FAT Berichte

Nr. 555 | 2000

Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon TG, Tel. 052/368 31 31, Fax 052/365 11 90

Leistungssteigerung am Traktormotor

Einfluss von Abgasturbolader und Ladeluftkühlung auf das Leistungs-, Verbrauchs- und Abgasverhalten an einem Traktormotor

Edwin Stadler und Isidor Schiess, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon

Der Traktormotor gehört zur Kategorie der Einbau- und Industriemotoren. Diese werden in grossen Stückzahlen für universelle Zwecke für die Industrie, die Bau-, Land- und Forstwirtschaft entwickelt und gebaut. Die universelle Anwendung ermöglicht grössere Stückzahlen und, damit verbunden, sinkende Herstellungskosten. Je nach Anwendungszweck, ob als Antriebseinheit für Pumpen, Generatoren, Gabelstapler, Baumaschinen oder Traktoren, sind die technischen und umweltrelevanten Anforderungen an den Motor sehr unterschiedlich. Die Traktormotoren werden heute vorwiegend im Baukastensystem als Drei-, Vier- und Sechs-Zylindermotoren mit einem Einzelzylindervolumen von rund einem Liter je Zylinder gebaut. Das Leistungsspektrum reicht von etwa 40 bis 120 kW. Die Leistungsanpassung an die verlangte Nennleistung erfolgte bislang vorwiegend durch die Zylinderzahl, heute vermehrt unter Einsatz eines Abgasturboladers, vereinzelt auch bereits mit zusätzlichem Ladeluftkühler. Im vorliegenden Versuch zeigen wir an einem stark verbreiteten wassergekühlten Vierzylinder-Traktordieselmotor in Saugversion die Wirkungsweise von Abgasturbolader (ATL) und Ladeluftkühlung (LLK) als Mittel zur Leistungssteigerung. Im Vordergrund der Untersuchung stand das Motorverhalten in Bezug auf Drehmoment, Leistung, Treibstoffverbrauch und Abgase (Abb. 1). Alle Messungen erfolgten am Motorenprüfstand der FAT in Tänikon und ergaben zusammengefasst folgendes Bild: Eine Leistungssteigerung von 25% mit Abgasturbolader (ATL) und bis 45% mit zusätzlicher Ladeluftkühlung (LLK) erweisen sich als realisierbar. Der spezifische Treibstoffverbrauch konnte gleichzeitig mit Ausnahme des untersten Drehzahlbereiches um 4 bis 7% verbessert und die Motorabgase in praktisch allen Lastbereichen günstig beeinflusst werden. Ein Abgasturbolader mit zusätzlicher Ladedruckregelung, eventuell zusammen mit einer ladedruckabhängigen Einspritzmengenregelung, könnten die Motorkennwerte noch weiter verbessern.

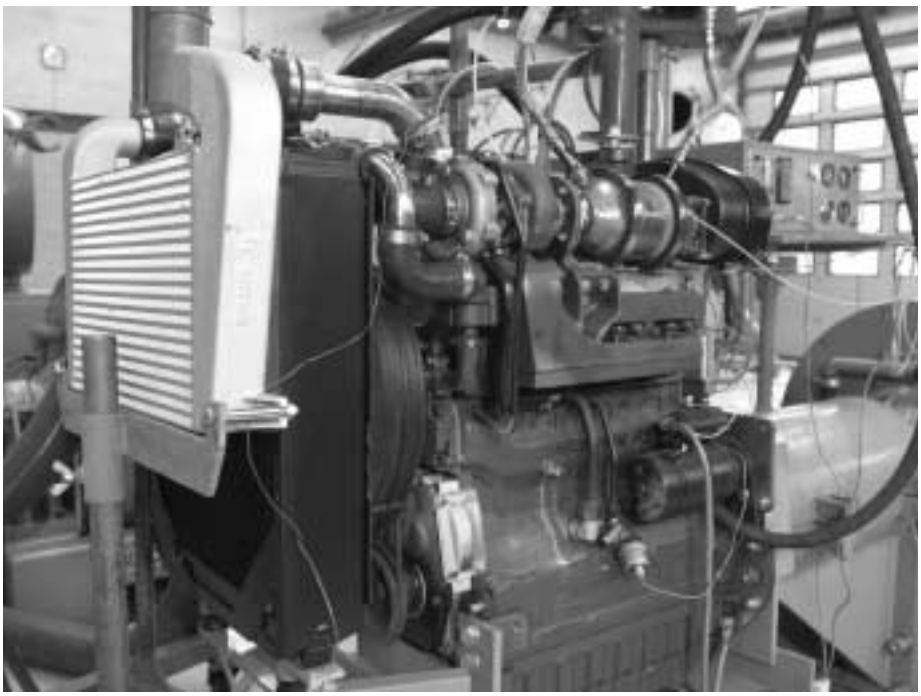


Abb. 1: Versuchsmotor Same Deutz-Fahr, Typ 1000.4 WT mit Abgasturbolader ATL und Ladeluftkühler LLK auf dem Prüfstand der FAT.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Der Versuchsmotor	3
Motoreinstellungen und Messergebnisse	3
Abgas- und Rauchverhalten	6
Schlussfolgerungen	7

Problemstellung

Die Schweizer Landwirtschaft befindet sich in einer Phase der Umstrukturierung. Die Betriebe werden grösser, die Leistung der Maschinen und Traktoren soll erhöht werden. Nicht immer ist der Kauf eines neuen, grösseren und schwereren Traktors die beste und kostengünstigste Wahl. Oft steht lediglich die Forderung nach einer höheren Leistung an der Zapfwelle und nicht die Zugkraft im Vordergrund. Somit genügt es unter Umständen, die Motorleistung des bereits vorhandenen Traktors zu erhöhen. Zum Zwecke der Leistungssteigerung werden deshalb Traktoren mit Saugmotoren verschiedentlich vom Traktorhändler mit einem Turbolader nachgerüstet. Im Handel sind fertige, auf den Traktortyp zugeschnittene Bausätze zu kaufen. Die Umbaukosten inklusive Material betragen etwa Fr. 3500.–.
Das Verhalten des Motors nach einem solchen Eingriff lässt sich aber nicht exakt voraussagen. Ein Versuch an einem stark verbreiteten Traktormotor soll die Wirkung der Nachrüstung beispielhaft aufzeigen.

