

Diagnoseverfahren für tribologische Systeme in stationären landtechnischen Anlagen

Dr. rer. nat. R. Kranemann, KDT, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Technologie der Instandsetzung

Für die Instandhaltung landtechnischer Anlagen ist der Zeit- und Arbeitskräftaufwand gegenwärtig noch unverhältnismäßig hoch, da das Instandhaltungspersonal oft erst nach dem Eintreten eines Fehlers wirksam werden kann. Produktionsverluste sind häufig nicht zu vermeiden. Damit ist die Durchsetzung der Instandhaltung nach Überprüfungen auch für maschinentechnische Ausrüstungen dieser Anlagen eine wichtige Aufgabe.

Einen Diagnoseschwerpunkt bilden tribologische Systeme. Sie unterliegen überwiegend Normalschädigungen durch Ermüdung, Verschleiß und Korrosion. Als Zustandsparameter zur Überwachung des Schädigungsverlaufs können die Wärmeänderung, die Geometrie der Einzelteile zueinander, der Schwingungszustand, die Schmierung oder der Materialabtrag herangezogen werden. Die Erfassung geometrischer Veränderungen der Einzelteile zueinander (z. B. Verdrehungsmessung bei Getrieben) ist auf einfache Systeme beschränkt, und die direkte Materialabtragermittlung (z. B. Abdruckverfahren) macht oft erhebliche Demontagen notwendig. Die weitgehend demontagefreie Überprüfung ist erst bei indirekter Messung der Zustandsparameter zu realisieren.

Entsprechend den Erfahrungen anderer Volkswirtschaftsbereiche (Energiewirtschaft, Maschinenbau, Chemieindustrie u. a.) sowie in Auswertung der Literatur [1, 2] werden im folgenden die Endoskopie, die Temperaturmessung, die Körperschallmessung und die Ölanalyse auf Verschleißpartikel näher betrachtet. Die technischen Anwendungsbedingungen wurden am Beispiel einer Milchproduktionsanlage MVA 1930 experimentell untersucht.

1. Endoskopie

Untersuchungen haben gezeigt, daß in den o. g. Milchproduktionsanlagen Getriebemotoren und Elektrogurttrommeln die Schwerpunkte der endoskopischen Diagnose bilden dürften [3]. Als Technoendoskope wurden die starren Bronchoskope und das flexible Bronchoskop 444 (Bild 1) des VEB MLW Berlin angewendet [4]. Mit dem flexiblen Bronchoskop können die Einzelteile der Getriebe-

motoren und Elektrogurttrommeln vollständig diagnostiziert werden, während mit den starren Bronchoskopen mehrere Einzelteile nur eingeschränkt zugänglich sind [3].

Für die Diagnose sind die Baugruppen grundsätzlich außer Betrieb zu setzen. Um alle Einzelteile bewerten zu können, ist in den meisten Fällen das Schmieröl abzulassen. Zur Vermeidung störender Reflexionen am verbleibenden Ölfilm empfiehlt sich eine Innenreinigung der Baugruppen.

Folgende weitere Probleme schränken den Einsatz der Endoskopie in der vorbeugenden Instandhaltung ein:

- Die Endoskopie ist ein subjektives Diagnoseverfahren.
- Eine Schädigungsdiagnose ist nicht möglich.
- Die medizinischen Endoskope sind gegen mechanische Belastungen sehr störanfällig.

Eine Anwendung der Endoskopie in stationären landtechnischen Anlagen kann derzeit nicht empfohlen werden.

2. Temperaturmessung

Temperaturmeßverfahren, sowohl berührende als auch berührungslose, finden bei der Gleitlager- und Wälzlagerdiagnose bereits Anwendung. Neue Aspekte ergaben sich für die berührungslose Temperaturmessung (Pyrometrie) mit den Handpyrometern des Pyrovar-Systems vom VEB Meßgerätekwerk „Erich Weinert“ Magdeburg [4, 5]. Die Pyrometrie bietet gegenüber berührenden Verfahren erhebliche Vorteile bei Messungen an rotierenden Objekten, an Oberflächen mit fortwährend geänderten Temperaturen, an unter elektrischer Spannung stehenden Teilen und an Körpern mit geringer Wärmekapazität und schlechter Wärmeleitung.

