

Verfahren zur Diagnose von Wälzlagerungen

Dr.-Ing. R. Ullmann, KDT, Ingenieurbüro für vorbeugende Instandhaltung Dresden

1. Aufgabenstellung

Wälzlager unterliegen wie andere Maschinenelemente während ihres Einsatzes verschiedenen Schädigungsprozessen. Diese Schädigungsprozesse, im Bereich der Landtechnik sind es vorwiegend Verschleiß- und Ermüdungserscheinungen [1][2], führen zu einem Abbau der Werkstofffestigkeit der Lagerelemente bzw. zu einer Verschlechterung der Laufeigenschaften des Lagers. Damit vermindert sich gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Lagerung. Ein Ausfall der Wälzlagerung ist so früher oder später unausbleiblich.

Für moderne landtechnische Arbeitsmittel muß jedoch eine hohe Einsatzzuverlässigkeit gefordert werden, um unplanmäßige Ausfälle auf ein Minimum zu begrenzen. Es gilt daher, die Verschleiß- und Ermüdungserscheinungen in einem Wälzlager rechtzeitig zu erkennen, um bereits vor einem plötzlichen Ausfall eine vorbeugende Instandsetzung durchführen zu können.

Ein Mittel zur demontagelosen Zustandsermittlung der Wälzlagerung sind die Verfahren der Technischen Diagnostik. Diese Verfahren beruhen auf der Erfassung der Laufeigenschaften eines Wälzlagers. Im wesentlichen eignen sich dafür drei Verfahren [1][2]:

- Messung der Luftschallabstrahlung der Wälzlagerung
- Messung der Körperschallabstrahlung der Wälzlagerung
- Messung der Auslenkung der Welle im Lager

Die Messung der Wellenauslenkung ist an einer Maschine nur mit großem Aufwand zu realisieren [2].

In diesem Beitrag soll über eine praktische Erprobung der Luft- und Körperschallmessung zur Wälzlagerdiagnose berichtet werden. Als Erprobungsmaschine dazu wurde der Mähdrescher E 512 gewählt, um Aussagen über die erreichbare Diagnosegüte bzw. Aussagen über die Grenzen der Anwendbarkeit der Verfahren zur Wälzlagerdiagnose zu erhalten.

2. Versuchsprogramm

Die Erprobung der Diagnoseverfahren erfolgte an den beiden Wälzlagerungen der Dreschtrommel des Mähdreschers E 512.

Nach der Art der Antriebsquelle der Dreschtrommel läßt sich das Versuchsprogramm in drei Komplexe einteilen:

a) Diagnose bei externem Antrieb

Der Antrieb der Dreschtrommel erfolgt durch einen Elektromotor. Sämtliche übrigen Baugruppen und Übertragungs-

einrichtungen des Mähdreschers befinden sich dabei im Stillstand.

b) Diagnose bei internem Antrieb

Der Antrieb der Dreschtrommel erfolgt durch den Dieselmotor des Mähdreschers, wobei alle nicht zur Kraftübertragung erforderlichen Antriebseinrichtungen und Baugruppen außer Betrieb sind.

c) Diagnose bei Antrieb der gesamten Maschine

Der Antrieb der Dreschtrommel erfolgt durch den Dieselmotor des Mähdreschers, wobei sämtliche Baugruppen und Antriebseinrichtungen in Betrieb sind.

Für die Lagerungen galten während der Diagnose folgende Betriebsbedingungen:

- Drehzahl der Dreschtrommel $n_T = 600$ U/min (± 10 U/min)
- Drehrichtung der Dreschtrommel: Linksdrehung, d. h. in Betriebsdrehrichtung
- Lagerbelastung: entsprechend der Belastung aus Gewicht-, Antriebs- und Unwucht Kräften der Trommel am jeweiligen Lager von konstanter Größe
- Lagersitz: Originalsitz im Originalflanschgehäuse (Neuzustand)
- Schmiermittel in den Wälzlagerungen: Wälzlagerfett Ceritol + K 3 TGL 14819, Neuzustand und Nennfüllung des Lagers ($62 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$).

