

Bewertung der Drehmomenten- und Leistungskennlinien von Dieselmotoren auf der Basis der Beschleunigungsmethode

Dr.-Ing. W. Schiroslawski, KDT/Dipl.-Ing. K.-H. Schröter, KDT
Ingenieurbüro für Landtechnik beim VEB Kombinat für Landtechnische Instandhaltung Rostock

1. Zielstellung

Der Diagnoseparameter „Beschleunigung“ kann allein und in Verbindung mit anderen Diagnoseparametern dazu verwendet werden, um

- Aussagen über Funktion und ökonomische Arbeitsweise von Dieselmotoren zu erhalten
- geschädigte Einzelteile der Zylinder-Kolben-Gruppe und des Verstell Drehzahlreglers zu erkennen
- Fehleinstellungen von Funktionsparametern aufzudecken.

Als zweckmäßig hat sich erwiesen, Überprüfungen der Dieselmotoren an Standardtraktoren in Verbindung mit jedem 2. Ölwechsel durchzuführen, um eine entsprechende Beseitigung der Schädigungen und Fehleinstellungen rechtzeitig einzuleiten [1]. Damit werden eine hohe Verfügbarkeit und ein wirtschaftlicher Motorenbetrieb erreicht, was zu Kraftstoff- sowie Materialeinsparungen führt und letztlich Kosteneinsparungen zur Folge hat [2]. Der vorliegende Beitrag gibt Hinweise zur Bewertung von Diagnoseergebnissen, die mit Hilfe des Diagnoseparameters „Beschleunigung“ gewonnen werden können.

2. Zusammenhang zwischen Beschleunigung, Drehmoment und Leistung

Das indizierte Drehmoment M_i eines Dieselmotors während des Beschleunigungsvorgangs wird wie folgt bestimmt:

$$M_i = M_v + \theta \frac{d\omega}{dt}; \quad (1)$$

- M_i indiziertes Drehmoment in Nm
- M_v Moment der mechanischen Verluste in Nm
- θ Trägheitsmoment des Motors in $\text{Nm} \cdot \text{s}^2$
- $d\omega/dt$ Winkelbeschleunigung der Kurbelwelle in rad/s^2 .

Während einer Vollastbeschleunigung — der Betätigungshebel an der Einspritzpumpe wird von der Leerlaufstellung plötzlich auf Vollaststellung gebracht — erhält der Dieselmotor bis zum Erreichen der Abregeldrehzahl eine Einspritzmenge, die der Vollast entspricht. Die Leistung des Motors ergibt sich dann zu

$$P_e = \frac{(M_i - M_v) \omega}{1000} = \frac{\theta \omega}{1000} \frac{d\omega}{dt}; \quad (2)$$

- P_e Motorleistung in kW
- ω Winkelgeschwindigkeit in rad/s .

Das Trägheitsmoment eines Dieselmotors ist annähernd konstant, so daß die Leistung über eine Motorkonstante c nach folgender Beziehung ermittelt werden kann:

$$P_e = c \omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (3)$$

Daraus folgt unmittelbar, daß zur Bestimmung der Leistung die Winkelgeschwindigkeit und die Winkelbeschleunigung meßtechnisch erfaßt und das Produkt aus beiden Größen gebildet werden muß.

Untersuchungen von Ždanovskij [3] haben ergeben, daß sich die auf der Grundlage der Be-

schleunigung experimentell ermittelte Leistung von der Leistung im statischen Regime, die auf einem Bremsprüfstand erhalten wird, beträchtlich unterscheidet. Die Ursache liegt darin, daß bei Beschleunigungen von 150 bis 200 rad/s^2 und größer eine Deformation des Arbeitszyklus des Motors eintritt. Diese Deformation nimmt mit sinkender Beschleunigung ab. Ždanovskij wies weiterhin nach, daß die auf der Grundlage der Beschleunigung rechnerisch ermittelte Leistung und die Leistung im statischen Regime übereinstimmen. Möglichkeiten zum Abbau der Deformation der Arbeitszyklen bestehen in der Zylinderabschaltung und im Aufbringen einer Belastung (z. B. über die Arbeitshydraulik). Im ersten Fall gilt:

$$\theta \frac{d\omega}{dt} = M_{i1} - M_v; \quad (4)$$

r — Anzahl der eingeschalteten Zylinder
 M_{i1} indiziertes Moment eines Zylinders.