In der MVA 1930 fand das Handpyrometer HPN (Temperaturbereich 0 bis 200 °C, Bild 2) bei der Überwachung mechanischer Reibpaarungen Anwendung. Ausgewählt wurden:

- Tragrollen des Melkkarussells
- Tragrollen und Elektrogurttrommeln der Futterbänder

- Schildlager der Vakuumzellenverdichter
- Frästrommellager des Futterdosierers.

Die an den Meßstellen ermittelten Temperaturen T_0 lagen zwischen der Umgebungstemperatur (10 bis 20 °C) und 105 °C. Die Emissionsgrade der strahlenden Flächen ϵ_0 betragen 0,88 bis 0,98 [6]. Ausgewählte Meßergebnisse sind im Bild 3 dargestellt.

An Reibpaarungen mit geringen Relativgeschwindigkeiten zueinander (z. B. Tragrollen des Melkkarussells und der Futterbänder) ist die Temperatur als Diagnoseparameter ungeeignet. Gegenüber der Umgebungstemperatur war eine Temperaturerhöhung nicht meßbar. An schneller rotierenden Paarungen (z. B. Schildlagerungen der Zellenverdichter und Frästrommellager) erhöhen sich die Temperaturen z. T. beträchtlich. Für eine breite Anwendung der Pyrometrie an diesen Baugruppen sind die Toleranzbereiche der Oberflächentemperaturen bei verschiedenen Betriebszuständen und die funktionellen Zusammenhänge zwischen Schädigungsstatus und Temperaturerhöhung zu ermitteln. Bereits gesichert ist die Pyrometrie als Diagnoseverfahren für elektrotechnische Anlagen [2, 7].

Bei der berührungslosen Temperaturmessung müssen der Emissionsgrad der strahlenden Oberfläche ϵ_0 und die Umgebungstemperatur T_u am Pyrometer eingestellt werden. Abweichungen zwischen Einstellwert (ϵ_{0er} , T_{uer}) und den tatsächlichen Parametern führen zu Meßfehlern. Anhand von theoretischen Ableitungen wurden mathematische Beziehungen aufgestellt, die eine Errechnung der Meßfehler zulassen und damit eine Optimierung der Diagnosebedingungen er-

Bild 3. Temperaturniveau an ausgewählten Baugruppen der MVA (Zeitabstand zwischen den Messungen jeweils 14 Tage, Mittelwerte aus 5 Messungen in 14tägigem Abstand; schraffiert: mittlere Umgebungstemperaturen);

1,2 Tragrollen des Melkkarussells, 3,4 Schildlagergehäuse vom Zellenverdichter, 5,6 Frästrommellager

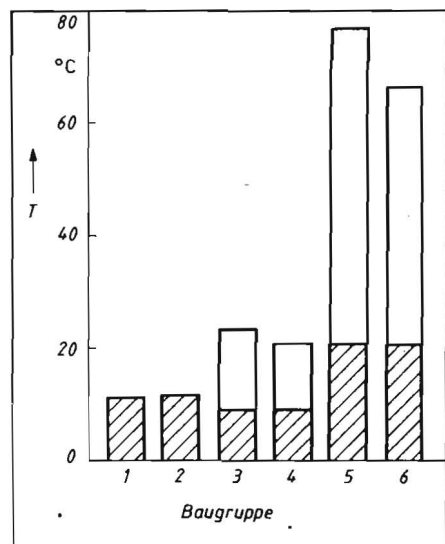
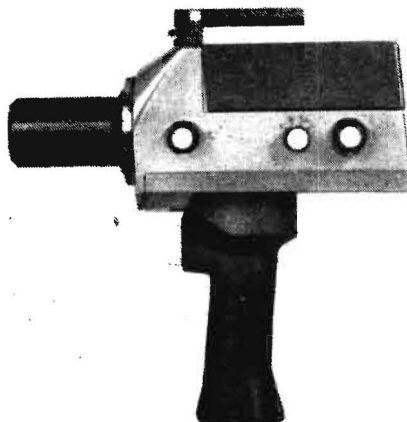
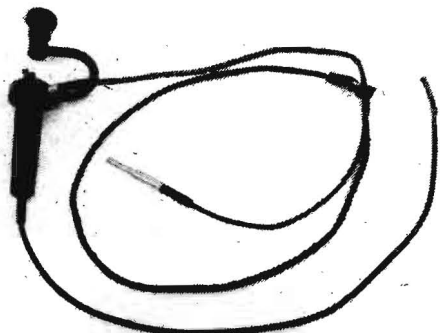