Die Nachbildung des Schädigungszustands der Lagerungen erfolgte durch Einsatz entsprechender Prüflager. Als Prüflager, im weiteren kurz auch als Prüfling bezeichnet, wurden Neu- und Verschleißlager sowie pittingbehaftete Rillenkugellager des Typs 6309 verwendet. Die Gebrauchtlager wurden instand zu setzenden Maschinen entnommen.

In Tafel 1 sind die in der Erprobung eingesetzten Ermüdungslager zusammengestellt. Hierbei erfolgte eine Einteilung der Pittingbildung in verschiedene Gruppen. Außerdem sind in Tafel 1 die im weiteren verwendeten Abkürzungen für die Lagerschädigung aufgeführt worden.

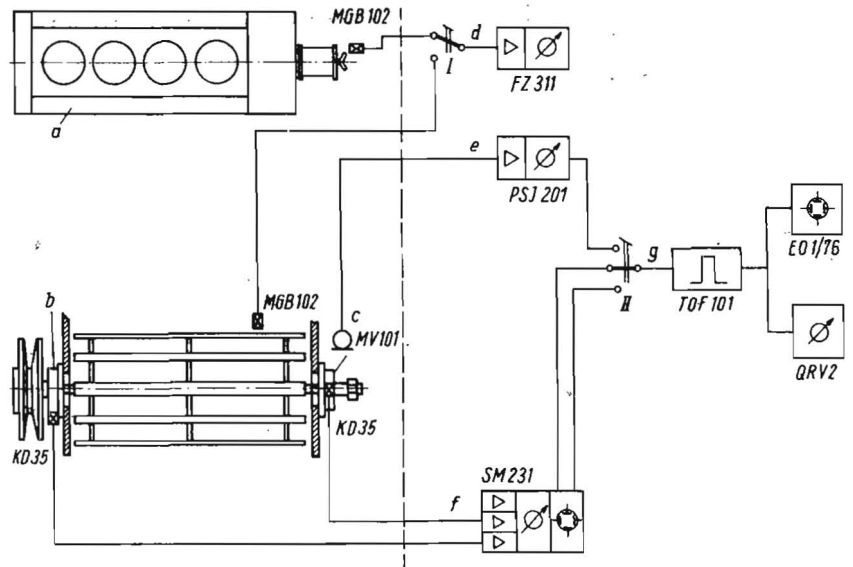
Unter punktförmiger Pittingbildung ist eine Pittingfläche zu verstehen, deren Durchmesser < 1 mm ist.

Als eigentliche Diagnoselagerung wurde die linke Dreschtrommellagerung (in Fahrtrichtung des Mähdreschers gesehen) verwendet, da diese Lagerung günstige Arbeitsbedingungen bietet. Diese Lagerung erhielt außerdem einen Spannhülzensitz,

Tafel 1. Sortiment an Ermüdungslagern (flächenhaftes Pittingausmaß durch Länge der Pittingfläche am Ringumfang in cm dargestellt)

Lfd. Nr.	Schädigung durch Pittingausbildung am Innenring	Wälzkörper	Außenring	Radialspiel nach dem Aushebeverfahren [1] μm	Auswertungssymbol
1	—	—	1 x punktförmig	30	A 0
2	—	—	1 Fläche von 1,2 cm	30	A 2
3	3 x punktförmig	—	—	95	B 0
4	1 x punkt- bis flächenförmig 1 cm	—	—	90	B 1
5	1 Fläche von 1,5 cm	—	—	40	B 2
6	gesamter Umfang	punkt- und flächenförmig	—	75	C 1
7	über Umfang verstreut	punkt- und flächenförmig	—	50	C 2
8	3 Flächen von je 0,5 cm	punkt- und flächenförmig	2 Flächen von je 0,5 cm	75	D 1
9	7 Flächen von je 1 cm	punktförmig	7 Flächen von je 1 cm	40	D 2
10	gesamter Umfang	punkt- und flächenförmig	4 Flächen von je 0,5...6 cm	90	D 3
11	über Umfang verstreut	punkt- und flächenförmig	7 Flächen von je 1 cm	45	D 4

Bild 1. Elektrische Meßeinrichtung zur Wälzlagerdiagnose am Mährescher E 512; a Dieselmotor 4 VD 14,5/12-1 SRW, b Gegenlager der Dreschtrammel, c Diagnoselager der Dreschtrammel, d Drehzahl, e Gesamtschalldruckpegel, f Körperschall, g Frequenzanalyse



so daß sich ein einfacher Lagerwechsel vollziehen ließ. Die rechte Trommellagerung wurde als Festlager ausgelegt, das Lager wurde direkt auf die Welle aufgezogen. Deshalb war am rechten Trommellager kein zu häufiger Lagerwechsel möglich, da dies zu einer Verminderung des Festsitzes des Wälzlagers auf der Welle geführt hätte.