Im zweiten Fall besteht das Problem, daß die aufgebrachte Last bei Verwendung einer Drossel stark drehzahlabhängig ist. Da ein vollständiger Abbau der Deformation der Arbeitszyklen ohnehin nicht möglich ist, schlagen die Autoren folgende Verfahrensweise vor:

- Es wird davon ausgegangen, daß die Deformation der Arbeitszyklen bei einer bestimmten Drehzahl konstant ist. Dann ist es möglich, in die Motorkonstante c in Gl. (3) einen Korrekturfaktor, der experimentell ermittelt werden muß, einzubeziehen. Als Drehzahl wird die Nenndrehzahl gewählt, um auf die Nennleistung zu schließen.
- Es wird untersucht, in welchem Drehzahlbereich der ermittelte Korrekturfaktor gilt. Dabei ist der Bereich von der Drehzahl bei maximalem Drehmoment bis zur maximalen Drehzahl von Interesse.

3. Geräte für das Messen der Beschleunigung und für das Aufzeichnen der Drehmomenten- und Leistungscharakteristiken

Auf der Grundlage der dargestellten theoretischen Zusammenhänge kommen folgende Geräte, die auch Bestandteil des Diagnosegerätesystems DS 1000 sind, zur Anwendung (Bild 1):

- Drehzahl- und Beschleunigungsmessgerät MK 8-007 (ČSSR-Import)
- Analogmultiplikator (Entwicklung der WPU Rostock und des IBR Sonneberg)
- x-y-Schreiber „endim“ 620.02.

Untersuchungen von Krause [4] weisen eine starke Abhängigkeit der Beschleunigung von der Motoröltemperatur und der Einspritzmenge nach. Daraus resultiert die Forderung nach Einhaltung folgender Meßbedingungen, wenn auf den Zustand des Motors geschlossen werden soll:

- Motoröltemperatur 60°C
 - richtig eingestellte Einspritzpumpe.
- Das Meßgerät MK 8-007 verarbeitet Signale von induktiven Gebern. Als Gebervarianten stehen zur Verfügung:
- Zapfwellengeber

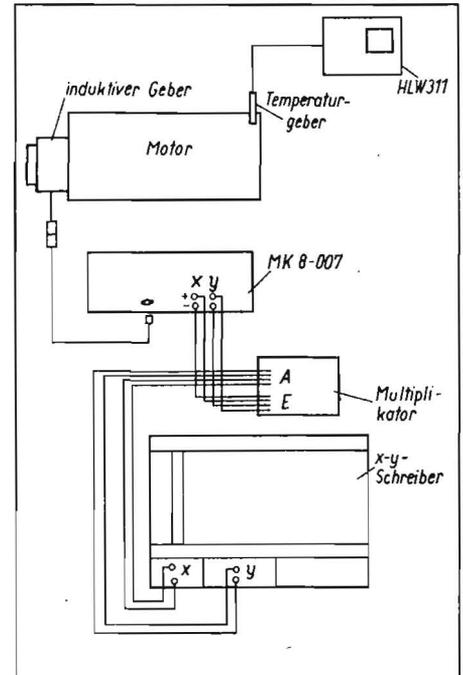


Bild 1. Zusammenschaltung der Meßgeräte zur Drehmomenten- und Leistungsmessung

- Tachogeber
- Anlasserzahnkranzgeber.

Im Zapfwellengeber werden Wechselzahnäder für die einzelnen Maschinentypen verwendet. Ein schlagender Zapfwellenstumpf, unterschiedliche mechanische Verluste und Dreh-schwingungen im Getriebe wirken verfälschend auf das Meßergebnis. Die Arbeit mit dem Tachogeber erfordert eine zusätzliche Arbeitskraft, die an rotierenden Teilen arbeiten muß. Der Anschluß muß an der Kurbelwelle oder an einer Welle erfolgen, die eine mit der Kurbelwelle übereinstimmende Drehzahl hat. Schlupf an der Gummispitze des Gebers führt zu fehlerhaften Meßergebnissen.

Mit dem Anlasserzahnkranzgeber können die Meßfehler der o. g. Geber vermieden werden. Erforderlich sind jedoch ein Umbau des MK 8-007 und eine Vorbereitung der Meßstelle (Gewindebohrung $M 16 \times 1,5$). Der Analogmultiplikator liefert das der Leistung entsprechende Produkt aus Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung, das auf dem x-y-Schreiber aufgezeichnet wird. Des weiteren kann der Verlauf der dem Drehmoment entsprechenden Beschleunigung registriert werden.

