

XI OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA TEORII MASZYN  
I MECHANIZMÓW11th POLISH CONFERENCE ON THE THEORY OF MACHINES  
AND MECHANISMS

27-30. 04. 1987 ZAKOPANE

Jörg MÜLLER

Lehrstuhl Getriebetechnik der Sektion Landtechnik,  
Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, DDR

## MÖGLICHKEITEN UND PROBLEME DER DIAGNOSE GETRIEBETECHNISCHER BAUGRUPPEN

**Zusammenfassung.** Die Aufgabe der Technischen Diagnose besteht im Feststellen des Schädigungszustandes von Baugruppen oder Einzelteilen mit dem Ziel, rechtzeitig Massnahmen für ihren Ersatz oder ihre Instandsetzung einleiten zu können, um einerseits unvorhergesehene Stillstandszeiten oder schwerwiegende Nachfolgeschäden zu vermeiden und um andererseits die Instandsetzbarkeit der betreffenden Bauteile noch zu gewährleisten. In einigen Zweigen der Technik - wie beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt - sind beachtliche Fortschritte erzielt worden und der serienmassige Einsatz von Diagnosesystemen für elektronische Baugruppen selbstverständlich. Die gegenwärtige Situation für getriebetechnische Baugruppen soll in vorliegendem Beitrag beleuchtet werden.

### 1. Begriffserläuterung

Unter technischer Diagnose werden alle Vorgänge verstanden, die zum Ermitteln des Zustandes eines technischen Arbeitsmittels gehören, wobei der Begriff "Zustand" unmittelbar auch seine Bewertung mit Blick auf die in Rechnung zu setzenden Einsatzbedingungen beinhaltet. Es wird unterschieden [1] zwischen: Funktionsdiagnose, Schädigungsdiagnose, Komplexdiagnose, Tiefendiagnose, Teil- und Gesamtdiagnose, deren Aufgabenbereiche Tafel 1 stichwortartig andeutet.

Sämtliche Verfahren setzen die Kenntnis von ein oder mehreren Parametern voraus, die den Schädigungszustand des betreffenden, zu diagnostizierenden Arbeitsmittels kennzeichnen - sogenannte "Schädigungskenngrössen" -, und von denen eine oder mehrere als "Diagnoseparameter" geeignet sind; das sind schliesslich solche, die einer messtechnischen und rechentechnischen Ermittlung zugänglich sind und unter realisierbaren Diagnosebedingungen den Schädigungszustand unmittelbar erfassen lassen. Grundsätzlich kann erst

## Einteilung der Diagnoseverfahren

| Begriff             | Kennzeichen-<br>des Merkmal          | Massnahmen  |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| Funktionsdiagnose   | Diagnose-<br>parameter               | Überprüfen der Funktionsfähigkeit   |
| Schadigungsdiagnose |                                      | Ermitteln des Schädigungszustandes  |
| Komplexdiagnose     | Umfang der<br>Diagnose-<br>parameter | Feststellen des Allgemeinzustandes  |
| Tiefendiagnose      |                                      | detailliertes Überprüfen  |
| Teildiagnose        |                                      | Überprüfen einzelner Teile oder Baugruppen eines technischen Arbeitsmittels |
| Gesamtdiagnose      |                                      | Überprüfen eines gesamten technischen Arbeitsmittels                        |

dann von einer Diagnose im umfassenden Sinne gesprochen werden, wenn - wie bereits angedeutet - eine Bewertung des Zustandes eines zu diagnostizierenden Objektes vorgenommen und eine Aussage über seine Relation zu einem bestimmten Schädigungsgrenzwert getroffen werden kann, so dass mit Hilfe dieser Aussage die Entscheidung über den möglichen Verbleib des Diagnoseobjektes in weiterer Nutzung oder über seine notwendige Aussonderung möglich wird. In vollkommener Form gelingt diese als Restnutzungsdauerprognose bezeichnete Aussage quantifiziert nur, wenn das Schädigungs-Nutzungsdauer-Verhalten unter den vorgesehenen Einsatzbedingungen bekannt ist. Häufig ist jedoch ein ökonomischer Gewinn auch dann schon zu erwarten, wenn der Diagnosebefund eine mögliche Funktionsuntüchtigkeit einer Baugruppe für eine Kampagne oder bis zur nächsten vorgesehenen Instandhaltungsmassnahme mit bestimmter Sicherheit gewährleistet.