3. Elektrische Meßeinrichtung

Als Diagnosekenngrößen wurden die Luftschall- und die Körperschallabstrahlung des Prüflagers gemessen. Ermittelt wurde jeweils das Gesamtschwingungsspektrum sowie das einer Frequenzanalyse zu unterziehende Schwingungsspektrum [1]. Die Drehzahlen der Dreschtrammel und des Dieselmotors wurden nach dem Impulsverfahren erfaßt (Bild 1).

Für die Körperschallmessung am Prüflager und am Gegenlager der Erprobungsbaugruppe wurden piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer vom Typ KD 35a (Metra Radebeul) verwendet. Die Befestigung der Aufnehmer erfolgte mit Hilfe von Haftmagneten an speziellen Auflageflächen der Lagergehäuse (Bild 2).

Das Aufnehmersignal wurde im Schwingungsmeßgerät SM 231 (VEB Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden) auf die Schwingungsgeschwindigkeit integriert und zu einer Frequenzanalyse weitergeleitet. Am Röhrenvoltmeter QRV 2 erfolgte eine Anzeige der Schwingungsamplitude des gesamten Körperschallspektrums bzw. des der Terz-Frequenzanalyse unterzogenen Schwingungsspektrums.

Die Luftschallmessung erfolgte jeweils an einem Meßpunkt, da eine annähernd symmetrische Schallabstrahlung der Prüflagerung zu verzeichnen ist (Bewertung des Pegels A1). Es wurden folgende Aufnehmerentfernungen zu den Prüflagerungen gewählt:

- linkes Dreschtrummellager (Diagnoselager) 10 cm
- rechtes Dreschtrummellager (Gegenlager) 50 cm (konstruktiv bedingt).

Bild 2 zeigt das am Diagnoselager aufgestellte Meßmikrofon. Vorweggenommen sei, daß mit dem Aufnehmerabstand von 50 cm am Gegenlager kaum Aussagen über den Schädigungszustand der Wälzlagerung getroffen werden konnten. Bei diesem Aufnehmerabstand war bereits ein hoher Störpegel von 92 dB A1 zu verzeichnen, der durch Antriebsgeräusche der Maschine sowie durch Turbulenzgeräusche der Dreschtrammel hervorgerufen wurde. Die Ablesung des Gesamtschalldruckpegels erfolgte am Schallpegelmessgerät PSI 201 (VEB Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden). Die Weiterverarbeitung des Luftschalls in Form einer Frequenzanalyse entsprach der des Körperschalls (vgl. Bild 1).

4. Erprobungsergebnisse

Bei der Diskussion der nachfolgenden Erprobungsergebnisse wird vorausgesetzt, daß keine Schädigung des Gegenlagers der

Dreschtrammel vorliegt. Der Fall der Pittingbildung beim Gegenlager wird am Schluß des Beitrags betrachtet. Variable Untersuchungsparameter sind somit an der Diagnoselagerung nur das Schadensausmaß des Wälzlagers sowie die Art des Antriebs der Erprobungsbaugruppe.

4.1. Diagnose bei externem Antrieb

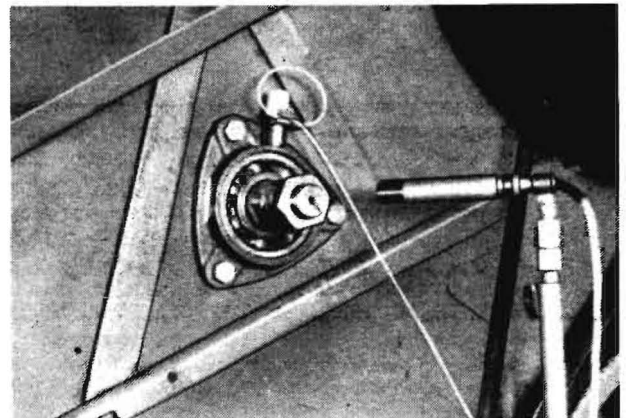
Bild 3 weist das Ergebnis der Messung des Luftschalls als Gesamtschalldruckpegel aus. Der gemessene Schalldruckpegel setzte sich dabei vorwiegend aus zwei Komponenten zusammen:

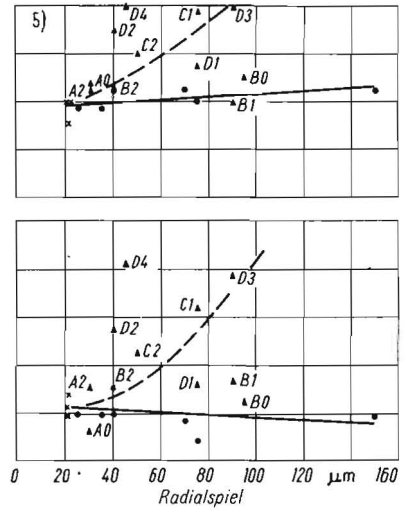
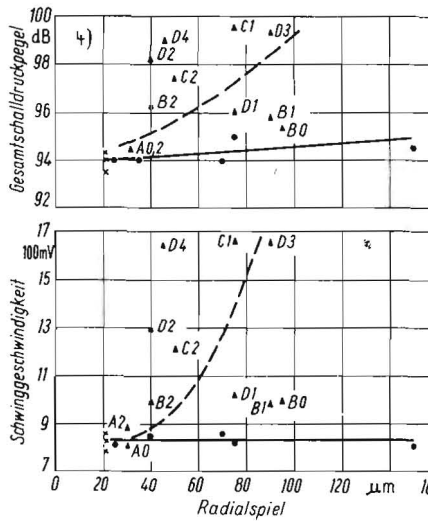
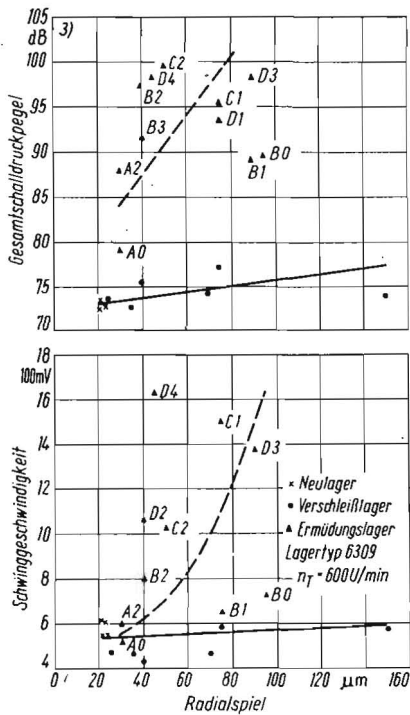
- Luftschall, hervorgerufen durch das Diagnoselager
- Luftschall, hervorgerufen durch Luftturbulenzgeräusche des Dreschtrummellaufs (Antriebsgeräusche sind mit 50 dB A1 am Diagnoselager vernachlässigbar)

Bei Neu- und Verschleißlagern als Prüflinge halten sich die beiden Luftschallkomponenten annähernd die Waage.

Mit steigender Prüflingsschädigung verändert sich dieses Verhältnis zugunsten des Lagergeräusches. Wie aus Bild 3 ersichtlich, ist ein geringes Ansteigen des Gesamtschalldruckpegels um etwa 1,5 dB mit zunehmendem Lagerverschleiß zu verzeichnen. Weit stärker ausgeprägt ist die Schalldruckerhöhung bei den Ermüdungsprüflingen, bei denen, beginnend mit der Pittingbildung auf dem Außenring (AO) bis zur Pittingbildung an allen Lagerelementen (D2, D3, D4), Werte bis zu 15 dB zu registrieren sind. Mit diesen quantitativen Pegelwerten ist eine eindeutige Diagnostizierung der Ermüdungsschädigung des Prüflagers möglich.

