

Ermittlung von Kennlinien und Grenzwerten für die technische Diagnostik

Dr.-Ing. H.-H. Maack, KDT/Dipl.-Ing. R. Litzel, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik
Dipl.-Ing. K. Straube, Ministerium für Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft

1. Problemstellung

Das Anliegen der technischen Diagnostik besteht in der weitgehend demontagelosen Ermittlung des technischen Zustands von Maschinen und Anlagen durch Messen, Aufbereiten und Bewerten von außen erfassbarer Signale (Diagnoseparameter), die den technischen Zustand von Elemente- und Bauteilpaarungen im Inneren der Maschine in Form von Struktur- oder Funktionsparametern widerspiegeln. Zum Erkennen von Zustandsänderungen muß zwischen Diagnoseparametern (x_D) und Strukturparametern (x_S) ein eindeutiger funktioneller Zusammenhang der Form $x_D = f(x_S)$ existieren, d.h. es müssen Diagnosekennlinien für die Zustandsbewertung vorliegen. Um Schlußfolgerungen für die weitere Nutzung oder Instandsetzung zu ziehen, sind weiterhin zweckmäßige Grenzwerte oder Entscheidungskriterien erforderlich, die konstruktiv, einsetztechnologisch, ökonomisch oder instandsetzungstechnisch bedingt sein können. Zur Abschätzung einer Restbetriebsdauer ist außerdem die Kenntnis des Schädigungsverlaufs in Abhängigkeit von einer zeit- bzw. leistungsproportionalen Größe (Verschleißcharakteristik) erforderlich. Die Ermittlung der Diagnosekennlinien, der Grenzwerte sowie der Verschleißcharakteristiken ist aufgrund der Typenvielfalt der Diagnoseobjekte sehr aufwendig. Über den Stand der Ermittlung derartiger Angaben und die damit verbundenen Probleme soll anhand einiger ausgewählter Parameter nachfolgend berichtet werden.

2. Methoden zur Kennlinien- und Grenzwertermittlung

Grundsätzlich bieten sich zwei unterschiedliche Methoden zur Kennlinienermittlung an, deren Geltungsbereich sich vorrangig auf Strukturparameter bezieht:

— Die Kennlinie kann aufgrund bekannter Gesetzmäßigkeiten analytisch hergeleitet werden.

Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge zwischen Diagnose- und Strukturparametern sowie deren Quantifizierbarkeit.

Eine experimentelle Bestätigung der rechnerisch ermittelten Kennlinien wird in vielen Fällen, besonders auch infolge der nicht immer eindeutigen Eliminierbarkeit von Störgrößen, erforderlich sein.

— Die experimentelle Aufnahme der Kennlinie erfolgt durch meßtechnische Erfassung der Zustandsparameter (Vermessung des Verschleißzustands meist nach Demontage) und der zugehörigen Diagnoseparameter unter Beachtung des Störgrößeneinflusses.

Je nachdem, ob real verschlissene Elemente oder beschleunigte Verschleißvorgänge oder künstlich simulierte Verschleißbedingungen zugrunde gelegt werden, ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der experimentellen Kennlinienermittlung, die alle mit mehr oder weniger Vor- und Nachteilen hinsichtlich Aussagekraft und Aufwand behaftet sind. Welches Verfahren zur Nachbildung bzw. zur direkten Ermittlung der Verschleißvorgänge anzuwenden ist, muß im konkreten Anwendungsfall entschieden werden.

Bei der Funktionsdiagnose steht der Nachweis der Betriebsfähigkeit im Vordergrund. Es geht dabei z. B. um die Einhaltung von Drehzahlen, Drücken, Förderströmen u. a. In vielen Fällen können unzulässige Abweichungen solcher Funktionsparameter vom Normzustand durch Einstell- und Regulierungsmaßnahmen korrigiert werden. Demzufolge steht das Auffinden von Abweichungen im Vordergrund der Überprüfungsmaßnahmen, so daß der Zusammenhang $x_D = f(x_S)$ der Diagnosekennlinien oft von untergeordneter Bedeutung ist. Vielmehr werden hier zeit- bzw. parameterabhängige Verläufe der qualitativen und quantitativen Abweichungen von der Sollkurve benötigt, um auf Funktionsstörungen zu schließen. Große Be-