Bild 2. Handpyrometer HPN des VEB Meßgerätekwerk „Erich Weinert“ Magdeburg

Bild 1. Flexibles Bronchoskop 444 des VEB MLW Berlin



möglichen. Werden z. B. die vorgestellten Messungen in der MVA 1930 mit konstanter Emissionsgradeinstellung am Pyrometer $\epsilon_{0E} = \bar{\epsilon}_0 = 0,93$ durchgeführt, so ist der errechnete Fehler bei $T_0 = T_u$ wie erwartet Null und erreicht bei der größten Oberflächentemperatur $T_0 = 105^\circ\text{C}$ als Maximum $\Delta T = \pm 3,5 \text{ K}$.

Bei konstanter Umgebungtemperatureinstellung $T_{uE} = \bar{T}_u = 15^\circ\text{C}$ errechnen sich die maximalen Fehler bei $T_0 = T_u$ zu $\Delta T = \pm 0,7 \text{ K}$ und bei $T_0 = 105^\circ\text{C}$ zu $\Delta T = \pm 0,3 \text{ K}$.

Zwischen den rechnerischen Temperaturabweichungen und den experimentell ermittelten Fehlern herrscht eine gute Übereinstimmung [6]. In der diagnostischen Anwendung dürften somit eine konstante Umgebungtemperatureinstellung und auch eine konstante Emissionsgradeinstellung vertretbar sein.

3. Körperschallmessung

Vibroakustische Verfahren sind für die Überwachung von separaten Wälzlagerungen als gut einzuschätzen [2, 8]. Beim Einsatz in der Getriebediagnose werden komplizierte meß- und rechentechnische Methoden (Frequenzanalyse, Cepstrumauswertung u. a.) erforderlich. Als Sensoren finden piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer (z. B. KD35) Anwendung. Zu berücksichtigen ist, daß die Voraussetzungen für eine hohe Diagnosesicherheit bei der Körperschallmessung nicht immer erfüllt werden können:

- Ankopplung des Beschleunigungsaufnehmers möglichst nahe am Wälzlager
- Wahl der Meßstelle innerhalb der Belastungszone des Lagers
- keine Unterbrechung der Werkstoffbrücke zwischen Außenring des Lagers und Meßstelle
- Drehzahl größer als 200 min^{-1}
- Ausschaltung der Störschwingungen von Nachbarbaugruppen.

In den Bildern 4 und 5 sind Beispiele für die Aufnehmerankopplung dargestellt. Die Tastspitze ist nur bei orientierenden Messungen anzuwenden. Die Ankopplung über den Haftmagneten zeigt ein besseres Frequenzübertragungsverhalten, erfordert jedoch eine ebene Fläche mit einem Durchmesser von mindestens 20 mm. Eine Aufnehmerankopplung mit Hilfe einer Stiftschraube verbessert die Übertragungseigenschaften weiter, ist allerdings wegen der aufwendigen Meßstellenvorbereitung nur in Ausnahmefällen zu verwirklichen.

