

## Literatur

- [1] WILLY STÖPH: Referat auf dem VII. Parteitag. Zeitschrift „Die Wirtschaft“, Ausgabe A. vom 27. April 1967, Nr. 17, S. 10
- [2] Autorenkollektiv: „Chemie heute — Chemie morgen“. Urania-Verlag 1967. S. 15 und 259
- [3] BAUDE, B.: „Komplexaufgabe Korrosionsschutz“. JfL-Mitteilung, H. 2/1965, S. 42
- [4] OLDEN, J.: „Zweckmäßige Auswahl der Korrosionsschutzverfahren“. Zeitschrift „Die Wirtschaft“, Ausgabe A, Nr. 43/1968, S. 6
- [5] BAUMGÄTL: „Werkstoffkunde“. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1967. S. 102 und 103

- [6] Broschüre „Hot galvanized steel in agriculture“. Hot Dip Galvanizers Association, 34 Berkeley Square London; S. 4. Printed in England by „The Whitepiars Press Limited“
- [7] EIJSBERGEN, van I. F. H.: „Fortschritt und Wirtschaftlichkeit der Feuerverzinkung“. Zeitschrift: Bänder, Bleche, Rohre. Düsseldorf 8/1967, Nr. 9, S. 627 und 628

## Bildnachweis

- Bild 1. OLDEN, J.: „Zweckmäßige Auswahl von Korrosionsschutzverfahren.“ Zeitschrift „Die Wirtschaft“, Ausgabe A. Nr. 43/1968, S. 6
- Bild 3 und 4. Kostprijzen van thermisch verzinken opzichte van andere conserverings methoden. Bulletin Thermisch Verzinken (Niederland) 1968, S. 8 A 7849

Ing. H. SCHOBERT\*

## Neues Verfahren zur Untersuchung der Antriebsaggregate und -systeme von Maschinen und Fahrzeugen (Teil I)

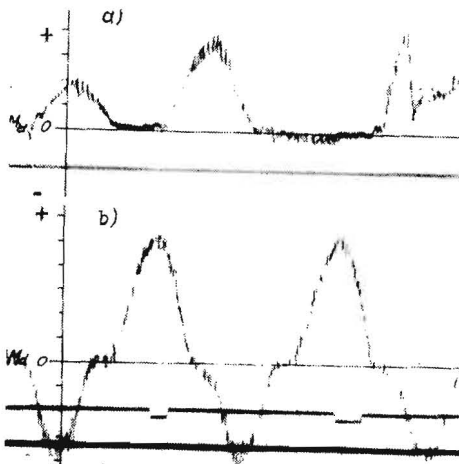
### Beispiel: Untersuchung einer Pflanzenschutzmaschine

Bei komplizierten Antriebssystemen ist immer wieder festzustellen, daß sich die Grenznutzungsdauer der Gesamtsysteme in der Praxis als niedriger erweist als die Grenznutzungsdauer der nach den üblichen Normen dimensionierten Aggregate. Das hängt meistens damit zusammen, daß sich das Drehschwingungsverhalten des Gesamtsystems wesentlich von dem der einzelnen Aggregate unterscheidet. Im Gesamtsystem treten dadurch zusätzliche dynamische Belastungen infolge innerer Drehschwingungen auf. Diese Zusatzbelastungen werden noch erhöht, wenn die Drehmomente infolge der Schwingungen von positiven zu negativen Werten fallen und durch das Spiel im Antriebssystem Stöße auftreten, die überdies noch den Verschleiß einzelner Teile begünstigen. Es handelt sich also um ein komplexes Problem der Schwingungstechnik, der Betriebsfestigkeit und des Verschleißes, das theoretisch selten vollkommen beherrscht werden kann. Eine optimale schwingungstechnische Abstimmung und eine Dimensionierung hinsichtlich Betriebsfestigkeit und Verschleiß erfordern daher entsprechende experimentelle Untersuchungen.

Im vorliegenden Beitrag wird gemäß Patentschrift 59 962 ein neues Verfahren zur Untersuchung von Antriebsaggregaten und -systemen durch praxisnahe dynamische Drehmomentbelastung erläutert.