deutung haben hierbei dynamische Prüfverfahren, wie z. B. die Ermittlung der Drehmoment- bzw. Leistungs-Drehzahl-Charakteristik von Dieselmotoren nach dem Beschleunigungsverfahren oder die Methode des hydraulischen Stoßes zur Prüfung von Hydraulikkreisläufen (durch das Aufzeichnen und Auswerten des Druck-Zeit-Verlaufs), deren Sollkurven konstruktionsbedingt sind und vom Hersteller des jeweiligen Arbeitsmittels im Ergebnis der Produktionsendkontrolle bereitgestellt werden sollten.

Zweckmäßig erscheint auch die Anwendung dynamischer Prüfverfahren nach abgeschlossener Instandsetzung, um die Sollkurve des jeweiligen Arbeitsmittels für die nachfolgende Funktionsdiagnose zu ermitteln.

Vom Hersteller werden Grenzwerte für eine Anzahl von Funktionsparametern festgelegt (z. B. Düsenabspritzdruck, obere Leerlaufdrehzahl, Einspritzmenge je Hub u. a.), deren Einhaltung bei der Funktionsdiagnose im Komplex oder einzeln kontrolliert wird. Bei einer ökonomisch nutzbringenden Diagnose kommt es sehr darauf an, daß die Definition solcher Grenzwerte auch unter Berücksichtigung der Energie- und Materialökonomie erfolgen muß, wobei unterschiedliche Einsatzbedingungen und volkswirtschaftlich zweckmäßige Instandsetzungsverfahren eine Rolle spielen. Die Erfahrungen bei der Ermittlung solcher Grenzwerte besagen, daß eine gute Zusammenarbeit mit dem Hersteller Voraussetzung ist und in der Praxis sowie im Labor aufwendige Untersuchungen durchzuführen sind. Die bisherigen Ergebnisse der Breitereprobung der Funktionsdiagnose an Dieselmotoren im Bezirk Rostock rechtfertigen diesen Aufwand. Von den LPG, die die Funktionsdiagnose anwenden, werden Einsparungen an Kosten, Arbeitszeit, Energie und Material erzielt. Nachfolgend werden zwei Methoden der Funktionsdiagnose, die gegenwärtig in großer Breite in die Praxis eingeführt werden, kurz erläutert.

Fortsetzung von Seite 396

Verschrottungsgrenze nicht überschritten haben.

— Gleichzeitig mit der Einführung der Instandhaltungsmethode nach Überprüfung ist sowohl die Versorgung der Landwirtschaftsbetriebe und der VEB KfL mit instandgesetzten Einzelteilen und Unterbaugruppen als auch die Rückführung der schadhafte Einzelteile und Unterbaugruppen in den Bereich der spezialisierten Einzelteilinstandsetzung zu sichern.

5. Zusammenfassung

Die Anwendung der Instandhaltungsmethode nach Überprüfung in Verbindung mit dem Einsatz von Diagnoseverfahren kann zu einer bedeutenden Effektivitätssteigerung der landwirtschaftlichen Produktion und der Instand-

haltung führen. Eine wesentliche Voraussetzung für das volle Ausschöpfen dieser Reserven ist die optimale Einordnung der Diagnose- und Instandsetzungsprozesse in die landwirtschaftliche Produktion und in das System der landtechnischen Instandhaltung. Besondere Bedeutung hat in diesem Zusammenhang das objektive Bestimmen der Grenzen zwischen Teil- und Grundinstandsetzung. In der vorliegenden Arbeit wird das Prinzip des Festlegens derartiger Grenzen erläutert und am Beispiel ausgewählter Motorbaugruppen angewendet.

Literatur

- [1] Marx, D.: Der optimale Turnus und der Nutzeffekt von Instandhaltungsmaßnahmen. *Energetischechnik* 18 (1968) H. 4, S. 156 ff.
- [2] Maack, H.-H.; Troppens, D.: Verfahrens- und

gerätetechnische Aspekte der technischen Diagnostik. *Maschinenbautechnik* 30 (1981) H. 8, S. 367—370.