## 2. Zur Entwicklung von Diagnoseverfahren

Diagnosebedingungen beziehen nicht zuletzt die Frage nach ökonomischer Realisierbarkeit mit ein, deren Überprüfung zweckmässigerweise zu Beginn der Entwicklung eines Diagnoseverfahrens nicht ausser acht gelassen werden sollte, denn die "Möglichkeit zur Diagnose einer getriebetechnischen Baugruppe" bedeutet stets eine ökonomische Möglichkeit, und es gilt im voraus die Aufwendungen - einschliesslich Ausfallzeit - für die Anwendung eines Diagnoseverfahrens mit evtl. Teilinstandsetzung abzuschätzen und mit denjenigen, zu vergleichen, die zur Beseitigung von unvorhergesehen Schäden bei Anwendung der Instandsetzung nach starrem Zyklus aufzuwenden sind; denn nicht in jedem Falle kann eine Diagnosewürdigkeit von vornherein als gegeben angesehen werden.

Die Ermittlung von Schädigungskenngrössen steht am Anfang jeder Entwicklung von Diagnoseverfahren. Hierzu gehören: Bauteilabmessungen, Ober-

flächenbeschaffenheit, Umweltbedingungen, Riss, Bruch, mikrogeometrische Veränderungen, Gelenkspiele, Pressungen, spezielle Kenngrößen wie Federdämpfer-Kennwerte, Temperatur, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnisse, Leistungs- und Energieparameter (Verlustleistung, Wirkungsgrad, Drehmoment, Drehzahl, Verlustwärme), akustische Signale einschliesslich Laufruhe; Schmiermittelzustand. Zum Ermitteln der zutreffenden Schädigungskennwerte bedient man sich zweckmässigerweise der systematischen Schädigungsanalyse, mit deren Hilfe zielgerichtet, in einzelnen Etappen Schadensstellen von massgebendem Einfluss eliminiert sowie Primär- und Nachfolgeschäden klassiert werden können und sich nach Aufstellen des Wirkungsmechanismus der Schädigung schliesslich als Diagnoseparameter geeignete Schädigungskennwerte ableiten lassen. Die letzte Etappe umfasst das quantifizierte Bestimmen vom Schädigungs-Nutzungsdauer-Verhalten sowie von Schädigungsgrenzwerten [2, 3].

### 3. Diagnoseverfahren für getriebetechnische Baugruppen

Die Entwicklung von Diagnoseverfahren haben vor allem diejenigen Institutionen für Instandhaltung vorangetrieben, deren Aufgabe im permanenten Betreuen gleichartiger mobiler Maschinen (z.B. Landmaschinen) oder hochinvestiver Anlagen (z.B. Kraftwerke) besteht. Tafel 2 vermittelt eine Übersicht über bekannte oder in Vorschlag gebrachte objektive Verfahren zur Diagnose von Getrieben und ihre darin multivalent eingesetzten Baugruppen mit Bezug auf in Betracht kommende Diagnoseparameter. Ein Einschätzen der Anwendbarkeit genannter Diagnoseverfahren bedarf eines zielgerichteten Einbeziehens des jeweiligen Anwendungsfall.

