

# Die Abgastemperatur als Maß für die Motorauslastung und den Kraftstoffverbrauch von Dieselmotoren

Von Carsten Kipp und Egon Bergmann, Berlin\*)

DK 631.372:621.43.019.9:621.1.018.7

Für viele Aufgabenstellungen in der landtechnischen Forschung und Entwicklung sowie für projektierte Fahrerinformations- oder Automatisierungssysteme ist die Kenntnis der Motorauslastung eine wichtige Voraussetzung. Zur Zeit steht für die Ermittlung dieser Kenngröße noch kein serienmäßig verwendbares Meßverfahren zur Verfügung. Unter bestimmten Voraussetzungen ist jedoch die Ableitung der Motorauslastung aus der Motorabgastemperatur möglich.

In diesem Artikel erfolgt eine systematische Untersuchung der die Genauigkeit dieses Verfahrens beeinflussenden Faktoren. Eine Zusammenstellung der möglichen Störeinflüsse in Verbindung mit ihrer jeweiligen Größe sowie geeigneter Korrekturmöglichkeiten kann als Entscheidungsgrund dienen, für welche Anwendungen die Abgastemperatur als Maß für die Motorauslastung geeignet ist.

## 1. Einleitung

Die Entwicklung der Elektronik und Mikroelektronik und deren Einzug in viele Gebiete des Maschinen- und Fahrzeugbaus hat unter anderem den Wunsch nach Funktionsoptimierung dieselmotorisch betriebener Nutzfahrzeuge unter Ausnutzung aller durch die Mikroelektronik gegebenen Möglichkeiten zur Folge.

Die ständig sinkenden Kosten pro Funktionseinheit, die große Zuverlässigkeit und nicht zuletzt das durch den sicheren Einsatz der Elektronik im Pkw-Bereich gestiegene Verbrauchervertrauen ermutigen auch die Hersteller von Nutzfahrzeugen, diese Technik in die Serie einzuführen.

Voraussetzung für das Anzeigen, Stellen oder Regeln mit Hilfe der Elektronik ist die Erfassung betriebsrelevanter Größen durch geeignete Sensoren. Die Vielfalt der zu messenden Größen, deren große Spannweite sowie die oftmals widrigen Umgebungsbedingungen am Meßort sind jedoch Gründe dafür, daß geeignete Sensoren für den Serieneinsatz oftmals fehlen.

Anwendung finden vielfach Sensoren, die sich im Automobilbau bewährt haben und deren hohe Stückzahlen die Kosten niedrig halten. So ist die Messung einer Drehzahl unproblematisch, die Ermittlung einer zur Funktionsoptimierung motorisch angetriebener Maschinen außerordentlich bedeutenden Betriebsgröße, des Motormoments, aber noch ein großes Problem.

Für diese zur Bestimmung des Betriebspunktes von Verbrennungskraftmaschinen unabdingbare Meßgröße fehlt immer noch ein billiger und zuverlässig arbeitender Sensor. Die zur Zeit erhältlichen Sensoren auf der Basis der Messung von Wellenverdrehung, Wellenspannung oder Änderung der Permeabilität des Wellenwerkstoffes sind allenfalls für Labormessungen oder für den Versuchsbetrieb

geeignet. Gleiches gilt für Sensoren zur Erfassung des Zylinderinnendruckes. Allein der Messung des Regelstangenweges oder des Nadelhubes ist durch die Einführung elektronischer Einspritzsysteme in Zukunft größere Bedeutung beizumessen.

Zur Beurteilung der Auslastung von Verbrennungskraftmaschinen wird daher oftmals die sich einstellende Abgastemperatur herangezogen. Schon in den Anfängen des Motorenbaus fand diese Meßgröße bei größeren Stationär- und Schiffsmaschinen gerne als Maß für eine gleichmäßige Belastung der verschiedenen Zylinder Verwendung. Da es sich hierbei um eine Vergleichsmessung handelt, bleiben äußere die Abgastemperatur beeinflussende Größen ohne Auswirkung.

Soll jedoch die Abgastemperatur zur Beurteilung der Auslastung des gesamten Motors herangezogen werden, ist eine Untersuchung der Aussagekraft dieser Meßgröße unumgänglich. Im folgenden soll am Beispiel einiger Dieselmotoren für den Einsatz in Landmaschinen untersucht werden, mit welchem Fehler die Abgastemperatur eine Aussage über Motordrehmoment und Kraftstoffverbrauch ermöglicht. Soweit ein experimenteller Nachweis wegen fehlender Versuchsanlagen nicht möglich war, ist versucht worden, die Bedeutung verschiedener Einflußgrößen abzuschätzen.

## 2. Der Dieselmotor als ideales System

Betrachtet man den Dieselmotor als ein System, an dessen Grenze für eine Leistungsbilanz die Wellenleistungen, die Massenströme und zugehörigen Temperaturen bestimmt werden, Bild 1, so ergibt sich bei Vernachlässigung des Strahlungsanteils der Kühlleistung und Verwendung üblicher Dieselmotorkraftstoffe [1]:

$$P_{\text{Eingang}} = P_{\text{Nutz}} + P_{\text{Abgasverlust}} + P_{\text{Kühlverlust}}$$

$$\dot{m}_B H_u = \sum M_{di} \omega_i + \dot{m}_B (1 + 14,4 \lambda) c_{pA} \Delta \vartheta_A + \dot{m}_K c_{pK} \Delta \vartheta_K \quad (1)$$

Aus der Bilanzgleichung (1) ergeben sich für die Abgastemperatur  $\vartheta_A$ , unter Vernachlässigung der Änderung der spezifischen Wärmekapazität  $c_{pA}$  des Abgases, die in Bild 2 gezeigten Einflußgrößen, die im folgenden am idealen System Motor diskutiert werden.