- [3] Eichler, C.; Ihle, G.: Entwicklungstendenzen in der Instandhaltungstechnik. *agrartechnik* 29 (1979) H. 12, S. 527—532.
- [4] Ihle, G.: Die Stellung der technischen Diagnostik im Gesamtsystem der landtechnischen Instandhaltung. *agrartechnik* 31 (1981) H. 12, S. 527—529.
- [5] Lutz, A.: Untersuchungen zur Abhängigkeit der Kosten für eine spezialisierte Grundinstandsetzung der Baugruppen Drehstromlichtmaschine 12 V, 500 W, Typ 8042.3/1, und Anlasser 24 V, 2,94 kW, Typ 8203.101/3, von der Instandsetzungsstückzahl. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Diplomarbeit 1980.
- [6] Sohn, M.: Untersuchungen zur Abhängigkeit der Kosten für eine spezialisierte Grundinstandsetzung der Baugruppe Dieseleinspritzpumpe DEP 4B 0460308054 und 0460349005 von der Instandsetzungsstückzahl. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Diplomarbeit 1980. A 3498

a)			b)			
Ordinate	α bei $n=1300 \text{ min}^{-1}$ in rad/s^2	Schmieröltemperatur ϑ_a in $^{\circ}\text{C}$	Ordinate	α bei $n=1300 \text{ min}^{-1}$ in rad/s^2	Schmieröltemperatur ϑ_a in $^{\circ}\text{C}$	
M	—	50	M	—	50	
	—x—	50		—	250	50
	—	50		—x—	80	50
P	—	50	P	—	50	
	—	50		—x—	230	50
	—	50		—	120	50

