbetrieb simuliert und angepaßt.

Die vorstehenden Komponentenerprobungen wurden mit gutem Erfolg abgeschlossen. Es wurden sechs derartige Einspritzpumpen und zugehörige Nocken mit variablen Hubgeschwindigkeiten gefertigt und für einen Motorversuch bereitgestellt. Das Steuerprogramm wurde ebenfalls montagefertig für den Betrieb an einem Vollmotor 6L48/60 vorbereitet.

> Vorversuche zur Simulation der Förderintensität am Vollmotor mit konventionellem Einspritz-System

An einem Vollmotor sollten durch verschiedene Einspritznocken mit unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten bei möglichst gleichem sonstigen Betriebszustand der Einflußbereich der Förderintensität auf die Betriebswerte ermittelt werden.

Für eine erste Erprobung im Vollmotor wurden Nocken mit einem fallenden Geschwindigkeitsverlauf ($v_1/v_2 = 2,3 / 1,24$ m/s) ausgelegt

Diese Nocken sollten später in Verbindung mit der ventilgesteuerten Einspritzpumpe verwendet werden.

Durch entsprechende Einstellung konnte hier mit den herkömmlichen Pumpen die Förderung in der Nähe von v_1 oder wahlweise v_2 realisiert werden.

3.1.1.4. Ergebnisse: Modifikation einer nockenbetätigten Einspritzpumpe

Bereits auf dem Komponentenprüfstand zeigte sich, dass mit der gewählten Nocke bei Vollast der Einspritzdruck nur in einer Größenordnung von ca. 130 bar variierbar ist, das sind etwa 10% des Vollasteinspritzdruckes, obwohl die Nockengeschwindigkeit deutlich unterschiedlich ist. (siehe Anlage A1 / 2)

Im Teillastbereich fällt diese Druckerhöhung noch geringer aus. Eine Aussage über den Einfluß der Einspritzdruckerhöhung auf den Rußwert kann bei Versuchen am Komponentenprüfstand natürlich nicht gemacht werden.

Stationäre Motorversuche an einem 6L48/60 - Vollmotor mit verschiedenen Nockengeschwindigkeiten bestätigen den Einspritzdruckanstieg durch die "schnellere" Kraftstoffförderung, der zur Niedriglast hin allerdings gegen Null geht. Das ist auch der Grund warum der Teillastrußwert durch diese "schnellere" Kraftstoffförderung nur marginal verbessert wird. (siehe Anlage A1 / 3)

Aus diesen stationären Messungen kann bereits hergeleitet werden, dass ein deutlicher Rußverbesserungseffekt mit diesem System nicht erreicht werden kann.

3.1.2. Common Rail

Ein Common-Rail-System (CR) bietet die Möglichkeit, ohne bei Vollast unnötig hohen Einspritzdruck verkräften zu müssen, bei Teillastbetrieb einen entsprechend ausreichenden Druck darstellen zu können.

3.1.2.1. Zielsetzung

An einem Vollmotor sollte ein CR hinsichtlich seiner Auswirkung auf die Rußemission und sein Verhalten bei instationären Belastungszuständen untersucht werden.

Dabei sollte zunächst das Verbesserungspotential gegenüber des Serien-Einspritzsystems ermittelt und danach auch die Tauglichkeit im instationären Schwerölbetrieb nachgewiesen werden.

Bei ausreichend erscheinendem Verbesserungspotential soll mit einem derartigen System ein Regelkonzept für instationäre Lastübergänge dargestellt und erprobt werden.

3.1.2.2. Lösungskonzept

Es wurden zwei verschiedene CR-Systeme ein "hubgesteuertes" und ein "druckgesteuertes" erprobt. (s. Anl. A2 / 1)

Das hubgesteuerte System arbeitet mit speziellen Einspritzventilen, die über ein Magnetventil direkt geöffnet und geschlossen werden und den im CR-System vorgespannten Kraftstoff in den Brennraum einspritzen.

Bei der zweiten Variante, einem druckgesteuerten System werden bei nahezu konventionellen Einspritzventilen Einspritzbeginn und -ende durch einen Druckverlauf im Druckrohr gesteuert, der nun seinerseits mittels Magnetventilen aus einem CR-Reservoir gespeist wird.

3.1.2.3. Stationäre Vorversuche am Vollmotor 16/24

Nach Vorerprobung der einzelnen Komponenten und der elektronischen Steuerung an entsprechenden Komponentenprüfständen wurde ein 7L 16/24 (21473) mit beiden Systemen nacheinander gefahren.

> Vergleich CR-System mit konventioneller Einspritzung (stationär)

Beide CR-Systeme unterscheiden sich an diesem Motortyp bzgl. Rußemission und instationärem Verhalten nur wenig. Die im Folgenden dargestellten Versuche und Ergebnisse beziehen sich daher auf beide Systeme

Im Vergleich zur konventionellen Einspritzung zeigen die Einspritzdruckverläufe während der Einspritzung beim CR-Systems ein grundsätzlich anderes Verhalten (s. Anl. A2 / 2). Während der Einspritzdauer ist der Druck bei CR auf einem gleichmäßig hohen Niveau. Damit läßt sich die Verbrennung und auch die Rußbildung günstiger steuern.

In der Darstellung der maximalen Einspritzdruck-Werte über der Motorleistung ist der Vorteil eines CR-System gegenüber einer konventionellen Einspritzung deutlich zu erkennen. Um bei Teillast einen ausreichend hohen Einspritzdruck darstellen zu können, muss der Vollast-Einspritzdruck nicht unnötig überhöht werden (s. Anl. A2 / 3)

Mit einem CR Einspritzsystem können die Rußemissionen über den gesamten Lastbereich gesenkt werden. Hier wirkt einerseits der höhere Teillast-Einspritzdruck aber andererseits auch die günstigere Formung des Druckverlaufes während des einzelnen Einspritzvorganges (s.o.) reduzierend auf den Ruß.

Die NO_x-Emission und der Kraftstoffverbrauch verschlechtern sich im Vergleich zum konventionellem Einspritzsystem dabei nicht. (s. Anl. A2 / 4)

> Einfluß des Raildruckes (stationär)

Die Parameter Raildruck und Bestromungsbeginn (das entspricht dem Einspritzbeginn) können beim CR-System im Motorkennfeld frei gewählt werden.

Grundsätzlich führt eine Raildruckerhöhung, wenn der Bestromungsbeginn konstant gehalten wird, zunächst zu einer Reduzierung der Rußemissionen. Ab einem Druck von ca. 1100 bar bleibt der Rußwert auf einem Minimum (s. Anl. A2 / 5 / obere Kurve). Der NO_x-Wert nimmt dabei allerdings zu.

Durch eine entsprechende Korrektur des Bestromungsbeginns kann nun parallel zur Raildruckerhöhung die NO_x-Emission konstant gehalten werden. Dabei ist der Einfluß der Raildruckerhöhung auf den Rußwert nicht mehr so intensiv. Gleichzeitig wird aber ein flaches Optimum in der Rußemission bei einem Raildruck von ca. 1000 bar erkennbar. (s. Anl. A2 / 5 / untere Kurve)

> Voreinspritzung (stationär)

Bei der "abgesetzten" Voreinspritzung (VE) werden ca. 10°KW vor der Haupteinspritzung etwa 25% der gesamten Kraftstoffmenge eingespritzt. Um eine

Verbesserung im Ruß-NOx-be trade off zu erzielen, muß dabei aber auch die Haupteinspritzung um etwa 1°KW in Richtung "später" verlagert werden.

Mit einer derartigen VE kann im unteren Teillastbereich (<25%) günstig auf Ruß NOx und Kraftstoffverbrauch eingewirkt werden. Diese Verbesserungseffekte sind quantitativ jedoch nur gering. (s. Anlage A2 / 6)

> Nacheinspritzung (stationär)

Bei der "abgesetzten" Nacheinspritzung (NE) werden ca. 20° KW nach der Haupteinspritzung etwa 30% der gesamten Kraftstoffmenge eingespritzt.

Dadurch kann die Rußemission im oberen Lastbereich (> 50% Leistung) reduziert werden. Gleichzeitig bleiben die NOx Emissionen konstant, der Kraftstoffverbrauch steigt minimal an. (s. Anl. A2 / 7)

3.1.2.4. Instationäre Versuche an einem Vollmotor 16/24

Durch die elektronische Einspritz-Steuerung ist das System äußerst flexibel zu gestalten und kann leicht an die jeweiligen Betriebsbedingungen angepaßt werden.

Am Motor 7L 16/24 - 21473 wurden anschließend an die oben erläuterten stationären Vorversuche die Effekte des CR-Systems im Vergleich zur konventionellen Einspritzung während instationärer Belastungsvorgänge ermittelt.

Durch die Möglichkeit der schnellen Anpassung des Raildruckes an die Leistungsänderungen, bzw. die Erhaltung eines relativ hohen Einspritzdruckes auch bei Teillast, lassen sich mit einem CR-System positive Effekte auf die Ruß-Emission auch bei Beschleunigungsvorgängen erreichen.

Das instationäre Ruß-Verhalten kann deutlich verbessert werden. Der Einfluß auf Stickoxid-Emission und Kraftstoffverbrauch ist nur marginal.

Für die instationären Versuche wurde der transiente Ruß über die Opazität mittels spezieller Meßgeräte aufgezeichnet, die nach dem Durchlichtverfahren arbeiten (z.B. Sick oder AVL 439), da diese Geräte ein schnelles und analoges Signal zur Verfügung stellen. Die für die vorhergegangenen stationären Vor- tests angewandte Filterschwärzungsmethode (z.B. Bosch) ist in diesem Fall nicht sinnvoll, weil sie für den Meßablauf auch bei automatisch arbeitenden Geräten (z.B. AVL 415) ein bestimmtes Zeitfenster benötigt. Weiterführende Darstellung der einzelnen Ruß-Meßverfahren siehe Abschnitt 3.7.

In Anlage A2 / 8 wurde der Verlauf bestimmter Betriebswerte wie Abgas-Opazität, Motordrehzahl, Ladedruck und Einspritzdruck während eines ausgewählten Beschleunigungsvorganges dargestellt. Der Versuchsmotor 7L16/24 wurde bei konstanter Nenndrehzahl plötzlich mit 35 % Leistungsabgabe beaufschlagt.

Deutlich ist der Rußstoß und als Reaktion auf die Lastaufschaltung der Einbruch der Motordrehzahl zu erkennen. Mit einem Common-Rail-System wird das transiente Betriebsverhalten deutlich verbessert. Sowohl der Rußstoß (Opazität) als auch der im Generatorbetrieb störende Drehzahleinbruch werden reduziert.

3.1.2.5. "Boost-Injection"

Als zusätzliche Maßnahme zur Verbesserung des instationären Verhaltens, die mit der CR-Technik darstellbar ist, wurde hier die "Boost-Injection" angedacht.

Die Boost-Injection ist eine deutlich verzögerte Nacheinspritzung. Hierdurch wird die Verbrennung soweit verlängert, dass ein kräftiger Abgastemperaturanstieg entsteht, der zu einem Ansteigen der Turbolader-Drehzahl und damit zu einer Ladedruckerhöhung führt.

Der Effekt auf das Beschleunigungsvermögen des Motors ist in etwa vergleichbar mit der Wirkung des bekannten Jet-Assist, bei dem Luft aus den Anlaßluftflaschen über Düsen auf die Schaufeln des Verdichterrades geblasen wird, so dass der Lader eine Drehzahl-Erhöhung erfährt.

In Anlage A2 / 9 ist die Wirkungsweise der Boost-Injection bei einer Lastaufschaltung von Leerlauf auf 35% Leistung im zeitlichen Verlauf dargestellt. Deutlich ist ein schnellerer Anstieg des Ladedruckes erkennbar. Der Motor beschleunigt auch entsprechend zügiger. Allerdings führt die späte Nacheinspritzung zu einer stärkeren Emission von unverbrannten Kraftstoffresten. Dies zeigt sich auch durch den ausgeprägten Kurvenverlauf der Opazitäts-Kurve (siehe Anlage). Der subjektive Eindruck am Auspuff ist dabei nicht so sehr ein schwarz, grauer Rußstoß sondern eine deutliche weiße Wolke, die zwar nicht von der Filterpapier-Schwärzungs-Methode (z.B. Bosch) wohl aber vom Sick-Gerät erfasst werden kann.

Das instationäre Rußverhalten, hier als schwarze Trübung erkennbar, wird durch Einsatz des Boost-Injection-Systems durchaus verbessert. Die entstehende "weiße Wolke", die auch das Sick-Gerät "sehen" kann, führt aber zu kaum durchgreifenden Verbesserungen im optischen Gesamteindruck des Auspuffs bei instationären Laständerungen.

Zum derzeitigen Zeitpunkt scheint mit Boost-Injection kein Verbesserungspotential vorhanden.

3.1.2.6. Abschließende Bewertung des Common Rails

Um bei transienten Belastungszuständen einen Rußstoß deutlich zu reduzieren, ist der Einsatz eines Common-Rail-Systems durchaus sinnvoll.

Durch den auch bei Teillastbetrieb höheren Raildruck kann der Motor auf Laständerungen schneller und genauer reagieren.

Die durch ein Common-Rail-System ermöglichte Boost-Injection hat hier zwar eine Reduzierung des Schwarz-Rußstoßes aber eine deutliche Verstärkung einer "weißen Wolke" zur Folge. Ohne weitere Optimierungsarbeit erscheint für dieses Feature wegen des optischen Eindruckes das Verbesserungspotential gering.

3.2. Querschnittsänderung der Einspritzdüse beim Hochfahren

Ein grundlegendes Problem der konventionellen Einspritzdüse ist die unveränderbare Spritzlochgeometrie, die meist für den Vollastbetrieb ausgelegt wird und dann bei Niedriglast nicht mehr paßt. Das bedeutet z.B. zu große Spritzlochdurchmesser für die geringe Einspritzmenge, so dass eine optimale Strahlausbreitung nicht mehr stattfindet.

Zu diesem Problem wurden bereits im Rahmen des Vorgängervorhabens CLEAN umfangreiche Versuche durchgeführt. Aus diesen Vorversuchen war ersichtlich, dass zur Optimierung des Rußwertes im Teillastbetrieb deutlich andere Spritzlochgeometrien als im Vollastbetrieb nötig sind.

Im vorliegenden Projekt geht es nun darum, eine technische Lösung zu entwickeln und zu erproben, die es ermöglicht, während des Motorbetriebes eine Querschnittsänderung der Einspritzdüse vorzunehmen zu können.

3.2.1. Freigabe eines zusätzlichen Querschnittes (KOAX-Düse)

3.2.1.1. Zielsetzung

Zunächst muß ein Konzept für ein Einspritz-Nadelventils entwickelt werden, bei dem der Spritzlochquerschnitt durch Freigabe weiterer Düsenlöcher zu Vollast hin vergrößert werden kann.

Entsprechender Bauteile für die Motortypen 58/64 und 48/60 sollen als Prototyp gefertigt werden.

Parallel dazu werden an einem Vollmotor 48/60 die konzipierte Spritzlochgeometrie für Niedriglast in einer konventionellen Einspritzdüse gefahren, um das Verbesserungspotential abzuschätzen zu können.

Danach soll eine Erprobung dieser Nadelventile auf einem Komponentenprüfstand und Entwicklung eines dazu nötigen Steuersystems durchgeführt werden, um einen Teil der Spritzlöcher bei Niedriglast sicher verschließen zu können. Dazu gehört auch die Erprobung einer entsprechenden Steuersoftware.

Anschließend muß ein Vollmotor ausgerüstet und des Verbesserungspotential ermittelt werden, zunächst stationär und dann auch hinsichtlich instationärer Laständerungen.

Wenn ein ausreichendes Verbesserungspotential abschätzbar ist, wird ein entsprechendes Regelkonzept für die Lastübergänge erstellt und erprobt.

3.2.1.2. Lösungskonzept

Das technische Konzept der KOAX-Düse sieht vor, daß bei Teillast nur eine begrenzte Anzahl Spritzlöcher mit einer speziellen Niedriglastspezifikation freigegeben wird und bei höheren Leistungen zusätzliche Spritzlöcher geöffnet werden.

Gelöst wurde das mit einer koaxialen Doppelnadel-Düse

Die Funktion ist in Anlage B1 / 1 schematisch dargestellt.

Eine Innennadel, die die zusätzlichen Spitzlöcher für höhere Lasten steuert, läuft in einer Hohl-nadel, die die Löcher für den Teillastbetrieb freigibt.

Bei Niedriglastbetrieb wird die Innennadel hydraulisch geschlossen gehalten. So arbeitet nur die äußere Hohl-nadel und gibt den oberen Spritzlochkreis mit der Teillast-Spezifikation frei. Bei Lastanstieg wird bei der Überschreitung eines definierten Füllungswertes der o.g. hydraulische Zuhaltedruck entlastet und somit die Innennadel beweglich. Diese arbeitet dann parallel zur äußeren Hohl-nadel und gibt eine zusätzliche Lochreihe frei.

3.2.1.3. Vorversuche am Vollmotor 58/64 mit "Einnadel-Düsen"

Als Vorversuch für eine derartige KOAX-Düse mit Doppelnadel wurde die Auswirkung einer entsprechenden Teillast-Spritzloch-Spezifikation in einer serienmäßigen Einnadel-Düse an einem Vollmotor 8L58/64 (1110197) ausprobiert.

Um die Effekte deutlicher erkennbar zu machen, wurden bewußt extrem ungünstige Aufladebedingungen realisiert. Die Motorausführung entsprach also nicht dem Serienzustand

Im Vergleich zu den mit einer Seriendüse (14 x 0,85 – 81°) im stationären Niedriglastbetrieb ermittelten Boschwerte wurde die Rußemission bei gleichen Lastzuständen, aber mit einer Düse gemessen, die nur die Teillast-Löcher (7 x 0,85 – 81°) der späteren KOAX-Düse gebohrt hatte. Mit dieser Düse konnten natürlich keine höheren Lasten gefahren werden, da sonst der Einspritzdruck über die zulässigen Grenzen angestiegen wäre.

Deutlich ist das Verbesserungspotential aus den statischen Messungen zu erkennen. (siehe Anlage B1 / 2)

Der Rußwert geht bei Leerlauf und 10 % Leistung auf ca. ½ des serienmäßigen Rußwertes zurück.

Es erscheint also sinnvoll, die Versuche und Entwicklungen in dieser Richtung weiterzuführen, d.h. die Funktion derartiger umschaltbarer KOAX-Düsen am Vollmotor zu testen.

3.2.1.4. Stationäre Versuche am Vollmotor 58/64 mit KOAX-Düse

An einem 9L58/64 (1110200) wurden daher zwei KOAX-Düsen zur Funktionserprobung in Zyl 7 und 8 eingebaut.

Der Einfluß auf die Betriebswerte auch auf den Abgasruß war nicht feststellbar. Es waren ja auch nur zwei von neun Zylindern mit diesen Nadelventilen ausgerüstet. Eine zylinderspezifische Einzelrußentnahme wurde zwar versucht, führte aber nicht zur reproduzierbaren Ergebnissen.

Diverse Funktionstest wurden über etwa 20 Laufstunden durchgeführt. Dabei stand vor allem die Untersuchung der Wirksamkeit der hydraulischen Zuhaltung und die Wirkung auf die Betriebswerte der beiden Zylinder beim Lösen und wieder Fixieren der Innennadel im Vordergrund.

Die Ergebnisse dieses Kurztests waren nicht in Gänze befriedigend. Es zeigten sich Probleme bei der eindeutigen und dauerhaften Zuhaltung der Innennadel

und Schwierigkeiten des Laufverhaltens der beiden coaxialen Nadeln in der neuartigen Einspritzdüse.

Der Versuchslauf am Vollmotor und die anschließende Bauteilkontrolle ergab, daß hier noch konstruktive Modifikationen erforderlich sind.

Die weiteren Erprobungen dieses Einspritzsystems wurden aus organisatorischen Gründen dann aber am Motortyp 48/60 fortgeführt.

3.2.1.5. Vorversuche am Vollmotor 48/60 mit "Einnadel-Düse"

Wie bereits beim Typ 58/64 (s.o.) wurde zunächst auch mit einem 6L48/60 Vollmotor (1130054) ein Vorversuch zur Abklärung des Verbesserungspotentials durchgeführt, wobei wiederum bewußt sehr ungünstige d.h. zu erhöhten Rußwerten führende Aufladebedingungen realisiert wurden.

Auch hier wurden den Niedriglast-Rußwerten einer serienmäßigen Düse die Boschwerte einer Einnadel-Düse gegenübergestellt, die Teillastlöcher einer entsprechend späteren KOAX-Düse hatte. (siehe Anlage B1 / 3)

Es wurden dabei drei verschiedene Teillast-Spezifikationen ($10 \times 0,66 - 81^\circ / 8 \times 0,64 - 81^\circ$ und $7 \times 0,60 - 81^\circ$) erprobt.

Die Rußwert-Verbesserungen durch die Teillast-Spezifikationen sind hier nicht mehr so ausgeprägt, vermutlich, da der Ausgangswert niedriger liegt als bei den o.g. 58/64-Düsen. Trotzdem ist erkennbar, daß mit den 7- Loch-Düsen, die günstigsten Rußwerte erreicht werden konnten.

Die Unterschiede im Rußwert bei Niedriglast und Leelauf sind bei Propellerbetrieb noch deutlicher. (siehe Anlage B1 / 4)

Bei dem Ergebnis ist zu beachten, daß gleichzeitig mit dem Querschnitt auch die Anzahl der Spritzlöcher geändert wurde.

Der Einfluß der hier untersuchten unterschiedlichen Düsenspezifikation auf den max. Einspritzdruck bei 10%-Leistung ist in Anlage B1 / 5 dargestellt.

Obwohl hier der Verbesserungseffekt nicht derart ausgeprägt war, wie beim Motortyp 58/64 erscheint auch hier eine Erprobung von Querschnittumschaltbaren KOAX-Düsen sinnvoll.

3.2.1.6. Stationäre Versuche am Vollmotor 48/60 mit KOAX-Düse

Am Versuchsmotor 6L 48/60 – 1130086 wurden KOAX-Düsen mit zwei verschiedenen Spritzlochspezifikationen gefahren.

Nach den o.g. Vorversuchen und der anschließenden Bauteilkontrolle mit Begutachtung des Spritzbildes auf den Kolbenkronen hat man sich für folgende zwei Spezifikationen entschieden, bei denen jeweils der Gesamtquerschnitt der Spritzlöcher gleich war:

Variante 1:

$8 \times 0,56 - 79^\circ$ (Teillast) + $8 \times 0,70 - 81^\circ$ (zusätzlich bei höherer Last)

Variante 2:

$12 \times 0,46 - 79^\circ$ (Teillast) + $6 \times 0,81 - 81^\circ$ (zusätzlich bei höherer Last)

Die Motor-Betriebsergebnisse wurden in Anlage B1 / 6 dargestellt. Über den gefahrenen Lastpunkten sind die stationären Meßwerte von Ruß (Bosch) und Opazität (Sick) mit den o.g. beiden KOAX-Düsen-Varianten im Vergleich zu der normalen Serien-Düse aufgetragen.

Im unteren Niedriglastbetrieb bis ca. 10% Motorlast zeigen beide KOAX-Düsenvarianten ein deutlich besseres Rußverhalten als die vergleichbare Serien-Einnadel-Düse.

Die Variante 1 zeigte bei 25% Leistung einen plötzlich schlechteren Rußwert verbunden mit Unregelmäßigkeiten in den Betriebswerten. Dies deutet auf eine Funktionsstörung im Öffnungsverhalten vermutlich der inneren Nadel hin. Eine anschließende Bauteilkontrolle ergab jedoch ein ordnungsgemäßes Bild.

Die Variante 2 blieb hingegen auch bei dieser Leistung im Rußverhalten günstiger als die Seriedüse.

Bei einer weiteren Leistungssteigerung ab ca. 40 %, wenn beide Nadeln öffnen, kommt es dann jedoch auch hier zu einer deutlichen Rußverschlechterung im Vergleich zur entsprechenden Serinedüse. Hier scheint sich möglicherweise die Vielzahl der Strahlen gegenseitig zu stören.

Es muß hier auch darauf hingewiesen werden, daß verglichen mit der Seriedüse die Stickoxid-Emissionen reduziert werden konnten, aber der spezifische Kraftstoffverbrauch angestiegen ist. Dies gilt für beide KOAX-Düsen-Varianten.

Eine Beeinflussung oder gar Probleme bei der Drehzahlregelung des Motors während der Umschaltphase von einer auf beide Nadeln und zurück konnte nicht festgestellt werden.

Bei der abschließenden Bauteilkontrolle, für die der Motor jeweils aus ähnlicher Teillast gestoppt wurde, mußte festgestellt werden, dass die Düsen zwar noch einwandfrei abspritzten aber teilweise kräftige Koksablagerungen aufwiesen. Hier besteht vor einer möglichen Serieneinführung noch Handlungsbedarf, da eine Verkokung zu Unregelmäßigkeiten in der Strahlausbreitung und im Brennverlauf führen kann.

3.2.1.7. Abschließende Bewertung der KOAX-Düse

Beide KOAX-Düsen-Varianten zeigten trotz unterschiedlicher Spritzlochgeometrie ein ähnlichen positiven Einfluß auf die Teillastruß-Emission.

Das Verhalten des Motor-Regler-Düsen-Systems beim instationären Durchfahren des Umschaltpunktes von einer auf beide Nadeln zeigte keine Probleme auf.

Beide KOAX-Düsen-Varianten zeigten bei höheren Leistungen (Betrieb mit beiden Nadeln) einen deutlichen Anstieg des Kraftstoffverbrauches und der Ruß-Emission. Hier ist sicher noch durch entsprechende konstruktive Überarbeitung des Konzeptes, wie z.B. Spritzlochspezifikation, -bearbeitung, evtl. Teillast-Löcher an der Innennadel usw., ein Verbesserungspotential vorhanden.

Eine Erprobung dieser KOAX-Düsen in Verbindung mit weiteren Maßnahmen, wie Jet-Assist, Hilfsluftgebläse usw, erschien nicht sinnvoll, da das ungünstige Verhalten im Lastbereich über ca. 40% das Ergebnis verfälscht hätte. Eine

Fortsetzung der Versuche sollte erst mit einem modifizierten KOAX-Düsen-System vorgenommen werden.

Das gute Rußverhalten bei Niedriglast, ja sogar bei Leerlauf und auch das problemlose Arbeiten während der Umschaltphase, sind wichtige Pluspunkte dieses Systems, die auch eine aufwendige konstruktive Überarbeitung rechtfertigen würden. Dies ist aber im Rahmen dieses CLEAN II – Projektes aus Zeitgründen nicht mehr möglich und war auch so nicht vorgesehen, da hier nur Grundlagenuntersuchungen durchgeführt werden sollten

3.2.2. Umschalten auf einen anderen Querschnitt (seitliche Teillastdüse)

3.2.2.1. Zielsetzung

Zunächst sollte ein Konzept für ein Einspritz-Nadelventil-System entwickelt werden, bei dem während des Motorbetriebes beim Übergang auf einen niedrigen Lastpunkt von dem normalen Haupteinspritzventil auf ein separat angeordnetes sogenanntes "Teillastventil" mit entsprechend modifizierten Düsenlöchern umgeschaltet werden kann.

Entsprechende Versuchs-Bauteile für den Motortyp 48/60 sollten gefertigt werden.

Parallel dazu soll an einem Vollmotor 48/60 die konzipierte Spritzlochgeometrie für Niedriglast in der Teillastdüse stationär gefahren werden, um das Verbesserungspotential abschätzen zu können.

An einem Komponentenprüfstand soll dann des Systems Haupt-Teillast-Nadelventil mit Kraftstoffförderung von einer einzigen Einspritzpumpe aus erprobt werden, wobei insbesondere der Umschaltvorgang von einer Düse auf die andere untersucht werden soll.

Danach soll ein derartiges System an einem Vollmotor installiert und zunächst stationär und dann auch hinsichtlich instationärer Laständerungen erprobt werden. Dabei wird des mögliche Verbesserungspotentials ermittelt.

Wenn ausreichendes Verbesserungspotential vorhanden ist, wird ein entsprechendes Regelkonzept für die Lastübergänge erstellt und erprobt.

3.2.2.2. Lösungskonzept

Das technische Konzept der separaten Teillastdüse-Düse sieht vor, daß beim Übergang von höherer Leistung auf Teillast ab einem bestimmten Lastpunkt die in der serienmäßigen Einspritzpumpe geförderte Kraftstoffmenge nicht mehr vom Haupteinspritzventil, sondern statt dessen von einer Teillastdüse eingespritzt wird.

Dieses Teillasteinspritzventil ist räumlich von der Hauptdüse getrennt angeordnet, in diesem Fall seitlich zwischen den Gaswechselventilen.

Die Umschaltung wird dadurch erreicht, daß mittels hydraulischer Systeme über entsprechende Druckstücke direkt die Nadeln zugehalten werden und zwar bei

Vollast die Nadel des Teillastnadelventils, so daß dann nur die Hauptdüsen-
nadel frei zum Einspritzen arbeiten kann, und umgekehrt.

3.2.2.3. Vorversuche am Komponentenprüfstand

Als Vorversuch für eine separate Teillastdüse wurde die Funktion eines derarti-
gen Zwei-Nadelventilsystems mit einer Einspritzpumpe und der zugehörigen
hydraulischen Steuerung am Komponentenprüfstand erprobt.

In Anlage B2 / 2 ist die Wirkung einer Teillastdüse im Vergleich zu einer norma-
len Hauptdüse dargestellt. Das Diagramm hat als Ordinate die jeweiligen Re-
gelstangenstellung (=Füllung) der Einspritzpumpe. (Zur Orientierung: Der Fül-
lungswert bei Motor-Halblast beträgt ca. 45 mm) Bei etwa 40 mm Füllungswert
wird mit der Teillastdüse bereits der Vollasteinspritzdruck der normalen Serien-
düse erreicht.

Diese Vorversuche zeigten bereits, daß es bei der Konzipierung der hydraulischen
Steuerung und Füllungs-Regelung in der Übergangsphase von Teillast-
auf Vollastdüse zu Schwierigkeiten kommen kann.

Da die Teillastdüse deutlich kleinere Spritzlöcher hat, kann es beim Umschalten
auf die Vollastdüse zu einem Rußstoß kommen, bis der Regler die Füllung we-
gen des nun größeren Düsenloch-Querschnitts wieder reduziert hat.

Das Servosystem muß so optimiert werden, daß beim Umschalten auch nicht
kurzzeitig beide Düsen gleichzeitig einspritzen, was ebenfalls zu einem Ruß-
stoß führen würde.

Hier muß also ein deutlich aufwendigeres Konzept für die Steuerung des Um-
schaltvorgangs (Servosteuerung, elektronischer Regler usw.) ausgeführt wer-
den, als ursprünglich geplant.

Außerdem zeigten diese Versuche, daß im Druckrohr zu der jeweils nicht arbei-
ten Einspritzdüse hin hohe Druckstöße auftreten, die möglicherweise Kavitati-
onserscheinungen hervorrufen können.

3.2.2.4. Vorversuche am Vollmotor 48/60

Zunächst wurde mit einem 6L48/60 Vollmotor ein Vorversuch zur Abklärung des
Verbesserungspotentials durchgeführt.

Für diese Versuche wurden spezielle Zylinderköpfe aufgegeben. Die Hauptein-
spritzdüse bleibt in Zylinderkopf-Mitte. Die Teillastdüse ist seitlich im Zylinder-
kopf zwischen den Gaswechselventilen untergebracht.

Sowohl auf der Haupt- als auch auf der Teillastdüse ist ein Hydraulikkolben
aufgesetzt, der über eine Stange durch das Zentrum des Nadelventils auf die
Düsennadel drückt und diese gegen den Einspritzdruck zuhält, wenn die Düse
nicht einspritzen soll.

Eine elektronische Steuerung für die Umschaltung von Haupt- auf Teillastdüse
in Abhängigkeit von Füllung und Motordrehzahl wurde erstellt. Die Parameter
für diese Steuerung, wie z.B. Füllungswert für Umschaltpunkt, Reglerblockie-
rung bei Betrieb nur mit Teillastdüse usw., sollten im Versuch ermittelt werden.

In einem ersten stationären Versuch wurde der o.g. Motor nur mit der seitlichen Teillastdüse, ohne Hauptnadelventil also auch ohne hydraulische Umschaltvorrichtung im niedrigen Leistungsbereich gefahren.

Es wurde mit verschiedenen Teillastdüsen-Spezifikationen (4x0,95-87°, 4x0,70-87°, 2x0,95-88°, 4x0,70-87°) experimentiert. Die Düse wurde so geplant, dass je 2 Strahlen an der Kolbenmitte vorbei in die Brennraummulde spritzen.

Für stationäre Niedriglastpunkte (Leerlauf, 5%, 10%) konnte nur mit der Düse 4x0,70-87° eine geringfügige Verbesserung und auch nur im Leerlauf erreicht werden. Auch bei gering höheren Lasten verschlechterte sich der Rußwert deutlich. (s. Anl. B2 / 3)

Die übrigen Düsenvarianten waren im Rußwert deutlich schlechter als die serienmäßige Mittendüse

Eine Verbesserung des Rußwertes konnte erst erreicht werden, als auch die Brennraumkontur sowohl am Zylinderkopf als auch an der Kolbenkrone im Bereich der Teillastdüse modifiziert wurde. (s. Anl. B2 / 4)

Allerdings erreichten die Einspritzdrücke bei höherer Belastung (> 10% Leistung) die Grenzbereiche, ohne daß der Rußwert sich weiter verbesserte. Es wurden im Gegenteil gegenüber der Seriendüse sogar schlechtere Werte gemessen. Auch die Bauteiltemperaturen zeigten, daß mit einer Seitendüse ein Betrieb oberhalb von 10% Leistung nicht möglich war.

Um hier das Rußverhalten möglicherweise weiter verbessern zu können, wären noch wesentlich umfangreichere Modifikationen an Kolbenoberteilen und Zylinderköpfen nötig gewesen, wodurch sich dann aber der normale Hochlastbetrieb wahrscheinlich negativ dargestellt hätte.

Da hier einerseits der Verbesserungseffekt im gewünschten Lastbereich nicht erkennbar war, andererseits aber umfangreiche Neukonstruktionen am Motor selbst und aufwendige Änderungen am Steuer- und Regelungskonzept nötig gewesen wären, wurde das Verbesserungspotential insgesamt als sehr gering eingeschätzt.

3.3. Kraftstoff-Wasser-Emulsion (KWE)

Die steigenden Anforderungen an die Abgasemissionswerte z.B. auch im Rahmen der IMO-Bestimmungen oder Weltbank-Vorschriften machen es notwendig, verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung der NO_x-Emission zu erproben. In bestimmten Fahrgebieten (z.B. Ostsee) führt auch die Koppelung der Hafengebühren an den Emissionsausstoß der Motoren zu verstärkter Nachfrage der Kunden nach Antriebsanlagen mit nachgewiesen niedrigem Schadstoffausstoß.

Eine Möglichkeiten zur Reduzierung der NO_x-Emission stellt das Einemulgieren von Wasser in den Kraftstoff dar. Ob ein Betrieb mit einer derartigen Kraftstoff-Wasser-Emulsion (KWE) auch eine bestimmte Verbesserung der Rußemission besonders im Niedriglastbereich bewirkt, soll untersucht werden.

3.3.1. Konstante Wasserkonzentration beim Hochfahren

3.3.1.1. Zielsetzung

Hinweise einer positiven Wirkung eines KWE-Systems auf die Rußemission wurden für stationäre Lastpunkte bereits im Vorgängerprojekt CLEAN gefunden.

Darauf aufbauend sollen hier zur Absicherung zunächst die Auswirkung von KWE auf den Ruß bei verschiedenen Motortypen unter stationären Lastbedingungen vertiefend untersucht werden.

Danach soll ein Konzept für ein KWE-System für instationären Betrieb erstellt werden und das bereits vorhandene System für einen Vollmotor-Betrieb so modifiziert werden, dass dann auch instationäre Laständerungen erprobt werden können.

Das technische Problem einer Online-Messung des aktuellen Wassergehaltes als Voraussetzung für eine veränderbare Wasserdosierung bei transienten Betriebszuständen mußte gelöst und ein entsprechendes Gerät beschafft und erprobt werden.

Wenn ausreichendes Verbesserungspotential vorhanden ist, wird ein entsprechendes Regelkonzept für die Lastübergänge erstellt und erprobt.

3.3.1.2. Lösungskonzept

Die in Vorversuchen bereits erprobten einzelnen Komponenten eines KWE-Moduls werden in das Kraftstoffsystem des Versuchsmotors integriert und als Gesamtkonzept besonders auch in Hinblick auf instationären Motorbetrieb weiterentwickelt.

In diesem Zusammenhang wird ein Konzept erstellt und erprobt, das auch auf motor-relevante Steuergrößen, wie z.B. Einspritzpumpenfüllung, Einfluß nehmen soll, um einen möglichst rußfreien instationären Betrieb zu gewährleisten.

Als wichtige Meß- und Kontrollgröße ist hierbei der Wassergehalt des Kraftstoffes vor Eintritt in den Motor zu behandeln.

Mit einem derart optimierten KWE-System werden zunächst mit herkömmlicher, konventionellen Einspritzung dann auch an einem Common-Rail-Motor entsprechende Versuche zur Optimierung des instationären Betriebes erfolgen.

3.3.1.3. Aufbau eines KWE-Moduls

Eine schematische Darstellung des KWE-Systems ist in Anlage C / 1 ausgeführt. Das System ist auch für Betrieb mit Schweröl geeignet.

Dazu gehören folgende Elemente (siehe Anlage C / 1):

- Der Kraftstoff-Motorkreislauf (Boostersystem):
Hier ist das Wasser bereits in den Kraftstoff einemulgiert. Dieses Teilsystem steht unter einem Druck, der so hoch ist, dass im Betrieb mit aufgeheiztem Schweröl an keiner Stelle des Kreislaufes der entsprechende Wasserdampfdruck unterschritten wird.
- Das Kraftstoff-Feeder-System
Hier wird aus dem Tagestank der nötige Kraftstoff in der gerade vom Motor verbrauchten Menge über eine Mengenmeßeinrichtung dem Boostersystem zugeführt.
- Die Wassereindüsung ist im Feeder-System kurz vor Eintritt in den Boostersystem platziert.
- Das eigentliche KWE-Modul beinhaltet neben der Wasseraufbereitung, -dosierung, -mengenmessung, Filtern, Pumpen und Steuerventilen auch eine Kontroll- und Steuereinheit, die aus der gemessener Kraftstoff-Verbrauchsmenge und vorgegebenen Wassergehaltssollwert die aktuell notwendige Wassermenge berechnet und eindüst.

3.3.1.4. Vorversuche Wasser-Gehalts-Messeinrichtung (WGM)

Um am Motor mit zugemischtem Wasser die gleiche Leistung fahren zu können, wie mit reinem Kraftstoff ist eine Anhebung der Einspritzpumpen-Füllung nötig.

D.h., dass auch die Füllungsbegrenzungen, die bei Beschleunigungsvorgängen einen Rußstoß verhindert, entsprechend weiter freigegeben werden müssen. Diese Freigabe muß aber in Abhängigkeit von der tatsächlich, aktuell gefahrenen Wassermenge erfolgen. Würde man z.B. die Füllungsgrenzen erweitern, aber gar kein Wasser fahren, so käme es bei transientem Betrieb zu Rußstößen.

Eine entsprechende Wassergehalts-Messeinrichtung (WGM), die im Kraftstoffzulauf möglichst direkt vor Motor eingebaut ist, steuert diese Füllungserweiterung bei Betrieb mit KWE.

An einem 12V48/60 – 1135078 wurde ein WGM getestet. Bei konstanter Motorlast (75% Leistung / Generatorbetrieb) wurden sowohl im MDF- als auch im Schwerölbetrieb drei verschiedene Wasser-Kraftstoff-Verhältnisse eingestellt. Zur Kontrolle wurde bei den jeweiligen Meßpunkten Kraftstoffproben gezogen, anhand derer im Labor der Wassergehalt bestimmt wurde.

Der maximal auftretende Unterschied zwischen Analyse und WGM-Anzeige betrug ca. 2% - Punkte. (siehe Anlage C / 2) Diese Differenz ist bezogen auf die gesamte Emulsionsmenge und im Vergleich zu den Toleranzwerten der übrigen Motor-Meßgrößen durchaus akzeptabel.

Ein Problem bei dieser Vorerprobung war die Probenentnahme aus dem Boostersystem zur Analyse des Wassergehaltes im Labor. Besonders bei Schwerölbetrieb mit ca. 145 °C Kraftstoffvorlauftemperatur mußte eine spezielle Vorrichtung zur Probenentnahme dargestellt werden, um ein Ausdampfen der Emulsion zu verhindern, was dann zu falschen Analysewerten geführt hätte.

Nach weiteren Erprobungen und Versuchen, wie z.B. Standzeit, Dauerfestigkeit, Reproduzierbarkeit der Meßwerte und auch Weiterverwendung des Meßsignals, die nach Modifikationen positiv abgeschlossen werden konnten, ist das WGM für die weiteren Versuche einsetzbar gewesen.

3.3.1.5. Adaption der Prüfstände und Vorversuche zur Funktionssicherheit

Für die KWE-Versuche an den Vollmotoren wurde ein System wie oben beschrieben in Modularbauweise mit Steuerung in das vorhandene prüfstandsseitige Kraftstoffsystem eingebaut.

Aufgrund des für den KWE-Betrieb erforderlichen hohen Drucks mußte das vorhandene Kraftstoffsystem modifiziert werden. Dies betraf in erster Linie die prüfstandseitigen Förderpumpen, das Druckregelventil, die Filter, Rohrleitungen usw.

Der Wassergehalt im Kraftstoff wird durch die Steuerung des KWE-Moduls reguliert. Für die einzelnen Versuche wurden in dieser Steuerung verschiedene Wasserdosierkurven abgespeichert.

Bevor mit den eigentlichen Versuchen begonnen werden konnte, mußte die Funktion und Sicherheit des KWE-Systems in tatsächlichem Motorbetrieb unter Beweis gestellt werden.

Das Start- und Betriebsverhalten nach normaler Abstellung des Motorbetriebes und auch des Kraftstoffsystems im Schwerölbetrieb (bei ca. 145°C) mit KWE wurde getestet. Hier wurde bei Motorstillstand und laufender Förderpumpe das Kraftstoffsystem so lange unter Druck gehalten, bis die Emulsion auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt worden war. Danach konnten auch die Pumpen abgestellt werden. Nach Stillstandzeiten von 10 Std (über Nacht) bzw. 49 Std (über Wochenende) wurde das Kraftstoffsystem mit KWE normal in Betrieb genommen, d.h. Anwärmen bei zirkulierendem Kraftstoff und vorgeschriebenem Druck. Der Motor startete problemlos und zeigte im anschließenden Betrieb keine Unregelmäßigkeiten.

Bei einem sogenannten "Black-Out" d.h. der Ausfall der Versorgungsspannung wird das System wegen Stillstand der elektrisch angetriebenen Förderpumpen im betriebswarmen Zustand plötzlich drucklos. Dabei kommt es zum Entmischen und Ausdampfen der Wasseremulsion. Für solche Fälle wurde eine entsprechende Noteinrichtungen zum Aufrechterhalten eines nötigen Systemdruckes für eine bestimmte Zeit und Spüleinrichtungen mit Auffangbehältern installiert.

3.3.1.6. KWE in Verbindung mit konventioneller Einspritzung

> Vorversuche an Vollmotoren 6L48/60 und 9L32/40 (stationäre Messungen)

Nach entsprechenden Vorversuchen mit unterschiedlichen aber über den Lastbereich konstanten Zumischraten (s. Anlage C / 3 oben) wurden die weiteren Erprobungen mit 15 % Wassergehalt durchgeführt. Der Effekt einer 15 % -igen Wasserzumischung auf den Ruß im Niedriglastbereich ist in Anlage C / 3 unten dargestellt.

Zum Vergleich dazu wurden entsprechende Messungen am Motor 9L32/40 mit und ohne Wasserzumischung durchgeführt. Der Wassergehalt war mit 12 % etwas niedriger als bei den o.g. Versuchen mit 48/60. Auch hier ergab sich im unteren Leistungsbereich eine meßbare und auch sichtbare Reduzierung des Rußwertes. (siehe Anlage C / 4 oben)

In diesem Zusammenhang taucht aber das Problem auf, dass die zulässige Grenze des Einspritzdruckes im Vollastbetrieb überschritten wird, wenn ohne weitere Änderung am Einspritzsystem KWE gefahren wird. Um das zu vermeiden, muss man einen Teil des Rußgewinnes wieder "opfern" und Düsen mit größeren Spritzlochdurchmessern einbauen. Das ist in Anlage C / 4 unten dargestellt.

> Instationäre Versuche am 6L48/60 mit KWE

In den vorliegenden Untersuchungen des instationären Rußverhaltens an einem 6L48/60 Vollmotor wurden ca. 15% Wasser zugemischt. Dieser Motor war mit einem konventionellen Einspritzsystem ausgerüstet. Der Wasseranteil wurde bei diesen Versuchen über dem Lastbereich konstant gehalten.

>> Instationäre Belastung im Generator-Mode

Für diesen untersuchten instationären Belastungsvorgang wurde eine Lastaufschaltung bei konstanter Drehzahl gewählt. Dieser Vorgang entspricht der Lastaufnahme in einem Motorbetrieb zur Stromerzeugung z.B. an Bord eines Schiffes oder in einer stationären Kraftwerksanlage.

Ausgehend von einer Leistung von 5 % bei Nenndrehzahl wurde die Last entlang einer Lastrampe von 4 % der Nennlast pro Sekunde bis zu einer Leistung von 65 % angehoben. Ein derartiger Belastungsvorgang dauerte also etwa 15 Sekunden.

Dabei wurden bestimmte Betriebswerte aufgezeichnet, wie z.B. Abgas-Opazität, Einbruch der Motordrehzahl und Ladeluftdruck. Das Verhalten der Motordrehzahl während des Beschleunigungsvorganges wurde mit aufgenommen, um zu zeigen, wie der Motor auf die plötzliche Belastung reagiert. In Anlage C / 5 sind die Betriebswerte während dieses Vorgangs über der Zeit dargestellt. Erkennbar ist ein deutlich positiver Einfluß von KWE auf die Abgas-Opazität.

>> Instationäre Belastung im Combinator-Mode

Mit diesem Belastungsvorgang wird ein Schiffsbetrieb simuliert. Dabei treibt der Motor über ein Getriebe einen Propeller an, der seinerseits durch eine Verstellmöglichkeit der Steigung der einzelnen Propellerschaufel mehr oder weniger Last aufnehmen kann, auch wenn die Antriebsdrehzahl konstant bleibt. Wird andererseits die Antriebsdrehzahl erhöht und die Schaufelstellung in einer Position fest gehalten, so geschieht die Lastaufnahme entlang einer Hyperbel (Fest-Propellerkurve).

Bei modernen Schiffen sind diese beiden Belastungsvorgänge in einem sogenannten Combinator-Mode miteinander kombiniert. Es sind auf einem Schiff in der Antriebssteuerung mehrere verschiedene Modes vorbereitet, die von der Besatzung in Abhängigkeit von Fahrgebiet und Manöversituation ausgewählt werden können.

Ein typischer derartiger Combinator-Mode ist in Anlage C / 6 dargestellt. Dieser wurde dann auf dem Prüfstand mittels "MANpilot" (siehe Abschn. 2.3.3.1.) an der Wasserbremse mit dem Motor 6L48/60 reproduzierbar nachgefahren. Dabei wurde gleichzeitig Last und Drehzahl in einer vorgegebenen Abhängigkeit verstellt. In Anlage C / 6 (unteres Diagramm / unterbrochene Kurve) ist ein solcher tatsächlich gefahrener Vorgang aufgezeichnet. Die geringen Abweichungen zum theoretischen Combinator-Mode sind systembedingt, entsprechen aber auch den naturgegebenen Bordbedingungen bei denen es je nach Wellen und Wind zu teilweise noch größeren Abweichungen kommen kann.

Ausgehend von einer Drehzahl von ca. 280 rpm und etwa 5 % Leistung wird der Motor innerhalb von ca. 45 Sekunden auf eine Leistung von 60 % und 475 rpm beschleunigt.

In Anlage C / 7 sind zu diesem Vorgang die Betriebswerte des Motors aufgezeichnet. Im Gegensatz zu Anl. C / 5 (Generator-Mode) ist in diesem Diagramm an Stelle des Motordrehzahl-Einbruchs der gefahrene Drehzahlverlauf dargestellt. Auch hier, wie auch schon im Generator-Mode (s.o.) ist eine Reduzierung des Rußstoßes durch Einsatz des KWE-Systems deutlich.

3.3.1.7. KWE in Verbindung mit Common Rail (CR)

> Vorversuche am 7L16/24 CR mit KWE (stationäre Messungen)

Im Vergleich zum positiven Einsatz eines KWE-Systems in Verbindung mit einem konventionellen Einspritzsystem sollte nun KWE im Betrieb mit einem Common-Rail-System (CR) untersucht werden.

Der Motor 7L16/24 war mit einem solchen Common-Rail-System ausgerüstet. (Siehe dazu Abschnitt 3.1.2.) Die Untersuchungen erfolgten ausschließlich mit Schweröl. Bei allen Messungen wurde der Wassergehalt der KWE mit einem installierten WGM (siehe Abschnitt 3.3.1.4.) überwacht. Zusätzlich wurden Kraftstoffproben vor und nach Motor entnommen und im Labor auf Wassergehalt hin untersucht.

Der Motor zeigte bei Betrieb mit KWE kein auffälliges Verhalten und lief stabil.

Wie bereits in Abschnitt 3.1.2.3. wurde auch hier der Einfluß des Raildruckes auf den Rußwert ermittelt. Dabei wurde der Einspritzbeginn wiederum so variiert, daß sich eine konstante NO_x-Emission einstellte. Die Ergebnisse dieses Versuches sind in Anlage C / 8 (oben) dargestellt. Im Betrieb mit KWE liegt bei etwa 800 bar Raildruck ein Optimum im Rußwert.

Auffallend ist, dass im Gegensatz zur konventionellen Einspritzung das CR mit KWE schlechtere Rußwerte liefert als ohne KWE. Dies hängt mit der Ausführung des hier untersuchten CR-Systems zusammen. Für eine Verbesserung der KWE-Wirkung wäre eine Weiterentwicklung des CR-Systems bzw. von Motor-komponenten erforderlich gewesen.

Auch in der Darstellung von stationären Rußwertmessungen über der Motorleistung (siehe Anlage C / 8 unten) zeigt sich, dass besonders zur Teillast hin die Rußemission mit KWE schlechter wird.

Die NO_x-Emission wird dagegen vergleichbar mit einer konventionellen Einspritzung auch hier durch Einsatz von KWE geringer.

> Instationäre Versuche am 7L16/24 CR mit KWE

Im Anschluß an die o.g. stationären Messungen wurde nun der Einfluß des KWE in Verbindung mit CR bei instationären Vorgängen untersucht.

Für diesen Versuch wurde wiederum entsprechend o.g. Generator-Mode belastet. Da der Motor vom Typ her kleiner ist, ändern sich aber gegenüber dem 6L48/60 (s.o.) die charakteristischen Parameter für den Beschleunigungsvorgang.

Ausgehend von Leerlauf bei Nenndrehzahl (1200 rpm) wurde 50% Last innerhalb von etwa 0,5 Sekunden aufgeschaltet. Derartige Belastungsvorgänge entsprechen dem Serieneinsatz.

In Anlage C / 9 wurden zu diesem Vorgang die Abgas-Opazität, der Einbruch der Motordrehzahl während der Lastaufschaltung und der Ladedruckverlauf über der Zeitachse aufgezeichnet. Wie bereits bei den statischen Messungen wird auch hier durch das KWE die Rußemission ungünstiger.

3.3.1.8. Abschließende Bewertung von KWE mit konstantem Wassergehalt

Das KWE-System, das ursprünglich für die Reduzierung der NO_x-Emission entwickelt wurde, zeigt in Verbindung mit einem konventionellen Einspritzsystem im Niedriglastbetrieb auch eine bestimmte Rußwertverbesserung.

Im KWE-Betrieb ist es u.U. nötig, die Spritzlochdurchmesser der Einspritzdüsen zu vergrößern, damit der Einspritzdruck wegen des größeren Fördervolumens bei Vollast nicht die vorgegebenen Grenzen überschreitet. Hierdurch wird im Niedriglastbetrieb die Rußwertverbesserung durch KWE gegenüber einem Betrieb mit reinem Kraftstoff und kleineren Düsenspritzlöchern deutlich verringert.

Auch das transiente Rußverhalten (Rußstoß) wird in Verbindung mit einem konventionellen Einspritzsystem durch KWE günstiger.

KWE in Verbindung mit Common-Rail zeigt jedoch bei dem in diesem Versuch benutzten System und mit den dabei gefahrenen Parametern keine Verbesserung. Durch eine Weiterentwicklung des CR-Systems könnte hier evtl. der KWE-Einfluß auf die Rußwerte günstiger werden.

Aus den vorgenannten Gründen erscheint beim Vergleich des technischen Aufwands zur Rußverbesserung bei instationären Vorgängen der Einsatz eines KWE-Systems nicht gerechtfertigt, wenn außer einer Reduzierung des Rußstoßes nicht noch weitere Features, wie z.B. NOx-Reduzierung gefordert sind.

3.3.2. Variable Wasserkonzentration beim Hochfahren

3.3.2.1. Zielsetzung

Nach dem instationären Betrieb mit konstantem Wassergehalt (siehe Abschn. 3.3.1.) soll die Erprobung mit einem während einer transienten Laständerung gleichzeitig veränderlichem Wassergehalt fortgesetzt werden.

Bei den Versuchen aus Abschnitt 3.3.1. wurde der prozentuale Wasseranteil am eingespritzten Kraftstoff konstant gehalten.

Darauf aufbauend soll in diesem Abschnitt untersucht werden, ob es noch zusätzliche Rußstoß-Verbesserung bringt, den Wassergehalt während der Beschleunigungsvorgänge zu variieren.

3.3.2.2. Lösungskonzept

Das im Abschnitt 3.3.1.3. beschriebene System, das sich mittlerweile im Motorbetrieb als zuverlässig bewährt hat, soll für diese Versuche übernommen werden.

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.3.1.4. erläuterten Wasser-Gehalts-Messeinrichtung (WGM) sollte zunächst bei verschiedenen Motorbetriebszuständen die Regelbarkeit des Wassergehaltes ermittelt werden.

3.3.2.3. Regelung eines gewünschten Wassergehaltes bei transienten Motorzuständen

Die Einhaltung eines gewünschten Wassergehaltes bei instationären Motorfahrzeugzuständen ist eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines KWE-Moduls.

Hierzu wurden am Vollmotor die entsprechenden Betriebsdaten (Motordrehzahl, Bremslast, Wassermenge und Anzeige WGM) während eines Wechsellastlaufes aufgezeichnet. Während der Lastwechsel sollte in diesem Fall ein Wassergehalt von 10% möglichst konstant gehalten werden.

Bei dem untersuchten Fahrbetrieb wurde sowohl Motordrehzahl (von ca. 285 auf 465 rpm) als auch die Leistung von ca. 5 % auf 60 % entlang des in Anlage C / 6 beschriebenen Kombinator-Modes innerhalb von jeweils 45 sec auf- bzw. abgeregelt.

In Anlage C / 10 wurden die beim einem Lastzyklus aufgezeichneten Meßgrößen dargestellt.

Das KWE-Modul kann in der erprobten Ausführung die Aufgabe, den Wassergehalt konstant zu regeln, gut erfüllen. Die Schwankungen des Wassergehaltes bewegen sich zwischen 9,5 und 11,5 %. (dabei Einstellwertwert 10 %)

3.3.2.4. Verstellgeschwindigkeit des Wassergehaltes bei konstantem Motorbetrieb

Mit dem selben Motor und Prüfstand wurde in einem zweiten Schritt erprobt, welche Zeitspannen nötig sind, um gewünschte Änderungen in der Wasserkonzentration im Kraftstoffsystem direkt vor Motor zu erreichen.

Untersucht wurde beispielhaft eine gewünschte Wassergehaltsänderung von 0 % auf 10 % und wieder zurück auf 0 %.

Der Motor wurde dabei nach dem Hochfahren mit ca. 35 % Leistung bei konstanter Drehzahl (514 rpm) betrieben. Neben der aktuellen Motordrehzahl und der Bremslast wurde die mit der Dosiereinheit in den Kraftstoff eingedüste Wassermenge und der tatsächlich mittels WGM vor Motor gemessene Wassergehalt aufgezeichnet.

Das Ergebnis ist in Anlage C / 11 dargestellt. Die dem Kraftstoffsystem entsprechend der Verbrauchsmenge des Motors zugeführte Kraftstoffmenge wird ziemlich rasch mit der nötigen Wassermenge angereichert. Bis sich dadurch aber das Boostersystem auf die gewünschte Emulsion einstellt, vergehen mehrere Minuten. Sowohl beim Einfahren als auch beim Ausfahren dauert es etwa 20 bis 30 Minuten, bis vom WGM direkt vor Motor der Wassergehalt von 10 % bzw. etwa 0 % gemessen wird.

3.3.2.5. Abschließende Bewertung von KWE mit variablem Wassergehalt

Bei dem vorliegenden Konzept des KWE-Systems wird die nötige Wassermenge dem Feederkreislauf zugesetzt. Die Wasserkonzentration kann im Boostersystem auch bei größeren und schnellen Leistungsschwankungen mit ausreichender Genauigkeit gut auf dem gewünschten Sollwert gehalten werden.

Dagegen dauert aber eine Änderung der Wasserkonzentration im Boosterkreis deutlich länger (ca. 25 min), als für eine Einflußnahme auf die schnellen instationären Beschleunigungsvorgänge am Motor (15 sec bzw. 45 sec) nötig wäre.

Eine Änderung des Wassergehaltes des Kraftstoff-Feedersystems wirkt sich im Boosterkreis deswegen so langsam aus, weil die umlaufende Menge im Schwerölbetrieb ca. 2 bis 3 mal so groß ist, wie die bei Vollast vom Motor verbrauchte Menge. Die Motor-Umlaufmenge wird auch bei niedrigeren Leistungen konstant gehalten, so dass das Verhältnis Umlauf- zu Feedermenge im Teillastbetrieb noch ungünstiger wird.

Eine während der kurzen Beschleunigungszeiten des Motors veränderliche Wasserkonzentration im Kraftstoff ist somit nicht darstellbar.

3.4. Verbesserte Luftversorgung mit Zusatzluft

Eine Optimierung der Brennvorgänge im Zylinder und damit eine Reduzierung der Emission u.a. von Rußpartikeln wird auch durch die Anpassung des Parameters "Luftversorgung" erreicht.

Die Aufladung eines Dieselmotors kann nur in einem teilweise eng begrenzten Betriebsbereich mit dem optimalen Wirkungsgrad des zugehörigen Turboladers gefahren werden. Außerhalb dieses Bereiches, vor allem im Teillastbetrieb müssen zusätzliche Einrichtungen dieses Defizit auffangen.

Hierzu wurden bereits im Vorgängervorhaben CLEAN die Wirksamkeiten von einzelnen Hilfs-Maßnahmen bzgl. Luftversorgung mit Zusatzluft, wie Jet-Assist, Hilfsluft usw. bei stationären Motorbetriebszuständen dargestellt.

Trotz eines vorher optimierten stationären Betriebszustandes kann es bei instationären Belastungsvorgängen durch z.B. eine zeitverzögerte Reaktion der o.g. Maßnahmen zu zwar zeitlich begrenzten aber deutlich sichtbaren "Rußstößen" kommen.

Für diese o.g. Einrichtungen sollen hier nun die Verbesserungspotentiale während instationärer Belastungsvorgänge untersucht werden. Es sollen dafür auch die Steuergrößen für die Zu- bzw. Abschaltung dieser Einrichtungen zum Erreichen einer optimalen Wirkung ermittelt werden.

3.4.1. Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet Assist)

3.4.1.1. Lösungskonzept

"Jet-Assist" ist das Einblasen von Preßluft, meist aus den in der Anlage vorhandenen Anlaßluftflaschen, durch in das Verdichtergehäuse des Turboladers eingebrachte Düsenlöcher direkt auf die Verdichterradschaufeln, so dass auch die kinetische Energie ausgenutzt werden kann. Ein Funktionsschema ist in Anlage D1 / 1 dargestellt.

Durch Öffnen eines Magnetventils wird die Leitung von der mit ca. 30 bar gefüllten Startluftflasche zum Turbolader freigegeben. Über eine Blende wird der Druck auf den gewünschten Wert reduziert. Die Luft strömt durch eine Rückschlagklappe in einen Ringkanal des Verdichtergehäuses. Die Düsenbohrungen aus diesem Ringkanal sind so angeordnet, dass der Luftstrom fast senkrecht auf die Verdichterschaufeln trifft. Somit gelangt die zusätzliche Luft nicht nur in den Ansaugtrakt des Motors sondern erzeugt auch noch einen entsprechenden Impuls auf das Verdichterrad, so dass der Turbolader entsprechend beschleunigt wird.

Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen dargestellt, die nötig waren, um die Wirkung dieses Jet-Assist für den instationären Betrieb zu optimieren.

Um hier ein möglichst umfassendes Ergebnis zu erhalten, wurden die Versuche an drei verschiedenen Motortypen mit den jeweils zugehörigen Turboladern durchgeführt:

Motor 1: 7L 16/24 CR mit Turbolader des Typs NR15 / R 210

Motor 2: 8L 27/38 mit Turbolader des Typs NR 24 / S 040

Motor 3: 6L 48/60 mit Turbolader des Typs NA 40 / SM 1035

Um die Effekte deutlicher erkennbar zu machen, wurden bewußt teilweise extrem ungünstige Randbedingungen realisiert. Die Motorausführungen entsprachen somit nicht den jeweiligen Serienzuständen.

3.4.1.2. Versuche am Vollmotor 7L16/24 CR

Als Versuchsträger stand ein 7L16/24 CR in Genset-Ausführung zur Verfügung, d.h. der Motor war mit einem Generator zur Stromerzeugung gekoppelt. Somit konnten plötzliche Lastaufschaltungen dargestellt werden, wie sie bei Kraftwerksanlagen, Schiffsanlagen mit dieselektrischen Antrieben oder Generatorsätzen im Schiff gefahren werden.

Der Motor war für diese Versuche mit einem Common-Rail-Einspritzsystem ausgerüstet.

> Lastaufschaltung mit und ohne Jet-Assist

Für diese Versuche wurde der Motor bei Nenndrehzahl (1200 rpm) ausgehend von Leerlauf in einer dreistufigen Aufschaltung mit jeweils ca. 33 % Last beaufschlagt.

Dadurch wird der Motor in seiner Drehzahl kurzzeitig abgedrückt. Wie gut der Motor in Verbindung mit Aufladung, Einspritzung usw. auf instationäre Vorgänge reagieren kann, zeigt sich in der Größe und Dauer dieses Drehzahleinbruchs.