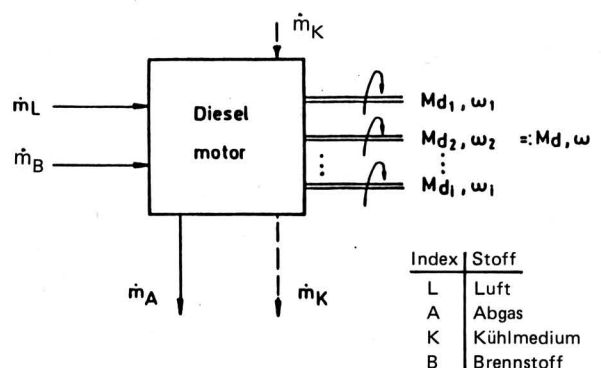


Bild 1. System Dieselmotor mit den bei der Leistungsbilanz berücksichtigten Größen.

\*) Dipl.-Ing. C. Kipp und Dipl.-Phys. E. Bergmann sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Institut für Maschinenkonstruktion, Fachgebiet Landtechnik und Baumaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich) der TU Berlin

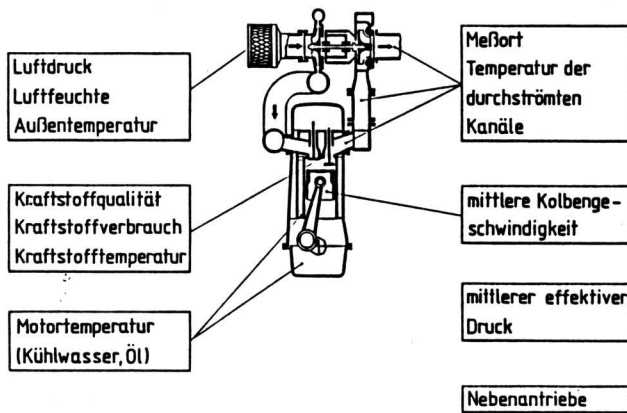


Bild 2. Die Abgastemperatur beeinflussende Größen.

### 2.1 Motormoment, Motordrehzahl, Kraftstoffverbrauch

Nach Mertins [1] ist das Verhältnis der Abgasverlustleistung zur Eingangsleistung unabhängig vom Betriebspunkt des Motors. Da das den Abgasverlustanteil mitbestimmende Luftverhältnis  $\lambda$  als Funktion von Motormoment  $M_d$  und Motordrehzahl  $n_M$  beschreibbar ist, schließt Mertins auf Zusammenhänge der Form:

$$M_d(\Delta\vartheta_A) = k_1(n_M) \Delta\vartheta_A + k_2(n_M) \quad (2)$$

und

$$\dot{m}_B(\Delta\vartheta_A) = (k_3(n_M) \Delta\vartheta_A + k_4(n_M)) \cdot n_M \quad (3)$$

Sowohl das Motormoment  $M_d$  als auch der Kraftstoffverbrauch  $\dot{m}_B$  sind demnach unter Berücksichtigung bestimmter motorspezifischer Konstanten aus der Abgastemperatur  $\vartheta_A$  abzuleiten.

Da die Abhängigkeit zwischen Motorbetriebspunkt und Abgastemperatur im wesentlichen durch die weitgehend zeitinvarianten Größen Motorgeometrie und Brennverfahren beeinflusst werden, wird hierauf im Abschn. 3 (reales System Dieselmotor) näher eingegangen.

### 2.2 Kraftstoffqualität

Die Qualität des Kraftstoffes ist durch seine Dichte  $\rho_K$  und seinen spez. Heizwert  $H_u$  bestimmt. Für die Ableitung des Kraftstoffverbrauches aus der Abgastemperatur ergeben sich daher Abweichungen, die der Änderung der Dichte in etwa proportional sind. Legt man als Eckwerte für die Kraftstoffqualität Sommer- und Winterkraftstoff zugrunde ( $\rho_K = 0,845 - 0,833 \text{ g/cm}^3$ ), so ergibt sich eine Abweichung im ermittelten Kraftstoffverbrauch von  $\Delta\dot{m}_B = \pm 0,8 \%$  [2].

Für den Zusammenhang zwischen Motormoment und Abgastemperatur ist dieser Einfluß ohne Bedeutung, da sich mit ändernder Heizleistung des Kraftstoffstromes Abgastemperatur und Motormoment gleichsinnig ändern. Zudem ist die Änderung des Heizwertes vernachlässigbar klein.

### 2.3 Kraftstofftemperatur

Da die Kraftstofftemperatur sich in einer Dichteänderung niederschlägt und somit gleiche Auswirkungen wie eine Qualitätsänderung hat, beeinflusst auch sie im wesentlichen die Beziehung Kraftstoffverbrauch/Abgastemperatur.

Die Dichte des Kraftstoffes ändert sich pro 1 °C um etwa  $\Delta\rho_K \cong 1 \%$ . Damit ergeben sich für übliche Schwankungen der Kraftstofftemperatur  $\Delta\vartheta_K = \pm 20 \text{ °C}$  Änderungen im abgeleiteten Kraftstoffverbrauch von  $\Delta\dot{m}_B = \pm 2,0 \%$ .

### 2.4 Ansauglufttemperatur

Die Temperatur der Außenluft beeinflusst die sich einstellende Abgastemperatur im wesentlichen durch Anheben bzw. Absenken des Eingangstemperaturniveaus des thermodynamischen Prozesses sowie durch die sich mit der Temperatur ändernde Dichte und die daraus resultierende Änderung des Luftmassenstroms.

Versuche an verschiedenen Motoren ergaben eine Änderung der Abgastemperatur von 1 °C bei Variation der Ansaugluft um den gleichen Betrag. Bild 3 zeigt diesen Zusammenhang beispielhaft für einen der untersuchten Motoren.

Der hierdurch verursachte Fehler beträgt, Temperaturschwankungen der Ansaugluft von  $\Delta\vartheta_s = \pm 20 \text{ °C}$  vorausgesetzt, maximal  $\pm 5,0 \%$ .