Bild 2. Meßwertaufnehmer am Diagnoselager





Bilder 3 bis 5. Einfluß der Prüflagerschädigung auf die Luftschall- und Körperschall-Linearwerte; Lagertyp 6309, $n_T = 600$ U/min (die Zeichenerklärung im Bild 3 gilt für alle Bilder)

Bild 3. Diagnose bei externem Antrieb

Bild 4. Diagnose bei internem Antrieb durch Dieselmotor

Bild 5. Diagnose bei Antrieb der gesamten Maschine, $n_{DM} = 1000$ U/min

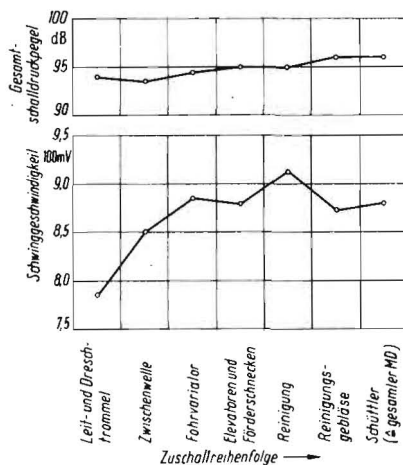


Bild 6. Störleistungsanalyse am Prüflager des MDE 512 (Körperschall-Linearwerte); $n_T = 600$ U/min, $n_{DM} = 1000$ U/min

Bild 3 zeigt die Abhängigkeit des Körperschall-Linearwertes des Prüflagers von der Schädigung des Prüflings. Unter dem Linearwert soll im folgenden das Gesamtschwingungsspektrum verstanden werden, d. h. die zur Schwinggeschwindigkeit integrierte Schwingungsamplitude des Prüflagerschwingungsspektrums.

Mit der Messung des Körperschall-Linearwertes unter den gegebenen Erprobungsbedingungen werden Ermüdungsschäden im Prüflager erst bei schon erheblichem Fortschritt der Lagerelementeschädigung erfaßt, da z. B. vollständig pittingbehaftete Prüflinge maximal nur das 1,5fache der Schwingungsamplitude der Neu- und Verschleißlager aufwiesen. Optimale Aussagen erbrachte die Körperschall-Frequenzanalyse. Je nach vorliegendem Schadensausmaß der Pittingbildung wurden in Frequenzbändern Amplitudenanstiege bis auf das 20fache im Vergleich zu den Verschleißprüflingen gemessen. Dabei hatte eine punktförmige Pittingbildung am Lauftring eine Amplitudenerhöhung hochfrequenter Frequenzbänder von 100 bis 260% zur Folge.

4.2. Diagnose bei internem Antrieb

Der 4-Zylinder-Dieselmotor der Erprobungsmaschine gestattete nach eigenen Messungen eine Drehzahlregelung im Bereich von 500 bis 2100 U/min. Für die Erprobung wurde eine Arbeitsdrehzahl gefordert, die folgende Bedingungen zu erfüllen hatte:

- minimale Schwingungsabstrahlung des Dieselmotors in Form von Luft- und Körperschall an die Erprobungsbaugruppe
- minimale Erregung von Bauteilen des Mähdreschers zu Eigenschwingungen
- stabiles Drehzahlverhalten des Dieselmotors
- Drehzahlhöhe, die einer quantitativen Diagnosedrehzahl entspricht.

Als geeignete Antriebsdrehzahl wurde $n_{DM} = 1000$ U/min gewählt.

Im Bild 4 wurde der am Prüflager ermittelte Körperschall-Linearwert über der Lagerschädigung aufgetragen. Im Vergleich zur Diagnose bei externem Antrieb liegen in diesem Falle die Absolutwerte des Körperschalls (Schwinggeschwindigkeit nach Bild 4) um rd. 50% höher, hervorgerufen durch die starke Störleistungseinwirkung des Dieselmotors. Eine Unterscheidung zwischen Lagern mit beginnender Pittingbildung und Neu- bzw. Verschleißlagern ist praktisch unmöglich, das zeigt sich bei den am Außenring pittingbehafteten Prüflingen.

Die Messung des Luftschalls als Linearwert und auch als Analysewert (vgl. Bild 3) sowie des Körperschall-Linearwertes erbrachte unter den vorliegenden Erprobungsbedingungen keine positiven Ergebnisse. Diagnostische Aussagen ließen sich aus folgenden Gründen nicht bilden:

- Erhebliche Schwingungsüberlagerungen der Antriebsquelle der Erprobungsbaugruppe auf das Prüflingschwingungsspektrum und damit bereits bei Neu- und Verschleißlagern quantitativ hohe Schwingungsspektren.
- Erfassung einer Pittingbildung im Wälzlager erst bei schon erheblichem Schadensfortschritt.