Wie in Anlage D1 / 2 dargestellt kann durch den Einsatz des Jet-Assist der Rußstoß besonders bei der ersten Lastaufschaltstufe deutlich reduziert werden. Auch der Drehzahleinbruch wird verringert.

Für den optischen Eindruck eines Rußstoßes ist nicht nur die Höhe der maximal erreichten Opazität maßgeblich, sondern auch deren zeitliche Erstreckung. So kann z.B. ein hoher aber sehr kurzzeitig auftretender Rußwert weniger störend wirken, da er sich möglicherweise in der Umgebungsluft rascher auflöst.

> Anlassen mit und ohne Jet-Assist

Der Motor 7L16/24 CR wird mit einem separaten Luftmotor, der über das Törnrad die Kurbelwelle antreibt, angelassen. Da hier nicht wie bei größeren Motortypen die Anlaßluft direkt in den Zylinder eingeblasen wird, ist der Motorstart mit einem Rußstoß verbunden.

Wird dem Motor durch Jet-Assist während der Startphase zusätzlich Luft zugeführt, so kann die Abgastrübung deutlich reduziert werden (siehe Anlage D1 / 3). Der während des Motorstarts normalerweise auftretende Abfall im Ladedruck wird durch den Einsatz von Jet-Assist beseitigt. Jet-Assist bewirkt auch ein Schnelleres Hochlaufen des Motors auf Solldrehzahl.

> Variation des Jet-Druckes

Bei den vorhergegangenen Versuchen wurde jeweils mit einem Jet-Assist-Druck von etwa 2,5 bar gearbeitet. Es wurde nun untersucht, in wie weit mit einer Erhöhung dieses Druckes weitere Verbesserungen der instationären Abgastrübung erreicht werden können.

Bei diesen Untersuchungen wurde der Motor ausgehend vom konstanten Betrieb bei etwa 50 % Leistung schlagartig auf 100 % belastet. Dabei war jedesmal Jet-Assist im Einsatz, wobei einmal mit den o.g. 2,5 bar und im zweiten Fall mit etwa 4 bar Luftdruck gearbeitet wurde.

Mit dem höheren Druck konnte, wie in Anlage D1 / 4 dargestellt, der Rußstoß reduziert werden. Auf den Drehzahleinbruch hat der Jet-Assist-Druck dagegen nur geringen Einfluß.

Dieser Ruß-Verbesserung steht allerdings der größere Energiebedarf für die Bereitstellung der Jet-Assist-Luft gegenüber (Höherer Druck und größerer Luftverbrauch). Hier müssen gesonderte Wirtschaftlichkeitsüberlegungen angestellt werden. Die weiteren Messungen wurden wieder mit etwa 2,5 bar Jet-Assist-Druck durchgeführt.

> Variation der Startzeit des Jet-Assist

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde der Jet-Assist automatisch über die Motorsteuerung gestartet. Steuerparameter war dabei ein vorher definiertes Maß an Drehzahleinbruch mit gleichzeitigem Füllungsanstieg. D. h. der Jet-Assist reagierte mit entsprechender systembedingter Verzögerung (in diesem Fall ca. 0,5 sec) auf einen bereits laufenden transienten Motorbetriebsvorgang.

Im Folgenden sollte ermittelt werden, ob durch einen präventiven Einsatz des Jet-Assist eine Verbesserung des Rußstoßes beim Belasten erreicht werden kann.

Der Motor wurde in diesem Fall ausgehend von Leerlauf schlagartig auf 50 % belastet. Im Vergleich zu der o.g. motoreigenen Ansteuerung (Fall 1) wurde der Jet-Assist 1,5 sec (Fall 2) bzw. 3 sec (Fall 3) vor dem Belastungsvorgang gestartet. Um diese Vorlaufzeit für den Jet-Assist realisieren zu können, wird das Steuersignal zur Lastaufschaltung im Power-Management kurzzeitig verzögert an den Motorregler weitergegeben. Das Jet-Assist-Ende lag in den beiden letzten Fällen konstant bei 2 sec nach Lastaufschaltung.

Die Reduzierung des Rußstoßes ist in Anlage D1 / 5 dargestellt. Ein um 1,5 sec vorgezogener Jet-Assist-Start (Fall 2) bringt eine erkennbare Verbesserung. Ein noch früherer Beginn (Fall 3) führt kaum noch zu weiterer Rußreduzierung.

Auch der Einbruch der Motordrehzahl kann durch eine zeitliche Optimierung des Jet-Assist verbessert werden.

Es ist also tatsächlich sinnvoll den Start des Jet-Assist nicht als Reaktion auf beschleunigungsbedingte Änderungen der Motorbetriebswerte auszulösen, sondern durch einen gezielten aktiven Steuerimpuls, der bereits durch die Anforderung einer Motor-Laständerung erzeugt wird.

3.4.1.3. Versuche am Vollmotor 8L27/38

Der Versuchsträger 8L 27/38 war ebenfalls mit einem Generator zur Stromerzeugung gekoppelt. Auch bei diesen Versuchen konnten damit plötzliche Lastaufschaltungen dargestellt werden.

> Lastaufschaltung mit und ohne Jet-Assist

Für diese Untersuchung wurde der Motor ausgehend von Leerlauf bei Nenn-drehzahl mit einer Last von ca. 50 % plötzlich beaufschlagt, wobei der Regler versucht den Motor auf konstanter Drehzahl zu halten. Der Jet-Assist-Druck wurde bei diesen Untersuchungen auf ca. 4 bar eingestellt.

Durch den Einsatz von Jet-Assist läßt sich bei dieser Motorausrüstung der Rußstoß zwar nicht im Maximalwert aber deutlich in der zeitlichen Erstreckung reduzieren. Damit wird auch der optische Eindruck maßgeblich verbessert. Auch der Drehzahleinbruch wird mit Jet-Assist günstiger. (siehe Anlage D1 / 6).

> Variation des Jet-Assist-Druckes

Bei der gleichen Lastaufschaltungsart wie oben (0 % > 50 %) wurde nun der Jet-Assist-Druck variiert. Zusätzlich zu der oben dargestellten Messung mit ca. 4,0 bar (Fall 1) wurde der Effekt bei ca. 5,0 bar (Fall 2) und 7,0 bar (Fall 3) untersucht.

Die Ergebnis-Darstellung in Anlage D1 / 7 bestätigt, dass mit zunehmendem Druck, wie erwartet, der Drehzahleinbruch und die Ausregelzeit geringer werden. Auch beim Rußstoß ist eine Reduzierung erkennbar. Er erreicht zwar in allen drei Fällen einen ähnlichen Maximalwert aber die zeitliche Erstreckung wird weniger.

Mit steigendem Jet-Assist-Druck steigt auch der Luftdurchsatz. Da der Motor aber mit zunehmendem Druck durch die schnellere Ausregelzeit früher wieder die Nenn-drehzahl erreichte, wurde der Jet-Assist entsprechend früher beendet. Dadurch wurde ein Teil des Luft-Mehrverbrauches kompensiert. Es bleibt beim hohen Jet-Assist-Druck (Fall 3) gegenüber dem Druck von 4,0 bar (Fall 1) ein Mehrverbrauch von ca. 7 % übrig.

> Geometrie-Variation der Jet-Assist-Bohrungen

Von der Bauteilfestigkeit des Turboladergehäuses her sind einer Drucksteigerung bestimmte Grenzen gesetzt. Eine andere Möglichkeit den Jet-Assist-Effekt zu verbessern ohne den Luftdruck erhöhen zu müssen, ist eine Vergrößerung der Jet-Bohrungsdurchmesser (Siehe Anlage D1 / 1; Pos. 6). Der Einfluß dieser Durchmesser soll im Folgenden untersucht werden.

Dazu wurden die bisher verwendeten Lochdurchmesser soweit aufgebohrt, dass sich der Gesamtquerschnitt der Löcher um 50 % vergrößerte. Der Jet-Assist-Druck wurde dabei auf 5,0 bar eingestellt.

In Anlage D1 / 8 ist die Wirkung beider Bohrungs-Durchmesser bei gleicher Lastaufschaltung wie bisher (Leerlauf > 50 %) gegenübergestellt.

Das Ergebnis ist ähnlich dem Effekt mit der Anhebung des Jet-Assist-Druckes (siehe oben). Der Drehzahleinbruch und die Ausregelzeit gehen zurück. Der Rußstoß wird reduziert durch eine Verkürzung der Zeitdauer.

Da die Drehzahl-Ausregelzeit kürzer ist, wird der durch die Vergrößerung der Bohrungen bedingte höhere Luftdurchsatz wiederum bis auf einen Rest von 7 % kompensiert,.

3.4.1.4. Versuche am Vollmotor 6L48/60

Der Versuchsträger 6L 48/60 war nicht wie die beiden Vorgänger mit einem Generator gekuppelt, sondern wurde an einer Wasserbremse gefahren.

Damit konnten Beschleunigungsvorgänge wie im Schiffsbetrieb simuliert werden, bei dem der Motor über ein Getriebe mit einem Verstellpropeller gekoppelt ist. In Abhängigkeit von der Motordrehzahl nimmt dabei der Propeller eine entsprechende Last auf. Da der Propeller meist mit einer Steigungsverstellung der Blätter ausgerüstet ist, kann diese Zuordnung von Motordrehzahl zur Lastaufnahme (= Kombinatorkurve) variiert werden. Eine typische derartige Kombinatorkurve ist in Anlage C / 6 dargestellt. Der Versuchsmotor wurde auch bei den folgenden instationären Untersuchungen nach dieser Kurve gefahren.

Um den Einfluß der Turboladerausführung auf die Wirkungsweise des Jet-Assist ermitteln zu können, wurden die Versuche mit drei verschiedenen Düsenringquerschnitten durchgeführt. Dabei wurde mit einem "mittleren" Querschnitt, einem um ca. 17 % kleineren und einem um ca. 15 % größeren gefahren.

> Lastaufschaltung mit und ohne Jet-Assist

Für diese Untersuchung wurde der Motor innerhalb von ca. 45 sec entsprechend der o.g. Kombinatorkurve von 5 % auf 60 % Leistung beschleunigt.

In Anlage D1 / 9 wurden die dabei gemessenen Werte der Auspuff-Opazität, Motordrehzahl und Ladedruck über der Zeitachse dargestellt. Deutlich ist der positive Einfluß des Jet-Assist erkennbar. Der Ladedruck wird durch den Jet-Assist erkennbar angehoben, wodurch dann der Rußstoß entscheidend verringert wird.

Auch hierbei ist für den optischen Eindruck die absolute Höhe des Opazitätswertes nicht allein ausschlaggebend. Zur Verdeutlichung dieses subjektiven Eindruckes wurden beispielhaft für die beiden o.g. Opazitätskurven (mit und ohne Jet-Assist) jeweils eine zugehörige Bildfolge in zeitlicher Abfolge in der Anlage D1 / 10 beigefügt.

Die Untersuchungen an diesem Versuchsträger wurden mit drei verschiedenen Düsenringquerschnitten durchgeführt. Wie aus Anlage D1 / 11 ersichtlich, konnte durch den Einsatz eines Jet-Assist bei allen Varianten der Rußwert reduziert werden. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden in dieser Anlage nur die jeweils maximale Opazitäten in Balkenform gegenübergestellt. Weiterhin ist aus dieser Darstellung erkennbar, dass mit kleiner werdendem Querschnitt der Opazitätswert abnimmt. Diese Aussage gilt aber nur für die hier untersuchten Querschnitte.

> Variation der Steuerzeit des Jet-Assist

Angesteuert wird der Jet-Assist bei Drehzahleinbruch und gleichzeitigem Füllungsanstieg, wie er durch schnelle Lastanforderung im Motorbetrieb hervorgerufen wird.

Bei einer Belastung des Motors innerhalb von ca. 15 sec von 2 % auf ca. 65 % Leistung mit konstant gehaltener Drehzahl wurden die Ansteuerzeiten für den Jet-Assist so justiert, dass überhaupt keine Opazitätszunahme während dieses Vorgangs gemessen werden konnte. Die Jet-Dauer betrug dabei ca. 9 sec. in Verbindung mit einem recht hohen Luftverbrauch.

Es galt nun zu untersuchen, wie weit die Jet-Dauer reduziert werden kann, ohne dass sich der Rußstoß subjektiv verschlechtert. Das Ergebnis ist in Anlage D1 / 12 dargestellt. Der Jet-Assist wurde etwa 2 sec später gestartet und die Dauer wurde auf etwa 4 sec reduziert. Im Drehzahlverlauf ist kein Unterschied erkennbar. Der Opazitätswert ist zunächst leicht angestiegen, blieb aber unter der Grenze von 20 %. Auch war bei subjektiver Beobachtung des Schornsteines kein Rußstoß erkennbar. Der Luftverbrauch konnte aber durch diese Maßnahme deutlich (um ca. 60 %) reduziert werden.

3.4.2. Zusatzluft im Bereich Verdichter (Hilfsluftgebläse)

Bereits im Vorgängervorhaben CLEAN wurde als Alternative zum Jet-Assist ein Hilfsgebläse vorgestellt. Damals wurde die positive Wirkung während stationär gefahrener Teillastpunkte gezeigt. Hier wird nun die Wirkungsweise während instationärer Vorgänge untersucht.

Die Lufteinblasung geschieht dabei mittels separatem Roots-Gebläse direkt vor Ladeluftkühler bis zu einem maximalen Gegendruck von ca. 0,8 bar. Der Vorteil dieser Lösung liegt darin, daß das System unabhängig vom Motor betrieben werden kann. Zudem wird der Jet-Assist aus dem Anlaßluftsystem gespeist, wozu dieses System dann entsprechend des Luftmeherverbrauches größer ausgelegt werden muß. D.h. es treten nicht unerhebliche Mehrkosten für Luftflaschen, Kompressoren, Rohrleitungen usw. auf. Dies besonders auch deswegen, weil das Anlaßluftsystem für 30 bar ausgelegt sein muß.

Nach Durchführung der Untersuchungen mit einem derartigen Hilfsluftsystems am Versuchsmotor 6L48/60 – 1130086 auf dem Prüfstand wurde eine derartige Einrichtung an Bord eines Schiffes zur Darstellung der Machbarkeit installiert. Die Anlage D1 / 13 zeigt diese Installation an Bord, um einen Eindruck zu vermitteln.

Anmerkung: Die Kosten für diese Schiffsinstallation sowie die dafür nötigen Einstellungs- und Erprobungsarbeiten an Bord wurden nicht auf das Clean II - Vorhaben verbucht, sondern gingen ausschließlich zu Lasten MAN-B&W-Diesel AG Augsburg

Die Wirkungsweise eines derartigen Hilfsluftsystem zeigt Anlage D1 / 14. Der Versuchsträger 6L48/60 – 1130086 wurde dabei mit konstant gehaltener Drehzahl innerhalb von etwa 15 sec. von 5 % zu 60 % Leistung hochgefahren. Zu Beginn der dargestellten Messung läuft das Gebläse bereits und wird während des Beschleunigungsvorgangs bei Erreichen von etwa 0,9 bar Ladeluft-Überdruck (das entspricht ca. 30% Leistung) abgeschaltet. Deutlich ist die Reduzierung des Rußstoßes und des Drehzahleinbruches durch die eingeblasene Hilfsluft erkennbar. Während des gesamten Betriebes des Hilfsluftgebläses wurde bei diesen Versuchen die Umblaseklappe (siehe dazu Vorgängervorhaben CLEAN) geöffnet. Durch das Gebläse wurde auch im untersten Betriebsbereich ein positives Spüldruckgefälle erzeugt.

3.4.3. Zusatzluft direkt in den Zylinder

3.4.3.1. Lösungskonzept

Als dritte Möglichkeit die Luftversorgung mittels Zusatzluft zu verbessern erschien eine direkte Lufteinblasung in die Zylinder untersuchenswert. Dabei konnte hardwaremäßig auf ein erprobtes System, das Anlaßsystem zurückgegriffen werden.

Hierzu mußte eine entsprechende Steuerung entwickelt und getestet werden. Das Anlaßventil soll kurz vor Schließen des Einlaßventils geöffnet und kurz bevor der Kompressionsdruck im Zylinder 30 bar erreicht wieder geschlossen werden. Im benutzen Anlaßsystem steht die Luft unter diesem Druck zur Verfügung. Zwischen diesen beiden Schaltpunkten stehen ca. 120 °KW zum Einbringen der Zusatzluft bereit.

Die Öffnungsdauer und damit die eingeblasene Luftmenge muss so gewählt werden, dass der aus der nachfolgenden Verbrennung resultierende Zünddruck den maximal zulässigen Wert nicht überschreitet.

3.4.3.2. Vorversuche zur Darstellung der Steuerung

Für die Versuche sollte nach Möglichkeit das am Motor vorhandene serienmäßige Anlaßsystem benutzt werden.

Die einzelnen Komponenten eines Anlaßventils und der zugehörigen Steuerung wurden zunächst auf einem separaten Prüfstand erprobt und optimiert.

Eine Realisierung der Ansteuerung des Anlaßventils mittels der vorhandenen serienmäßigen, pneumatischen Staudrucksteuerschieber war nicht möglich, da zwar der Öffnungsvorgang präzise funktionierte aber der Schließvorgang bei höheren Motordrehzahlen extrem verzögert wurde. Grund dafür war die zur Entlüftung der Steuerventile nötige Totzeit.

Für Versuche an o.g. Motor wurde das Anlaßventil herkömmlich pneumatisch angesteuert, wobei aber der Luftdruck nicht durch ein Staudruckventil sondern durch ein elektrisch angesteuertes Magnetventil geschaltet wird, das zur Vermeidung von weiteren Totzeiten direkt auf das Anlaßventil im Zylinderkopf gesetzt wurde.

3.4.3.3. Versuche am Vollmotor 6L 32/40

Für die Erprobung der direkten Lufteinblasung stand der Versuchsträger 6L32/40 – 1063080 zur Verfügung. Auch hier wurde der Motor entsprechend ungünstig ausgerüstet, um einen Rußstoß ohne Hilfsmaßnahmen deutlich werden zu lassen.

Nach entsprechenden Vorerprobungen und Justierarbeiten wurde ein Vergleich gefahren ohne Hilfsmaßnahmen, mit Jet-Assist und mit direkter Lufteinblasung. Das Ergebnis ist in Anlage D1 / 15 dargestellt. In diesem Versuch wurde der Motor bei konstanter Drehzahl innerhalb von ca. 10 sec von 5 % auf 35 % Leistung belastet. Im Vergleich zum Jet-Assist bringt die direkte Einblasung bzgl. des Rußstoßes eine Verbesserung und eine mittlere Luftmengeneinsparung von ca. 17 %.

Bei Beschleunigung des Motors nach Kombinatorikurve ist der Effekt nicht ganz so deutlich. (siehe Anlage D1 / 16) Gegenüber der Variante ohne Maßnahmen zeigt die direkte Lufteinblasung eine Verbesserung ist aber geringfügig schlechter als bei Jet-Assist. Der Luftverbrauch ist bei beiden Maßnahmen nahezu gleich.

3.4.4. Abschließende Bewertung einer verbesserten Luftzufuhr

Die Versuche haben gezeigt, dass durch einen Einsatz von Jet-Assist die Abgastrübung und auch der Drehzahleinbruch beim Instationärbetrieb deutlich gesenkt werden können.

Beim Motorstart mit Luftmotor wird der Rußstoß durch Jet-Assist ebenfalls erheblich reduziert. Bei Motoren mit Anlaßlufteinblasung direkt in die Zylinder entsteht beim Starten selbst kaum ein Rußstoß, wenn die Startfüllungsbegrenzung ordnungsgemäß justiert ist. Es handelt sich dabei ja bereits um eine Zusatzluft-Einbringung direkt in den Zylinder. Eine Ausnahme stellen hier evtl. V-Motoren dar, wenn sie nur auf einer Reihe mit Anlassventilen ausgerüstet sind und zwei Turbolader mit getrennten Abgassammelleitungen besitzen. Für diese Motoren ist es sinnvoll, durch Jet-Assist beim Starten den Turbolader auf der Reihe ohne Anlassventile zu beschleunigen.

Der Jet-Assist-Effekt muß durch entsprechende Anpassungsarbeiten und Parametrierungen optimiert werden. (z.B. Modifikation der Jet-Bohrungen, Jet-Luftdruck, Steuerungszeiten usw.). Wie die hier vorliegenden Untersuchungen an verschiedenen Motoren im Vergleich zeigen, können diese Optimierungsarbeiten nur bedingt von einem auf einen anderen Motortyp übertragen werden. Ein möglichst guter Effekt des Jet-Assist wird nur erreicht, wenn die Parameter an der fertig installierten Anlage zu den dort nötigen Betriebsbedingungen justiert werden.

Durch ein "Hilfsgebläse" läßt sich der Rußstoß bei instationären Belastungsvorgängen deutlich reduzieren. Hier ist der Installationsaufwand allerdings deutlich höher. Für spezielle Anwendungen, wie z.B. Schiffe, mit längerem Niedriglastbetrieb (unter ca. 20% der Nennlast) oder gar längerem Leerlauf, ist evtl. der Aufwand zu rechtfertigen.

Mit einer direkten Lufteinblasung in den Zylinder können ähnliche Verbesserungen wie beim Jet-Assist dargestellt werden. Der Vorteil einer direkten Lufteinblasung besteht darin, dass bereits beim ersten Arbeitsspiel nach Start des Systems die eingeblasene Luftmasse komplett zur Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffes zur Verfügung steht.

Welches der Systeme sinnvoll eingesetzt werden soll, muss je nach Anwendung und Anforderung entschieden werden. Zu beachten ist dabei, dass jedes System im Verbund mit anderen Maßnahmen und auch in Bezug auf Motortyp, Zylinderzahl, Manövermode usw. speziell zu parametrisieren ist, um eine optimale Wirkung zu erzielen.

3.5. Verbesserte Luftversorgung mit veränderter Turbolader-Charakteristik

Im vorherigen Abschnitt 3.4. wurde bereits die Problematik "Verbesserte Luftversorgung" behandelt, wobei dort das Thema: "Einbringung von Zusatzluft" untersucht wurde.

In Weiterführung des Themas wird im vorliegenden Abschnitt nun die Möglichkeit zur Optimierung der Turbolader-Charakteristik selbst untersucht.

Bereits im Vorgängervorhaben CLEAN wurde die Wirksamkeit eines speziell auf Teillast-Betrieb hin angepassten Abgas-Turboladers dargestellt. Allerdings wurde damals nur das stationäre Betriebsverhalten untersucht.

Im Folgenden wird das Verbesserungspotential verschiedener Turbolader-Ausführungen speziell in Bezug auf das instationäre Rußverhalten ermittelt. Dafür wurden drei Variationmöglichkeiten erprobt:

- Ein speziell für Teillastbetrieb spezifizierter Turbolader
- Variationen des Düsenrings eines sonst unveränderten Turboladers
- Ein "verstellbarer Düsenring" (VTA)

Um die Rußstoß-Effekte deutlicher erkennbar zu machen, wurden bewußt teilweise extrem ungünstige Randbedingungen realisiert. Die Motorausführungen entsprachen somit nicht den jeweiligen Serienzuständen.

3.5.1. Teillast-Turbolader

Bereits bei CLEAN wurde beschrieben, dass die Dieselmotoren und Turbolader im Allgemeinen passend für den Vollastpunkt zueinander optimiert werden. Das hat zur Folge, dass im Teillastbereich die Kennfelder von Motor und Turbolader auseinanderlaufen, und der Turbolader im Wirkungsgrad deutlich abfällt.

Eine Abhilfe ist ein speziell für den niedrigen Leistungsbereich ausgelegter Turbolader, mit dem eine deutliche Rußverbesserung bei stationärem Betrieb erreicht werden konnte. Dies wurde schon bei CLEAN dargestellt. Hier wird nun untersucht, wie sich ein derartiger Turbolader im Beschleunigungsbetrieb verhält.

3.5.1.1. Vorversuche (stationär) am Vollmotor 6L 32/40

Für diese Versuche stand der Motor 6L 32/40 – 1063080 mit konventioneller Einspritzung zur Verfügung. Der Ausgangs-Turbolader war ein Radiallader mit der Bezeichnung NR29 / S028 und wurde vergleichend gemessen mit einem für Teillast spezifizierten Radiallader NR29 / S042. Beide Lader waren so mit dem Motor abgestimmt, dass sie sich in den Vollast-Betriebswerten nur geringfügig unterschieden.

Zunächst wurden die Betriebswerte bei stationären Lastzuständen mit beiden Ladern vergleichend am selben Motor gemessen. Wie aus Anlage D2 / 1 ersichtlich, unterscheiden sich die Messwerte bei Vollast tatsächlich nur gering. Zur Teillast hin hat der modifizierte Turbolader dann aber einen höheren Wirkungsgrad in Verbindung mit einem höheren Ladedruck und erzeugt eine Rußwert-Reduzierung.

3.5.1.2. Beschleunigungsversuche am Vollmotor 6L 32/40

Für die instationären Versuche wurde der Motor ausgehend von einem Lastpunkt von 10% Leistung bei Nenndrehzahl (750 rpm) innerhalb von ca. 15 sec. auf 60% Leistung beschleunigt, wobei die Drehzahl vom Regler konstant gehalten wurde. Dieser Vorgang wurde im Vergleich mit beiden Turboladervarianten gefahren.

In Anlage D2 / 2 wurde das Ergebnis dieser Versuche dargestellt. Der Drehzahleinbruch verschwindet mit dem Teillast-Turbolader fast vollständig. Der Drehzahleinbruch während der Beschleunigung gibt, wie schon oben erwähnt, einen Eindruck von der Reaktionsfähigkeit des Motors. Je geringer dieser Einbruch ist, um so besser arbeiten Motor und Turbolader in diesem Bereich zusammen und umso geringer ist auch der Rußstoß beim Beschleunigen. Der Maximalwert der Abgastrübung reduziert sich um mehr als die Hälfte und auch die Dauer des Rußstoßes wird um ca. 30% verringert. Auch der optische Eindruck des Rußstoßes ist deutlich günstiger.

3.5.2. Varianten der Turboladergeometrie

Bei Nachrüstungen den kompletten Turbolader auszutauschen, bedeutet natürlich einen recht großen Aufwand. Es wurde daher untersucht, wie groß das Potential zur Rußstoßverbesserung ist, wenn man nur Einbauteile wie den Düsenring oder den Nachleitapparat variiert.

Die Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen Motortypen durchgeführt, wobei der kleinere (27/38) mit einem Radiallader und der größere (48/60) mit einem Axiallader ausgerüstet war.

3.5.2.1. Versuche am Vollmotor 8L 27/38

Für diese Versuche stand der Motor 8L 27/38 – 21377 zur Verfügung, der mit einem Radiallader NR24 / S041 bestückt war. An dem Motor wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen der Turbolader von Variante 1 auf Variante 2 umgebaut, um eine Erhöhung des Ladedruckes zu erhalten. Bei diesem Umbau wurde der Querschnitt des Verdichter-Nachleitapparates um ca. 10 % und des Turbinen-Düsenrings um ca. 17 % reduziert.

> stationäre Vorversuche

Mit beiden Turboladervarianten wurden zunächst bei bestimmten Lastzuständen die Betriebswerte aufgenommen.

Durch den Umbau von Variante 1 auf 2 wurde besonders im mittleren und oberen Leistungsbereich ein wie gewünscht deutlich höherer Ladedruck erreicht. Mit dem Wechsel der Einbauteile verlor der Turbolader aber über den gesamten Last-Bereich etwa 2%-Punkte am Wirkungsgrad. In Anlage D2 / 3 ist dieser Effekt dargestellt. Der statische Rußwert konnte im oberen Lastbereich geringfügig verbessert werden. Bei Niedriglast dagegen verschlechtert er sich.

> instationäre Beschleunigungsversuche

Vergleichend mit beiden Turbolader-Ausrüstungen erfolgten die instationären Untersuchungen. Dabei wurden ausgehend von verschiedenen Grundlasten aus jeweils 40% Last aufgeschaltet.

In Anlage D2 / 4 wurde der Verlauf der Betriebswerte aufgezeichnet bei einer Lastaufschaltung von 40% ausgehend von Leerlauf (0%) bei Nenndrehzahl (750 rpm). Trotz geringfügig höheren Ladedruckes reagiert der Turbolader und Motor mit der Variante 2 nicht besser. Der Drehzahleinbruch hat ein ähnliches Profil und der Rußstoß kommt etwas später aber Maximum und Zeiterstreckung sind ähnlich. Hier kommt zum Tragen, dass die Variante 2 erst oberhalb einer Motorlast von ca. 20% besser ist (Vergleich Anlage D2 / 3)

Bei der gleichen Lastaufschaltung aber diesmal ausgehend von 25 % Grundlast ist in Anlage D2 / 5 eine geringe Besserung mit der Variante 2 gegenüber 1 erkennbar. Der Drehzahleinbruch ist nicht ganz so tief und der Rußstoß hat zwar einen ähnlichen Maximalwert, aber die zeitliche Erstreckung ist etwas geringer.

Auf grund der o.g. statischen Messungen war erwartet worden, dass sich mit der Variante 2 ein günstigeres Betriebsverhalten auch im instationären Betrieb einstellen könnte, da mit dem engeren Düsenring der Ladedruck angestiegen war. Wie hier die Motorversuche zeigten, ist das nicht in dem gewünschten Maße der Fall. Der engere Düsenring führt in diesem Fall nicht nur zu einem höheren Ladedruck, sondern auch zu einem geringeren Spüldruckgefälle. Im stationären Betrieb hat dies keine Verschlechterung der Abgastrübung zur Folge, da im Generatorbetrieb ($n = \text{const}$) auch bei niedrigen Lasten ein Luftüberschuss im Zylinder vorhanden ist. Bei einer Lastaufschaltung kommt es aber immer mehr oder weniger zu Luftmangelerscheinungen. Durch das o.g. geringere Spülgefälle bleibt mehr Restgas im Zylinder, was die Abgastrübung negativ beeinflusst. Zudem kommt noch die Verschlechterung des Turboladerwirkungsgrades hinzu.

3.5.2.2. Versuche am Vollmotor 6L 48/60

Für vergleichbare Untersuchungen wie im vorangegangenen Abschnitt, nun aber mit einem Axial-Turbolader, stand der Motor 6L 48/60 – 1130086 zur Verfügung. Dabei wurde nur der Düsenring-Querschnitt in zwei Schritten variiert und zwar ausgehend vom Ausgangszustand (Variante 1) über einen etwa 15 % kleineren zu einem ca. 25 % kleineren Querschnitt.

> stationäre Vorversuche

Mit den drei unterschiedlichen Düsenringen wurden jeweils die Betriebswerte bei konstanter Last von ca. 5 % bei Nenndrehzahl von 514 rpm aufgenommen.

Wie die Ergebnisdarstellung in Anlage D2 / 6 verdeutlicht, stellt sich der gewünscht Effekt ein. D.h. mit kleinerem Düsenring steigt selbst bei dieser Niedriglast der Ladedruck und die Rußemission wird reduziert.

> Instationäre Versuche im Generatorbetrieb

Mit allen drei Düsenringvarianten erfolgten dann die instationären Untersuchungen. Im ersten Schritt wurde das Verhalten während einer Belastung im Generatorbetrieb untersucht. Dazu wurde die Leistung innerhalb von 10 sec. von 3 % auf 60 % bei konstant gehaltener Nenndrehzahl angehoben.

In Anlage D2 / 7 sind die Ergebnisse dargestellt. Beim Drehzahl-Einbruch sind die Unterschiede im Zehntelprozentbereich und in der Form ähnlich. Ebenso sind beim Rußstoßverhalten die Kurven ähnlich, obwohl der Ladedruck-Verlauf Unterschiede von 200 mbar zeigt.

Hier tritt wiederum der Effekt auf, dass sich der Motor bei instationärer Belastung gegenüber den variierten Parametern anders verhält, als es nach den vorher durchgeführten stationären Versuchen erwartet wurde.

> Instationäre Versuche im Kombinatorbetrieb

Die Untersuchungen wurden nun mit einem Belastungsmodus entsprechend der in Anlage C 6 dargestellten Kombinatorkurve wiederholt. Die Hochfahrkurve beginnt bei etwa 260 rpm und 5 % Leistung und endet nach 30 sec bei etwa 60% mit 470 rpm.

Wie in der Anlage D2 / 8 gezeigt, ergibt sich folgendes Bild: Der Ladedruckverlauf ist mit dem kleinsten Düsenring, wie erwartet, deutlich höher (Im oberen Lastbereich um ca. 300 mbar); der Rußstoß ist aber deutlich schlechter. Eine leichte Verbesserung ist nur mit dem 15 % kleineren Querschnitt erkennbar.

3.5.3. Verstellbarer Düsenring / Variable Turbine Area (VTA)

Wie auch bereits oben beschrieben bereitet die gegebene Charakteristik eines Abgasturboladers im Zusammenwirken mit einem Dieselmotor hoher spezifischer Leistungen Schwierigkeiten, für den gesamten Betriebsbereich das erwünschte Luftangebot zur Verfügung zu stellen.

Für die volle Motorleistung wird der Querschnitt des Düsenrings so groß gewählt, dass die zulässige Laderdrehzahl und der maximale, für den Brennraumdruck relevante Ladedruck nicht überschritten werden. Bei niedriger Motorlast hingegen führt ein für Vollast optimierter, also großer Düsenringquerschnitt zu einem zu niedrigen Ladedruck. Dies führt zu einer schlechteren Verbrennung im

Niedriglastbetrieb und auch zu einem schlechteren Beschleunigungsverhalten aus dem Leerlauf heraus. Durch den Einsatz eines Wastegates kann das Energieangebot für die Turbine bei Vollast durch Abblasen des Überschusses so eingestellt werden, dass auch bei Verwendung eines kleineren Düsenrings die Grenzwerte nicht überschritten werden. Allerdings bedeutet das Abgasabblasen mittels Waste-gate einen Verlust, der zu höheren Abgastemperaturen und höherem Kraftstoffverbrauch bei Vollast führen kann. Abhilfe schafft hier die variable Turbinengeometrie (Variable Turbine Area / VTA)

3.5.3.1. Lösungskonzept VTA

Der verstellbare Turbinenleitapparat an einem Axialturbolader bietet die Möglichkeit, durch die Veränderung des Querschnittes das Luftangebot für den jeweiligen Lastpunkt innerhalb gewisser Grenzen einzustellen. Die Leitschaufeln sind drehbar im äußeren Leitschaufelträger gelagert. In Anlage D2 / 9 ist ein derartiger VTA dargestellt.

3.5.3.2. Vorerprobung am Vollmotor 6L 48/60

Als Versuchsträger stand dafür der 6L 48/60 – 1130086 zur Verfügung.

Im ersten Schritt wurde die Funktion des VTA erprobt. Der Versuchsbetrieb zeigte auch mit Schweröl ein gutes Bauteilverhalten, so dass ein derartiger VTA für Serienanwendung freigegeben werden konnte.

> Wirkungsgradvergleich VTA mit festem Düsenring

Durch die konstruktiven Besonderheiten der verstellbaren Leitschaufeln wurde mit Wirkungsgradeinbußen durch z.B. Spaltverluste im Vergleich zum herkömmlichen starren Düsenring gerechnet. Vergleichsmessungen mit beiden Düsenringen zeigten aber, dass diese Verluste gering sind.

In Anlage D2 / 10 wurden die Turboladerwirkungsgrade über der gefahrenen Motorleistung aufgetragen. Mit dem auf befriedigendes Teillastverhalten ausgelegten festen Düsenring (punktierte Kurve) muß im oberen Lastbereich das Wastegate geöffnet werden, deswegen hier der Wirkungsgradabfall. Mit dem gleichen Querschnitt wie dieser feste Düsenring wurde der VTA zunächst fixiert gefahren (Mittelstellung / durchgezogene Kurve). Auch hier der Kurven-Abfall bei Vollast wegen des Öffnens des Wastegates. Über den oberen Lastbereich (größer ca. 50%) hat der VTA einen etwa 2 %-Punkte niedrigeren Wirkungsgrad.

Durch "Engerstellen" des VTA im Niedriglastbetrieb und "Weiterstellen" bei Vollast (unterbrochene Kurve) läßt sich der Wirkungsgrad in den entsprechenden Bereichen deutlich anheben. Bei Vollast braucht mit VTA in "weiter" Stellung das Wastegate nicht geöffnet werden, was zu dem etwas höheren Wirkungsgrad führt.

> **Vergleich stationärer Betriebswerte VTA mit festem Düsenring**

In Anlage D2 / 11 sind der Ladedruck und auch der Rußwert bei stationären Betriebszuständen in Abhängigkeit von der gefahrenen Leistung dargestellt. Die unterschiedlichen Turbolader-Zustände (starrer Düsenring, VTA Mittelstellung und enger bzw. weiter gestellt) entsprechen dabei wieder den Varianten aus dem vorangegangenen Wirkungsgrad-Diagramm.

Beim Engerstellen des VTA im Teillastbereich wird ein deutlicher Ladedruckgewinn von ca. 200 mbar verzeichnet. Der Rußwert wird entsprechend niedriger.

> **Verstellgeschwindigkeit VTA**

Die Verstellgeschwindigkeit und der dadurch erzeugte Ladedruckanstieg wurde bei einer konstanten Leistung von 25 % bei Nenndrehzahl ermittelt.

Wie aus Anlage D2 / 12 ersichtlich kann die mechanische Verstellung von einer Schaufelstufe zur nächsten in je ca. 5 sec bewerkstelligt werden. Der Ladedruck selbst braucht aber jeweils etwa 15 sec bis er sich auf den neuen Zustand eingestellt hat. Hier wurde schon vermutet, dass die Verstellgeschwindigkeit bzw. der daraus resultierende Ladedruckanstieg für Belastungsvorgänge zu langsam erfolgt.

3.5.3.3. Hochfahrverhalten mit gleichzeitiger Verstellung des VTA

Für diese Versuche wurde der Motor entlang der Kombinatorikurve, wie in Anlage C / 6 vorgestellt innerhalb von ca. 30 sec von 5 % auf 60 % Leistung beschleunigt.

Der Motor lief in der Ausgangsposition bei 5 % Leistung mit VTA-Stellung "enger". Während des Hochfahrens wurde nach ca. 20 sec bei etwa 50 % Leistung der VTA von der engen auf die mittlere Stellung umgeschaltet.

In Anlage D2 / 13 ist dieser Vorgang über der Zeit aufgetragen. Der VTA-Verstellvorgang selbst tritt kaum in Erscheinung. Der Ladedruck des VTA liegt während des gesamten Beschleunigungsvorgangs höher als beim starren Düsenring. Trotzdem ist der Rußstoß mit VTA deutlich ausgeprägter. Auch hier ist trotz günstiger stationärer Ergebnisse (s.o.) mit dem "engeren" VTA eine Verschlechterung zu verzeichnen, da trotz höheren Ladedruckes das Spülgefälle ungünstiger und der Restgasanteil im Zylinder höher werden.

3.5.4. Abschließende Beurteilung einer veränderten Turbolader-Chrakeristik

Wie schon von CLEAN her bekannt, läßt sich die Teillastruß-Situation bei stationären Betriebszuständen durch Anpassung des Turboladers verbessern. Wie die hier vorliegenden Versuche dargestellt haben, läßt sich daraus jedoch nicht automatisch schließen, dass auch der Rußstoß bei instationären Belastungsvorgängen reduziert wird.

Während (beim Motor 6L32/40) durch die Umrüstung auf einen neu ausgelegten Teillastlader ein positiver Effekt auch auf den Rußstoß erzielt wurde, konnte das (beim 8L27/38) mit einer Komponentenänderung am Radiallader nicht erreicht werden, obwohl auch im letzteren Fall im Stationärbetrieb durch eben diese Änderung der Ladedruck angehoben werden konnte.

Auch mit dem Axiallader (am 6L 48/60) konnte durch eine Reduzierung des Düsenring-Querschnittes zwar der Ladedruck angehoben und damit der Rußwert im stationären Betrieb entsprechend reduziert werden, aber eine Verbesserung des Rußstoßes beim Belasten sowohl nach Generator- als auch Kombinator-kurve wurde damit nicht erreicht. Der engste Querschnitt zeigt diesbezüglich sogar eine Verschlechterung.

Versuche mit einem verstellbaren Düsenring zeigen bei instationären Belastungen (am 6L 48/60) bezüglich des Rußstoßes ebenfalls eine Verschlechterung, obwohl bei konstanter Teillast ein Reduzierung des Rußwertes festgestellt werden konnte.

Es wurde nachgewiesen, dass eine Turboladeränderung, die auf möglichst niedrigen Rußwert bei konstanten Niedriglasten ausgerichtet ist, nicht generell auch bei instationären Vorgängen positive Wirkung auf den Rußstoß hat sondern sogar im Gegenteil diesen verschlechtern kann.

3.6. Variation der Ladelufttemperatur

Bereits im Vorgängervorhaben CLEAN wurde der Einfluß der Ladelufttemperatur auf den Rußwert untersucht. Wie die damaligen Versuche gezeigt haben, wird die Kraftstoff-Aufbereitungs-Phase während des Zündverzuges günstiger, wenn durch spezielle Zusatzeinrichtungen die Temperatur der Ladeluft im niedrigen Teillastbereich auf über 60°C angehoben wird (/1/).

Es wurde damals auch festgestellt, dass für einen positiven Effekt eine ausreichende Luftmenge zur Verfügung stehen muß, da durch diese Aufheizung gleichzeitig die Luftdichte reduziert wird. Das bedeutet, dass der Rußverbesserungs-Effekt auch von der Qualität der Aufladung abhängt.

Im Vorgängervorhaben CLEAN wurden nur stationäre Betriebszustände untersucht. Hier soll nun das Rußverhalten während instationärer Belastungsvorgänge ermittelt werden, wobei zunächst als Ausgangszustand das stationäre Verhalten des jetzigen Versuchsträgers wegen der mittlerweile verbesserten Aufladung dargestellt wurde.

3.6.1. Vorversuche (stationär) am Vollmotor 6L 48/60

Als Versuchsträger stand der Motor 6L48/60 – 1130086 zur Verfügung.

Die Ladeluftvorwärmung wurde wie in Anlage E / 1 skizziert durch Abschalten der zweiten Stufe des zweistufigen Ladeluftkühlers erreicht. Durch die erste Stufe (Hochtemperatur / HT) des Ladeluftkühlers fließt das Motorkühlwasser mit ca. 90 °C und kühlt die vom Verdichter mit ca. 200 °C (bei Vollast) ankommende Ladeluft vor. In der zweiten Stufe (Niedertemperatur / NT) wird dann normalerweise die Ladeluft auf die gewünschte Zylindereintrittstemperatur gekühlt. Wird nun diese zweite Stufe nicht mehr vom Niedertemperaturkreislauf durchströmt, so erwärmt sich das darin stehende Wasser über die von der ersten Stufe her durchströmende Ladeluft.

Bei niedrigen Teillasten ist die Lufttemperatur nach Verdichter evtl. nur 50°C, bei Leerlauf noch niedriger. Damit würde es verstärkt zu einer ungünstigen Verbrennung und zum vermehrten Rußen kommen. Bei dem beschriebenen Verfahren erwärmt sich die Ladeluft in der ersten Stufe. Wegen Abschalten der zweiten Stufe findet keine Rückkühlung statt. Somit läßt sich die Lufteintrittstemperatur in den Zylinder deutlich anheben.

Als Vorstufe zur Untersuchung des Rußstoßverhaltens bei instationären Vorgängen wurde zunächst sowohl der Einfluß der Ladeluftvorwärmung bei konstanter Niedriglast als auch die für eine Aufheizung der Ladelufttemperatur nötige Zeitdauer ermittelt.

3.6.1.1. Ladeluftvorwärmung bei konstanter Niedriglast

In Anlage E / 2 sind Rußwert und Ladelufttemperatur über jeweils konstant gefahrenen Lastpunkten im Generatorbetrieb (bei konstanter Nenndrehzahl) auf-

getragen. Im derartigen Stationär-Betrieb erreicht man durch eine Ladeluftvorwärmung niedrigere Rußwerte. Die höhere Ladelufttemperatur verbessert die Verdampfung des eingespritzten Kraftstoffes und dadurch die Verbrennung.

In der betrachteten Untersuchung wurde die Ladeluft für die einzelnen Lastpunkte zunächst auf ca. 75°C vorgewärmt. Es ist aus den Kurven ersichtlich, dass dieser Effekt nur im Leistungsbereich unterhalb ca. 25% positiv ist. Bei höheren Leistungen wird der Rußwert nur noch wenig beeinflusst.

Wie in Anlage E / 3 dargestellt wurde, läßt sich bereits mit einer Anwärmung der Ladeluft auf 60°C bei 10% Leistung der Rußwert um 0,2 RB reduzieren. Eine weitere Temperaturerhöhung auf 75°C erbringt nur noch geringe Verbesserungen.

3.6.1.2. Zeitlicher Verlauf des Ladeluftvorwärm-Vorgangs

Für die Beurteilung, ob diese Methode auch bei instationären Belastungszuständen einen Erfolg bzgl. einer Rußstoßminderung bringen kann, musste der zeitliche Ablauf bzw. die Dauer des Aufheizvorgangs untersucht werden.

Bei einer konstant gefahren Leistung von ca. 10 % der Nennleistung bei Nenndrehzahl wurde die zweite Stufe des Ladeluftkühlers abgeschaltet. Wie aus Anlage E / 4 ersichtlich, dauerte es ca. 4 min bis eine Ladelufttemperatur von 60°C erreicht wurde. Bis der Rußwert im gewünschten Maße darauf reagiert hatte, vergingen jedoch etwa 10 - 15 min. Die Abschaltung der Vorwärmung geht dagegen deutlich schneller, da in diesem Fall ja sofort Wasser mit ca. 38°C die zweite Stufe des Ladeluftkühlers durchströmt. Dieser Vorgang wurde nicht eigens dargestellt

3.6.2. Instationäre Versuche am Vollmotor 6L 48/60

Für diese Versuche wurde der Motor auf zwei verschiedene Arten beschleunigt, einmal entlang der in Anlage C / 6 beschriebenen Kombinatorikurve und das andere Mal bei konstanter Nenndrehzahl entlang einer Lastrampe. In beiden Fällen war die 2. Stufe des Ladeluftkühlers bereits bei Beginn der Belastung abgeschaltet, wenn mit Vorwärmung gefahren wurde. Bei instationären Vorgängen, die nur etwa 15 sec dauern, würde der Rußverminderungseffekt zu spät einsetzen, wenn die Umschaltung auf Vorwärmung erst mit Beginn des Belastungsvorgangs aktiviert worden wäre (siehe dazu auch Anlage E / 4).

3.6.2.1. Verhalten bei Lastaufschaltung bei Nenndrehzahl

Bei dieser Art der Belastung läuft der Motor mit ca. 5 % Leistung bei Nenndrehzahl und wurde ausgehend davon innerhalb von 15 sec. auf etwa 65 % Leistung hochgefahren. Dieser Vorgang wurde jeweils mit und ohne Vorwärmung in gleicher Weise durchgeführt.

> ohne Hilfsmaßnahmen

Zunächst wurde nur der Effekt der Ladeluftvorwärmung selbst ohne weitere Hilfsmaßnahmen untersucht. Bei der Messung ohne Vorwärmung hatte die Ladeluft-Temperatur vor Zylinder 40°C und mit Vorwärmung ca. 77°C erreicht.

In Anlage E / 5 zeigt sich, dass der Opazitätswert ohne Vorwärmung vor Beginn der Belastung, wie nach den o.g. Vorversuchen erwartet, etwas höher ist. Beim Hochfahren der Lastrampe erweist sich jedoch die Ladeluftvorwärmung als Nachteil. Die Vorwärmung führt zu einem größeren Drehzahleinbruch und zu einer höheren Rußemission.

Wie die Untersuchung zeigt, spielt die im Zylinder verfügbare Luftmasse die entscheidende Rolle im Instationärbetrieb. Die höhere Ladelufttemperatur führt zu einer geringeren Luftdichte und somit zu weniger Luft im Zylinder. Das Verbrennungsluftverhältnis ist niedriger. Im stationären Betrieb bei Nenndrehzahl spielt dies keine Rolle, da hier bei Niedriglast Luftüberschuss herrscht und somit der oben beschriebene positive Effekt während der Kraftstoff-Aufbereitungs-Phase wirksam werden kann. Beim schnellen Hochfahren erreicht man aber mit Ladeluftvorwärmung früher den Luftmangelbereich, was zu höheren Rußemissionen führt.

> mit Hilfsmaßnahmen

Bei dem nächsten Versuch war Jet-Assist aktiviert. Die Arbeitsweise des Jet-Assist wurde bereits in Abschnitt 3.4.1. beschrieben.

Mit Jet-Assist als gleichzeitige Zusatzmaßnahme wird der oben ermittelte Nachteil der Vorwärmung kompensiert, wie in Anlage E / 6 aufgezeichnet. Hier kommt die bessere Kraftstoffverdampfung zur Wirkung. Die Vorwärmung hat jetzt wieder einen positiven Effekt.

In Anlage E / 7 wurden diesmal bei immer gleichen Belastungsvorgängen die erreichten Opazitäts-Maxima vergleichend gegenübergestellt. Dabei entspricht das erste Balkenpaar mit der Bezeichnung "keine" den Werten aus Anlage E / 5 und das dritte Paar ("zusätzlich Jet-Assist") den aus Anlage E / 6.

Auch in Verbindung mit der Zusatzmaßnahme "Hilfsluftgebläse", wie sie in Abschnitt 3.4.2. dargestellt wurde, kann mit der Ladeluftvorwärmung eine weitere Verbesserung erreicht werden.

3.6.2.2. Verhalten bei Hochfahren entlang Kombinatorkurve

Bei dieser Art der Beschleunigung wird der Motor auch in der Drehzahl entsprechend der Laststeigerung hochgefahren. Dies geschieht entsprechend der Kurve, wie sie in Anlage C / 6 dargestellt wurde. Im vorliegenden Fall wurde der Motor innerhalb von ca. 45 sec von 5 % auf 60 % Leistung beschleunigt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in Anlage E / 8 wiederum in Balkenform, also die Opazitäts-Maxima, zusammengestellt. Im Vergleich zur Belastung bei konstanter Drehzahl (siehe Anlage E / 7) ist das Ausgangsbalkenpaar (keine Zusatzmaßnahmen) niedriger, was auf die langsamere Beschleunigung zurückzuführen ist.

Es ist aber deutlich erkennbar, dass in allen Fällen die Vorwärmung negativ wirkt. Hier können auch die getesteten Zusatzmaßnahmen nicht mehr ausreichend verbessernd wirksam werden.

Im Kombinatorbetrieb ist bei Teillast das Verbrennungsluftverhältnis niedriger als im Generatorbetrieb. Das weitere Absenken der verfügbaren Luftmasse durch die Ladeluftvorwärmung führt zu durchwegs höheren Rußemissionen. Auch die Zusatzmaßnahmen können diese Tendenz nicht umkehren.

3.6.3. Abschließende Beurteilung Ladelufttemperaturvarianten

Da im Stationärbetrieb besonders im Niedriglastbereich die Rußwerte deutlich besser sind, kann man auf die Ladeluftvorwärmung nicht verzichten. Deshalb müsste eigentlich von der Motorsteuerung her vor einer Lastaufschaltung die Ladeluftvorwärmung kurzzeitig abgeschaltet werden können. Da aber das Ab- und wieder Zuschalten und damit der Effekt auf die Rußreduzierung länger dauern würde als der eigentliche Belastungsvorgang mit relativ kurzen Rußstößen, nimmt man diese kurzzeitige Verschlechterung in Kauf. Besonders im Generator-Belastungsmodus können hier Zusatzsysteme wie Jet-Assist oder Hilfsgebläse oder beides zusammen mit Erfolg eingesetzt werden.

3.7. Optimierung eines Gesamt-Motormanagementsystems

3.7.1. Problemdarstellung / Zielsetzung

In den vorausgegangenen Abschnitten wurden weitgehend die Wirkungsweisen nur jeweils einzelner Maßnahmen untersucht. Im Zusammenspiel dieser Einzelmaßnahmen miteinander können sich aber Verschiebungen der Effektivität einstellen.

Zur Verdeutlichung dieser Problematik sei an Abschnitt 3.6. erinnert. Dort wurde dargestellt, dass die Ladeluft-Vorwärmung im stationären Teillastbetrieb eine deutliche positive Auswirkung auf den Rußwert hat. Bei instationären Beschleunigungen dagegen wirkt diese Maßnahme eher negativ. Wird jetzt aber mit weiteren Maßnahmen wie Hilfsluftgebläse oder Jet-Assist zusätzlich operiert, bringt auch die Ladeluft-Vorwärmung wieder eine Verbesserung. Diese tritt aber nur bei Belastung mit konstanter Drehzahl auf. Bei Beschleunigung nach Kombinatorkurve wurde keine derartige Verbesserung festgestellt. Dieses Beispiel zeigt die Komplexität des Systems, das also nicht nur von den Einzelparametern und deren Zusammenspiel untereinander, sondern auch von dem Motor bzw. dessen Fahrweise abhängt.

Deswegen soll im vorliegenden Abschnitt das Zusammenwirken der Einzelmaßnahmen untersucht und ein in sich abgestimmtes und optimiertes Maßnahmen-Paket zusammengestellt werden. Dabei wird auch die Frage nach der Steuerung (z.B. der Zeitpunkte für Zu- und Abschalten, bzw. die Wirkdauer) der einzelnen Komponenten und deren Abhängigkeiten voneinander ermittelt. Hier ist der Begriff des Gesamt-Motormanagementsystems bzw. dessen Optimierung darzustellen.

3.7.2. Lösungskonzept

Der besseren Übersicht wegen, werden hier zunächst die in den vorangegangenen Abschnitten bereits dargestellten Einzel-Maßnahmen aufgelistet, die die Bausteine des im Weiteren zu untersuchenden Gesamtsystems darstellen:

- Kraftstoff-Wasser-Emulsion (siehe Abschnitt 3.3.)
- Jet-Assist (siehe Abschnitt 3.4.1.)
- Hilfsluftgebläse (siehe Abschnitt 3.4.2.)
- Ladeluft-Vorwärmung (siehe Abschnitt 3.6.)
- Ladeluft-Umblasen
- Abgas-Abblasen (Waste Gate)

Die beiden letzt genannten Komponenten (Umblasen, Abblasen) sind nötig, um entsprechend der vom Motor gefahrenen Lastkurve einen möglichst guten Turbolader-Wirkungsgrad zu erreichen.

Die Kurve des optimalen Wirkungsgrades der Strömungsmaschine Turbolader und der geforderte Motor-Lastpunkt können nur in einem eng begrenzten Bereich des Kennfeldes zur annähernden Deckung gebracht werden. Diesen Bereich legt man praktischerweise etwa in die Gegend des vorwiegend vom Motor gefahrenen 85 % - Lastpunktes. Zur Teillast hin fällt der Turbolader-Wirkungsgrad dann ab und somit verschlechtert sich auch der Rußwert.

Mit dem Ladeluft-Umblasen wird ein Teil des nicht zur Verbrennung nötigen Luftüberschusses direkt von der Ladeluft- in die Abgasleitung geblasen. Dadurch simuliert man dem Verdichter eine für ihn günstigere Motorschlucklinie, wodurch der Turbolader in einen günstigeren Wirkungsgrad-Bereich gelangt, was sich im Teillastbereich wiederum günstig auf die Rußemission auswirkt.

Durch das Abgas-Abblasen andererseits wird verhindert, dass ein für z.B. den o.g. 85-%- Betriebspunkt optimal ausgelegter Turbolader bei weiter steigender Motorleistung über seine zulässigen Grenzen (z.B. Drehzahl) hinaus überlastet wird.

Beide Features sowohl das Ladeluft-Umblasen bei Teillast als auch das Abgas-Abblasen bei hoher Leistung können durch das in Abschnitt 3.5.3. beschriebene Konzept des verstellbaren Düsenringes (VTA) ersetzt werden.

3.7.3. Stationäre Versuche am Vollmotor 6L48/60

Eine Darstellung der oben aufgelisteten Einzel-Maßnahmen ist in Anlage F / 1 skizziert. Die räumliche Anordnung der einzelnen Komponenten zu Motor bzw. Turbolader ist dabei nur als Schema zu verstehen.

Zunächst wurde das Zusammenspiel bzw. die Kombination von Einzel-Maßnahmen bezüglich der Auswirkung auf den Rußwert bei stationären Leistungspunkten ermittelt. In Anlage F / 2 ist der jeweils gemessene Rußwert über der Leistung bei konstanter Nenndrehzahl aufgetragen. Dabei wurden die einzelnen Maßnahmen ausgehend vom Motorzustand ohne Zusatzmaßnahme jeweils additiv zugeschaltet.

Der bei den einzelnen Schritten dargestellte Ruß-Verbesserungseffekt ist in der Größenordnung abhängig von der Reihenfolge des Zuschaltens. Beispielsweise verbessert sich der Rußwert beim Einschalten einer Ladeluftvorwärmung im Leerlauf um ca. 0,6 RB wenn vorher keine weiteren Maßnahmen vorgenommen wurden. Ist dagegen im Ausgangszustand bereits der Turbolader für Teillast optimiert und wird dann der Vergleich mit / ohne Ladeluftvorwärmung gefahren, dann ergibt sich nur noch eine Verbesserung von ca. 0,4 RB (siehe Abschnitt 3.6.1.1. und Anlage E / 2)

Außerdem wirken die einzelnen Maßnahmen auch in unterschiedlichen Lastbereichen. Während beispielsweise die Optimierung der Turboladerausüstung über einen weiten Leistungsbereich (Leerlauf bis 50% Leistung) positive Auswirkungen auf den Rußwert hat, ist die Zylinderabschaltung nur auf einen Bereich unterhalb von 10% beschränkt.

Die Funktion und Wirkungsweise einer Optimierung der Einspritzdüsen, z.B: Spritzlochgeometrie, und einer Zylinderabschaltung auf Motorbetriebsverhalten und Rußwert bei statischen Betriebszuständen wurden bereits im Vorgängervorhaben CLEAN (/1/) beschrieben.

3.7.4. Instationäre Versuche am Vollmotor 6L48/60

Für die folgenden Untersuchungen stand wiederum der Motor 6L48/60 . 1130086 zu Verfügung. Dabei wurden, wie in den vorangegangenen Abschnitten die beiden Belastungsarten: Beschleunigung entlang der Kombinatorkurve und Lastaufschaltung bei konstanter Nenndrehzahl unterschieden.

3.7.4.1. Steuerung und Parametrierung der Einzelmaßnahmen

Die Einzelmaßnahmen müssen in Abhängigkeit vom jeweiligen Motorfahr- bzw. -beschleunigungszustand zu- und abgeschaltet werden. Die Funktion einer dafür nötigen Steuerung AC 31, einer Speicher-Programmierbaren Steuerung (SPS), wurde in Abschnitt 2.3.3.2. beschrieben.

Zunächst wurden für die beiden o.g. Belastungsarten die Steuerparameter empirisch ermittelt und die jeweils bzgl. Rußstoß-Entwicklung optimalen in die AC31 einprogrammiert.

Damit ergaben sich für die beiden Fälle die in Anlage F / 3 über der Leistung dargestellten Aktionsbereiche der untersuchten Einzel-Maßnahmen.

Für die tatsächliche Ansteuerung konnte nicht immer das Füllungs- bzw. Lastsignal benutzt werden, weil je nach Lastaufschaltprofil bei gleicher Füllung unterschiedliche Fahrzustände erreicht werden. Deshalb mußten für die Ansteuerung auch andere Motorbetriebswerte herangezogen werden.

Eine Übersicht über die Steuerungsparameter und Schaltpunkte für die o.g. Einzel-Maßnahmen speziell für den im Weiteren untersuchten Beschleunigungsbetrieb gibt folgende Liste wieder:

- Das Kraftstoff-Wasser-Emulsions-Modul ist gleichzeitig mit der Motorbetriebsbereitschaft bzw. mit Einschalten des Kraftstoffversorgungs-Systems in Betrieb
- Jet-Assist
Zuschalten bei Kombinatorbelastung, wenn Drehzahl um mehr als ca 10 rpm und gleichzeitig die Füllung um mehr als 2 % ansteigt.
Zuschalten bei Lastaufschaltung mit konstanter Drehzahl, wenn Drehzahl-einbruch größer als ca. 10 rpm und gleichzeitig die Füllung um mehr als 2 % ansteigt.
Abschalten entweder nach 10 sec Dauer oder wenn die o.g. Einschaltkriterien nicht mehr bestehen.

- Hilfsluftgebläse
Zuschalten bei ca. 5 % Leistung Füllungssignal
Abschalten bei Erreichen von ca. 1000 mbar Überdruck in der Ladeluftleitung das entspricht ca. 45 % Leistung bei Kombinatorbetrieb bzw. 40 % bei Lastaufschaltung mit konstanter Drehzahl.
- Ladeluftvorwärmen
Zuschalten vor Motorstart
Abschalten bei ca. 30 % Leistung Füllungssignal
- Ladeluftumblasen
Zuschalten bei ca. 10 % Leistung Füllungssignal
Abschalten bei ca. 40 % Leistung Füllungssignal
- Abgasabblasen
Zuschalten bei ca. 90 % Leistung Füllungssignal oder Erreichen der maximal zulässigen Turbolader-Drehzahl
Abschalten, wenn diese Kriterien nicht mehr bestehen

Die vorgenannten Schaltpunkte gelten exemplarisch für den verwendeten Versuchsträger. Andere Motortypen erfordern evtl. modifizierte, bei der Entwicklung zu bestimmende Werte. Die generellen Zusammenhänge ändern sich aber nicht.

3.7.4.2. Beschleunigungsversuche entlang Kombinatorkurve

Der Versuchsmotor 6L48/60 – 1130086 wurde bei diesen Untersuchungen entsprechend der in Anlage C / 6 dargestellten Kombinatorkurve in ca. 45 sec von 5 % auf 60 % Leistung beschleunigt. Im vorliegenden Kapitel ist das Zusammenspiel der Einzel-Maßnahmen dargestellt, wobei diese nach dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Kriterien zu- bzw. abgeschaltet wurden.

In der Anlage F / 4 ist der zeitliche Ablauf der Betriebswerte beim Einsatz von Luftvorwärmung und Hilfsluftgebläse im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahmen aufgezeichnet. Deutlich ist die Verschlechterung des Rußstoßes durch den Einsatz der Luftvorwärmung erkennbar, obwohl der Ladedruckverlauf eher günstiger ist. Durch das zusätzlich zugeschaltete Gebläse verringert sich der Rußstoß wieder. Während des Betriebes des Hilfsluftgebläses war gleichzeitig auch die Umblaseklappe geöffnet, um den positiven Effekt des Gebläses ausnutzen zu können.

Durch den Einsatz von Jet-Assist wird zwar der Maximalwert der Opazität nur kaum reduziert, aber die Dauer des Rußstoßes vermindert. Wird zusätzlich noch das Hilfsluftgebläse zugeschaltet, kann der Rußstoß auf ein niedriges Niveau gedrückt werden. Deutlich ist der durch den Jet-Assist verbesserte Ladedruckverlauf in den ersten Sekunden der Beschleunigungsphase erkennbar.