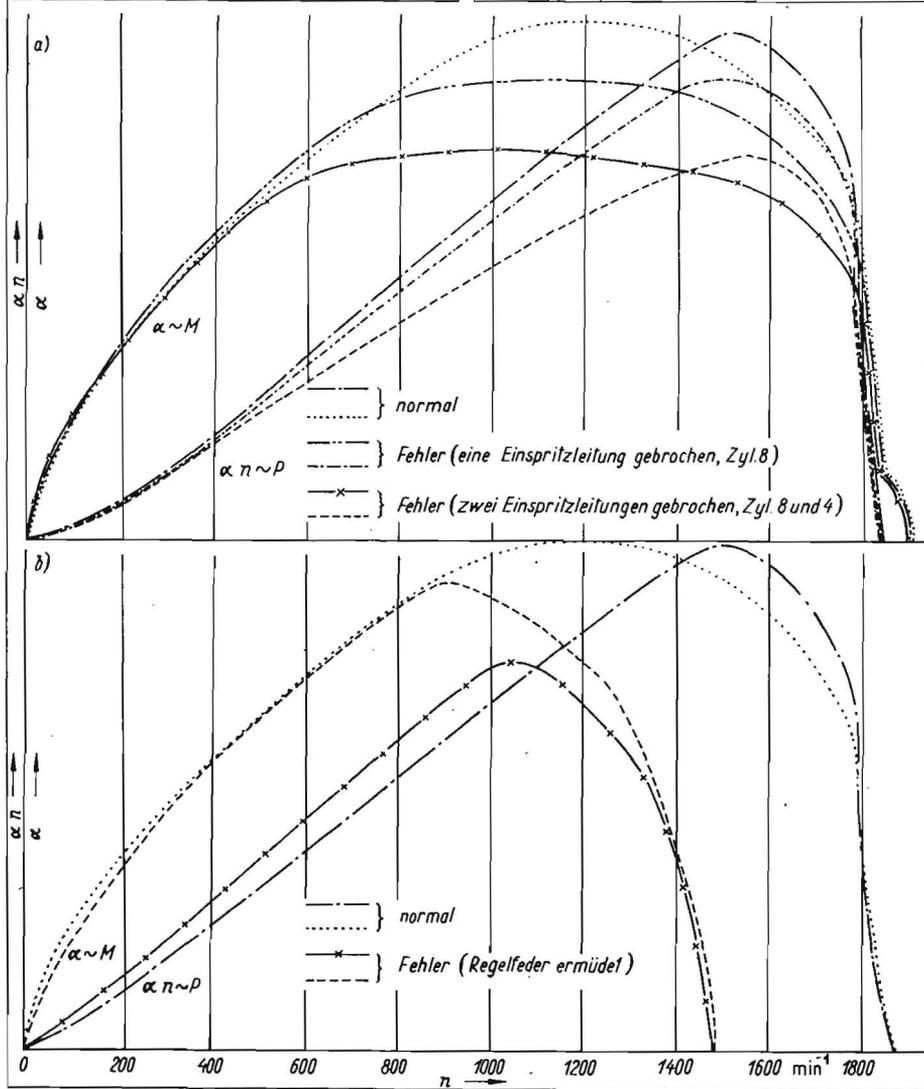


Bild 1. Dynamische Momenten- und Leistungskennlinien;
a) Parameter „Zylinderausfall“
b) Parameter „Regelfedersteife“

3. Diagnose nach der Beschleunigungsmethode

Die Leistung ist ein wichtiger Parameter des Dieselmotors. Ihre Bestimmung ist eine Möglichkeit der Diagnose des Dieselmotors, ohne den Motor vorher aus dem Fahrzeug ausbauen und auf einem Bremsprüfstand montieren zu müssen.

Beim Betreiben des Dieselmotors wird chemische Energie des Kraftstoffs in Bewegungsenergie umgewandelt. Gleichung (1) zeigt eine Beziehung für die kinetische Energie, die sich aus dem auf die Kurbelwellenmitte reduzierten Massenträgheitsmoment J und der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \dot{\varphi}$ ermitteln läßt:

$$T = \frac{J}{2} \dot{\varphi}^2 \quad (1)$$

Mit Hilfe der Lagrangeschen Gleichung zweiter Art (2) für dieses System mit einem Freiheitsgrad kann die Bewegungsgleichung (3) abgeleitet werden, wobei mit M das auf die

Koordinate φ reduzierte Moment bezeichnet ist:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = M \quad (2)$$

$$J \ddot{\varphi} = M(\varphi; \dot{\varphi}; t) \quad (3)$$

Die Leistung ist dem Moment proportional. Man erhält eine Gleichung mit der Winkelgeschwindigkeit als Proportionalitätsfaktor:

$$P = M \omega = J \alpha \omega = J 2\pi n \alpha \quad (4)$$

Die Kurbelwellen-Winkelbeschleunigung wird z. Z. mit dem Gerät MK 8-007 aus der ČSSR gemessen. Ein Multiplikator wurde von der Sektion Landtechnik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock entwickelt, der das der Leistung proportionale Produkt αn ausgibt, so daß die Winkelbeschleunigung α wie auch das Produkt $\alpha \omega$ bzw. αn vom x-y-Schreiber über der Drehzahl n aufgezeichnet werden können. Im Gegensatz zur statischen Kennlinie, die Punkte stationärer Betriebszustände verbindet,

sind im Bild 1 dynamische Kennlinien des Leistungsverlaufs über der Drehzahl aufgezeichnet. Sie zeigen einen von der statischen Kennlinie abweichenden Verlauf, charakterisieren jedoch ebenso das Leistungsvermögen des Motors. Beim Beschleunigungsverfahren wird die Winkelbeschleunigung der Motorkurbelwelle aufgezeichnet, die sich nach einer plötzlichen Führungsgrößenänderung (Verstellhebel bis zum Anschlag für Vollast) ergibt.

Die Bilder 1 a und b wurden vom aufgeladenen Dieselmotor JaMS-238 NB des Traktors K-700 aufgenommen. Dabei wurden bestimmte Schädigungen simuliert. Im Bild 1 a ist die Wirkung des Schädigungsparameters „Zylinderausfall“ dargestellt. Ein Zylinder fällt z. B. aus, wenn die entsprechende Einspritzleitung gebrochen ist.

Die Zylinderabschaltung ist darüber hinaus direkt als Diagnosemethode entwickelt worden, wobei die Sollkurven bei abgeschalteten Zylindern für die Funktionsdiagnose die Grundlage zur Bestimmung der Abweichungen bilden.