Die Analyse der Maschinen und Ausrüstungen der MVA 1930 zeigt, daß die Wälzlagerungen der Hauptbaugruppen, wie Getriebemotoren und Elektrogurttrommeln, sowie die Lagerungen der meisten anderen rotierenden Elemente zum großen Teil gute Voraussetzungen für eine Körperschallmessung bieten [9].

Im VEB Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden wurde für die technische Diagnose von Wälzlagerungen ein mikrorechnergestütztes Schwingungsdiagnosegerät (Bild 6) entwickelt. Im Gerät ist eine neuartige Signalverknüpfung der Effektiv- und Maximalbeschleunigung des Körperschalls zum Diagnosekennwert $K(t)$ realisiert:

$$K(t) = \frac{\bar{a}(t_0) \hat{a}(t_0)}{\bar{a}(t_0) \bar{a}(t_0)}$$

\bar{a} Effektivwert der Schwingungsbeschleunigung

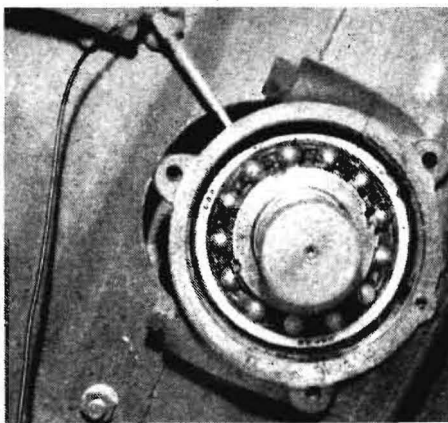


Bild 4. Ankopplung des Beschleunigungsaufnehmers mit Hilfe einer Tastspitze am Streutrommellager des Futterdosierers H 10.2

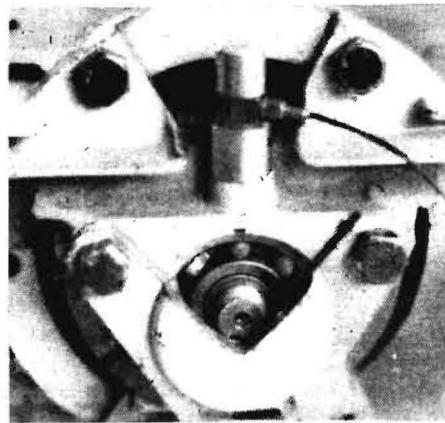


Bild 5. Ankopplung des Beschleunigungsaufnehmers mit Hilfe eines Haftmagneten am Lenverdrichter VZ40/130 V

\bar{a} Maximalbeschleunigung

t_0 Anfangszeitpunkt

t_D Diagnosezeitpunkt.

Die Berücksichtigung des Anfangszustands der geschädigten Wälzlager beim $K(t)$ -Wert erhöht die Diagnosesicherheit auf über 98% [2].

Im Experiment konnte die gute Korrelation zwischen Schädigungszustand und Diagnosekennwert $K(t)$ an Wälzlager aus landtechnischen Baugruppen bestätigt werden [10]. Das Diagnosegerät M 1302 hat ein robustes Gehäuse und weist einen hohen elektrischen Schutzgrad auf. Es ist tragbar und netzunabhängig. Für dieses Gerät wird in der Anlageninstandhaltung ein breites Einsatzspektrum erwartet [2].

Bei der Getriebediagnose ergeben sich mit dem verstärkten Einsatz leistungsfähiger Mikrorechenteknik neue Aspekte. Die komplizierteren Signalverknüpfungen, vor allem die Frequenzanalyse durch schnelle Fouriertransformation, werden damit auch für die

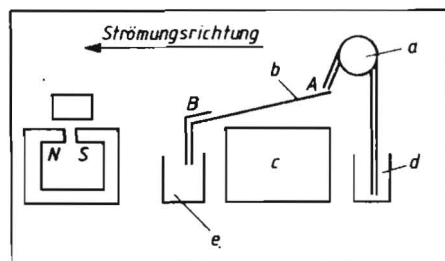


Bild 7 Schematische Darstellung eines Ferrografen; a Pumpe, b Träger, c Magnet, d Probenbehälter, e Sammelbehälter

technische Diagnostik von Baugruppen der Landtechnik interessant. Eine gerätetechnische Lösung läßt sich z. B. bei vertretbarem Aufwand durch den Mikrorechner MC80 in Verbindung mit einem A/D-Wandler und einem Schwingungsmeßgerät (SM212, M1302) verwirklichen [11, 12]. Damit steht auch für die Diagnose von komplizierteren tribologischen Systemen ein universelles Hilfsmittel zur Verfügung.