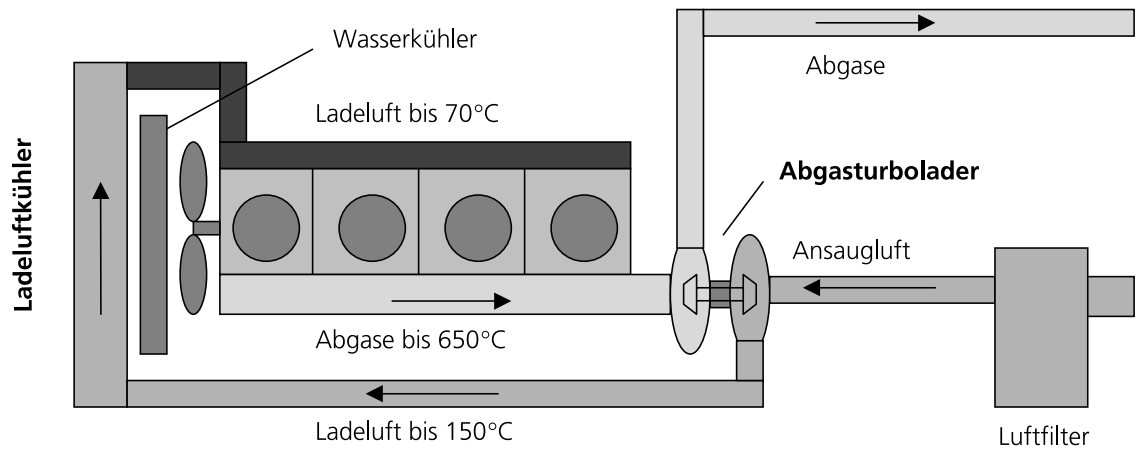
Der Versuchsmotor

Fabrikat:	Same Deutz-Fahr
Typ:	1000.4W, (1000.4WT mit Abgasturbolader)
Art:	Vier-Zylinder-Dieselmotor mit direkter Einspritzung
Bohrung/Hub:	105/115,5 mm
Hubraum:	4000 cm^3
Kühlsystem:	Wasser
Nenndrehzahl:	2500 min^{-1}
Einspritzpumpe:	BOSCH, Einzelsteckpumpen Typ PFR
Drehzahlregler:	Elektronisch
Nennleistung bei 2500 min^{-1} (laut Angaben des Motorherstellers):	
Saugversion:	55 kW (75 PS)
Turboversion (ATL):	69 kW (94 PS)
Turboversion mit Ladeluftkühler (ATL + LLK):	79 kW (107 PS)
Abgasturbolader:	Garrett, Typ TA 3110, ohne Ladedruckregelung
Ladeluftkühler:	SDF, Grösse B x H x T 450 x 300 x 65 mm

Die Wirkungsweise von Abgasturbolader (ATL) und Ladeluftkühlung (LLK)

Bekanntlich lässt sich bei einem Dieselmotor bei gleichem Hubraum und gleicher Drehzahl die Leistung erhöhen, wenn mehr Treibstoff eingespritzt wird. Dies allerdings nur in Grenzen: Reicht die Luftmenge im Zylinder nicht mehr aus um die zusätzliche Treibstoffmenge zu verbrennen, beginnt der Motor zu rauchen und der spezifische Treibstoffverbrauch steigt an.

Der Abgasturbolader hilft hier weiter. Abbildung 2 zeigt schematisch die Wirkungsweise der **Abgasturboaufladung**. Eine Turbine nutzt einen Teil der im Abgasstrom enthaltenen Energie, indem ein auf gleicher Welle angebrachter Verdichter die Ansaugluft des Motors komprimiert. Als Folge der grösseren Luft- bzw. Sauerstoffmenge im Zylinder kann eine grössere Treibstoffmenge eingespritzt und in Nutzleistung umgesetzt werden. Die Leistungsausbeute je Liter Hubvolumen



Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung (Luft/Luft-Ladeluftkühlung)

Abb. 2: Der Abgasturbolader nutzt einen Teil der Abgasenergie – die bei Saugmotoren ungenutzt bleibt – zur Verdichtung der Ansaugluft auf einen Druck von 0,8 bis 1,5 bar. Die Luftmenge im Zylinder erhöht sich, so dass eine grössere Treibstoffmenge verbrannt und folglich die Motorleistung gesteigert werden kann.

Tab. 1: Wichtigste Motorkennwerte im Überblick

Motorvariante Kurzbezeichnung im Bericht		Basis Saugmotor Sauger	Turbomotor ATL	Turbomotor mit Ladeluftkühlung ATL + LLK
Einstellung der Einspritzpumpe				
Einspritzmenge bei Nenndrehzahl/Volllast	mm^3	52,0	62,2	72,7
Veränderung bei Nenndrehzahl	%		19,6	39,8
Motorleistung				
Nennleistung bei 2500 min^{-1}	kW	55,2	69,1	79,9
	PS	75,1	93,9	108,5
Veränderung	%		25,2	44,7
Drehmomentverlauf				
Drehmoment bei 2500 min^{-1}	Nm	211	264	305
Drehmoment max.	Nm	269	328	397
Bei Motordrehzahl	min^{-1}	1200	1400	1500
Drehmomentanstieg	%	27,5	24,2	30,2
Anfahrdrehmoment bei 1000 min^{-1}	%	124	121	119
Treibstoffverbrauch				
Spez. Verbrauch bei Nenndrehzahl	g/kWh	236	225,6	228,4
Spez. Testverbrauch (ISO-8178 C1)	g/kWh	247,7	237,2	230,2
Verbesserung	%		–4,2	–7,1
Abgasturbolader, Ladedruck max.	bar		0,83	0,94
Motor, spez. Mitteldruck	bar	6,6	8,3	9,6
Öltemperatur max.	°C	104	106	108
Abgas- und Rauchverhalten				
Gasförmige Motorabgase				
Kohlenwasserstoffe (HC)	g/kWh	1,35	1,0	0,97
Stickoxide (NOx)	g/kWh	10,16	11,56	9,59
Kohlenmonoxid (CO)	g/kWh	4,54	1,63	1,94
Schwarzrauch BOSCH				
95 % (2375 min^{-1})	SZ	1,5	0,55	1,2
70 % (1750 min^{-1})	SZ	1,65	0,8	1,7
50 % (1250 min^{-1})	SZ	2,6	3,4	5,3