4. Bewertung von Diagnoseergebnissen

4.1. Leistungskennlinien für den Motor

4 VD 14,5/12-SRW im Mährescher E 512

Die Beschleunigungsmessungen und das Aufzeichnen der Leistungskennlinien mit Hilfe der Beschleunigungsmethode wurden an zehn Mähreschern durchgeführt. Für alle Maschinen wurden auf einer Wasserwirbelbremse die

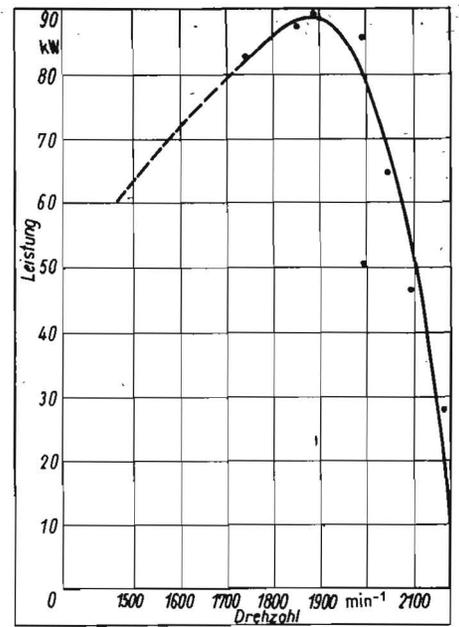
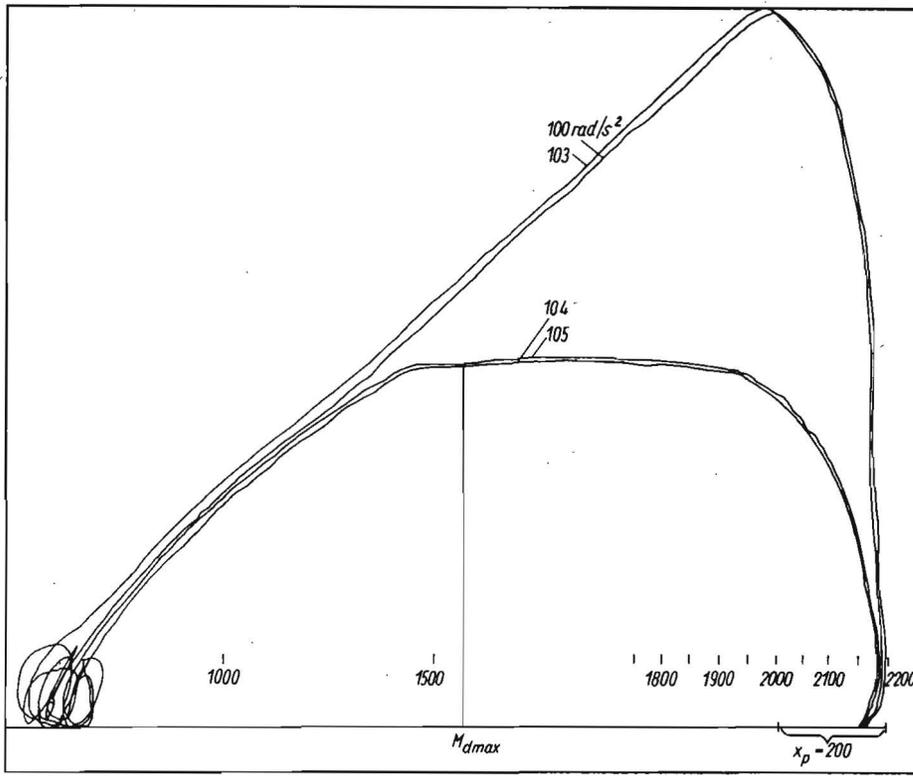


Bild 3. Auf dem Motorprüfstand aufgenommene Vollastkennlinie des Motors nach Bild 2

Bild 2. Leistungskennlinie eines Motors 4 VD 14,5/12-SRW im Mährescher E 512; x_p Proportionalitätsbereich