4. Ölanalyse auf Verschleißpartikel

In tribologischen Systemen mit geschlossenen Maschinen- und Ölkreisläufen (z. B. Getriebe, Dieselmotoren, Hydraulikanlagen) kommt es durch die Abnutzung zur Anreicherung von Metallpartikeln im Fluid. Werden periodisch Proben aus den Ölsystemen analysiert, so lassen sich Schädigungen frühzeitig erkennen. In der Luftfahrt und bei Schienenfahrzeugen hat die Atomspektroskopie breite Anwendung gefunden. Erfäßt werden die Konzentrationen der im Schmieröl suspendierten Elemente.

Die atomspektroskopische Ölüberwachung ist relativ aufwendig, so daß die Anwendung nur ökonomisch vertretbar ist, wenn in zentralisierten Labors große Problemengen analysiert werden. Darüber hinaus ist ein Nachteil aller Methoden der Atomspektroskopie, daß die Verschleißpartikel selbst nicht untersucht werden können.

Ein interessantes Verfahren für die qualitative Erfassung von Form und Größenverteilung der ferromagnetischen Abriebpartikel

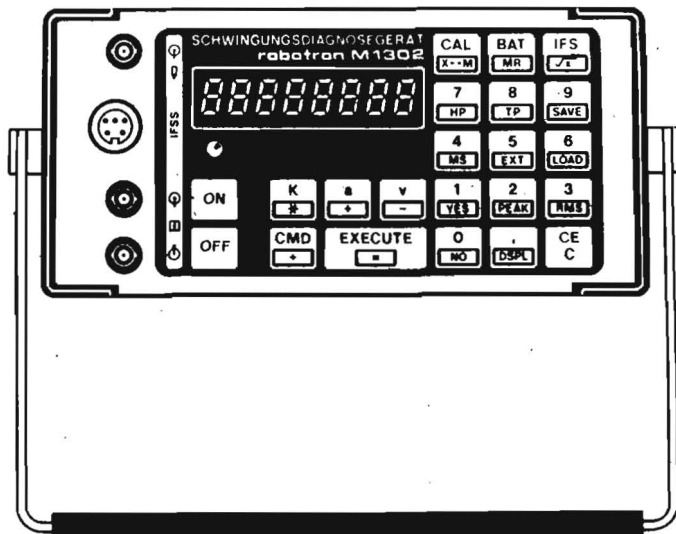


Bild 6 Schwingungsdiagnosegerät Robotron M 1302 vom VEB Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden

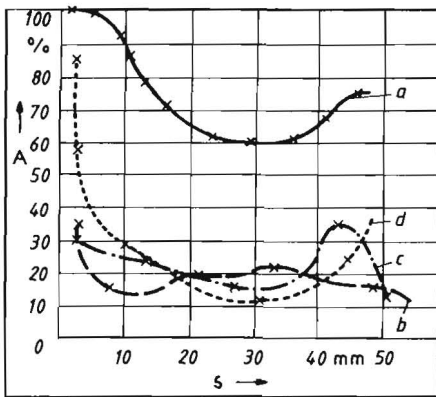


Bild 8. Mittlere Flächenabdeckung A in den Ferrogrammen von Getriebeölen aus Baugruppen einer MVA1930 als Funktion der Entfernung s von der Probenauftrittsstelle [14]; a Homogenisierungsbrücke des Güllebeckens (175 ppm Fe), b Grundfutterdosierer (25 ppm Fe), c Futterbandantrieb (7 ppm Fe), d Windenantrieb der Verteil- und Entnahmemaschine des Hochsilos (< 5 ppm Fe)