\* Institut für Leichtbau Dresden

Bild 1. Drehschwingungen mit pulsierender und wechselnder Beanspruchungsamplitude



### 1. Problemstellung

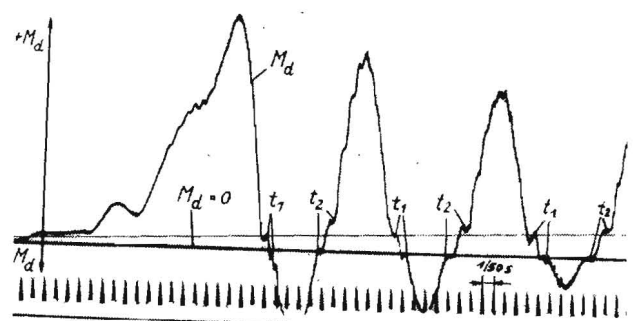
Hochwertiges Material von Antriebsaggregaten und -systemen (Wälzlager, Zahnräder, Kupplungen, Gelenkwellen usw.), Zeit und Geld werden noch in beträchtlichen Mengen für Instandsetzungen aufgewendet. Außerdem entstehen durch den Ausfall der Maschinen hohe ökonomische Verluste. Um die Instandsetzungen radikal einzuschränken, ist es notwendig, bei den Erzeugnissen bereits im Entwicklungsstadium die reparaturanfälligen Teile (Schwachstellen) zu erkennen und zu verbessern. Nicht größere Instandsetzungskapazität, sondern höhere Zuverlässigkeit und Grenznutzungsdauer der Aggregate ist die Forderung der Zeit.

Der Idealzustand „Grenznutzungsdauer der Maschine — Grenznutzungsdauer ihrer Einzelteile“ sollte ständig angestrebt werden. Im Hinblick auf Verformung und Verschleiß sind zu schwach dimensionierte Bauteile zu verstärken bzw. zu stark dimensionierte Bauteile schwächer zu halten. In einer Studie wurde z. B. bei Getrieben die Notwendigkeit einer praxisnahen Erprobung zur systematischen Ermittlung von Schwachstellen, Leistungsgrenze und Grenznutzungsdauer nachgewiesen. Die Ergebnisse sind grundsätzlich für alle Antriebsaggregate und komplette Antriebssysteme zutreffend.

Schwachstellen, Leistungsgrenze und Grenznutzungsdauer sind aber keine konstanten Größen, sondern weitgehend von Art, Größe und Häufigkeit der Drehmomentbeanspruchung abhängig.

In der Praxis werden die Antriebssysteme und -aggregate von Fahrzeugen und Maschinen überwiegend durch schwelende und wechselnde Drehmomente beansprucht (Bild 1). Werden bei schwelender Belastung die unteren Drehmo-

Bild 2. Anlaufvorgang bei einer Landmaschine



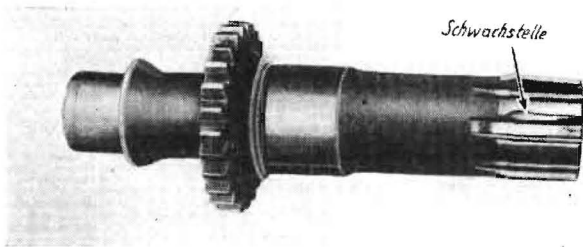


Bild 3. Schwachstelle bei der Kupplungswelle eines Traktors

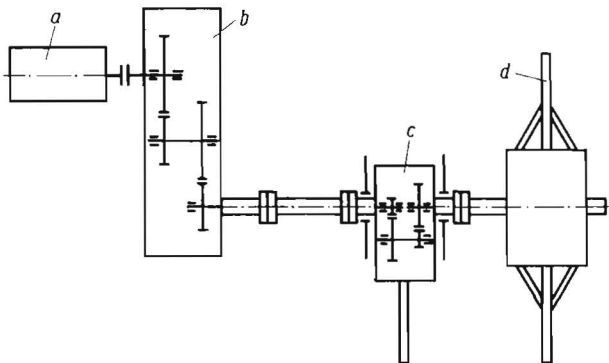


Bild 5. Prinzipieller Versuchsaufbau zur Einleitung von Drehschwingungen. a Motor, b Prüfgetriebe, c Pendelgetriebe, d Bremse