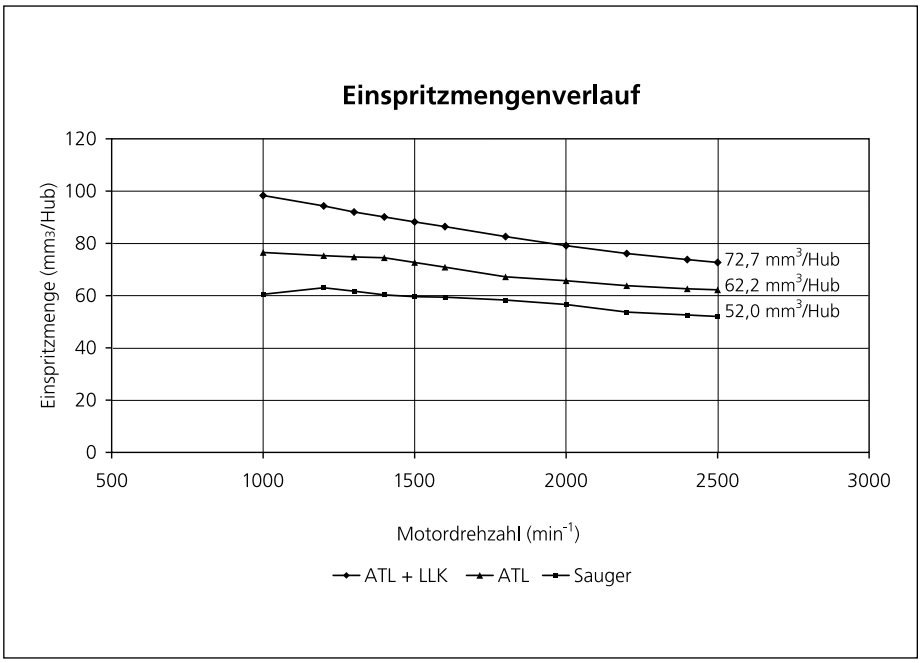


Abb. 3: Entsprechend der grösseren für die Verbrennung verfügbaren Luftmenge im Zylinder kann die Einstellung der Einspritzpumpe angepasst werden.

verbessert sich. Die Abgasturboaufladung hat aber den Nachteil, dass sich die Luft durch die rasche Verdichtung aufgeheizt, das heisst, die Dichte der Luft nimmt ab und die thermische Belastung für den Motor steigt an. Wird nun aber die verdichtete Luft in einem **Ladeluftkühler** wieder abgekühlt, erhöht sich die Luftdichte und die thermische Belastung geht zurück.

Zwei Systeme der Ladeluftkühlung sind bei Traktoren zu finden: Die Luft/Luft-Ladeluftkühlung und die Luft/Wasser-Ladeluftkühlung. Heute gelangt im Traktorenbau mehrheitlich die Luft/Luft-Ladeluftkühlung zur Anwendung. Dabei wird der Ladeluftkühler vor dem Kühlwasser-Wärmetauscher angeordnet. Für die Kühlluft sorgt der hinter dem Wasserwärmetauscher sitzende, vom Motor angetriebene ungeregelte oder temperaturgeregelte (Visco) Lüfter (Abb. 2). Bei der Luft/Wasser-Ladeluftkühlung sorgt ein dem Kühlwasserkreislauf des Motors angeschlossener Wärmetauscher für die Abkühlung der heissen Ladeluft. Mit der Abgasturboaufladung und der Ladeluftkühlung kann das Leistungs-, Verbrauchs- und Abgasverhalten des Motors verbessert werden.

Motoreinstellungen und Messergebnisse

Einspritzmenge

Im Gleichschritt mit den Motormodifikationen Sauger, ATL, ATL + LLK, wurde die Fördermenge der Einspritzpumpe den neuen Erfordernissen angepasst (Abb. 3): Als Sauger mit einer Volllasteinspritzmenge bei Nenndrehzahl von 52,0 mm^3/Hub, als Turbomotor (ATL) mit 62,2 mm^3/Hub und als Turbomotor mit Ladeluftkühlung (ATL + LLK) mit einer Volllasteinspritzmenge von 72,7 mm^3/Hub. Die drehzahlabhängige Überhöhung der Einspritzmenge zu den tiefen Drehzahlen bewirkt den erwünschten hohen Drehmomentanstieg und ein hohes Anfahrdrehmoment bei 1000 min^{-1}.

Die Volllastkennlinien

Abbildung 4 zeigt die Volllastkennlinien von Drehmoment, Leistung und spe-

zifischem Treibstoffverbrauch in den drei Motorvarianten: Sauger, ATL, ATL + LLK.

Drehmoment (M)
(Abb. 4)

Drehmoment und Drehmomentanstieg sind wichtige Parameter für die Beurteilung von Durchzugkraft und Anfahreigenschaften eines Motors (Tab. 1).
Gegenüber der Saugversion erhöht sich das Drehmoment entsprechend der grösseren Einspritzmenge in den Ausführungen ATL, ATL + LLK über den ganzen Drehzahlbereich. Das Drehmoment-Maximum verschiebt sich ausgehend beim Sauger von 1200 min^{-1} auf 1400 min^{-1} mit ATL und auf 1500 min^{-1} beim ATL mit LLK. Das ist die Folge des zu geringen Ladedruckes des ungeregelten ATL im untersten Drehzahlbereich und der damit zusammenhängenden, nicht optimalen Luftfüllung der Zylinder mit Verbrennungsluft. Diese Drehzahlerhöhung von 1200 auf 1500 min^{-1} bewirkt keine Nachteile für den praktischen Traktoreinsatz, um so mehr als das Anfahrdrehmoment (nachfolgend) nicht darunter leidet. Ein Drehmomentanstieg von 20 bis 30% beurteilen wir als gut, über 30% als sehr gut. Das Anfahrdrehmoment gemessen bei 1000 min^{-1} und bezogen auf das Drehmoment bei Nenndrehzahl beurteilen wir mit 120% als sehr gut. Ein hohes Anfahrdrehmoment erleichtert das Anfahren mit dem Traktor mit schweren Lasten wesentlich.

