

# Entwicklung und Anwendung vibroakustischer Verfahren für die Motordiagnose in der Landtechnik

Dr.-Ing. H.-H. Maack, KDT/Dr.-Ing. G. Neumann, KDT

## 1. Einleitung

Ökonomische Analysen zum Einsatz von Diagnoseverfahren in der Praxis [1] ergaben, daß auch höhere Investitionen für die Diagnostik durch eine generelle Einsparung an Arbeitszeit bei den Überprüfungen schnell kompensiert werden. Damit gewinnen aufwendigere, bisher in der Landtechnik nicht eingesetzte Diagnoseverfahren an Bedeutung. Diese Verfahren sollten sich jedoch neben der Verringerung des Zeitaufwands für die Vorbereitung, Durchführung und Bewertung im Rahmen der Überprüfung durch eine höhere Genauigkeit des Diagnosebefunds und durch die Möglichkeit der quantitativen Erfassung mehrerer Strukturparameter (z. B. Spiele) auszeichnen. Nur so können perspektivisch auch Probleme der Restbetriebsdauerprognose bewältigt werden. Eine erfolgversprechende Verfahrenskategorie ist die vibroakustische Diagnose. Sie umfaßt Verfahren, die auf der Messung, Verarbeitung und Bewertung von Körper- und Luftschallsignalen beruhen.

Eingebunden in die vielfältigen Bemühungen, praxisreife vibroakustische Diagnoseverfahren zu entwickeln, wurden auch an der Sektion Landtechnik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock Untersuchungen durchgeführt, die das Ziel haben, konkrete Aussagen zur Eignung dieser Verfahren vorrangig für Dieselmotoren zu gewinnen. Einige sich daraus ergebende Aspekte zur Anwendbarkeit der vibroakustischen Diagnose auf diesem Gebiet werden im folgenden dargestellt.

## 2. Stand der Verfahrensentwicklung

Im Rahmen der laufenden Untersuchungen zur vibroakustischen Diagnose von Dieselmotoren wurden vornehmlich Körperschallsignale zur Beurteilung des technischen Zustands herangezogen. Dabei kommt in der Verarbeitung des von Aufnehmer und Verstärker übertragenen elektrischen Schwingungsverlaufs das Grundanliegen der vibroakustischen Diagnostik zum Ausdruck:

*Trennung von Stör- und Nutzsignalanteilen, um anhand analysierter Schwingungsgrößen (Diagnoseparameter) Aussagen über die Veränderung bestimmter technischer Zustandsgrößen (Strukturparameter) treffen zu können.*

Entsprechend diesem Grundanliegen können sich unter Berücksichtigung der schwingungserregenden Baugruppen bzw. Bauteilpaarungen, der Detailliertheit der erforderlichen Aussagen (Komplex- oder Tiefendiagnose), der gerätetechnischen Realisierbarkeit und deren Kosten sowie der Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse verschiedene verfahrens- und gerätetechnische Lösungen ergeben. Meist ist eine Eingrenzung auf bestimmte Baugruppen, z. B. den Dieselmotor, unumgänglich, da beispielsweise der Entstehungsprozeß und die Weiterleitung der Schwingungssignale erheblich von der jeweiligen konstruktiven Gestaltung sowie von der Funktion der betreffenden Bauteilpaarung

geprägt sind und somit baugruppenspezifischen Charakter haben.

Eine allgemein zu formulierende Aufgabe bei der Entwicklung vibroakustischer Verfahren ist das Auffinden von Erregerquellen des Körperschalls, die abnutzungsbedingten Veränderungen unterliegen. Dabei ist die Kenntnis des mathematisch-physikalischen Zusammenhangs von betriebsbestimmenden Zustandsparametern und Erregerfunktion von besonderer Bedeutung. Die Kenntnis des funktionellen Zusammenhangs von Zustandsparameter und Erregerfunktion grenzt letztlich den Umfang möglicher und diagnostisch günstiger Kennfunktionen bzw. Kenngrößen ein.

## 3. Stand der Anwendung vibroakustischer Verfahren

Grundsätzlich ist festzustellen, daß eine Diskrepanz zwischen dem hohen Entwicklungsstand der Schwingungsanalyseverfahren zur Merkmalsgewinnung (Diagnoseparameter) einerseits und dem Einsatz vibroakustischer Diagnoseverfahren speziell für Verbrennungsmotoren in der Volkswirtschaft der DDR andererseits besteht. Ein wesentlicher Grund dafür ist das Fehlen von speziellen vibroakustischen Diagnosegeräten, die in ihrer Handhabbarkeit und ihrem Preis dem Diagnoseobjekt und seinen Einsatzbedingungen angepaßt sind. Gleiches trifft für die Anpassung hinsichtlich spezieller Diagnoseparameter zu, die für die Spezifik der Signalentstehung in Abhängigkeit von der Veränderung eines ausgewählten Zustandsparameters geeignet sind. Hier ist also ein Schwerpunkt weiterer Entwicklungsarbeit zu setzen.