mentspitzen Null, so trennen sich durch das Spiel die vorher anliegenden Flächen und stoßen bei Zunahme des Drehmomentes wieder aufeinander. Bei wechselnder Drehmomentbeanspruchung erfolgt ein Nulldurchgang in den negativen Drehmomentbereich. Dabei entstehen Drehstöße, die besonders zerstörend wirken können; z. B. die Zähne in einem Getriebe heben sich ab und stoßen auf die Gegenflanken. Wellen werden wechselnd auf Durchbiegung bei gleichzeitiger Zahnschrägstellung beansprucht. Durch die schwingenden Achs-Abstandsänderungen wirken beim Zahneingriff zusätzlich verschleißerhöhende Reibungskräfte. Durch den Kraftrichtungswechsel heben sich die Wälzlager von den Wälzbahnen ab und stoßen auf die gegenüberliegenden Bahnen. Die Keilwellenprofile der Gelenkwellen und Kupplungen schlagen durch Stoßbeanspruchung schneller aus, usw.

Bei diesem Vorgang ist das Verdrehspiel die Ursache der Stöße. Die Geschwindigkeit der Spielvergrößerung ist wiederum von Art, Größe und Häufigkeit der dynamischen Drehmomentbeanspruchungen abhängig. Man erkennt, daß hierdurch die Grenznutzungsdauer erheblich beeinflußt wird. Bild 2 zeigt einen Drehschwingungsvorgang beim Anlauf einer Landmaschine.

Zu den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  entstehen entsprechend dem Verhältnis des Massenträgheitsmoments der antreibenden Masse zu dem der getriebenen — infolge plötzlicher Beschleunigung der getriebenen Masse — Stoßdrehmomente. Ein Teil der Stoßenergie wird durch den Aufprall aufgezehrt und wirkt an den tragenden Flächen zerstörend. Diese Drehstöße bewirken — zusammen mit den pulsierenden Belastungen infolge der Schwingungen — die vorzeitige Ermüdung des Werkstoffes und die Entstehung von Rissen, Dauerbrüchen und Pittings. Sie verringern, je nach der Häufigkeit ihres Auftretens, die Grenznutzungsdauer. Betroffen werden hauptsächlich nur die höchstbeanspruchten Teile (Schwachstellen). Durch vorzeitige Zerstörung oder vorzeitigen Verschleiß nur eines Teils fällt das ganze Aggregat mit oft hohem ökonomischen Verlust aus.

Bild 3 zeigt eine Schwachstelle im Getriebe eines Traktors. Von der Kupplungswelle ist das Keilwellenprofil früher zerstört als das auf dieser Welle befindliche Zahnrad. Schäden

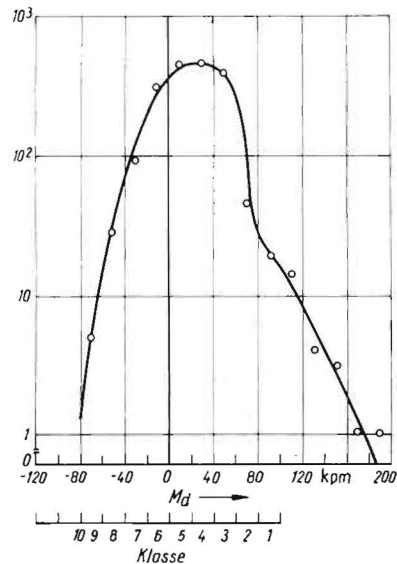


Bild 4. Verteilung der Lastspitzen an der hinteren Gelenkwelle eines LKW mit Allradantrieb (Messung 4258 u. 4260) 1809 Lastspitzen /  $\approx 3,8$  km Fahrstrecke,  $V_m \approx 15,5$  km/h

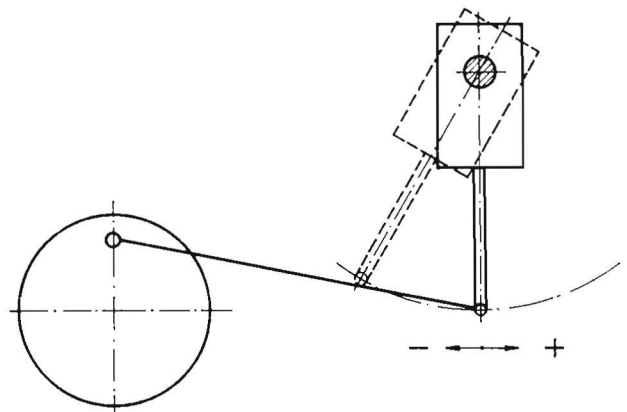


Bild 6. Drehschwingungserregung mit Kurbeltrieb

durch negative Drehmomente sind auf dem Keilwellenprofil nicht erkennbar. Offenbar ist ein  $M_d$ -Nulldurchgang nicht aufgetreten. Es hat ein Abheben der Flächen etwa nach Bild 1a stattgefunden.