Leistung (P)
(Abb. 4)

Die Motorleistung berechnet sich aus dem Drehmoment (M) in Nm und der Drehzahl (n) in min^{-1}, nach der Formel:

$$\frac{M}{1000} \times \frac{2\,\pi \times n}{60} = \frac{M \times n}{9550}$$

Wir vergleichen die Leistung bei Nenndrehzahl 2500 min^{-1} in kW und die Leistungssteigerung gegenüber der Saugversion in Prozent (Tab. 1). Als Folge der grösseren Einspritzmenge mit ATL (+19,6%) und ATL + LLK (+39,8%) erhöht sich die gemessene Motorleistung von 55,2 kW beim Sauger auf 69,1 kW (+25,2%) mit ATL und auf 79,9 kW (+44,7%) mit ATL + LLK.

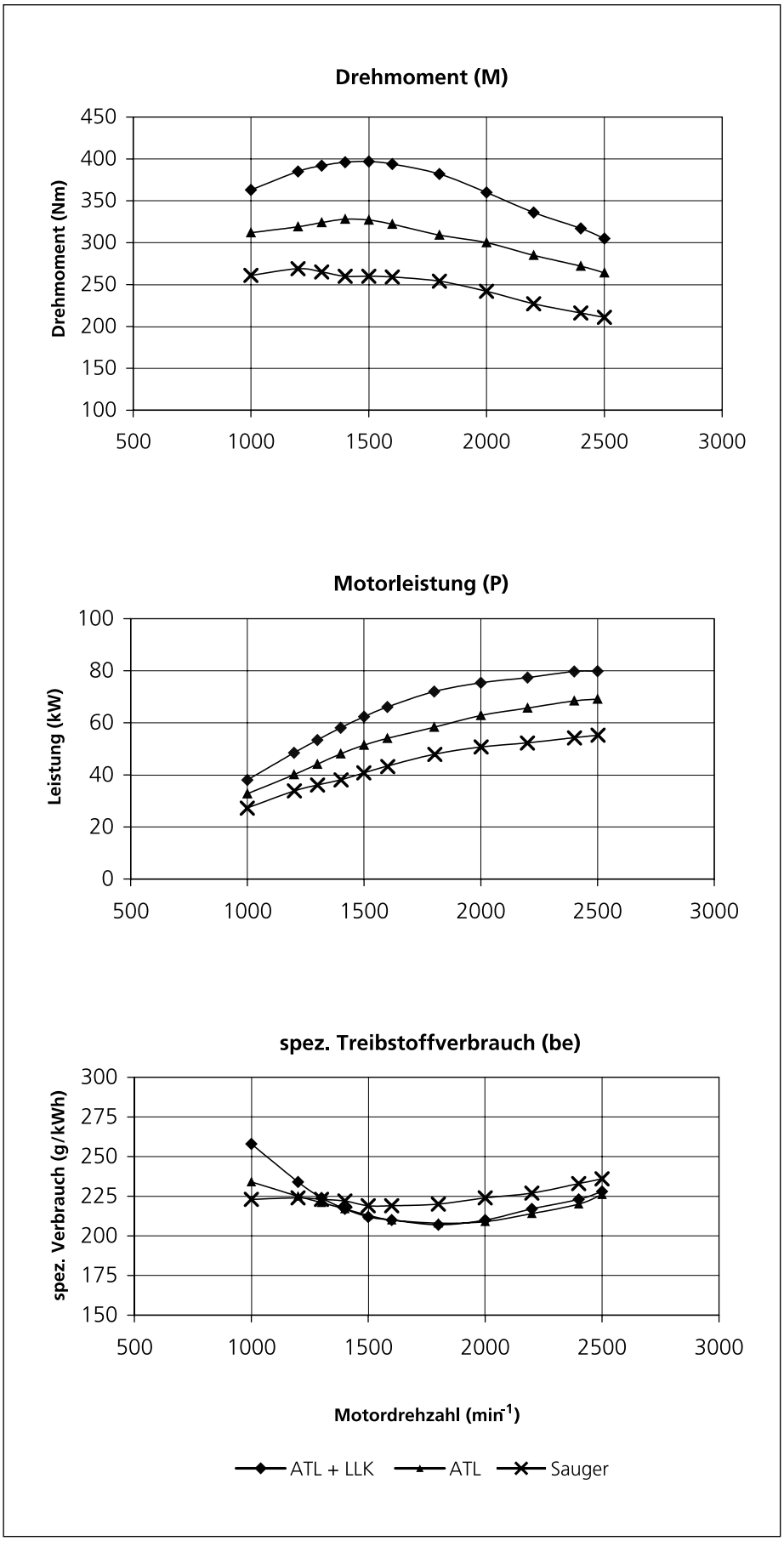


Abb. 4: Die Volllastkennlinien von Drehmoment, Leistung und spezifischer Treibstoffverbrauch aufgenommen in den Motorversionen «Sauger» mit Abgasturbolader ATL und mit zusätzlicher Ladeluftkühlung LLK.