Im Gegensatz dazu ist in anderen Wirtschaftszweigen, z. B. in der Chemieindustrie und in der Energieerzeugung, national und international bereits ein Breitereinsatz vibroakustischer Verfahren zu verzeichnen. Die Methoden der Schwingungsanalyse zur Bestimmung des technischen Zustands von Maschinenanlagen haben sich dabei als sehr wirkungsvoll erwiesen [2]. Wesentliche Gründe für den zunächst vorrangigen Einsatz vibroakustischer Verfahren in den o. g. Wirtschaftszweigen sind in folgendem zu sehen:

- Der hohe Preis der zu überprüfenden Objekte, strenge Sicherheitsbestimmungen und das große ökonomische Risiko bei unplanmäßigem bzw. unkontrolliertem Ausfall rechtfertigen den Einsatz relativ teurer Technik zur Kontrolle des technischen Zustands der Maschinenanlagen.
- In Verbindung damit ist auch der Einsatz hochqualifizierter Spezialisten und damit auch komplizierter Technik im Rahmen der Diagnose möglich.
- Die im wesentlichen konstanten Betriebsbedingungen erleichtern prognostische Aussagen zum technischen Zustand der Maschinenanlagen sowie eine adaptive Einführung von Diagnoseverfahren überhaupt.

Entsprechend den bereits aufgeführten Prä-

missen für den Einsatz von Diagnoseverfahren in der Landtechnik sind also in diesen Wirtschaftszweigen gesammelte Erfahrungen nur bedingt übertragbar. Vor allem ist ein höherer Aufwand in der Entwicklungsphase der Diagnoseverfahren, der dazugehörigen Technik und der Diagnostiktechnologie notwendig, um zu Lösungen zu kommen, die für den Praktiker anwendbar und ökonomisch vertretbar sind. Erste Ergebnisse zur Einsetzbarkeit vibroakustischer Verfahren für NKW und mobile Landmaschinen zeigen jedoch, daß diese Probleme prinzipiell lösbar sind. Die Vorteile dieser Verfahren, vor allem ihre universelle Einsetzbarkeit, rechtfertigen diesen meist höheren Entwicklungsaufwand gegenüber herkömmlichen Verfahren.

## 4. Auswahl von Diagnoseobjekten und Diagnoseparametern

Neben der ökonomischen Analyse hinsichtlich der Diagnosewürdigkeit einzelner Diagnoseobjekte spielen für die vibroakustische Diagnose die Frage der Schwingungserregung eine wesentliche Rolle. Das prinzipielle Herangehen wird im folgenden anhand des Dieselmotors erläutert.

Man kann davon ausgehen, daß in einem arbeitenden Motor folgende vier qualitativ unterschiedlichen Schwingungserregerprozesse [3] vor sich gehen, wobei nach [4] die beiden letztgenannten für die vibroakustische Diagnose von besonderer Bedeutung sind:

- Schwingungen infolge von hydro- und gasdynamischen Vorgängen
  - Schwingungen infolge von Reibung
  - Schwingungen infolge von Unwucht und Exzentrizität
- Diese sind durch niedrige Frequenzen (Grundfrequenz entspricht meist der Motordrehzahl), relativ große Schwingwege (die vom Quadrat der Wellendrehzahl abhängen) und durch relativ kleine Beschleunigungen gekennzeichnet.
- Schwingungen infolge von Berührungen der Elementpaarungen in kinematischen Paarungen (z. B. Stoß)

Charakteristisch sind der kHz-Bereich sowie große Beschleunigungen. Zu beachten ist, daß die Schwingungsimpulsamplitude proportional der Berührungsgeschwindigkeit der Stoßpartner und damit auch der Größe des Spiels innerhalb der Paarung ist.

Für eine Reihe von Baugruppen des Dieselmotors (z. B. Kurbeltriebe, Ventile, Einspritzsystem) ist die Schwingungserregung durch solche Stoßvorgänge geprägt, so daß es während eines Arbeitszyklus des Motors zur Entstehung einer zeitlich determinierten Schwingungsimpulsfolge kommt, die von stochastischen Anteilen überlagert ist.