Tafel 2

Einrichtungen zur objektiven Diagnose (nach [4])

| Diagnoseparameter                                      | Hilf- und Messeinrichtungen  |
|--|--|
| Oberflächen  | Endoskope  |
| Geräusche  | Stethoskope  |
| Temperaturbereiche                                     | Temperaturindikatoren  |
| Lagerspiel   | Messuhr und Anpasseinrichtungen, induktive bzw. Wirbelstrom-Wegaufnehmer   |
| Verdrehspiel   | mechanische und elektrische Verdrehspielmess-einrichtungen   |
| Tragbild, Gestaltabweichung                            | Abdruckmittel, Form- und Rauheitsmessgeräte  |
| Dehnung, Spannung                                      | Dehnungsmesstechnik, Spannungsoptik  |
| Vibroakustische Signale, schwingungstechnische Grössen | Schwingungsmessplätze mit Auswerteverfahren  |
| Abriebprodukte   | Automabsorptionsspektroskop, elektromagnetisches Konzentrationsmessgerät, radioaktive Isotope/Strahlungsintensitätsmessgerät |
| Temperatur   | Mechanisch/elektrische Temperaturmesseinrichtungen   |

Die Mehrzahl der Diagnoseparameter beziehen sich auf Grössen, die verschleissbedingte Abnutzung kennzeichnen. Neben zahlreichen mechanischen und elektrischen Verfahren zum Bestimmen geometrischer Veränderungen werden in zunehmendem Masse vibroakustische Verfahren in die Entwicklung einbezogen; diese haben den unbestreitbaren Vorteil einer multivalent einsetzbaren Gerätetechnik, jedoch bedarf die Algorithmierung des Zusammenhanges "Schädigung in Abhängigkeit von Nutzungsdauer sowie Einsatzbedingungen" - insbesondere wegen zu klärender physikalischer Abhängigkeiten - beträchtlichen Aufwand [9], so dass bisher für die Anwendung vibroakustischer Diagnoseverfahren empfohlen werden musste, das akustische Diagnosesignal in Betracht kommender Getriebe bereits im Neuzustand zu erfassen, seine Veränderungen dann während deren Einsatzes zu verfolgen und beim extremen Verändern schliesslich die entsprechende Instandhaltungsmassnahme zu empfehlen, die zunächst meist im Demontieren des Getriebes und Feststellen der Ursache für die Veränderung des Signales liegt. Eine Verfahrensweise wie sie für unvestitionsintensive Aggregate realisierbar ist, aber gegenwärtig kaum für in hoher Stückzahl eingesetzte mobiler Technik; für diese Fälle ist die Kenntnis der Diagnosekennlinie der betreffenden Baugruppe Voraussetzung, wenn einfache, wenig aufwendige Handhabung erwartet wird.

Nach vorliegender Information sind gegenwärtig keine Entwicklungen abgeschlossen, die eine Komplex-Diagnose (z.B. mit Hilfe Geräuschpegelmessung, Verdrehspielmessung) mit hoher Sicherheit zu einem beliebigen Diagnosezeitpunkt und dabei auch eine Aussage über noch mögliche Restnutzungsdauer des Objektes (Restnutzungsdauerprognose) gestattet. Ursache dafür ist weniger die notwendige, gegebenenfalls auch aufwendige Messtechnik als vielmehr die Unkenntnis der quantifizierten Abhängigkeit des Schädigungs-Nutzungsdauer-Verhaltens unter Berücksichtigung jeweiliger Einsatzbedingungen des Diagnoseobjektes. Damit sind auch weitgehend optimale Schädigungsgrenzwerte unbekannt. Des weiteren gilt zu bedenken, dass beim Festlegen von Aussonderungsgrenzen keineswegs nur von den funktionellen Zusammenhängen des betreffenden Aggregates ausgegangen werden darf, sondern vielmehr auch die Frage einer Regenerierbarkeit auszusondernden Bauteile im Blick zu halten ist; denn es kann durchaus sein, dass eine Instandsetzbarkeit eines Bauteiles nur bis zu einem bestimmten Abnutzungszustand möglich ist.