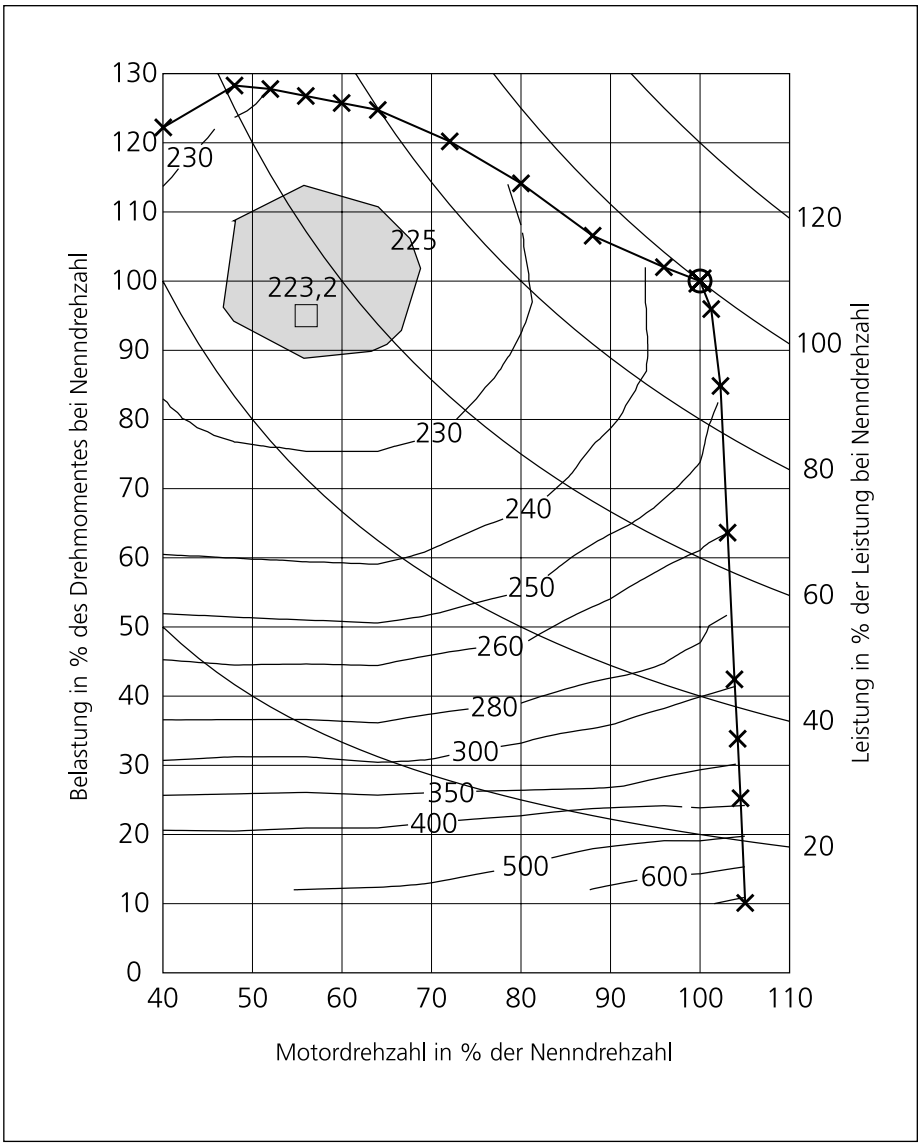


Abb. 5: Kennfeld des Motors in Saugversion mit einem Bestpunkt von 223,2 g/kWh.

Spezifischer Treibstoffverbrauch (be) (Abb. 4)

Der spezifische Treibstoffverbrauch ist im Drehzahlbereich oberhalb 1300 min^{-1} mit ATL und ATL + LLK rund 5% günstiger als der «Sauger». Unterhalb 1300 min^{-1} kehrt sich die Situation ins Gegenteil. Der verminderte Ladedruck des ungeregelten Turboladers reicht nicht für eine optimale Luftfüllung der Zylinder.
Die Verbrennung der hohen Einspritzmengen verschlechtert sich, der Treibstoffverbrauch steigt besonders für den ATL mit LLK an. Ein ATL mit Ladedruckregelung oder eine ladedruckabhängige Mengenregelung an der Einspritzpumpe könnten Abhilfe bringen. Einen spezifischen Treibstoffverbrauch bei Nennleistung bis zu 230 g/kWh beurteilen wir als günstig.

Das Motorkennfeld (Muscheldiagramm)

Im Gegensatz zur Volllastkurve stellt das Motorkennfeld den spezifischen Treibstoffverbrauch über den ganzen Motorbetriebsbereich von Nulllast bis Volllast und von Tiefdrehzahl bis zur oberen Abregeldrehzahl dar. Auf dem Prüfstand werden am Motor etwa in 100 Einzelmesspunkten, verteilt im ganzen Drehzahl- und Lastbereich von unbelastet bis Volllast, der Treibstoffverbrauch gemessen. Die Punkte gleichen Verbrauches werden dann mit Linien verbunden und es entstehen die sogenannten Muschelkurven oder Kurven gleichen Verbrauches.
Abbildung 5 zeigt das Motorkennfeld des Motors in der Saugversion. Die Achse Motordrehzahl (Abszisse) stellt den nutzbaren Drehzahlbereich in Prozent der Nenndrehzahl dar, die Achse Belastung (linke Ordinate) das nutzbare Drehmoment in Prozent des Drehmomentes bei Nenndrehzahl und die Achse Leistung (rechte Ordinate) die Leistung in Prozent der Leistung bei Nenndrehzahl. Innerhalb dieser Fläche sind die Linien konstanten Treibstoffverbrauches eingetragen.
Wir erkennen: Die Zone mit dem besten spezifischen Treibstoffverbrauch < 225 g/kWh (schraffiert) liegt im oberen eher linken Teil der Fläche, im Bereich der Belastung von 90 bis 110% und einer auf 50 bis 60% reduzierten Motordrehzahl. Der Tiefstpunkt wurde mit 223,2 g/kWh gemessen; im Gegensatz dazu die Motorkennfelder des Motors mit ATL und ATL + LLK (Abb. 6 und 7). Die Fläche (schraffiert) mit einem spezifischen Verbrauch von < 225 g/kWh ist um ein mehrfaches grösser und reicht im Drehzahlbereich von 40 bis 95% der Nenndrehzahl und im Lastbereich von 55% bis zur Volllast. Der verbrauchsgünstigste Wert wurde mit ATL mit 207,6 g/kWh und mit ATL + LLK mit 208,5 g/kWh gemessen. Die tieferen Werte gleichen einer Wirkungsgradverbesserung des Motors über den gesamten Betriebsbereich.