In Verbindung mit diesen Maßnahmen wurde nun statt reinem Kraftstoff eine Emulsion aus Kraftstoff mit ca. 15 % Wasserzumischung (KWE) gefahren. Wie in Anlage F / 6 dargestellt kann allein durch den KWE-Betrieb kaum eine Verbesserung erreicht werden. Werden aber Jet-Assist und Hilfsluftgebläse zusätzlich eingesetzt, reduziert sich der Rußstoß sogar noch unter das Niveau von Anlage F / 5.

3.7.4.3. Lastaufschaltung bei konstanter Drehzahl

Bei diesen Untersuchungen wurde der o.g. Motor bei konstanter Drehzahl innerhalb von ca. 15 sec von 5 % auf 65 % Last hochgefahren. In den folgenden Diagrammen ist der Drehzahleinbruch aufgezeichnet als Maß für die Reaktionsfähigkeit des Motors auf die schnelle Lastanforderung.

Im ersten Versuch sollte der Einfluß des Umblasens (siehe Abschnitt 3.7.2.), das bei stationären Betriebszuständen, wie in CLEAN (/1/) beschrieben, eine positive Wirkung auf die Rußemission zeigt, abgeklärt werden. Wie aus der Anlage F / 7 ersichtlich, kann bei dem untersuchten instationären Belastungsvorgang kein Unterschied zwischen mit oder ohne Umblasen festgestellt werden. Auch die Form des Drehzahleinbruches ist identisch. Da aber im stationären Betrieb das Umblasen einen positiven Effekt auf die Rußemission gezeigt hat, werden die folgenden Versuche weiterhin auch mit Umblasen in den unter Abschnitt 3.7.4.1. genannten Grenzen, sowie parallel mit dem Hilfsluftgebläse gefahren.

In der Anlage F / 8 ist dargestellt, dass das Ladeluftvorwärmen alleine auch bei Lastaufschaltung mit konstanter Nenndrehzahl gegenüber dem Zustand ohne Maßnahmen wiederum eher eine Verschlechterung bringt. Erst in Verbindung mit dem Hilfsluftgebläse kann eine deutliche Verbesserung erreicht werden.

Wie aus Anlage F / 9 ersichtlich läßt sich mit dem Einsatz von Jet-Assist und Hilfsluftgebläse der Rußstoß nahezu beseitigen.

Wird statt des reinen Kraftstoffes noch eine Emulsion mit 15 % Wasser gefahren so ist, wie in Anlage F / 10 gezeigt überhaupt kein Rußstoß mehr erkennbar.

3.7.5. Instationäre Motorversuche am 14V 48/60 – 1135072

Ähnliche Versuche wurden an einem größeren Vollmotor vergleichend durchgeführt, um zu untersuchen, in wie weit die vom 6L48/60 (siehe Abschnitt 3.7.4.) vorliegenden Parameter des Motormanagements übertragbar sind.

Für die Versuche stand ein 14V48/60 zur Verfügung mit einer Nennleistung von 14700 kW bei einer Drehzahl von 514 min^{-1} .

Die bereits am 6L48/60 getesteten Komponenten zur, wie:

- Kraftstoff-Wasser-Emulsion-Modul
- Jet-Assist-Einrichtung
- Hilfsluftgebläse
- Ladeluft-Vorwärmeinrichtung
- Ladeluft-Umblase-Klappen mit Anschlußleitungen
- Abgas-Abblase-Klappen

wurden entsprechend des größeren Motors und der höheren Leistung neu ausgelegt bzw. adaptiert.

Eine weitere Schwierigkeit ergab sich dadurch, dass dieser V-Motor mit zwei Turboladern ausgerüstet war. Das Steuer-Management mußte für die o.g. Einzel-Maßnahmen mit zusätzlichen Meßaufnehmern, Steuer-Software-Elementen und Parametern ausgerüstet werden, da die beiden Turbolader besonders bei schnellen Lastaufschaltungen während instationären Vorgängen nicht immer synchron liefen.

Auch für diese Untersuchungen wurde zur Steuerung wieder eine AC 31 (siehe Abschnitt 2.3.3.2.) verwendet.

Auch dieser große Vollmotor ließ sich im Stationärbetrieb bis unter 10 % Leistung ohne sichtbare Rußemission fahren. Der Rußwert war dabei unter 0,2RB.

Bei Lastaufschaltungen, die ähnlich wie beim 6L48/60 vorgenommen wurden, konnte der Rußstoß nahezu beseitigt werden. Der Opazitätswert lag dabei unter 15 %. Die Ergebnisse waren mit den in Abschnitt 3.7.4. vergleichbar.

3.7.5. Abschließende Beurteilung Gesamt-Motormanagement

Die in diesem Abschnitt dargestellten Untersuchungen machen deutlich, dass es möglich ist, auch bei größeren Viertakt-Dieselmotoren nicht nur den Stationärbetrieb ohne sichtbare Rußemission darzustellen, sondern auch den Rußstoß während instationärer Beschleunigungsvorgänge weitgehend zu beseitigen.

Allerdings muß dabei beachtet werden, dass sich die Wirkungsweisen einzelner Verbesserungsmaßnahmen im Verbund nicht addieren. Dies gilt sowohl für den stationären als auch den instationären Betrieb. Werden aber die Einzel-Maßnahmen geschickt miteinander kombiniert bzw. aufeinander abgestimmt, dann ist u. U. sogar eine Verstärkung des Verbesserungseffektes möglich.

Um die Einzel-Maßnahmen in der dafür nötigen Weise miteinander verknüpfen zu können, ist ein entsprechendes, leistungsfähiges Steuerprogramm (z.B: AC 31) nötig, das auch anpassungsfähig und entsprechend den Motorunterschieden und Anwendungsanforderungen modifizierbar ist.

3.8. Vergleich von Ruß / Partikel-Messeinrichtungen

3.8.1. Problemdarstellung / Zielsetzung

In Abschnitt 2.3.3.4 wurden bereits die für die Untersuchungen im Rahmen CLEAN II benutzten Rußmessverfahren aufgelistet. Im vorliegenden Abschnitt werden die Messverfahren genauer beschrieben und miteinander verglichen. Dabei soll die Tauglichkeit d.h. die Möglichkeit einer möglichst objektiven Erfassung des Ruß- / Partikel- Emissionsverhaltens vor allem auch im Hinblick auf die Besonderheiten bei instationären Belastungsvorgängen von Antriebsanlagen untersucht werden.

Für Onroad- und Offroad-Fahrzeuge wird international, soweit Vorschriften einzuhalten sind, die Partikelemission limitiert. Entsprechend dem U.S. Federal Register werden unter dem Begriff "Particulates" alle festen und flüssigen Abgaskomponenten zusammengefaßt, die nach Abkühlung durch Verdünnung mit gefilterter Luft auf Filtern abgeschieden werden.

Die aufgefangenen Partikelmassen entsprechen bei diesen Fahrzeugen weitestgehend dem Beitrag der motorerzeugten Emission, weil die Partikel nahezu nur aus elementarem Kohlenstoff (ca. 75 %) und kondensierten organischen Verbindungen (ca. 25 %) bestehen. Damit ist eine Partikel-Messmethode für diesen Anwendungsfall gerechtfertigt.

Es war nun von Seiten verschiedener Behörden daran gedacht, diese Methode auch für große 4-Takt-Dieselmotoren im Schiffseinsatz zu übernehmen. Hier ergibt sich jedoch das Problem, dass die verwendeten Kraftstoffe einen beträchtlichen Anteil an Schwefel enthalten, der zu Sulfatpartikeln im Abgas führt. Zusammen mit dem an die Sulfate gebundenen Wasser ergibt das einen Gewichtsanteil von teilweise über 50 % der Gesamtpartikelmasse. Die Kraftstoffe für landgebundene Fahrzeuge sind dagegen nahezu schwefelfrei.

Somit sind Partikelmessungen für den Anwendungsfall "Schiffsantriebe" nicht geeignet, um die sichtbare Abgasfahne oder gar einen kurzzeitigen Rußstoß, wie sie durch schlechte Verbrennung entstehen, ausreichend beschreiben zu können.

Im Folgenden werden ausgehend von Partikelmessungen an großen Dieselmotoren weitere hier benutzte Rußmessmethoden vergleichend beschrieben

3.8.2. Partikelmessmethode

Die "Partikelmethode" (PM) ist in ISO 8178-1 (1996) definiert als Sammlung aller Teilchen aus dem Abgas auf einem Filter nach Verdünnung des Abgases mit kalter, gefilterter Luft. Lt. Norm muß die Temperatur des verdünnten Abgases $\leq 52^{\circ}\text{C}$ sein.

Eine Probenentnahme aus dem heißen Abgas und Abscheidung der Teilchen auf Filtern ohne Abkühlung wird dagegen als "Staubmessung" bezeichnet, die aber bisher nur bei ortsfesten Anlagen zur Anwendung kommt.

Die Partikel-Messmethode wurde bereits weitgehend in CLEAN (/1/) beschrieben. Auch bei den vorliegenden Untersuchungen zu CLEAN II wurde das Messsystem AVL SPC 472 (Smart Sampler Modular) verwendet.

Die Messung wird im Teilstrom durchgeführt. Ein Teil des Abgases wird aus dem Auspuff nach Turbolader abgesaugt und mit gereinigter Luft abgekühlt. Diese Verdünnung soll die Mischungsvorgänge des Abgases in der Atmosphäre simulieren. Dabei scheiden sich zusätzlich zu den festen Bestandteilen, wie elementarer Kohlenstoff, Oxidasche, usw., auch aus kondensierten organischen Verbindungen sowie aus Sulfaten unter der Anlagerung von Wasser gebildete Aerosole auf den Filtern ab. Auf den Filtern werden somit auch die Partikel konserviert, die sich erst bei der Mischung des heißen Abgases mit der Umgebungsluft bilden. Das entspricht vermutlich dem Zustand, der tatsächlich auf die Umwelt bzw. den Menschen einwirkt, wobei aber die sicher unterschiedlichen Wirkungen von festen Teilchen und Aerosolen noch kaum untersucht sind.

3.8.3. Auswertung einer Partikelmessung aus stationärem Betrieb

Die Filterbeladung wird zunächst massenmäßig und dann chemisch analysiert.

Bei der Partikelmessung werden, wie oben beschrieben, neben den stark sichtbaren schwarzen Abgasbestandteilen (Kohlenstoff, Ruß) auch noch weitere weniger sichtbare bzw. andersfarbige Abgasbestandteile (Asche (grau, silber, rot, blau), Sulfate (gelb), Kondensate (gelb, braun) und Kohlenwasserstoffe (weiß) erfaßt. Um nähere Aussagen zur Partikelemission machen zu können, müssen die Partikel chemisch analysiert werden,

Als Beispiel für eine derartige chemische Analyse sind in Anlage G / 1 in Balkenform die prozentualen Anteile der einzelnen Komponenten über der Motorleistung aufgetragen. Die Messungen wurden am Vollmotor 6L48/60 bei stationär gefahrenen Lastpunkten mit konstanter Drehzahl durchgeführt. Der Motor war dabei so eingestellt, dass besonders, serienuntypisch, hohe Emissionen auftraten, um die Messauflösung zu verbessern.

Abgesehen von den Leerlaufwerten ist erkennbar, dass sich die Gesamtmasse der Partikel (pro m³- Abgas) über den Lastbereich nicht signifikant ändert. Die chemische Zusammensetzung der Partikel ändert sich dagegen deutlich. Während der Anteil an Organischem Kohlenstoff zur Vollast hin zurückgeht, steigt der Anteil an Sulfat und sulfatgebundenes Wasser kräftig an. Der Anteil an Asche und elementarem Kohlenstoff (Ruß) bleibt nahezu konstant.

Die Partikel-Messmethoden sind sehr "unhandlich". Neben dem technischen Aufwand wird dafür auch entsprechend ausgebildetes Personal benötigt. Der Motor muß einen stationären Betriebspunkt in entsprechender Beharrung fahren, wobei die Dauer der eigentlichen Partikelsammlung ca. 10 Minuten beträgt. Die einzelnen Filterplättchen müssen vor der Messung konditioniert (Temperatur, Luftfeuchte) und genau gewogen werden. Nach der Messung muß, wie

oben dargestellt, eine umfangreiche chemische Analyse vorgenommen werden. Auf dem Weg ins Labor müssen die beladenen Filter speziell konserviert (z.B. eingefroren werden), damit sich die Beladung nicht unter Reaktion mit der Umgebung verändert.

Es ist ersichtlich, dass sich ein derartiges Messverfahren nicht für einen wirtschaftlich vertretbaren Einsatz z.B: an Bord von Schiffen eignet. Dafür werden Messsysteme benötigt, die in einfacher Handhabung, nach entsprechender Einweisung auch vom Bordpersonal angewandt, eine der sichtbaren Rußemission entsprechenden Messgröße reproduzierbar darstellen können.

3.8.4. Rußmessverfahren

Es werden in der Praxis zur Rußmessung verschiedene Verfahren angewendet. Im Gegensatz zur Partikelmethode sind diese Rußmessverfahren teilweise einfacher und trotzdem mit ausreichender Reproduzierbarkeit durchzuführen. Bestimmte Verfahren (Opazität) eignen sich auch für die Aufzeichnung instationärer Vorgänge.

Es wurden im Rahmen von CLEAN II folgende Messmethoden diesbezüglich untersucht:

- Für Messung eines stationären Betriebspunktes:
 - Rußmessung mit Filterpapiermethode nach Vorschrift BOSCH
 - AVL 415 Filterpapiermethode
- Für instationäre Belastungsvorgänge
 - AVL 439 Durchlichtverfahren im Teilstrom (Opazität)
 - SBS 1000 Durchlichtverfahren im Vollstrom (Opazität)
 - Sick OMD 41 Durchlichtverfahren im Vollstrom (Opazität)

3.8.4.1. Rußmessverfahren für stationären Motorbetrieb

Hierbei handelt es sich üblicherweise um Verfahren, bei denen aus dem Abgasvollstrom nach Turbine mittels Sonde eine bestimmte Abgasmenge durch ein Filterpapier hindurch abgesaugt wird. Der Absaugungs- und anschließende Auswertungsvorgang dauert eine gewisse Zeit. Somit sind diese Messverfahren nur bei stationärem Motorbetriebszuständen anwendbar.

> BOSCH ETD 020.00 / ETD020.50

Hersteller: Robert Bosch GmbH, Deutschland

Mittels Handpumpe wird ein bestimmtes Abgasvolumen durch ein in die Pumpe eingelegtes Filterpapier gezogen. Nach diesem Vorgang wird das Filterpapier aus der Pumpe entnommen und mittels eines elektronische Gerätes ausgewertet. Dabei wird ein Messaufnehmer auf das geschwärzte Filterpapier gesetzt, der sowohl eine definierte Lichtquelle als auch eine Fozelle enthält. Das je

nach Schwärzungsgrad mehr oder weniger reflektierte Licht wird in einen digital ablesbaren Messwert umgesetzt.

Die Auswerteeinheit wird vor jeder Messung mittels eines weißen, unbeladenen Filterpapiers auf einen Nullwert justiert. Der Messwert liegt zwischen 0 = weiß und 10 = schwarz.

Die Anwendung dieser Methode ist auch an Bord von Schiffen sehr einfach, vor allem weil das Gerät nur ca. 1,5 kg wiegt und leicht transportierbar ist. Aus diesem Grund wurde auch bei den Untersuchungen für CLEAN II, wenn es sich um stationäre Messungen handelte und nicht anders angegeben ist, die "Rußmessung BOSCH" (RB) angewendet.

Aus einem Vergleich von gemessenen RB-Werten mit einer gleichzeitigen, subjektiven Beobachtung der Abgasfahne kann z.B. für einen Vollmotor 6L48/60 folgende Beurteilung zugeordnet werden:

- bis ca. RB = 0,3 ist der Auspuff nicht sichtbar
 - bis ca. RB = 0,6 ist der Auspuff schwach sichtbar
 - um ca. RB = 0,8 ist der Auspuff deutlich sichtbar
 - ab ca. RB = 1,2 ist der Auspuff deutlich dunkelgrau
- Es muss dabei eine Messtoleranz von $\pm 0,1$ angenommen werden.

Die o.g. Angaben sind, wie gesagt, rein subjektiv und abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, wie z.B. Hintergrund (Wolken), Beleuchtung (Sonnenstand), Windverhältnissen, Auspuffaustrittsquerschnitt usw. Es soll mit dieser Aufstellung auch nur ein grober Eindruck vermittelt werden, um sich unter den in diesem Bericht veröffentlichten Diagrammen etwas vorstellen zu können.

> **AVL 415**

Hersteller: AVL List GmbH, Österreich

Dieses Gerät arbeitet prinzipiell ähnlich der o.g. BOSCH-Einrichtung, nur dass die Kalibrierung, Probenahme und Auswertung automatisch stattfindet. Dadurch werden Störeinflüssen durch die "händische" Tätigkeit weitgehend ausgeschlossen. Allerdings ist das Gerät deutlich teurer und auch unhandlicher (ca. 20 kg) und somit für einen ambulanten Einsatz nicht geeignet.

Auch die im Folgenden aufgelisteten Verfahren für instationäre Belastungszustände sind ebenfalls für stationären Motorbetrieb geeignet

3.8.4.2. Rußmessverfahren für instationären Motorbetrieb

Bei einem instationären Beschleunigungsvorgang, der bei großen Schiffsdieselmotoren in einem Zeitraum von ca. einer Minute abläuft, sind die o.g. Filterpapier-Methoden nicht anwendbar. Hier bieten sich Durchlicht-Systeme an, die im Schornstein nach Turbolader fest installiert sind an. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden folgende Messgeräte installiert und benutzt:

> **AVL 439**
Hersteller: AVL List GmbH, Österreich

Bei diesem Gerät wird ein Teilstrom des Abgases kontinuierlich aus dem Auspuff über eine separate Kammer mit einer foto-optischen Opazitätsmessstrecke gesaugt. Für Vergleichsmessung, Kühlung und Reinigung braucht das Gerät eine externe Pressluftversorgung.

Das System liefert analoge Meßsignale von 0 – 100 % Opazität.

> **SBS 1000**
Hersteller: SBS technology, Dänemark

Dieses Gerät arbeitet mit getrennter Lichtquelle und Fozelle, die im Auspuff sich gegenüberliegend fest installiert werden. Es arbeitet also im Vollstrom. Aufwendig ist hier die gegenseitige Ausrichtung von Lichtquelle und Empfänger, die sich sowohl im kalten (Anfahren) als auch im heißen Zustand des Auspuff-Rohres nicht deaxieren darf. Auch dieses Gerät liefert analoge Opazitäts-Messwerte (0 % - 100 %). Zur Kühlung und Reinigung wird Raumluft über Filter mittels separatem Gebläse durch die Optik geblasen. Das Gerät ist im Aufbau einfach und auch kostengünstig.

> **Sick OMD 41-02**
Hersteller: Sick AG optic electronic, Germany

Dieses Gerät arbeitet ebenfalls im Vollstrom, hat aber Lichtquelle und Fozelle in einem Gehäuse. Auf der gegenüberliegenden Seite muß im Auspuff ein Reflektor montiert werden. Auch hier muß besondere Sorgfalt auf die Ausrichtung der beiden Teilgeräte zueinander gelegt werden. Ein beigestelltes Gebläse für Reinigungs- und Kühlluft ist auch hier nötig. Die Handhabung des Sick-Gerätes ist einfach. Es liefert ebenfalls analoge Opazitätswerte von 0 % bis 100 %.

Die meisten Opazitäts-Messungen im Rahmen CLEAN II wurden mit diesem System vorgenommen. Die beiden anderen Geräte wurden nur zu Vergleichsmessungen herangezogen.

3.8.4.3. Korrelation der einzelnen Rußmessverfahren

Zur Beurteilung der einzelnen Geräte wurde untersucht, inwieweit die Messwerte zueinander korrelieren.

> **Filterpapiermethode (Bosch zu AVL 415)**

Aus Anlage G / 2 ist ersichtlich, dass die beiden Filterpapiermethoden gut miteinander korrelieren. Auch bei dem Vergleich von zwei unterschiedlich großen Diesel-Motoren auf unterschiedlichen Prüfständen (6L48/60 und 7L16/24) liegen die Trendlinien beider Motoren dicht nebeneinander.

> **Opazität (AVL 439 zu SBS 1000 zu Sick OMD 41-02)**

Bei bestimmten Beschleunigungsversuchen am 6L48/60 wurden die Opazitäten gleichzeitig mit den drei o.g. Messsystemen aufgenommen. Als Beispiel ist in Anlage G / 3 eine derartige Messung dargestellt.

Der zeitliche Verlauf ist bei allen drei Geräten nahezu identisch, was gerade bei instationären Beschleunigungsvorgängen von Wichtigkeit ist. Es treten also auch bei dem AVL 439 keine zeitlichen Verzögerungen durch die Messung im Teilstrom auf. Der Unterschied in den angezeigten Maximalwerten ist berücksichtigbar.

Wenn nicht anders angegeben wurden die in diesem Bericht vorliegenden Opazitätsmessungen mit dem Sick-Gerät durchgeführt.

> **Filterpapiermethode zu Opazität**

Um instationär und stationär gefahrenene Motorzustände von der erzeugten Rußemission her vergleichen zu können, wurde in Anlage G / 5 eine Korrelation zwischen der mittels Sick OMD 41 gemessenen Opazität und dem mittels Bosch ETD 020.00 gemessenen Rußwert dargestellt. Dabei wurden natürlich nur stationäre Lastpunkte gefahren.

Auch hier wurden wieder zwei verschieden große Motoren (6L48/60 und 8L27/38) auf unterschiedlichen Prüfständen miteinander verglichen. Auch in diesem Fall liegen die beiden Trendkurven beieinander.

Um auch hier nochmal einen Hinweis auf einen subjektiven Eindruck eines Beobachters der Abgasfahne zu geben, kann mit den unter Abschnitt 3.8.4.1. dargestellten Einschränkungen folgender Anhaltswert dienen:

Sichtbarkeitsgrenze ist ca. 0,4 RB (Bosch)
das entspricht ca. 8 – 10 % Opazität (Sick)

3.8.5. Einfluss der Kraftstoffart auf die Korrelation Sick - RB

In Anlage G / 5 wurde nochmals die Korrelation zwischen Sick und RB dargestellt. Es sind hier wiederum die auch schon in Anlage G / 4 gezeigten Werte des Motors 8L27/38. Diesmal wurden sie aber nach der gefahrenen Kraftstoffart unterschieden. Es wurden für die Messungen drei verschiedene Kraftstoffe: Dieselöl (MDF), Schweröl (HFO) und Gasöl (MGO) gefahren. Erkennbar ist hier, dass kein signifikanter Unterschied im Trend vorhanden ist.

3.8.6. Korrelation Partikel- zu Ruß-Messverfahren

Eine Korrelation zwischen den Partikel-Gesamtmassen und Ruß- oder Opazitäts-Messungen ist, wie bereits auch im Vorgängervorhaben CLEAN dargestellt, nicht gegeben.

Bei der Partikelmessung werden neben den stark sichtbaren, schwarzen auch noch weitere weniger sichtbare Abgasbestandteile erfaßt. Um nähere Aussagen zur Partikelmessung machen zu können, müssen die Partikel chemisch analysiert werden.

Eine gewisse Analogie zwischen dem elementaren Kohlenstoffanteil aus der chemischen Analyse und Sichtbarkeit des Abgases konnte in den hier vorliegende Untersuchungen gefunden werden.

In Anlage G / 2 ist der Verlauf des Gehaltes an elementarem Kohlenstoff an der Gesamtpartikelmasse, wie schon in Anlage G / 1 dargestellt, noch einmal über der gefahrenen Leistung aufgetragen. Zu den gleichzeitig gemessenen Rußwerten mittels Bosch-Handpumpe (RB) und Opazitäten (Sick OMD 41) ist eine Analogie erkennbar.

3.8.7. Fazit Partikel- / Ruß-Messverfahren

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen kann keine Aussage getroffen werden, dass aus der Partikel-Massenmessung oder aus der nachträglichen chemischen Partikel-Analyse Ergebnisse gewonnen werden, die den optischen Eindruck der Abgasfahne oder eines Rußstoßes wiedergeben können.

Der hohe Anteil an Sulfaten und daran angelagertes Wasser wird direkt aus dem Schwefelgehalt des Kraftstoffes erzeugt und kann durch motorische Maßnahmen nicht beeinflusst werden.

Die in den vorliegenden Untersuchungen dargestellten Erkenntnisse über Verbesserung-Möglichkeiten der Rußemission durch Optimierung motorischer Parameter werden dagegen durch eine Ruß- bzw. Opazitätsmessung in ausreichender Qualität wiedergeben.

Es kann jedoch bei einer Verbesserung des Rußwertes nicht automatisch auf eine Verbesserung des Partikelwertes oder umgekehrt geschlossen werden. Insofern korrelieren diese beiden Messverfahren nicht untereinander.

Erst zwischen dem Anteil des elementaren Kohlenstoffes aus der chemischen Analyse einer Partikelmessung und einer Ruß- bzw. Opazitätsmessung konnte eine gewisse Analogie gefunden werden.

Die Rußmessverfahren selbst, sowohl die Opazitätsmessungen und als auch die Filterpapiermethoden, geben die Trübung der Abgasfahne wieder, wie sie ein Beobachter unter bestimmten Umständen wahrnehmen kann. Dabei ist die Filterpapiermethode nur bei stationärem Betrieb anwendbar, wogegen die Opazitätsmessungen auch bei instationären Beschleunigungsvorgängen eingesetzt werden können.

Eine Korrelation zwischen den verschiedenen Rußmessmethoden konnte dargestellt werden.

4. Zusammenfassung / Anwendung des Gesamtkonzeptes

4.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsvorhabens: "Instationäre Ruß- / Partikelemission von Schiffsdieselmotoren (CLEAN II)" waren für MAN B&W Diesel AG (Augsburg) folgende Forschungsziele gestellt und wurden termingerecht erreicht:

- Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung des Emissionsverhaltens von Schiffsdieselmotoren-Motoren bei instationären Belastungsvorgängen und Untersuchung deren Wirksamkeit:
 - Variation der Einspritzintensität (nockenbetätigte Einspritzpumpe, Common Rail)
 - Querschnittsänderung der Einspritzdüse während des Hochfahrens ("KOAX-Düse", separate Teillastdüse)
 - Kraftstoff-Wasser-Emulsion
 - Verbesserte Luftversorgung mit Zusatzluft (Jet-Assist, Hilfsluftgebläse, Zusatzluft direkt in den Zylinder)
 - Verbesserte Luftversorgung mit veränderter Turbolader-Charakteristik (Teillast-Turbolader, Varianten Turboladergeometrie, VTA)
 - Variation der Ladelufttemperatur
 - Optimierung eines Gesamt-Motormanagementsystem als Verbindung der o.g. Einzelmaßnahmen

- Vergleich von verschiedenen Messverfahren und Untersuchung deren Tauglichkeit zur Darstellung der sichtbaren Emission (auch instationär, z.B. Rußstoß)

4.2. Durchführung

Im Versuchszeitraum vom 01. Juni 1999 bis zum 31. Mai 2002 wurden die Untersuchungen an vier verschiedenen Versuchsmotoren (7L16/24, 8L27/38, 6L32/40 und 6L48/60) sowie an einer Reihe von Serienmotoren durchgeführt.

4.3. Ergebnisse

4.3.1. Untersuchung von Einzel-Maßnahmen zur Verringerung der Ruß- / Partikelemission bei instationären Belastungsvorgängen.

Das Verbesserungspotential durch Modifikation von nockenbetätigten Einspritzpumpen ist gering, sofern die Einspritzsysteme für den stationären Betrieb bereits optimiert wurden. Z.B. lassen sich Einspritzdrücke wegen fest vorgegebener Bauteilbelastungsgrenzen nicht beliebig steigern, um im Teillastbetrieb einen positiven Effekt zu erreichen. Hier ist der Einsatz eines Common-Rail-Systems durchaus sinnvoll. Durch den bei Teillast höheren Raildruck in Verbindung mit nicht überhöhten Vollast-Einspritzdrücken kann der Motor auf Laständerungen schneller und genauer reagieren.

Mittels Querschnittveränderung der Einspritzdüse während des Hochfahrens läßt sich ein positiver Einfluß auf die Teillastruß-Emission bis hin zum Leerlauf erreichen. Hierbei ist die "KOAX-Düse" einer separaten, seitlichen Teillastdüse vorzuziehen. Auch das instationäre Durchfahren des Umschaltpunktes von einem Querschnitt auf den anderen ist problemlos darstellbar. Allerdings muß für einen sinnvollen Einsatz das System für einen Leistungsbereich oberhalb von ca. 40% noch konstruktiv verbessert werden. Eine dafür nötige Neuentwicklung war im Rahmen CLEAN II nicht vorgesehen.

Das Kraftstoff-Wasser-Emulsions-System (KWE), das ursprünglich für die Reduzierung der NO_x-Emission entwickelt wurde, zeigte im unteren Niedriglastbetrieb sowohl bei stationären als auch instationären Motor-Fahrzuständen eine gewisse Rußwertverbesserung. Allerdings sind hier noch zusätzlich Modifikationen am Einspritzsystem (Düsenspezifikation usw.) nötig. Wegen des technischen Aufwandes für ein KWE-System erscheint der Einsatz nicht gerechtfertigt, wenn außer einer geringen Rußverbesserung nicht noch weitere Features, wie z.B. NO_x-Reduzierung gefordert sind.

Durch den Einsatz eines Jet-Assist läßt sich der Rußstoß bei instationären Belastungsvorgängen deutlich reduzieren. Ähnliche Verbesserungen werden auch mit einer "direkten Lufteinblasung" in den Zylinder während der Beschleunigungsphase erreicht. Ein Hilfsluftgebläse verbessert ebenfalls den transienten Ruß, ist aber vom technischen Aufwand her vor allem bei längerem Niedriglastbetrieb (z.B: spezielle Schiffsanwendungen) gerechtfertigt.

Eine Anpassung der Turbolader-Charakteristik, mit der sehr wohl ein geringerer, stationärer Teillastruß darstellbar ist, muß für einen instationären Motorbetrieb hinsichtlich Ruß-Emission nicht besser sein, sondern kann diesen sogar verschlechtern.

Eine Anhebung der Ladelufttemperatur verschlechtert erkennbar die Rußstoß-Entwicklung bei instationären Betriebsvorgängen. Da jedoch diese Maßnahme die stationäre Ruß-Emission deutlich verbessert, muß evtl. eine kurzzeitige Verschlechterung in Kauf genommen werden.

4.3.2. Optimierung eines Gesamt-Motormanagement zur Verringerung der Ruß- / Partikelemission bei instationären Belastungsvorgängen.

Es ist auch bei größeren Viertakt-Dieselmotoren für Schiffsantriebe möglich nicht nur den Stationärbetrieb ohne sichtbare Rußemission darzustellen, sondern auch den Rußstoß während instationärer Beschleunigungsvorgänge weitgehend zu beseitigen.

Dafür müssen die unter Abschnitt 4.3.2. (s.o.) dargestellten Einzel-Maßnahmen aufeinander abgestimmt werden.

4.3.3. Vergleich von Messverfahren zur Darstellung der Ruß- / Partikelemission bei instationären Belastungsvorgängen.

Abgaspartikel beinhalten lt. Definition den motorisch beeinflussbaren und wegen seiner schwarzen Farbe deutlich sichtbaren Ruß, aber auch Asche aus Kraftstoff und Schmieröl, kondensierte hochsiedende Kohlenwasserstoffe und vor allem Sulfate mit angelagertem Wasser.

Der hohe Anteil an Sulfaten und daran angelagertes Wasser wird direkt aus dem Schwefelgehalt des Kraftstoffes erzeugt und kann durch motorische Maßnahmen nicht beeinflusst werden. Partikel-Messverfahren können den optischen Eindruck einer Abgasfahne nicht wiedergeben, wenn mit in der Schifffahrt üblichen Kraftstoffen (hoher Schwefelgehalt) gefahren wird.

Die untersuchten Ruß- (Filterpapier) bzw. Opazitäts-Messmethoden sind dagegen in der Lage, die Sichtbarkeit der Abgasemission darzustellen. Mit der Opazitätsmethode können auch transiente Rußstöße erfasst werden.

Eine gewisse Analogie zwischen einer Ruß-/ Opazitätsmessung und dem Rußanteil aus der Partikelmessung kann erst in der nachträglichen chemisch-analytischen Bestimmung der Zusammenstellung der gesammelten Partikel gefunden werden.

4.4. Verwertung der Ergebnisse

Es wurden Grundlagenerkenntnisse erarbeitet, die hinsichtlich motorischer Maßnahmen zur Rußminderung insbesondere während instationärer Belastungsvorgänge unmittelbar für die künftige Entwicklung herangezogen werden können.

Die Ergebnisse zum Partikelemissionsniveau und zur Beeinflussungsmöglichkeit zeigen, dass mit der pauschalen Größe "Partikel" keine Korrelationen zum Motorzustand möglich sind. Erst eine aufwendige chemische Analyse zeigt, welche Partikelkomponenten vom Motor verursacht sind und welche aus den Kraftstoffeigenschaften herrühren. Die Partikeldefinition nach ISO 8178 eignet sich somit nicht zur gesetzlichen Reglementierung von großen Diesel-Motoren für Schiffsantriebe.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist geplant.

5. Literaturverzeichnis

- /1/ CLEAN – Emissionsarme Schiffsantriebsanlage
Teilprojekt MAN B&W Diesel AG
BMBF-Forschungsbericht 18 S 0080 C vom 31.07.1998
- /2/ Zeitlmeir, Albert / MANpilot / 03.05.2000
(MAN B&W Diesel – interner Bericht)
- /3/ Haatuft, Morten / Diplomarbeit / Mai 2001
Investigation of instruments for particulate matter measurements
on large 4 stroke diesel engines
(MAN B&W Diesel – interner Bericht)

CLEAN II - Teilprojekt von MAN B&W

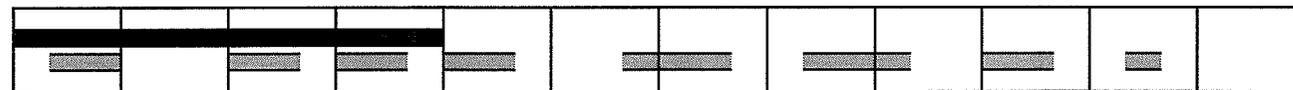


1. Motormanagement zur Erzielung niedrigster Partikel- / Rußemissionen bei instationärem Motorbetrieb

A) Variation der Einspritzintensität



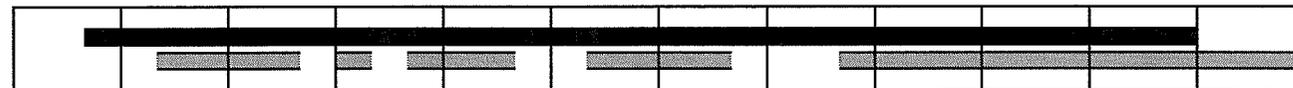
B) Querschnittsänderung der Einspritzdüsen



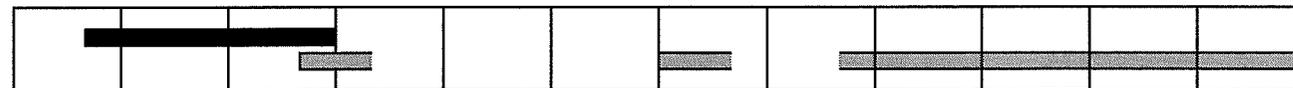
C) Kraftstoff-Wasser-Emulsion



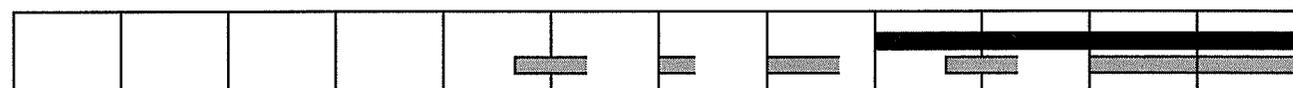
D) Verbesserte Luftversorgung



E) Variation der Ladelufttemperatur

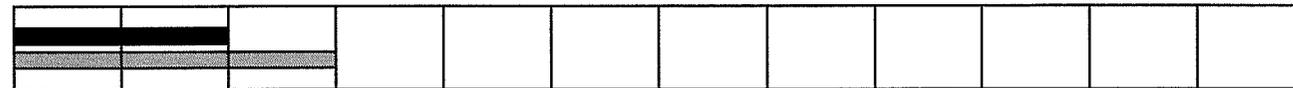


F) Optimierung eines Gesamt-Motormanagementsystems

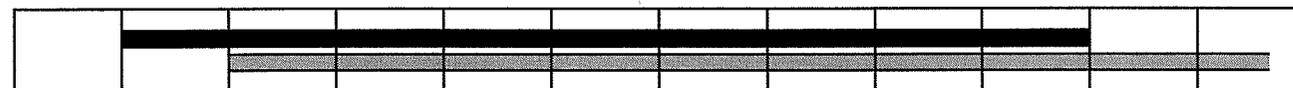


2. Ermittlung der bei instationärem Motorbetrieb auftretenden Partikel- / Rußemission

G) Beschaffung geeigneter Meßeinrichtungen



H) Vergleich von Meßeinrichtungen / Iststandsermittlung für Serienmotoren



I) Instationäre Messungen bei Anwendung von 1.



Jun-Aug	Sep-Nov	Dez-Feb	Mär-Mai	Jun-Aug	Sep-Nov	Dez-Feb	Mär-Mai	Jun-Aug	Sep-Nov	Dez-Feb	Mär-Mai
1999			2000				2001			2002	

■ Ursprüngliche Planung v. Juni 1999

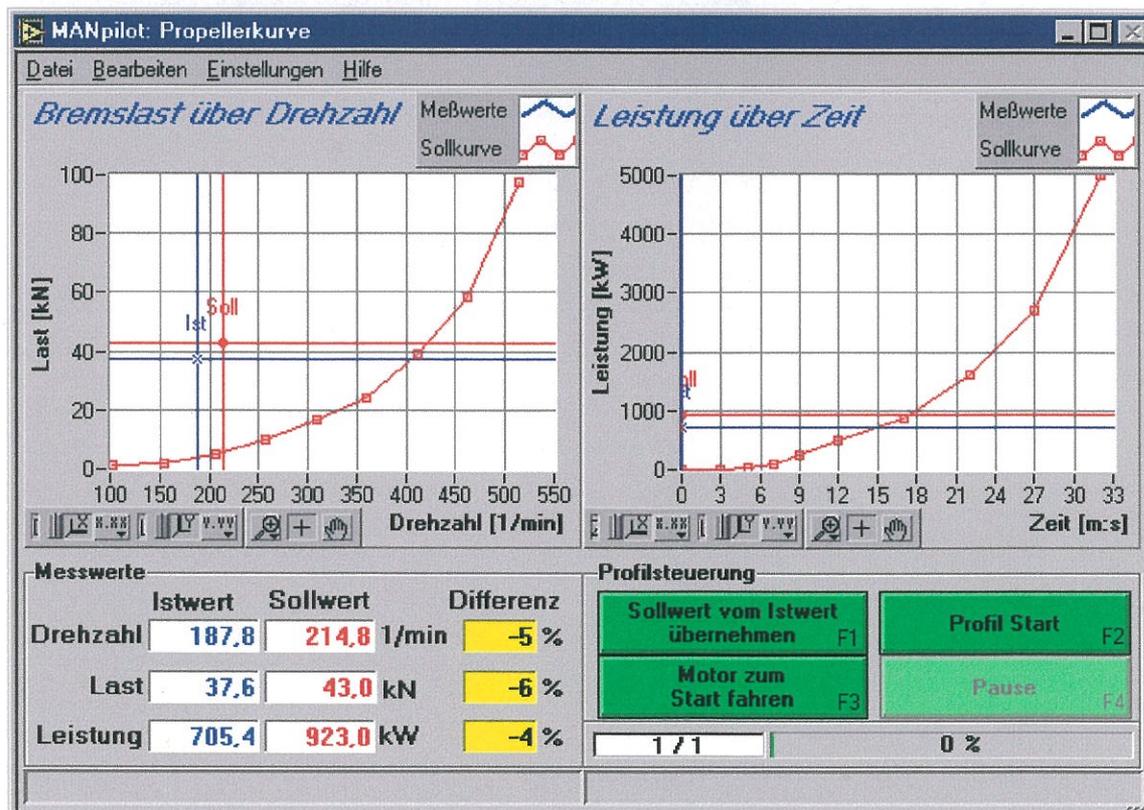
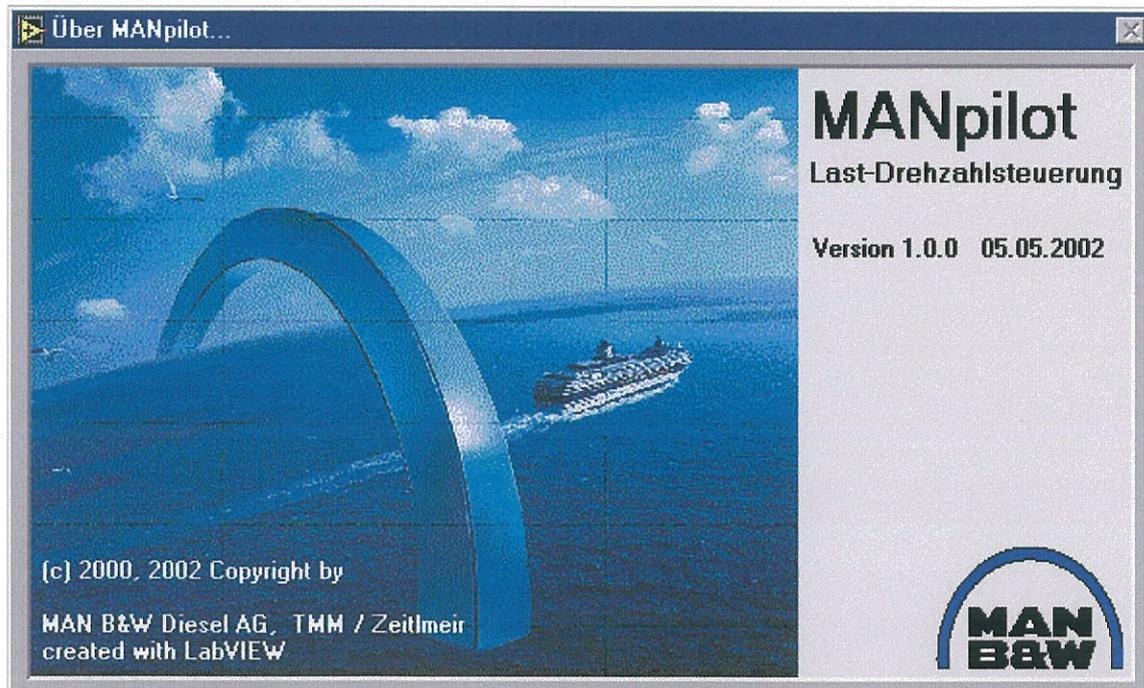
■ tatsächlicher Ablauf

Versuchsdurchführung allgemein

CLEAN II



Tabellen orientiertes Steuerprogramm
für reproduzierbare Motorbelastungsvorgänge

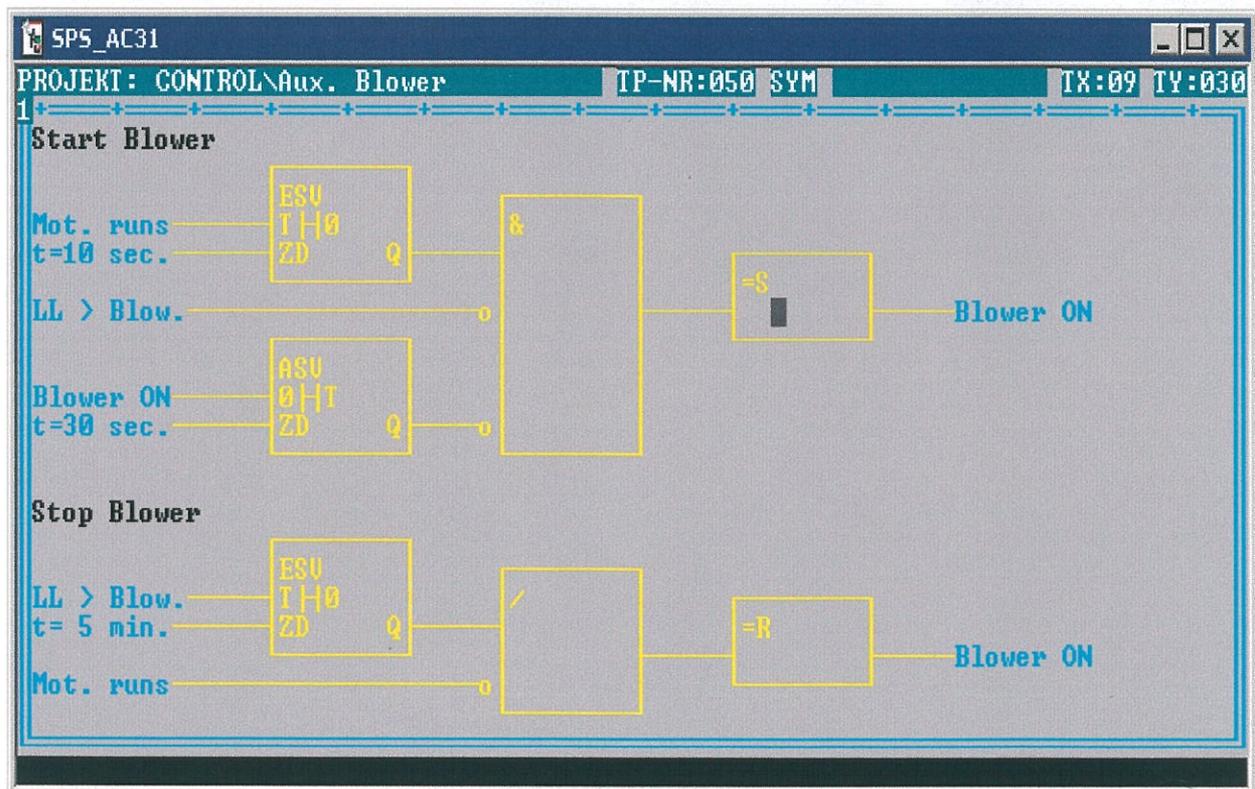


Versuchsdurchführung allgemein

CLEAN II



Speicher Programmierbare Steuerung
für die Schaltung der Komponenten und Motorhilfseinrichtungen



Versuchsdurchführung allgemein

CLEAN II



Mehrkanalmeßsystem μ -MUSYCS
für parallele Aufnahme von mehreren, sich verändernden Messgrößen

The screenshot shows the main configuration window of the µ-Musycs software. The title bar reads 'µ-Musycs'. The menu bar includes 'Datei', 'Einstellungen', 'Messen', 'Extras', 'Kanäle', and 'Gerät ?'. Below the menu bar are several icons for file operations and a play button. The main area is titled 'Einstellungen der verfügbaren Kanäle des Gerätes' and contains two sections: 'Aktive Kanäle: 0' and 'Parameter des selektierten Kanals:'. The parameters listed are: Gerät, Name, Typ, Werteabstand: 0, Meßbereich: 0, Werteanzahl: 0, Aufnahmen: 0, Vorverarbeitung: -, and Starttrigger-Nr.: keiner. A play button is located to the right of these parameters. At the bottom left, there is a status bar that says 'Laden der Geräteeinstellungen...'. To the right of the main window is a smaller window titled 'µ-Musycs-Start' which contains a menu with the following options: Neustart, Experiment laden..., Letztes Experiment laden (TR32L6-1), Basisverzeichnis..., Gerät auswählen..., ENDE, and a checked option 'Letztes Experiment merken'.

This screenshot displays the µ-Musycs software in a data acquisition state. The main window title is 'µ-Musycs - [TR32L6-2 / Versuchsnr.: 2]'. The menu bar is the same as in the previous screenshot. The main area contains four stacked plots showing real-time data over a 6-second interval. The top plot shows 'nMot' (rpm) and 'F_Bremse' (kN). The second plot shows 'nATL' (10^3 rpm) and 'pL' (bar). The third plot shows 'pA' (bar) and 'Si_Start' (V). The bottom plot shows 'russ_Sic' (%), 'rst', 'tvTurb', and 'tvTurb2' (°C). To the right of the plots is a 'nMot' parameter list window with the following values: nMot = 472.3 rpm, F_Bremse = 14.5 kN, nATL = 12120 rpm, rst = 45.7 %, pA = 297 mbar, pL = 1294 mbar, russ_Sic = 10.77 %, Si_Fahrh = 448 rpm, Si_Start = -0.0 V, tvTurb = 517 °C, and tvTurb2 = 504 °C. At the bottom right, there is a 'pL' plot window showing a dense, noisy signal in blue, with the y-axis ranging from 45.3 to 46.2 and the x-axis from 1.25 to 1.40 bar.

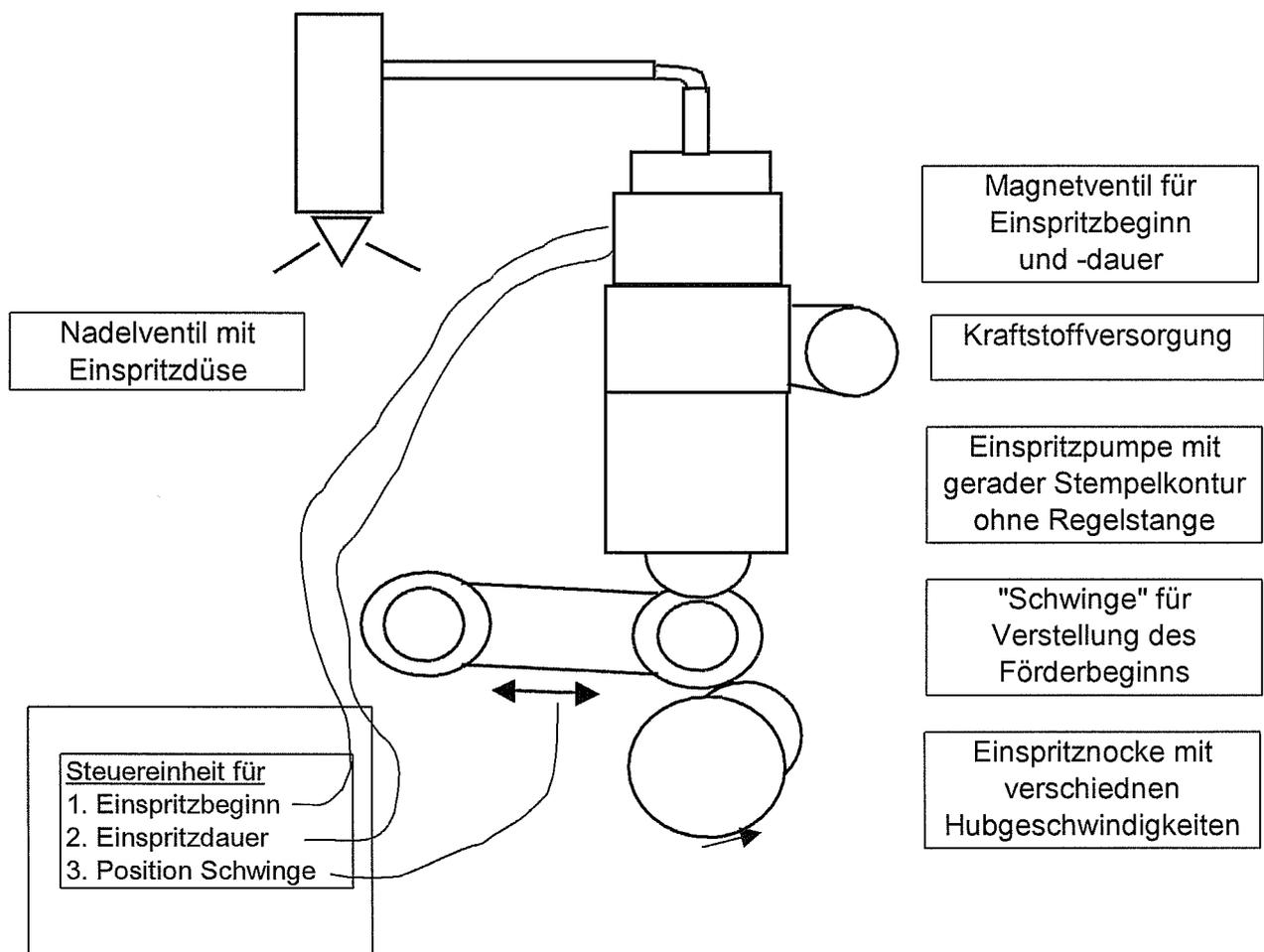
Variation der Einspritzintensität

CLEAN II



Ventilgesteuerte Einspritzpumpe

Funktions-Skizze



Variation der Einspritzintensität

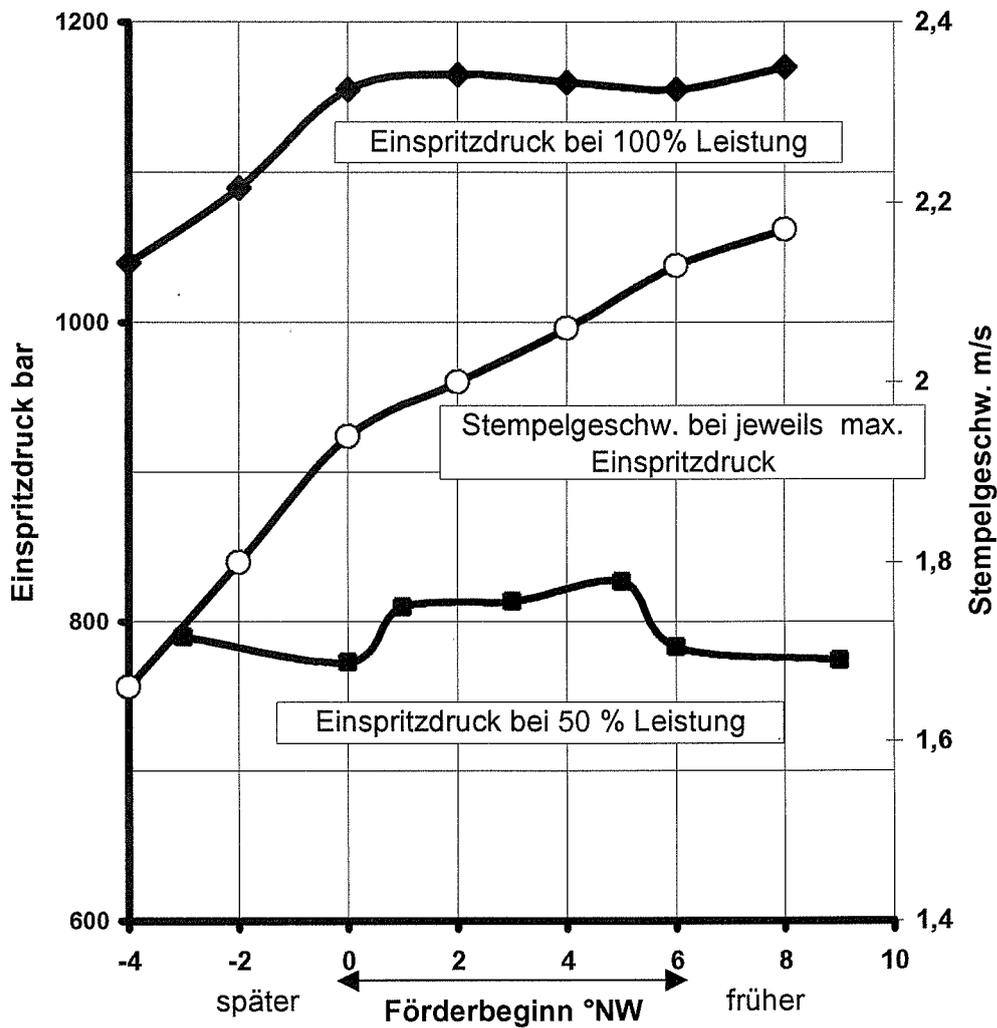
CLEAN II



Ventilgesteuerte Einspritzpumpe

Einfluß der Stempelhubgeschwindigkeit auf den Einspritzdruck

Messungen am Komponentenprüfstand



Variation der Einspritzintensität

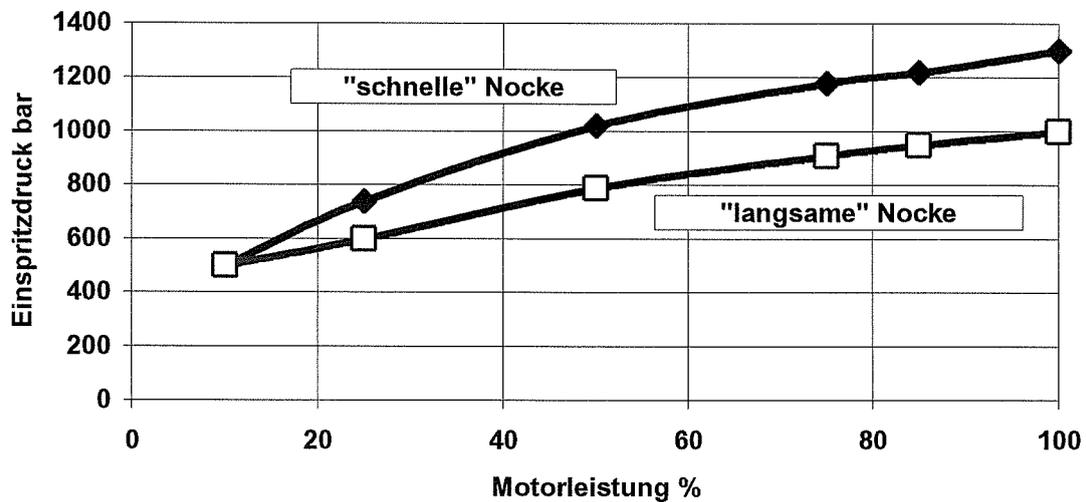
CLEAN II



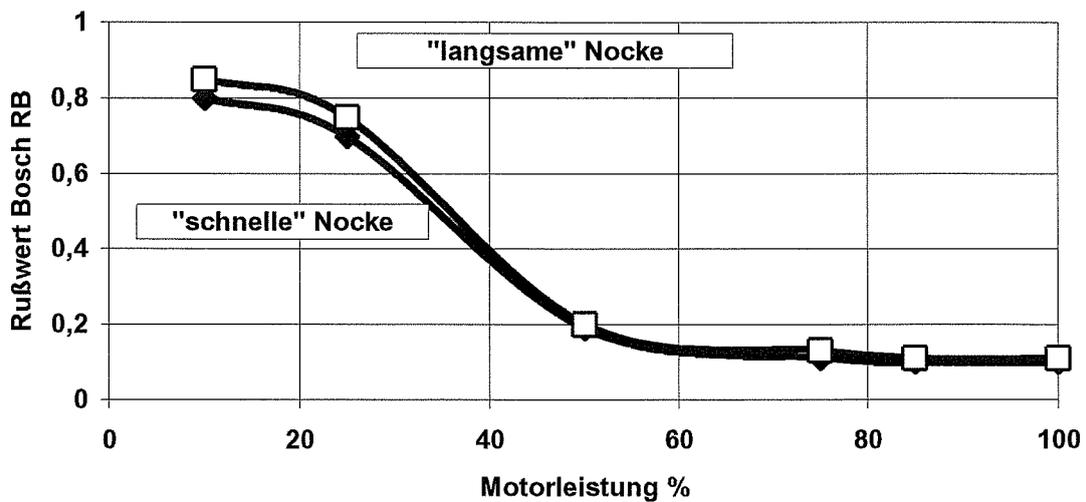
Ventilgesteuerte Einspritzpumpe

Messungen am Vollmotor
6L48/60 - 1130086 (stationäre Meßpunkte)

Einfluß der Stempelhubgeschwindigkeit auf den Einspritzdruck



Einfluß der Stempelhubgeschwindigkeit auf den Rußwert



Meßgenauigkeit bei RB-Wert +/- 0,1

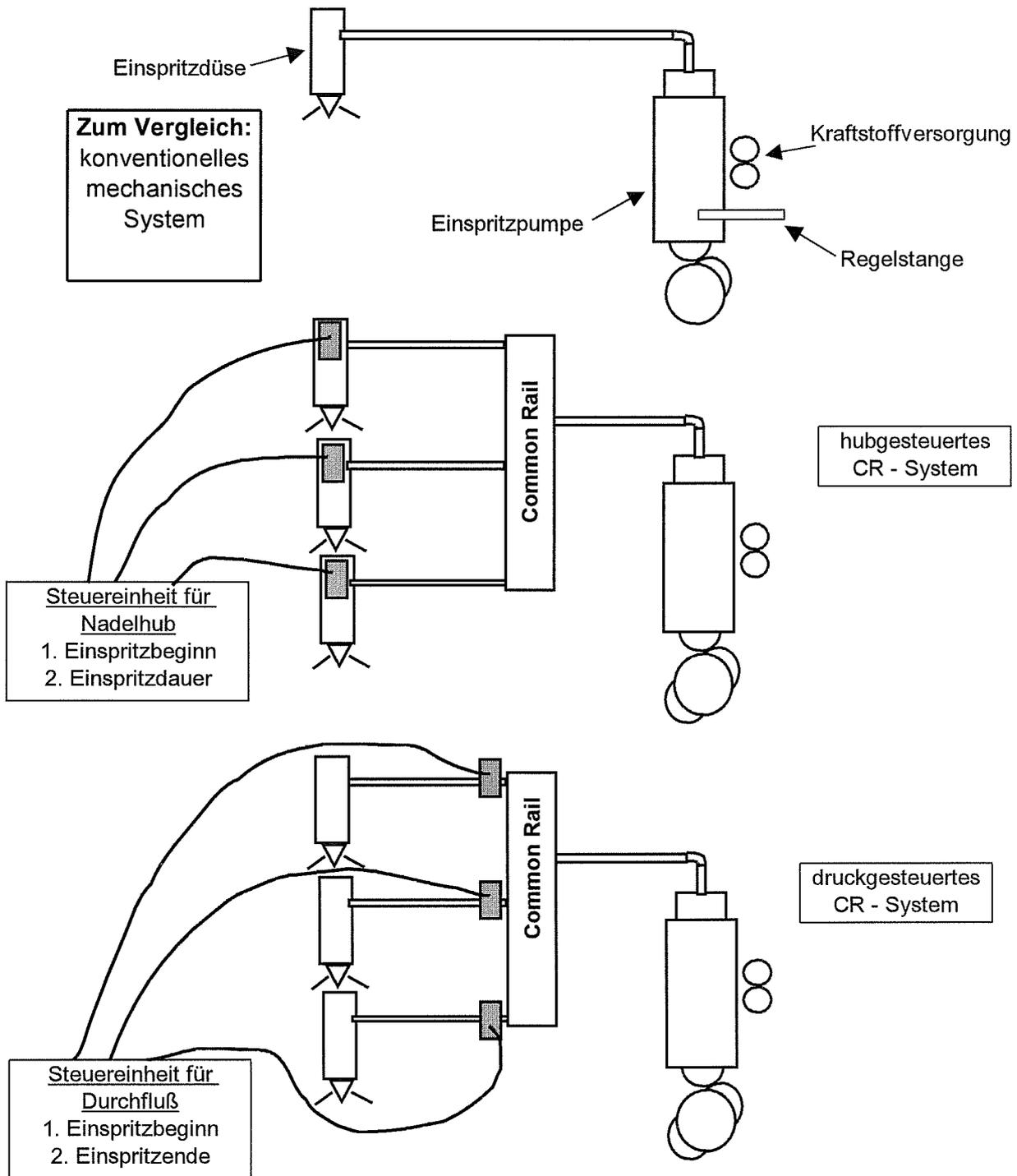
Variation der Einspritzintensität

CLEAN II



Common Rail (CR)