stellt die Ferrografie (Bild 7) dar. Der geräte-technische Aufwand ist deutlich kleiner als bei der Atomspektroskopie [13]. Zur Diagnose wird eine geringe Menge Schmieröl mit einem Lösungsmittel verdünnt und auf den leicht geneigten Glasträger gegeben. Der Magnet erzeugt über dem Träger ein inhomogenes, in Flußrichtung stark zunehmendes Magnetfeld. Dadurch werden die ferromagnetischen Partikel nach ihrer Größe fraktioniert. Die Auswertung der Ferrogramme erfolgt visuell (Ferrokopie) und densitometrisch (Ferrodensimetrie).

Bei der Ferrokopie wird das Ferrogramm durch ein bichromatisches Mikroskop (gleichzeitige verschiedenfarbige Durch- und Auflichtbeleuchtung) subjektiv bewertet. Die Morphologie der Teilchen läßt Rückschlüsse auf die Art der Abnutzung zu, wie Normalverschleiß, Freßverschleiß und Ermüdung.

Bei der Ferrodensimetrie ermittelt man die Flächenabdeckung der Verschleißpartikel an zwei definierten Punkten auf dem Glasträger durch optische Transmissionsmessungen. Aus der Flächenabdeckung werden Diagnosekennwerte, wie z. B. der Index der Verschleißhaftigkeit I_s , berechnet:

$$I_s = A_L^2 - A_S^2;$$

A_L Flächenabdeckung der großen Partikel

A_S Flächenabdeckung der kleinen Partikel. In der Literatur wird über erfolgreiche Anwendungen der Ferrografie bei der Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken, Industrietriebmotoren, Dieselmotoren u. a. berichtet. Hervorzuheben ist, daß die Ferrografie Schädigungszustände oft frühzeitiger als die spektroskopische Ölanalyse lokalisieren konnte. Bei Laboruntersuchungen [14] an Getriebeölen der MVA1930 wurde experimentell bestätigt, daß eine sichere Fraktionierung der Partikel möglich ist. Durch Variation des Versuchsregimes kann die Ablagerung in weiten Grenzen gesteuert werden.

Für landtechnische Getriebe liegen z. Z. noch keine Trenduntersuchungen vor. Es zeigt sich jedoch bereits, daß die auf den Ferrogrammen abgelagerte Teilchenmenge eine gute Korrelation zu den Resultaten der spektroskopischen Ölanalyse aufweist. Wie erwartet, haben Proben mit einer hohen Eisenkonzentration auch eine große Flächenabdeckung über das gesamte Ferrogramm (Bild 8, Kurve a) und Proben mit einer geringen Eisenkonzentration eine niedrigere Flächenabdeckung (Kurven b, c). Die Ölprobe aus dem Windenantrieb (Kurve d) weist jedoch bei einer sehr geringen Eisenkonzentration einen hohen Anteil großer Verschleißpartikel auf. Das dürfte auf eine hohe Verschleißhaftigkeit in dieser Baugruppe hinweisen.

Es ist festzustellen, daß die Ferrodensimetrie interessante Anwendungsaspekte aufweist. Sie liefert objektive Diagnoseresultate. Der geräte-technische Aufwand ist relativ gering. Vom Diagnosepersonal werden keine Spezialkenntnisse verlangt. Die Diagnose kann unmittelbar vor Ort (Pflagestation, mobile Diagnoseeinrichtung) durchgeführt werden.

5. Zusammenfassung

Die vorgestellten Diagnoseverfahren gestatten eine Überprüfung unterschiedlicher tribologischer Systeme in landtechnischen Anlagen. Mit weiteren Prüfgeräten, wie zur Wand- und Schichtdickenmessung [7] oder zur Fluchtungsmessung [15], sind Voraussetzungen gegeben, um schrittweise ein Diagnosesystem für die Anlageninstandhaltung aufzubauen.