Bei einer optimalen Diagnose soll aber eine Pittingbildung schon im frühestmöglichen Stadium erkannt werden.

4.3. Diagnose bei Antrieb der gesamten Maschine

Der Körperschall-Linearwert erbrachte auch hier keine positiven Ergebnisse (Bild 5). So ließen sich pittingbehaftete Lauftringe überhaupt nicht von den Verschleißprüflingen unterscheiden. Selbst ein vollständig ermüdeter Prüfling wurde nicht erfaßt. Das

weitere Ansteigen der Störgeräusche durch Hinzuschaltung aller Baugruppen des Mähreschers verminderte ebenso die Aussagefähigkeit der Luftschallmessung. Bild 6 veranschaulicht dies für den Gesamtschalldruckpegel des Prüflagers. Die Werte für Lager mit pittingbehafteten Laufringen ließen sich nicht von denen der eingesetzten Verschleißlager unterscheiden, während erst eine weit fortgeschrittene Schädigung der Lagerelemente feststellbar war.

Im übrigen gelten die gleichen Aussagen wie bei der Messung des Körperschall-Linearwertes. Die durchgeführte Terz-Frequenzanalyse des Luftschalls ermöglichte gleichfalls keine Aussagen über den Zustand des Prüflagers.

Insgesamt fiel so die Diagnosegröße Luftschall bei der Erprobung der Diagnose „gesamte Maschine“ negativ aus. Bild 6 vermittelt einen quantitativen Maßstab für den Einfluß der Störschwingungsquellen auf die Prüflagerung während des Laufs des gesamten Mähreschers. In der aufgeführten Reihenfolge erfolgte eine Zuschaltung der jeweiligen Baugruppen der Erprobungsmaschine. Dabei wurden die beiden Lagerungen der Dreschtrommel mit Neulagern versehen, wobei als Antriebsquelle der Dieselmotor diente. Wie Bild 6 ausweist, wurde nur ein geringer Luftschallanstieg von 2 dB gemessen, da der überwiegende Schallanteil der einzelnen Baugruppen und Antriebe direkt an die Umgebung abgestrahlt wird, wobei jedoch nur ein geringer Anteil zur Meßstelle des Prüflagers gelangte.

Der Maximalwert des Körperschall-Linearwertes wurde durch die Baugruppe Reinigung erreicht, während bei weiterer Hinzuschaltung der restlichen Aggregate des Mähreschers ein Abfall zu verzeichnen war. Beim Laufen der gesamten Erprobungsmaschine ergab sich so eine Linearwerterhöhung von 13% im Vergleich zum alleinigen Lauf des Dieselmotors mit der Zwischenwelle und der Dreschtrommel.

4.4. Diagnose beider Wälzlagerungen der Erprobungsbaugruppe
Bei einer Welle mit zwei Lagerungen erfolgt durch beide Lagerungen eine Schwingungsabstrahlung. Prinzipiell kann sich die Schwingungsenergie einer Wälzlagerung auf folgenden Wegen ausbreiten:

— Luftschall an die Umgebung

- Luftschall zum Gegenlager
- Körperschall über den Rotor
- Körperschall über das Maschinengehäuse bzw. über das Fundament
- Umwandlung von Schwingungsenergie in Wärmeenergie u. a. [3][4].

Auf diesen Ausbreitungswegen wird ein beträchtlicher Anteil der Schwingungsenergie des Prüflagers auf das Gegenlager und umgekehrt übertragen, wo es je nach Schadensausmaß der Lagerung zu Schwingungsüberlagerungen kommt.

Die Erprobung zeigte, daß eine Diagnostizierung des Gegenlagers am Prüflager nur bei weit fortgeschrittener Ermüdungsschädigung des Gegenlagers möglich ist.

Es wird empfohlen, praktisch beide Lagerungen einer Welle zu prüfen. Dabei reicht die Aussage des Vorhandenseins einer Ermüdungsschädigung in der Diagnosebaugruppe. Das Bestimmen der geschädigten Lagerung ist nicht erforderlich, da bei einer erforderlichen Instandsetzung in der Praxis beide Lagerungen demontiert werden.