#### 4. Beispiele einfacher mechanischer Diagnosetechnik

Ist keine bewährte Diagnosetechnik einsetzbar oder liegen keine eigenen Erfahrungen vor, empfiehlt sich zunächst mit der Entwicklung von mechanischen Diagnoseverfahren zu beginnen, die relativ einfach messbare Schädigungskenngrössen (z.B. Spielgrössen, Veränderung von Abmessungen) als Diagnoseparameter zugrunde legen. Für zwei getriebetechnische Baugruppen soll entwickelte Diagnosetechnik vorgestellt werden.

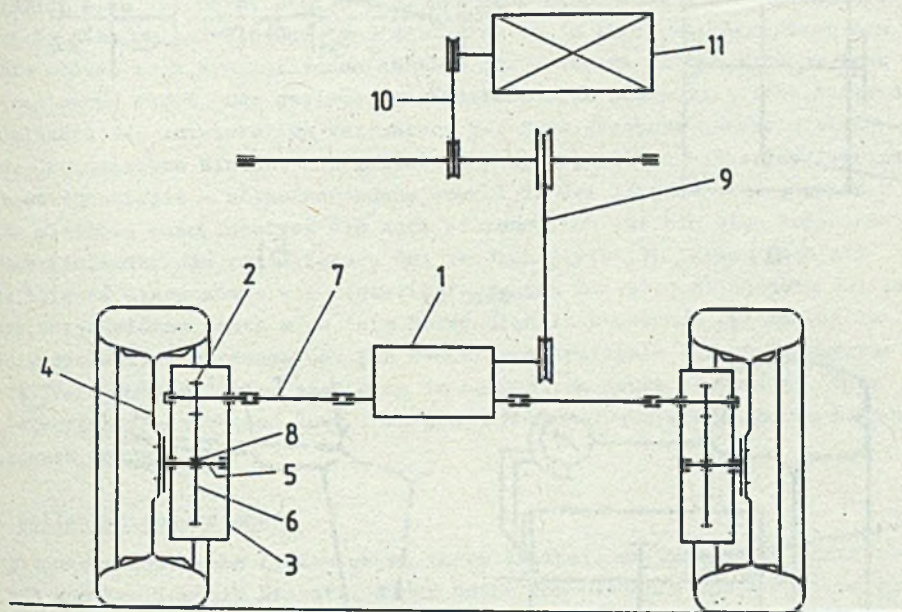
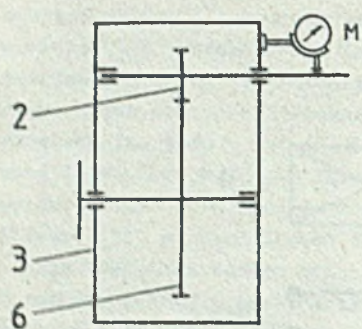


Bild 1

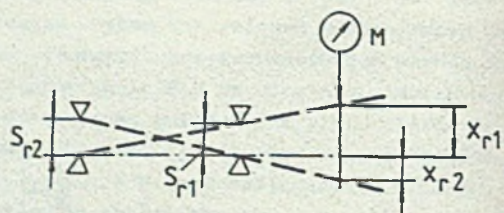
#### 4.1. Einstufiges Rädergetriebe

Der mechanische Fahrtrieb von Halmgüterntemaschinen ist mit einstufigen Rädergetrieben, dem sogenannten "Portalgetriebe" ausgerüstet (Bild 1). Um die Instandsetzungskosten zu minimieren, wird angestrebt, den Schädigungszustand der Portalgetriebe ohne deren Demontage zu bestimmen. Durchgeführte systematische Schädigungsanalyse [8] für dieses Getriebe wie aus, dass Schäden an Lagern der Geradstirnwelle (2, Bild 1) sowie der Flanschswelle (5, Bild 1) dominieren. Abnutzung an der Verzahnung - wie Verschleisserscheinungen, Pittings, Brüche infolge zwischengequetschter Bruchstücke und Gehäuseschäden - liessen sich als Nachfolgeschäden unzulässig hoher Spiele sowie schadhafter Einzelteile der Wälzlager (zerstörte Wälzkörper, Käfige, Laufringe) eliminieren.