Sowohl die Drehmoment-Drehzahl-Kurve wie auch die Leistung-Drehzahl-Kurve verlaufen bei abgeschalteten Zylindern wesentlich flacher. Die Größe der Abweichung vom Sollwert ermöglicht also eine Aussage über den Schädigungszustand.

Bild 1 b verdeutlicht den großen Einfluß, den die Federsteife der Regelfeder des Einspritzpumpenreglers auf die verfügbare Motorleistung ausübt. Eine Kurve wurde mit einer stark ermüdeten Regelfeder aufgenommen. Sie zeigt, daß die Maximalleistung des Motors bei einer um etwa 500 min^{-1} niedrigeren Drehzahl liegt. Außerdem ist die Maximalleistung um etwa 25% kleiner gegenüber der eines intakten Motors. Der Umrechnungsfaktor, mit dem man die Motorleistung ermitteln kann, ist

$$C_{JaMS} = 1,02 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}^2}{\text{rad}}$$

Er wurde für die Drehzahl $n_M = 1700 \text{ min}^{-1}$ bestimmt. Wie an den beiden Schädigungsparametern „Zylinderausfall“ und „Regelfedersteife“ dargestellt, wurden auch für weitere Schädigungsparameter die Kennlinienverläufe ermittelt (Tafel 1). Weitere Untersuchungen zeigten, daß

- Früheinspritzung
 - veränderte Ventilspiele
 - veränderter Einspritzdruck
- auf den Verlauf der Winkelbeschleunigung nur geringen Einfluß haben.

4. Kennlinien für die Parameter „Ölstrom/Lagerspiel“

Zur Überprüfung des Zustands der Kurbelwellenlagergruppe von Dieselmotoren steht gegenwärtig in der Landtechnik das Verfahren der kombinierten Ölstrom-/Öldruckmessung anwendungsbereit zur Verfügung.

Voraussetzung zur Ermittlung eines mittleren Lagerspiels aller vom Schmierölkreislauf versorgten Lagerstellen über den am Motor zu messenden Ölstrom bilden entsprechende Kennlinien. Diese müssen aufgrund motortypspezifischer Unterschiede für verschiedene Motoren gesondert ermittelt werden. Da eine exakte Berechnung des Öldurchsatzes durch die hydrodynamisch geschmierten Lagerstellen der Kurbelwelle in Abhängigkeit von der Spaltgeometrie (Lagerspiel) und unter Berücksichtigung sämtlicher Einflußgrößen bzw. -faktoren z. Z. noch nicht mit ausreichender Sicherheit realisiert werden kann, müssen der-