Funktions-Skizze / Prinzip Vergleich



Variation der Einspritzintensität

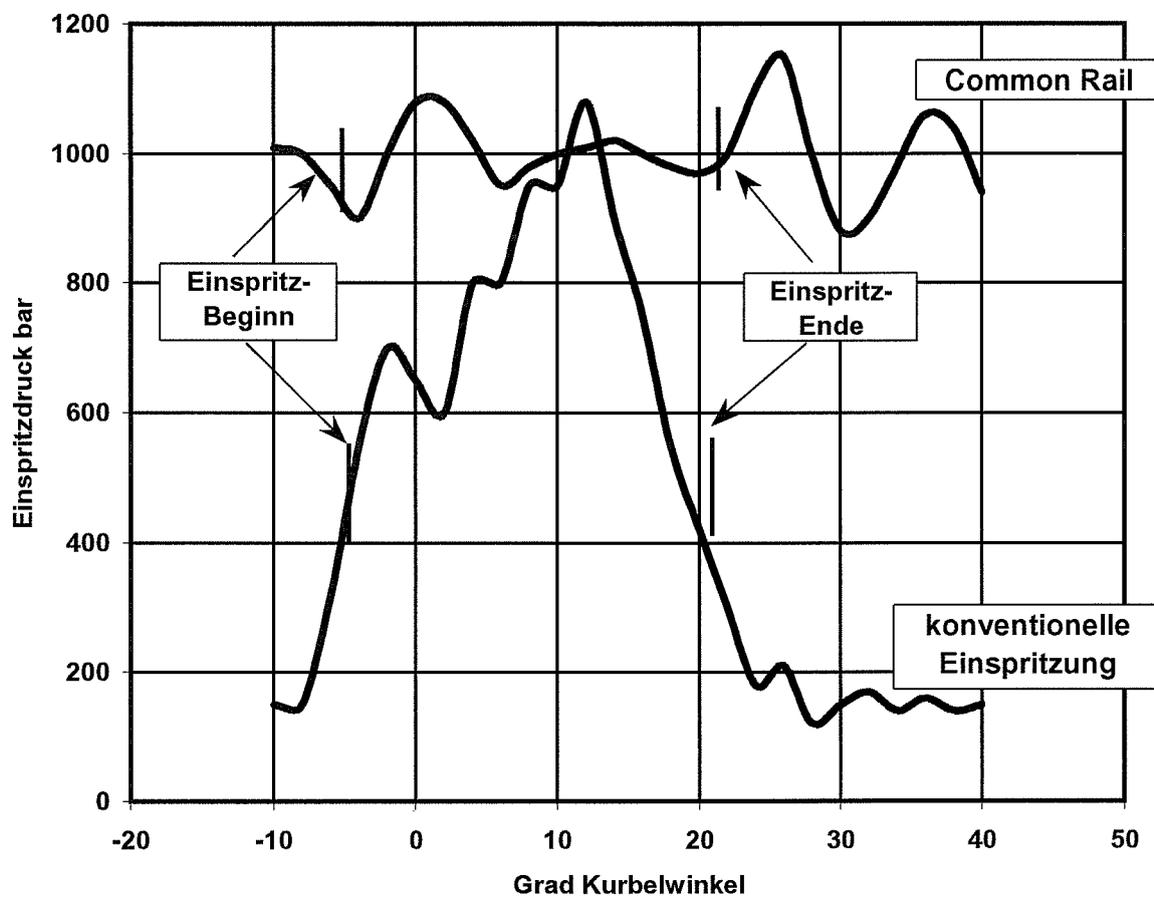
CLEAN II



Common Rail (CR)

Einspritzdruckverläufe / Vergleich der Systeme

Betrieb bei ca. 60 % Leistung
7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

CLEAN II

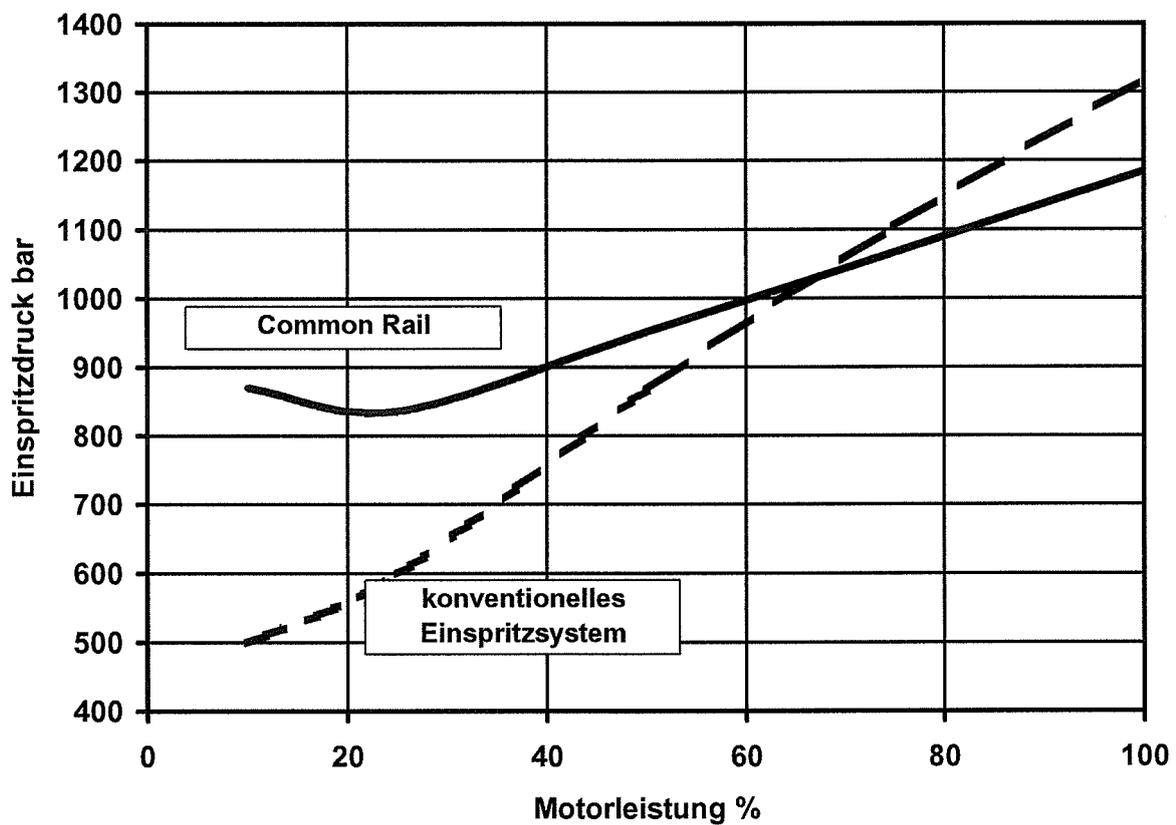


Common Rail (CR)

Einspritzdruck über der Last / Vergleich der Systeme

Kraftstoffart Schweröl

stationäre Meßpunkte
7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

CLEAN II



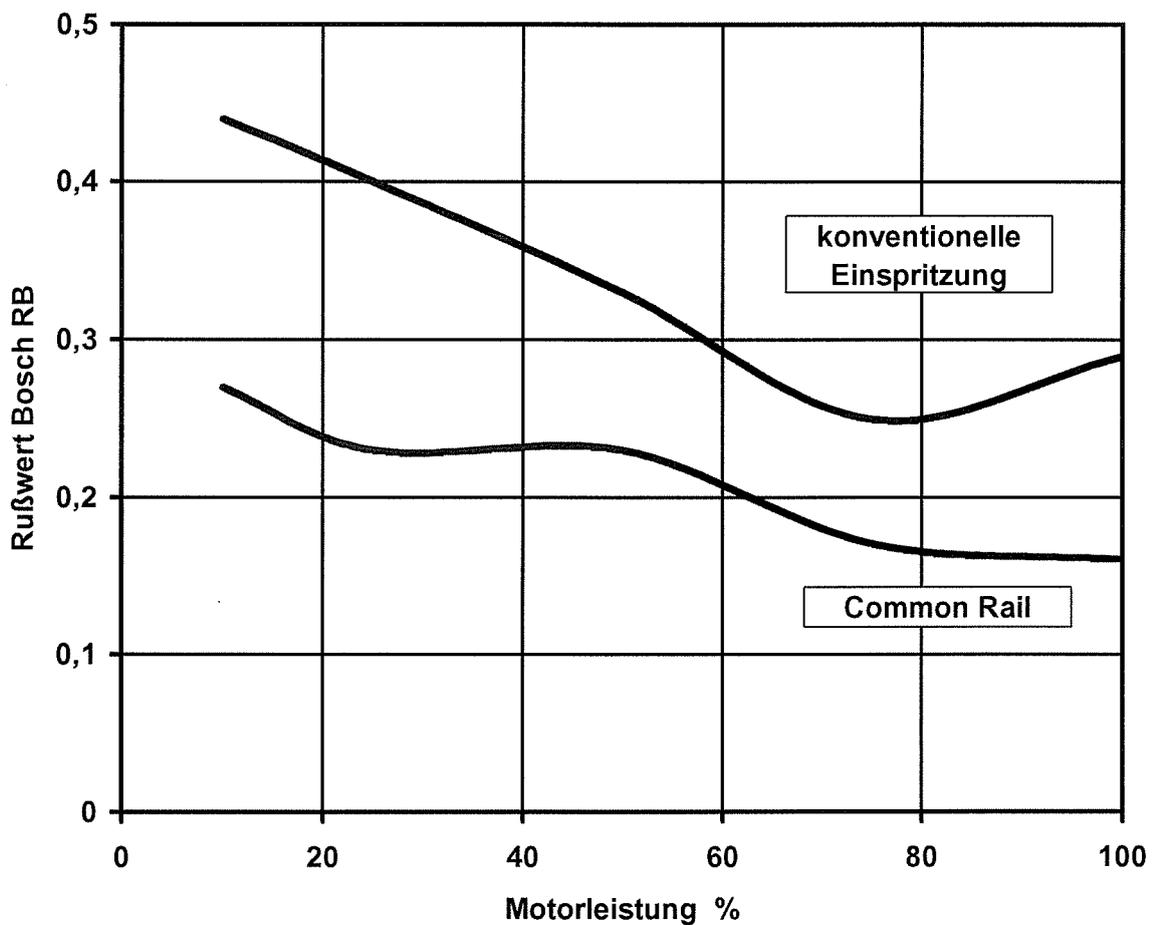
Common Rail (CR)

Ruß-Emission über der Last / Vergleich der Systeme

Kraftstoffart Schweröl

stationäre Meßpunkte

7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

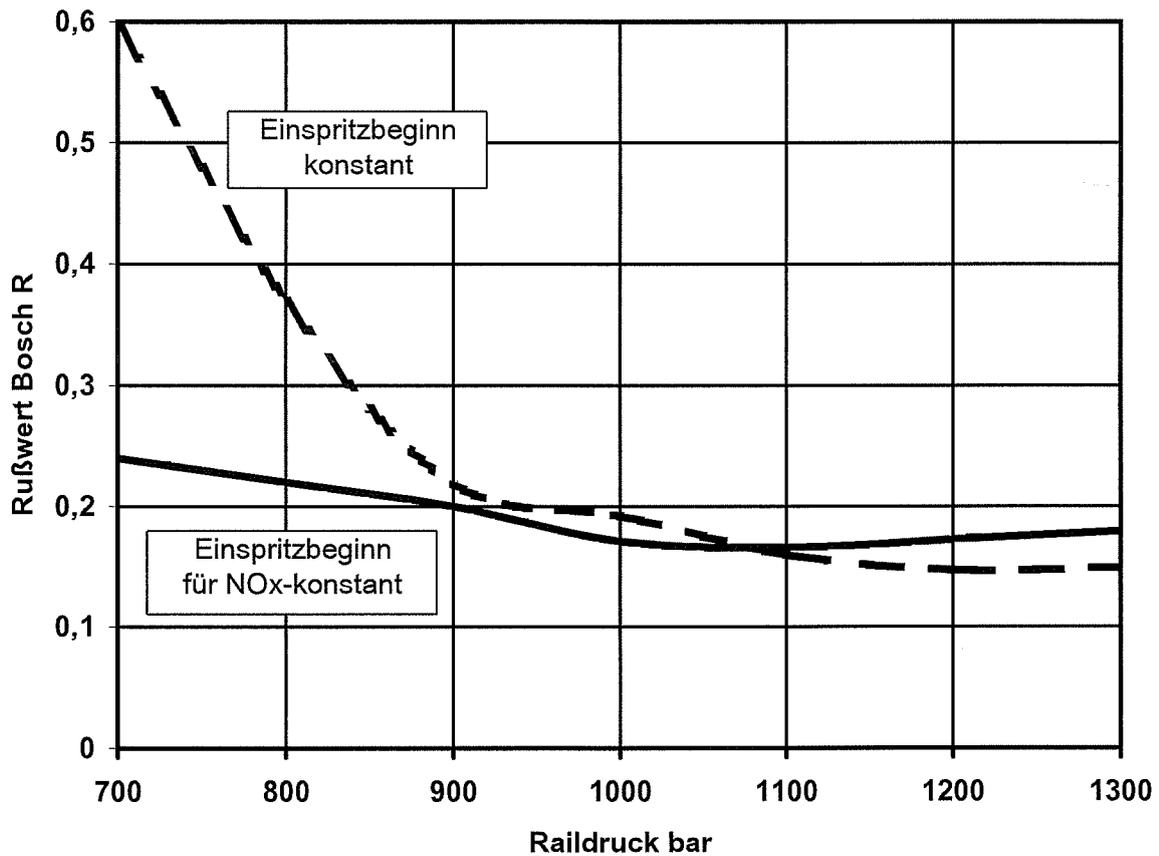
CLEAN II



Common Rail (CR)

Ruß-Emission in Abhängigkeit vom Raildruck
Vergleich konstanter und NOx-optimierter Einspritzbeginn
 stationäre Messungen bei ca. 60 % Motorleistung
 Kraftstoff: Schweröl

7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

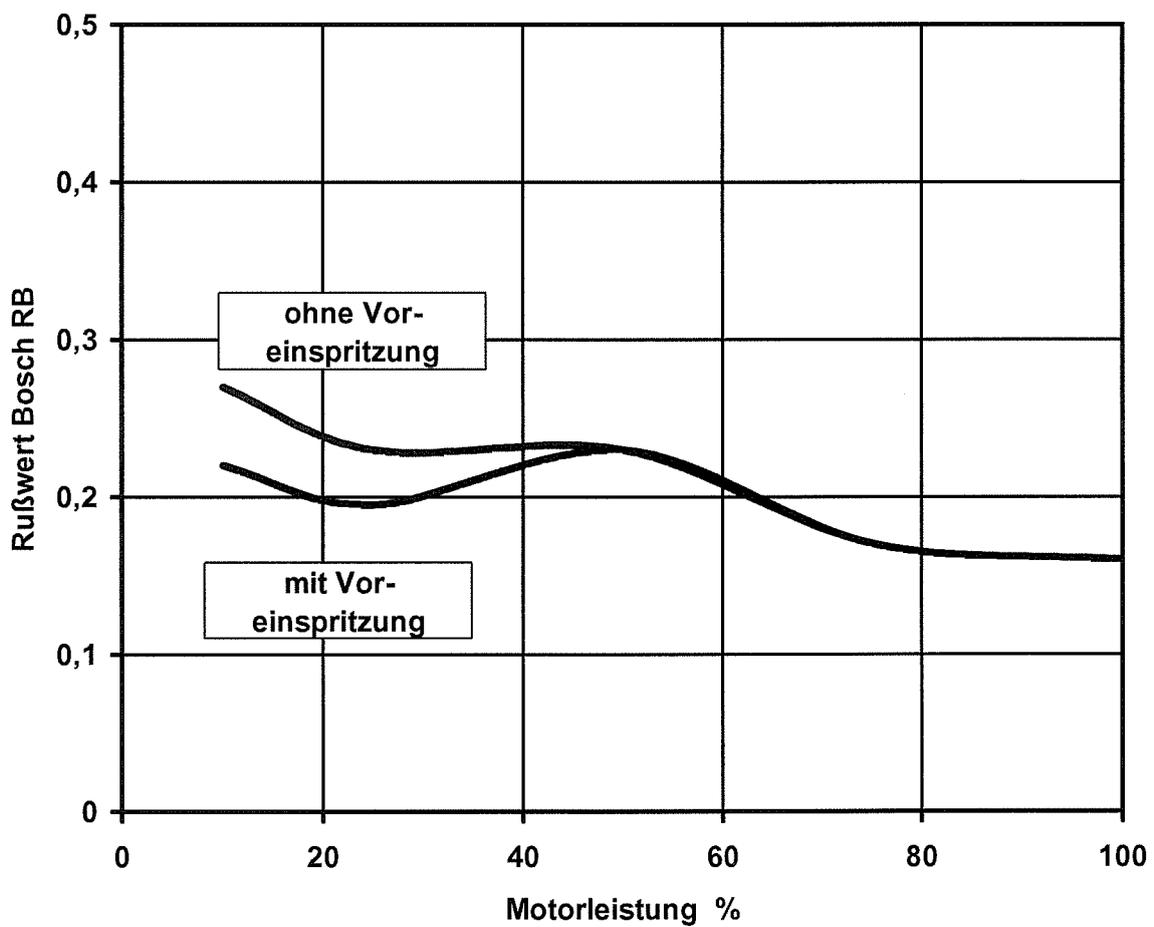
CLEAN II



Common Rail (CR)

Ruß-Emission über der Last
Vergleich mit / ohne Voreinspritzung
Kraftstoffart Schweröl

stationäre Meßpunkte
7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

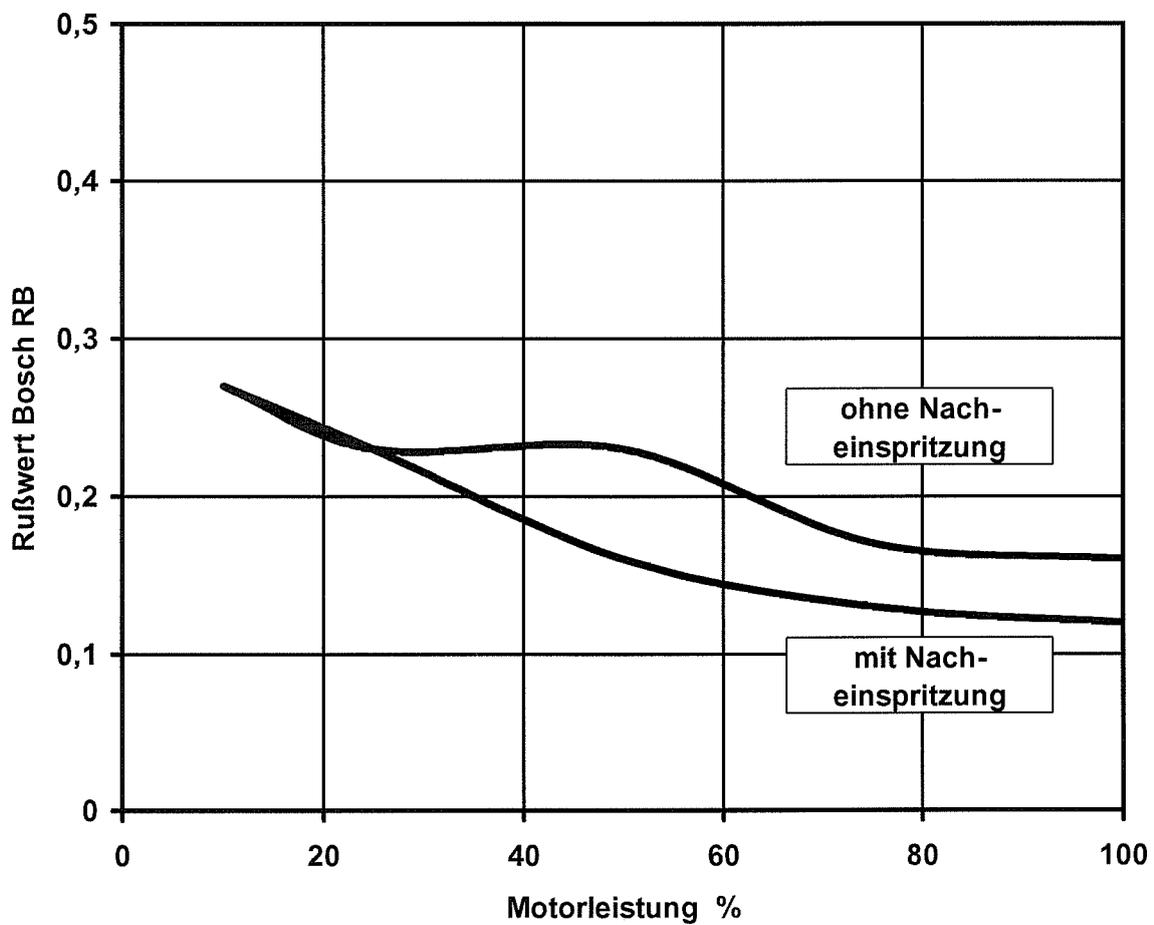
CLEAN II



Common Rail (CR)

Ruß-Emission über der Last
Vergleich mit / ohne Nacheinspritzung
Kraftstoffart Schweröl

stationäre Meßpunkte
7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

CLEAN II



Common Rail (CR)

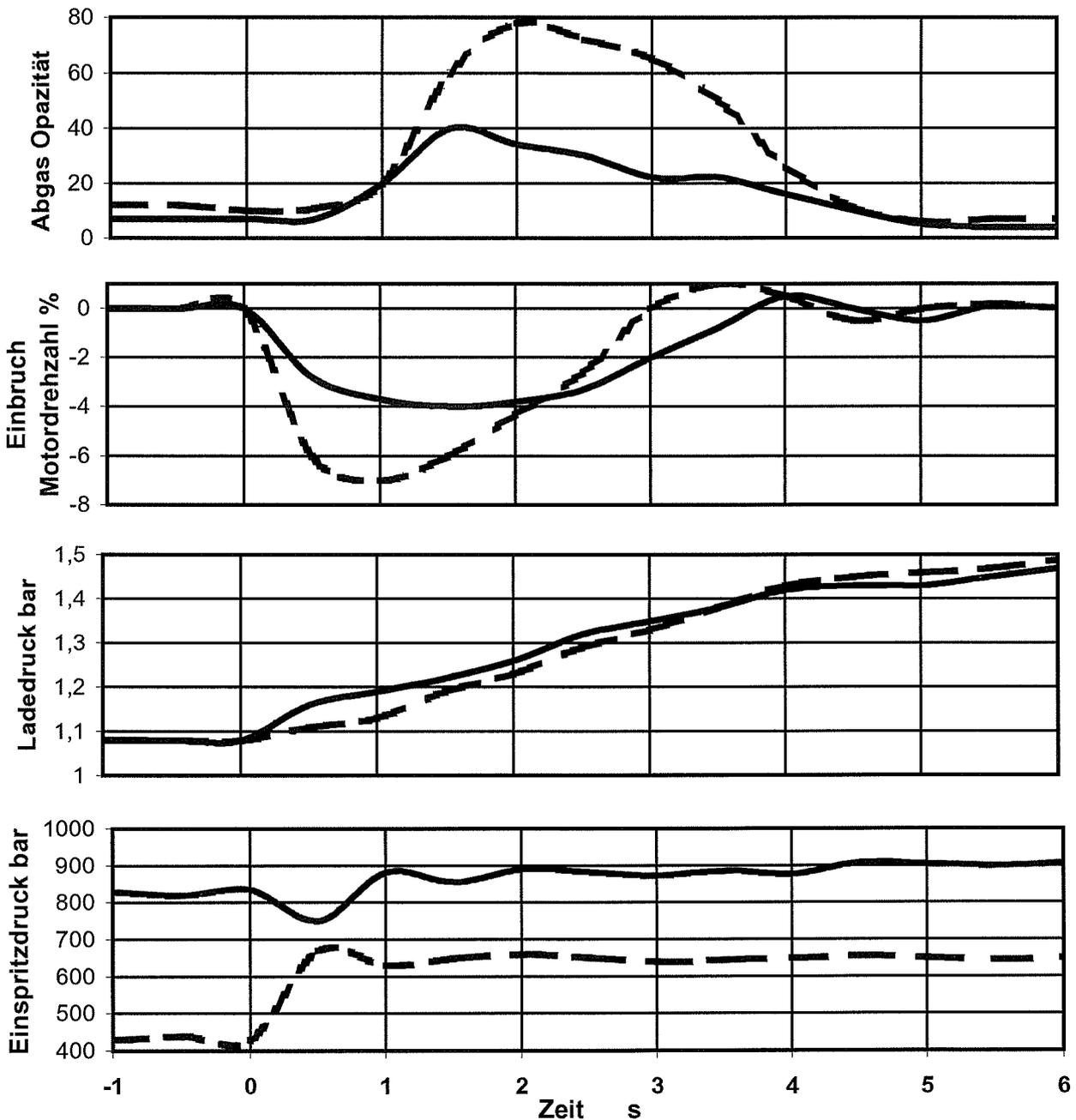
Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung von 0 % auf 35 %

Drehzahl konstant 1200 rpm

Vergleich zwischen konventioneller Einspritzung ----- und CR ———

Kraftstoffart Schweröl

7L 16/24 - 21473



Variation der Einspritzintensität

CLEAN II



Common Rail (CR)

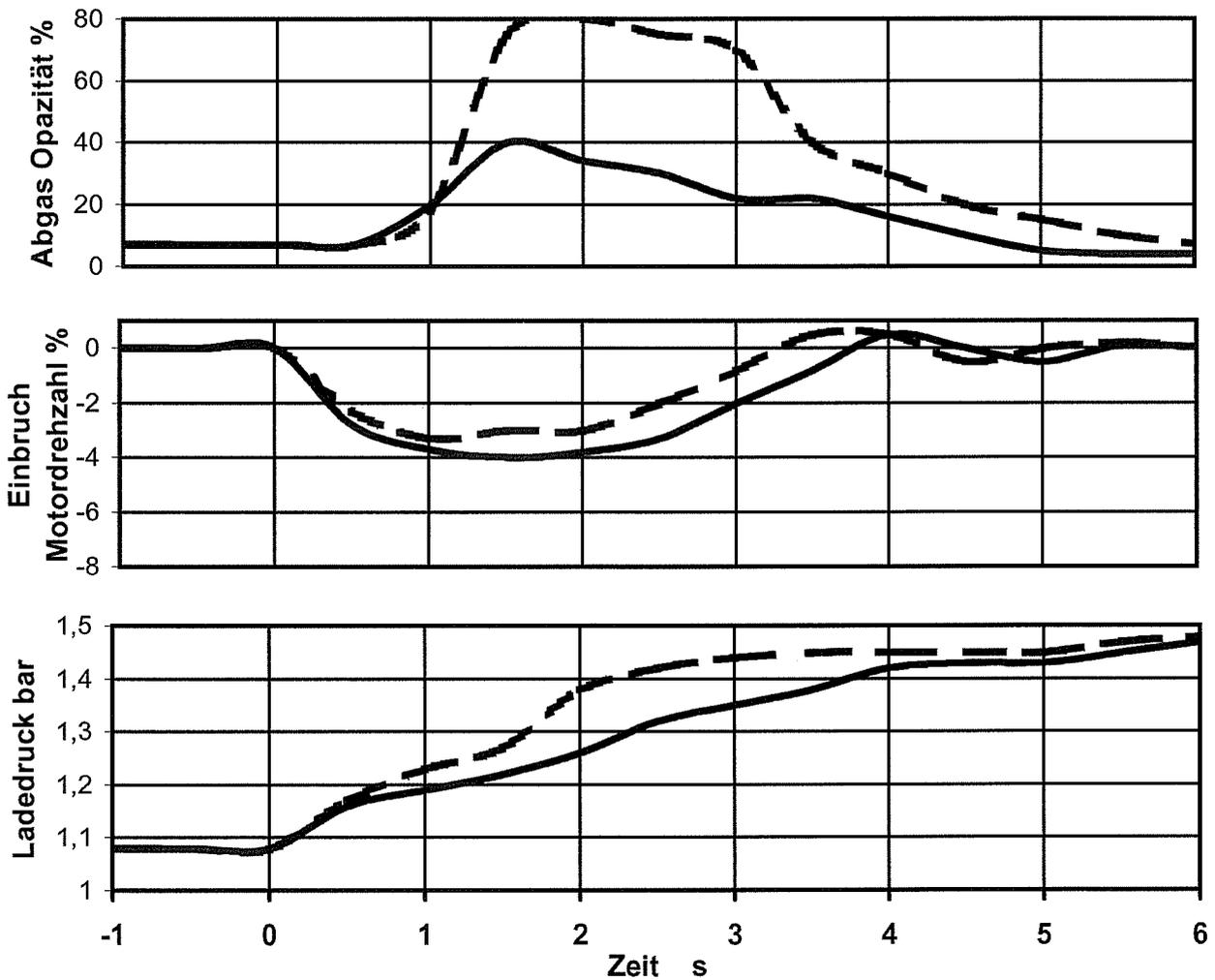
Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung von 0 % auf 35 %

Drehzahl konstant 1200 rpm

Vergleich CR ohne — und mit - - - - - Boost-Injection

Kraftstoffart Schweröl

7L 16/24 - 21473



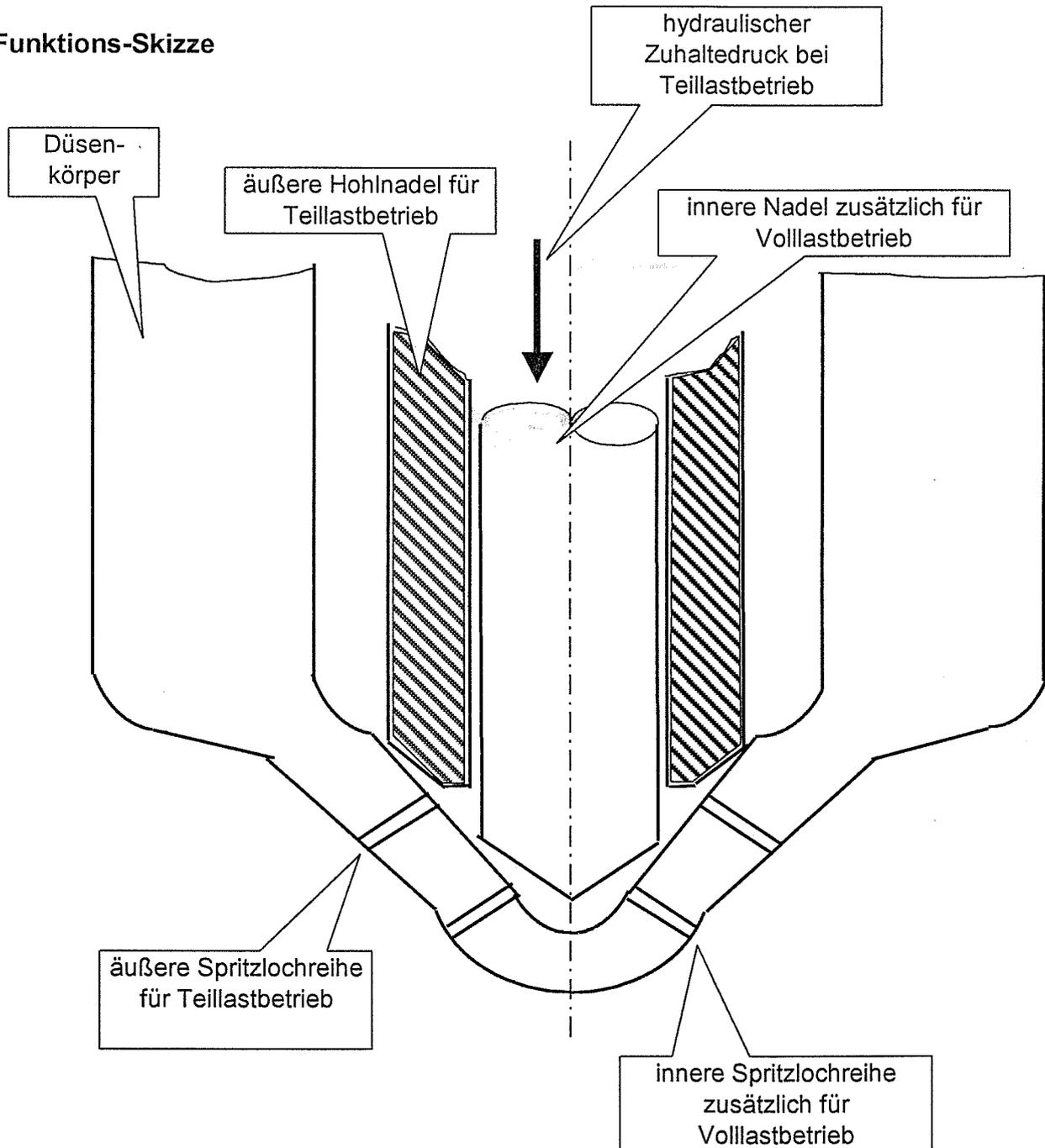
Querschnittsänderung der Einspritzdüse

CLEAN II



KOAX-Düse

Funktions-Skizze



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

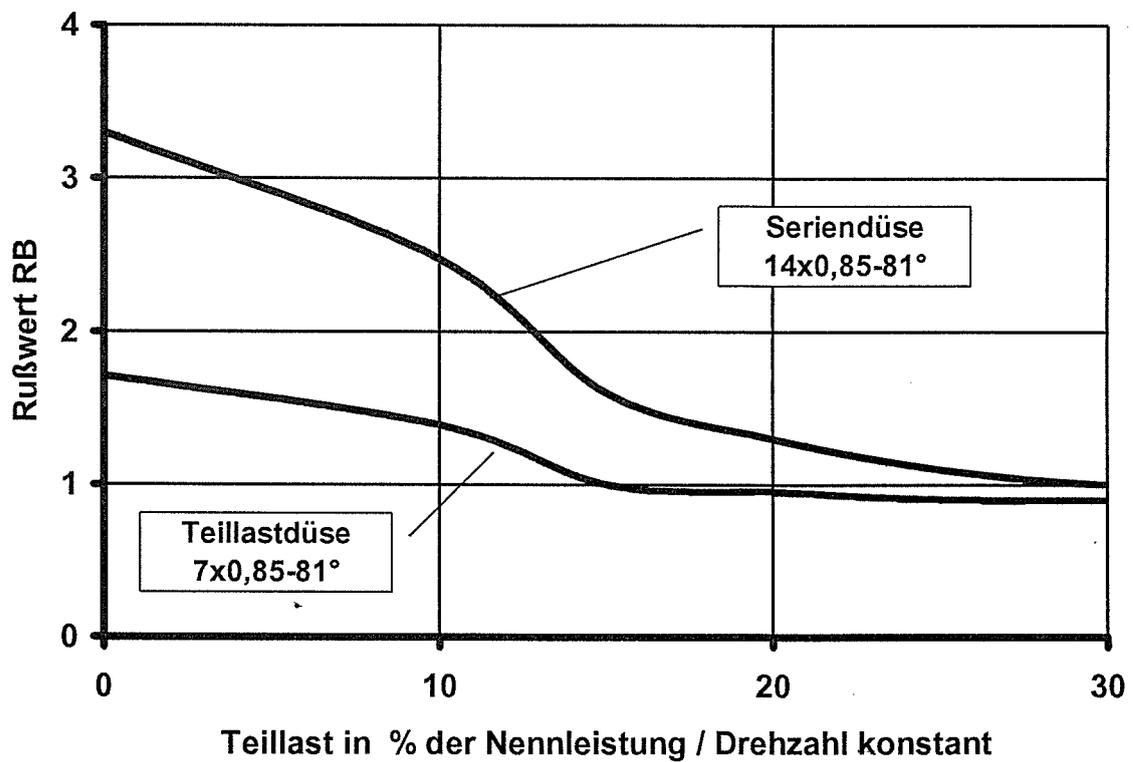
CLEAN II



KOAX-Düse

Vorversuch am Vollmotor 58/64 (stationäre Messungen)

Vergleich der Rußemission bei Verwendung einer Düse mit 7 und einer Seriedüse mit 14 Spritzlöchern (jeweils gleiche Spritzlochdurchmesser)



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

CLEAN II

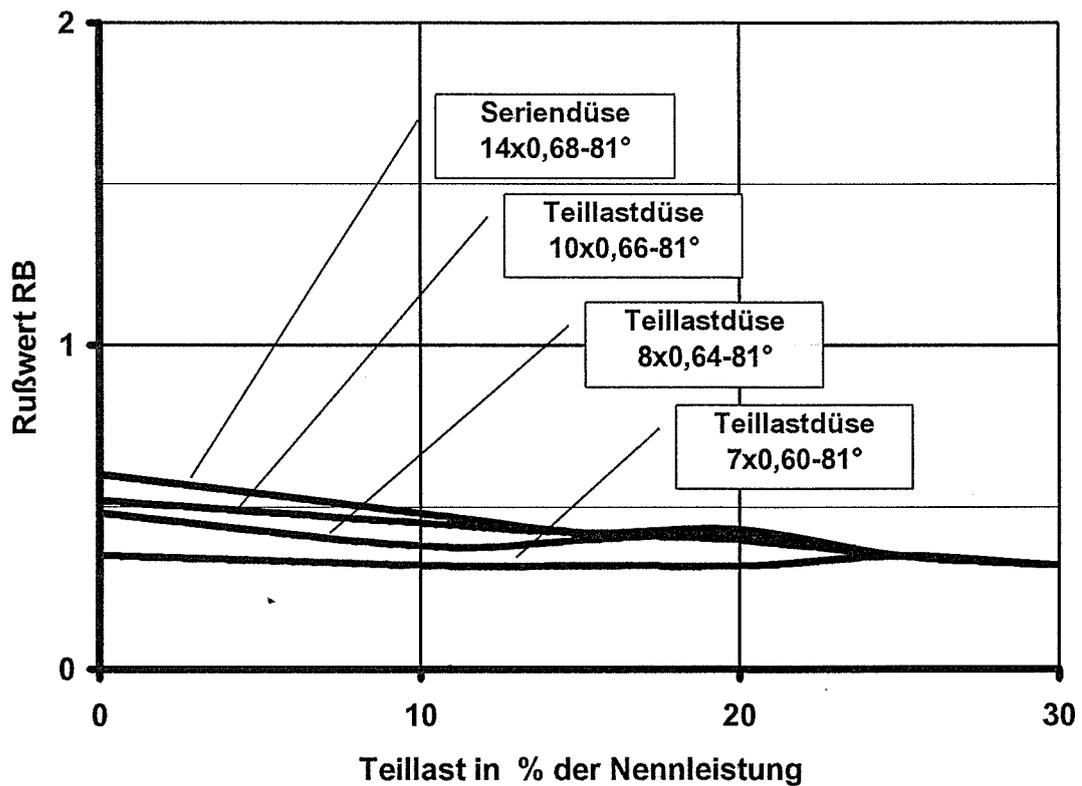


KOAX-Düse

Vorversuch am Vollmotor 48/60 (stationäre Messungen)

Vergleich der Rußemission bei Verwendung einer Düse mit 7, 8 und 10 mit einer Seriendüse mit 14 Spritzlöchern (jeweils gleiche Spritzlochdurchmesser)

Generatorbetrieb / Drehzahl konstant / Schweröl



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

CLEAN II

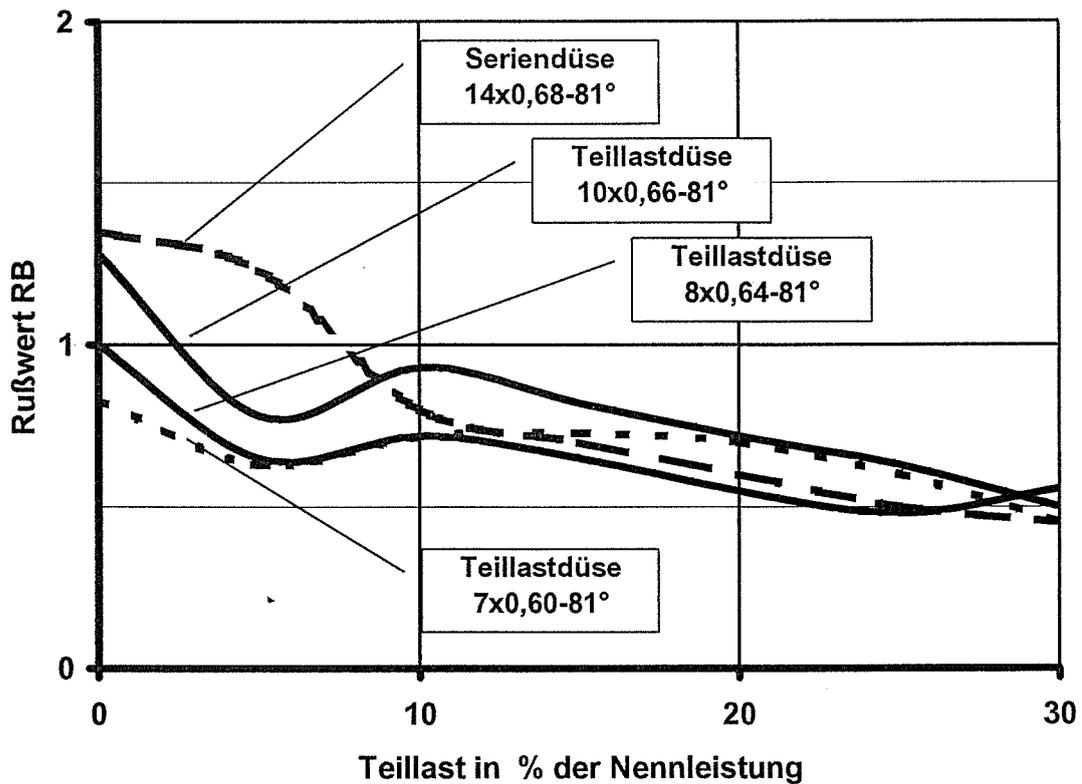


KOAX-Düse

Vorversuch am Vollmotor 48/60 (stationäre Messungen)

Vergleich der Rußemission bei Verwendung einer Düse mit 7, 8 und 10 mit einer Seriendüse mit 14 Spritzlöchern (jeweils gleiche Spritzlochdurchmesser)

Drehzahl nach Propellergesetz / Schweröl



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

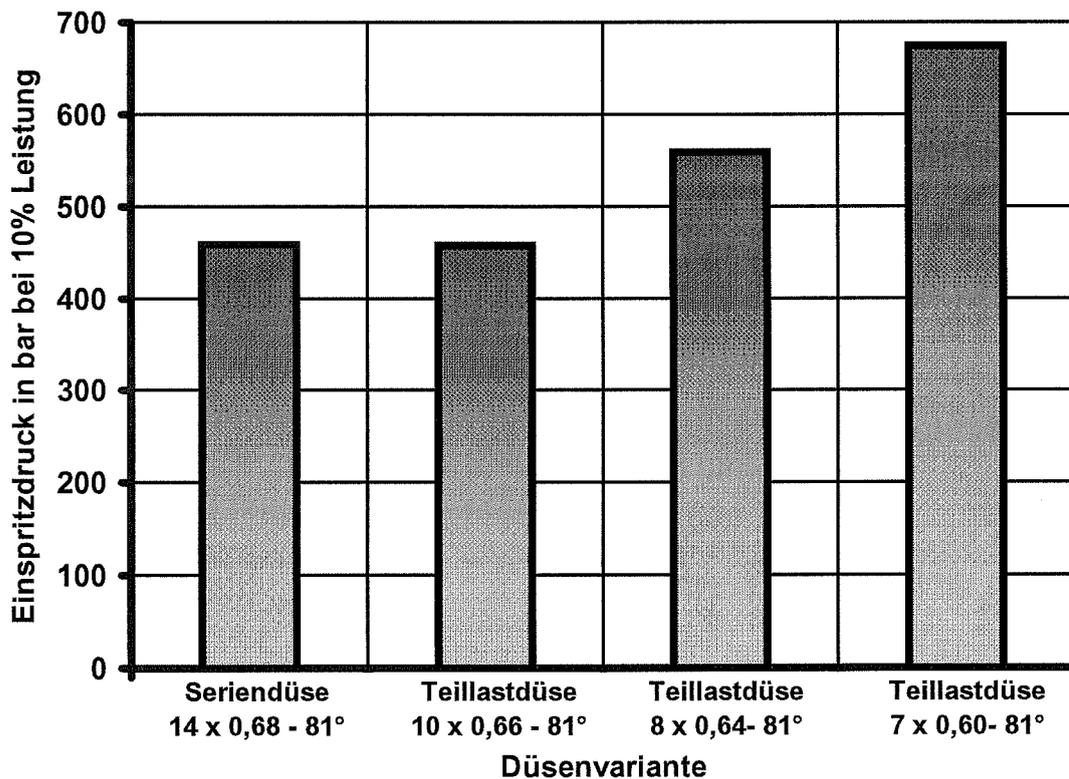
CLEAN II

KOAX-Düse

Vorversuch am Vollmotor 48/60 (stationäre Messungen)

Vergleich der Einspritzdrücke bei Verwendung einer Düse mit 7, 8 und 10 mit einer Seriedüse mit 14 Spritzlöchern (jeweils gleiche Spritzlochdurchmesser)

Leistung konstant 10 % / Drehzahl nach Propellergesetz / Schweröl



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

CLEAN II



KOAX-Düse

Vorversuch am Vollmotor 48/60 (stationäre Messungen)

Rußwert-Vergleich der Seriedüse mit zwei verschiedenen KOAX-Düsen

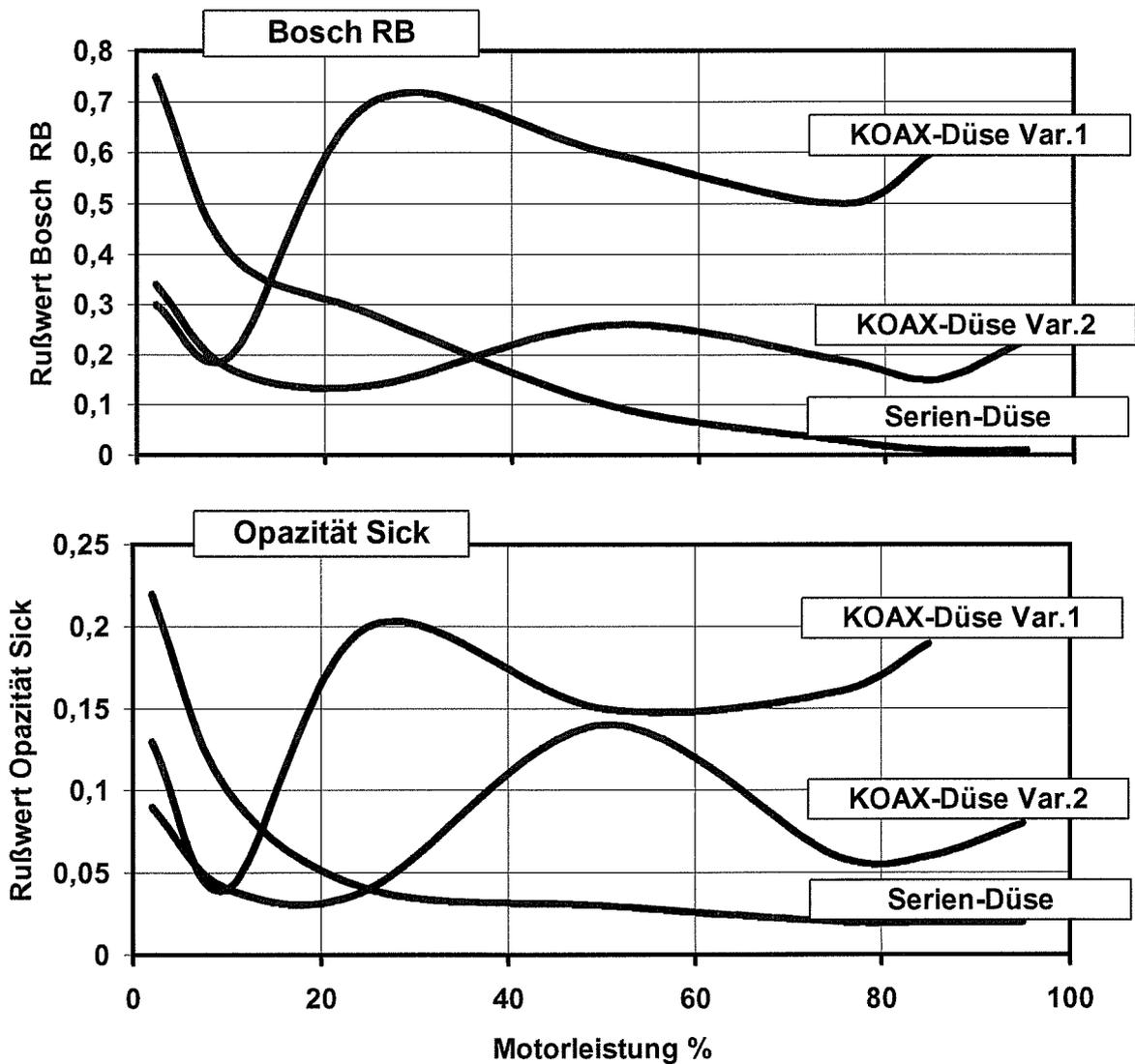
Variante 1: 8 x 0,56 - 79° + 8 x 0,70 - 81°

Variante 2: 12 x 0,46 - 79° + 6 x 0,81 - 81°

Serie: 14 x 0,68 - 81°

n = konstant

Kraftstoff = MDF



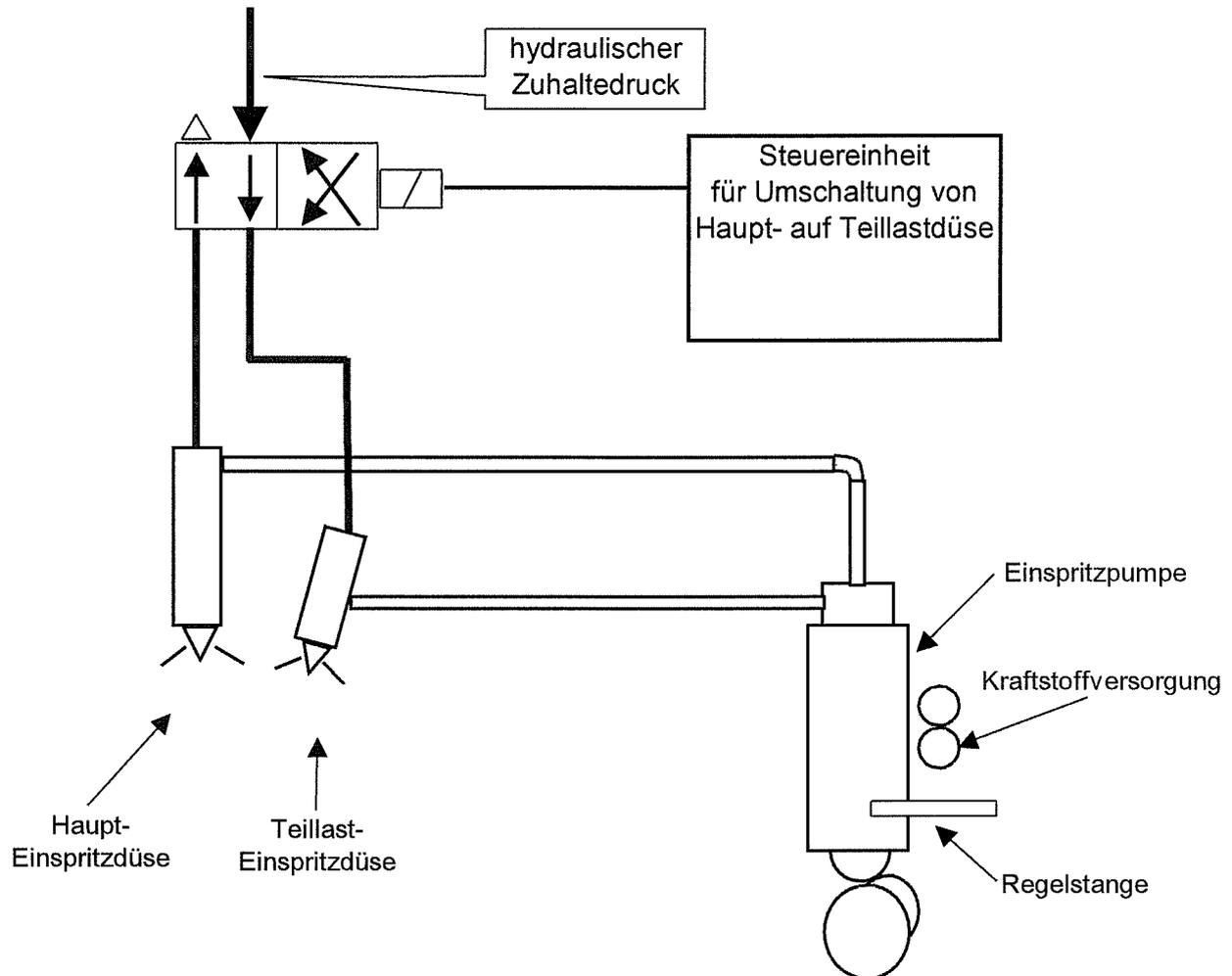
Querschnittsänderung der Einspritzdüse

CLEAN II



seitliche Teillastdüse

Funktions-Skizze



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

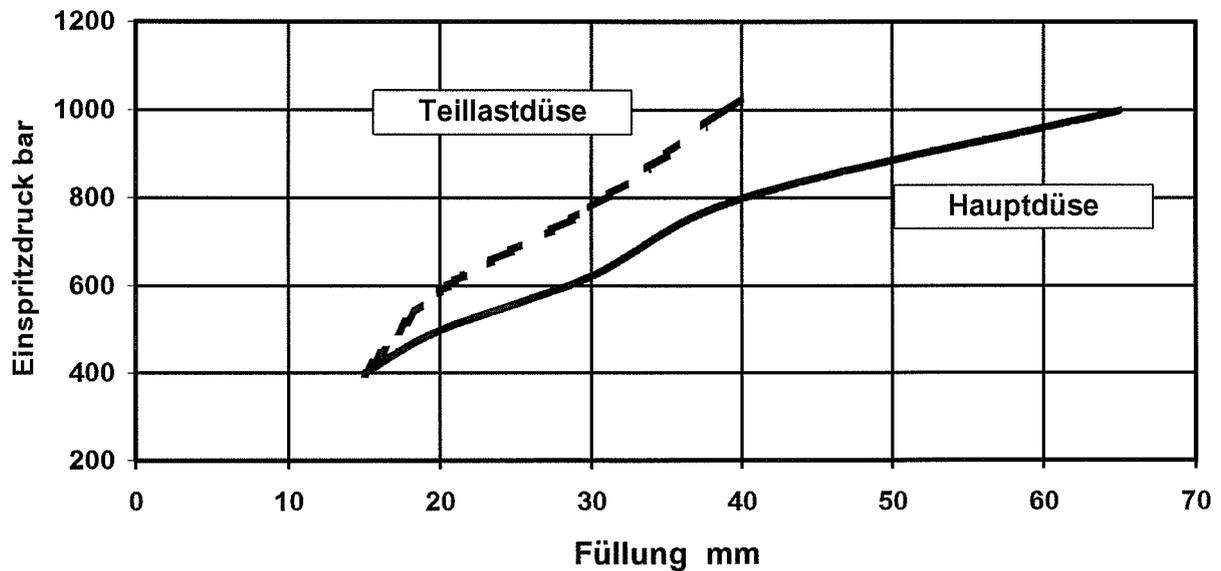
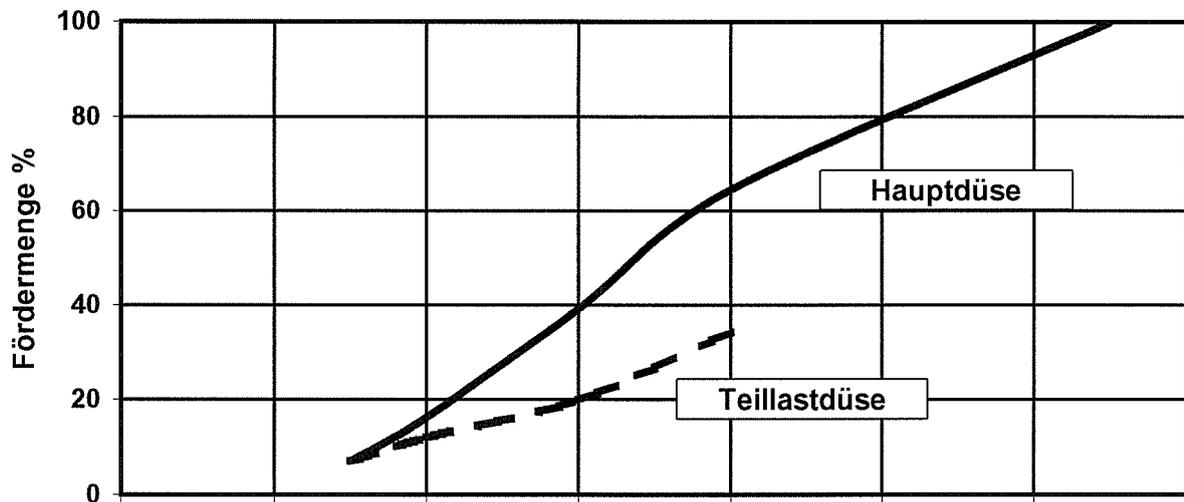
CLEAN II



seitliche Teillastdüse

Vergleich Teillasteinspritzdüse - - - - - zu Haupteinspritzdüse ———

Fördermenge pro Arbeitsspiel in % der Menge der Hauptdüse bei Vollast
Einspritzdruck in bar



Messungen am Komponentenprüfstand
Medium Renolin (entspricht Schweröl)

Querschnittsänderung der Einspritzdüse

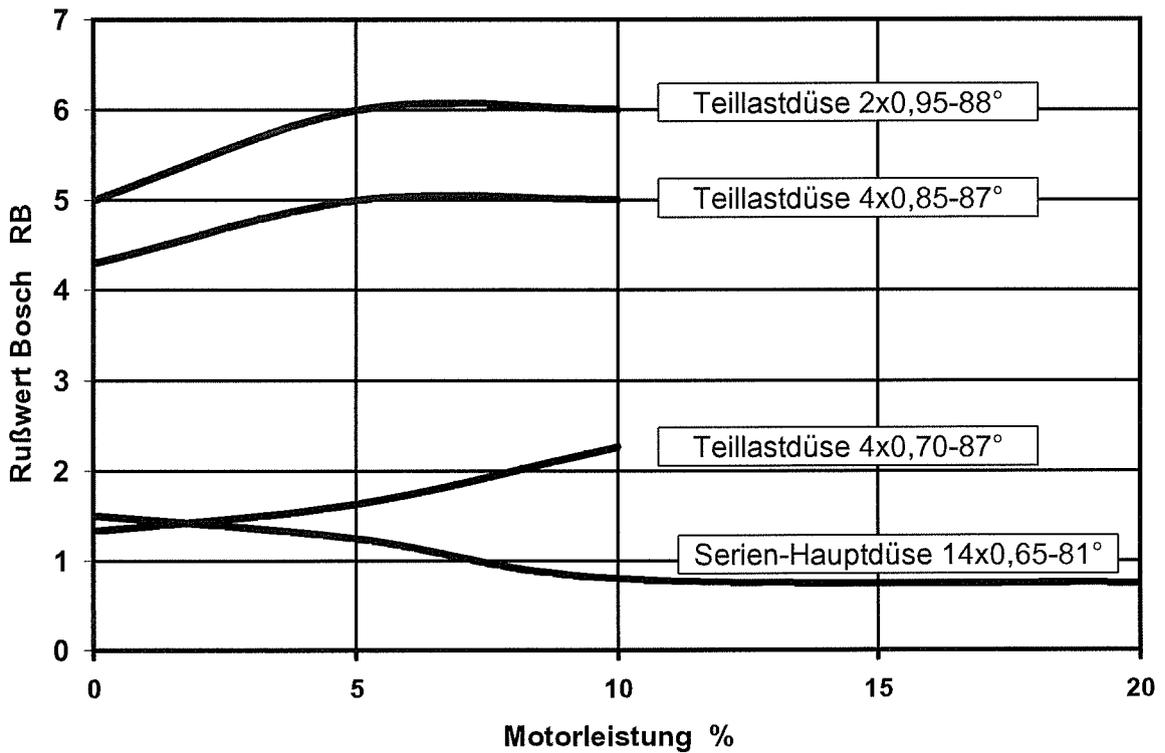
CLEAN II



seitliche Teillastdüse

Vergleich verschiedene Teillastdüsen mit Serien-Hauptdüse

Stationäre Messungen am Vollmotor 6L48/60 - 1130086
Brennraumform gegenüber Serie nicht geändert