Eine speziell entwickelte, einfache mechanische Einrichtung gestattet sowohl Radialspiel der Geradstirnwelle als auch der Flanschswelle zu bestimmen; zum Bestimmen der erstgenannten Spielgrösse wird entsprechend Bild 2 an der Geradstirnwelle nacheinander in entgegengesetzter Richtung

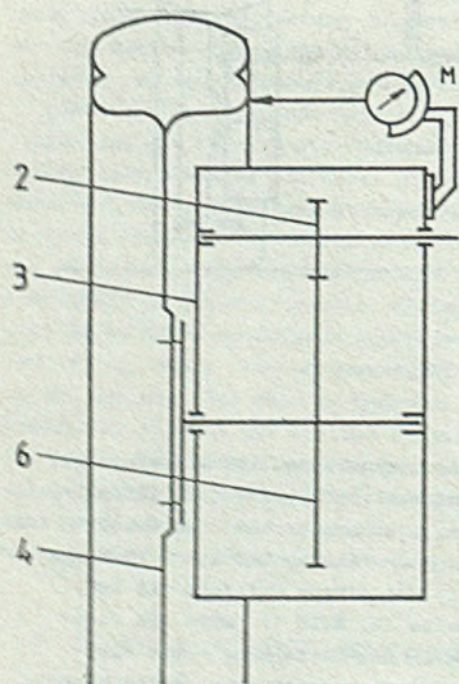


a)

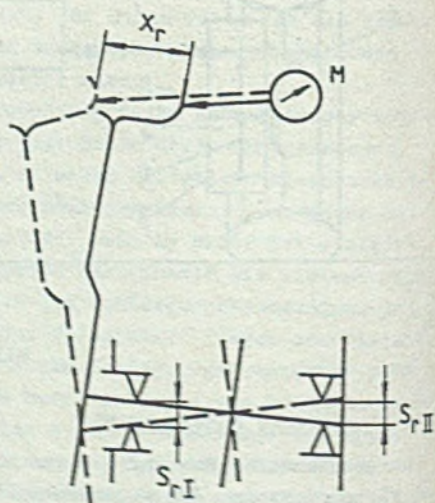


b)

Bild 2



a)



b)

Bild 3

eine gleich grosse Diagnosekraft aufgebracht; mit Hilfe des an der Messuhr angezeigten Wertes lässt sich die vorhandene Lagerspielgrösse errechnen. Das Lagerspiel (Summenspiel) der Flanschwellen ermittelt sich analog für ihre beiden Extremlagen über die mittels Messuhr am Felgenhorn ablesbare Hubgrösse (Bild 3); dabei stellt sich die eine Extremlage der Flanschwellen selbsttätig durch das Eigengewicht der Maschine in ihrer Gebrauchslage ein und die andere nach hydraulischen Anheben der Maschine durchs Eigengewicht des kompletten Rades. Der geringe, gerätetechnische sowie zeitliche Aufwand beim Einsatz des entwickelten Verfahrens zur Spieldiagnose gewährleistet seinen ökonomischen Einsatz und gestattet - eingepasst in bisherige Instandsetzungstechnologie - seine Anwendung sowohl in der Instandsetzung grosser Serien gleichen Maschinentyps als auch gelegentlich für einzelne Maschinen.

Auch Einrichtungen zum Erfassen des Verdrehspiels [8] lassen sich mit wenig Aufwand einsetzen - wie eigene Erfahrungen bestätigen-, jedoch sollte dieser Entscheidung stets eine ihre Notwendigkeit sichernde systematische Schädigungsanalyse vorausgehen. Ein Bedarf zum Ermitteln des Diagnoseparameters "Verdrehspiel" wird sich dann in besonderem Masse einstellen, wenn die betreffenden Maschinen über ihre projektierte Grenznutzungsdauer hinaus eingesetzt werden.