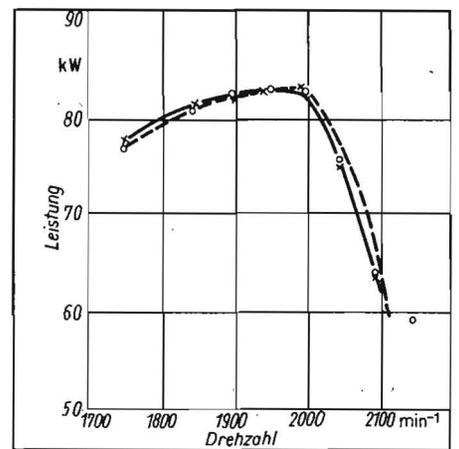
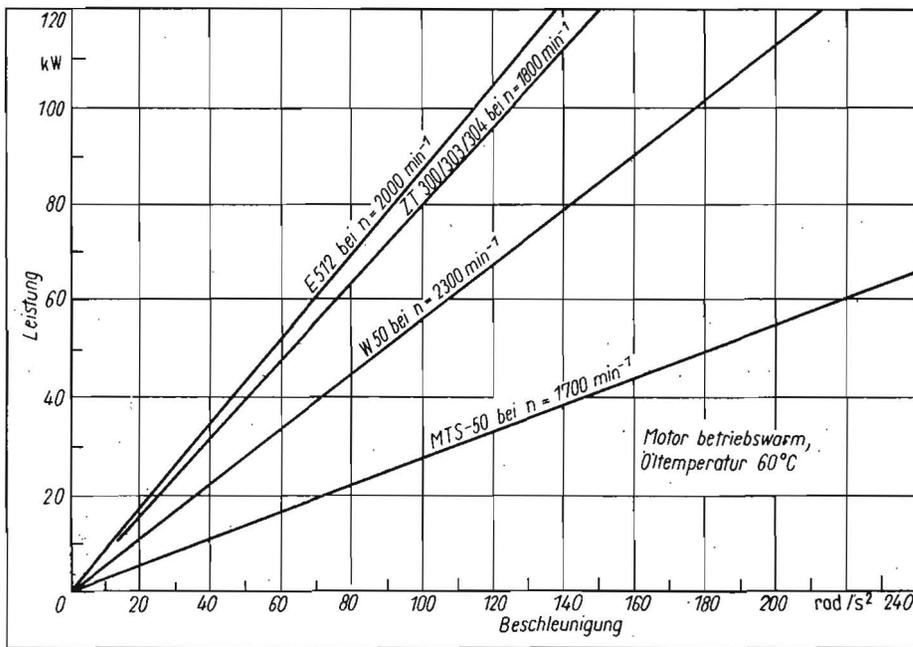


Bild 4. Vergleich von mittlerer Vollastkennlinie (Vollinie) und mittlerer Leistungskennlinie nach der Beschleunigungsmethode (Strichlinie)

Bild 5. Ermittlung der Leistung aus der Beschleunigungsmessung mit dem Meßgerät MK 8-007

Vollastkennlinien aufgenommen. Im Bild 2 ist die Leistungskennlinie eines Motors dargestellt, die nach der Beschleunigungsmethode aufgezeichnet wurde. Bild 3 verdeutlicht die auf dem Motorprüfstand aufgenommene Vollastkennlinie des gleichen Motors. Durch die Betrachtung beider Kurvenverläufe bei einer diskreten Drehzahl (Nennndrehzahl) wird der Umrechnungsfaktor von der Beschleunigung in die Leistung gebildet. Im Beispiel betragen bei einer Nennndrehzahl von 2000 min^{-1} die Beschleunigung 100 rad/s^2 und die Leistung $85,3 \text{ kW}$, woraus sich ein Umrechnungsfaktor von $0,853$ ergibt. Die Auswertung der Meßergebnisse aller zehn Mährescher führte auf einen Umrechnungsfaktor von $0,88$.

Zum Vergleich der beiden Meßmethoden wurden aus allen zehn Leistungskennlinien (Beschleunigungsmethode) bei bestimmten Dreh-

zahlen Umrechnungsfaktoren gebildet. Da die Beschleunigung bei Nennndrehzahl bekannt ist (Anzeige am MK 8-007) und die Leistung bei Nennndrehzahl durch die Multiplikation mit dem Umrechnungsfaktor $0,88$ ermittelt werden kann, ist es möglich, zu jeder anderen Drehzahl eine aus der Beschleunigung abgeleitete Leistung zu berechnen. In Tafel 1 werden die mittleren Leistungen, die nach der Beschleunigungsmethode ermittelt wurden, den mittleren Leistungen, die auf dem Motorprüfstand mit Hilfe der Wasserwirbelbremse aufgenommen wurden, gegenübergestellt.