Querschnittsänderung der Einspritzdüse

CLEAN II



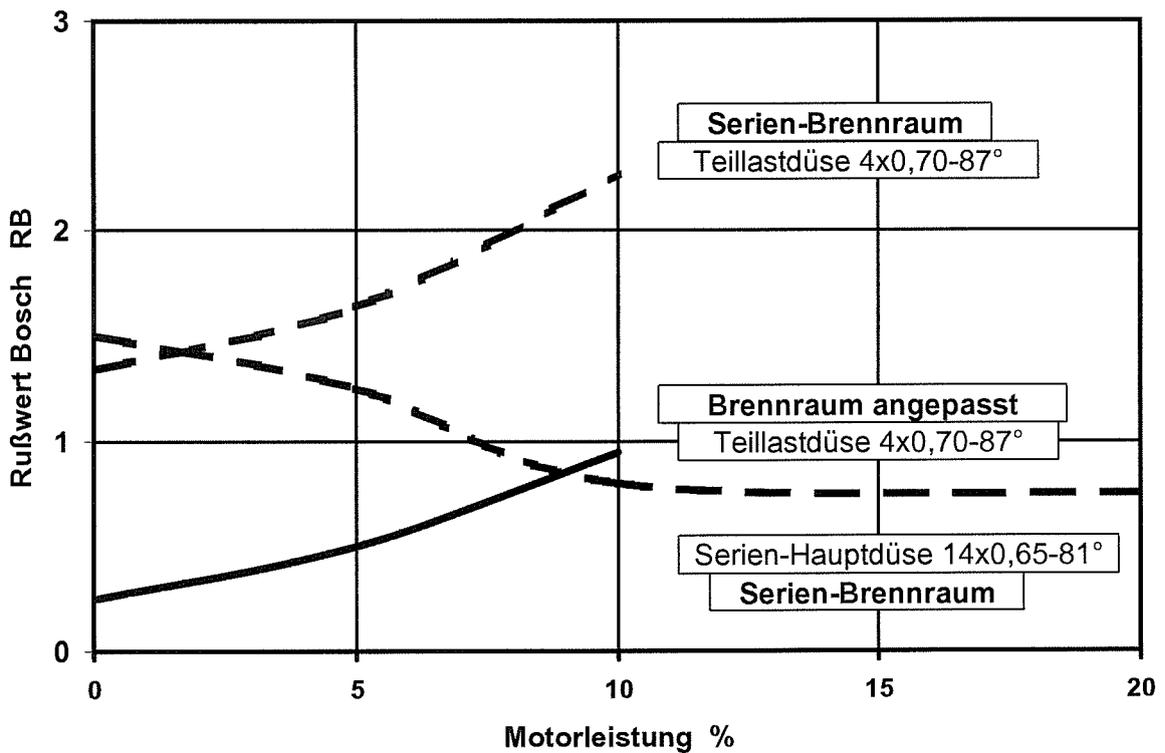
seitliche Teillastdüse

Vergleich verschiedene Teillastdüsen mit Serien-Hauptdüse

Stationäre Messungen am Vollmotor 6L48/60 - 1130086

Vergleich Brennraumform

wie Serie - - - - -
angepasst —————



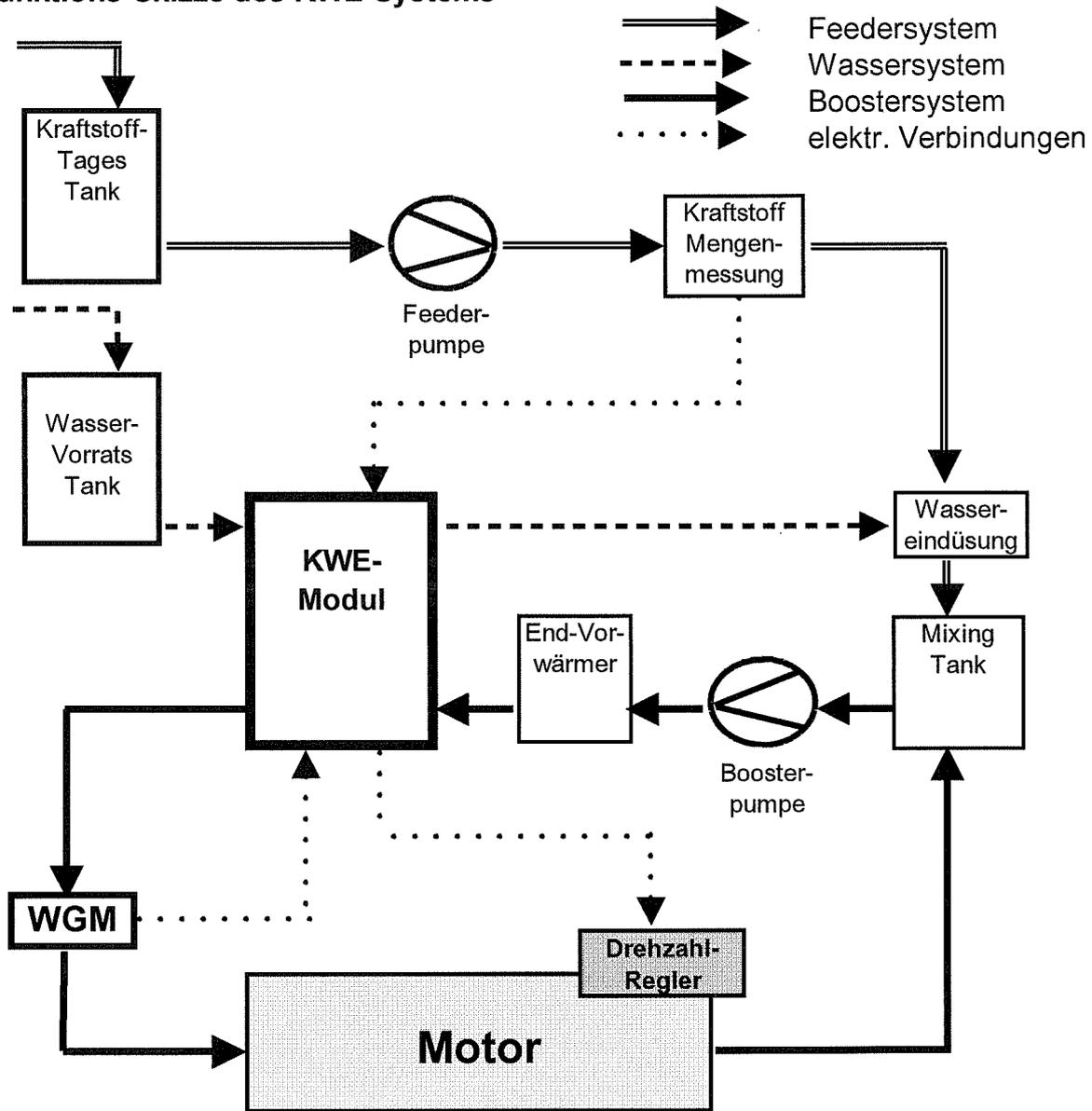
Kraftstoff-Wasser-Emulsion (KWE)

CLEAN II



Konstante Wasserkonzentration

Funktions-Skizze des KWE-Systems



WGM = Wasser-Gehalts-Meßeinrichtung

KWE-Modul beinhaltet:

Wasseraufbereitung, Filter, Pumpen, Wasserdosierung
Mess- und Kontrolleinheit

Kraftstoff-Wasser-Emulsion (KWE)

CLEAN II



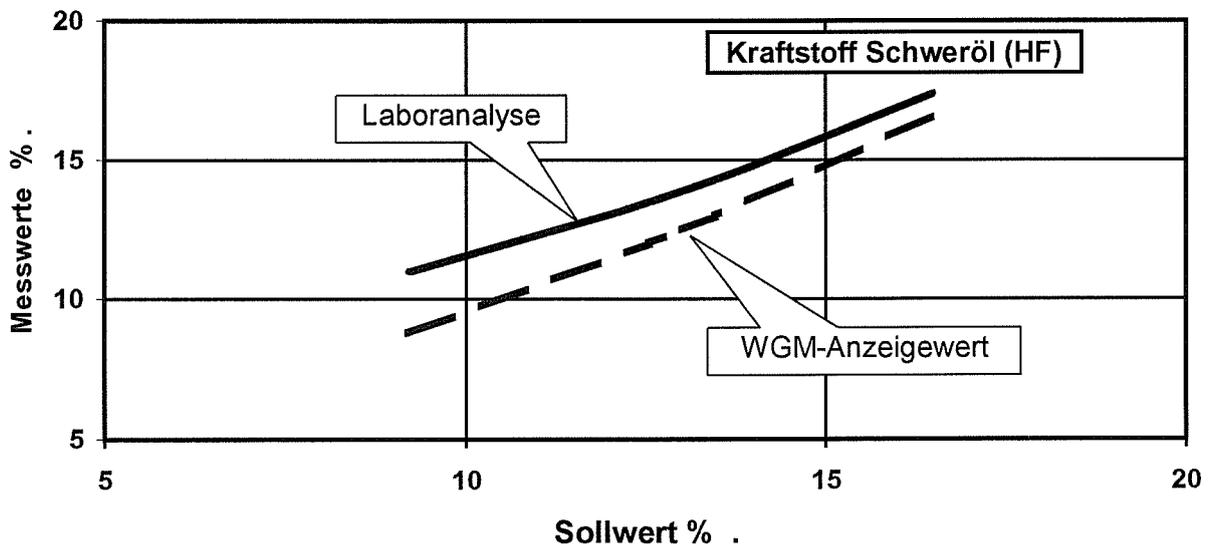
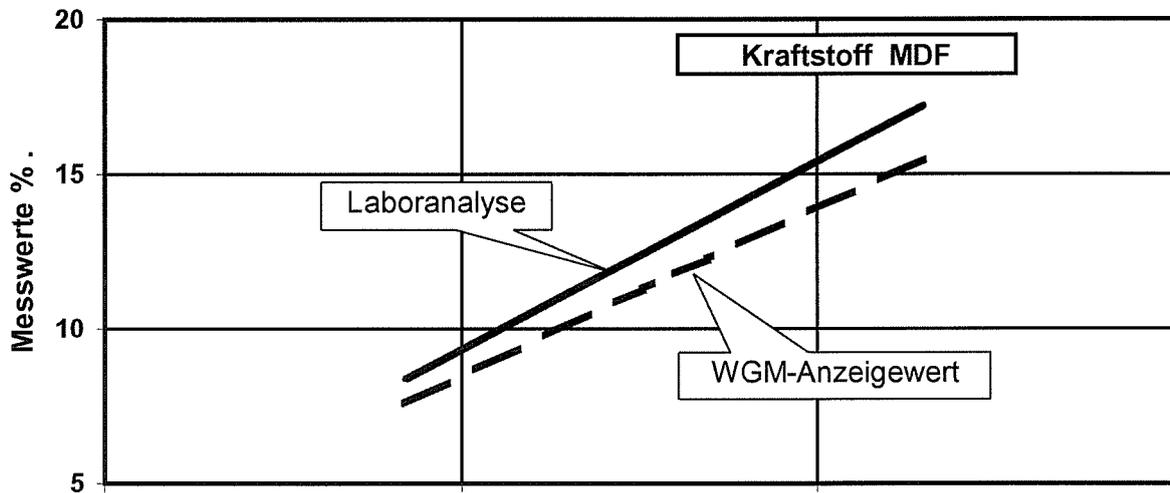
Konstante Wasserkonzentration

Vorversuche Wasser-Gehalts-Messeinrichtung (WGM)

Vergleich: WGM-Anzeigewert - - - - - zu Laboranalyse ———

Angegebene Messwerte in %

als Menge Wasser zu Gesamtmenge (Kraftstoff + Wasser)



Kraftstoff-Wasser-Emulsion (KWE)

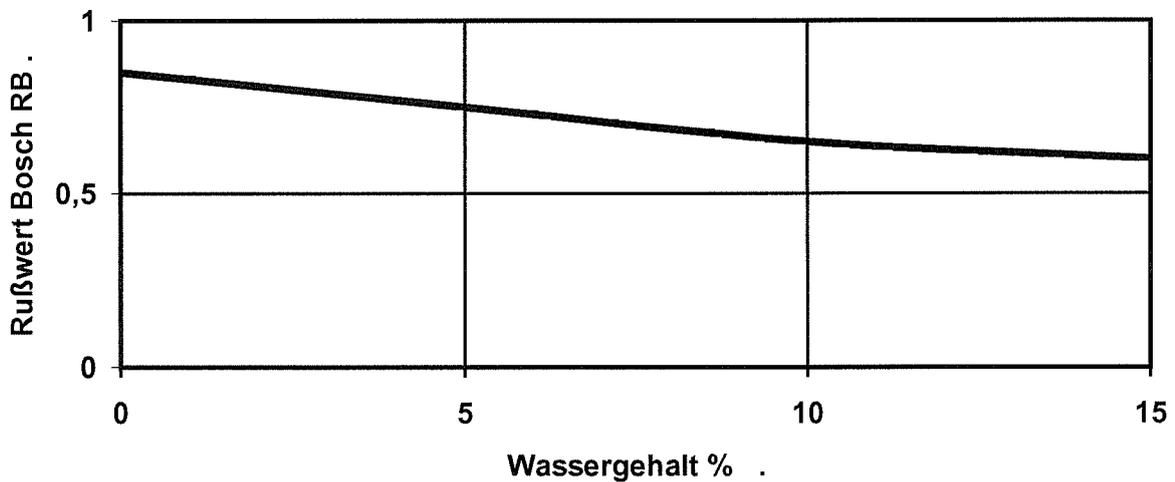
CLEAN II



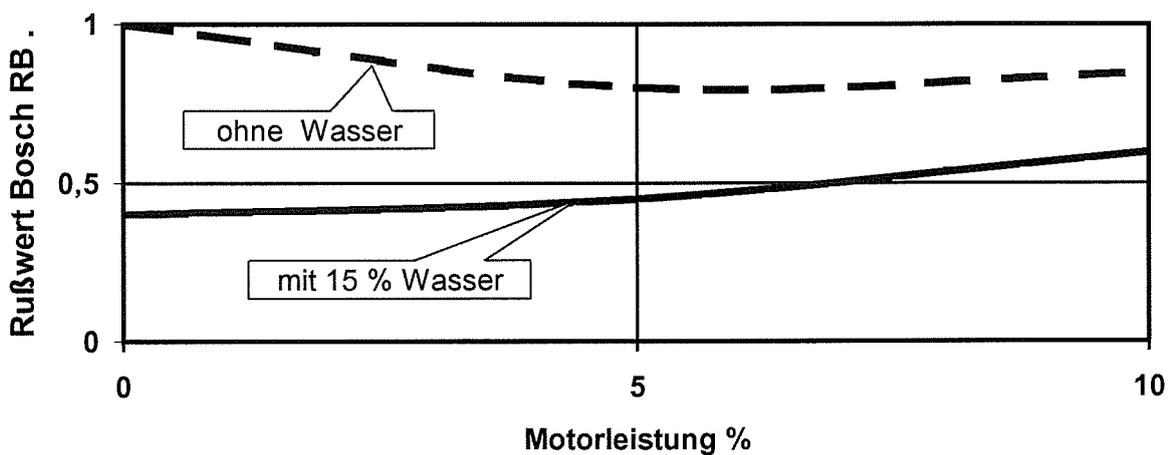
Konstante Wasserkonzentration

Vorversuche am 6L48/60

Stationäre Messungen mit verschiedenen Wassergehalten
Einfluß auf den Rußwert Bosch RB bei 10 % Leistung



Stationäre Messungen ohne und mit 15 % Wasser
Einfluß auf den Rußwert Bosch RB bei Niedriglast



Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

CLEAN II

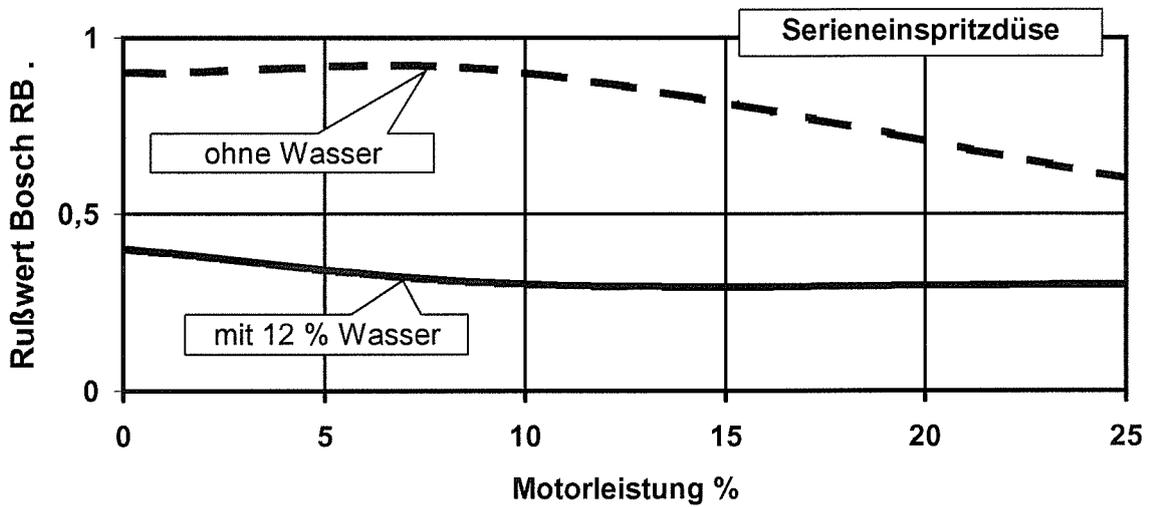


Konstante Wasserkonzentration

Vorversuche am 9L 32/40

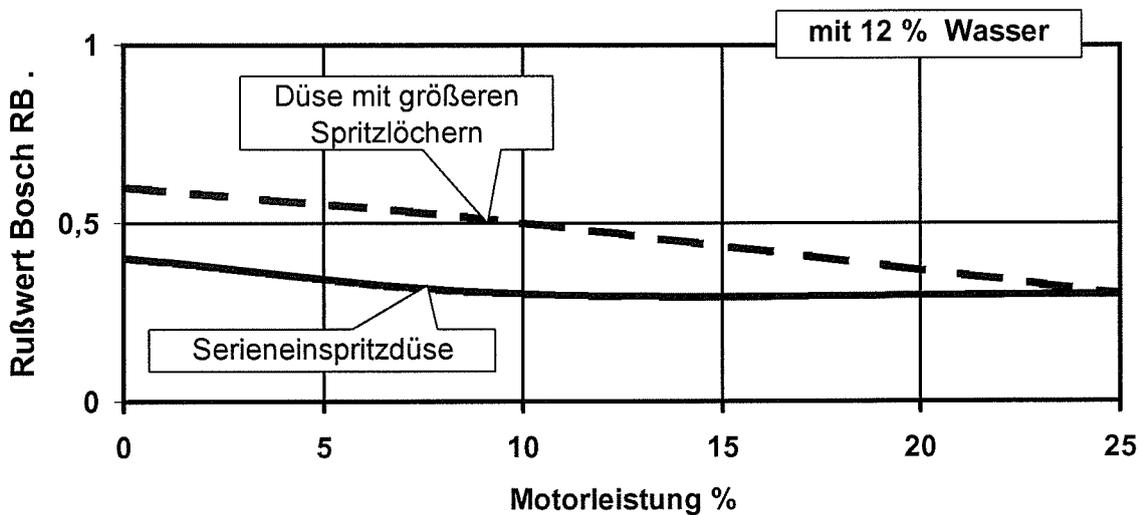
Einfluß auf den Rußwert Bosch RB bei Niedriglast

Stationäre Messungen ohne und mit 12 % Wasser



Stationäre Messungen mit 12 % Wasser

Vergleich Düsen mit normalen und größeren Spritzlochdurchmessern



Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

CLEAN II

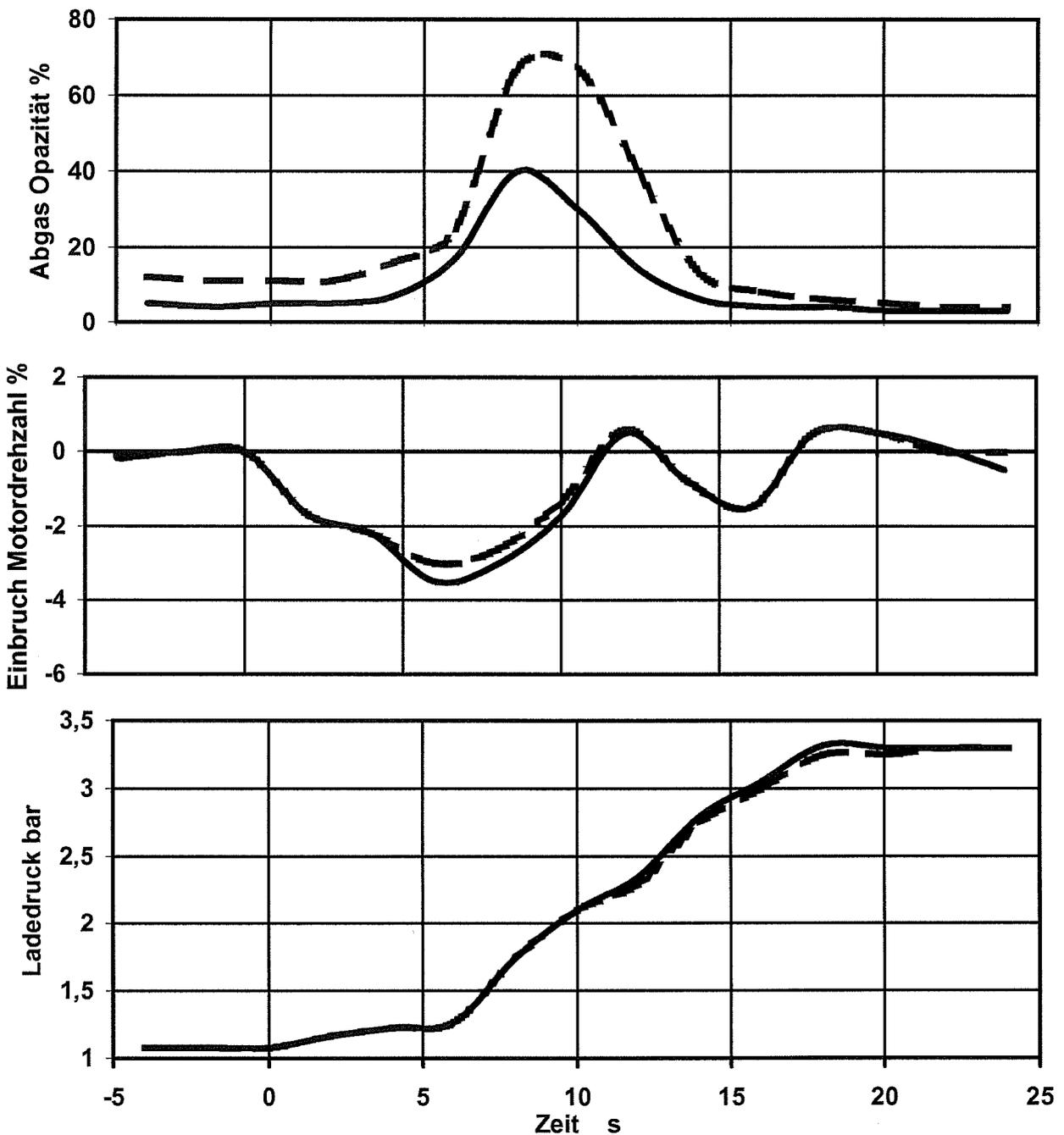


Konstante Wasserkonzentration

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung von 0 % auf 65 %
(Drehzahl konstant 514 rpm / Generator-Mode) in ca. 15 sec

Vergleich ohne ----- und mit ——— KWE

6L 48/60 - 1130086



Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

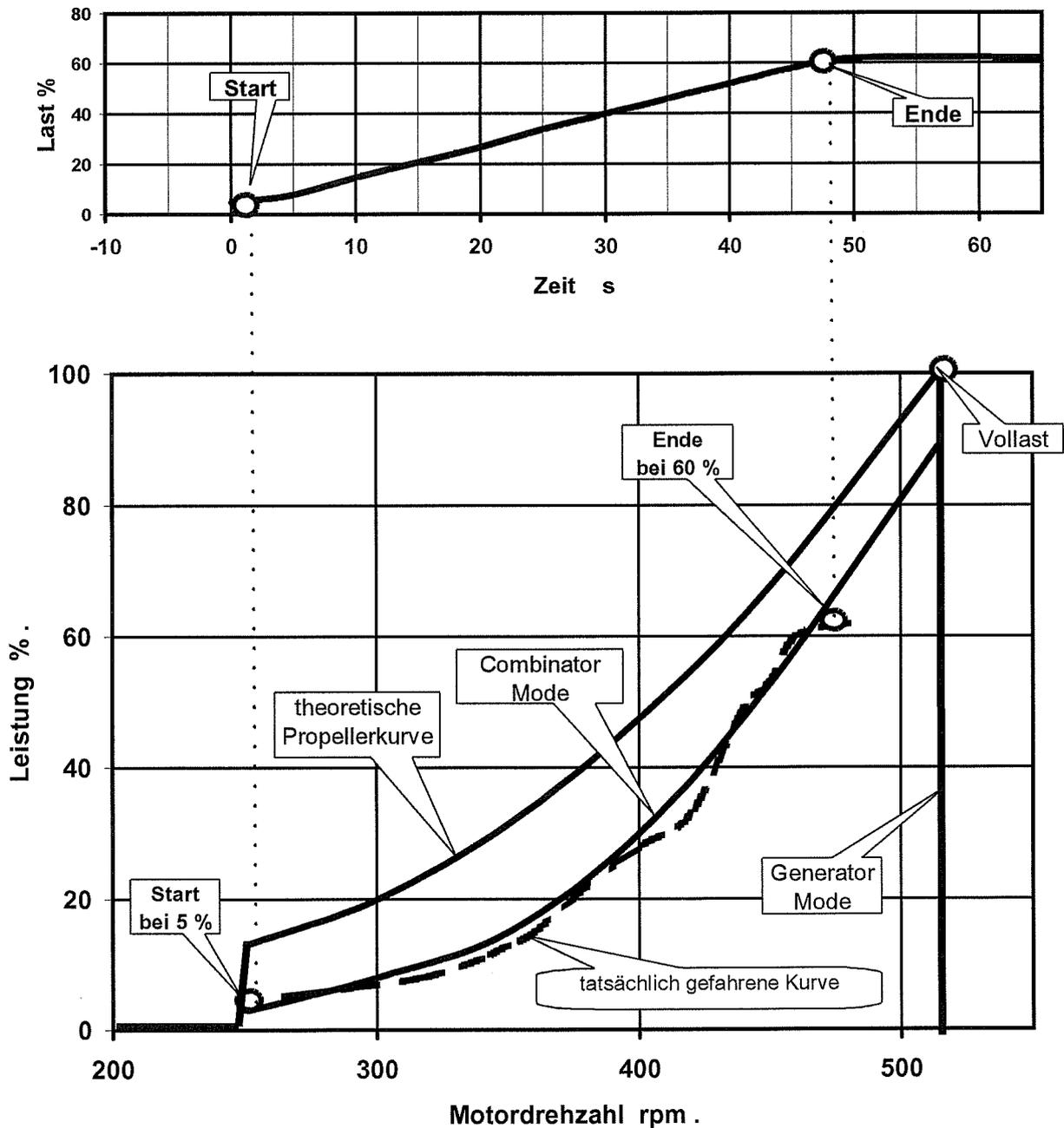
CLEAN II



Konstante Wasserkonzentration

Darstellung des für instationäre Belastung gefahrenen
Combinator-Mode von 5 % auf 60 % Leistung in ca. 45 sec

6L48/60 - 1130086



Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

CLEAN II

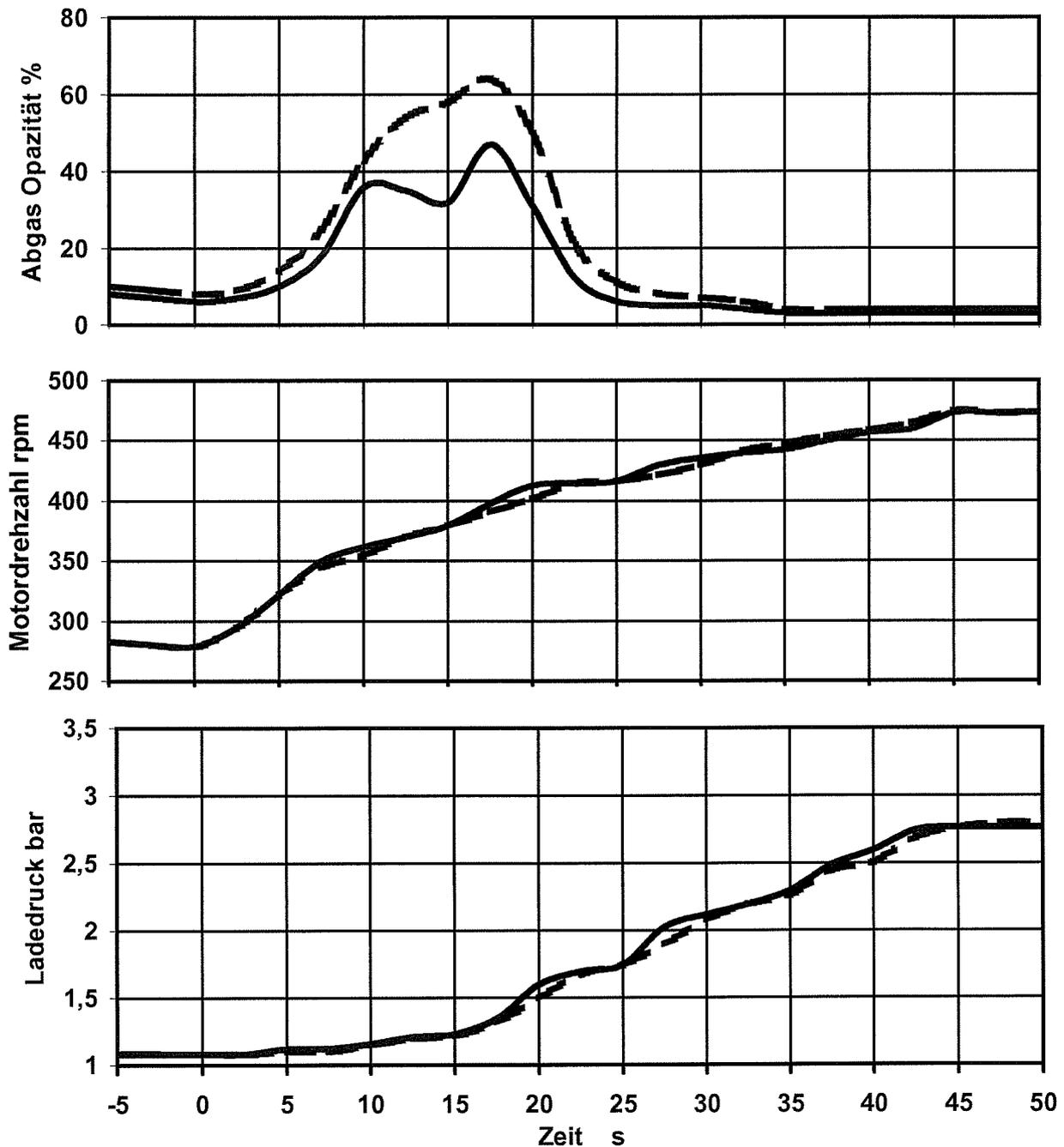


Konstante Wasserkonzentration

Betriebswerte über der Zeit während Belastung von 5 % auf 60 %
(Combinator-Mode siehe Anl. C / 6)) in ca. 45 sec

Vergleich ohne ----- und mit ——— KWE

6L 48/60 - 1130086



Kraftstoff-Wasser-Emulsion (KWE)

CLEAN II



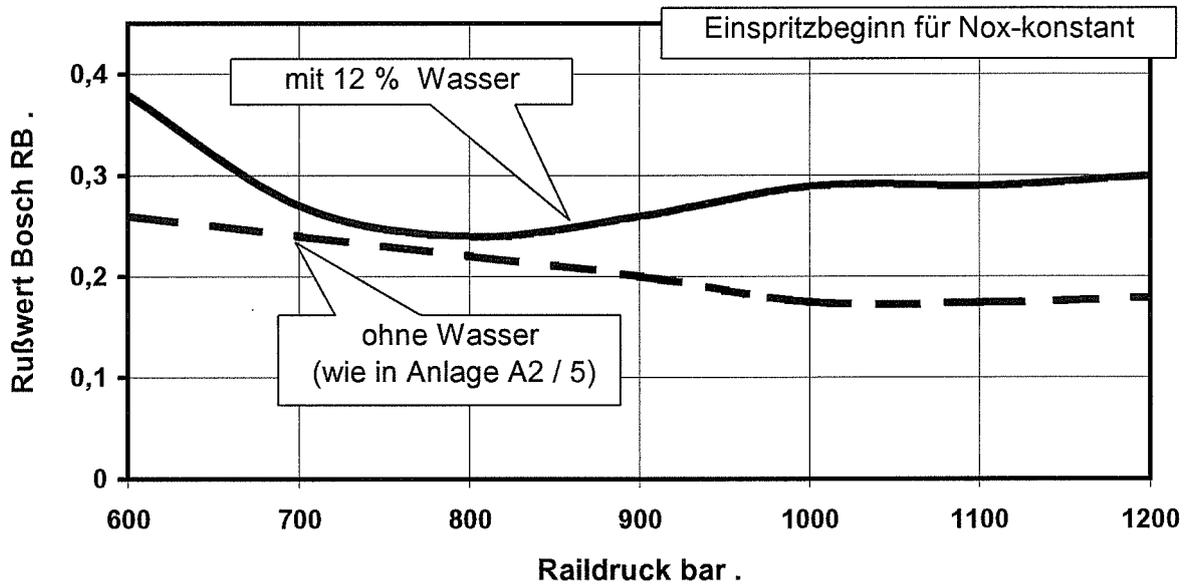
Konstante Wasserkonzentration
Vorversuche am 7L 16/24 CR

Common Rail

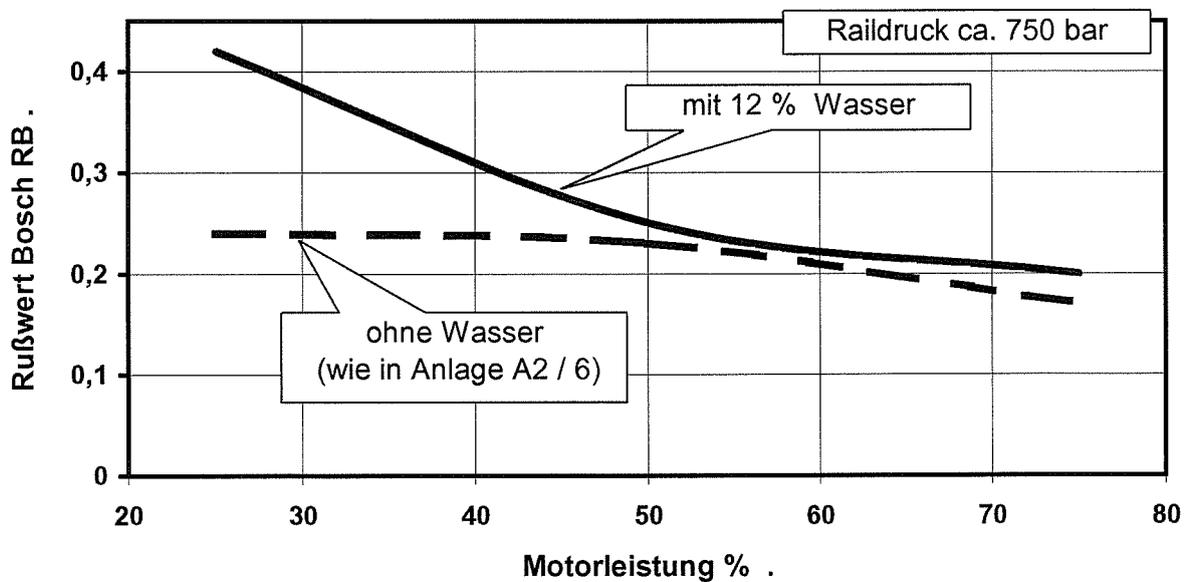
Kraftstoff: Schweröl

Vergleich mit / ohne KWE

Einfluß auf den Rußwert Bosch RB bei ca. 60 % Leistung



Stationäre Messungen mit 12 % Wasser



Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

CLEAN II



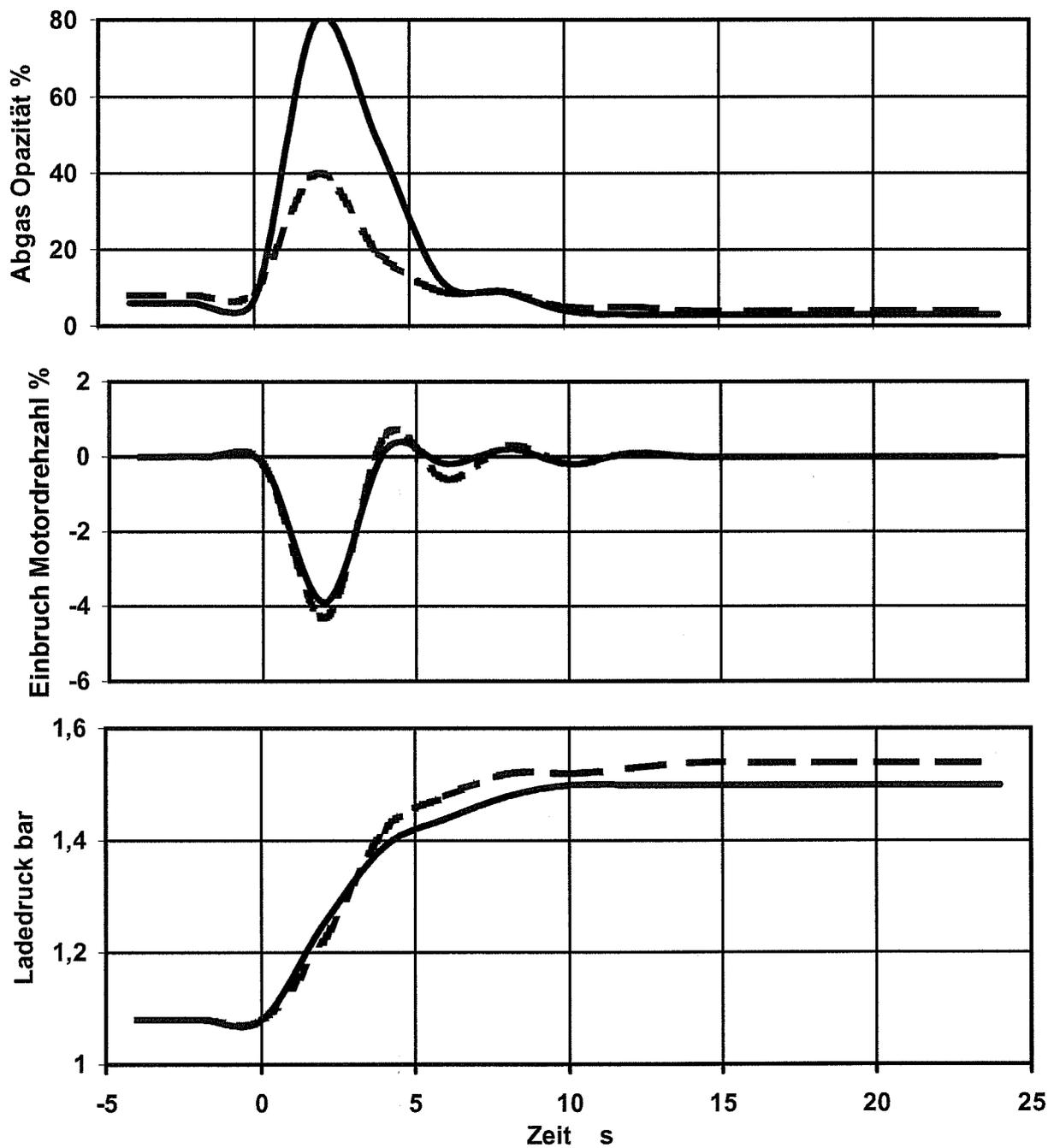
Konstante Wasserkonzentration

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung von 0 % auf 50 %
(Drehzahl konstant 1200 rpm / Generator-Mode) in ca. 0,5 sec

Vergleich ohne ----- und mit ——— KWE

Common-Rail-System

7L 16/24 CR - 21473



Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

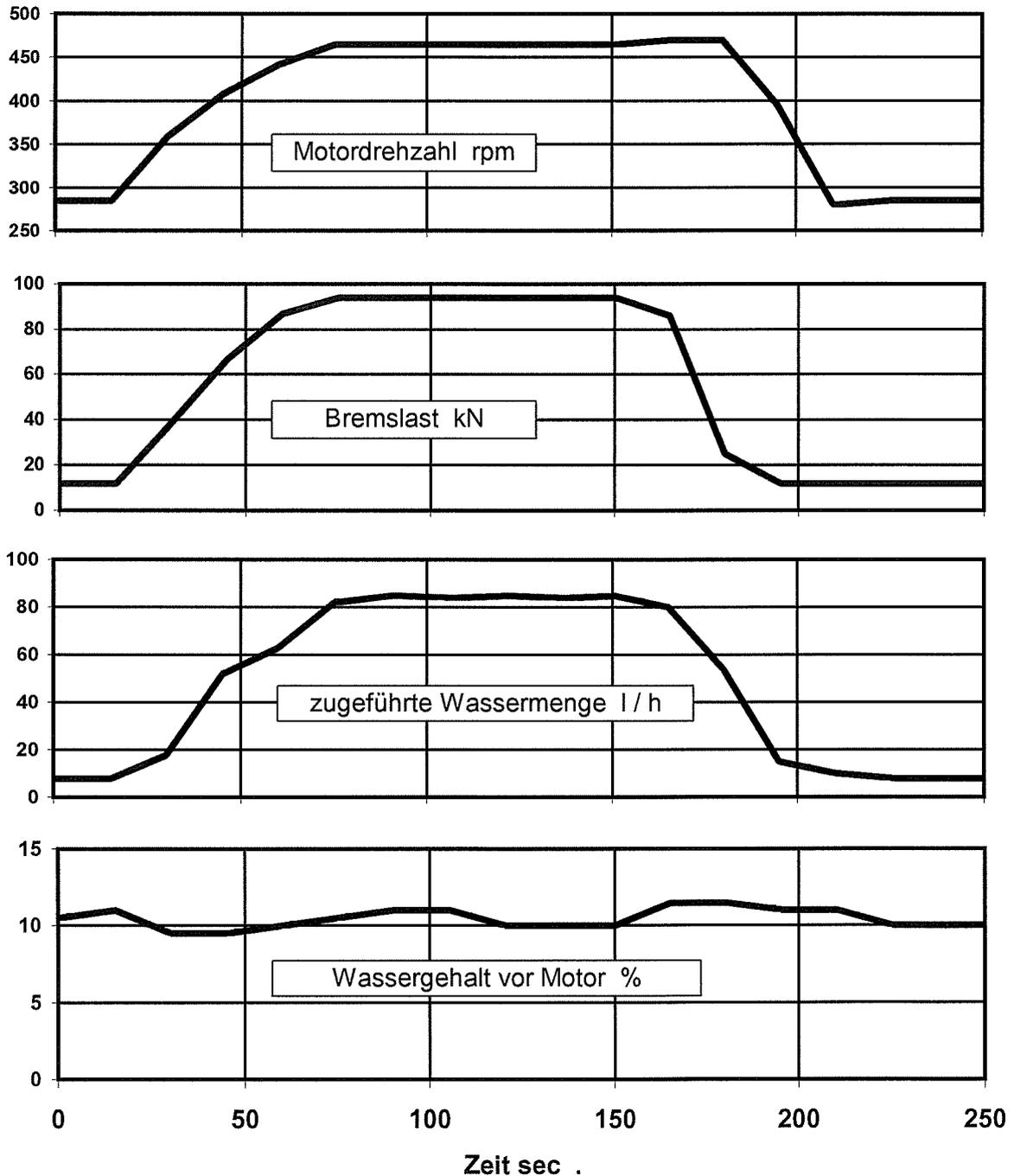
CLEAN II



variable Wasserkonzentration

Motorbetrieb Lastwechsel (5% > 60%) 6L48/60 - 1130086

Wassergehalt soll auf ca. 10% konstant gehalten werden

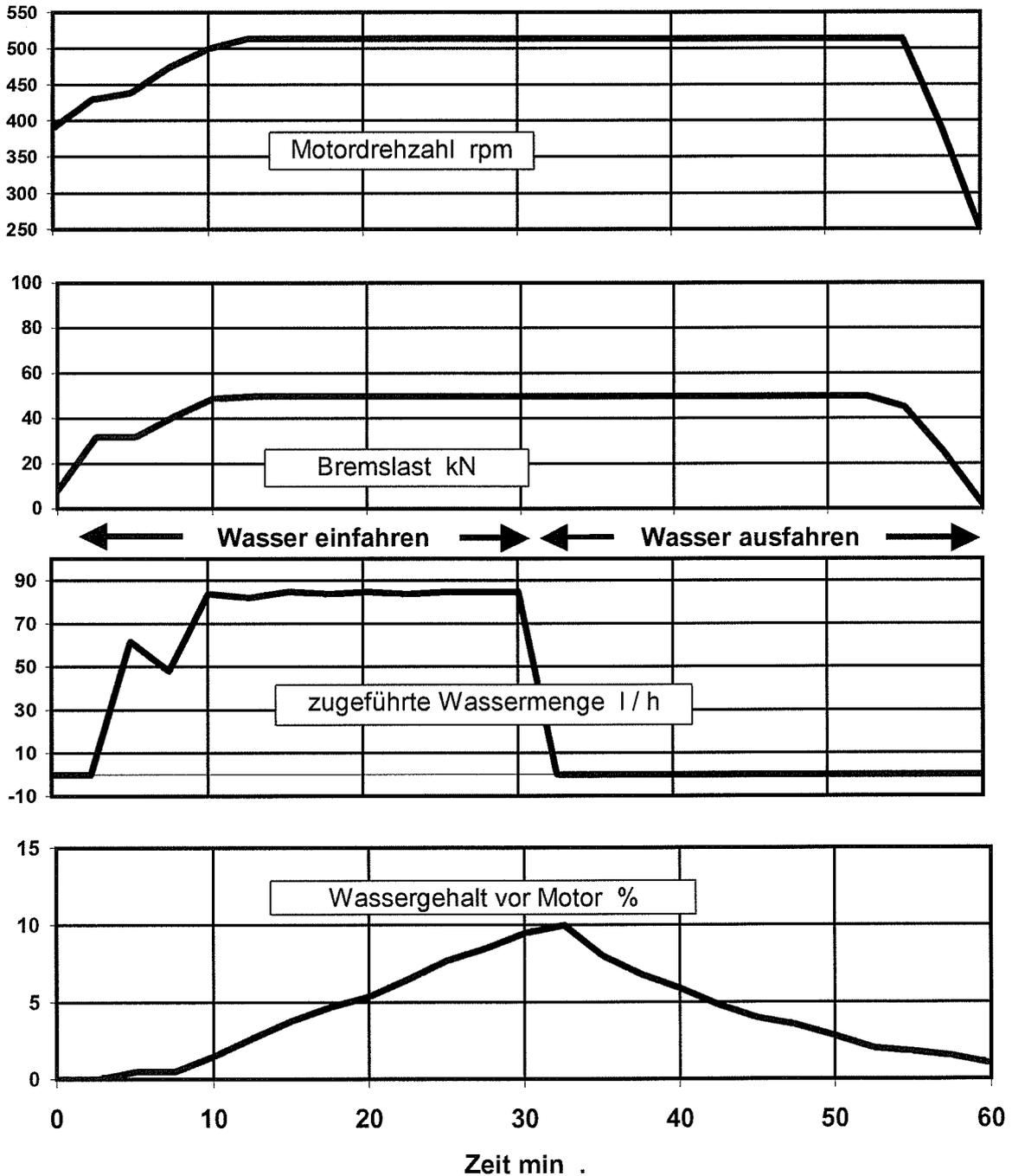


Kraftstoff-Wasser- Emulsion (KWE)

CLEAN II



variable Wasserkonzentration
 Motorbetrieb 6L48/60 - 1130086 Leistung ca. 35 %
 Wasser einfahren von 0 % auf ca. 10 %
 und ausfahren von 10 % auf ca. 0 %



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Funktions-Skizze des Jet-Assist-Systems

A Startluftflasche
(30 bar)

C Verdichterrad

1 Blende

2 Magnetventil

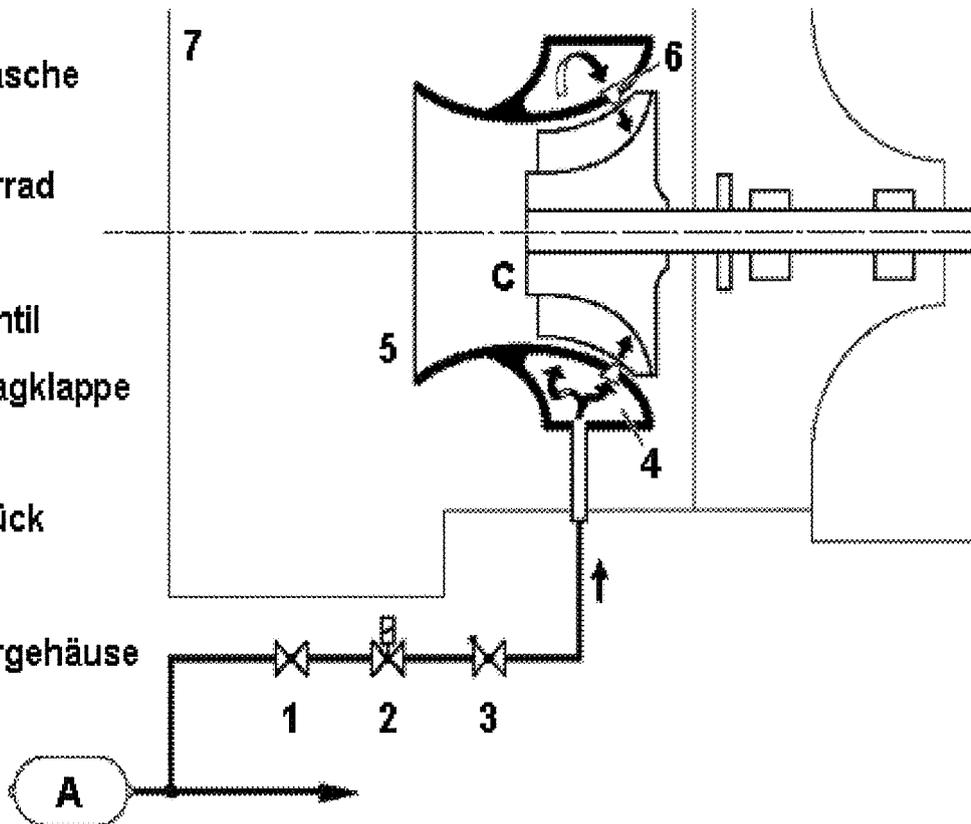
3 Rückschlagklappe

4 Ringkanal

5 Einsatzstück

6 Bohrung

7 Verdichtergehäuse



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



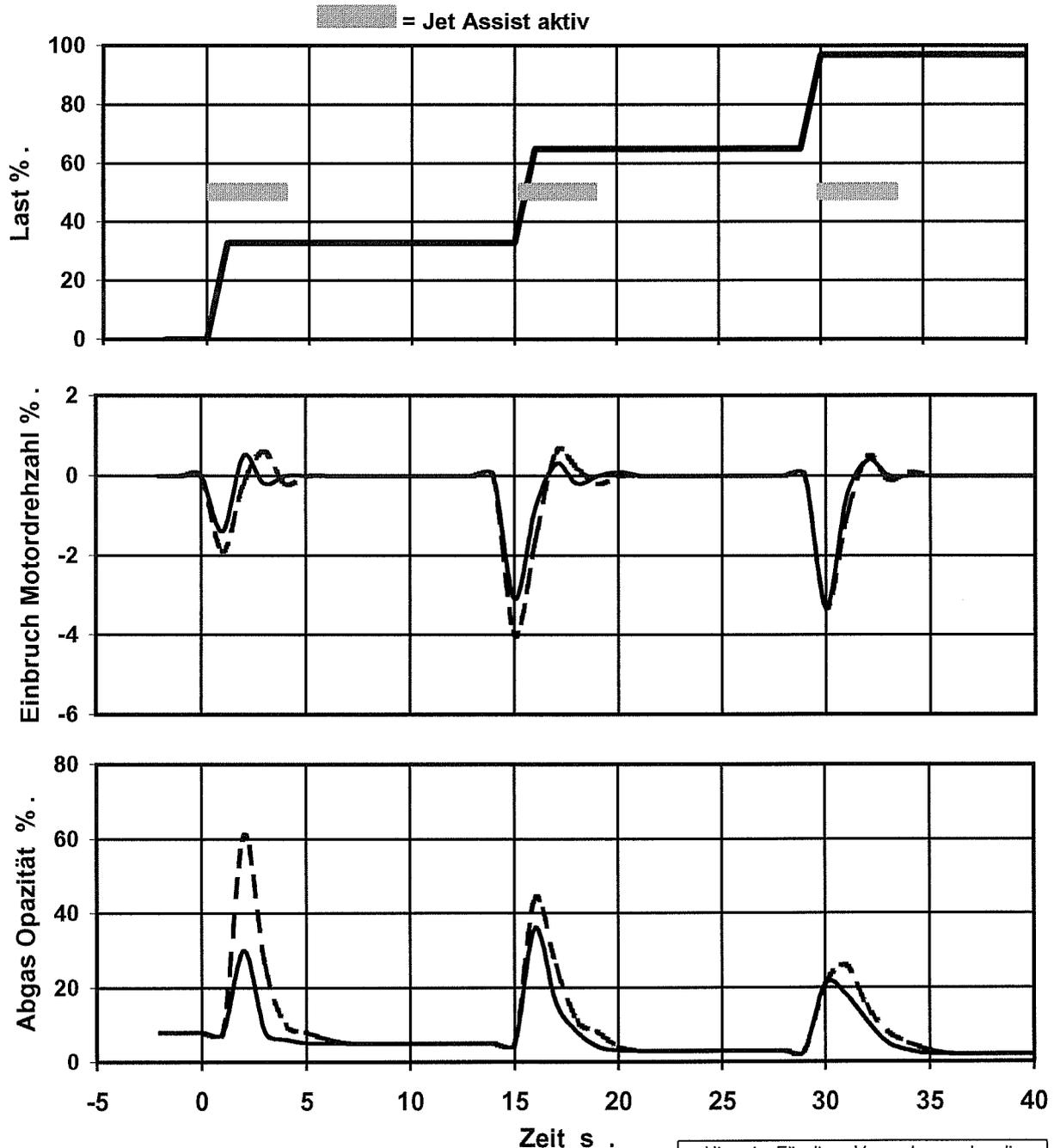
Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung

Vergleich ohne - - - - - mit ——— Jet-Assist

Common-Rail-System

7L 16/24 CR - 21473



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

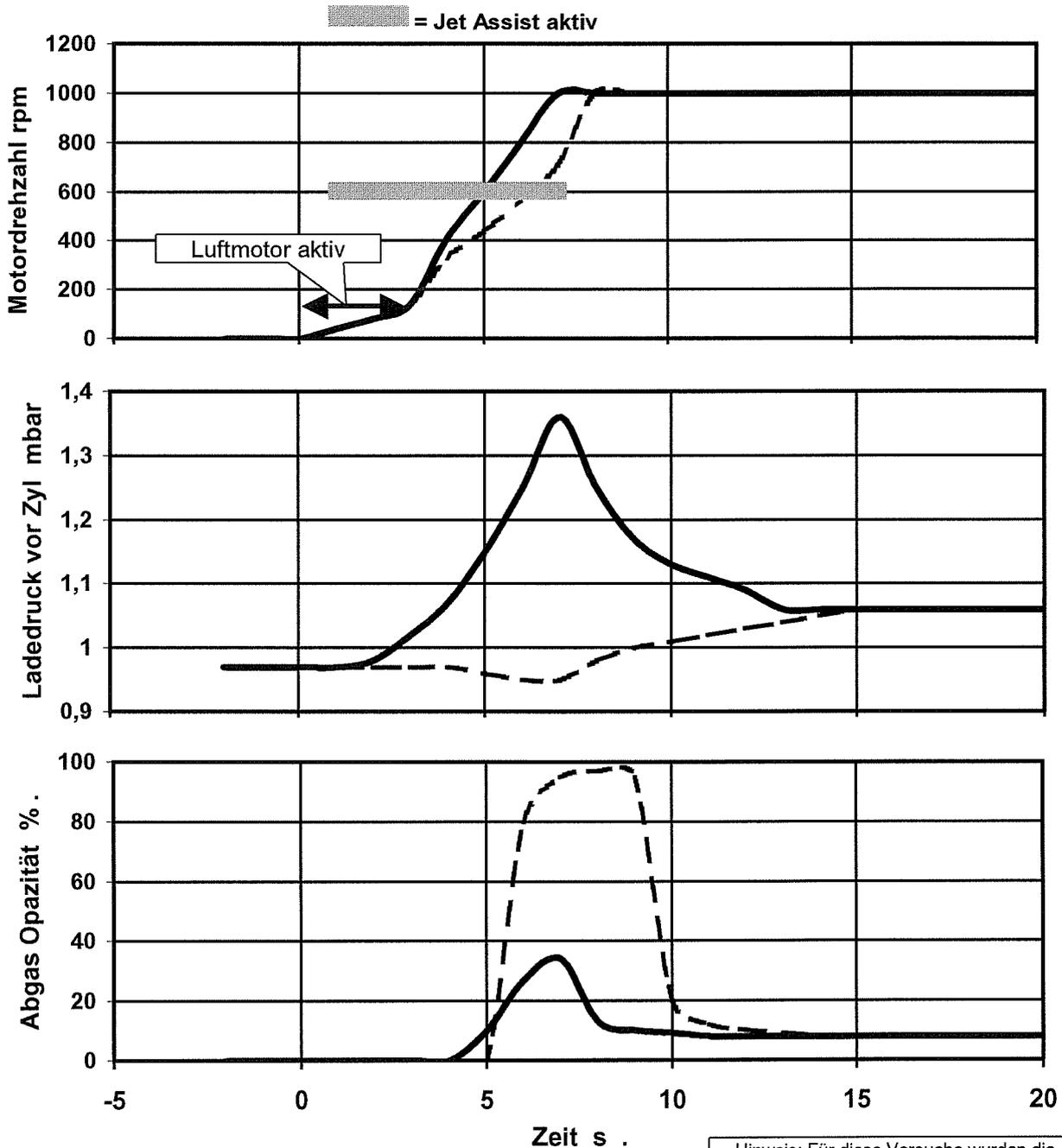


Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Motorstart mit Luftmotor
Vergleich ohne - - - - - mit ——— Jet-Assist

Common-Rail-System

7L 16/24 CR - 21473



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



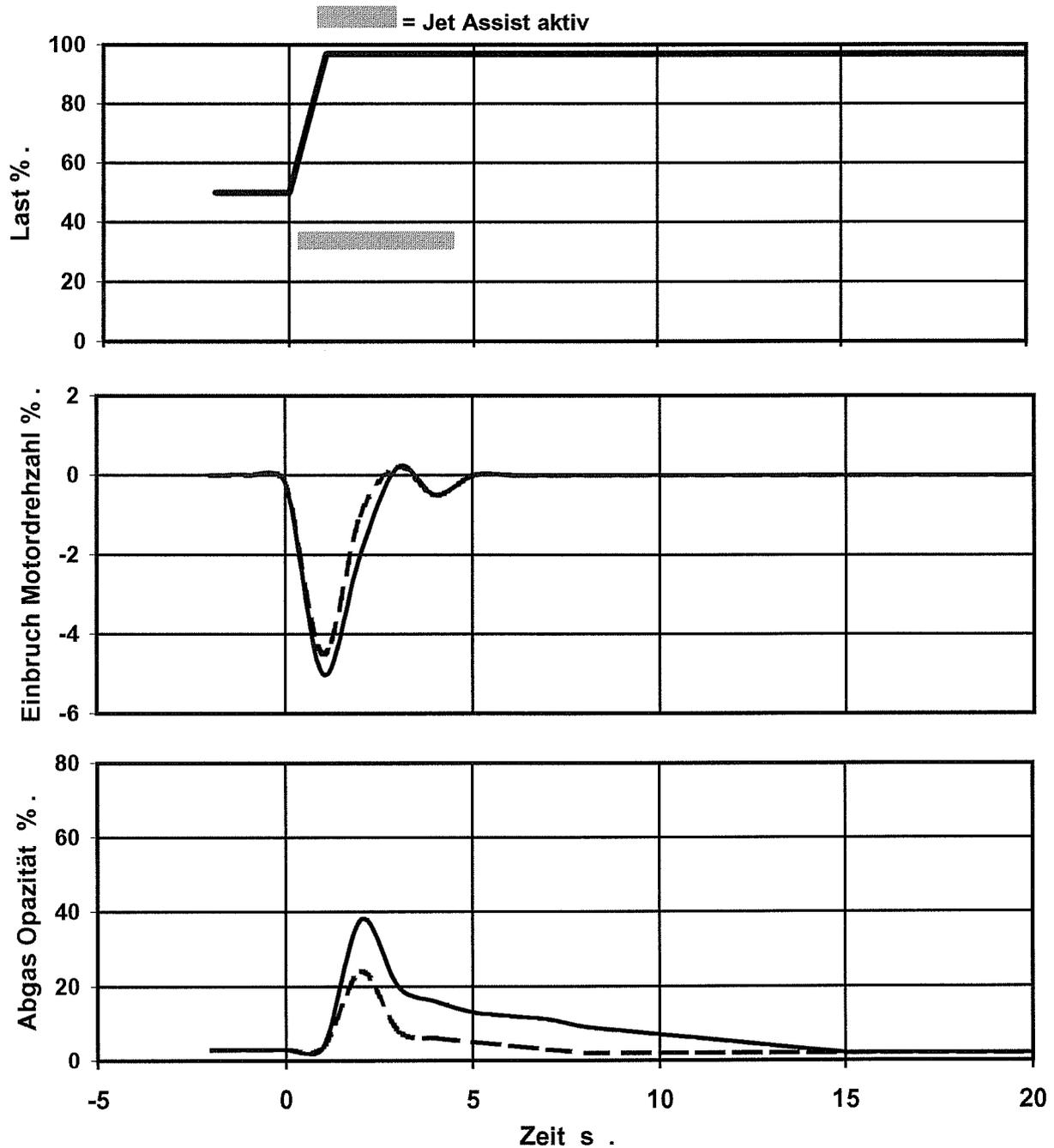
Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung

Vergleich 4,0 bar - - - - - 2,5 bar ——— Jet-Assist-Druck

Common-Rail-System

7L 16/24 CR - 21473



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

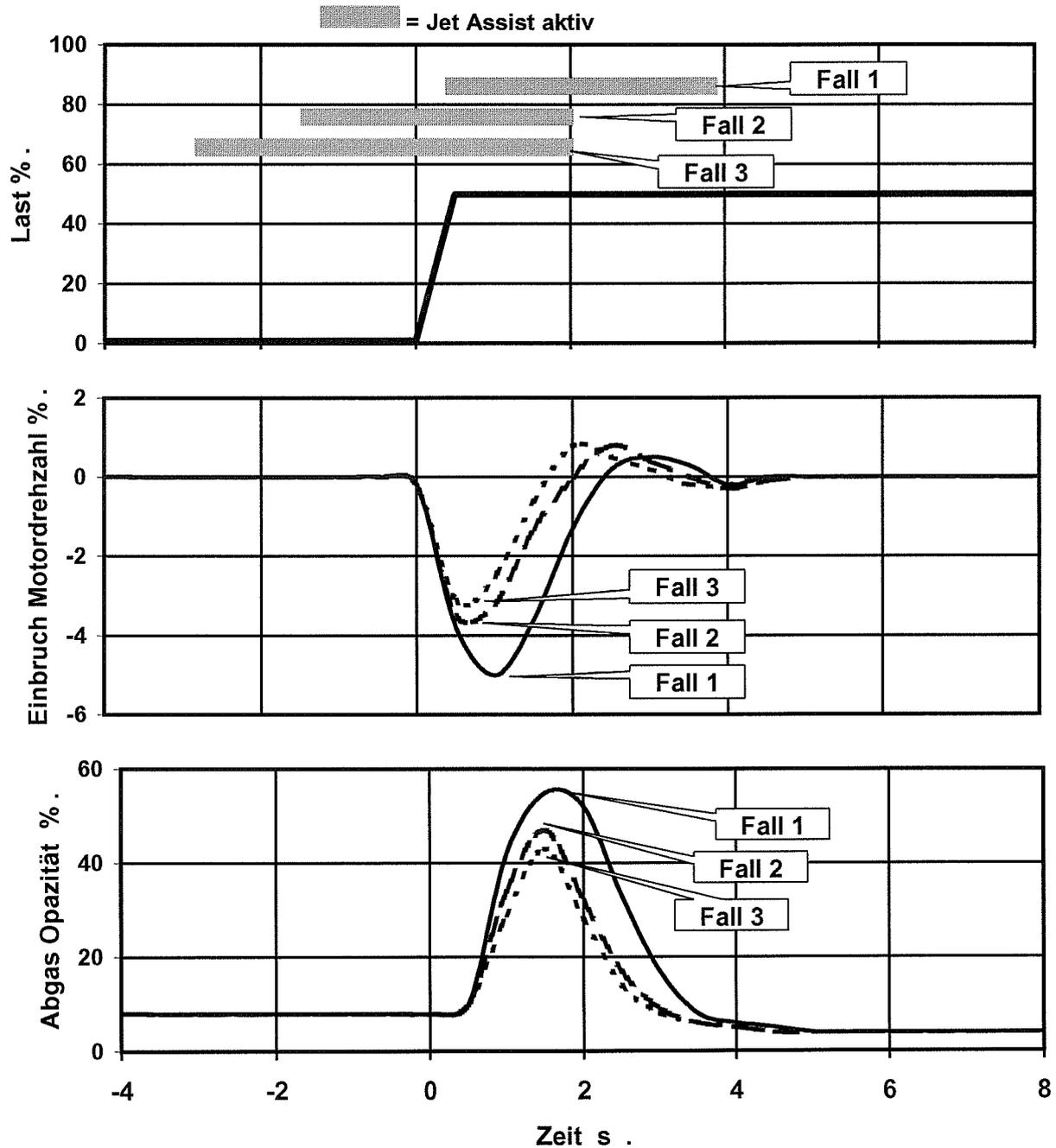


Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung
Vergleich: verschiedene Startzeiten des Jet-Assist