Die von den einzelnen kinematischen Paarungen ausgesandten Signale unterscheiden sich durch Stoßfolgefrequenz, die zeitliche Lage des Auftretens der Stöße bezüglich einer Kurbelwinkelmarke und durch ihre spektrale Zusammensetzung.

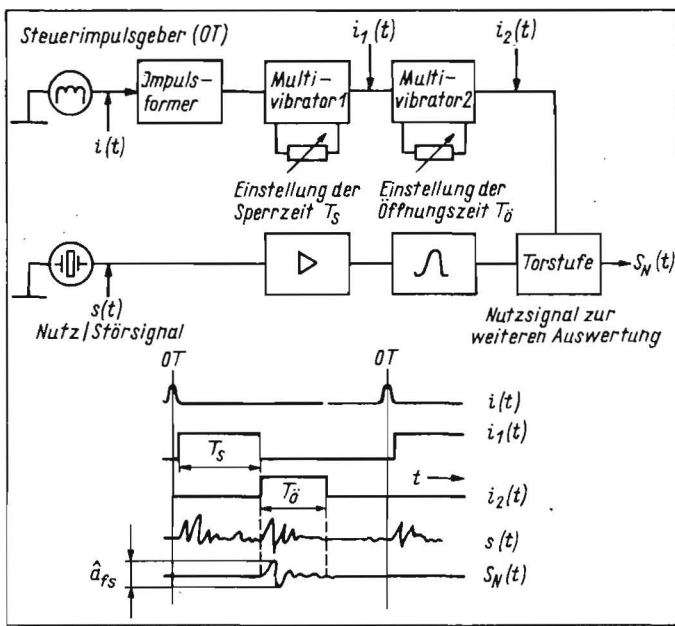


Bild 1. Blockschaltbild zur Wirkungsweise der zeitlichen Ausblendung und Filterung von Signalanteilen

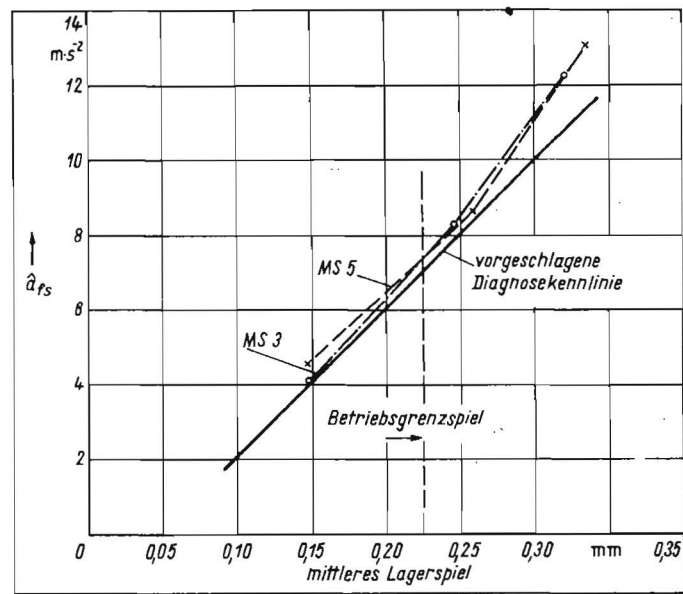


Bild 2. Diagnosekennlinien von Schwingbeschleunigung und Lagerspiel für die Kurbelwellenlagergruppe;  $\hat{a}_{fs}$  gefilterter und strobiertter Spitzenwert für die Schwingbeschleunigung, MS Meßstelle

Die Frequenzcharakteristika der gemessenen Spiele hängen von den Parametern des Stoßes (Stoßzeit, Zeitfunktion der Stoßkraft und Materialeigenschaften der Stoßpartner) und den Übertragungsfunktionen der Maschinenstruktur zwischen Quelle und Meßpunkt (häufig akustischer Kanal) ab.

Damit sind Möglichkeiten gegeben, daß durch die Kombination von zeit- und frequenzselektiver Analyse der gemessenen Schwingungssignale eine Bestimmung der Spiele in den Paarungen durchgeführt werden kann. Als Diagnoseparameter wird dabei vorrangig der Spitzenwert des Schwingungsimpulses genutzt (Bild 1).