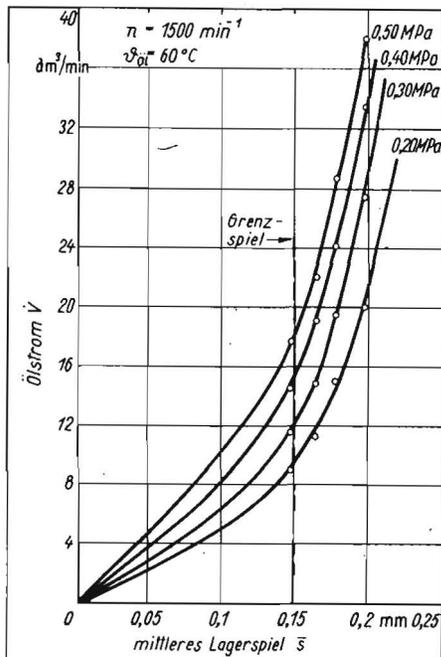


Bild 2. Diagnosekennlinienfeld Ölstrom/Lagerspiel des Motors JaMS-238 NB

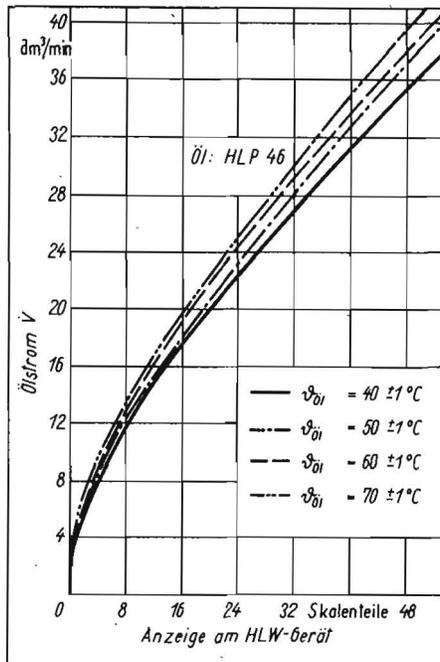


Bild 3. Geberkennlinie für Ölstrom

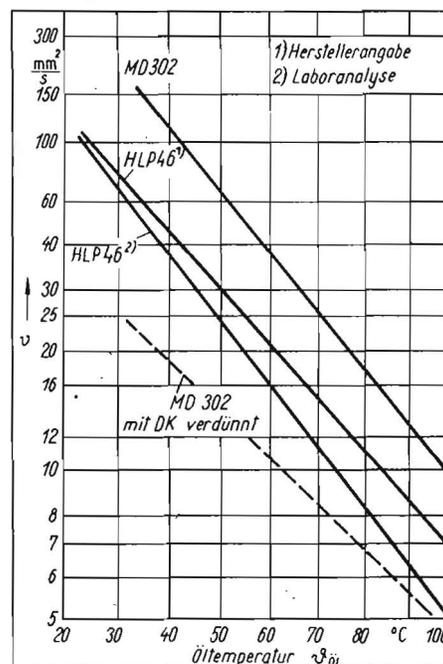


Bild 4. Temperatur-Viskosität-Schaubild für verschiedene Ölproben

Schädigungsparameter	Verläufe
Turboladerzustand (Drehzahlcharakteristik)	Abweichungen im Verlauf der Leistungskurven im Proportionalitätsbereich bei Beschleunigung des Motors aus dem Stillstand gegenüber Beschleunigung von unterer Leerlaufdrehzahl
Regel- bzw. Rückholfedersteife (Einspritzpumpe)	Verschiebung bzw. Veränderung der Leistungskurve gegenüber dem Normalzustand
gedrosselte Luftzufuhr (Filterverschmutzung)	oberhalb $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ flacherer Verlauf für Drehmoment und Leistung
Einspritzbeginn (Späteinspritzung)	flacherer Kurvenverlauf der Winkelbeschleunigung (Drehmoment) über dem gesamten Drehzahlbereich

Tafel 1
Kennlinienverläufe von
Schädigungsparametern

artige Kennlinien experimentell ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden Prüfstanduntersuchungen durchgeführt, bei denen der Lagerverschleiß (Spielvergrößerung) durch das Abschleifen der Lagerzapfen der Kurbelwelle simuliert wurde. Für die einzelnen Spielstufen wurde nach entsprechenden Einlaufphasen des Motors der Ölstrom bei verschiedenen Öldruckstufen mit Hilfe einer elektrischen Geberkombination [1] auf dem Prüfstand in Abhängigkeit von verschiedenen Einflußfaktoren (Drehzahlen, Schmieröltemperaturen, Belastung) ermittelt. Ein derartiges Kennlinienfeld für den Motor JaMS-238 NB des Traktors K-700 ist in Bild 2 dargestellt. Motordrehzahl und Öltemperatur sind hier als maßgebliche weitere Einflußfaktoren konstant zu halten, wenn aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden sollen. Der Temperatureinfluß wirkt sich einmal auf das sich einstellende Warmspiel in den Lagern und zum anderen auf die Ölviskosität aus. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Meßgenauigkeit muß deshalb ein stationärer Temperaturzustand beim Diagnosevorgang im Intervall von $\pm 2^\circ\text{C}$ eingehalten werden, das eine hohe technologische Disziplin vom Diagnosepersonal verlangt.