#### 4.2. Rollenkettengetriebe

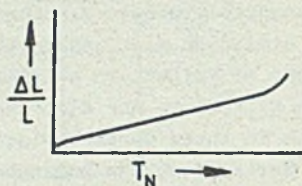
Rollenkettengetriebe finden wegen ihrer zahlreichen Vorzüge in stationärer und mobiler Technik Einsatz. Einer Reihe von Ursachen wegen [10] weisen Rollenkettengetriebe insbesondere bei ihrem Einsatz in mobiler Technik eine höhere Schadenshäufigkeit mit grösserer Streubreite als die Bauteile anderer Getriebebaugruppen auf, wobei unvorhergesehene Ausfälle nicht nur kostenaufwändige Nachfolgeschäden an anderen Bauteilen der betreffenden Maschinen, sondern auch wegen ausfallbedingter Stillstandszeiten erhebliche zusätzliche Kosten verursachen. Um diese Situation zu vermeiden, wird sicherheitshalber (oder besser gesagt "unsicherheitshalber") zu früh ausgesondert, so dass wiederum der Ersatzbedarf der genannten Bauteile unnötig ansteigt.

Das Diagnostizieren des Schädigungszustandes von Rollenketten und Kettenrädern bietet damit die Voraussetzung, unvorhergesehene Ausfälle sowie zu frühes Aussondern zu vermeiden. Im Ergebnis durchgeführter systematischer Schädigungsanalyse [11] bieten sich folgende Diagnoseparameter an:

##### - Rollenkette

Qualitäts- und einsatzbedingte Abnutzung der Rollenkette führt im Laufe ihrer Nutzungsdauer  $T_N$  zu ihrer Längung  $\Delta L$  (Bild 4a); von einem bestimmten Schädigungszustand ab ist die Funktionssicherheit des Getriebes nicht mehr gegeben, die Kette steigt in der Verzahnung des Kettenrades auf, setzt sich im weiteren auf zugeordnete Zahnköpfe (Beschädigungen am Zahnkopf sind die Folge) und springt schliesslich über. Die hierdurch bedingte

a)



b)



c)



Bild 4

überhöhte Zugbeanspruchung im Rollenkettengetriebe führt zum Gewaltbruch der Laschen, und damit zum Zerreißen der Rollenkette mit nachfolgender Schädigung nicht nur der Kettenradverzahnung, sondern auch anderer Bauteile der betreffenden Maschine.

Als Diagnoseparameter bietet sich folglich die Zunahme der Kettenlänge an, die identisch ist mit der relativen Abweichung der mittleren Ketten-

teilung  $\frac{\Delta L}{L} = \frac{f}{t} \frac{t_m}{t}$ ; ab einer bestimmten Längenzunahme (Aussonderungsgrenzmass) ist die Rollenkette auszusondern.

- Kettenräder

Naturgemäss unterliegt auch die Verzahnung eines Kettenrades einer Abnutzung (Bild 4b), wobei sich vielfach die Gepflogenheit eingebürgert hat, dieser Schädigung bis zum nahezu vollständigen Abnutzen des Zahnes keine nennenswerte Beachtung zu schen-

ken, so dass Kettenräder mit geschädigten Zahnprofilen - wie in Bild 4c gezeigt - nicht selten im Einsatz zu finden sind. Beim Zusammenarbeiten eines derart geschädigten Kettenrades mit der Rollenkette ist wegen der stark gestörten Eingriffsverhältnisse mit einer Zunahme des Verschleisses sowohl von Rollenkette als auch von Kettenrad zu rechnen. Als Diagnoseparameter bietet sich die Abnutzung des Zahnprofils  $f_s$  im Teilkreis an.