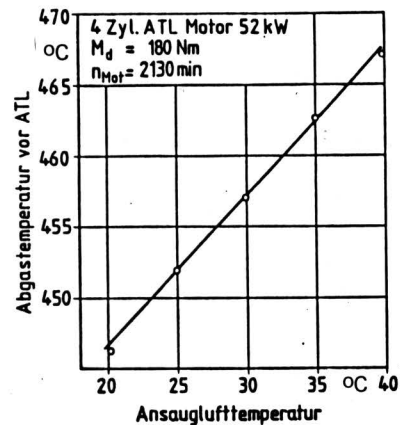


Bild 3. Abgastemperatur als Funktion der Temperatur der Ansaugluft.

### 2.5 Feuchte der Ansaugluft

Mit dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft ändert sich auch die spezifische Wärmekapazität sowie der durch das System durchgesetzte Luftmassenstrom, so daß ein Einfluß auf die sich einstellende Abgastemperatur zu erwarten ist.

Unter Annahme eines Betriebsbereichs von  $\vartheta_s = 0-40 \text{ °C}$  mit den jeweiligen Extremwerten der relativen Luftfeuchte wurden die Wärmekapazitäten des Kraftstoff-Luft-Dampf-Massenstromes ermittelt und verglichen. Durch Variation der Luftfeuchtigkeit ergibt sich bei konstantem Motorbetriebspunkt eine Abweichung der Abgastemperatur von  $\pm 1,5 \%$ .

### 2.6 Druck der Ansaugluft

Wegen der Abhängigkeit der Abgastemperatur vom Luftmassenstrom ist auch der Druck der Ansaugluft Ursache für wechselnde Abgastemperaturen bei gleichen Betriebspunkten. Die Bedeutung dieses Einflusses wurde ebenfalls überschlägig aus der sich ändernden Wärmekapazität des Kraftstoff-Luft-Dampf-Massenstromes bestimmt. Es ergibt sich eine Änderung der Abgastemperatur von  $\pm 0,5 \%$  pro 100 m Höhenänderung.

### 2.7 Kühlverlustleistung

Die Motortemperatur und die Temperatur der Kühlmedien beeinflussen sowohl den Verbrennungsablauf als auch die Kühlung des Abgases an Kolbenboden, Zylinderwandungen und den nachfolgenden Kanälen. Bei nicht betriebswarmen Motoren konnten Differenzen von bis zu 20 % in der sich einstellenden Abgastemperatur festgestellt werden.

Bei betriebswarmen Motoren konnten Auswirkungen schwankender Temperaturen von Motor und Kühlmedium auf die Abgastemperatur jedoch nicht mehr nachgewiesen werden. Diese aus Versuchen an wassergekühlten Dieselmotoren gewonnene Aussage ist mit Einschränkung auch auf luftgekühlte Motoren übertragbar.

### 3. Das reale System Dieselmotor

Inwieweit es möglich ist, aus der Abgastemperatur in geschlossener Lösung auf Motormoment oder Kraftstoffverbrauch zu schließen, oder ob eine dreidimensionale Kennfelderfassung [3] notwendig ist, zeigt der Verlauf der Linien gleicher Abgastemperatur im Drehzahl, Drehmoment-Diagramm des Dieselmotors. Bild 4 zeigt beispielhaft den Verlauf der Linien gleicher Abgastemperatur für einen 70 kW-Saug-Dieselmotor.

Je nach Verlauf der Linien und den Anforderungen an die Genauigkeit ist zu entscheiden, ob eine geschlossene Lösung, eventuell unter Einschränkung des Gültigkeitsbereiches, gefunden werden kann oder ob eine punktweise Abspeicherung als Kennfeld vorzuziehen ist.

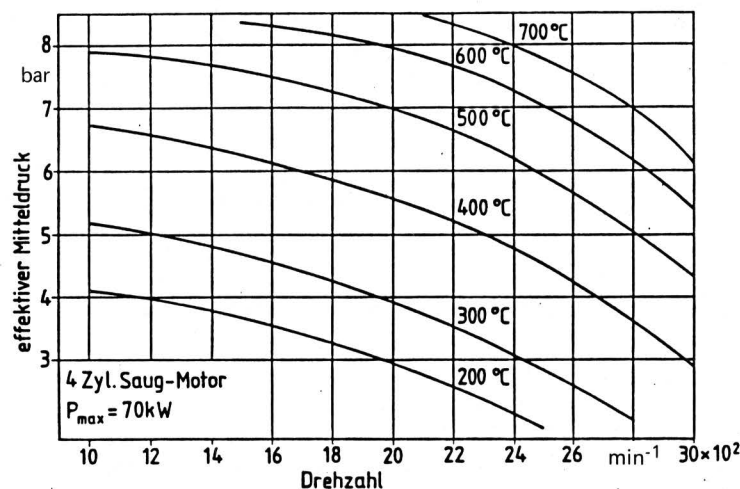


Bild 4. Linien gleicher Abgastemperatur eines Saug-Dieselmotors im Drehzahl, Mitteldruck-Diagramm.

In zahlreichen Veröffentlichungen [1, 2, 4, 5] wird auf die gute Korrelation zwischen Abgastemperatur und Motormoment bzw. Kraftstoffverbrauch hingewiesen. Eigene Messungen auf dem Motorprüfstand sowie Auswertungen von Feldversuchen bestätigten zunächst diese Aussagen. So konnte der Kraftstoffverbrauch  $\dot{m}_B$  eines 75 kW-Schleppers durch den Ansatz

$$\dot{m}_B = a \vartheta_{Korr}^2 + b \vartheta_{Korr} + c \quad (4)$$

$$\text{mit} \quad \vartheta_{Korr} = \vartheta_A (n_M/n_{nenn})^{1-\xi} \quad (5)$$

aus der Abgastemperatur  $\vartheta_A$  abgeleitet werden [6]. Bild 5 zeigt den tatsächlichen und den errechneten Kraftstoffverbrauch während einer Versuchsfahrt. Der berechnete Verlauf (unterbrochene Linie) eilt aufgrund thermischer Zeitkonstanten dem tatsächlichen Verbrauch stets um etwa 2–3 s nach.