Diese abgeleitete Methode der Ermittlung von vibroakustischen Diagnoseparametern kommt u. a. für die Zustandsparameter Lagerspiel und Kolben-Buchsen-Spiel in Frage, die wesentlich die ökonomischen und technischen Kennwerte des Motors bestimmen. Die folgenden Darlegungen beziehen sich deshalb auf notwendige Entwicklungsschritte bis hin zu Anwendungsmöglichkeiten eines solchen Verfahrens für die Komplexdiagnose des Schubkurbelgetriebes mit den Bauteilpaarungen Kolben-Gleitbuchse und Kurbelwellenlagerung.

### 5. Vibroakustische Diagnose der Kurbelwellenlager

Den Ausgangspunkt für jede Entwicklung praxisanwendbarer Diagnoseverfahren bildet u. a. das Schädigungsverhalten der betrachteten Baugruppen. Für das Beispiel der Kurbelwellenlager des Motors 6 VD 14,5/12-1 SRW waren in dieser Hinsicht folgende Aspekte zu beachten [5]:

- Da über 90 % der Pleuellfuß- und Hauptlager eindeutig verschleißgeschädigt sind, besteht die Notwendigkeit zur Diagnose dieser Baugruppe.
- Die annähernd gleiche Verschleißgeschwindigkeit aller Lagerstellen bietet gute Voraussetzungen für eine Komplexdiagnose.
- Da Pleuellager- und Hauptlagerverschleißbeträge benachbarter Lagerstellen sich

nur geringfügig voneinander unterscheiden, können zur Diagnose der gesamten Lagergruppe z. B. pleuellagerspiel- oder/ und hauptlagerspielabhängige Signale ausgenutzt werden.

Die Realisierung der Verfahren der Frequenzselektion und der zeitlichen Selektion setzt konkrete Kenntnisse über die Stoßerregung in den Lagern sowie über die Schwingungseigenschaften des akustischen Kanals (Systemidentifikation) und die Wirkung von Störfaktoren voraus. Da diese Fragen bisher für die Verhältnisse der Schwingungsübertragung von der zu diagnostizierenden Paarung (Pleuellager bzw. Hauptlager) zum Ort der Anbringung des Schwingungsgebers streng theoretisch nicht geklärt werden konnten, waren experimentelle Untersuchungen notwendig, um den Zusammenhang zwischen der Veränderung des Kurbelwellenlagerspiels (Strukturparameter) und der entsprechend analysierten Schwingungsgröße (Impulsamplitude als Diagnoseparameter) zu ermitteln. Das betrifft auch das Auffinden des günstigsten Meßregimes (Anbringensort des Gebers, Filterfrequenz, Parameter der Torschaltung, Bewertung der Schwingungsgröße) und die Minimierung der wirkenden Einflußfaktoren (Drehzahl, Belastung).

Zum Nachweis der Stoßerregung wurden Berechnungen angestrebt, die unter Berücksichtigung der Gas-, Massen- und Reibungskräfte die Wellenverlagerungsbahn sowie den Schmierfilmdruckverlauf in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel für die Pleuellager des o. g. Motors ausweisen und Rückschlüsse auf günstige Meß- und Diagnosebedingungen zulassen. Im Zusammenhang mit den experimentell auf einem Motorprüfstand gewonnenen Untersuchungsergebnissen konnte die Spielabhängigkeit der frequenzbewerteten und strobierten Schwingbeschleunigungen für folgende Bedingungen nachgewiesen werden:

- Prüfdrehzahl 1 050 min<sup>-1</sup> (Leerlauf)
- Kühlwassertemperatur 80 ± 5 °C

Ölsorte	MD 302
Meßstellen	MS 3 und MS 5 (Schnittpunkt zwischen Zylinderachse und Hauptlagerachse)
Filterstufen	1,25 und 1,6 kHz (Bandbreite 30 %)
Strobdaten	30° Kurbelwinkel vor OT der Zündung.

Die unter diesen Bedingungen ermittelten Kennlinien sind im Bild 2 dargestellt. Sie sind geeignet, eine Komplexdiagnose des Spiels für den betreffenden Motor vorzunehmen. Die auf der Ordinate ausgewiesenen Werte stellen die Summe der in den angegebenen Bandpaßstufen ausgefilterten und strobierten Spitzenwerte der Schwingbeschleunigung dar. Die Abszisse wird durch das künstlich simulierte (durch Abschleifen der Lagerzapfen) an Haupt- und Pleuellagern einheitliche Spiel dargestellt, das den realen Bedingungen des Verschleißes nahekommt.