Im Bild 4 sind die mittlere Vollastkennlinie sowie die mittlere Leistungskennlinie nach der Beschleunigungsmethode dargestellt. Die Maßstäbe wurden so gewählt, daß die Punkte auf den Leistungskennlinien über der Nennndrehzahl gleiche Ausschlagshöhen haben. Beide Kurven sind fast deckungsgleich. Das läßt die

Schlußfolgerung zu, daß beide Verfahren zur Ermittlung der Leistungskennlinie im gewählten Drehzahlbereich zu gleichen Ergebnissen führen. Folglich können die mit Meßgerät MK 8-007, Multiplikator und Koordinatenschreiber aufzeichneten Leistungsverläufe im untersuchten Drehzahlbereich für qualitative und quantitative Aussagen genutzt werden. Im Bild 5 wird die Umrechnung von der Beschleunigung in die Leistung bei Nennndrehzahl für Motoren verschiedener landtechnischer Arbeitsmittel veranschaulicht.

4.2. Bewertung des Zustands des Verstelldrehzahlreglers

Der Zustand des Reglers beeinflusst die Leistungscharakteristik des Dieselmotors sehr stark. Besonders Führungstift, Buchsen und Drucklager unterliegen einem hohen Verschleiß. Das sich ergebende Zusammenspiel

Tafel I. Vergleich der statischen und der Beschleunigungsleistung (experimentelle Daten)

n	mittlere Leistung (Beschleunigungsmethode)	mittlere Leistung (Wasserwirbelbremse)	Motor- konstante
min ⁻¹	Skalenteile	kW	c
2150	68,4	—	—
2100	73,4	63,4	0,86
2050	86,4	74,7	0,86
2000	95,0	82,8	0,87
1950	94,6	82,8	0,88
1900	94,3	81,6	0,87
1850	92,5	80,9	0,88
1750	88,0	77,6	0,88

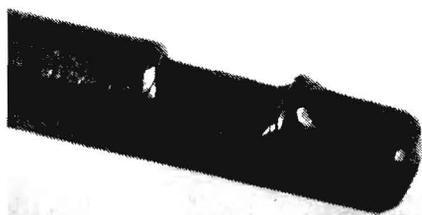
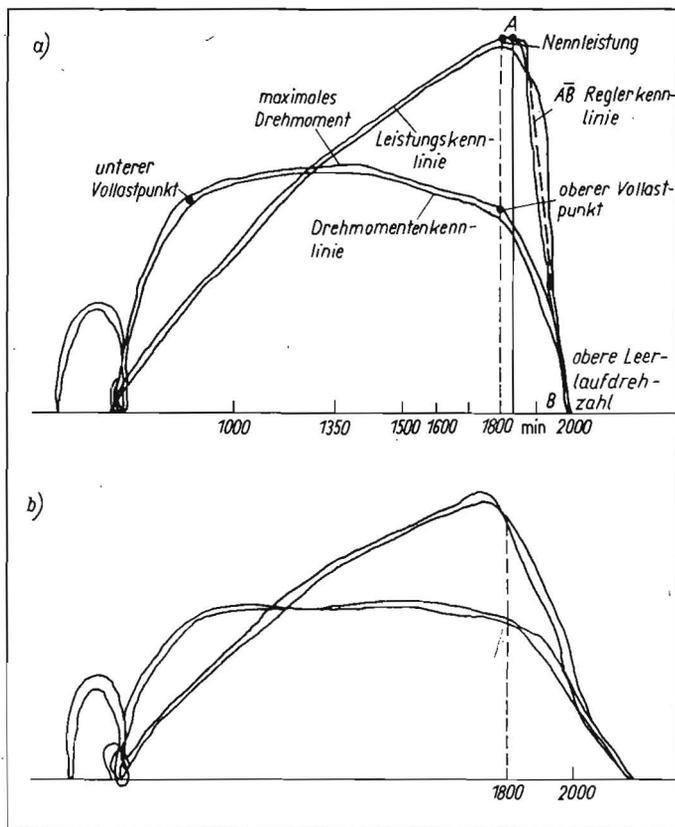