Durch einen ähnlichen Ansatz konnte für einen 8 Zyl.-210 kW-ATL-Motor zum Antrieb einer selbstfahrenden Erntemaschine die Motorleistung in guter Näherung aus der Abgastemperatur ermittelt werden, Bild 6. Da nur ein Betrieb auf der Abregellinie ( $n_M \approx \text{const.}$ ) erfolgt, ist die Korrelation erwartungsgemäß besonders gut.

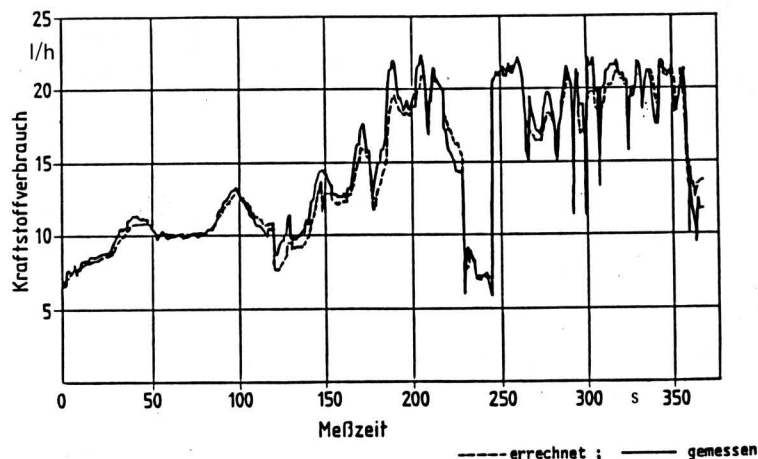


Bild 5. Tatsächlicher (—) und aus der Abgastemperatur ermittelte (---) Kraftstoffverbrauch eines 75 kW-Schleppers.

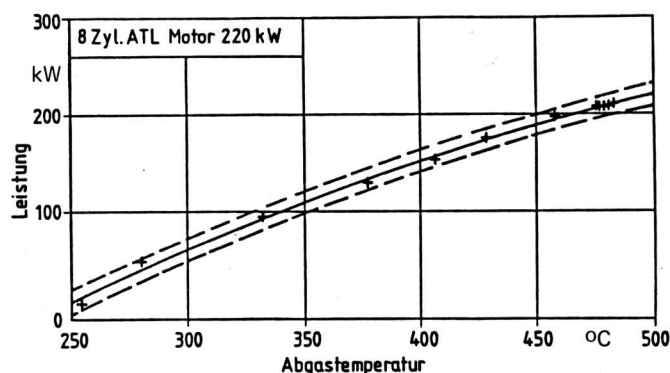


Bild 6. Motorleistung in Abhängigkeit von der Abgastemperatur.

Bei Langzeitmessungen und Messungen im Feld bei unterschiedlichen Bedingungen wurden jedoch teilweise erhebliche Abweichungen sichtbar, die deutlich machten, daß weitere Einflußgrößen auf Höhe und Verlauf der Abgastemperatur vorhanden sind.

Hält man alle äußeren Einflußparameter konstant, so ergibt sich ein sehr gut reproduzierbarer Zusammenhang  $M_d = f(\vartheta_A)$ . Für übliche Dieselmotoren im landwirtschaftlichen Einsatz (40–120 kW) wird bei Erhöhen des Drehmoments um 1 Nm ein Anstieg der Abgastemperatur von 1–3 °C erreicht, so daß eine ausreichende Empfindlichkeit gegeben ist.

Der Verlauf der Abgastemperatur in Abhängigkeit vom Motormoment ist in Bild 7 am Beispiel eines 52 kW-ATL-Motors für den landwirtschaftlichen Einsatz dargestellt. Der funktionale Zusammenhang kann in diesem Fall in guter Näherung linear angesetzt werden. Je nach Motortyp und gewünschter Genauigkeit der Approximation können auch quadratische Näherungen erforderlich sein, wobei sowohl progressive als auch degressive Verläufe ermittelt wurden [5 bis 8].

#### 3.1 Motordrehzahl (Kolbengeschwindigkeit)

Die Kolbengeschwindigkeit beeinflusst im wesentlichen den Füllungsgrad sowie die zur Abkühlung der Abgase zur Verfügung stehende Zeit. Mit steigender Drehzahl sinkt der Füllungsgrad, so daß der zu erwärmende Luftmassenstrom abnimmt und die Abgastemperatur ansteigt. Im gleichen Sinne wirkt sich die mit steigender Drehzahl kürzer werdende Abkühlzeit des Abgases aus.

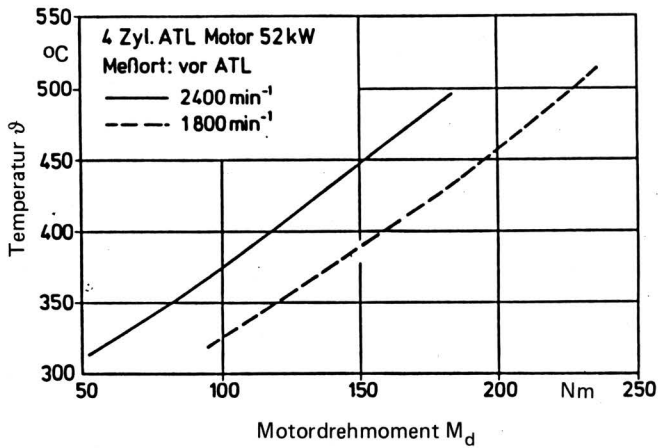


Bild 7. Abgastemperatur in Abhängigkeit vom Motordrehmoment, Drehzahl als Parameter.

Bild 8 zeigt den Verlauf der Abgastemperatur über der Motordrehzahl bei jeweils konstantem Motormoment. Sowohl aus diesem Bild als auch aus Bild 7 wird deutlich, daß die Motordrehzahl ein dominanter Einflußfaktor ist. Für die untersuchten Motoren ergeben sich Abweichungen von bis zu  $\pm 15\%$ , wenn der Drehzahl einfluß unberücksichtigt blieb.

Zusätzliche Einflüsse am realen Motor sind:

- Meßort
- Luftfilterverschmutzung.