### 6. Diagnose der Kolben-Gleitbuchsen-Paarung

Die für diese Paarung durchgeführte Analyse des Schädigungsverhaltens brachte einige Besonderheiten, die bei der Formulierung der Aufgabe zur vibroakustischen Diagnostik unbedingt berücksichtigt werden müssen. Bekannt ist, daß die Durchmessergröße der Gleitbuchsen in OT-Stellung des Kolbens ihr Maximum erreicht. Da für diese Paarung die verschleißabhängige Erregerquelle durch den Anlagewechsel des Kolbens (Resultat: Kolbenkippsstoß) gegeben ist, sind Kolbenkippsstöße im Bereich von OT als Indikator für die Durchmesservergrößerung der Gleitbuchse am empfindlichsten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß für die Kolben-Gleitbuchsen-Paarung die Abnutzung im Ring-Nut-Bereich des Kolbens aussonderungsbestimmend ist. Für die untersuchten Motoren ist hier das Verschleißstoßspiel der Ölschlitzringe zu nennen. Daraus folgt, daß nur bei Kenntnis der Relationen der Schädigung der Einzelelemente der Gesamtpaarung die vibroakustische Diagnose

auf der Grundlage der Ausnutzung der Erregerquelle Kolbenkipstoß möglich ist, d. h., der ermittelbare Zustandsparameter Kolben-Buchsen-Spiel bestimmt nur indirekt die Aussonderungsgrenze der Gesamtpaarung.

Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Anlagewechsel des Kolbens ermöglichen die Bestimmung der Abhängigkeit der Auftreffgeschwindigkeit und des Zeitpunkts des Kolbenstoßes vom Zustandsparameter Kolben-Buchsen-Spiel und von den motorseitigen Diagnosebedingungen. Damit lassen sich nicht nur die Diagnosebedingungen optimieren, sondern auch die Parameter der Zeitselektion fundiert bestimmen. Es konnte z. B. nachgewiesen werden, daß für die vibroakustische Diagnose der Kolben-Gleitbuchsen-Paarung niedrige Drehzahlen (rd. 800 min<sup>-1</sup>) besser geeignet sind als höhere Drehzahlen.

Die im Bild 3 dargestellte Diagnosekennlinie wurde unter Laborbedingungen ermittelt. Die Spitzenwerte sind dabei auf den Wert bei Einbauspiel normiert. Die erzielten Abhängigkeiten lassen die angewendeten Verfahren als perspektivreich für die Diagnose in der Praxis erscheinen. Der Hauptvorteil ihrer praktischen Anwendung wäre die Diagnose des gesamten Schubkurbelgetriebes mit Hilfe eines nur leicht modifizierten Verfahrens.

### 7. Gerätetechnische Entwicklung

Für das Verfahren der Schwingungsmessung mit Frequenzselektion und zeitlicher Selektion von Signalanteilen mit nachfolgender Amplitudenbewertung wurde weitgehend

eine Gerätetechnik verwendet, die handelsüblich in Gestalt des SM-Systems vom VEB Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden produziert und angeboten wird. Lediglich für die Torstufe mußte eine Eigenentwicklung betrieben werden [6]. Die prinzipielle Wirkungsweise der Meßkette geht aus Bild 1 hervor. Sie beruht darauf, daß zeitliche Abschnitte des aufgenommenen, verstärkten und vorgefilterten Schwingungssignals über eine winkelabhängig gesteuerte Torstufe rhythmisch einem Spitzenwertmeßgerät zugeführt werden. In Anbetracht der Tatsache, daß neben Laboruntersuchungen auch die Anwendbarkeit des Verfahrens unter Praxisbedingungen zu testen ist, wurde nach verschiedenen Entwicklungsetappen eine Meßgerätekette unter der Bezeichnung Strob IV konzipiert, die diesen Anforderungen gerecht wird. Im Bild 4 ist der Meßplatzaufbau gegenwärtig befindet sich diese Gerätevariante in der Überleitung für die Kleinserienproduktion, um für potentielle Nachnutzer verfügbar zu sein [7].