Common-Rail-System

7L 16/24 CR - 21473



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

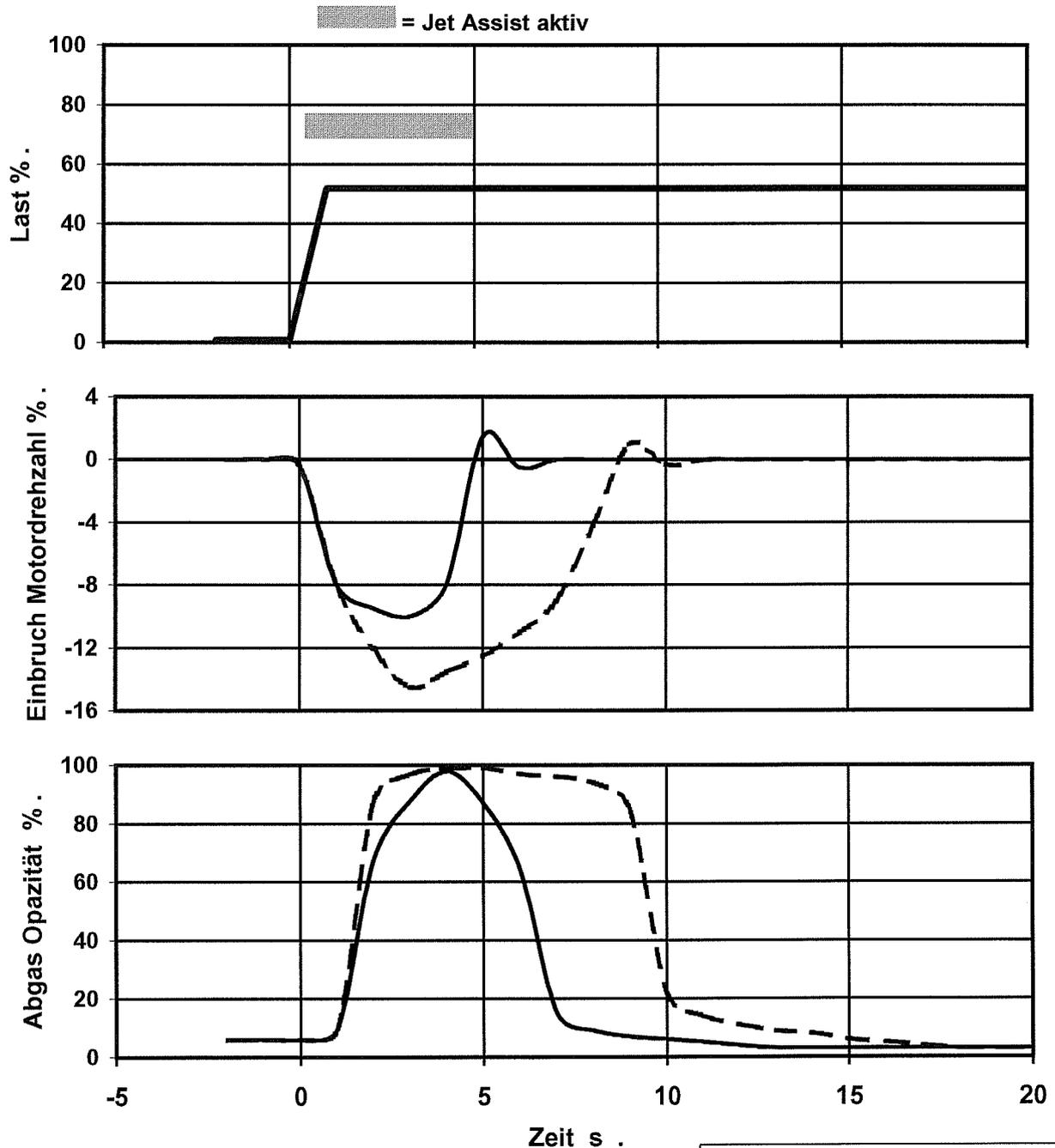


Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung

Vergleich: ohne - - - - - mit ——— Jet-Assist

8L 27/38 - 21377



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

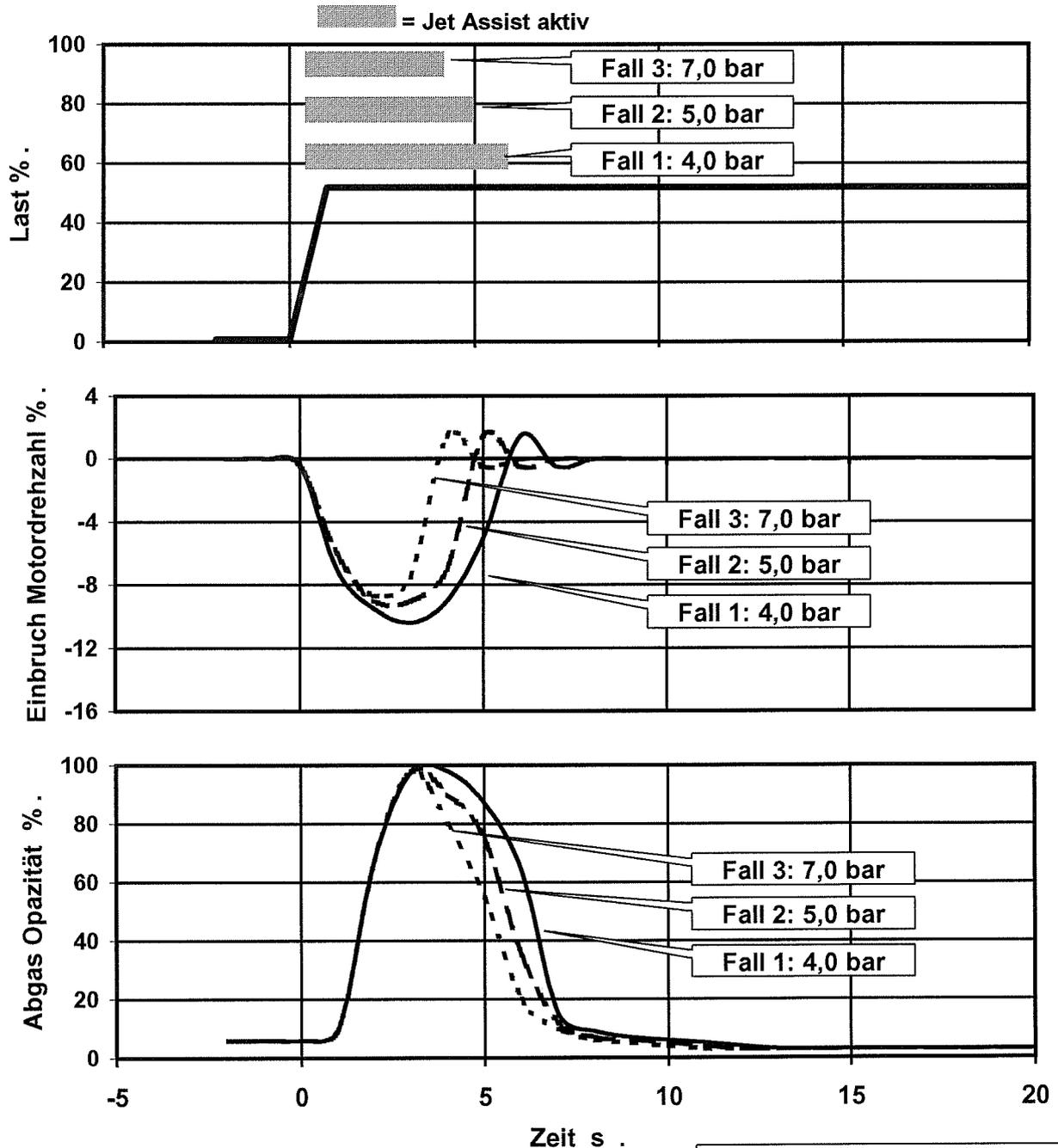
CLEAN II



Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung
Vergleich: verschiedene Jet-Assist-Drücke

8L 27/38 - 21377



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

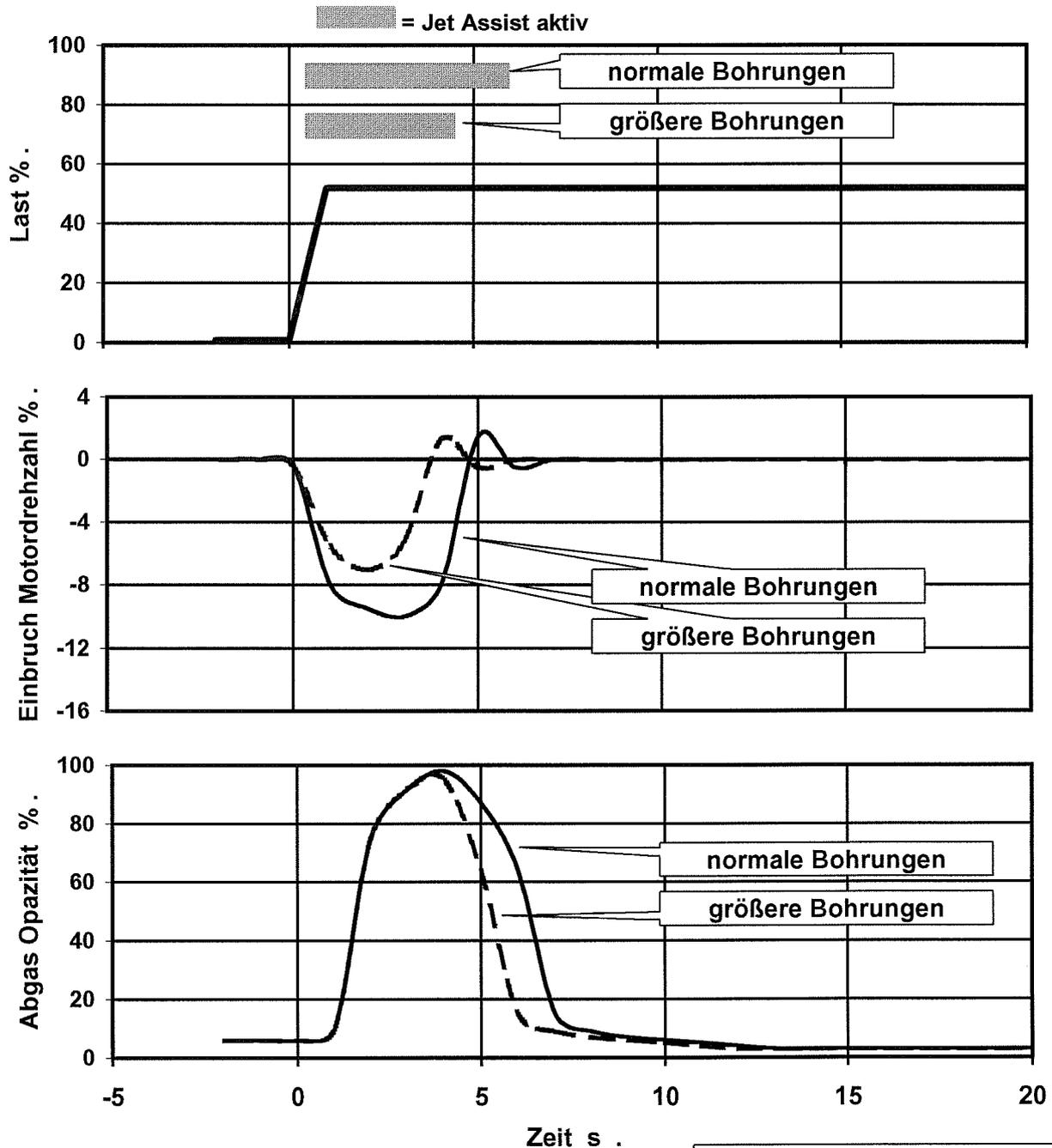
CLEAN II



Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Lastaufschaltung

Vergleich: normale — vergrößerte (+50%) - - - - Jet-Assist-Bohrungen
8L 27/38 - 21377



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

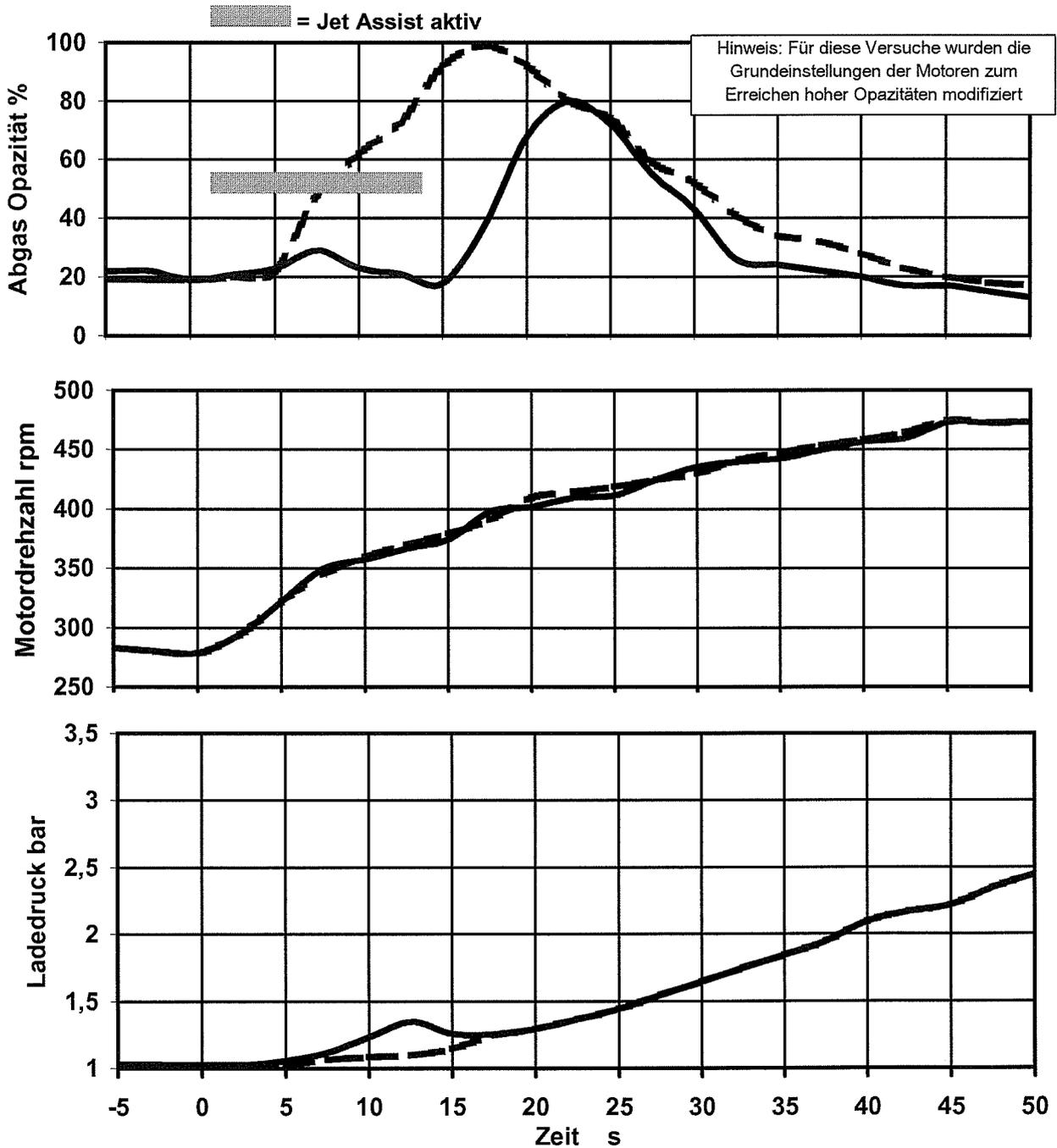


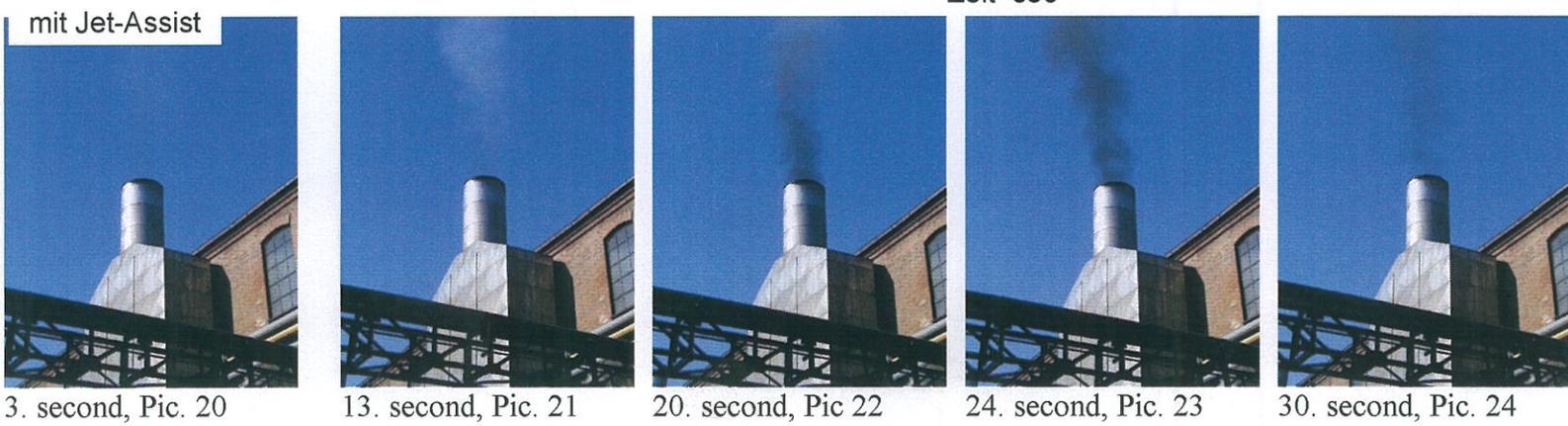
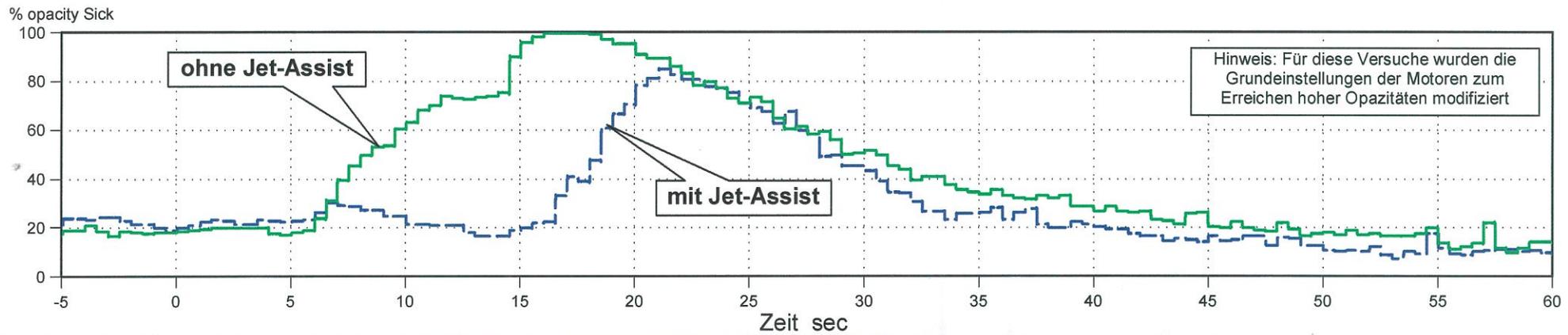
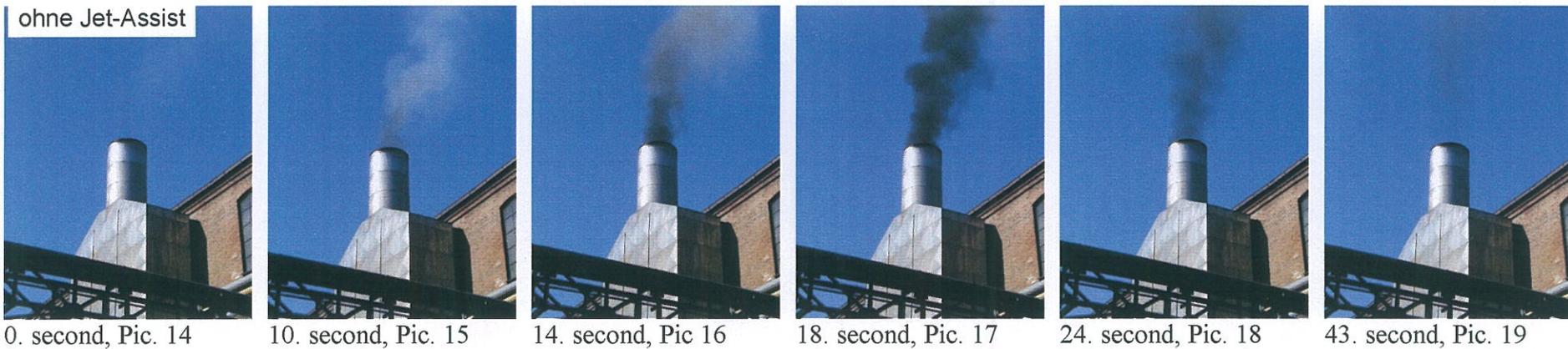
Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Betriebswerte über der Zeit während Belastung von 5 % auf 60 %
(Combinator-Mode siehe Anl. C / 6) in ca. 45 sec

Vergleich ohne ----- und mit ——— Jet-Assist

6L 48/60 - 1130086





6L48/60 – 1130086

**Hochfahren nach
Combinator-Mode
5 % bis 60 % in 45 sec**

mit / ohne Jet-Assist

Anlage D1 / 10



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



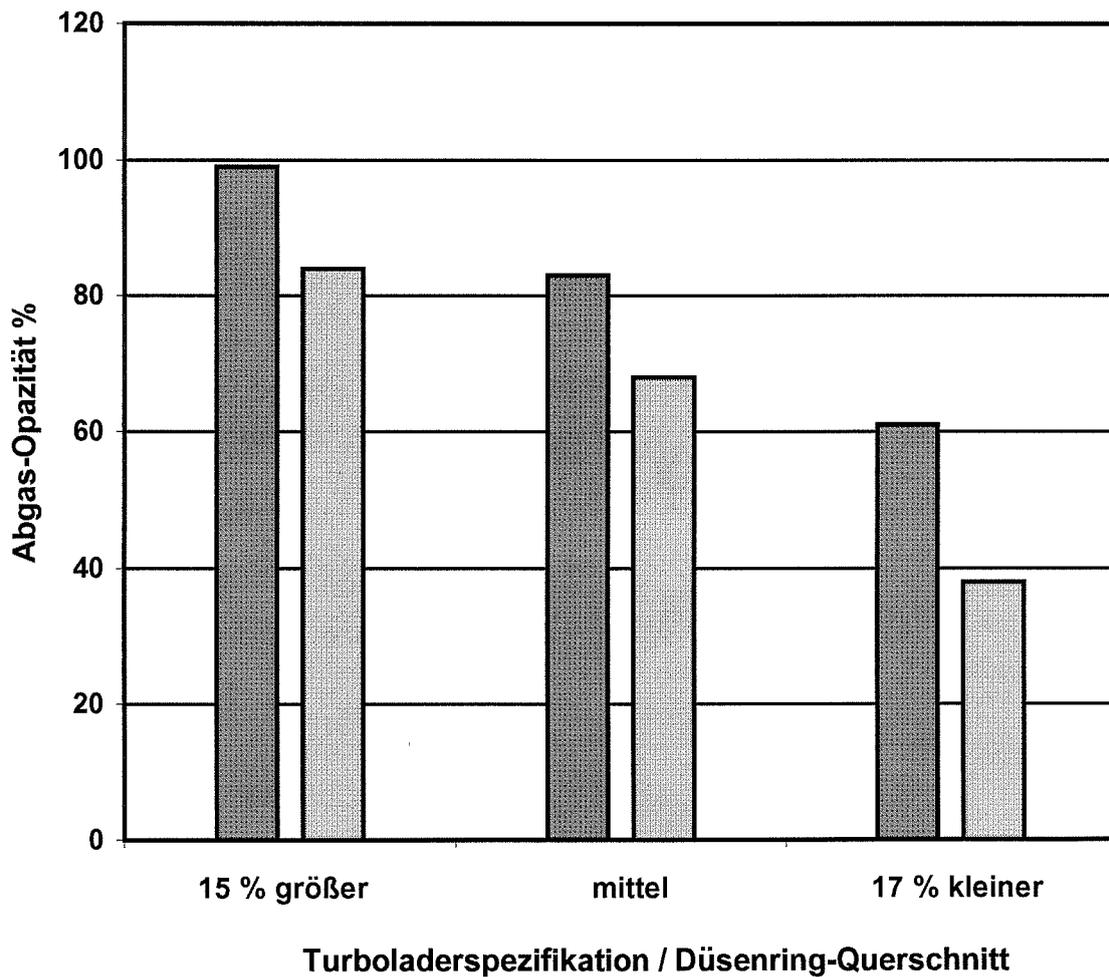
Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 45 sec
(Combinator-Mode siehe Anl. C / 6)

6L 48/60 - 1130086

Verschiedene Turbolader-Spezifikationen

Maximale erreichte Opazitätswerte ohne  und mit  Jet-Assist



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

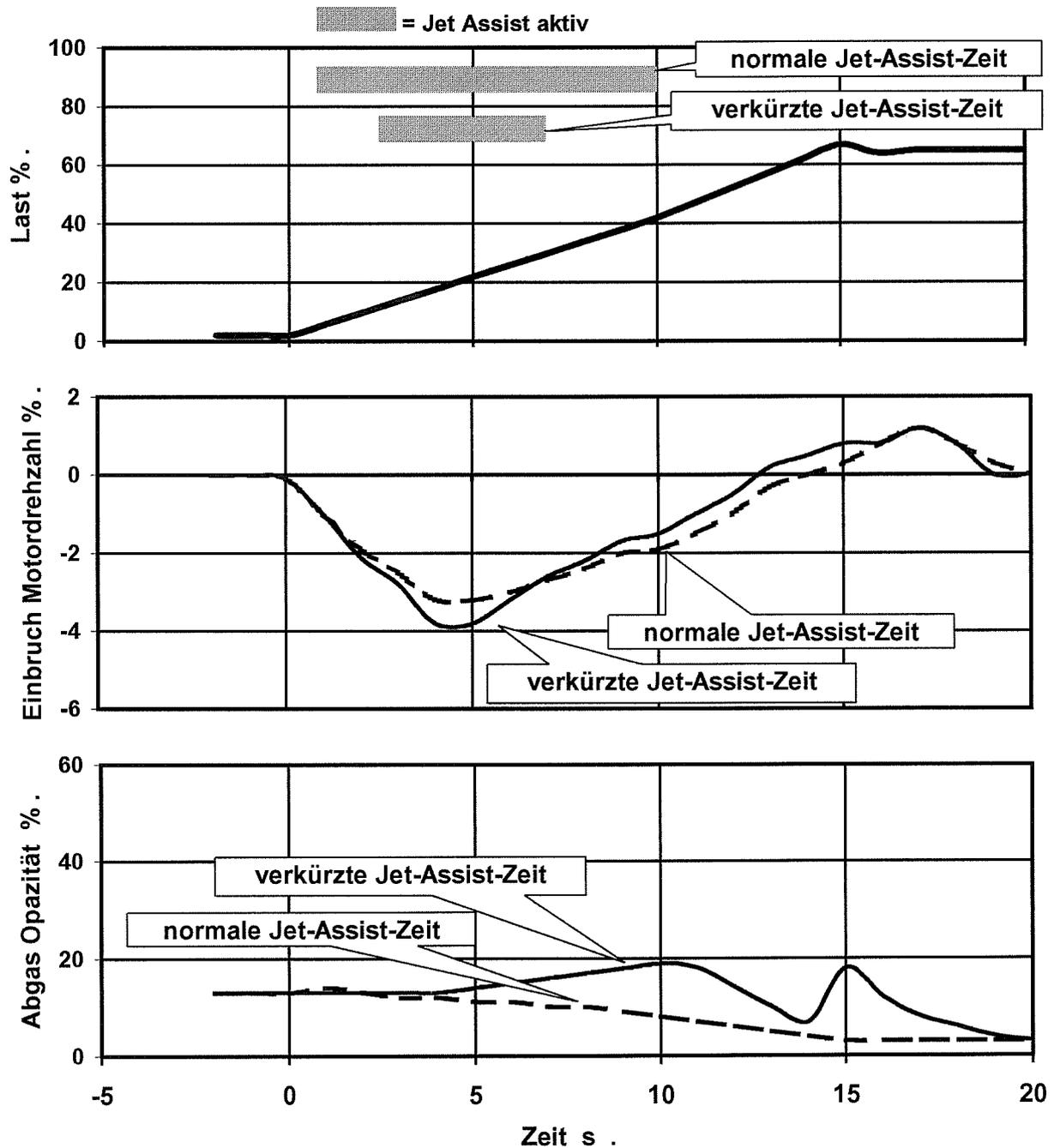


Zusatzluft im Bereich Verdichter (Jet-Assist)

Belastung bei konstanter Drehzahl / Variation der Jet-Assist-Steuerzeit

Vergleich: normale - - - - verkürzte — Jet-Assist-Zeit

6L 48/60 - 1130086

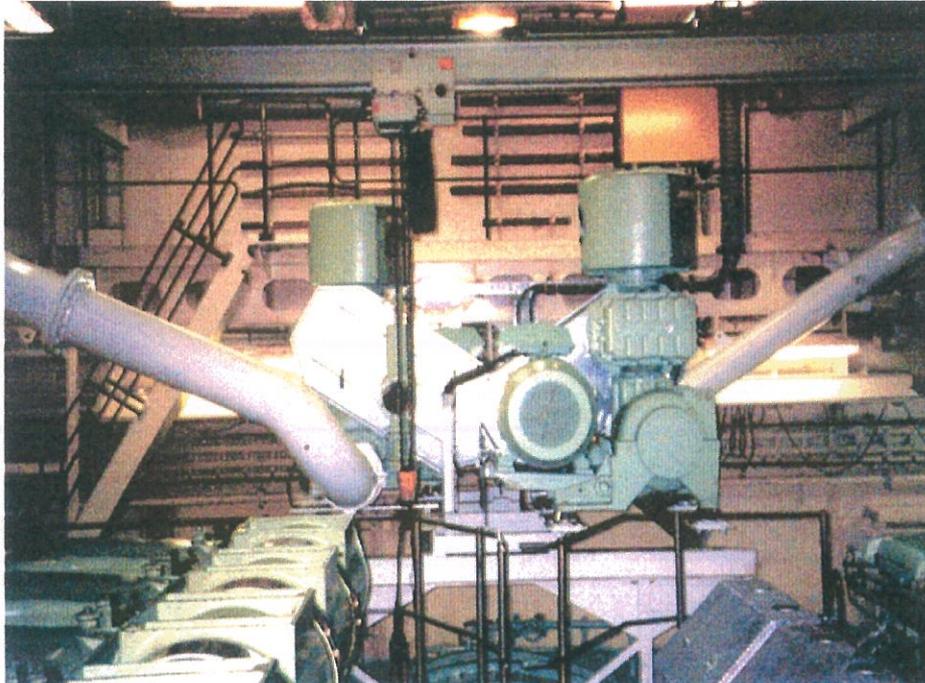


Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



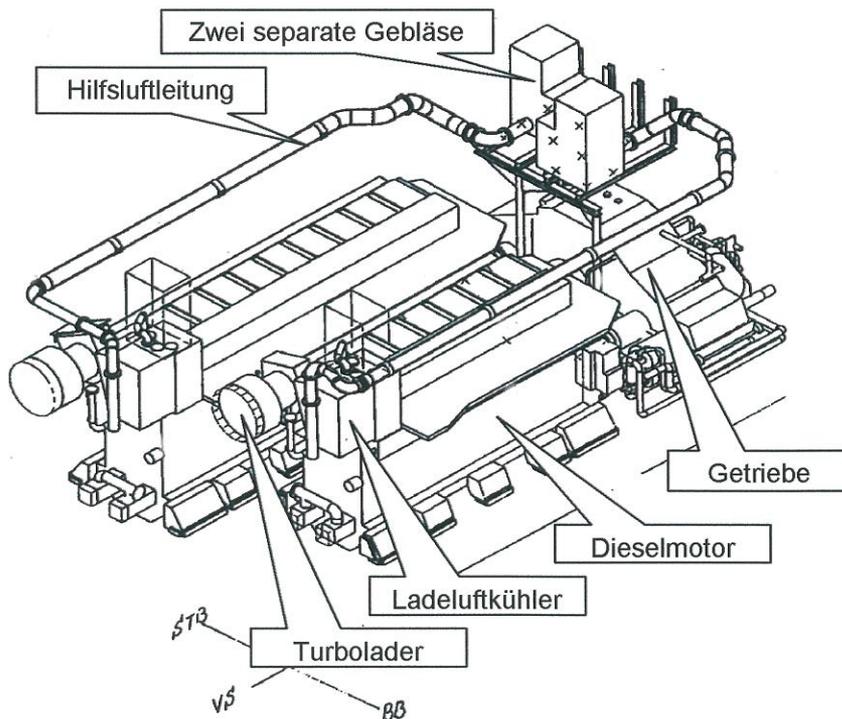
Zusatzluft im Bereich Verdichter (Hilfsluftgebläse)
Beispiel für die Installation von Hilfsgebläsen an Bord eines Schiffes



Blick in einen Maschinenraum einer Zweimotoren-Schiffsantriebsanlage

Blickrichtung:
Schiffsheck

Installation von zwei Hilfsgebläsen im Bereich zwischen den beiden Motoren über dem Wellenge triebe



Schematische Darstellung der Zweimotoren-Schiffsantriebsanlage

Installation von je einem Gebläse für einen Motor

Antrieb der Gebläse mit Elektromotoren

Ansaugung der Luft aus dem Maschinenraum

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



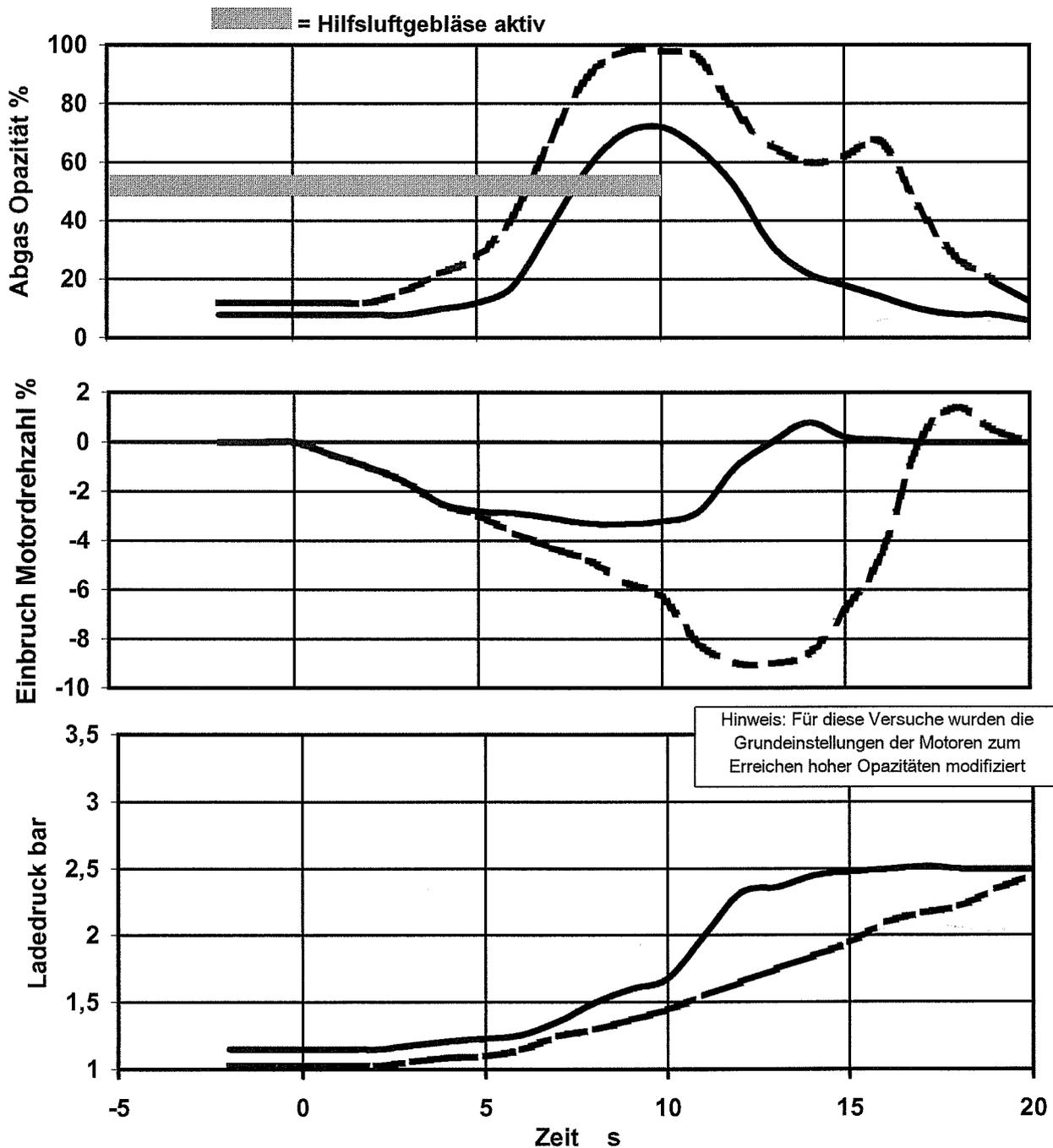
Zusatzluft im Bereich Verdichter (Hilfsluftgebläse)

Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 15 sec bei konst. Drehzahl

Vergleich ohne ----- und mit ——— Hilfsluft

6L 48/60 - 1130086



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Zusatzluft direkt in den Zylinder

Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Betriebswerte über der Zeit

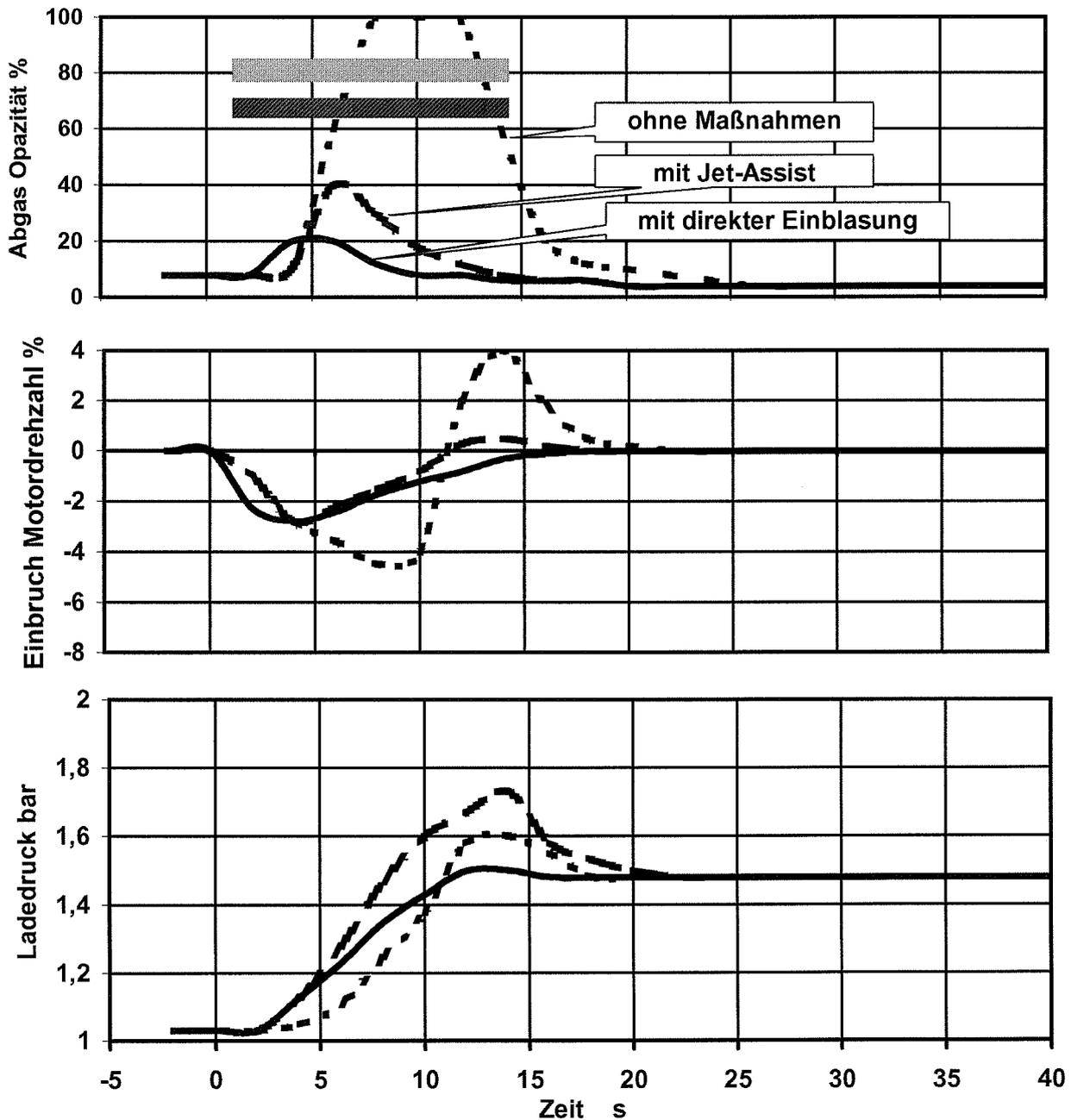
Belastung von 5 % auf 35 % in ca. 10 sec bei konst. Drehzahl

Ohne Maßnahmen - - - - - mit Jet-Assist - - - - -

mit direkter Einblasung ———

6L 32/40 - 1063080

▨ = Jet-Assist aktiv ▩ = direkte Einblasung aktiv



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Zusatzluft direkt in den Zylinder

Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Betriebswerte über der Zeit

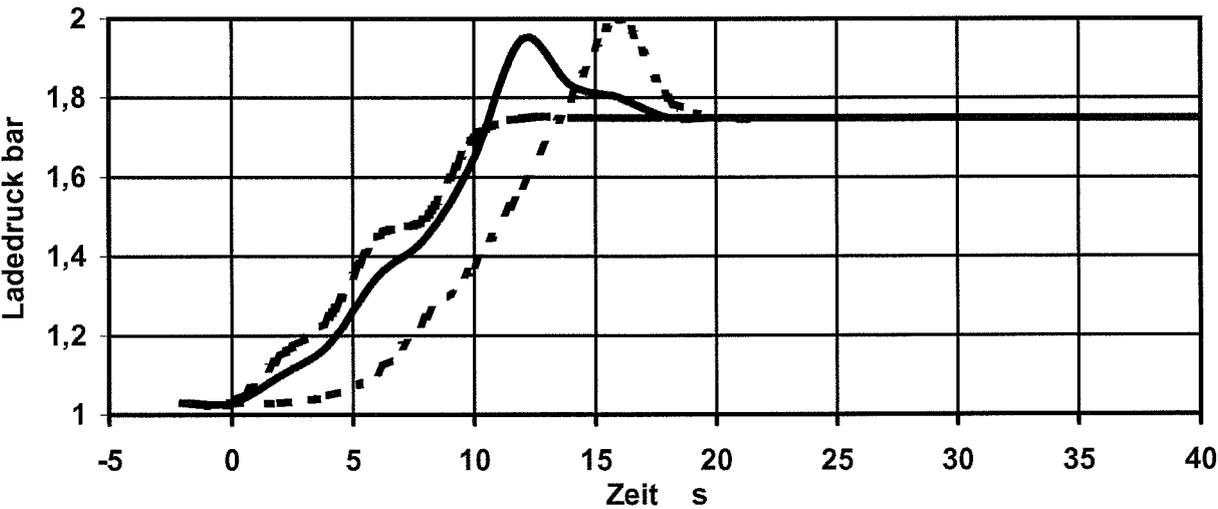
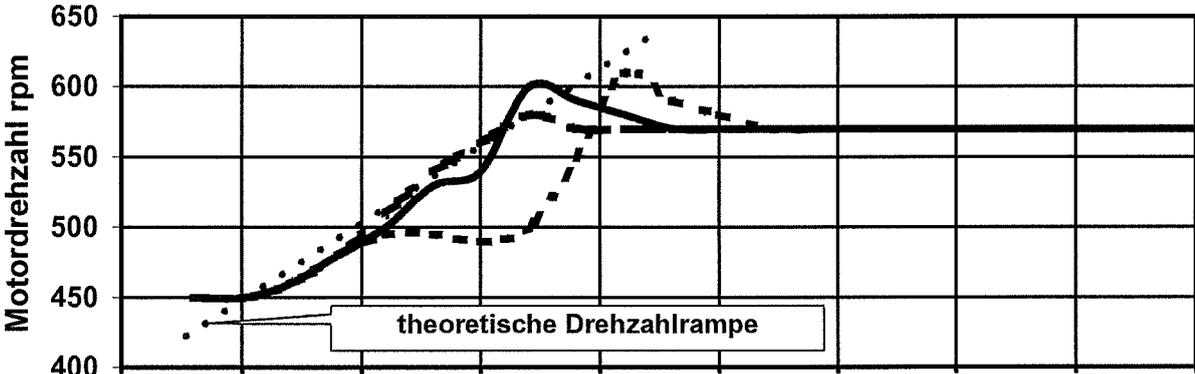
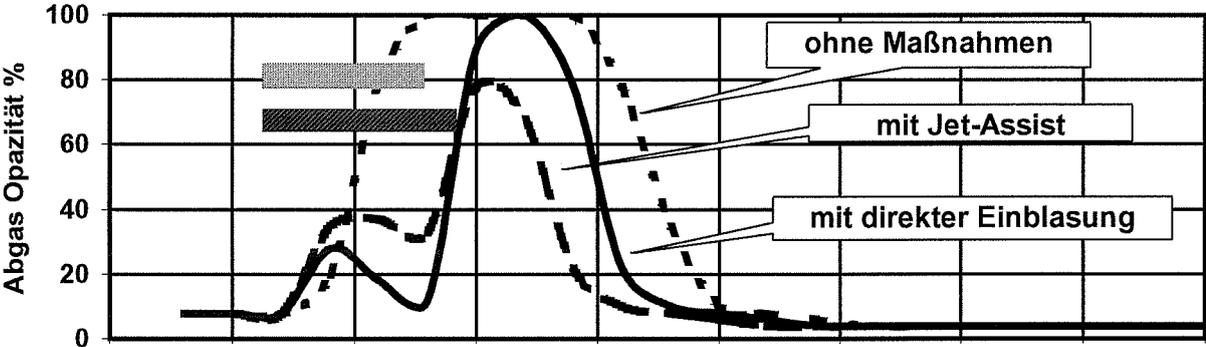
Belastung von 5 % auf 45 % in ca. 10 sec nach Kombinatorikurve

Ohne Maßnahmen - - - - - mit Jet-Assist - - - - -

mit direkter Einblasung ———

6L 32/40 - 1063080

▨ = Jet-Assist aktiv ▨ = direkte Einblasung aktiv



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

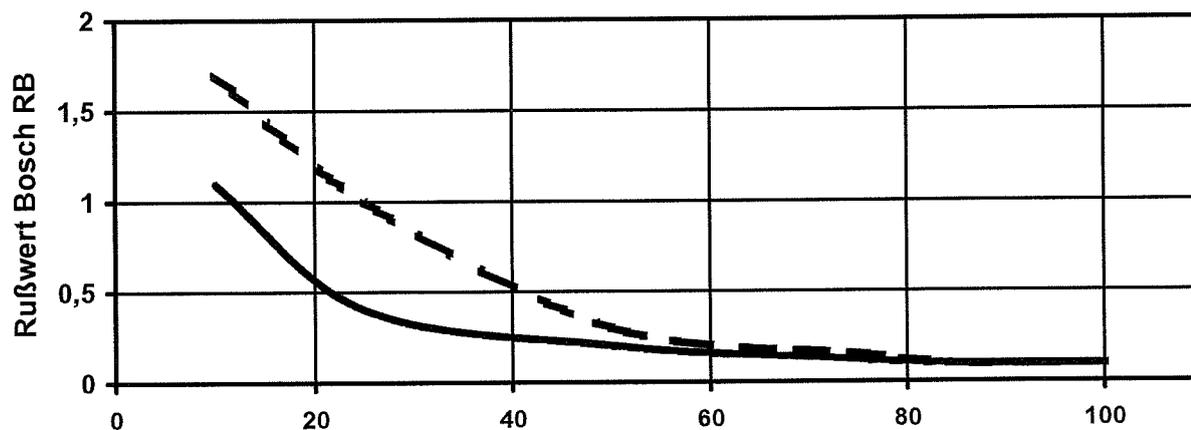
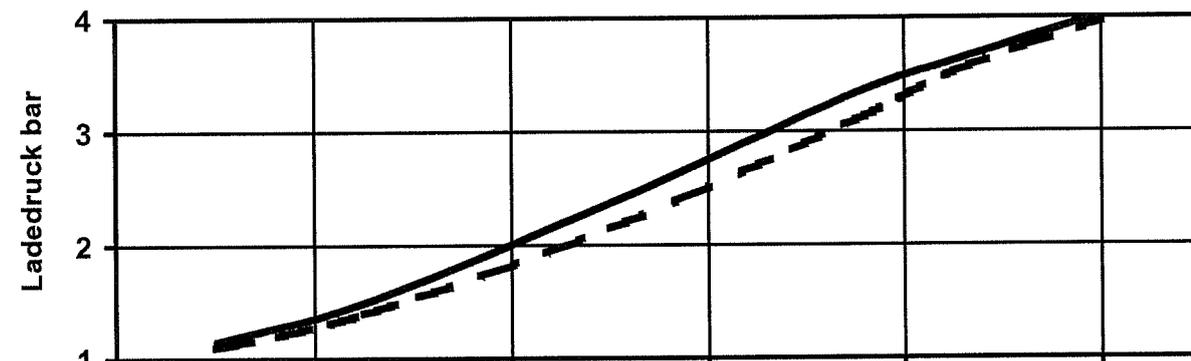
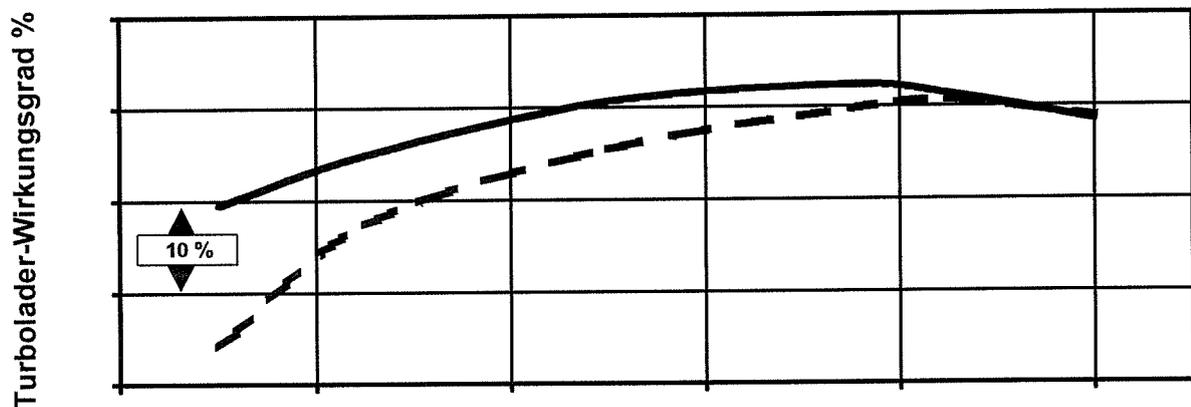


Veränderte Turbolader-Charakteristik / Teillastlader

Stationäre Messungen in Abhängigkeit von der Leistung bei konst. Drehzahl

Vergleich: - - - - - Ausgangs-Lader ——— Teillastlader

6L 32/40 - 1063080



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

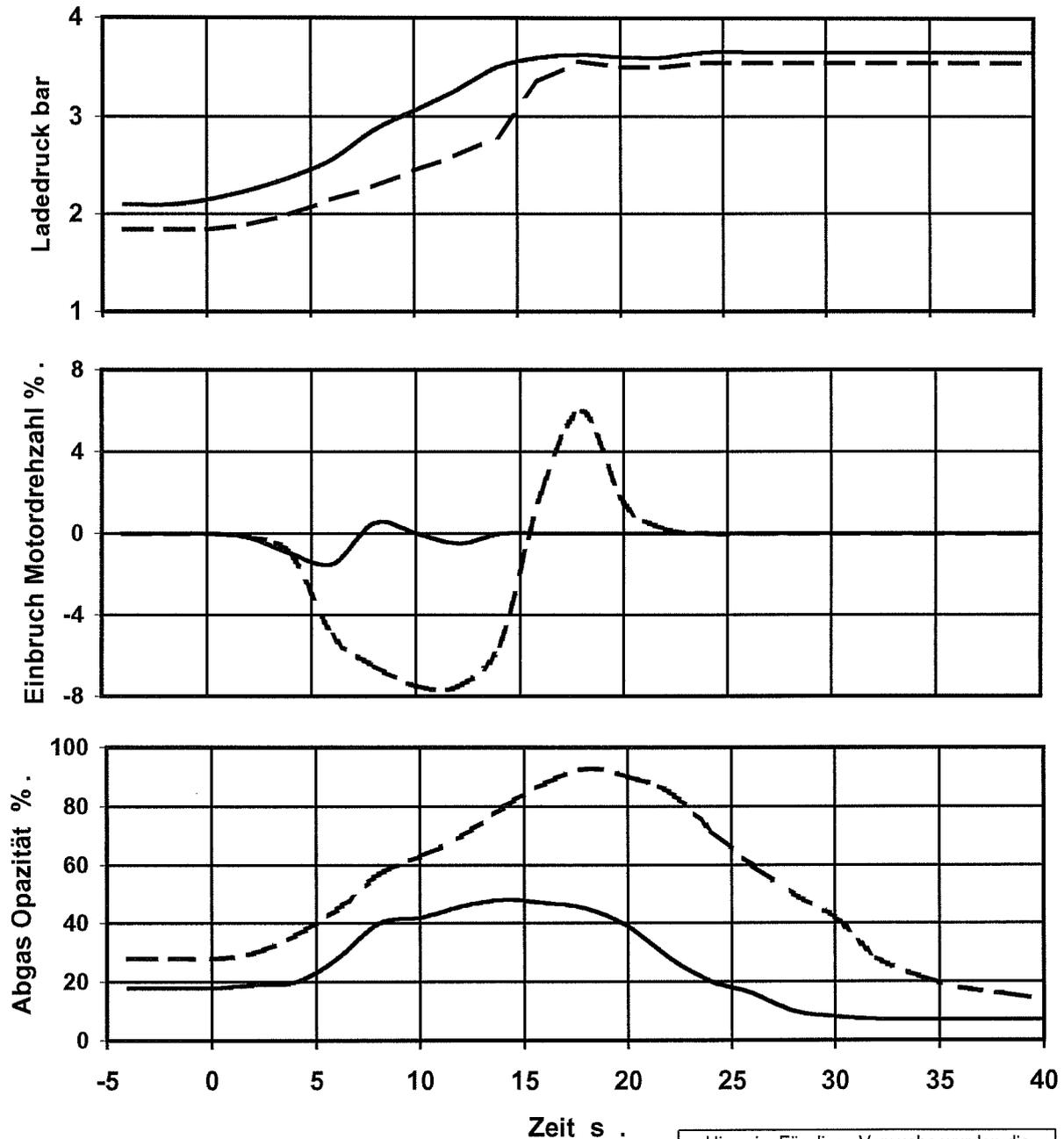


Veränderte Turbolader-Charakteristik / Teillastlader

Belastung von 10 % auf 60 % in 15 sec bei konstanter Drehzahl

Vergleich: - - - - - Ausgangs-Lader ——— Teillastlader

6L 32/40 - 106080



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Veränderte Turbolader-Charakteristik / Turbolader-Geometrie

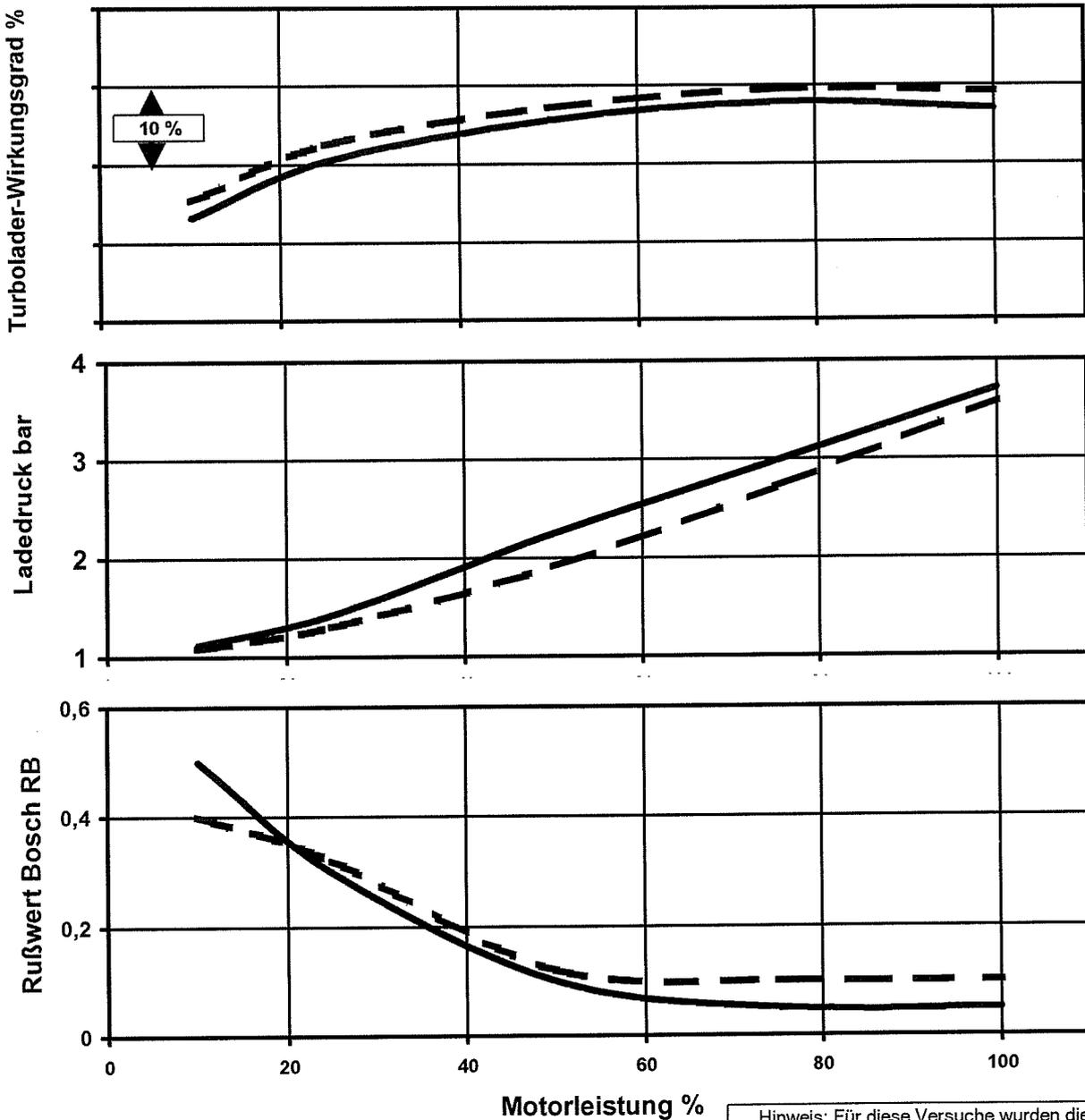
Stationäre Messungen in Abhängigkeit von der Leistung bei konst. Drehzahl

Vergleich: Turbolader - - - - - Variante 1 ——— Variante 2

Umbau von Variante 1 auf 2 bedeutet: Querschnitt des

- Nachleitapparates 10 % kleiner
- Düsenrings um 17 % kleiner

8L 27/38 - 21377



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Veränderte Turbolader-Charakteristik / Turbolader-Geometrie