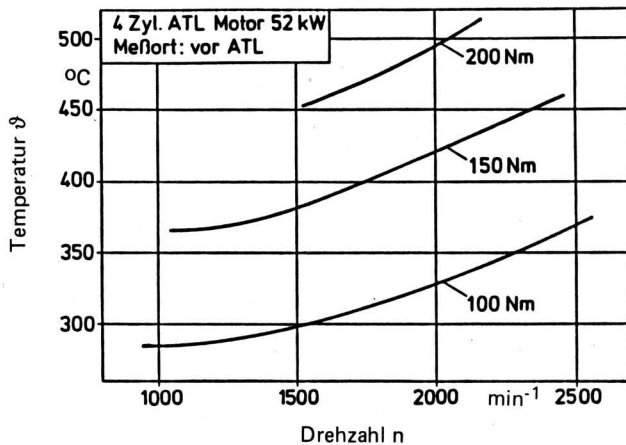


Bild 8. Abgastemperatur in Abhängigkeit von der Motordrehzahl, Motordrehmoment als Parameter.

### 3.2 Meßort

Zur Ermittlung des Meßorteinflusses wurde die Abgastemperatur an folgenden charakteristischen Punkten gemessen:

1. am Auslaßventil (Meßort 1)
2. direkt vor dem Turbolader (Meßort 2)
3. direkt nach dem Turbolader (Meßort 3).

Diese drei Meßorte wurden nach folgenden Kriterien bewertet:

- a) Empfindlichkeit  $\zeta = \Delta\vartheta / \Delta M_d$
- b) dynamisches Verhalten  $\Delta\vartheta = f(t)$
- c) Korrelation mit Motormoment
- d) Meß- und Verrechnungsaufwand
- e) Aussagesicherheit.

Die Ergebnisse im einzelnen:

a) mittlere Empfindlichkeit:

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_1 &= 0,89 \\ \bar{\zeta}_2 &= 1,11 \\ \bar{\zeta}_3 &= 0,93 \end{aligned}$$

Meßort 2 weist demnach die maximale Empfindlichkeit auf.

b) Dynamisches Verhalten

Bild 9 zeigt die Sprungantwort der Abgastemperatur an den drei untersuchten Meßstellen. Es zeigt sich deutlich, daß die Temperatur direkt am Zylinderauslaß (Meßort 1) am schnellsten den 95 %-Wert erreicht (30 s). Der Temperaturverlauf wird im wesentlichen durch die Zeitkonstante des Aufnehmers geprägt. Die Meßorte 2 und 3 weisen mit 2–5 min erheblich höhere Zeitkonstanten auf.

c) Korrelation mit Motormoment

Bedingung für eine eindeutige Beziehung zwischen Abgastemperatur und Motormoment ist die Einschränkung des Gültigkeitsbereiches auf  $M_d > 0,5 M_{dnenn}$  und  $n_M > 0,6 n_{Mnenn}$ .

Damit ergibt sich:

Meßort	Fehler	Bemerkungen
1	$\pm 8\%$	bei Korrektur mit Ansauglufttemperatur
2	$\pm 5\%$	bei Korrektur mit Ansaugluft- und Bauteiltemperatur
3	$\pm 9\%$	bei Korrektur mit Ansauglufttemperatur.

Meßort 2 (vor ATL) weist den geringsten Fehler auf.

d) Meß- und Verrechnungsaufwand

Bei den Meßorten 2 und 3 ist zusätzlich die Messung der Bauteiltemperatur  $\vartheta_B$  erforderlich.

e) Aussagesicherheit

- Meßort 1 erfaßt nur einen Zylinder, die Extrapolation auf das Gesamtsystem ist daher kritisch
- Meßort 2 erfaßt beim 4-Zyl.-Motor mit Stoßaufladung nur zwei Zylinder, d.h. es ist eine sicherere Extrapolation auf das Gesamtsystem möglich
- Meßort 3 erfaßt das Gesamtsystem.

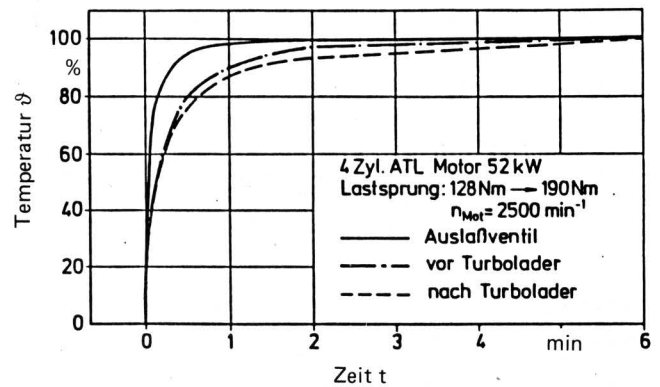


Bild 9. Verlauf der Abgastemperatur nach sprungweiser Änderung der Motorbelastung für drei Meßorte.

Eine zusammenfassende Bewertung ist in Tafel 1 durchgeführt. Aufgrund der großen Empfindlichkeit und des kleinsten Fehlers scheint der Meßort 2 (vor ATL) am geeignetsten zu sein. Die Messung der Abgastemperatur direkt am Zylinderauslaß (Meßort 1) ist nur dann sinnvoll, wenn zur Verbesserung der Aussagesicherheit an mehreren Zylindern gemessen wird. Der Meßort 3 (nach ATL) hingegen erwies sich bei den Versuchen als unbrauchbar.

Kriterium \ Meßort	1			2			3		
	Auslaß	vor ATL		vor ATL		nach ATL		nach ATL	
Empfindlichkeit	+	++		+		+		+	
Dyn. Verhalten	+	o (+)		-		o (-)		-	
Fehler	o	+		o		o		o	
Meßaufwand	+	+ (o)		+ (o)		+ (o)		+ (o)	
Aussagesicherheit	-	o		+		+		+	
Punkte	2	4 (4)		2 (2)		2 (2)		2 (2)	

Tafel 1. Bewertung der drei Meßorte für die Messung der Abgastemperatur; Werte in ( ) bei Korrektur durch Krümmertemperatur.