### 8. Ausblick

Eine Anwendung der untersuchten Verfahren wird zunächst für die Bereiche der Landtechnik und des Verkehrswesens gesehen, da in diesen Bereichen die speziell untersuchten Motoren 4/6 VD 14,5/12 vornehmlich zum Einsatz kommen. Die Ausweitung der Anwendung des Verfahrens der kombinierten Frequenz- und Zeitselektion mit nachfolgender Spitzenwertbewertung auf andere Dieselmotorentypen (Voraussetzung

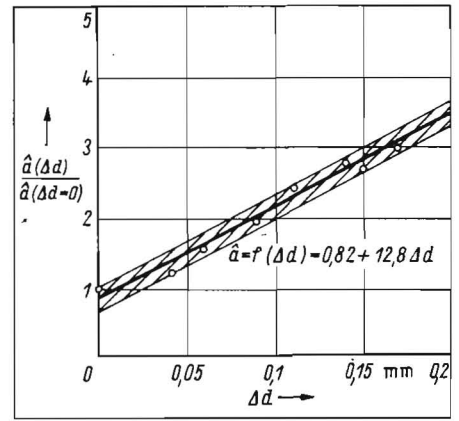


Bild 3. Diagnosekennlinie für den Spitzenwert eines Kolbenkipstoßes nach Frequenzselektion und zeitlicher Selektion in Abhängigkeit von der Durchmesserungsvergrößerung der Gleitbuchse; Drehzahl 800 min<sup>-1</sup>; Filter f<sub>m</sub> = 2 kHz, Güte 2, Zeitfenster 375 °KW bis 405 °KW (Zünd-OT 360 °KW)

Tauchkolben) ist aufgrund der theoretisch gleichen Voraussetzungen prinzipiell möglich. Eine detaillierte Untersuchung der Grenzwerte und der Diagnosespezifität für die Motortypen ist jedoch notwendig. Der Breitereinsatz des vorgeschlagenen Verfahrens in der Praxis hängt zum gegenwärtigen Bearbeitungszeitpunkt noch von der Lösung folgender weiterer Aufgaben ab:

- Untersuchung des Einflusses der Serienstreuung der Motoren

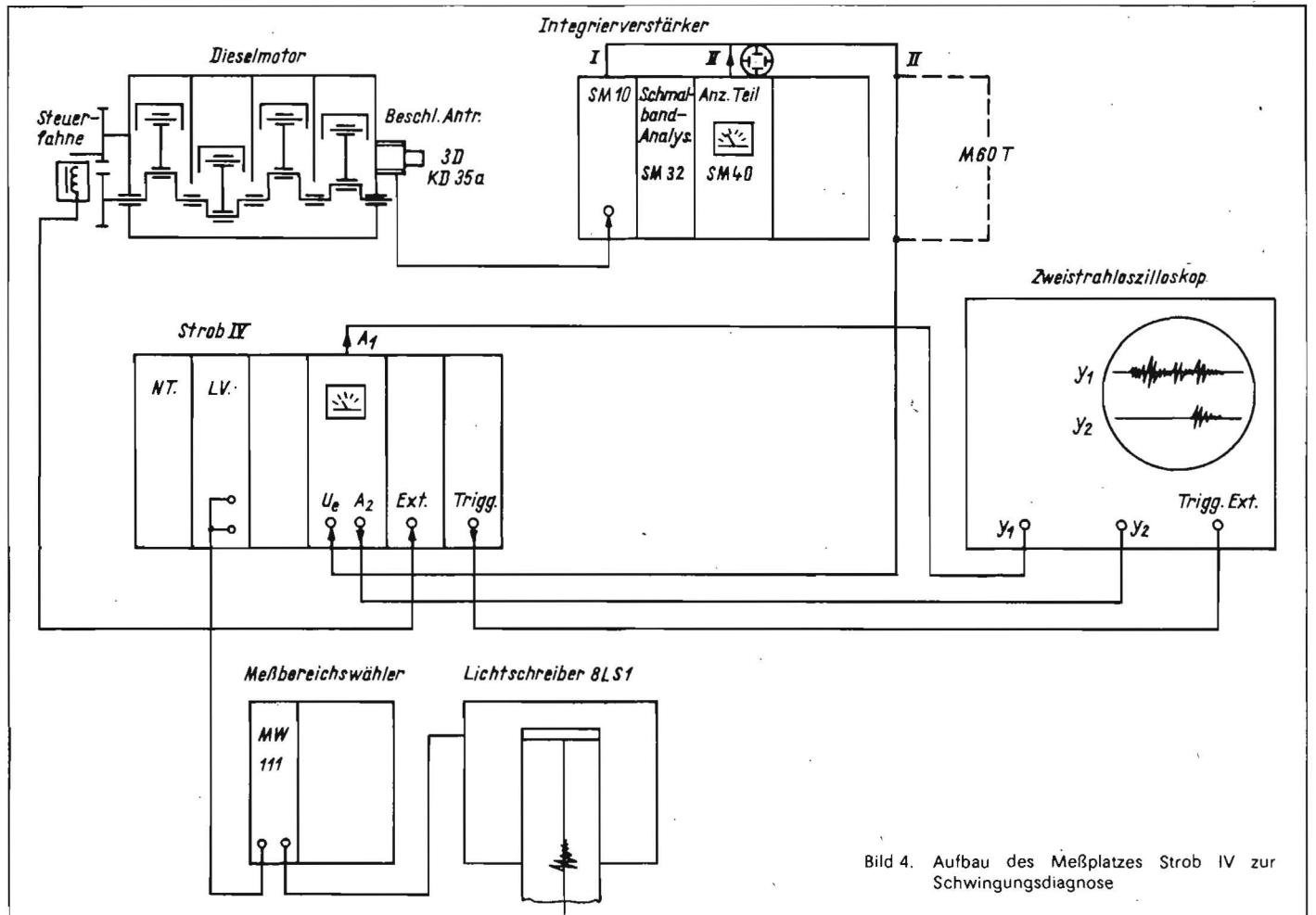


Bild 4. Aufbau des Meßplatzes Strob IV zur Schwingungsdiagnose

- Festlegung einer praktikablen Möglichkeit der Geberankopplung
- gerätetechnische Weiterentwicklung in Richtung eines universell einsetzbaren kompatiblen Diagnosesystems.

Für die Lösung aller Teilprobleme wurde ein langfristiges Überführungsprogramm [8] erarbeitet, wobei eine Kooperation mit Partnern angestrebt wird, um eine möglichst schnelle und breite Anwendung der vorhandenen wissenschaftlichen Ergebnisse zu gewährleisten.

### Literatur

[1] Schiroslawski, W.; Troppens, D.; Maack, H.-H.:

- Instandhaltung nach Überprüfungen für landtechnische Arbeitsmittel. Vortrag anlässlich der IV. Rostocker Universitätstage, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, 1981.
- [2] Analysetechniken in der Maschinendiagnose. Brüel und Kjaer, Vortrag Nr. 260G, 1978.
- [3] Pavlov, B. V.: Akustische Diagnostik von Mechanismen (russ.). Moskva: Izd. Mašinostroenie 1971.
- [4] Welz, F. J.: Einige Ergebnisse schwingungsakustischer Diagnoseverfahren an Dieselmotoren in der SU. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen Dresden 26 (1976) 5, S. 945-948.
- [5] Maack, H.-H.: Vibroakustische Diagnoseverfahren für das Kurbelgetriebe von Dieselmotoren. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion

- Landtechnik, Abschlussbericht 1981.
- [6] Biereichel, H.; Maack, H.-H.; Neumann, G.: Geräteentwicklung für vibroakustische Untersuchungen an mechanischen Systemen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe 33 (1984) 10.
- [7] Müller, J.: Ergebnisse schädigungsanalytischer Untersuchungen an getriebetechnischen Baugruppen. agrartechnik, Berlin 35 (1985) 1, S. 11-15.
- [8] Neumann, G.: Anwendungsrichtlinie zum Abschlussbericht Vibroakustik Kolben-Gleitbuchsen-Paarung. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Teilbericht 1983.

A 4305

# Technologische Aspekte des Diagnosesystems DS 1000

Dozent Dr. sc. techn. W. Schiroslawski, KDT

## 1. Problematik

Die derzeitigen Diagnoseverfahren sind dadurch gekennzeichnet, daß die diagnostischen Informationen sowohl im stationären als auch im dynamischen Betriebszustand der technischen Arbeitsmittel gewonnen werden. Das hat zur Folge, daß einerseits die Meßbedingungen technologisch zweckmäßig definiert und andererseits die Diagnosearbeiten mit hoher technologischer Disziplin ausgeführt werden müssen. Außerdem sind in der Gestaltung der Diagnostiktechnologien die Einflüsse der einzeln oder komplex wirkenden Schädigungen auf das Verhalten der Diagnoseparameter und vor allem die Einflüsse durch das unterschiedliche Verhalten einzelner Baugruppen im stationären und dynamischen Betriebsregime zu berücksichtigen.

Der Autor stellt sich das Ziel, an einigen ausgewählten Beispielen die o. g. Situation darzustellen, die Auswirkungen bei Nichteinhalten der technologischen Vorschriften zu zeigen und Hinweise zur Verbesserung der Diagnostiktechnologie zu geben.