In Bild 4 wird die Verteilung der Lastspitzen an der hinteren Gelenkwelle bei einem allradaugetriebenen LKW gezeigt. Trotz eines großen Anteils an negativen Drehmomenten ist die Häufigkeit der  $M_d$ -Nulldurchgänge als wichtiger Einfluß auf die Grenznutzungsdauer nicht erkennbar.

## 2. Gegenwärtiger Stand

Die zur Zeit bekannten Versuchsmethoden und -einrichtungen zur Prüfung von Antriebsaggregaten gestatten eine wahlweise Simulierung schwellender und wechselnder Drehmomente mit verschiedener Frequenz und Amplitude nur zu einem gewissen Grade. Überwiegend werden die Prüflinge mit gleichbleibendem mittleren Drehmoment belastet, Nulldurchgänge zum negativen Drehmomentbereich werden nicht simuliert. Dabei setzt man Spannungsprüfstände (Energie-Kreislaufverfahren) oder Bremsprüfstände (Energie-Durchgangsverfahren) ein. Eine systematische Ermittlung von Schwachstellen, Leistungsgrenze und Grenznutzungsdauer unter verschiedenartig wählbaren dynamischen Drehmomentbelastungen ist damit nicht möglich.

Bild 7. Antriebsschema zur Untersuchung einer Landmaschine

a Antrieb durch E-Motor (Schleifringläufer), drehzahlregelbar mit Wasserwiderstand,  $N_{\max} = 63 \text{ kW}$ ,  $n = 0 \text{ bis } 2\,930 \text{ U/min}$ ,  $mD^2 = 4 \text{ kgm}^2$ ; b Gelenkwelle,  $n = 1\,620 \text{ U/min}$ ; c Pendelgetriebe,  $i = 3 : 1$ ; d Drehmomentenmesser  $M_{d1}$ ; e Gelenkwelle  $n_z = 540 \text{ U/min}$ ; f Hauptgetriebe; g Kolbenpumpe; h Gelenkwellenstrang,  $n_s = 1\,000 \text{ U/min}$ ; i Drehmomentenmesser  $M_{d2}$ ; k Schaltgetriebe mit folgenden Daten:

Schaltstufe	$i_s$	$N$ PS	$n_s$ U/min	$n_V$ U/min
1	1 : 1,185	9	1000	1 185
2	1 : 1,395	13		1 395
3	1 : 1,605	19		1 605
4	1 : 1,815	27		1 815

l Ventilator; m Erregung (noch oben versetzt gezeichnet): Gleichstrom-E-Motor, drehzahlregelbar mit Leonardsatz,  $N_{\max} = 45 \text{ kW}$ ,  $n = 0 \text{ bis } 6\,000 \text{ U/min}$ ; n Gelenkwelle; o Kurbelscheibe; p Koppelstange

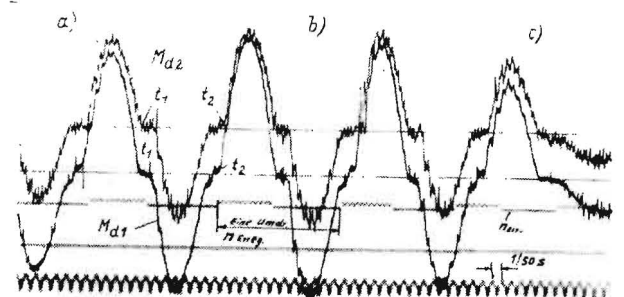
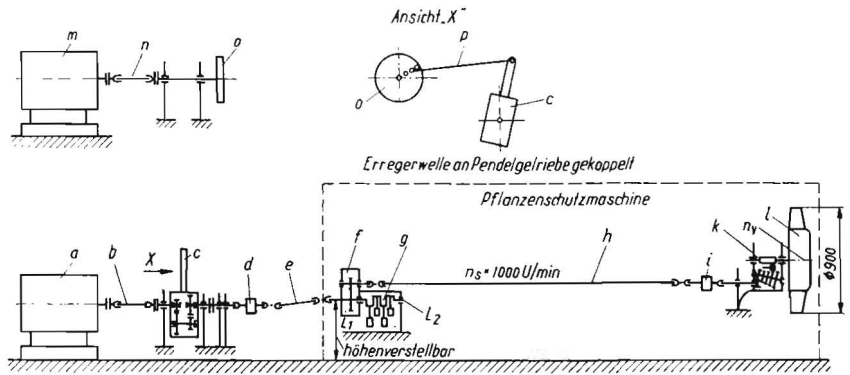