### 3.3 Luftfilterverschmutzung

Da der dem Motor zugeführte Luftmassenstrom nicht nur vom Umgebungsdruck, sondern auch stark vom Verschmutzungsgrad des Luftfilters abhängt (bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen von besonderer Bedeutung), wurde dieser Einfluß gesondert untersucht. Hierzu wurde die Abgastemperatur in Abhängigkeit vom Filterwiderstand gemessen, Bild 10, und zwar im vollen Bereich, der sich vom Zustand eines neuen Filters bis zum Zustand beim vorgeschriebenen Filterwechsel erstreckt. Der verursachte Fehler beträgt  $\pm 4\%$ .

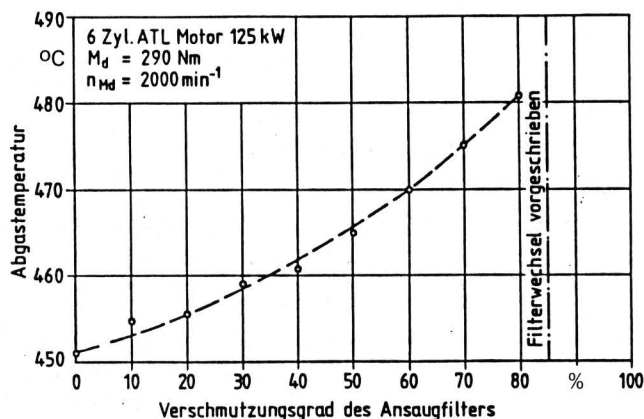


Bild 10. Abgastemperatur in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad des Luftfilters.

## 4. Das reale System Fahrzeug

Für das reale System Fahrzeug ergeben sich weitere Einflüsse auf die sich einstellende Abgastemperatur.

Diese sind:

- thermische Zeitkonstanten aus der Erwärmung von Bauteilmassen,
- Kühlung des Abgaskrümmers durch Klima und Fahrtwind sowie der aus der Zusatzlast resultierende
- Einfluß der Nebenantriebe.

### 4.1 Aufnehmer- und Bauteilmassen

Die gemessenen Abgastemperaturen unterscheiden sich stark von der sich theoretisch aus Kraftstoff- und Luftmasse ergebenden Abgastemperatur aufgrund der Kühlung an den Zylinderwänden, am Kolbenboden und insbesondere an den nachfolgend durchström-

ten Kanälen. Durch die Wärmekapazität der Bauteilmassen ergeben sich teilweise erhebliche Verzögerungszeiten, die eine Messung, insbesondere im dynamischen Bereich, erschweren.

Hinzu kommt, daß sich durch unterschiedliche Kühlung der freiliegenden Abgasanlage (Regen, Wind) unterschiedliche stationäre Betriebszustände ergeben [6].

Bei der Bauteilerwärmung ist auch die Verzögerungszeit des Meßaufnehmers selbst zu untersuchen, Bild 11. 95 % des Endwertes der Abgastemperatur werden erst nach etwa 2 min stationären Betriebes erreicht. Der Einfluß des Thermoelements beträgt ca. 30 s. Die Zeitkonstante der Bauteilmassen ist demnach dominant und durch ein schnelles (massearmes) Thermoelement nicht zu verringern.

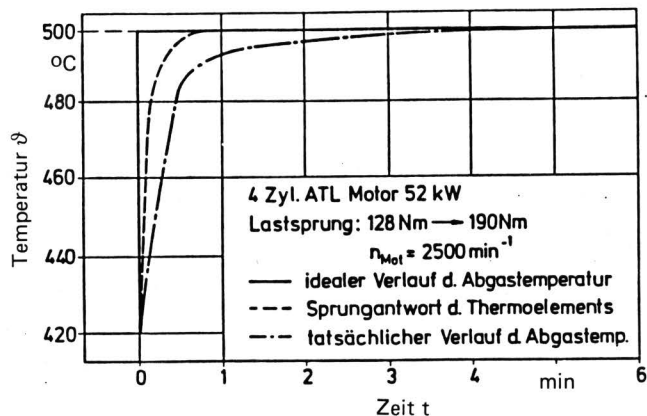


Bild 11. Verlauf von Abgastemperaturen nach sprunghafter Änderung der Motorbelastung.

Unterwirft man das System unterschiedlichen sprunghaften Änderungen der Belastung, so ergeben sich die in Bild 12 gezeigten Verläufe von Bauteiltemperatur  $\vartheta_B$  und Abgastemperatur  $\vartheta_A$ . Es ist zu erkennen, daß die Bauteil- (Krümmer-) temperatur die Abgastemperatur beeinflusst.

Es liegt daher nahe, aus diesen beiden Temperaturen auf eine theoretische Abgastemperatur  $\vartheta_T$  rückzuschließen. Aus der Wärme-mengenbilanz eines durchströmten Rohres erhält man den Ansatz:

$$\vartheta_T = \frac{2}{1-d} \vartheta_B + \frac{d+1}{d-1} \vartheta_A$$

mit

$$d = 2 \frac{c m}{a A}$$

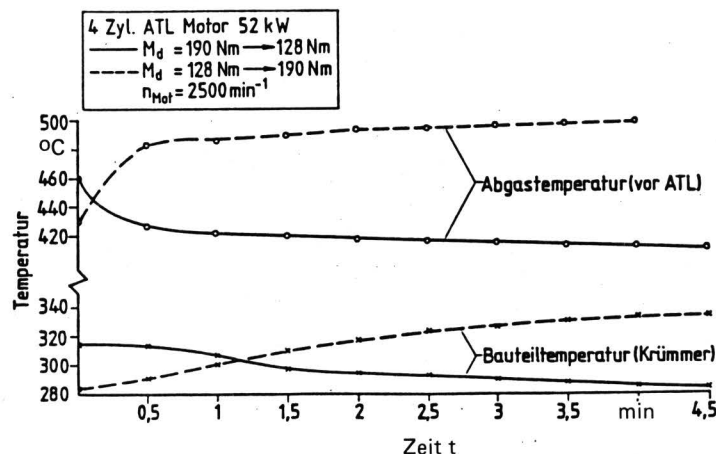


Bild 12. Verlauf von Abgastemperatur und Bauteiltemperatur nach sprunghafter Änderung der Motorbelastung.

darin ist:

- c spez. Wärmekapazität des Abgases
- m Masse des eingeschlossenen Gases
- a Wärmeübergangskoeffizient Gas/Bauteil an glatten Flächen
- A innere Oberfläche des Rohres.