## 2. Überprüfung des Zustands der Pleuellager von Dieselmotoren

Die Ermittlung des Summenlagerspiels der Haupt- und Pleuellager eines Dieselmotors erfolgt mit dem Diagnoseparameter Motorölstrom. Nach Gläser/Gnlike [1] ergibt sich der Ölstrom durch ein dynamisch belastetes Radialgleitlager näherungsweise zu

$$\dot{V} = J_3(\epsilon) \frac{d^3 \psi^3 p}{8 \eta} + J_1(\epsilon) \frac{K d^3 \psi \omega}{8}; (1)$$

$\psi$  relatives Lagerspiel  
 $p$  Öldruck  
 $\eta$  Viskosität  
 $d$  Durchmesser  
 $\epsilon$  relative Exzentrizität  
 $J_3, J_1, K$  Koeffizienten,

wodurch das Diagnoseverfahren und die Diagnosebedingungen begründet sind. Neuere Untersuchungen von Brendel/Leistner [2] weisen auf einige prinzipielle Probleme hin, halten aber das Verfahren für geeignet. Dieses Verfahren setzt zunächst annähernd gleichen Verschleißzustand der

o. g. Lager voraus [3]. Des weiteren hängt die Genauigkeit dieses Verfahrens in großem Maß von den Meßbedingungen [s. Gl. (1)] und, wie Beier [4] durch experimentelle Arbeiten bestätigte, von den Öleigenschaften im weiteren Sinn ab. Entscheidend bestimmt wird die Genauigkeit der Diagnose vom strukturellen Aufbau des Ölkreislaufs selbst. In dieser Hinsicht weisen die in der Landtechnik vorhandenen Dieselmotoren bemerkenswerte Besonderheiten auf. In einem neuen Motor 4 VD 14,5/12-1 SRW werden zur Pleuellagerung rd. 54 % des Gesamtölstroms, der in den Ölhauptkanal mündet, verwendet [5]. Da dieser Anteil durch Pleuellager und Pleuel auf die Pleuellager fließt, wirkt er direkt auf die Genauigkeit des Verfahrens ein. Daher muß noch untersucht werden, wie sich der Pleuellageranteil beim Verschleiß der Haupt- und Pleuellager, des Pleuellagers sowie der Pleuel selbst verändert. Im Motor 8 VD 14,5/12,5-1 SVW sind außer Doppelspritzdüsen zur Pleuellagerung zwei Pleuel vorhanden, die ebenfalls anteilig aus dem Gesamtölstrom eines Pleuelkanals gespeist werden.

Entsprechend Gl. (1) sind als Meßbedingungen für die Ölstrommessung die Temperatur, der Öldruck, die Motordrehzahl und die Ölviskosität konstant zu halten. Zur einfachen Gestaltung der Diagnostiktechnologie wäre es zweckmäßig, möglichst viele der ge-

nannten Diagnosebedingungen einheitlich für alle Motortypen zu gestalten. Diese Forderung ist, wie noch gezeigt wird, nicht vollständig zu erfüllen.

Im Bild 1 ist das Warmlaufverhalten der Motoren D-50 und 6 VD 14,5/12 SRW dargestellt. Die Bilder 2 und 3 verdeutlichen die Abhängigkeit des Motorölstroms von den Meßbedingungen am Beispiel eines D-50. Im Bild 2 ist ersichtlich, daß bei einer Temperaturabweichung von  $-10^\circ\text{C}$  der Fehler des gemessenen Ölstroms  $\Delta \dot{V}_2 = 0,5 \text{ dm}^3/\text{min}$  ( $\approx 5,5\%$ ) beträgt. Dieser Fehler wird bei kleineren Temperaturen noch größer. Für den D-50 ist die Meßtemperatur von  $60^\circ\text{C}$  gut geeignet, da die Kurve in diesem Bereich sehr stark degressiv verläuft und damit die Abhängigkeit des Ölstroms vom Erwärmungszustand des Motors geringer wird. Obwohl dieser Sachverhalt mehr oder weniger aus dem Viskosität-Temperatur-Verhalten resultiert – am Motor 6 VD zeigt sich zwar eine analoge Tendenz (Bild 2), die Degression ist jedoch nicht so sehr ausgeprägt –, ist für das Bestimmen der zweckmäßigen Meßtemperatur die zur Verfügung stehende Meßzeit ausschlaggebender, wobei aus Gründen der Energieeinsparung eine möglichst geringe Warmlaufzeit anzustreben ist. Aus Bild 1 ist erkennbar, daß bei einer Temperaturgrenze von  $4^\circ\text{C}$  (entspricht einem Meßfehler von rd. 2%) beim Motor D-50 lediglich eine Meßzeit von 70 s zur Ver-

Bild 1. Erwärmungskurven der Motoren D-50 und 6 VD 14,5/12 SRW