Die Temperaturabhängigkeit der Meßwerte eines elektrischen Ölstromgebers in Zusammenschaltung mit dem HLW-Gerät ist in Bild 3 dargestellt. Danach beträgt die Ölstromdifferenz zwischen den Öltemperaturen (Ölsorte HLP 46) von 40°C und 70°C bei einem Meßwert von $20 \text{ dm}^3/\text{min}$ rd. 10%. Die primäre

Ursache für diese Abweichungen besteht in der unterschiedlichen Ölviskosität. Deshalb können einwandfreie Meßergebnisse nur bei Einhaltung der vorgegebenen Ölviskosität, d. h. nach einem Ölwechsel mit der vorgeschriebenen Ölsorte, gewonnen werden. Bild 4 zeigt ein Viskosität-Temperatur-Schaubild für verschiedene Ölsorten und -zustände. Besonders auffallend ist der Unterschied zwischen normalem Motorenöl (MD 302) und einer mit Dieselmotorenstoff verdünnten Ölprobe, die dem Prüfstandmotor entnommen wurde.

Bei der Festlegung entsprechender Grenzwerte für ein mittleres Lagerspiel und damit für zulässige Ölstromwerte muß von verschiedenen Kriterien ausgegangen werden, die motortypspezifisch bestimmt sind. Im Fall der Kennlinienermittlung für den gleichmäßig vorgegebenen Verschleiß aller Lagerstellen des Motors JaMS-238 NB wurde in Abstimmung mit dem VEB LIW Anklam eine Aussonderungsgrenze von $0,15 \text{ mm}$ als mittleres Lagerspiel festgelegt [2]. Oberhalb dieses Grenzwerts steigen die Ölstromwerte stark progressiv an, so daß infolge des absinkenden Schmierölzuleitungsdrucks die Schmierölversorgung des Abgas-turboladers gefährdet wird. Die Grenzwerte für andere Motortypen wurden zum größten Teil aus instandhaltungsbedingten Aspekten (Einhaltung der Reparaturstufen) heraus festgelegt. Sie liegen i. allg. niedriger als die vom Hersteller vorgegebenen Grenzwerte. Bekannt sind diese Werte für die Motortypen 4/6 VD 14,5/12-1 SRW (ZT 300, E 512, W 50, E 280),

D-50/D-240 (MTS-50/80) und JaMS-238 NB (K-700). Da sie auf dem Prüfstand an einem Motorexemplar bei Verschleißsimulation ermittelt wurden, ist eine Bestätigung bzw. Anpassung unter Praxisbedingungen erforderlich.

5. Grenzwerte für weitere Diagnoseverfahren

Von großer Bedeutung für die Kraftstoffökonomie ist die Überprüfung der Einspritzpumpe von Dieselmotoren. Hier geht es in erster Linie um die Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen Einstellparameter, wie Fördermenge, Regelstangenweg, Abregelbeginn, Vorhubwinkel u. a. Derartige Angaben wurden in sehr zweckmäßiger Art und Weise für alle praktisch in der Landtechnik vorkommenden Einspritzpumpenvarianten in Form eines Datenschiebers vom Ingenieurbüro für vorbeugende Instandhaltung Dresden zusammengestellt.

Für die Verfahren der Rauchdichtemessung, der Kompressionsenddruckmessung und der Durchblaststrommessung werden vorerst noch die in [3] angegebenen Werte verwendet. Eine Aktualisierung dieser Angaben wird als notwendig erachtet.

Für die Ausarbeitung weiterer Diagnoseverfahren, die Ermittlung und Vorgabe von Sollkennlinien und Grenzwerten ist die weitere Vertiefung der Zusammenarbeit der Hersteller und Instandhalter unerlässlich. Zunehmend haben die Diagnoseparameter auch Einfluß auf die Erkennung von Garantiansprüchen, weshalb besonders auf diesem Gebiet die Arbeit schneller vorangebracht werden muß.

Literatur

- [1] Troppens, D.; Maack, H.-H.; Litzel, R.: Elektrische Meßeinrichtung zur Ölolumenstrommessung für die Diagnose von Baugruppen in Schmieröl- und Hydraulikkreisläufen. agrartechnik 30 (1980) H. 12, S. 531—533.
- [2] Pahl, J.: Diagnosekennlinie Ölstrom/Lagerspiel am Motor JaMS-238 NB. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Diplomarbeit 1981 (unveröffentlicht).
- [3] Wohlbe, H.: Überprüfung von Traktoren und Lastkraftwagen. Spezialschule für Landtechnik Großenhain, Informationsmaterial 1975.