Die theoretische Abgastemperatur  $\vartheta_T$  läßt sich demnach aus der Bauteiltemperatur  $\vartheta_B$  und der gemessenen Abgastemperatur  $\vartheta_A$  unter Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren zusammensetzen. Messungen nach sprunghafter Änderung der Motorbelastung bestätigen diesen Ansatz, Bild 13.

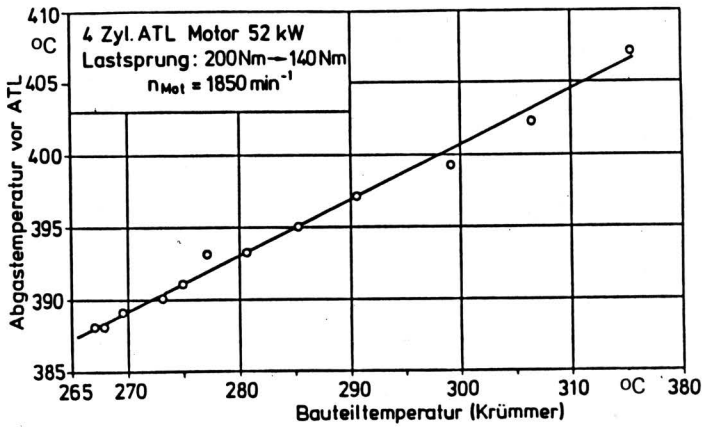


Bild 13. Abhängigkeit der gemessenen Abgastemperatur von der Bauteiltemperatur bei konstantem Drehmoment nach Ausführung eines Lastsprungs.

Da der Wärmeübergang Gas/Rohrwand von der Strömungsgeschwindigkeit im Krümmer abhängt, ergeben sich an verschiedenen Punkten im Kennfeld zwangsläufig unterschiedliche Gewichtungsfaktoren. Es ist daher sinnvoll das Kennfeld so einzugrenzen, daß mit einem mittleren Gewichtungsfaktor ausreichende Genauigkeit erreicht wird.

Dieses ist in der Regel bei der oben schon genannten Eingrenzung des Bereiches auf  $M_d > 0,5 M_{d,nenn}$  und  $n_M > 0,6 n_{M,nenn}$  der Fall. Außerhalb dieses Bereiches ergeben sich ohnehin keine im landtechnischen Einsatz anzustrebenden Betriebspunkte.

Durch Korrektur der Abgastemperatur  $\vartheta_A$  mit der Bauteiltemperatur  $\vartheta_B$  und Einschränkung des Gültigkeitsbereiches im Kennfeld konnte die Zeitkonstante auf die des Thermoelements reduziert, die Fremdkühlung des Krümmers (Regen, Wind) kompensiert und der hieraus resultierende Fehler unter 5% gehalten werden.

Bild 14 zeigt die so ermittelten Linien gleicher theoretischer Abgastemperatur  $\vartheta_T$  für einen 125 kW-ATL-Motor.

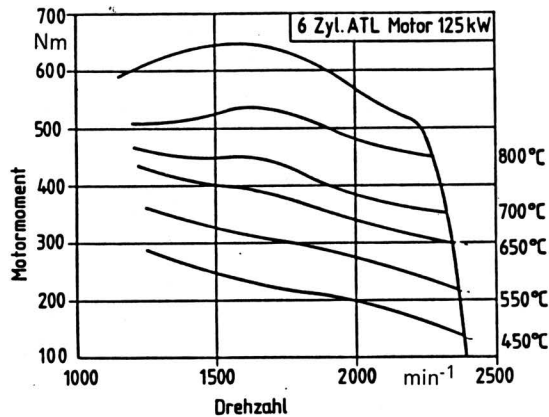


Bild 14. Drehzahl, Drehmoment-Kennfeld eines Motors mit Linien gleicher theoretischer Abgastemperatur.

Zur Bestimmung der zu erwartenden Endtemperatur aus dem Temperaturgradienten sei auf [9 und 10] verwiesen.

#### 4.2 Nebenantriebe

- Hilfsaggregate wie
- Schmierölpumpe
  - Kühlwasserpumpe
  - Kühlgebläse
  - Luftpresse
  - Lichtmaschine
  - Hydraulikpumpen
  - Klimaanlage usw.

führen aufgrund der abgenommenen Leistung ebenfalls zu einer Erhöhung der Abgastemperatur.

Soll die an der Kupplung abgegebene Leistung und nicht die Gesamtleistung des Motors ermittelt werden, so sind die Nebenverbraucher entsprechend zu berücksichtigen, was bei zu- und abschaltbaren Aggregaten schwierig ist.

#### 5. Zusammenfassung

Der Zusammenhang zwischen der Abgastemperatur und der Motorauslastung bzw. dem Kraftstoffverbrauch wird im wesentlichen durch die Faktoren

- Motordrehzahl
- Krümmerkühlung
- Ansauglufttemperatur
- Filterverschmutzung
- äußerer Luftdruck

beeinflusst.

Die Auswirkungen der einzelnen Einflüsse sind in Tafel 2 zusammengestellt.

Inwieweit die Genauigkeit bei der Ermittlung von Motorleistung bzw. Kraftstoffverbrauch aus der Abgastemperatur ausreichend ist, hängt vom vorgesehenen Einsatzfall und vom Aufwand hinsichtlich der Korrektur ab. Die Abgastemperatur allein ist mit Sicherheit keine brauchbare Größe, um Aussagen über Motorauslastung und Kraftstoffverbrauch zu gewinnen. Korrigiert werden sollen zumindest die Einflüsse aus Motordrehzahl und Krümmerkühlung, um den Fehler auf die Größenordnung von  $\pm 10\%$  zu reduzieren.