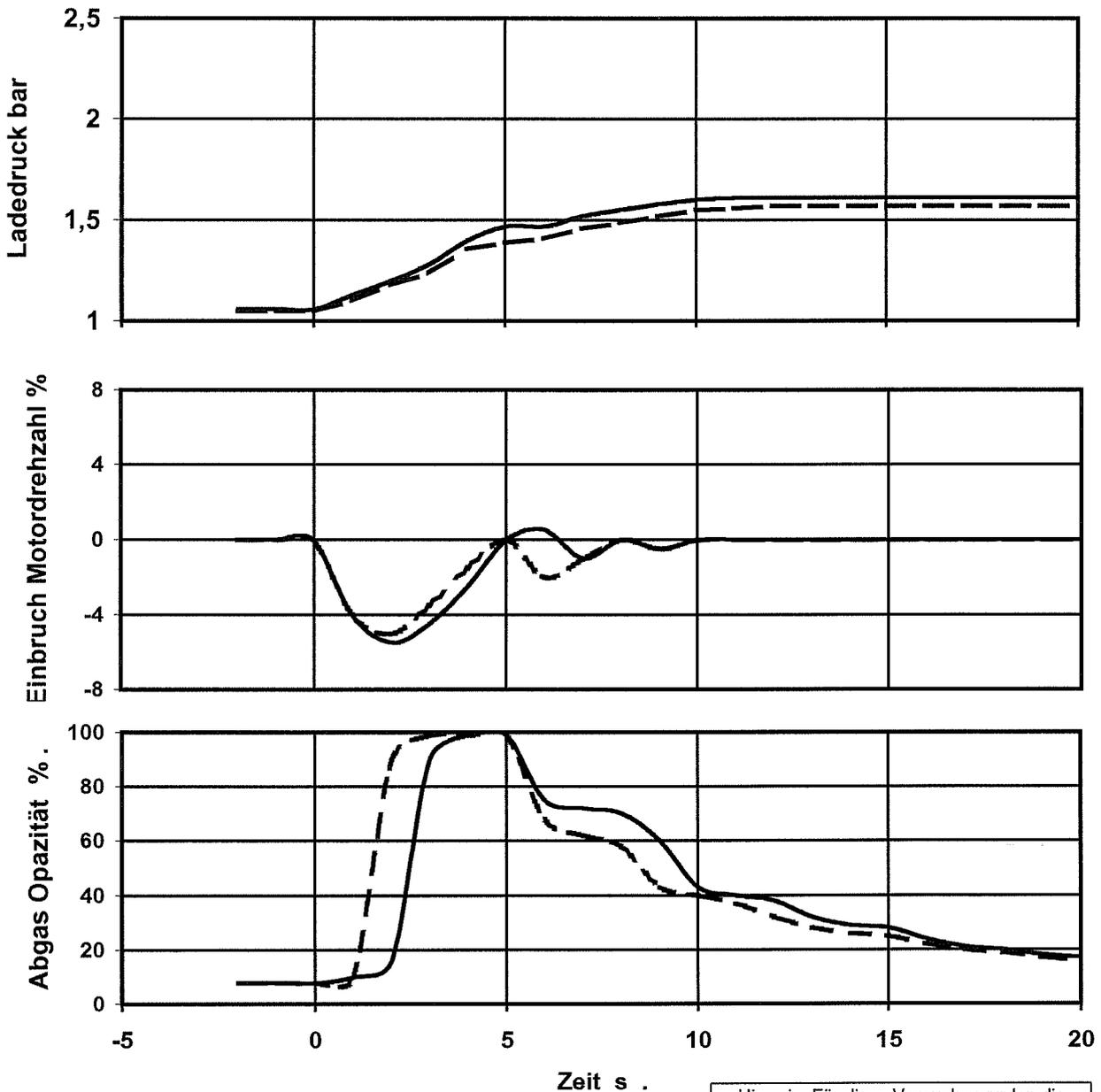
40 % Lastaufschaltung bei Nenndrehzahl (750 rpm) ausgehend von 0 %

Vergleich: Turbolader - - - - - Variante 1 ——— Variante 2

Umbau von Variante 1 auf 2 bedeutet: Querschnitt des

- Nachleitapparates 10 % kleiner
- Düsenrings um 17 % kleiner

8L 27/38 - 21377



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Veränderte Turbolader-Charakteristik / Turbolader-Geometrie

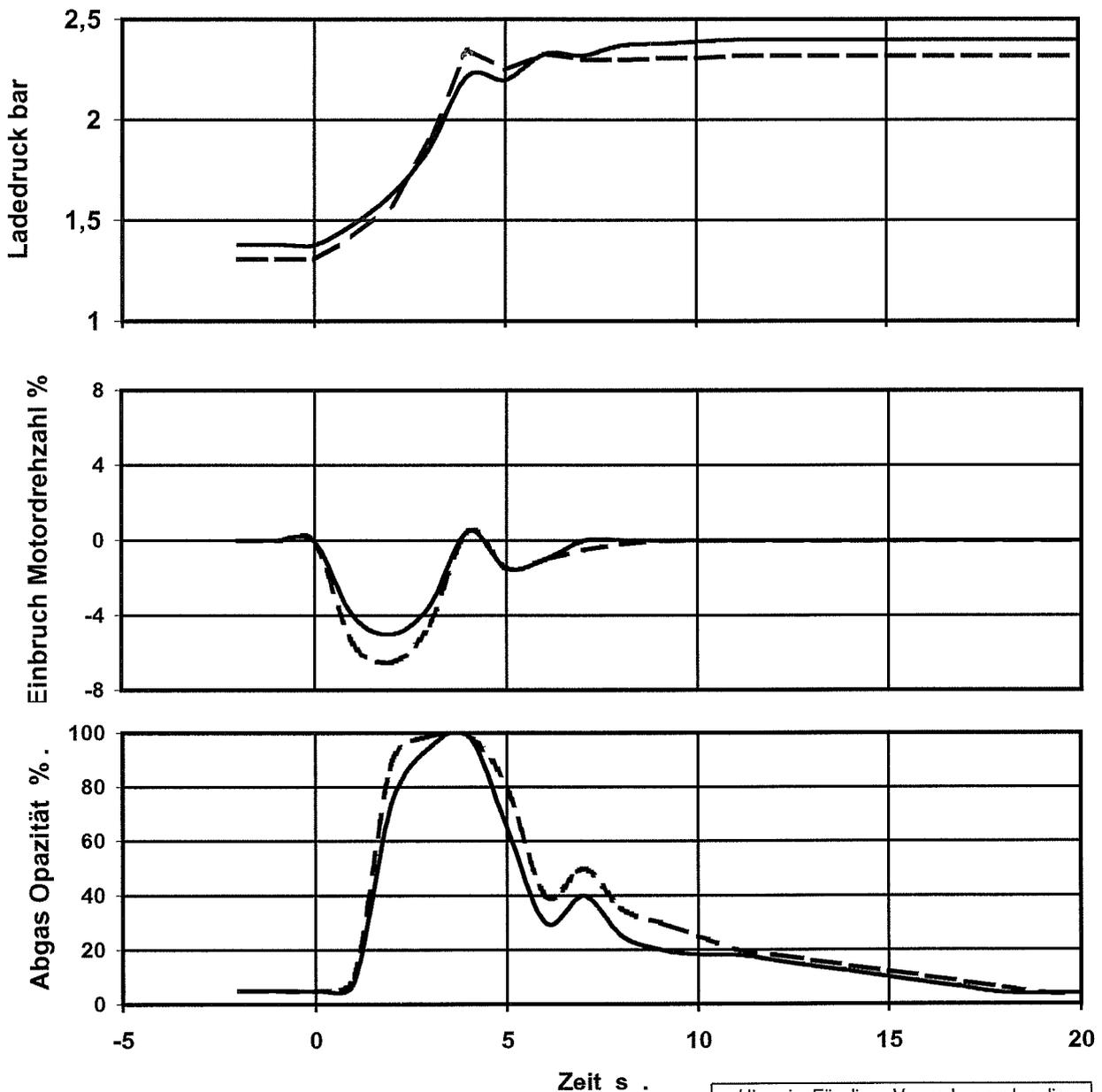
40 % Lastaufschaltung bei Nenndrehzahl (750 rpm) ausgehend von 25 %

Vergleich: Turbolader - - - - - Variante 1 ——— Variante 2

Umbau von Variante 1 auf 2 bedeutet: Querschnitt des

- Nachleitapparates 10 % kleiner
- Düsenrings um 17 % kleiner

8L 27/38 - 21377



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

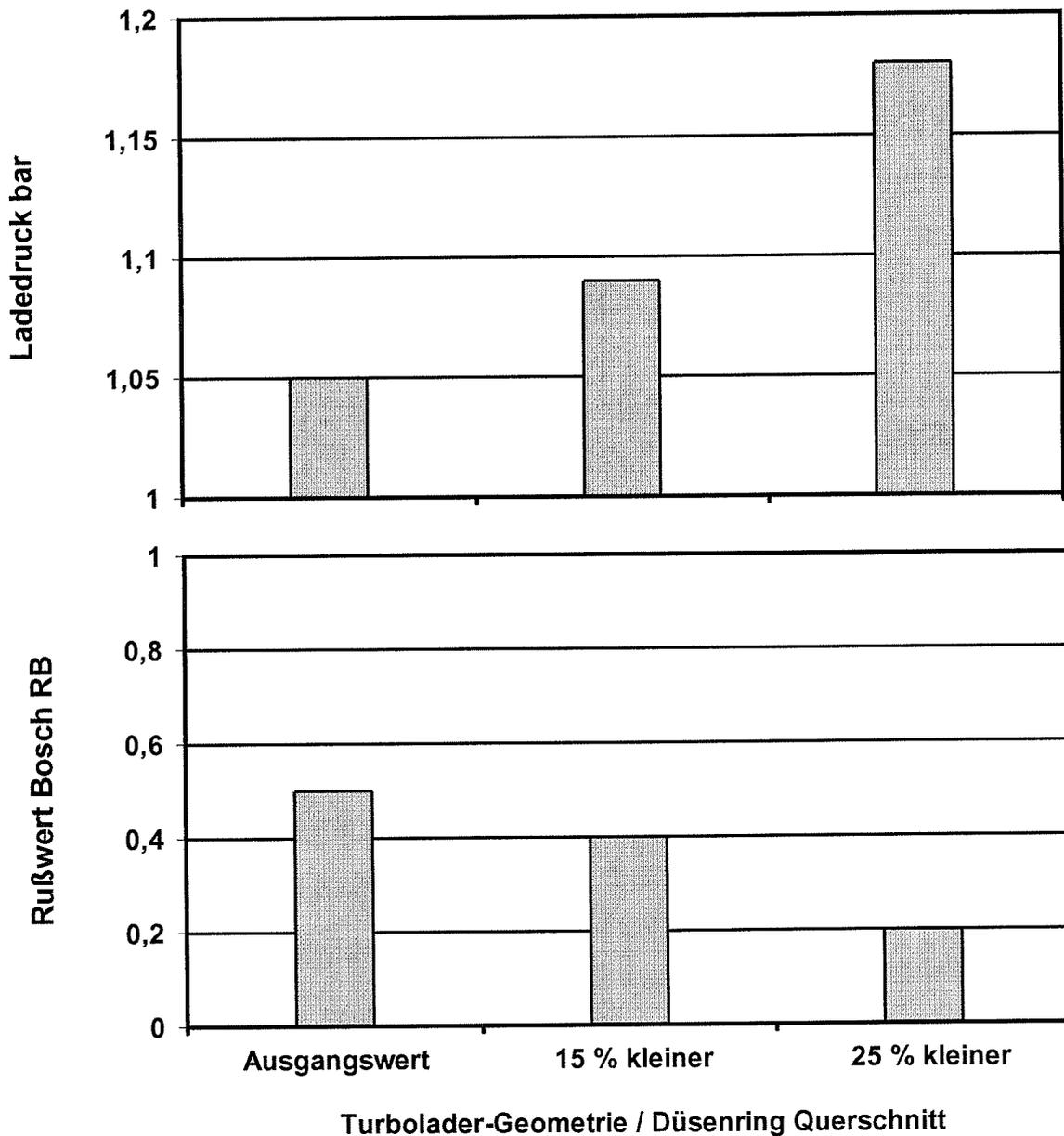
CLEAN II



Veränderte Turbolader-Charakteristik / Turbolader-Geometrie

Stationäre Messungen in Abhängigkeit vom Düsenring-Querschnitt
Konstante Leistung ca. 5% bei Nenndrehzahl

6L48/60 - 1130086



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Veränderte Turbolader-Charakteristik / Turbolader-Geometrie

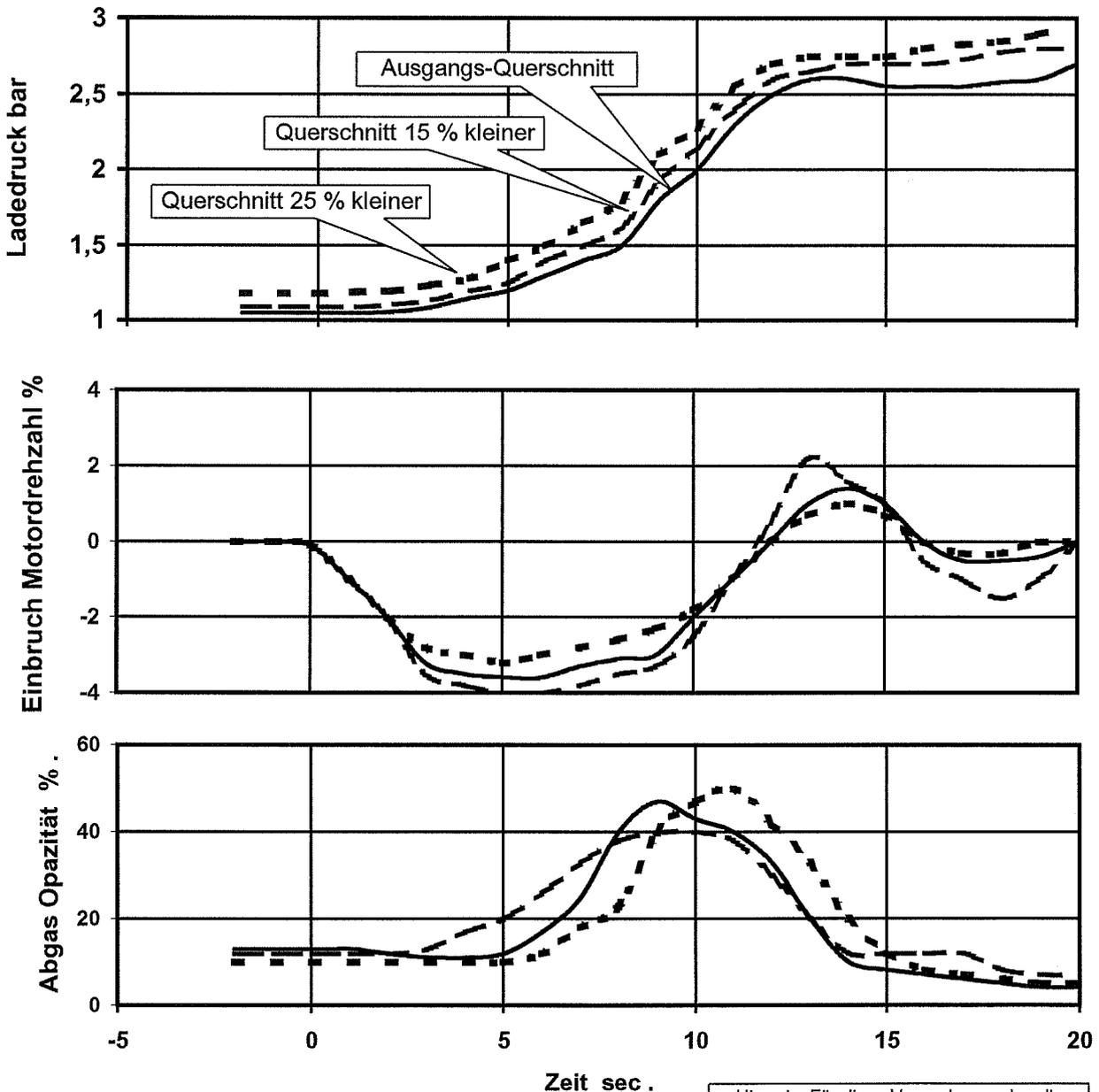
Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 10 sec bei konst. Drehzahl

Variation Düsenring-Querschnitt:

Ausgangswert: ————— 15 % kleiner: - - - - - 25 % kleiner: - - - - -

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Veränderte Turbolader-Charakteristik / Turbolader-Geometrie

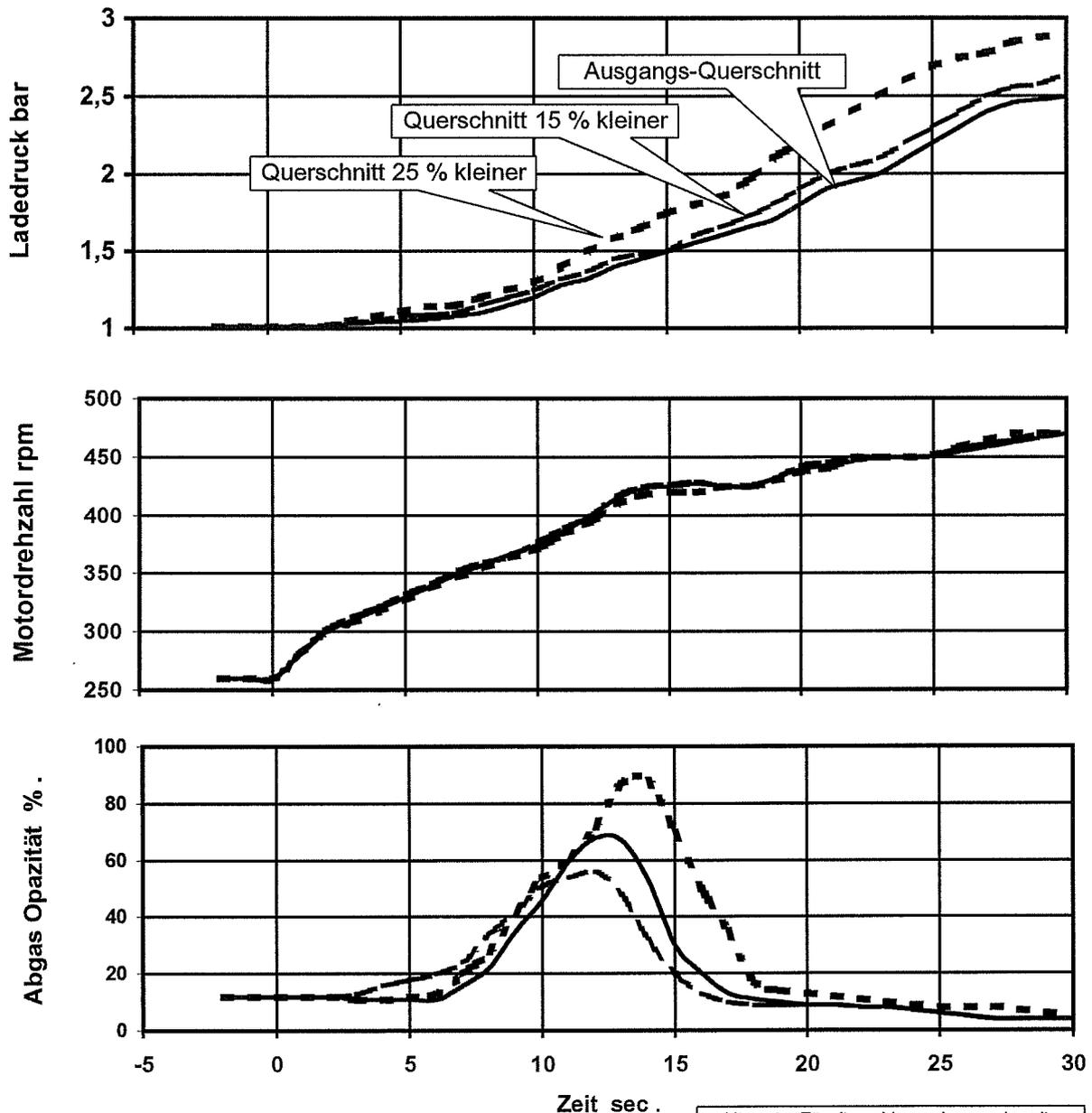
Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 30 sec entlang Kombinatorikurve

Variation Düsenring-Querschnitt:

Ausgangswert: — 15 % kleiner: - - - - - 25 % kleiner: - - - - -

6L48/60 - 1130086



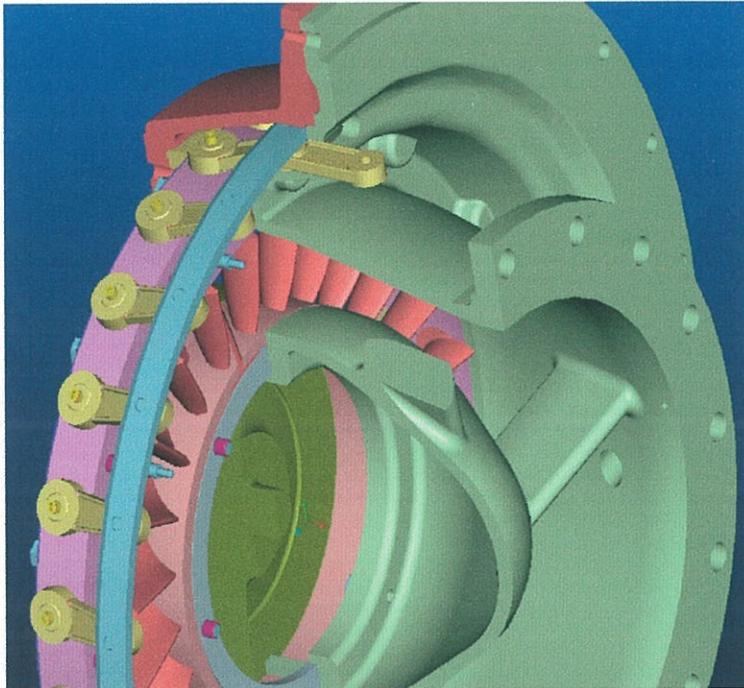
Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung mit
veränderter Turbolader-Charakteristik

CLEAN II



Variabler Turbinendüsenring / Variable Turbine Area (VTA)
(patentiert)



Schematische Darstellung
des VTA

Pro-E-Modell

Verstellbare Schaufeln des
Düsenring auf Turbinenseite

(patentiert)



Demontierter VTA

nach Schwerölbetrieb am
6L48/60

Im Hintergrund Turbolader
Blickrichtung von der Abgas-
seite her auf das Turbinenrad

(patentiert)

Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



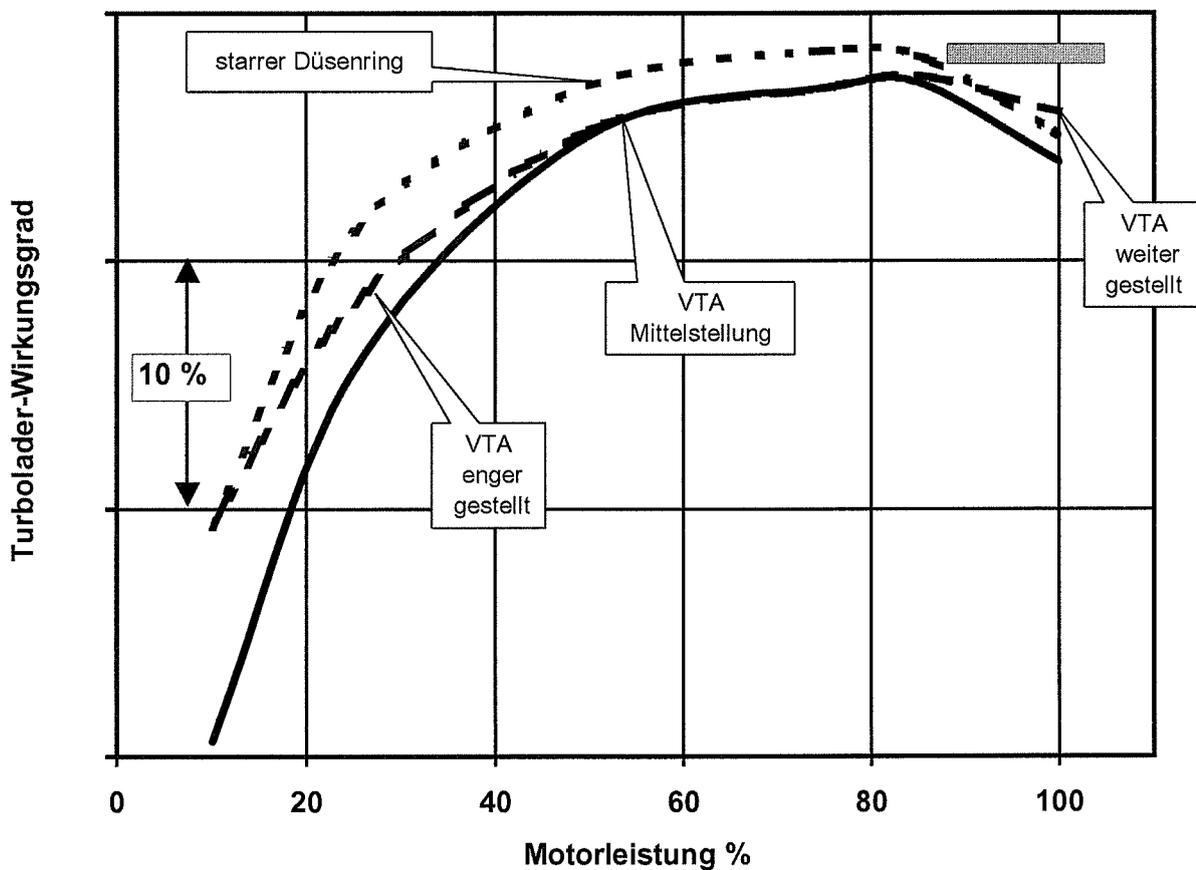
Variabler Turbinenleitapparat / Variable Turbine Area VTA

Betriebswerte (stationär) über der Motorleistung bei Nenndrehzahl

Vergleich: Turbolader-Wirkungsgrad

VTA Mittelstellung: ——— VTA verstellt: - - - - -
 starrer Düsenring: ······ Wastegate offen: ▒

6L48/60 - 1130086



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II

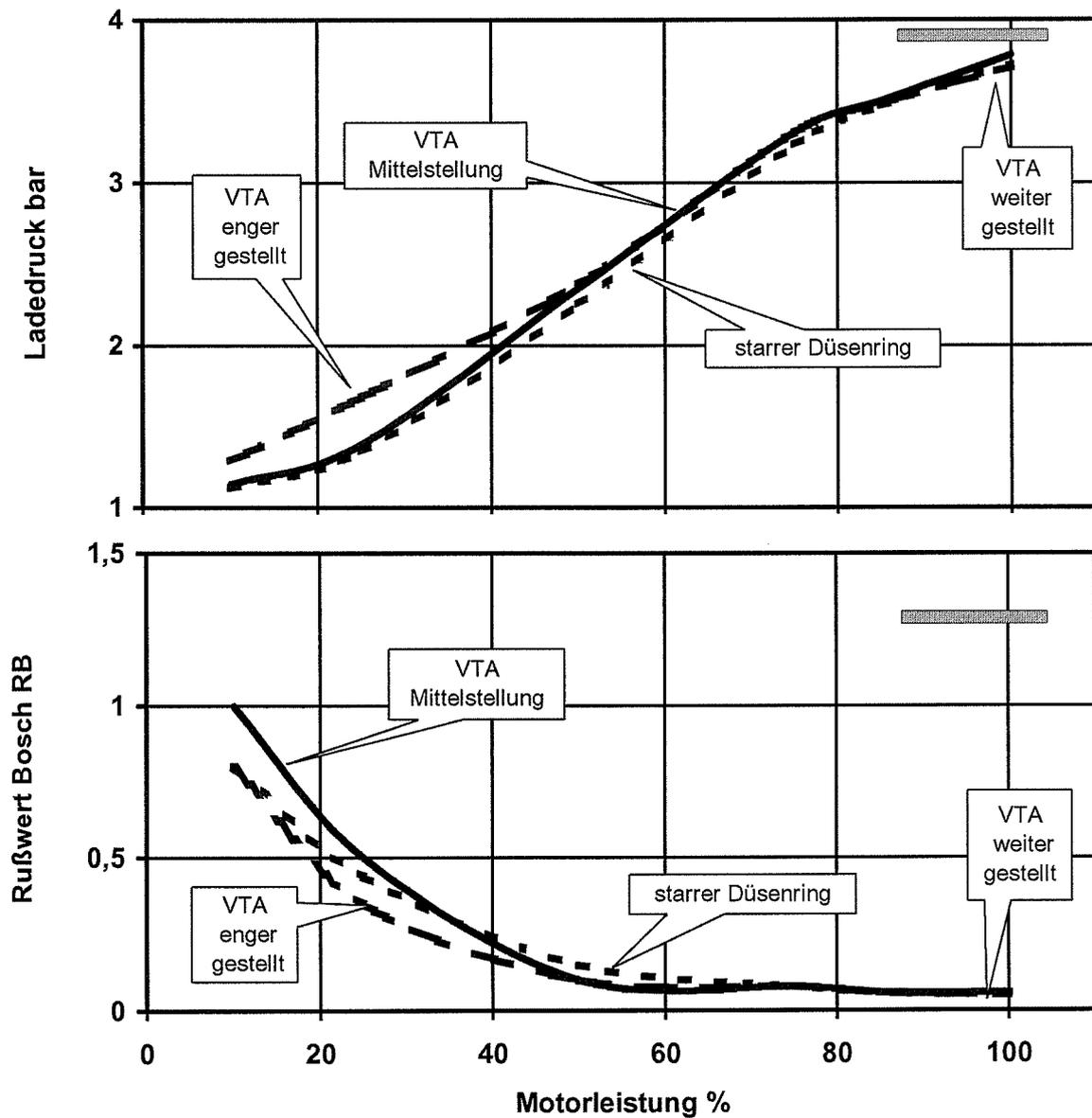


Variabler Turbinenleitapparat / Variable Turbine Area VTA

Betriebswerte (stationär) über der Motorleistung bei Nenndrehzahl

VTA Mittelstellung: ——— VTA verstellt: - - - - -
 starrer Düsenring: ······ Wastegate offen: ▒

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Verbesserte Luftversorgung

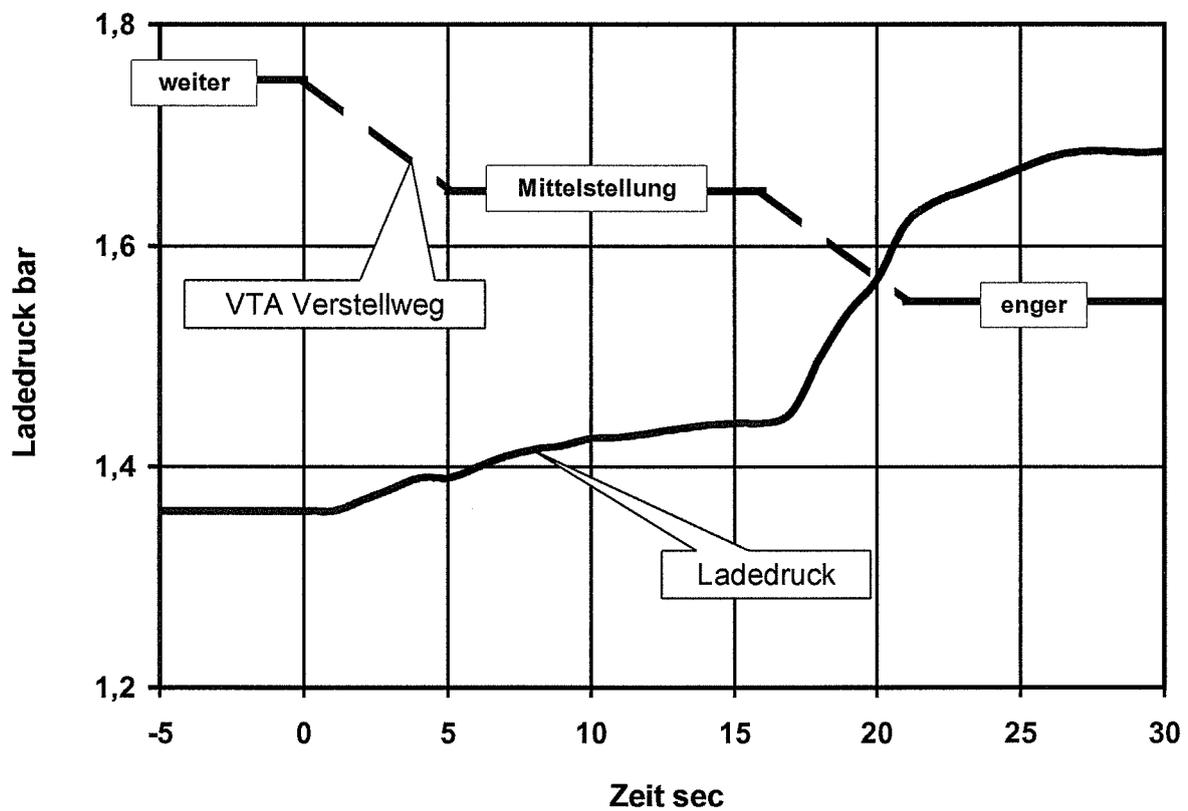
CLEAN II



Variabler Turbinenleitapparat / Variable Turbine Area VTA

Betriebswert (Ladedruck) über der Zeit
 Konstanter Betrieb von 25 % Leistung bei Nenndrehzahl
 Variation Düsenring-Querschnitt
 Verstellgeschwindigkeit des VTA

6L48/60 - 1130086



Verbesserte Luftversorgung

CLEAN II



Variabler Turbinenleitapparat / Variable Turbine Area VTA

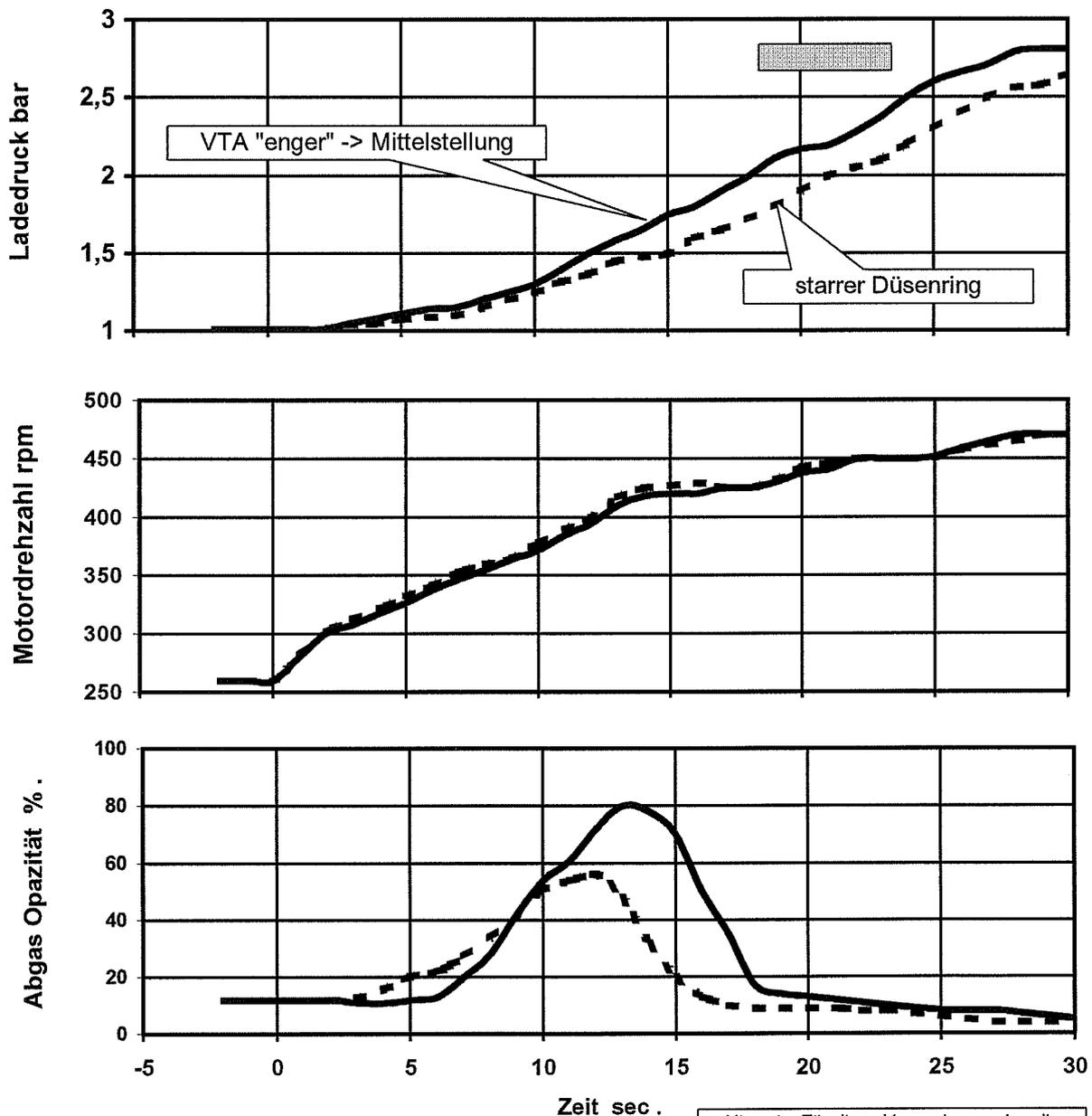
Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 30 sec entlang Kombinatorikurve

Vergleich starrer Düsenring: - - - - - mit VTA ————

VTA-Verstellung: 

bei ca. 50% (nach ca. 20 sec) von "eng" auf Mittelstellung

6L48/60 - 1130086



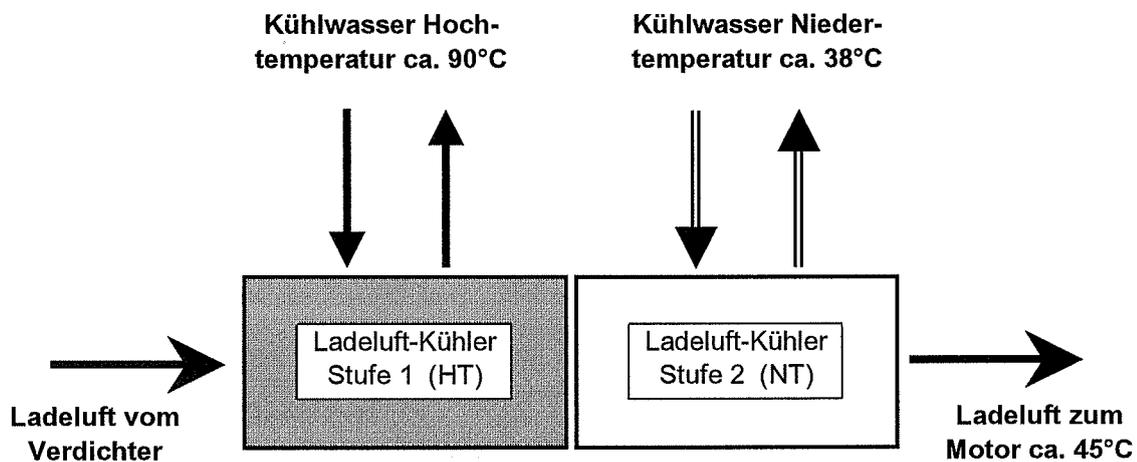
Variation der Ladeluft-Temperatur

CLEAN II

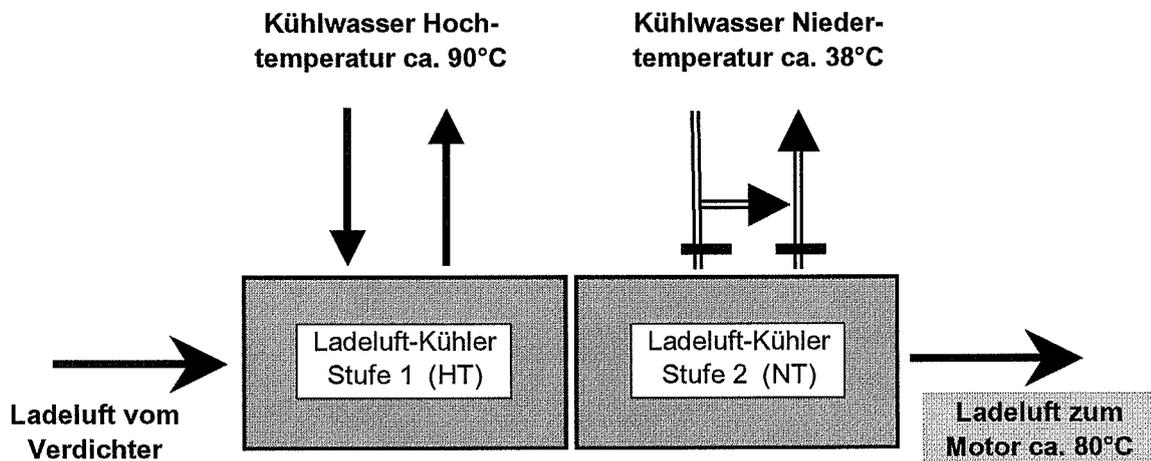


Funktion der Ladeluftvorwärmung bei zweistufigen Ladeluftkühlern

1. Kühlwasserkreisläufe ohne Vorwärmung



2. Kühlwasserkreisläufe mit Vorwärmung für Teillastbetrieb



Variation der Ladeluft-Temperatur

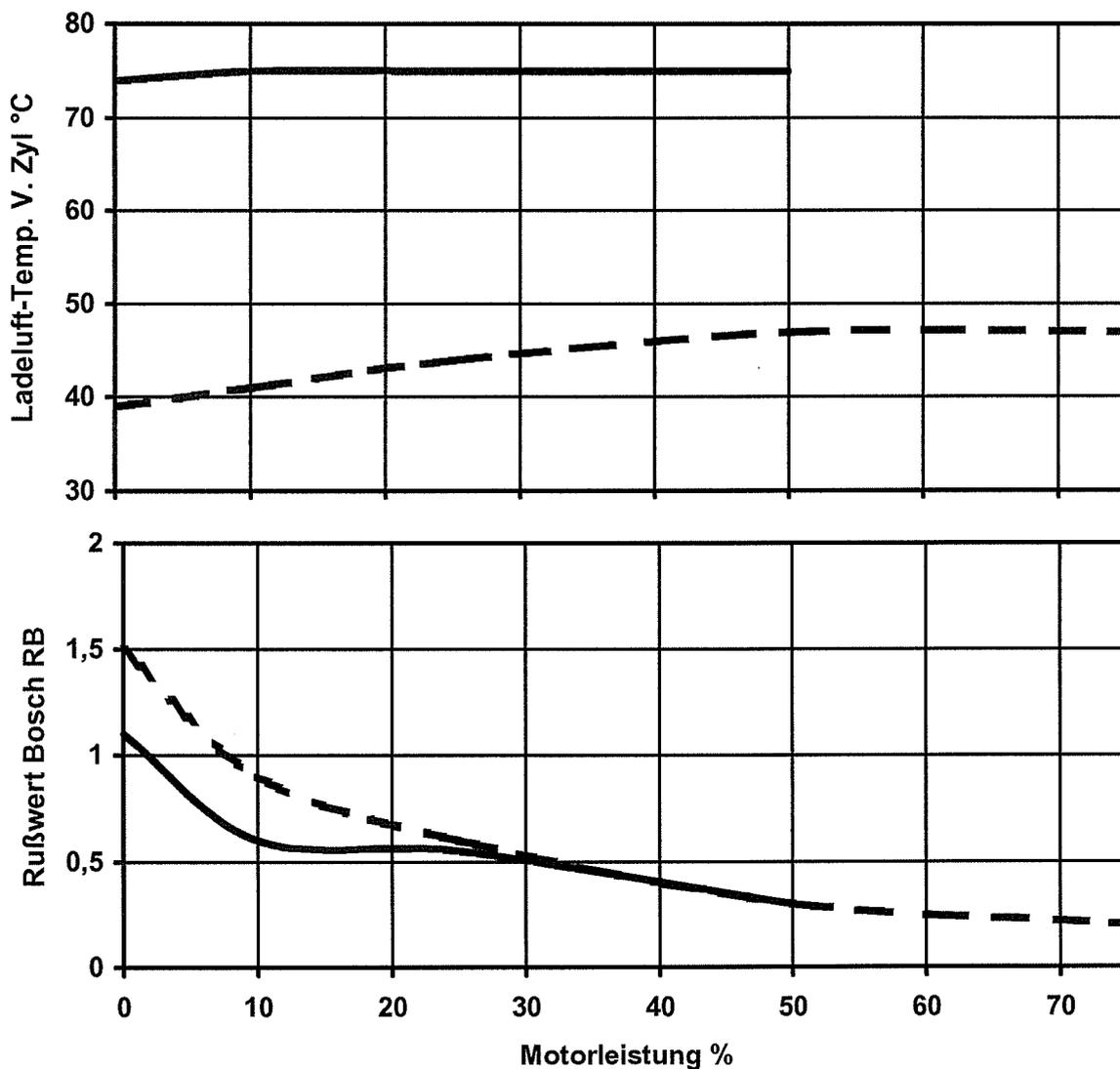
CLEAN II



Stationäre Messungen in Abhängigkeit von der Leistung bei konst. Drehzahl

Vergleich:
 - - - - - ohne Vorwärmung (Lufttemp. vor Zyl. ca. 40°C)
 ————— mit Vorwärmung (Lufttemp. vor Zyl. ca. 75°C)

6L 48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Variation der Ladeluft-Temperatur

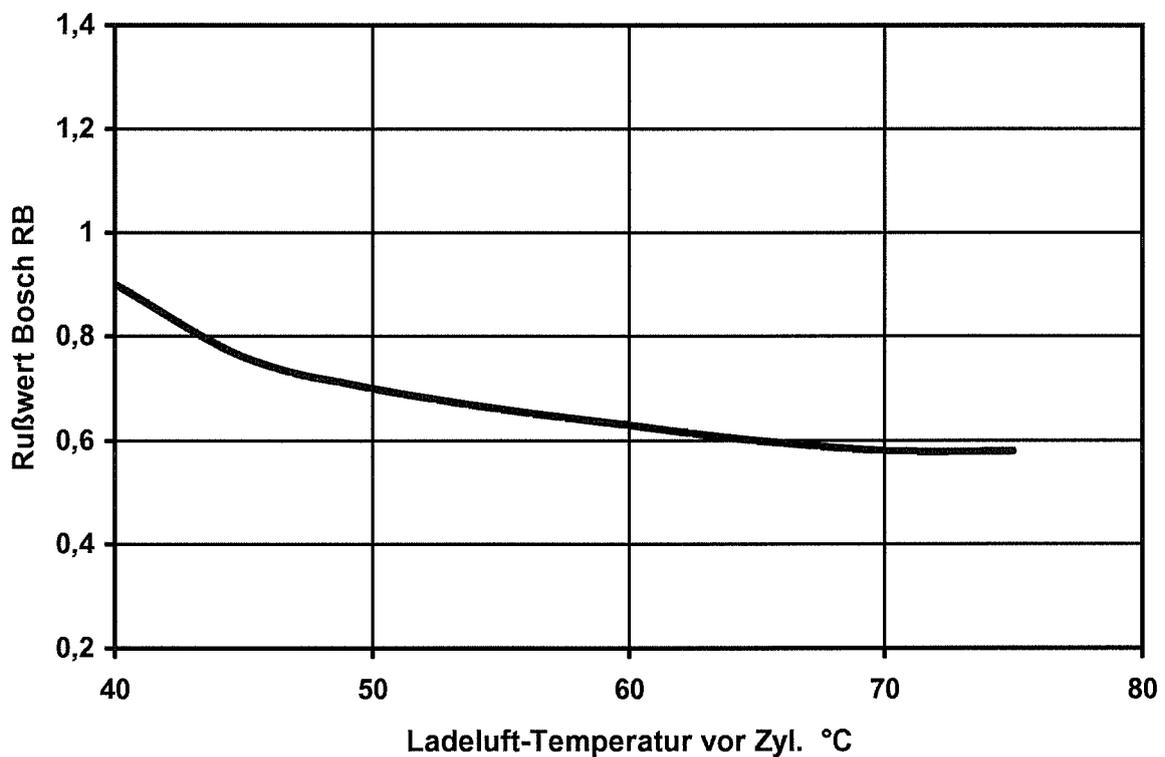
CLEAN II



Messung bei konstantem Betrieb mit 10 % Leistung bei Nenndrehzahl

Einfluß der Ladeluftvorwärm-Temperatur auf den Rußwert

6L 48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Variation der Ladeluft-Temperatur

CLEAN II



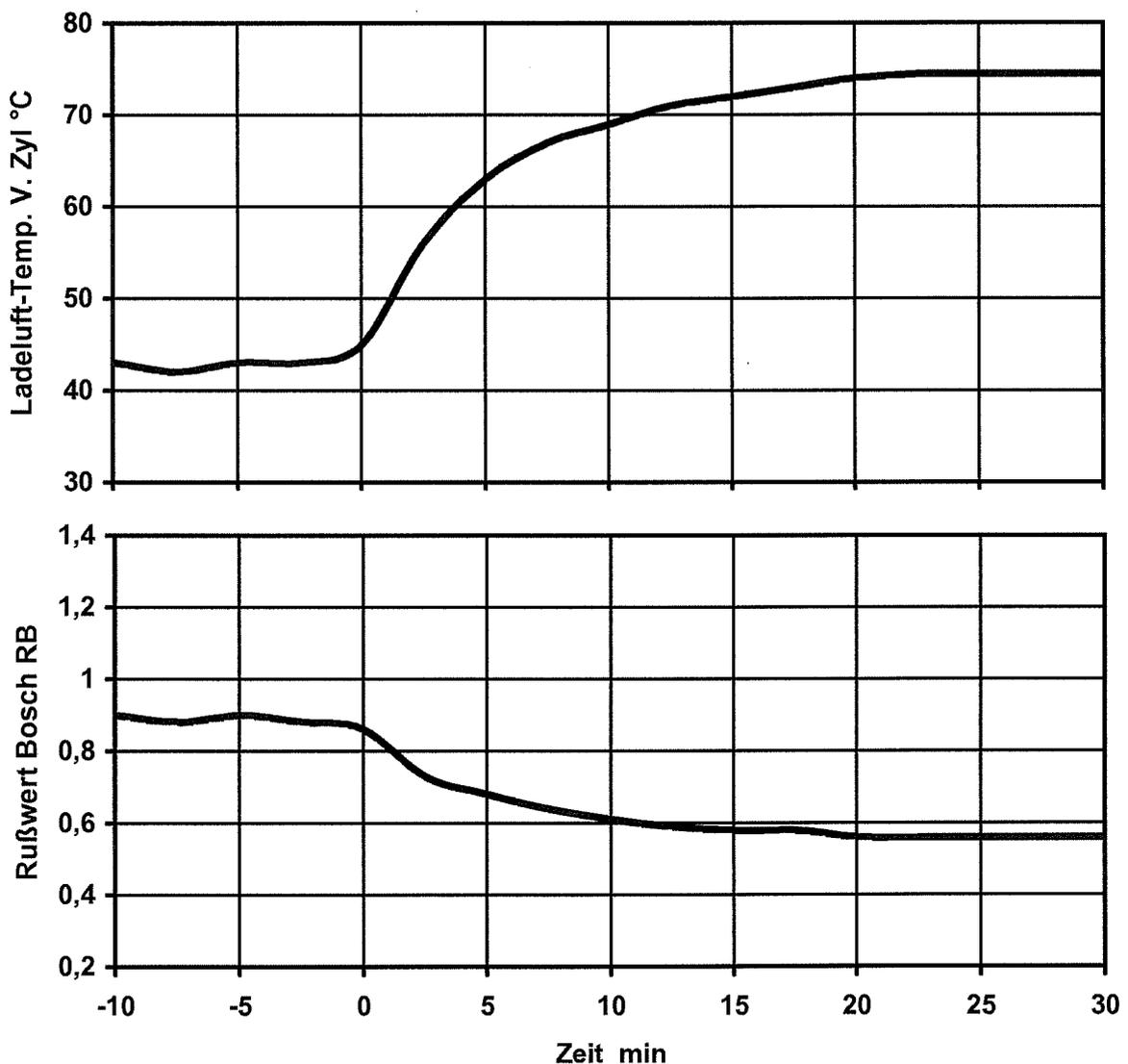
Messung bei konstantem Betrieb mit 10 % Leistung bei Nenndrehzahl

Zeitlicher Verlauf der Ladelufttemperatur und Rußemission

Vorwärmung durch Abschaltung der 2. Stufe des Ladeluftkühlers

Kühlwassertemperatur in der 1. Stufe des Ladeluftkühlers ca. 85 °C

6L 48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Variation der Ladeluft-Temperatur

CLEAN II

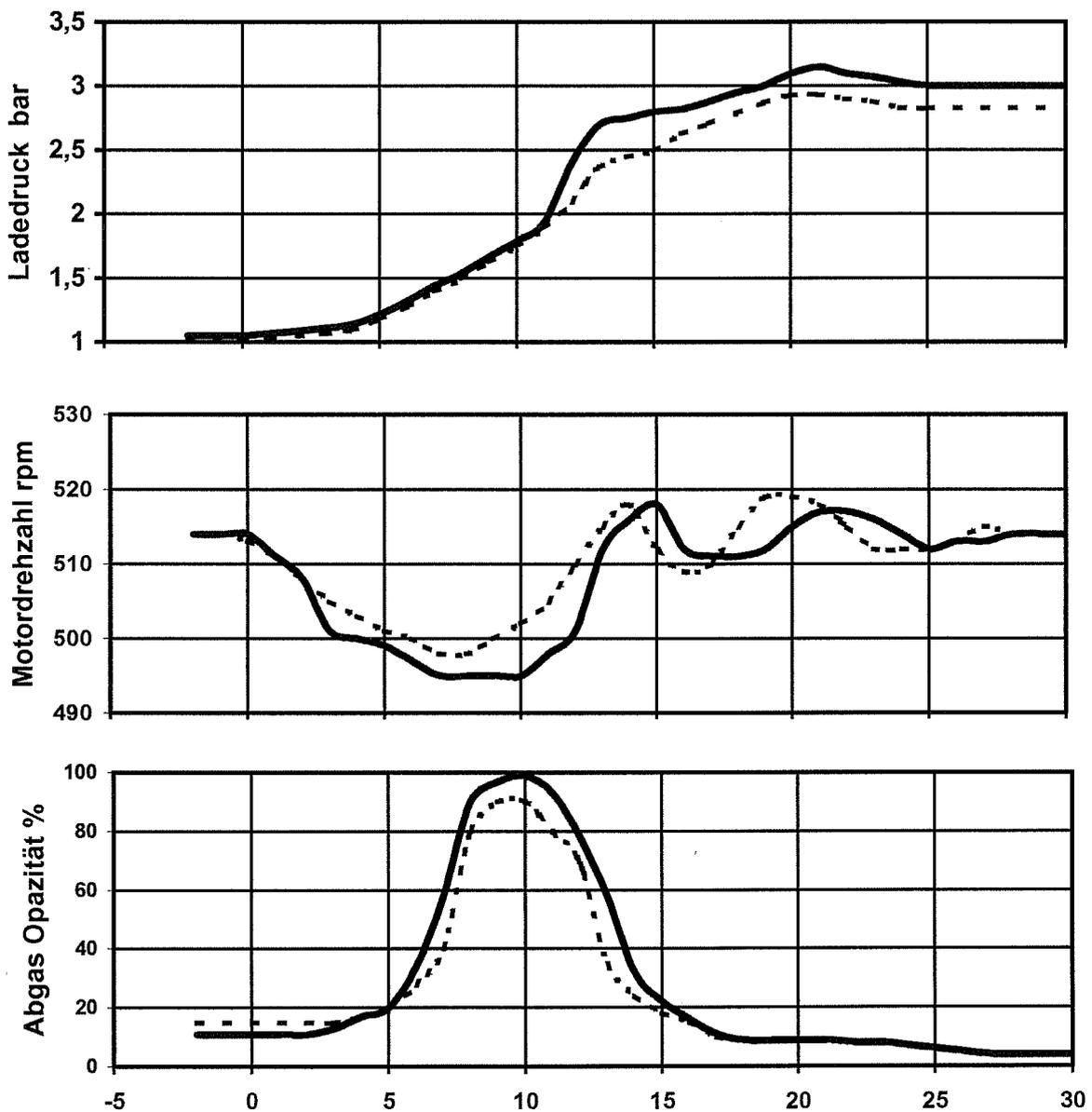


Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

Vergleich ohne: - - - - - mit: ——— Ladeluft-Vorwärmung

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Variation der Ladeluft-Temperatur

CLEAN II



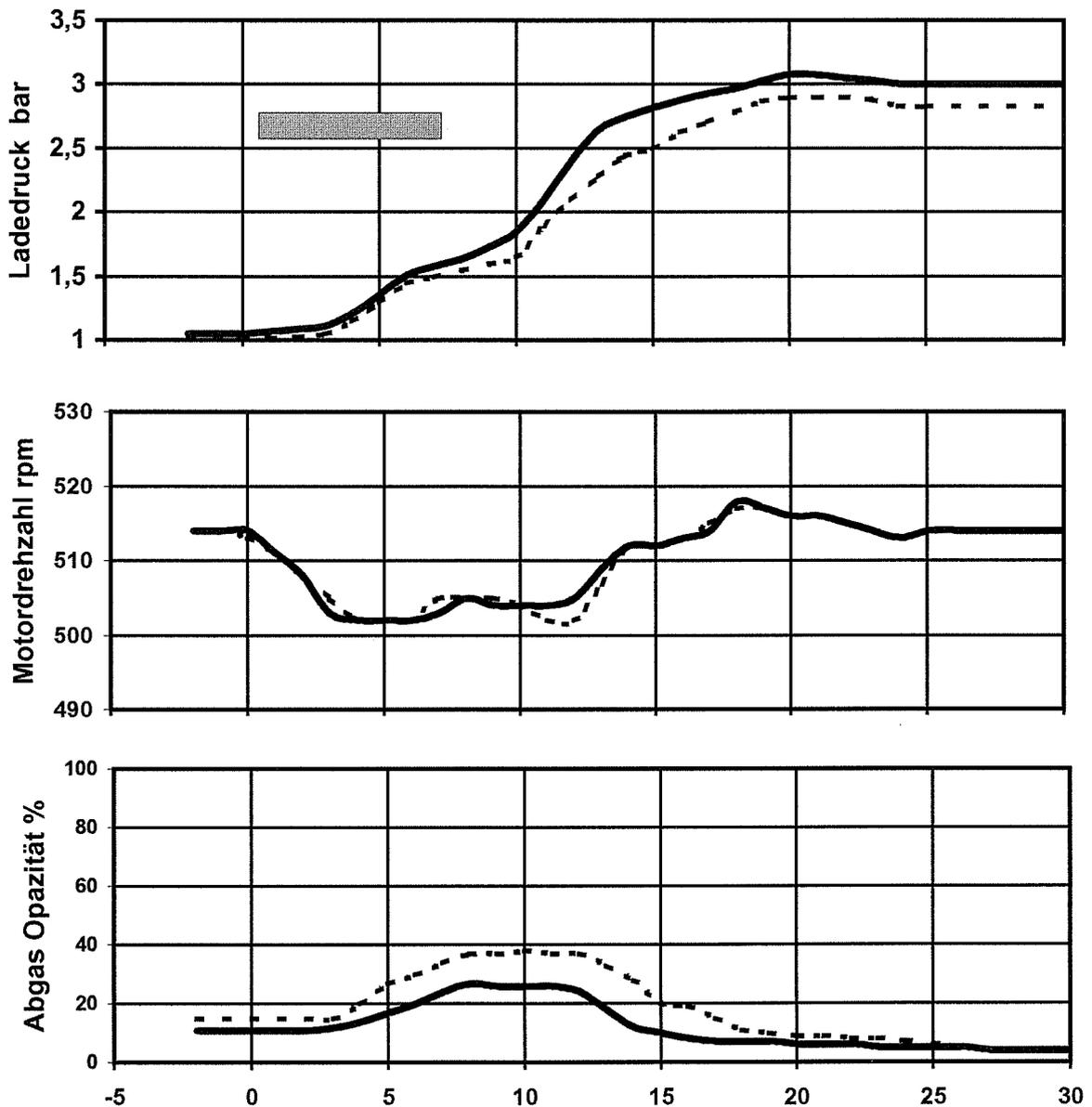
Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

Vergleich ohne: - - - - - mit: ——— Ladeluft-Vorwärmung

Beide Varianten mit Jet-Assist: [hatched box]

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Variation der Ladeluft-Temperatur