Vor einem Breitereinsatz dieser Geräte sind jedoch noch theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Diagnoseparametern, den Schädigungsgrenzwerten und den Toleranzbereichen der Zustands- und auch der Diagnoseparameter erforderlich.

Literatur

- [1] Verfahrenskatalog „Technische Diagnostik von Energieanlagen“. Ingenieurhochschule Zittau 1981.
- [2] Technologiemesse Technische Diagnostik. Kurzbeschreibung der ausgestellten Poster. KDT Frankfurt (Oder), 1986.
- [3] Schmidt, A.: Erarbeitung technischer Anwendungsbedingungen für die Endoskopie in der Prüfung maschinentechnischer Ausrüstungen. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Diplomarbeit 1985.
- [4] Kranemann, R.: Anwendungsmöglichkeiten der technischen Diagnostik für maschinentechnische Ausrüstungen stationärer Anlagen. agrartechnik, Berlin 33 (1983) 9, S. 410-412.
- [5] Rast, E.; Kranemann, R.: Temperaturmessung mit Strahlungspyrometern als Diagnoseverfahren für landtechnische Arbeitsmittel. agrartechnik, Berlin 36 (1986) 1, S. 36-37.
- [6] Schoof, M.: Untersuchungen zu Eignung der berührungslosen Temperaturmessung in der Anlageninstandhaltung. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Diplomarbeit 1986.
- [7] Stirl, A.: Instandhaltung stationärer maschinentechnischer Anlagen - Vorbereitung des Einsatzes verfügbarer Geräte der technischen Diagnostik. VEB Prüf- und Versuchsbetrieb Charlottenthal, Forschungsbericht 1985.
- [8] Sturm, A., u. a.: Wälzlagerdiagnostik für Maschinen und Anlagen. Berlin: VEB Verlag Technik 1985.
- [9] Neuhäuser, W.: Erarbeitung von Anwendungsbedingungen für Schwingungsmeßverfahren in der Anlagendiagnose. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Diplomarbeit 1985.
- [10] Jerusel, F.: Untersuchungen von Möglichkeiten zur Prüfung von Wälzlagern auf Wiederverwendung unter dem Gesichtspunkt der Automatisierung des Prüfwesens. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Diplomarbeit 1985.
- [11] Pritzkow, C.: Einkanalige vibroakustische Diagnose für den MC80. Institut für Leichtbau Dresden, 1984.
- [12] Vargovčik, F.: Untersuchungen zur Aussagefähigkeit der Frequenzanalyse von Maschinenschwingungen mit dem Mikrorechner MC80 in der Diagnose landtechnischer Anlagen. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Diplomarbeit 1986.
- [13] Westcott, V. C.: Verfahren und Vorrichtungen zur Untersuchung von in einem Fluid suspendierten Teilchen. BRD-AS 2241 143, G01 N 15/04. Anmeldetag: 22. Aug. 1972.
- [14] Bage, H.: Untersuchungen zur Diagnostizierbarkeit von Getrieben landtechnischer Anlagen durch Analyse der Schmieröle auf Verschleißpartikel. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Diplomarbeit 1986.
- [15] Schossée, R.: Messungen mit einem Fluchtungs-laser in Tierproduktionsanlagen. agrartechnik, Berlin 36 (1986) 11, S. 518-520.

A 4922

VEB Containerbau Leipzig

Betrieb des VEB Kombinat
Leipziger Metallbau
Linkelstr. 54
Leipzig
DDR - 7026
Telefon: 55126

LIMEX-BAU
EXPORT-IMPORT

Volkseigener Außenhandelsbetrieb der DDR
Breite Straße 12/17 Postfach 4
Berlin, DDR - 1020
Telefon 2 30 Telex 011 49 68/69

Container
Gattung 6-Typ EkpT-N
Einsatz als Transportcontainer,
Heizcontainer, Kleinstbüro, Lager-
raum, Prüflabor, u. ä.

● Leichtbauweise und hohe Lebensdauer
durch Aluminium-Werkstoff