Bild 8. Resonanzermittlung von einem Antriebssystem. a unterkritisch, b Resonanz, c überkritisch

Die Erprobung erstreckt sich in den meisten Fällen nur auf die Einzelaggregate, aber nicht auf das dynamische und schwingungsmäßige Zusammenwirken im Gesamt-Antriebssystem. Bei Versuchen unter praktischen Bedingungen (Versuchsstrecken usw.) ist eine zeittraffende Prüfung an Antriebssystemen kaum möglich. Solche Versuche dauern lange und sind teuer, es wirken viele unkontrollierbare Einflüsse. Solche Beanspruchungskollektive sind außerdem beim Vergleich ähnlicher Erzeugnisse nicht genau wiederhol- und reproduzierbar.

### 3. Lösungsweg

Zur Einleitung von vorgegebenen Drehmomentschwingungen sei auf die folgende prinzipielle Lösungsmöglichkeit hingewiesen (Bild 5). Wird z. B. in den Wellenstrang zwischen Prüfling und Bremse ein Pendelgetriebe geschaltet und um seine Drehachse ausgeschwenkt (Bild 6), so wird das statische Abbremsmoment durch positive bzw. negative Drehmomente überlagert. Unter bestimmten Bedingungen wird das Drehmoment Null. Beim Nulldurchgang zum negativen Drehmomentbereich oder umgekehrt entstehen die vorher erwähnten gefährlichen Drehstöße.

Jeder Pendelausschlag verändert, beschleunigt oder verzögert die Bewegungsvorgänge in den Antriebsaggregaten und -systemen. Durch unterschiedliche Amplituden und Frequenzen der Pendelausschläge lassen sich Größe und Frequenz der Lastamplituden vorwählen. An die Pendelstange müssen dazu geeignete Stellglieder (die kraft- oder auch weggesteuert sein können) gekoppelt werden. Verwendet man z. B. einen Kurbeltrieb nach Bild 6, so werden periodische Schwingungen auftreten, durch die sich schon viele Antriebsfälle simulieren lassen.

Solche Pendelgetriebe kann man als Schwingungserreger einem gesamten Antriebssystem vor- und nachschalten (Bild 7). Wählt man beim Versuch die gleiche Erregerstelle wie in der Praxis, so lassen sich praxisnahe Drehgeschwindigkeitsbedingungen im Hinblick auf die Amplitudenverteilung längs des Wellenzuges zeittraffend simulieren.

Schaltet man zusätzlich ein zweites oder mehrere Pendelgetriebe mit Kurbeltrieb oder andere Drehgeschwindigkeitserreger (z. B. Gelenkwellenungleichförmigkeit) in einen Wellenstrang ein, so lassen sich durch Überlagerung nach den Gesetzen der Schwingungslehre recht verschiedenartige Drehgeschwindigkeitsformen erzeugen und analog der Praxis in ein Antriebssystem einleiten.

An das Pendelgetriebe angekoppelte elektronisch-hydraulische Stellglieder (Hydraulikzylinder, Hydropulsanlagen und dgl.) ermöglichen, Beanspruchungskollektive aus praktischen

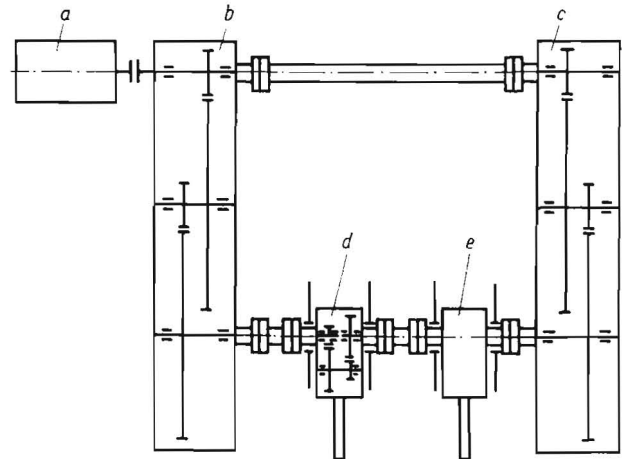


Bild 9. Pendelgetriebe als Drehgeschwindigkeitserreger im Verspannungsprüfstand. a Motor, b Prüfling 1, c Prüfling 2, d Pendelgetriebe 1, e Pendelgetriebe 2

Messungen programmgesteuert (mit Magnetband oder Lochkarte) nachzufahren.