Bild 7. Verschlossener Führungsstift

beeinflusst den Abregelbeginn und damit die Leistung bei Nenndrehzahl sowie die Maximaldrehzahl. Mit den bisher verwendeten Prüfverfahren war eine objektive Überprüfung des Reglers im montierten Zustand nicht möglich. Aus der aufgezeichneten Leistungscharakteristik sind sichere Schlüsse auf den Verschleißzustand des Verstelldrehzahlreglers zu ziehen. Im Bild 6a ist die Leistungskennlinie eines gleichmäßig arbeitenden Dieselmotors mit funktionstüchtigem Regler 464-22 dargestellt. Die Reglerkennlinie verläuft steil abfallend, und der Proportionalitätsbereich, der sich näherungsweise aus der Differenz zwischen Maximaldrehzahl und Drehzahl bei maximaler Leistung ergibt, ist $\approx 200 \text{ min}^{-1}$. Im Gegensatz dazu verläuft die im Bild 6b dargestellte Reglerkennlinie langsam abfallend und langgezogen. Der Proportionalitätsbereich beträgt mehr als 200 min^{-1} , und die maximale Drehzahl wird überschritten. Der Verlauf zeigt deutlich die für einen Reglerschaden typischen Merkmale. Bei der Instandsetzung ist häufig festzustellen, daß der Führungsstift (Bild 7) verschliffen ist. Ähnlich verlaufen die Drehmomenten- und Leistungskennlinien bei ausgelaufenen Drucklagern. Der langsame Abfall der Reglerkennlinie mit dem vergrößerten Proportionalitätsbereich ist das charakteristische Merkmal unzulässigen Verschleißes im Regler, was durch das Aufzeichnen der Leistungskennlinie sicher zu erkennen ist. Aus Bild 6b ist ersichtlich, daß bei dieser Schädigung die Nennleistung nicht erreicht wird, was bei sehr frühem Abregelbe-

Bild 6
Leistungs- und Drehmomentenkennlinie eines Motors 4 VD (ZT 300)
a) mit funktionstüchtigem Regler
b) mit Reglerschaden



ginn letztlich zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch — bezogen auf die Arbeitsmenge — führt.

4.3. Qualitative Bewertung des Beschleunigungsverlaufs

Neben der quantitativen Bewertung sind aus dem Beschleunigungsverlauf qualitative Aussagen über die Arbeitsweise von Dieselmotoren bis zu 6 Zylindern möglich. Im Bild 8 ist der typische Verlauf eines unregelmäßig arbeitenden Dieselmotors zu erkennen, wobei folgende Ursachen vorliegen können:

- fehlende Kompression (verbrannte Ventile, gebrochene Kolbenringe)
- fehlende oder gestörte Kraftstoffeinspritzung (verstopfte Einspritzdüse, gebrochene Kolbenfeder in der Einspritzpumpe, Verstopfungen in den Kraftstoffleitungen, angesaugte Luft im Kraftstoffsystem).

Verbunden mit dem typischen Verlauf ist eine

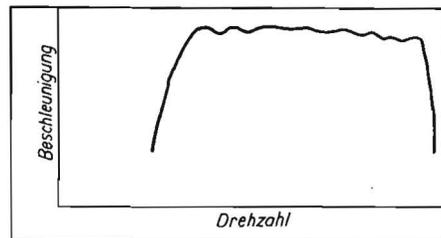


Bild 8. Beschleunigungsverlauf (qualitativ) bei einem unregelmäßig arbeitenden Motor

gegenüber dem Nennzustand geringere Beschleunigung. Wie bereits angemerkt, führt ein schlagender Zapfwellenstumpf zu einem ähnlichen Bild, es wird aber bei funktionstüchtigem Motor die Nennbeschleunigung ausgewiesen.

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden die Möglichkeiten der Bewertung von Drehmomenten- und Leistungskennlinien gezeigt. Mit der Meßbarkeit der Leistung ist eine komplexe Aussage über den allgemeinen Zustand und die Wirtschaftlichkeit des Motors möglich. Darüber hinaus eignet sich die Leistungskennlinie zur Tiefendiagnose am Verstelldrehzahlregler.

Literatur

- [1] Schiroslawski, W.; Schröter, K.-H.: Dokumentation zur Einführung der technischen Diagnostik. Ingenieurbüro für Landtechnik beim VEB KLI Rostock 1980 (unveröffentlicht).
- [2] Eichler, C.: Technisch-ökonomischer Nutzen der Anwendung der technischen Diagnostik des landwirtschaftlichen Betriebes anhand der Parameter Instandhaltungskosten, Baugruppenbedarf, Einsatzverhalten der Traktoren. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Forschungszwischenbericht 1982 (unveröffentlicht).
- [3] Zdanovskij, N.S.: Diagnostika avtotraktornich dvigatelej (Diagnostik von Fahrzeugmotoren). Leningrad: Kolos 1977.
- [4] Krause, W.: Analyse der Anwendung herkömmlicher Diagnosegeräte für Dieselmotoren. agrartechnik 31. (1981) H. 3, S. 100—103. A 3496