Mitteldruck und Motoröltemperatur als Hinweis für die thermische Motorbelastung

Der effektive Mitteldruck gibt Auskunft über die spezifische Leistung eines Dieselmotors unabhängig von seinem Hubraum. Mitteldruck ist der theoretische durchschnittliche Druck, der auf jeden Quadratzentimeter Kolbenfläche während der vier Takte (Ansaugen, Verdichten, Verbrennen, Ausstossen) wirkt. Dieser Wert ist allerdings nur ein Bruchteil des maximal auftretenden Druckes im Brennraum. Der spezifische Mitteldruck in (bar) berechnet sich nach folgender Formel:

$$\frac{\text{Nennleistung (kWh)}}{\text{Hubraum (l)} \times \text{Nenndrehzahl (min}^{-1}\text{)}} \times 1200$$

Anhand des Mitteldruckes lässt sich die Ausnutzung eines Traktormotors beurtei-

len (Tab. 1). Bei Saugmotoren liegt der Mitteldruck in der Regel zwischen 6,0 und 7,5 bar, bei Motoren mit ATL zwischen 7,5 und 10 bar und bei Motoren mit ATL + LLK bis zu maximal 13 bar.
Die maximale Öltemperatur oder deren Anstieg nach der Modifikation mit ATL und ATL + LLK gibt neben dem gerechneten spezifischen Mitteldruck einen weiteren wichtigen Hinweis über die thermischen Reserven eines Motors (Tab. 1). Motoröltemperaturen bis zu 115°C gelten erfahrungsgemäss als unproblematisch.

Die Wirkung des Ladeluftkühlers

Der Ladeluftkühler LLK hat den Zweck, die durch den Abgasturbolader verdichtete heisse Ansaugluft abzukühlen, um einerseits die Luftdichte zu erhöhen und anderseits die thermische Belastung des Motors zu verringern. Abbildung 8 zeigt die Temperatur der Ladeluft vor und nach dem Ladeluftkühler (LLK) bei Volllastbetrieb des Motors.

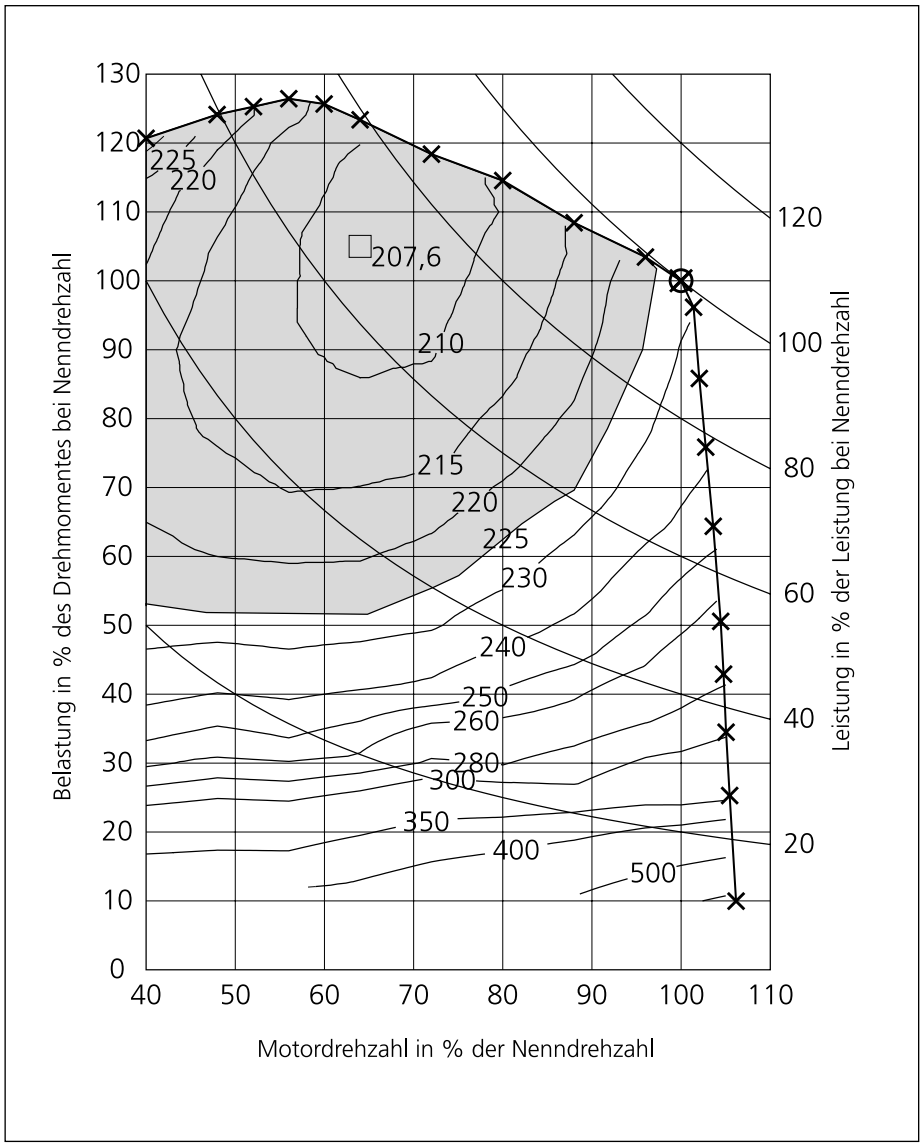


Abb. 6: Kennfeld des Motors mit Abgasturbolader ATL mit einem Bestpunkt von 207,6 g/kWh.

Abgas- und Rauchverhalten

Die gasförmigen Motorabgase

Wir beurteilen das Abgasverhalten anhand der gasförmigen Motorabgase Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NOx) gemessen nach der Norm ISO-8178 C1. Es handelt sich dabei um einen Testlauf auf dem Prüfstand mit acht unterschiedlichen Laststufen von je zehn Minuten. Die Messwerte der einzelnen Laststufen gehen mit unterschiedlicher Gewichtung in die Gesamtrechnung ein. Das Resultat sind die spezifischen Abgasemissionen in Gramm je Kilowattstunde (g/kWh). Die Motorabgase sind neu im Reglement ECE R-96/68 für Dieselmotoren für die Land- und Forstwirtschaft, Gültigkeit voraussichtlich ab 2001, begrenzt. Die kommenden Grenzwerte gelten ab Einführungsdatum für Neumotoren. Bereits gebaute oder im Einsatz stehende Motoren sind davon nicht berührt.
Die gemessenen Kohlenwasserstoffe (HC) überschreiten die geforderte Grenze in der Version Sauger knapp. ATL und ATL + LLK liegen klar darunter (Abb. 9). Die Stickoxide (NOx) liegen alle über dem zulässigen Grenzwert. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Version ATL + LLK mit der höchsten Leistung den tiefsten Wert aufweist. Die Stickoxide reagieren insbesondere auf hohe Verbrennungstemperatur. Diese liegt mit LLK auf tieferem Niveau. Die Werte für das Kohlenmonoxid (CO) liegen alle, jene von ATL und ATL + LLK weit unter dem vorgegebenen ECE Grenzwert.