CLEAN II

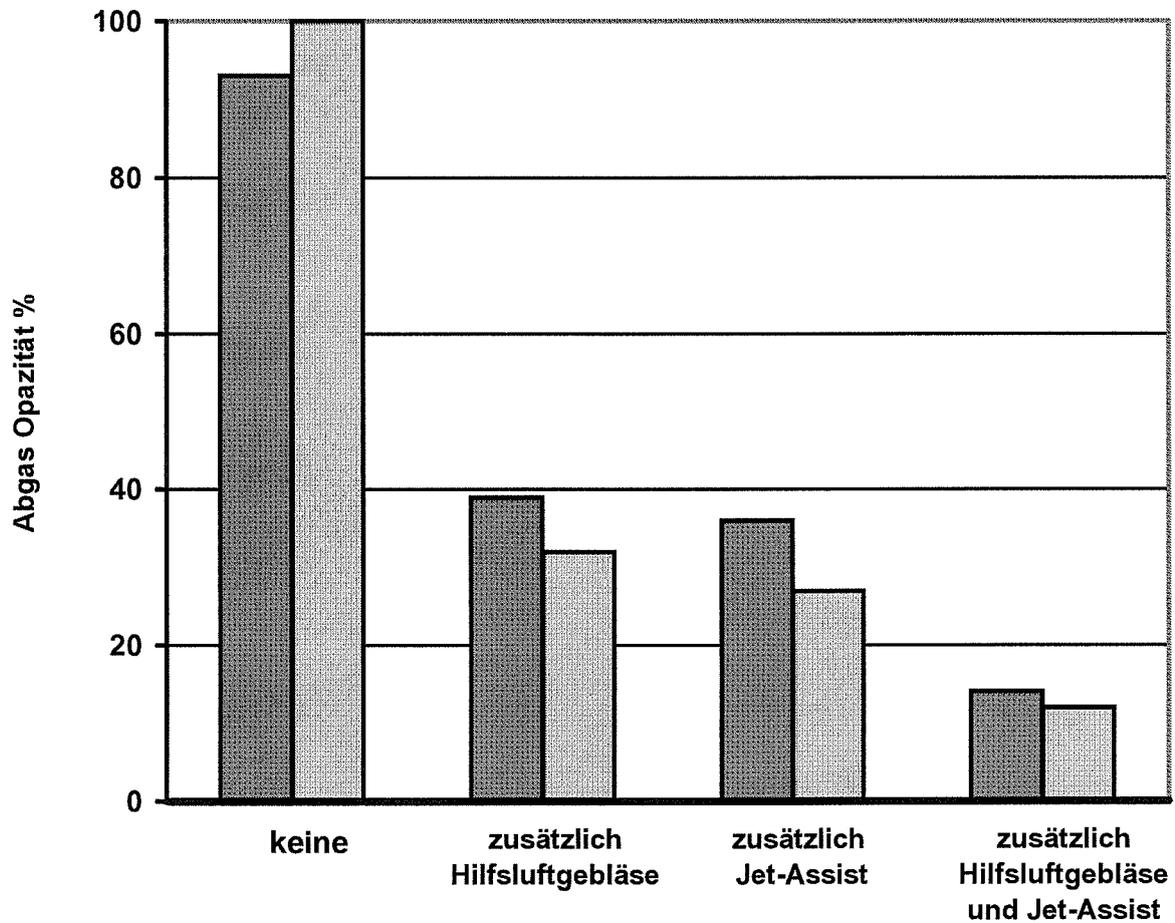


Maximalwerte der Abgas-Opazität

Belastung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

Vergleich ohne:  mit:  Ladeluft-Vorwärmung

6L48/60 - 1130086



ohne und mit zusätzlichen Maßnahmen

Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

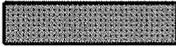
Variation der Ladeluft-Temperatur

CLEAN II

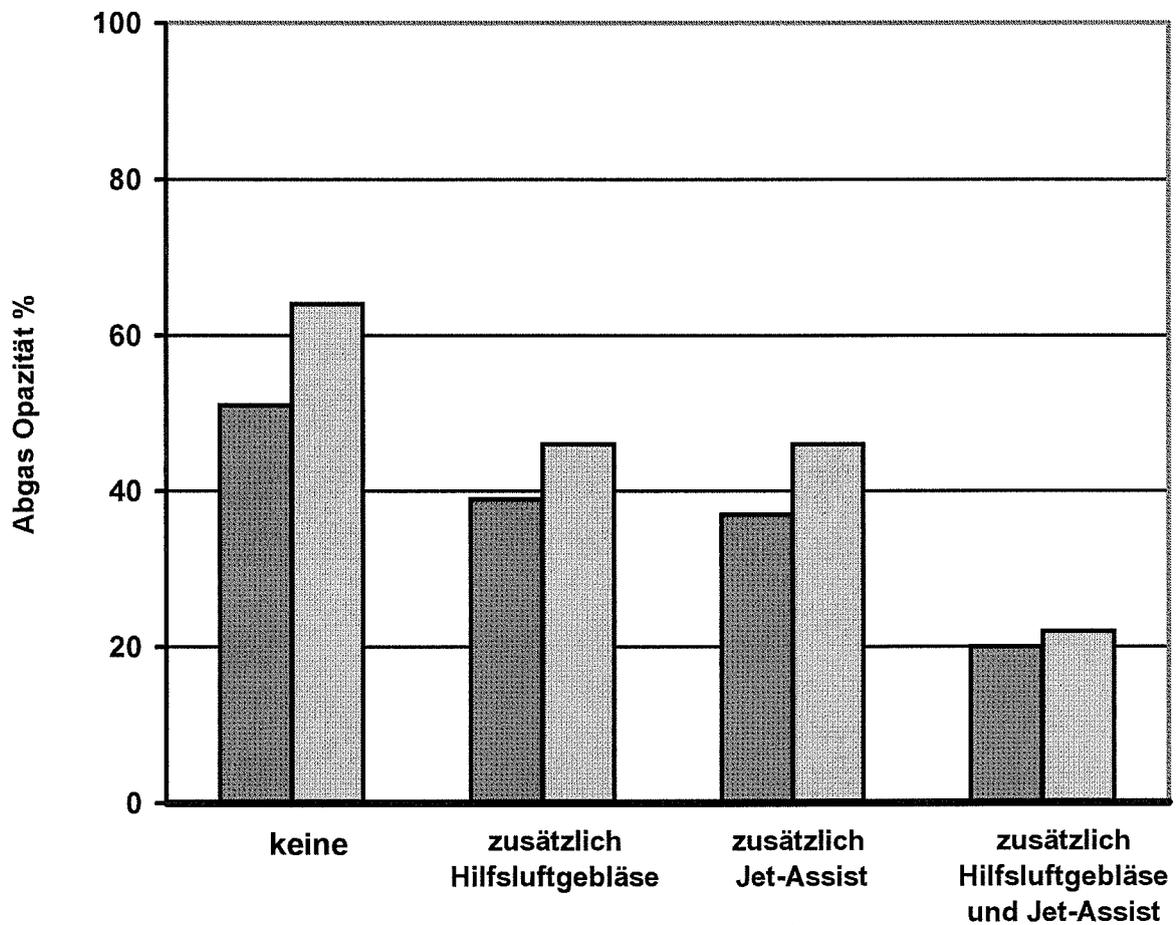


Maximalwerte der Abgas-Opazität

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 45 sec entlang Kombinatorikurve

Vergleich ohne:  mit:  Ladeluft-Vorwärmung

6L48/60 - 1130086



ohne und mit zusätzlichen Maßnahmen

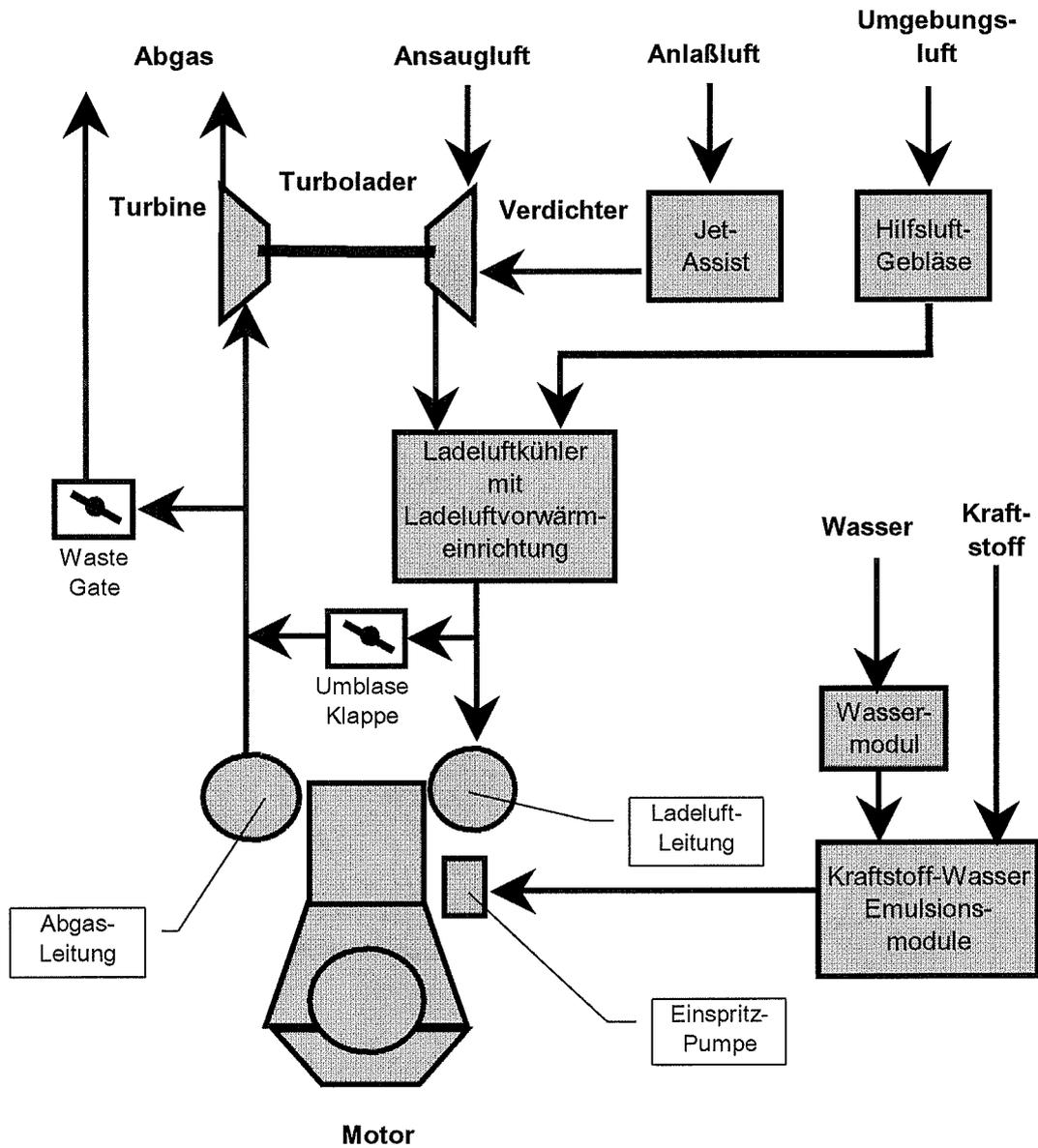
Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II



Funktionsdarstellung einzelner Rußstoß-Verbesserungs-Maßnahmen

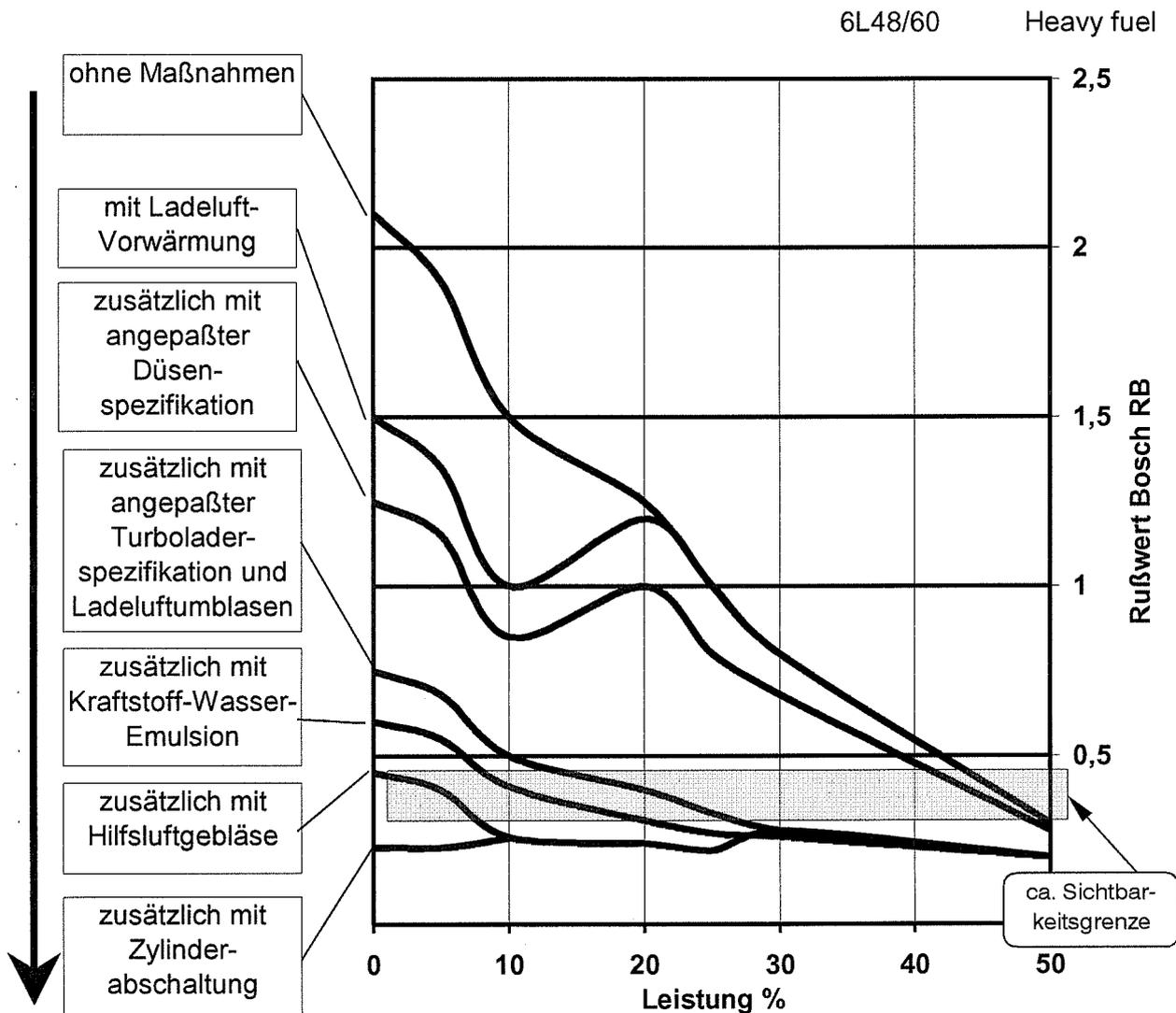


Motor- Managementsystem

CLEAN II



Vergleich einzelner Verbesserungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Leistung bei stationären Betriebspunkten mit konstanter Nenndrehzahl



Hinweis:

Die quantitativen Effekte gelten nur in der gezeigten Reihenfolge (Pfeilrichtung) der Anwendung der einzelnen Verbesserungsmaßnahmen

Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

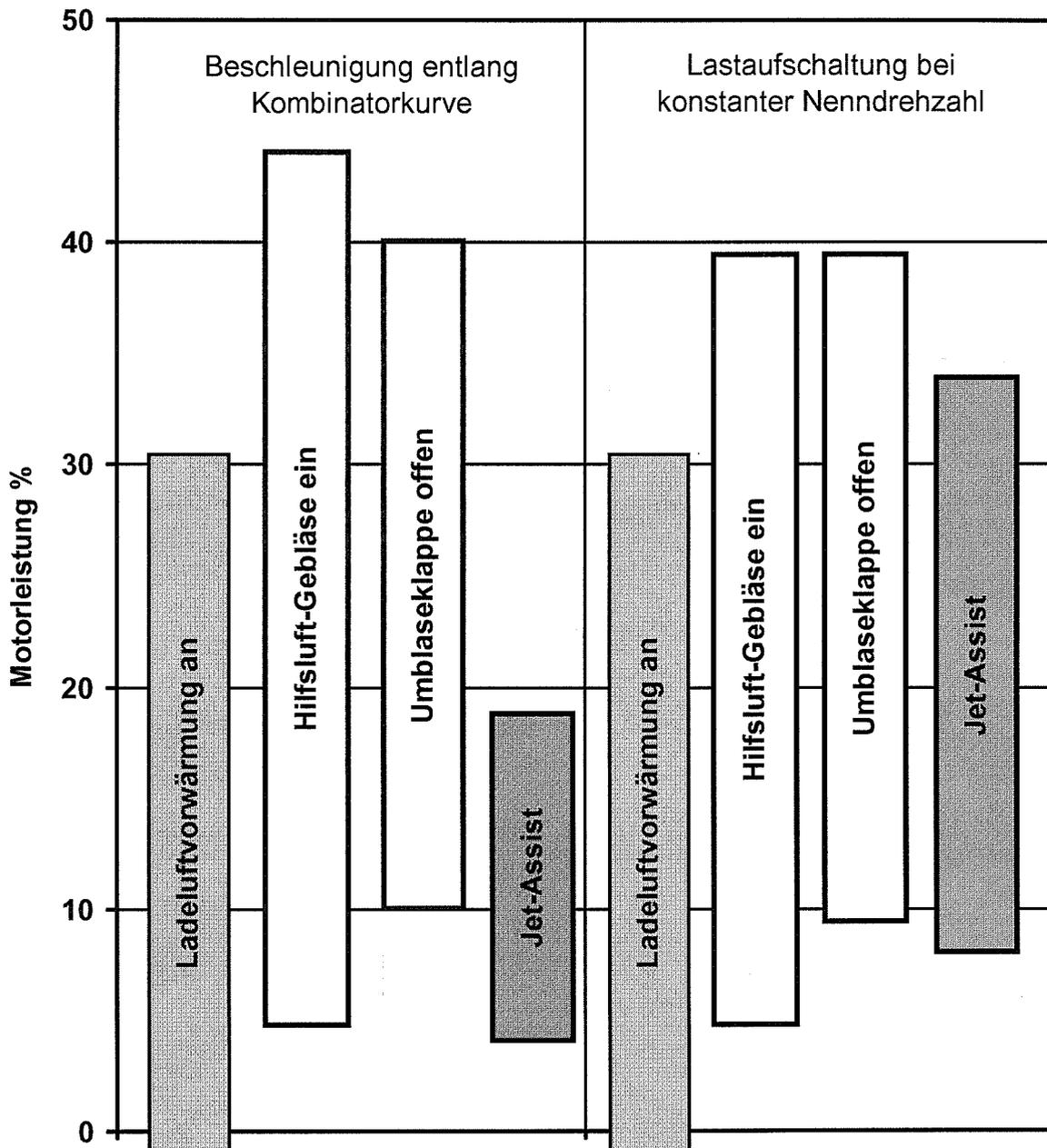
Motor- Managementsystem

CLEAN II



Zu- und Abschaltung der einzelnen Rußstoß-Verbesserungsmaßnahmen
in Abhängigkeit von der Leistung

6L 48/60 - 1130086



Motor- Managementsystem

CLEAN II



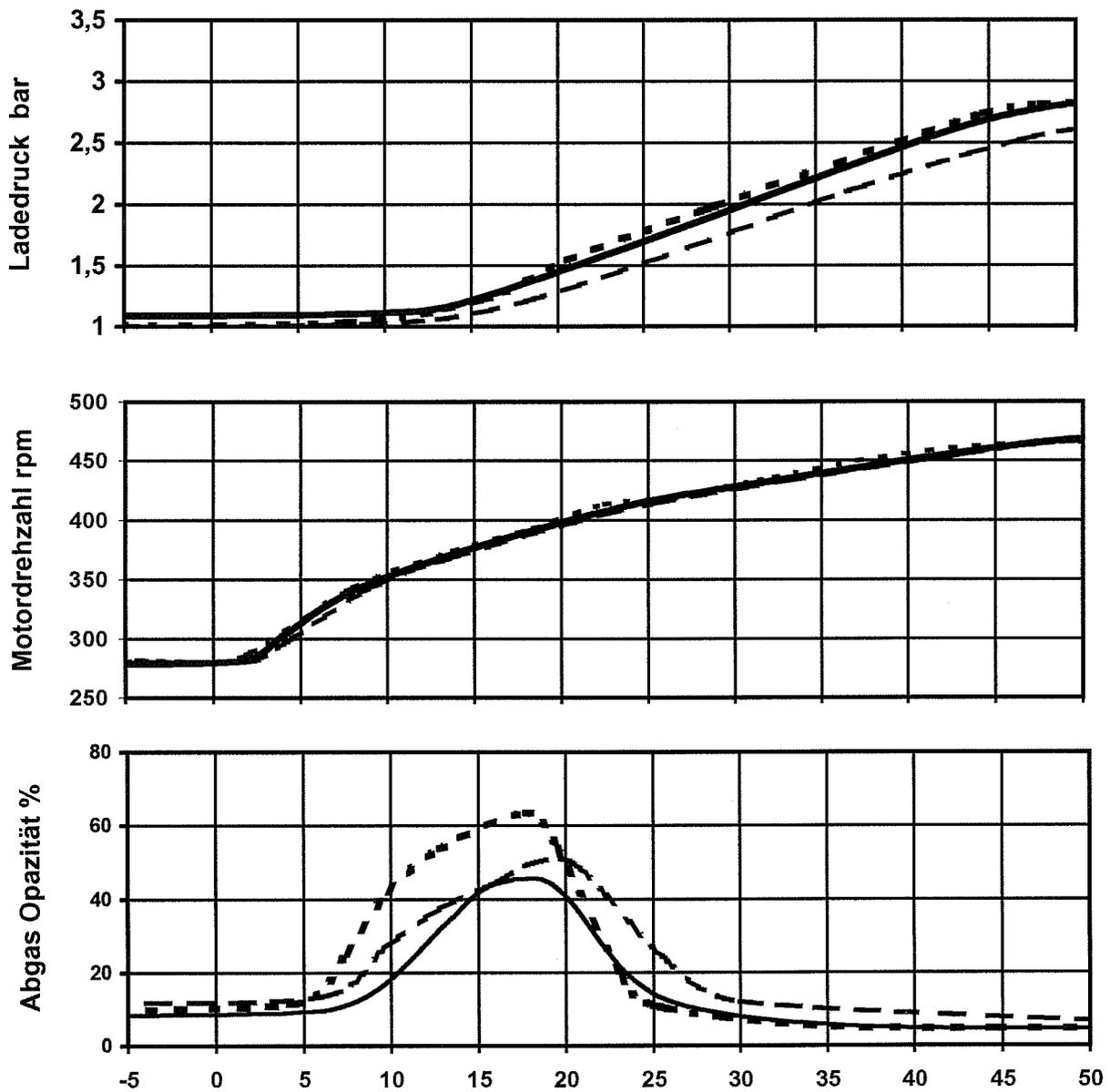
Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 45 sec entlang Kombinatorikurve

Vergleich

- ohne Maßnahmen
- mit Ladeluftvorwärmen
- mit Ladeluftvorwärmen und Hilfsluftgebläse

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II



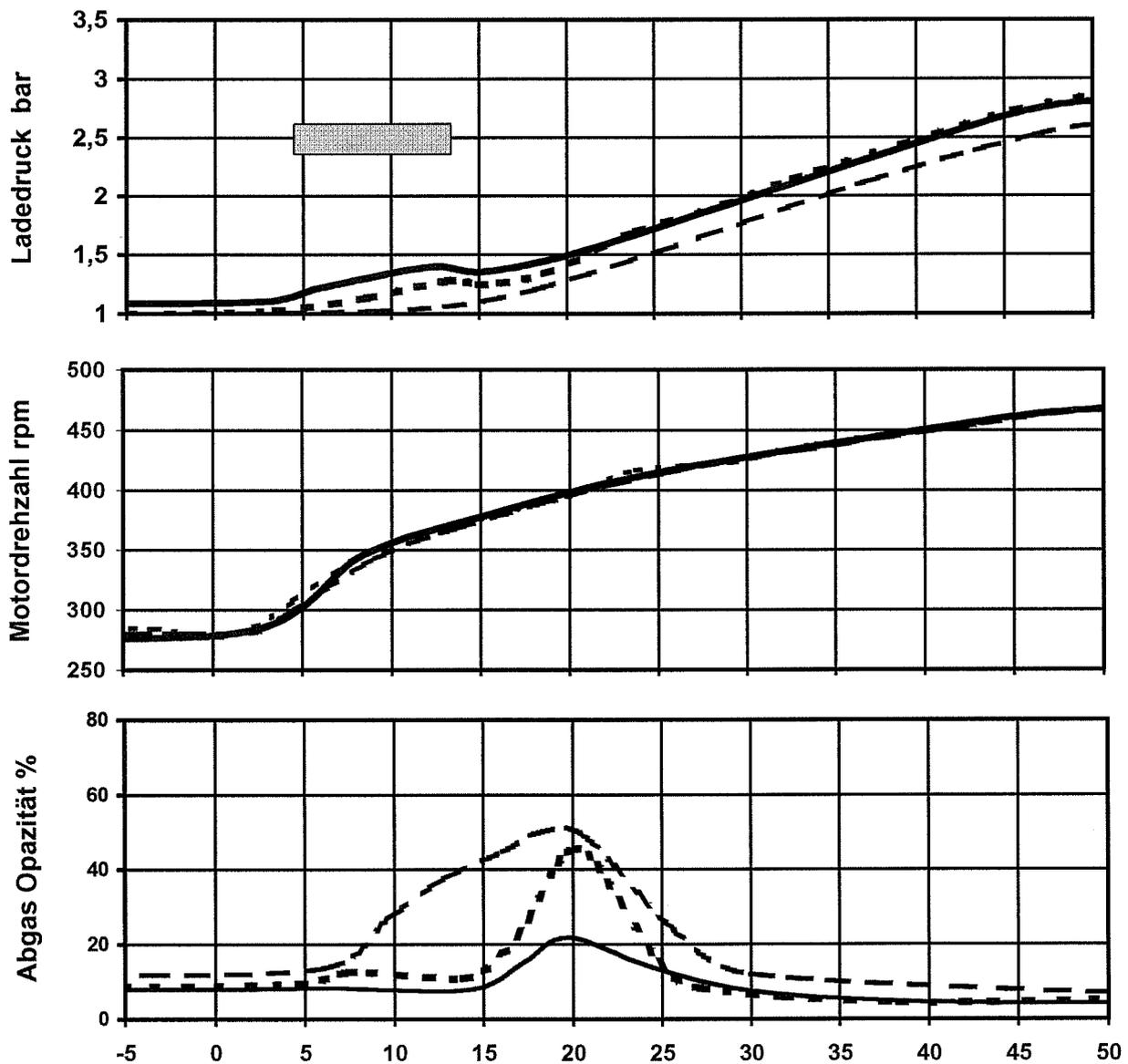
Betriebswerte über der Zeit

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 45 sec entlang Kombinatorikurve

- Vergleich
- ohne Maßnahmen
 - - - - - mit Ladeluftvorwärmen und Jet-Assist
 - mit Ladeluftvorwärmen und Hilfsluftgebläse und Jet-Assist

6L48/60 - 1130086

 = Jet-Assist aktiv



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II



Betriebswerte über der Zeit

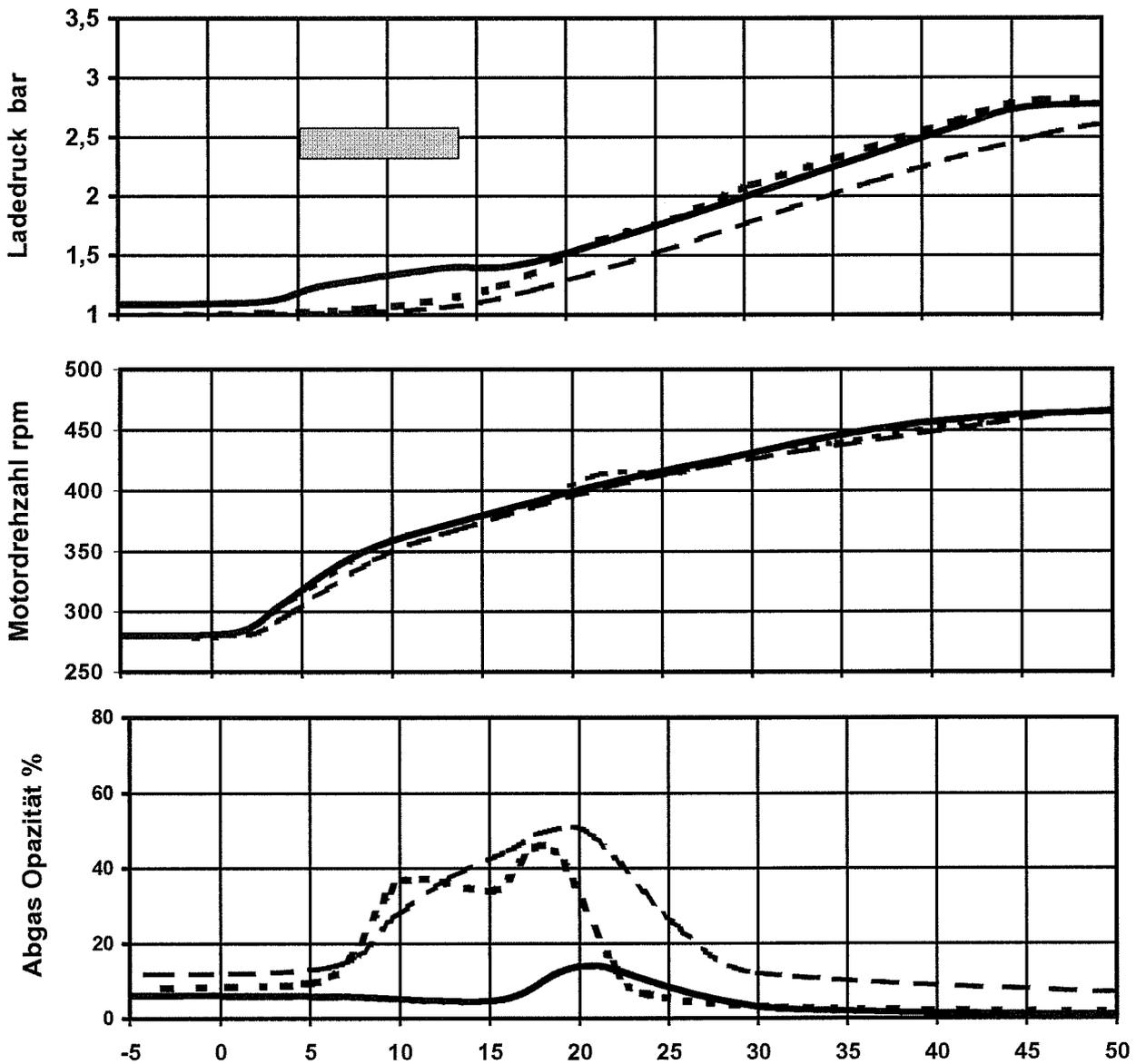
Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 45 sec entlang Kombinatorikurve

- Vergleich
- ohne Maßnahmen
 - - - - - mit Ladeluftvorwärmen und KWE
 - mit Ladeluftvorwärmen und Hilfsluftgebläse
und Jet-Assist und KWE

KWE = Kraftstoff-Wasser-Emulsion

6L48/60 - 1130086

= Jet-Assist aktiv



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II

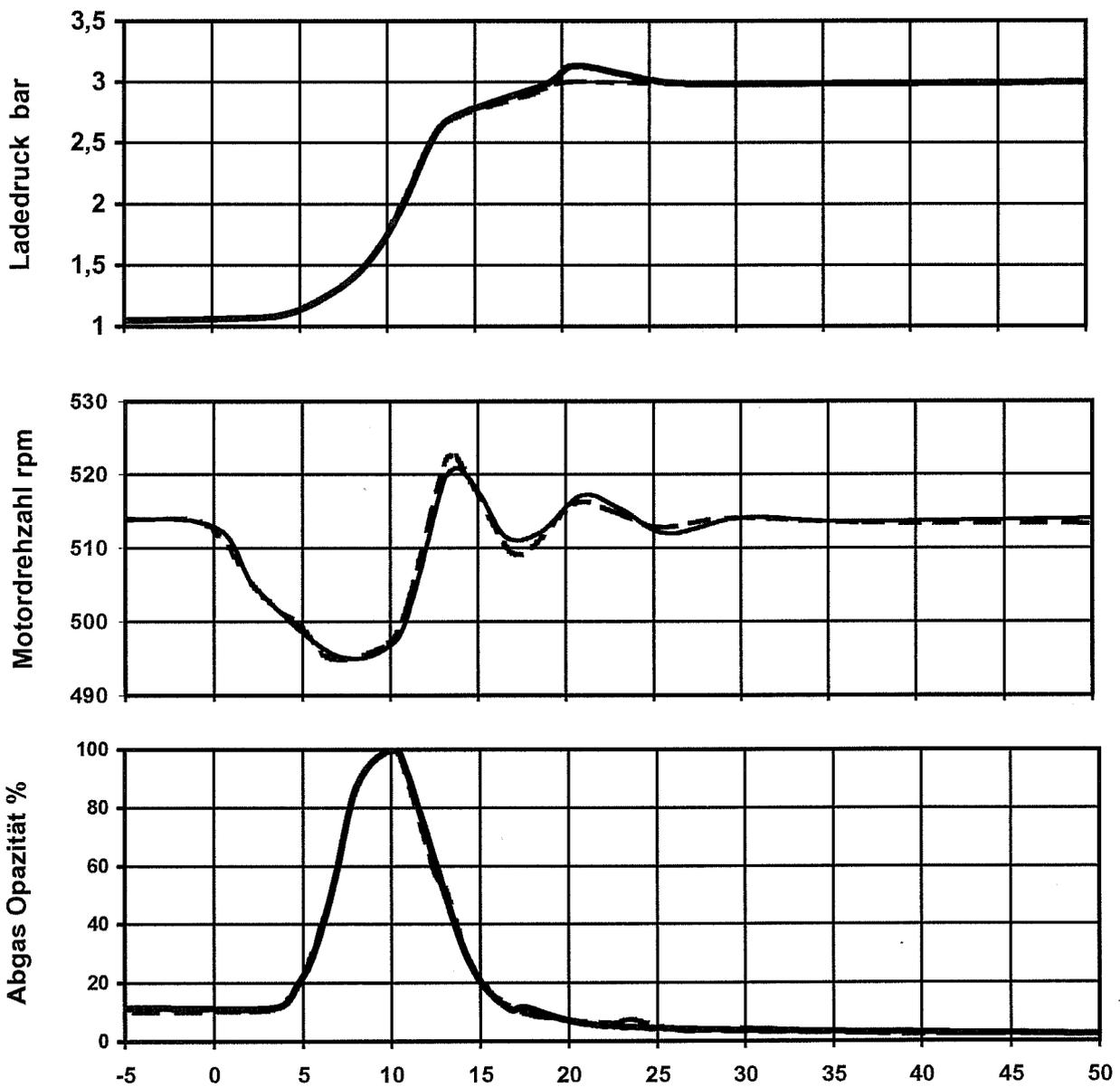


Betriebswerte über der Zeit

Lastaufschaltung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

Vergleich - - - - - mit Ladeluftvorwärmen ohne Umblasen
 — — — — — mit Ladeluftvorwärmen und mit Umblasen

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II

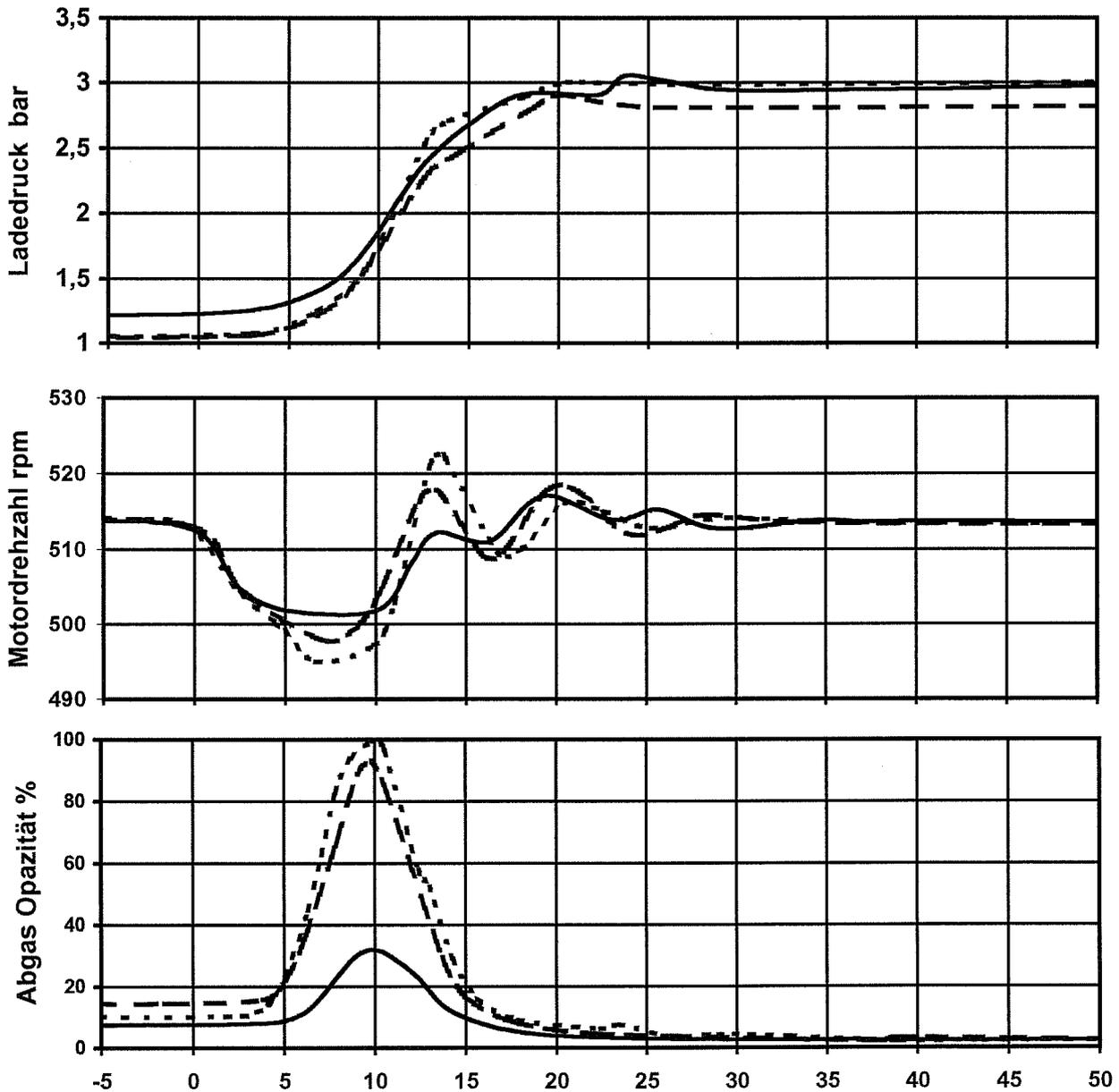


Betriebswerte über der Zeit

Lastaufschaltung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

- Vergleich
- ohne Maßnahmen
 - - - - - mit Ladeluftvorwärmen
 - mit Ladeluftvorwärmen und Hilfsluftgebläse

6L48/60 - 1130086



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II



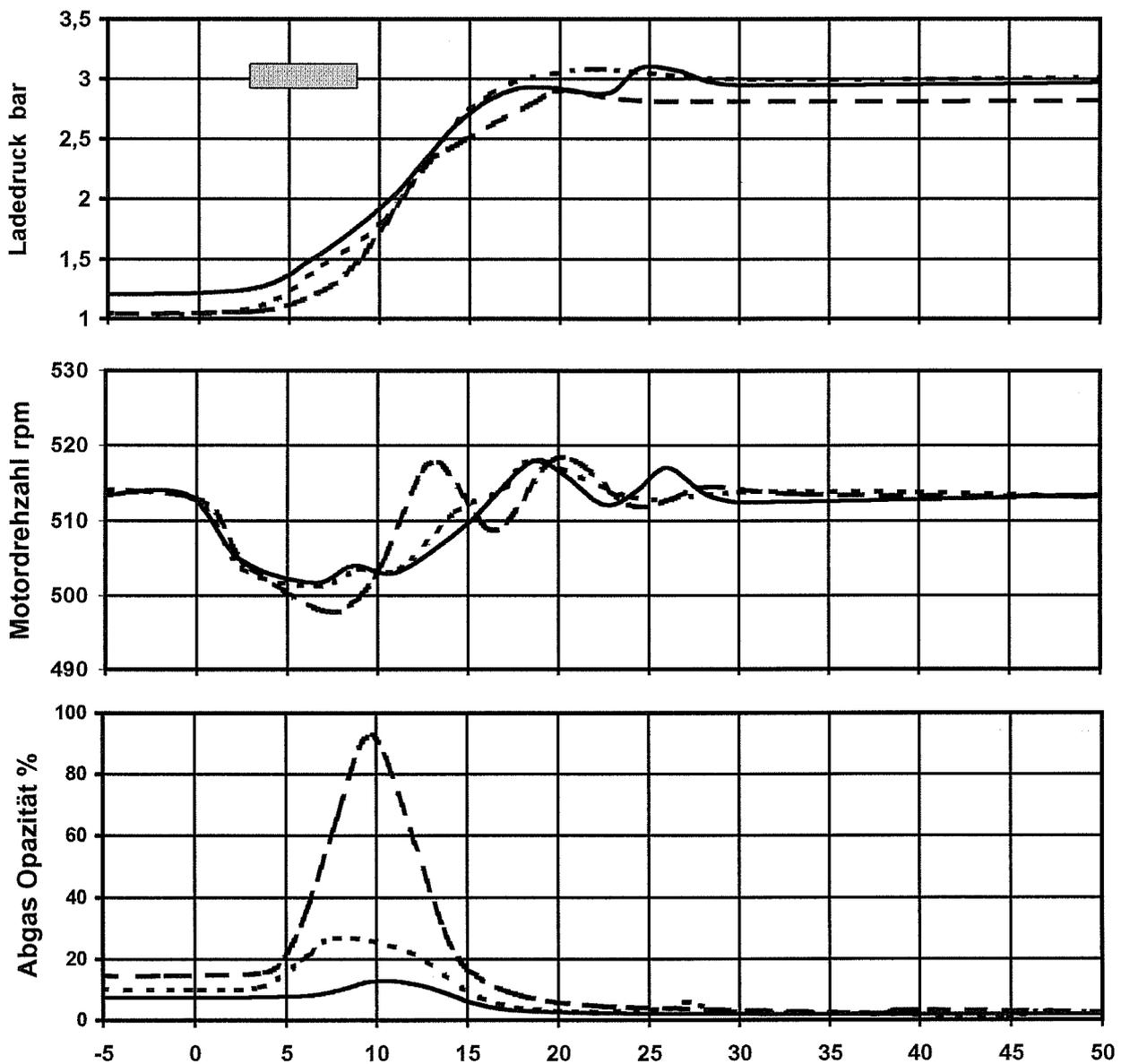
Betriebswerte über der Zeit

Lastaufschaltung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

- Vergleich
- ohne Maßnahmen
 - - - - - mit Ladeluftvorwärmen und Jet-Assist
 - mit Ladeluftvorwärmen und Hilfsluftgebläse und Jet-Assist

6L48/60 - 1130086

= Jet-Assist aktiv



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

Motor- Managementsystem

CLEAN II



Betriebswerte über der Zeit

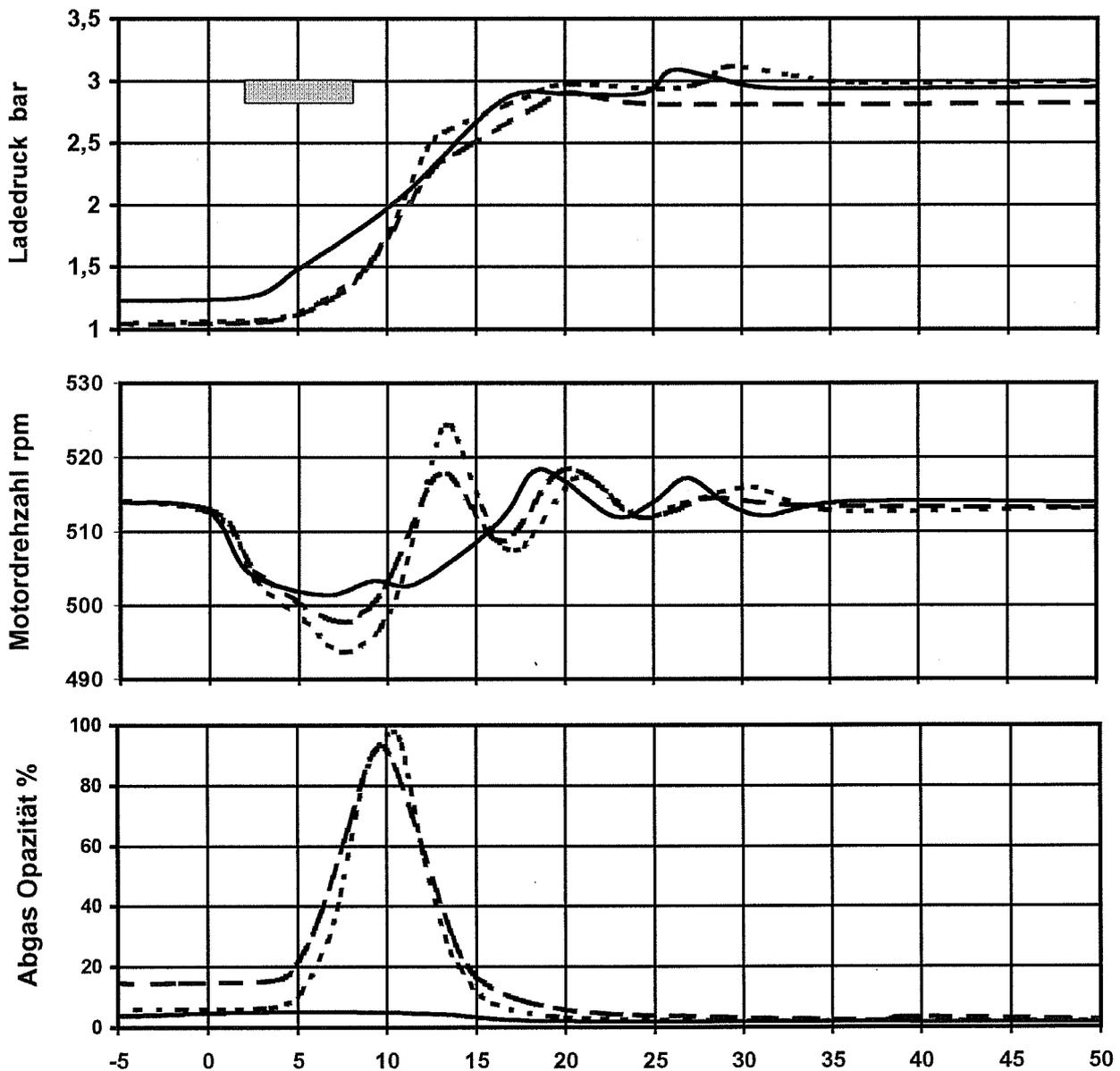
Lastaufschaltung von 5 % auf 65 % in ca. 15 sec bei konstanter Drehzahl

- Vergleich
- ohne Maßnahmen
 - - - - - mit Ladeluftvorwärmen und KWE
 - mit Ladeluftvorwärmen und Hilfsluftgebläse und Jet-Assist und KWE

KWE = Kraftstoff-Wasser-Emulsion

6L48/60 - 1130086

= Jet-Assist aktiv



Hinweis: Für diese Versuche wurden die Grundeinstellungen der Motoren zum Erreichen hoher Opazitäten modifiziert

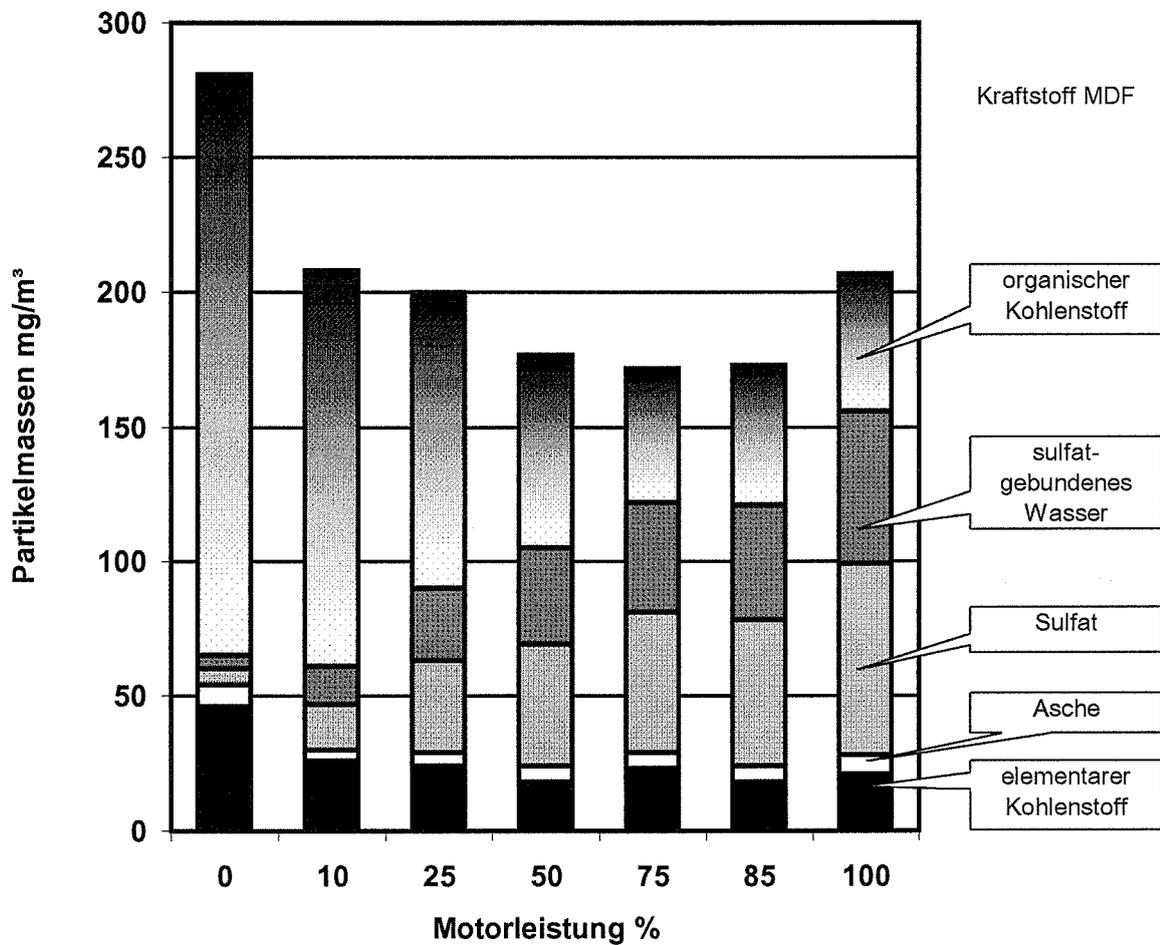
Ruß-, Partikel- Messeinrichtungen

CLEAN II



Partikelmenge und -zusammensetzung
über der Motorleistung bei konstanter Drehzahl (514 rpm)

6L48/60 - 1130086

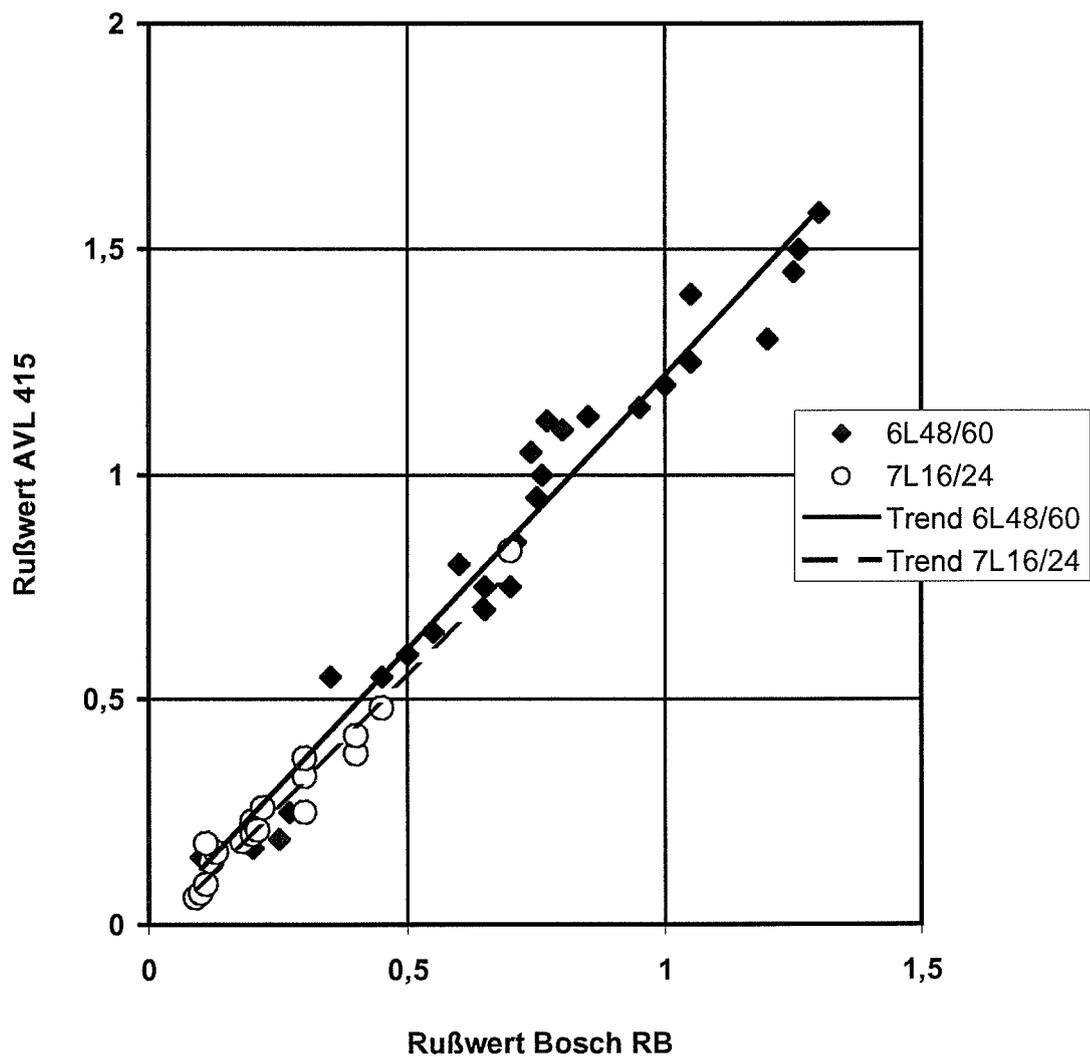


Ruß-, Partikel- Messeinrichtungen

CLEAN II



Vergleich Rußmessenrichtungen (Filterpapiermethode)
für stationären Motorbetrieb
Vergleich Bosch ETD 020.00 mit AVL 415



Ruß-, Partikel- Messeinrichtungen

CLEAN II

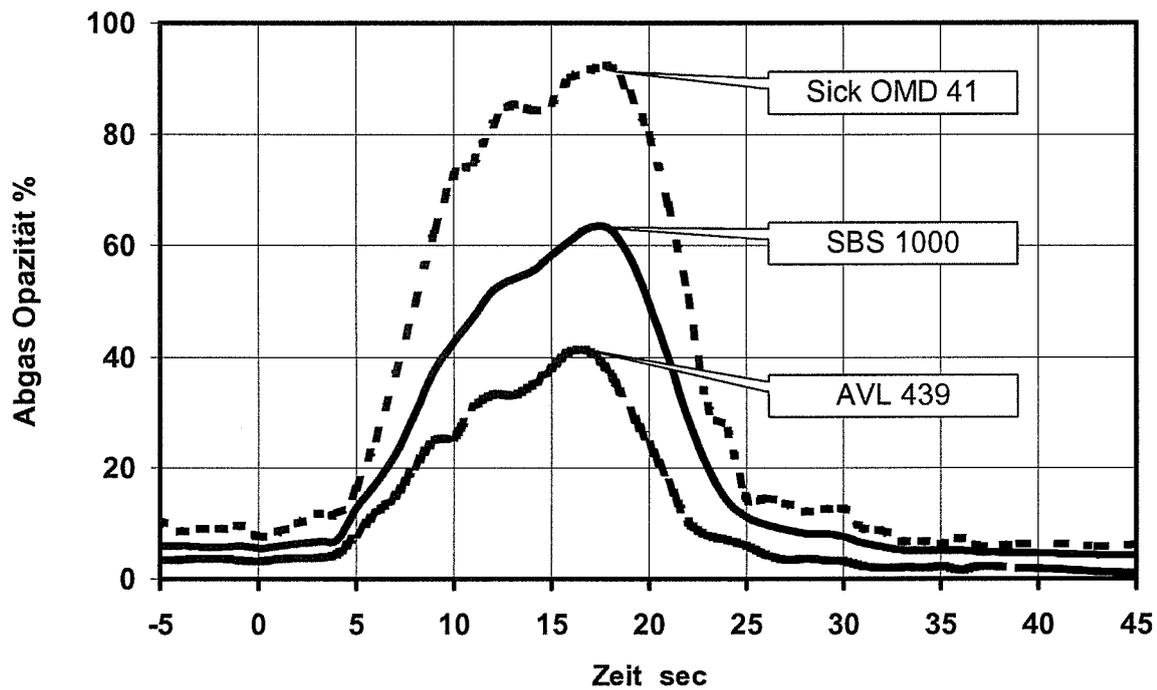


Vergleich Rußmeßgeräte (Opazität)

Belastung von 5 % auf 60 % in ca. 45 sec entlang Kombinatorkurve

Vergleich Sick OMD 41, AVL 439 und SBS 1000

6L 48/60 - 1130086

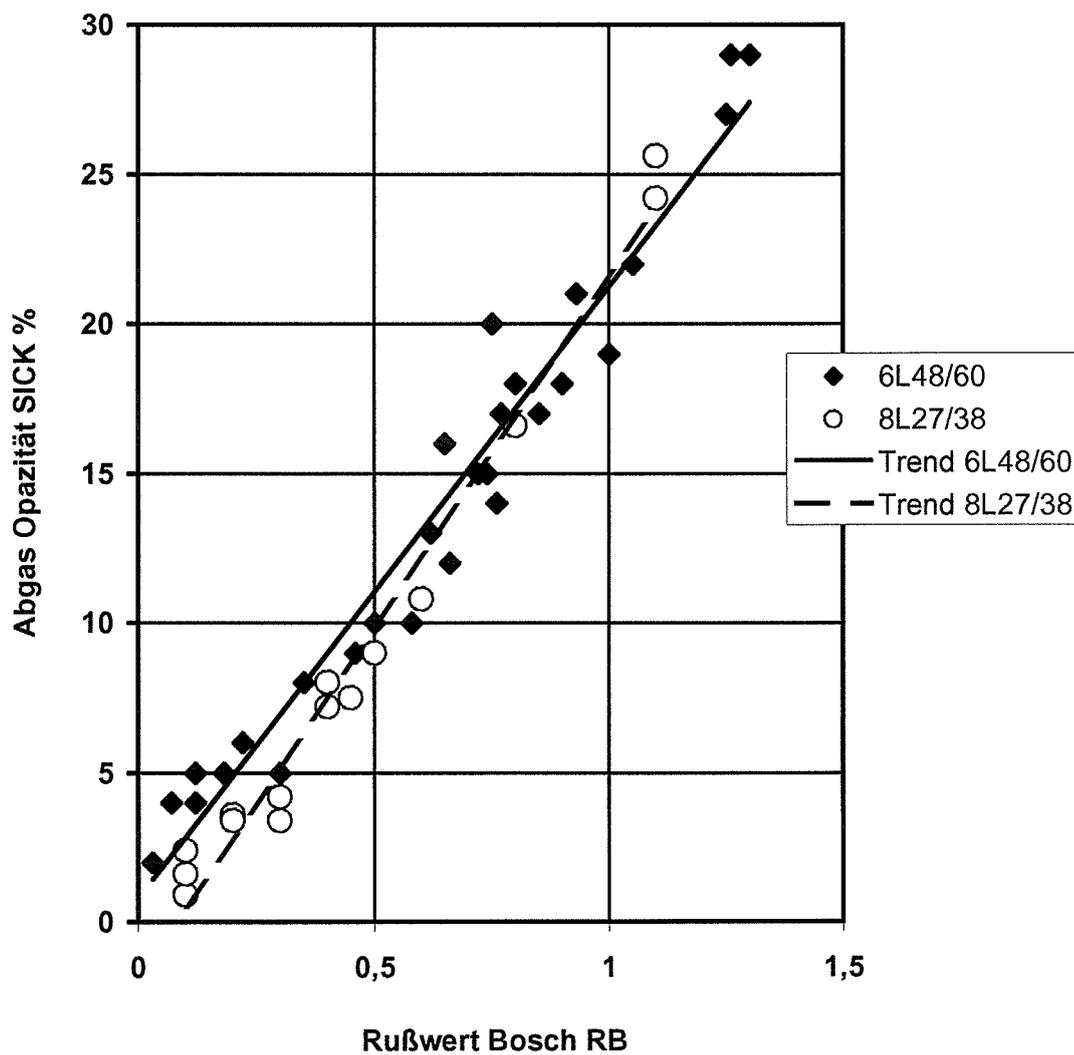


Ruß-, Partikel- Messeinrichtungen

CLEAN II



Vergleich Rußmessenrichtungen / Filterpapiermethode mit Opazität
für stationären Motorbetrieb
Vergleich Bosch ETD 020.00 mit Sick OMD 41



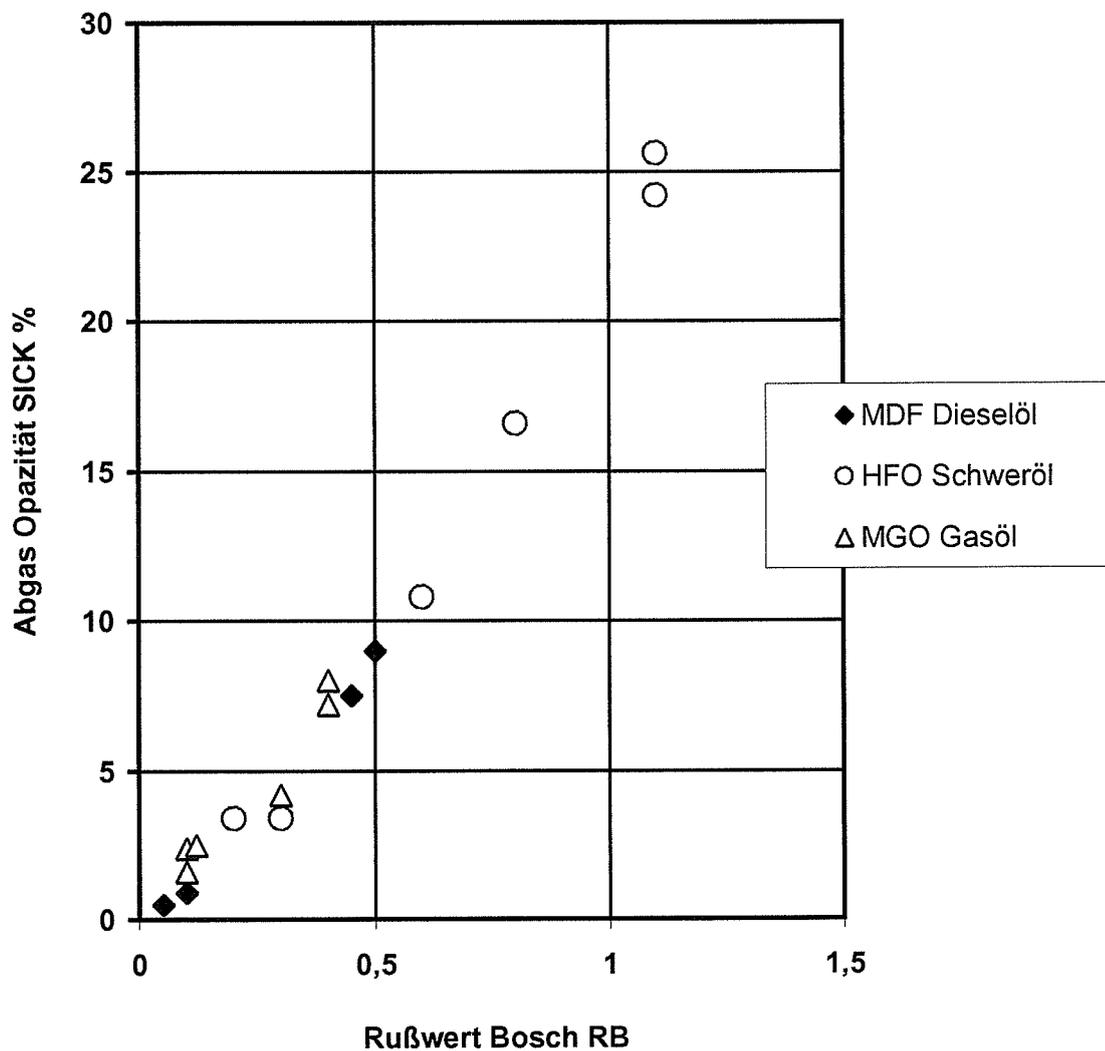
Ruß-, Partikel- Messeinrichtungen

CLEAN II



Vergleich Rußmessenrichtungen / Filterpapiermethode mit Opazität
für stationären Motorbetrieb
Korrelation zwischen Bosch ETD 020.00 und Sick OMD 41
Einfluss verschiedener Kraftstoffe

8L 27/38 - 21377



Ruß-, Partikel- Messeinrichtungen

CLEAN II



Partikelmenge des elementaren Kohlenstoffs
im Vergleich zur Rußmessung (RB, Sick)
über der Motorleistung bei konstanter Drehzahl (514 rpm)

6L48/60 - 1130086