Wegen der Notwendigkeit, während der Einsatzkampagne den Schädigungsstatus des Rollenkettengetriebes möglichst ohne aufwendige Montage bestimmen zu können, wurde spezielle mobile Diagnosetechnik entwickelt; ihr Einsatz als stationäre Technik ist darüber hinaus gegeben. Bild 5 zeigt den Prototyp des Messgerätes für relative Kettenlängenzunahme während seines Einsatzes am Rollenkettengetriebe einer modernen Landmaschine; an farbiger Skala lässt sich der Schädigungsstatus der Rollenkette ablesen und über ihre Weiterverwendung oder Aussonderung entscheiden.

Den Einsatz des Messgerätes für Abnutzung des Zahnprofils verdeutlicht Bild 6 (der besseren Anschaulichkeit wegen am demontierten Kettenrad dargestellt); das Gerät ist mit entsprechenden Auflagestücken versehen, die in die Zahnlücken gelegt werden, die dem Prüfzahn benachbart sind. Zeigerausschlag gibt Auskunft über Schädigungsstatus, und damit mögliche Weiterverwendung oder Aussonderung des Kettenrades.



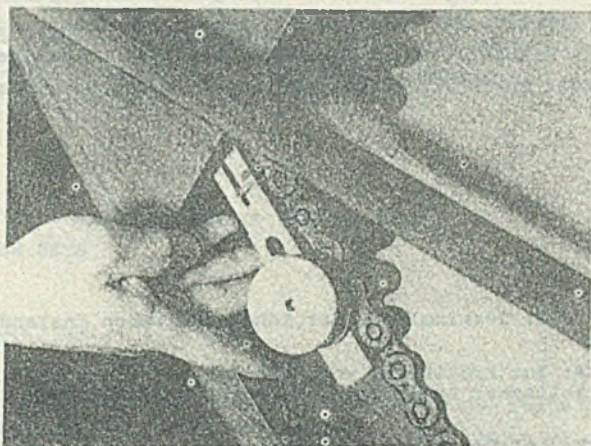


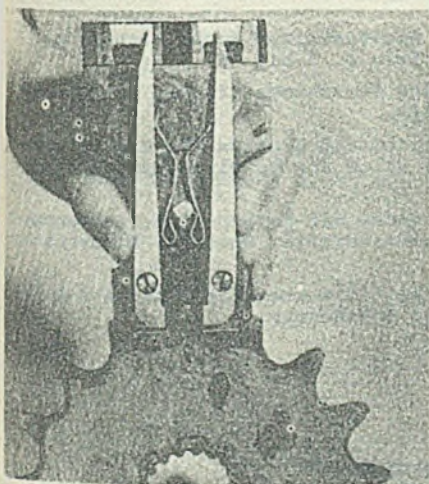
Bild 5

### 5. Ausblick

Die Forderung nach Diagnose getriebetechnischer Baugruppen wird im Zusammenhang mit der Steigerung der Zuverlässigkeit damit ausgerüsteter Aggregate mit unüberhörbarem Nachdruck seitens deren Nutzer gestellt; im Extremfall - besonders seitens japanischer Maschinennutzer - wird sogar die Forderung nach "selfcuringmaintenance" [5] erhoben, - einer Instandhaltungsmethode die gewährleistet, dass nach Erreichen eines bestimmten Schädigungsgrenzwertes selbsttätig Massnahmen zur Instandsetzung ausgelöst werden.