Spezifischer Testverbrauch im Fahrzyklus ISO-8178 C1

Die Norm ISO-8178 C1 beschreibt einen Fahrzyklus in acht verschieden Laststufen, die über das Motorkennfeld verteilt sind. Darin sind Volllast und Teillast sowohl bei hoher als auch reduzierter Drehzahl und die untere Leerlaufdrehzahl eingeschlossen. Aus den acht Messpunkten lässt sich ein für den praktischen Traktoreinsatz aussagekräftigen Testverbrauch errechnen (Tab. 1).
Die Verbrauchsreduktion von 4,2% mit ATL, bzw. 7,1% mit ATL + LLK ist bemerkenswert und eine Folge der besseren energetischen Ausnutzung des Treibstoffes.

Schwarzrauch (Partikel)

Unter Umgehung der aufwendigen Partikel-Masse-Bestimmung messen wir den Schwarzrauch mittels BOSCH-Filtermethode. Viel Schwarzrauch geht grundsätz-

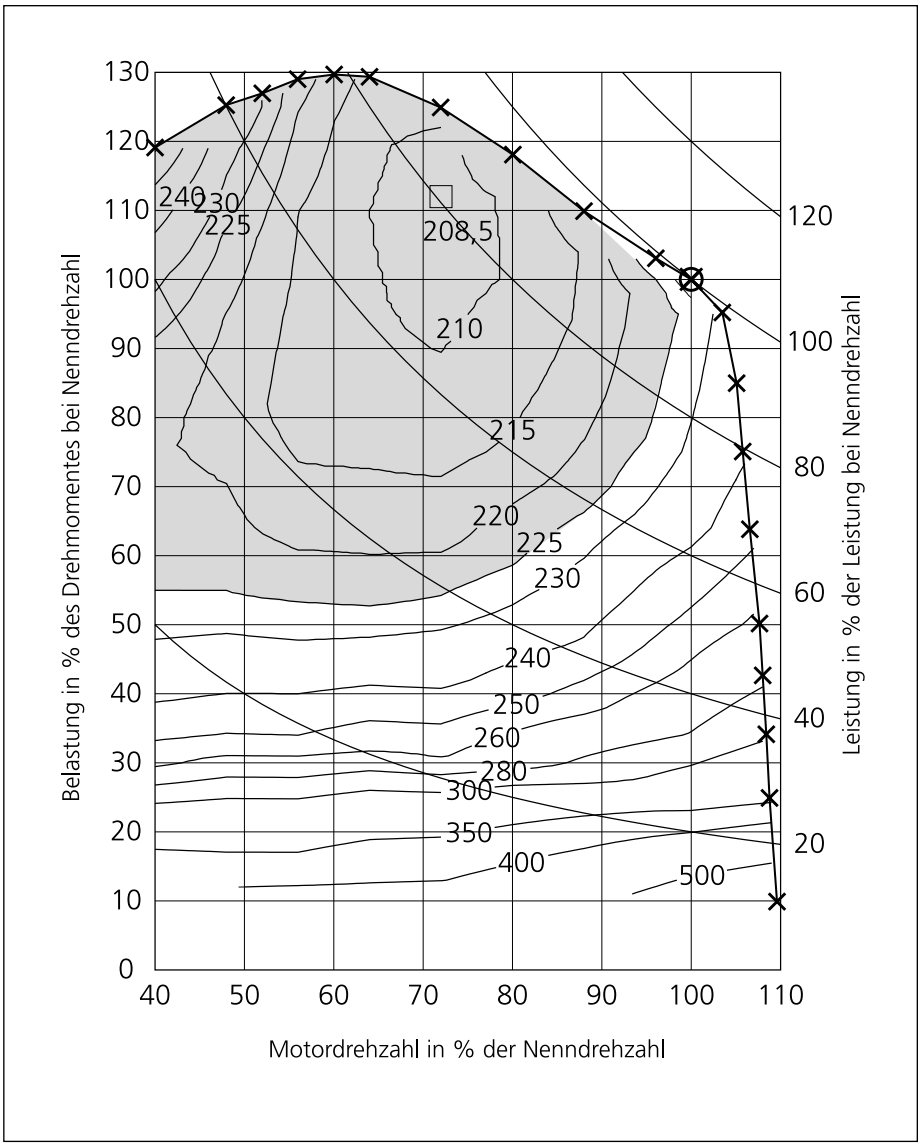


Abb. 7: Kennfeld des Motors mit Abgasturbolader ATL und Ladeluftkühler LLK mit einem Verbrauchs-Bestpunkt von 208,5 g/kWh.

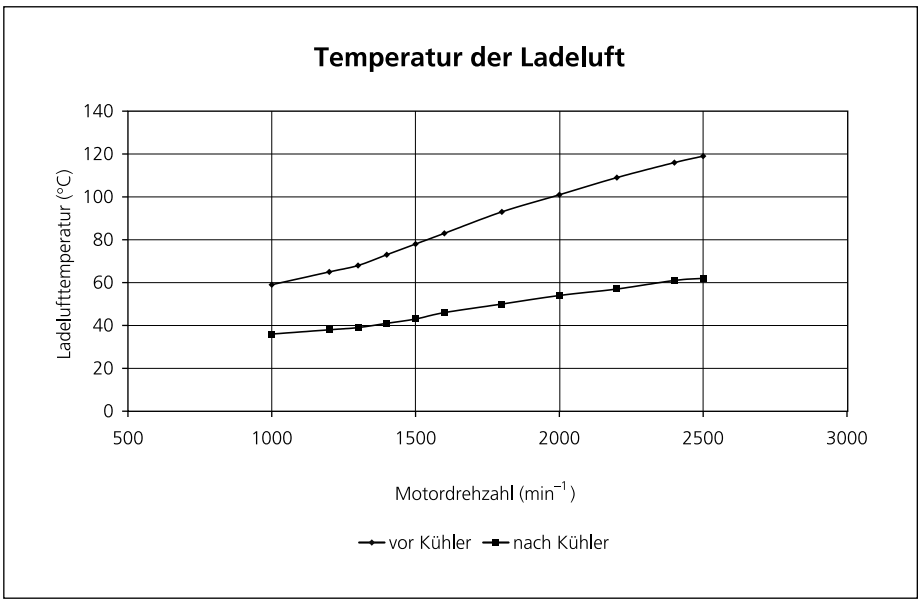


Abb. 8: Wirksamkeit der Luft/Luft-Ladeluftkühlung LLK im Volllastbetrieb.