Ein ganz wesentlicher Vorteil ist, daß durch diese Methode die Resonanzbereiche und kritischen Drehzahlen in Getrieben, Kupplungen, Gelenkwellen usw. sowie kompletten Antriebssystemen experimentell einfach zu ermitteln sind (Bild 8). Natürlich ist dabei darauf zu achten, daß die Massenverteilung des Antriebssystems durch den Einbau des Pendelgetriebes nur unwesentlich verändert wird. Zum Beispiel lassen sich mit einem Kurbeltrieb als Schwingungserreger Drehmomentschwingungen mit verschiedenen Erregerfrequenzen vorwählen. Bei einer bestimmten Erregerdrehzahl (z. B. Drehzahl der Kurbel des Kurbeltriebes) gerät das Antriebssystem in Resonanz, dadurch werden die kritischen

(Schluß Seite 432)

## 3.2. Meßgeräte und -verfahren für Wege und Winkel

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, erzeugt die Kraft- oder Druckwirkung eine mechanische Verschiebung, die dann vielfach zur weiteren Messung ausgenutzt wird. Daraus folgt, daß hierfür meistens die gleichen Prinzipien Anwendung finden können. Der Unterschied besteht dann eigentlich nur darin, daß man hier größere Wege oder Winkel braucht bei möglichst geringer Gegenkraft, während bei der Kraft- oder Druckmessung möglichst kleine Verschiebungen infolge entsprechend großer Gegenkraft günstig sind.

Beginnen wir auch hier wieder mit mechanischen Meßgeräten, von denen für die Messung von Wegen und Winkeln eine ganze Reihe entwickelt worden ist. Auf alle diese Geräte kann hier nicht eingegangen werden, sie sind aber auch überwiegend allgemein bekannt und sollten weiterhin benutzt werden. Bei einer laufenden Kontrolle oder Registrierung ergeben sich mitunter die bereits genannten Nachteile mechanischer Verfahren. Zum anderen ist es günstig, wenn man alle Größen auf einem Meßschrieb vorliegen hat, damit die zeitliche Zuordnung einfacher wird. So sind auch hier eine ganze Reihe von elektrischen Meßwertaufnehmern entwickelt worden. Diese sind auch in Zukunft für eine einheitliche Datenverarbeitung bedeutsam.

Meßwertaufnehmer in der Fluidtechnik sind ebenfalls möglich. Besonders mit der Pneumatik wurden sehr empfindliche Längenmeßgeräte entwickelt, die aber meistens für stationäre Anlagen gedacht sind. Für die Automatisierung haben noch hydraulische Meßwertaufnehmer Vorteile wegen der einheitlichen Hilfsenergie für die Meß- und Steuerelemente.

Bei den elektrischen Aufnehmern sind induktive Fühler am weitesten verbreitet. Man erhält mit derartigen Fühlern meistens in Verbindung mit Trägerfrequenzanlagen analoge Meßeinrichtungen für Wegmessungen von 0,1  $\mu\text{m}$  bis zu

100 mm (u. mehr in Sonderanfertigungen). Bekannt sind berührungslöse Ausführungen und solche mit mechanischer Ankerverstellung. Entsprechend der mechanischen Ausführung ist auch das dynamische Verhalten unterschiedlich. Prinzipiell ist in gleicher Weise mit besonderen Konstruktionen auch eine Winkelmessung möglich. Vom RGW Teltow gibt es bereits hierfür entwickelte Typen.

Bei der Messung größerer Wege und Winkel bei nicht zu schnellen Vorgängen wird wegen der einfachen Schaltung auch vielfach das Potentiometer benutzt.