Da die Genauigkeit der Ableitung des Motormomentes aus der Abgastemperatur nicht für alle Anwendungsfälle ausreichend ist, wurden am Institut für Landtechnik der TU Berlin Sensoren erprobt, die Motordrehmoment, Motordrehzahl – und damit die Motorleistung – und den Kraftstoffverbrauch aus dem Hub der Einspritzdüsen-nadel ermitteln. Die Prüfstandsversuche sind abgeschlossen. Die Sensoren werden zur Zeit im Feldeinsatz ausgiebig getestet. Eine Veröffentlichung zu diesem Thema ist in Vorbereitung.

Einflußgröße	Mögl. Fehler
Motordrehzahl	$\pm 15\%$
Ansaugluft Temperatur	$\pm 5\%$
Feuchte	$\pm 1\%$
Druck, bis 500 m über NN	$\pm 3\%$
Filterverschmutzung	$\pm 4\%$
äußere Krümmer-Kühlung	$\pm 8\%$
Kraftstoffqualität	$\pm 1\%$
Nebenantriebe	–
Motortemperatur	–
Serienstreuung	?

Tafel 2. Einflußgrößen und möglicher Fehler bei der Bestimmung des Motormomentes aus der Abgastemperatur.

## 6. Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Mertins, K.-H.*: Theoretische und apparative Voraussetzungen zur Traktoreinsatzoptimierung mit Hilfe von Fahrerinformationssystemen.  
Diss. TU Berlin (Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 25, Düsseldorf: VDI-Verlag 1984).
- [ 2 ] *Pang, S.N. u. G.C. Zoerb*: Measuring fuel consumption indirectly.  
Agric. Engineering Bd. 65 (1984) Nr. 9, S. 18/20.
- [ 3 ] *Mischke, A. u. G. Fränkle*: Elektronische Dieselregelung EDR für Nutzfahrzeuge.  
Automobiltechnische Zeitschrift – ATZ Bd. 85 (1983) Nr. 9, S. 539/48.
- [ 4 ] • *Endres, W.*: Verbrennungsmotoren II.  
Berlin 1966.
- [ 5 ] *Mertins, K.-H. u. I. Kalweit*: Abgastemperaturmessungen, Teil I: Meßwertaufnahme an einem Dieselmotor mit ATL.  
Interner Bericht, Inst. f. Landtechnik, TU Berlin 3/80.
- [ 6 ] *Kipp, C. u. E. Bergmann*: Auswertung von Feldversuchen zur Abgastemperatur eines Dieselmotors mit ATL.  
Interner Bericht, Inst. f. Landtechnik, TU Berlin 8/83.
- [ 7 ] *Kipp, C. u. E. Bergmann*: Experimentelle Ermittlung des Zusammenhangs Abgastemperatur – Motormoment am Beispiel eines 4 Zyl.-ATL-Motors.  
Interner Bericht, Inst. f. Landtechnik, TU Berlin 11/84.
- [ 8 ] • *Zimmer, K.*: Supercharging of internal combustion engines.  
Berlin-Heidelberg: Springer 1978.
- [ 9 ] *Näbauer, T. u. F. Riedlberger*: Verkürzung der Meßzeit bei Temperaturmessungen durch rechnergestützte Auswertung des Einschwingverhaltens.  
Messen + Prüfen/Automatik Bd. (1984) Nr. 1, S. 30/35.
- [ 10 ] *Aftalion, S.*: Bestimmung schnell veränderlicher Temperaturen motorischer Abgase.  
Motortechnische Zeitschrift – MTZ Bd. 20 (1959) Nr. 2, S. 45/46.

---

## Auszüge aus wichtigen Patent-Auslegeschriften

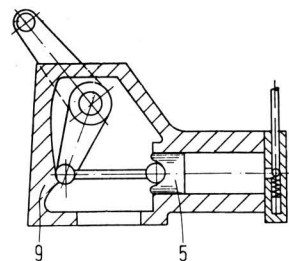
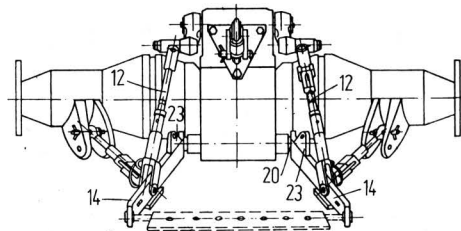
---

Int. Cl.<sup>2</sup>: A 01 B 63/10  
Auslegeschrift 27 43 405  
Anmeldetag: 27.9.77  
Bekanntmachungstag: 23.8.79

### Hydraulische Hubvorrichtung an einem Ackerschlepper mit Dreipunktaufhängung

Anmelder: International Harvester Company mbH, 4040 Neuss

Die Erfindung betrifft eine hydraulische Hubvorrichtung an einem Ackerschlepper mit Dreipunktaufhängung, bestehend aus einem Kraftheber mit einem im Krafthebergehäuse untergebrachten Zylinder und einem darin verschieblich gelagerten, mit im Krafthebergehäuse schwenkbeweglich gelagerten Hubarmen gekoppelten Kolben, mit an den freien Enden der Hubarme angelenkten Hubstangen, deren untere Enden nach dem Lösen von Bolzen wahlweise in unterschiedliche Lageraugenpaare an den Unterlenkern anschließbar sind, gekennzeichnet durch eine Anordnung von zwischen den Gelenkaugen (20) der Unterlenker (14) am Schlepper und in den Unterlenkern (14) vorgesehenen Lageraugen (13) fest an der Oberseite der Unterlenker (14) angebrachten Laschen (23), an die die unteren Enden der Hubstangen (12) nach dem Verstellen des Kolbens (5) des Krafthebers in eine durch einen Anschlag (9) begrenzte Hubendstellung anlenkbar sind.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1985

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren – ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. – All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. – Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.