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde über die Erprobung von Diagnoseverfahren für Wälzlagerungen am Mährescher E 512 berichtet. Dabei konnten durch eine Körperschallmessung Ermüdungsschäden in den Wälzlagerungen ausgewiesen werden. Sämtliche Aussagen resultieren aus den beschriebenen Erprobungsbedingungen. Qualitativ sind die Ergebnisse auch auf Lagerungen anderer Maschinen übertragbar.

Literatur

- [1] Ullmann, R.; Ihle, G.: Wälzlagerschäden und Methoden zu ihrer Erfassung in der Landtechnik. agrartechnik 23 (1973), H. 9, S. 416—422.
- [2] Ullmann, R.: Verfahren zur demontagelosen Erfassung von Ermüdungserscheinungen in Wälzlagern. TU Dresden, Sektion Kfz-, Land- und Fördertechnik, Dissertation 1974 (unveröffentlicht).
- [3] Reichardt, W.: Grundlagen der technischen Akustik. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig 1968.
- [4] Cremer, L.; Heckl, H.: Körperschall, Berlin/Göttingen/New York: Springer Verlag 1967. A 1103

Zahlen und Fakten zum Landmaschinenbau in der Volksrepublik Bulgarien

Dr. rer. oec. I. Ivanov

Wissenschaftliches Forschungsinstitut für Probleme der sozialistischen ökonomischen Integration bei der Kommission für ökonomische und wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit beim Ministerrat der VR Bulgarien

1. Entwicklung des bulgarischen Landmaschinenbaus

Die breite ökonomische und wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit mit den sozialistischen Ländern, insbesondere mit der UdSSR, ermöglichte der VR Bulgarien, in nur drei Jahrzehnten einen modernen Landmaschinenbau zu schaffen. Kennzeichnend für diese Produktion ist, daß sie sich sehr rasch und auf einem hohen Niveau des Maschinenbaus und des allgemeinen Industriepotentials entwickelt. So ist im Jahr 1974 im Vergleich zu 1939 die industrielle Bruttoproduktion auf das 51fache gestiegen und allein die des Maschinenbaus auf das 694fache. Der Maschinenbau, der sich in der VR Bulgarien endgültig als führender Industriezweig durchgesetzt hat, erzeugte im Jahr 1974 22,9% der Industrieproduktion und 40% des Exports des Landes, und im Jahr 1975 soll der Maschinenbau 15 bis 16% des Nationaleinkommens produzieren. Der Traktoren- und Landmaschinenbau hat sich zu einem wichtigen, strukturbestimmenden Zweig des Maschinenbaus entwickelt. Die intensive Entwicklung der Produktion von Traktoren und verschiedenen Arten von Landmaschinen in Bulgarien wird durch die Notwendigkeit des weiteren Aufbaus der materiell-techni-

schen Basis und durch die industriemäßige Produktion in der Landwirtschaft bedingt. Der Aufschwung des Landmaschinenbaus ist eng verbunden mit der Erhöhung des Grades der Konzentration der landwirtschaftlichen Produktion, mit ihrer Intensivierung, mit der Vertiefung der Spezialisierungs- und Kooperationsprozesse. Auf dieser Grundlage ist eine Erhöhung der Erträge in der pflanzlichen Produktion und der Produktivität in der tierischen Produktion zu erreichen.

Unter den Bedingungen der sozialistischen ökonomischen Integration wurde eine Reihe von Produktionsbereichen mit perspektivischem Charakter beschleunigt entwickelt. Darunter nehmen die Maschinen für den Weinbau (Bild 1), den Obst- und Gemüsebau, für den Tabakbau, die Mäseerntemaschinen, die Maschinen zum Einbringen, Lagern und zur Verarbeitung der Futterkulturen, die Drillmaschinen, zahlreiche Maschinen der Bewässerungstechnik (besonders Wasserpumpen, Pumpstationen und andere), Maschinen und Ausrüstungen für die Mechanisierung der Prozesse in der tierischen Produktion usw. einen wichtigen Platz ein. Für diese und andere Produktionsbereiche sind der hohe Grad der