Dabei ist auf Grund des hohen Stan-

Bild 6



des der Mikroelektronik die rechentechnische und automatische Verarbeitung von Diagnosewerten weniger problematisch als vielmehr das Ermitteln geeigneter Diagnoseparameter sowie das Bestimmen der quantifizierten Abhängigkeit des Schädigungsverhaltens eines Diagnoseobjektes von Nutzungsdauer und Einsatzbedingungen, um schliesslich den quantifizierten Aussonderungsgrenzwert festlegen und die zum Diagnosezeitpunkt vorhandene Restnutzungsdauer mit hoher Aussagesicherheit prognostizieren zu können. Die Algorithmierung dieser Zusammenhänge bedarf intensiver, umfangreicher Forschungsarbeit, um

in Betracht kommende physikalische Vorgänge der Schädigung unter Einbeziehen neuester Erkenntnisse maschinenbaulichen Grundlagenwissens wie Festkörpermechanik einschliesslich Schwingungstechnik, Maschinendynamik, Betriebsfestigkeit sowie Tribologie, Werkstoffkunde, Getriebetechnik zu klären [7].

#### LITERATUR

- [1] TGL 22278/02: Terminologie der landtechnischen Instandhaltung. Grundbegriffe.
- [2] J. MÜLLER: Zur Ermittlung von Schädigungsgrenzen getriebetechnischer und hydraulischer Baugruppen. Maschinenbautechnik 27 (1978) 3, S. 117 bis 114.
- [3] J. MÜLLER: Leitblatt zum Wirkungsmechanismus der Schädigung Maschinenbautechnik 29 (1980) 4, S. 156 bis 157.
- [4] J. MÜLLER und D. TROPPENS: Möglichkeiten und Probleme der Getriebe-diagnose. Agrartechnik 33 (1983) 12, S. 544 bis 546.
- [5] A. MÜTZENBERG: Technische Diagnostik - Fachtagung Technische Diagnostik 1985 des SVI, Bern, S. 3 bis 4.
- [6] G. MERHAR: Technische Diagnostik am Neu-Technikum Buchs Fachtagung Technische Diagnostik 1985 des SVI, Bern S. 5 bis 18.
- [7] J. MÜLLER: Aktuelle getriebetechnische Forschungsaufgaben Maschinenbautechnik 23 (1974) 7, S. 324 bis 327.
- [8] J. MÜLLER und D. TROPPENS: Möglichkeiten und Grenzen für die Diagnose von einstufigen Zahnradgetrieben mit Hilfe von Spielmessungen. Agrartechnik 34 (1984) 9, S. 419 bis 422.
- [9] G. NEUMANN: Zur vibroakustischen Diagnose der Kolben-Gleitbuchsenpaarung des Dieselmotors. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation A 1984.
- [10] J. MÜLLER: Schädigung von Rollenketten und Kettenrädern Wissenschaftliche Zeitschrift TU Dresden (erscheint demnächst).

#### MOŻLIWOŚCI I PROBLEMY DIAGNOZY ZESPOŁÓW MASZYNOWYCH

#### S t r e s z c z e n i e

Zadanie diagnozy technicznej polega na stwierdzeniu stanu uszkodzeń zespołów lub części pojedynczych mającym na celu możliwość wprowadzenia w odpowiednim czasie środków dla ich zastąpienia lub doprowadzenia ich do stanu używalności, aby z jednej strony uniknąć nieprzewidzianych przestojów lub w następstwie wielkich szkód, a z drugiej strony zapewnić używalność danych części. W niektórych gałęziach techniki - jak na przykład w lotnictwie i

astronautyce - uzyskano znaczne postępy, a użycie seryjne systemów diagnostycznych dla zespołów elektronicznych stało się oczywiste. Obecna sytuacja zespołów ma zostać naświetlona w niniejszym referacie.

THE POSSIBILITIES AND PROBLEMS OF THE DIAGNOSIS  
OF THE MACHINE SETS

S u m m a r y

Technical diagnosis depends on determining the state of damages in the machine or its part that aims at introducing new parts at a proper time not to cause any break on the one hand and at on the other to use given parts to the highest extent. In some fields as in aviation or astronautics the use of the diagnostic systems for electronic sets has become most frequent and has contributed to much progress.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Wojciech Cholewa

Wpłynęło do redakcji 26.XI.198 r.