Das Werk für Meßelektronik Dresden bietet in jüngster Zeit Wegemeßaufnehmer mit Halbleiterdehnmeßstreifen an. Hier wird die Auslenkung eines einseitig eingespannten Trägers, auf dem sich eine Halbbrücke befindet, angezeigt. Durch einfache Verlängerung des Trägerarms läßt sich der Meßbereich variieren. Die Halbleiterstreifen gestatten eine verstärkerlose Messung. Derartige Meßfühler lassen sich aber auch mit gewöhnlichen Meßstreifen leicht selbst schaffen.

Schwierigkeiten bereitet vielfach die Messung größerer Wege und Winkel (z. B. fortlaufende Umdrehungen). Hierzu bedarf es dann besonderer Konstruktionen. Untersetzungsgetriebe sind möglich, aber hinsichtlich der Dynamik und des Verschleißes nicht so günstig. Hier lohnt es, digitale Meßverfahren zu verwenden, besonders wenn auch eine hohe Genauigkeit im Detail verlangt wird. Besonders für die Winkelmessung an umlaufenden Wellen und eine Auflösung auf weniger als 1° wurden Verfahren entwickelt, die eine Art Pulsmodulation verwenden [19]. Meist werden hierzu Impulse durch fotoelektrische Effekte erzeugt, in der Form, daß bei einer bestimmten Winkelstellung eine entsprechende Kombination von Fotodioden Licht erhält, die sonst von einer Blendenscheibe verdeckt sind.

Auf Verfahren und Besonderheiten bei der Schwingwegmessung wird unter 3.4 noch eingegangen.

\* Sektion Landtechnik der Universität Rostock (Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. CHR. EICHLER)

<sup>1</sup> Teil I H. 5, S. 223, Teil II H. 6, S. 291, Teil III H. 7, S. 338, Teil IV H. 8, S. 382

## 3.3. Meßgeräte für Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Drehzahlen

Bei den nun zur Debatte stehenden Größen handelt es sich um solche, die durch Differentialoperationen nach der Zeit mit den Weg- und Winkelgrößen verknüpft sind, aber auch durch entsprechende Kraftwirkungen bestimmt werden können.

Begonnen wird mit den mechanischen Meßgeräten, die man hierfür noch oftmals einsetzt, da sie einfacher zu übersehen und billiger sind, besonders wenn nicht zu hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden. Das ist besonders für Tachometer und Handdrehzahlmesser zutreffend. Es lassen sich auch registrierende Meßgeräte ausführen, wie es das mit großer Präzision gefertigte Universalmeßgerät der Firma Metallwerker KG Meerane beweist. Aber dieses empfindliche Gerät kann kaum unter Praxisbedingungen bei Landmaschinenuntersuchungen eingesetzt werden.

Bei Beschleunigungsmessungen läßt sich die Trägheitskraft ausnutzen und wie in Kraftmessern anzeigen und registrieren. Auch hier treffen die allgemein genannten Nachteile zu und lassen die Anwendung zurückgehen.

Die in der Fluidtechnik verwendeten Prinzipien seien der Vollständigkeit halber nur kurz genannt: Hier kommen die für die Kraft- oder Verschiebungsmessung genannten Prinzipien in Frage, wobei auch mechanisch eine Umwandlung in diese Größen erfolgt. Speziell für Drehzahlmessungen und hieraus ableitbarer Größen benutzt man Meßwert-

(Schluß von Seite 431)

Drehzahlen und die Größe der dabei auftretenden Beanspruchungsamplituden des vorliegenden Systems gefunden. Danach kann man leicht Maßnahmen zur Dämpfung eines Schwingungssystems oder zur Verlagerung der kritischen Drehzahlen usw. einleiten und auf ihre Wirkung überprüfen. Entsprechend den Erregerstellen in der Praxis lassen sich Pendelgetriebe vor oder nach bzw. vor und nach dem Prüfling anordnen.

Pendelgetriebe können als Drehschwingungserreger auch in Verspannungsprüfständen eingebaut werden (Bild 9). Mit Ausnahme der Ermittlung von Resonanzbereichen sind etwa gleiche Ergebnisse zu erwarten.

Als Pendelgetriebe sind alle Getriebe mit An- und Abtriebswelle in gleicher Achse verwendbar. Bei Anwendung dieser Untersuchungsmethode und Aufbau eines solchen Prüfstandes müssen bestimmte Gesetzmäßigkeiten beachtet werden, auf die im Rahmen dieser Ausführungen nicht eingegangen werden kann.

(Fortsetzung folgt)

A 7803/I