lich mit hohem Partikelausstoss (unlösliche Partikel) einher. Das Rauchverhalten vergleichen wir anhand der Schwärzungszahl (BOSCH SZ) bei folgenden drei Volllastdrehzahlen: 95%, 70% und 50% der Nenndrehzahl (Tab. 1).
In den Drehzahlstufen 95% und 70% erzielt die Motorvariante ATL die besten Ergebnisse. Die Variante ATL + LLK ist bei 95% und 70% Drehzahl besser bzw. gleich wie die Version Sauger. Bei der 50%-Drehzahlstufe dagegen sind ATL aber insbesondere ATL + LLK schlechter. Der Grund liegt an der ungenügenden Verbrennung, da die Einspritzmenge zu gross ist bzw. es herrscht im Zylinder Luftmangel wegen des zu kleinen Ladedruckes des Abgasturboladers. Wir bewerten die Schwärzungszahlen unter 2,0 als gering, 2,0 bis 4,0 als mittelmässig und über 4,0 als hoch.

Schlussfolgerungen

Das Nachrüsten des serienmässigen Saugmotors mit Abgasturbolader ATL und Ladeluftkühlung LLK wirkte sich insgesamt positiv aus. Drehmoment und Nennleistung des Motors wurden bei entsprechender Erhöhung der Treibstoffeinspritzmenge um 25% mit ATL und um 45% mit zusätzlichem LLK gesteigert. Der spezifische Treibstoffverbrauch verbesserte sich mit Ausnahme der Volllastpunkte im untersten Drehzahlbereich unterhalb 1300 min^{-1} durchwegs positiv. Das Motorkennfeld weist einen Verbrauchs-Bestpunkt für den Motor in der Saugversion von 223,2 g/kWh, für den Turbo ATL 207,6 g/kWh und für den Turbo mit Ladeluftkühlung ATL + LLK einen solchen von 208,5 g/kWh auf. Im Test nach ISO-8178 C1, der acht Laststufen aus dem Kennfeld berücksichtigt und somit einen für den Praxiseinsatz interessanten Vergleich abgibt, errechnet sich für den Sauger ein Testverbrauch von 247,7 g/kWh, für den Motor mit ATL 237,2 g/kWh und für die Version ATL + LLK ein solcher von 230,2 g/kWh. Die gasförmigen Motorabgase Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) konnten mit ATL + LLK massiv unter die Grenzwerte von ECE-R96 gesenkt werden. Die Stickoxide NOx erhöhten sich erwartungsgemäss mit dem Einsatz des ATL. Zusammen mit dem LLK konnten sie jedoch in die Nähe des ECE-R96 Grenzwertes abgesenkt werden. Der Schwarzrauch reagierte mit

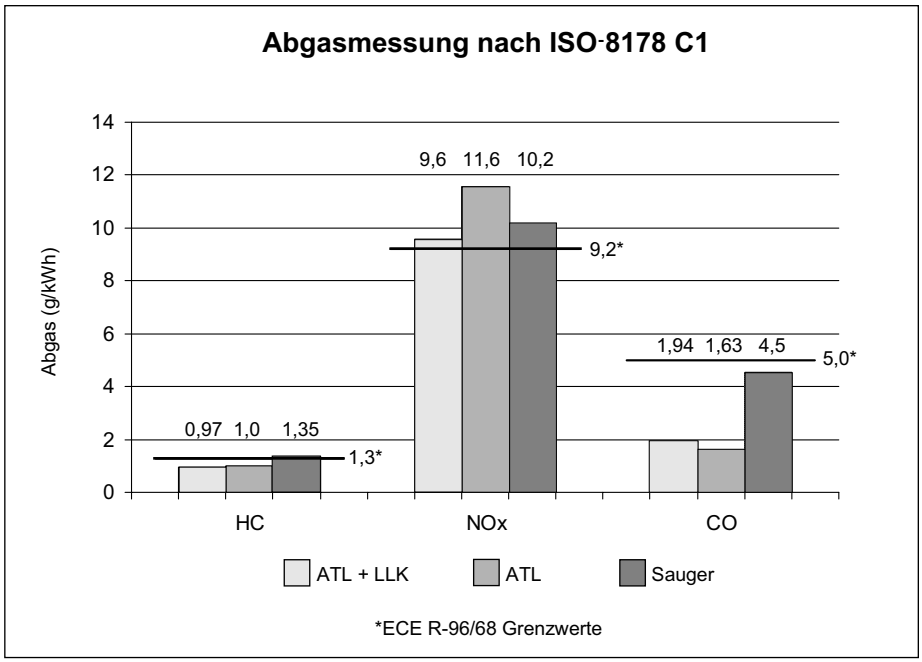


Abb. 9: Die Motorabgase werden in einem Acht-Stufen-Fahrzyklus entsprechend der Norm ISO-8178 C1 gemessen. Als Ergebnis werden die sogenannt limitierten Abgase Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NOx) und das Kohlenmonoxid (CO) als Emissionsfaktoren in g/kWh ausgewiesen.

Ausnahme der untersten Drehzahlstufe, wo der ungeregelte ATL ungenügenden Ladedruck erreicht, sehr positiv. Ein ATL mit Ladedruckregelung oder/und eine vom Ladedruck abhängige Einspritzmengen-Regelung könnte Abhilfe bringen. Eine weitere Optimierung des Verbrennungsablaufes und somit eine zusätzliche Wirkungsgradverbesserung könnte mit einer drehzahl- und lastabhängigen Einspritzzeitpunkt-Regelung erzielt werden. Der berechnete spezifische Mitteldruck, ein Mass für die Ausnutzung des Motors, wie auch die gemessene Öltemperatur liegen auch mit der höchst belasteten Version ATL + LLK in einem für Traktormotoren üblichen Rahmen.