

LANDTECHNISCHE FORSCHUNG

HERAUSGEBER: LANDMASCHINEN- UND ACKERSCHLEPPER-VEREINIGUNG IM VDMA

Heft 2/1971

München

19. Jahrgang

Die Verwendung des Analogrechners zur Ermittlung der Verlustleistungen und Wirkungsgrade eines hydrostatischen Getriebes

Dieter Hoffmann

Institut für Landmaschinen, Technische Universität Braunschweig

1. Einleitung

Verlustleistung und Wirkungsgrad eines hydrostatischen Getriebes werden von verschiedenen Parametern erheblich beeinflusst. Zur Ermittlung aller wichtigen Kennfelder muß die Abhängigkeit vom Druckniveau, von den Schwenkwinkeln und Drehzahlen und von der Öltemperatur untersucht werden. Zur Auswertung der Messungen kann mit gutem Erfolg ein Analogrechner eingesetzt werden [1].

2. Versuchsstand und Meßwertaufnahme

Zur Ermittlung von Verlustleistung und Wirkungsgrad eines hydrostatischen Getriebes wurde bei den hier beschriebenen Untersuchungen ein Prüfstand verwendet, der nach dem Energiedurchflußprinzip arbeitet. Über die Vor- und Nachteile dieses Prinzips wurde bereits in einer früheren Arbeit berichtet [2]. Der grundsätzliche Aufbau soll anhand von Bild 1 erläutert werden. Die mechanische Antriebsleistung $N_1 = M_1 \cdot n_1$ wird durch den elektrischen Regelantrieb er-

zeugt und durch das Getriebe in die mechanische Abtriebsleistung $N_2 = M_2 \cdot n_2$ umgewandelt, die in der hydrostatischen Leistungsbremse [2; 3] in Wärme umgesetzt wird.

Der elektrische Regelantrieb und die hydrostatische Leistungsbremse sind pendelnd aufgehängt und über Hebelarme mit je einer Waage verbunden. Die Skalen dieser Waagen sind entsprechend dem Drehmoment in kpm geeicht. Ihre Zeigerwellen sind darüberhinaus zur elektrischen Meßwertaufnahme mit hochgenauen Drehpotentiometern verbunden, so daß die Drehmomente nicht nur als Skalenwerte, sondern auch als analoge Signale zur Verfügung stehen. Die Antriebsdrehzahl n_1 und die Abtriebsdrehzahl n_2 werden durch Tachogeneratoren in elektrisch analoge Spannungen umgewandelt. Die Eichung und Überprüfung der Tachogeneratoren erfolgt über Photozellen und Lochscheiben durch den Einsatz eines Impulzzählers [4].

Bei der herkömmlichen Auswertung wurden die vier Meßwerte M_1 , n_1 und M_2 , n_2 abgelesen und in Tabellen einge-

Elektrischer Regelantrieb
(pendelnd aufgehängt)

Hydrostatisches Kompaktgetriebe
als Prüfling

Hydrostatische Leistungsbremse
(pendelnd aufgehängt)

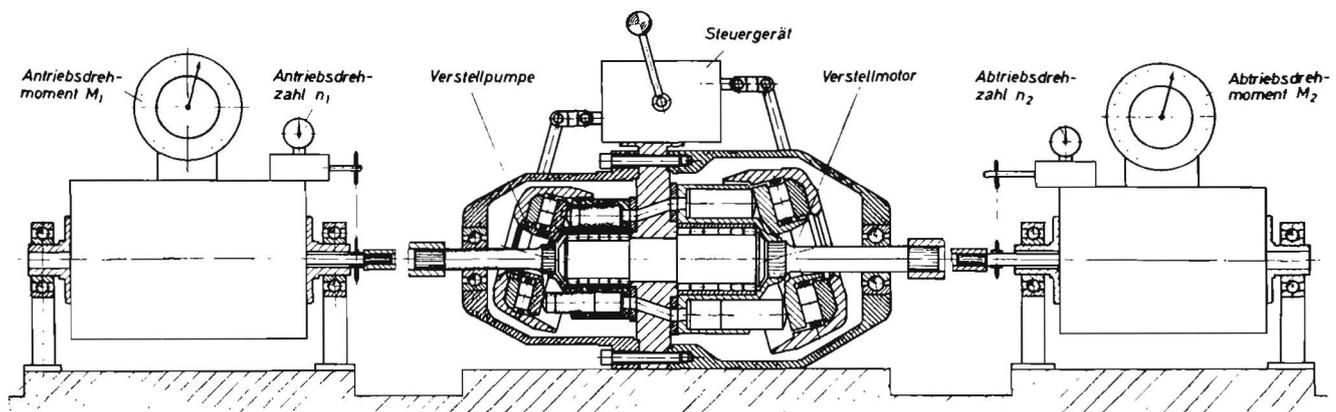


Bild 1: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes

tragen. Mit Hilfe eines Rechenschiebers oder einer Tischrechenmaschine wurden die An- und Abtriebsleistung, die Verlustleistung und der Wirkungsgrad errechnet.

$$N_1 = M_1 \cdot n_1; N_2 = M_2 \cdot n_2$$

$$N_v = N_1 - N_2; \eta = \frac{N_2}{N_1}$$

Die auf diese Weise ermittelten Punkte einer Meßreihe wurden in Diagramme eingetragen und durch eine Kurve verbunden.

Das Ablesen und Notieren der Meßwerte und das Errechnen und Aufzeichnen der Ergebnisse nahm sehr viel Zeit in Anspruch und war bei den gegebenen Möglichkeiten der Rechentechnik nicht befriedigend. Für die Auswertung wurde deshalb ein Analogrechner eingesetzt.

3. Berechnung von Verlustleistung und Wirkungsgrad mit dem Analogrechner

Der Einsatz eines Analogrechners zur Auswertung brachte gegenüber der bisherigen Methode einen erheblichen Zeitgewinn, weil die Ergebnisse schon während der Versuche laufend berechnet und aufgezeichnet wurden. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde die in Bild 2 gezeigte analoge Gerätekette eingesetzt. Die analogen Meßwerte werden durch Tachogeneratoren und Potentiometer (siehe Abschnitt 2) am Prüfstand ermittelt und in analogen Recheneinheiten (Bildmitte) entsprechend den gewünschten Rechenoperationen umgewandelt. Die Ergebnisse werden durch XY-Schreiber (Bild 2 links) in Diagramme eingezeichnet.

Während Aufbau und Funktion der analogen Recheneinheiten im Rahmen dieses Aufsatzes nicht behandelt werden (sie können aus der Literatur entnommen werden: [1; 5; 6]), sollen hier anhand von Struktur- und Programmierskizzen zwei Möglichkeiten für die Berechnung von Verlustleistung und Wirkungsgrad beschrieben werden.

3.1. Berechnung der Leistungen durch Verwendung von Multiplizierern

Für die Berechnung der Antriebs- und Abtriebsleistung wird die in Bild 3, links, dargestellte Schaltung verwendet. Der Tachogenerator G_1 liefert eine der Drehzahl n_1 analoge Spannung U_{11} . Das Potentiometer P_{W1} auf der Zeigerwelle der Waage 1, an dessen Enden die Referenzspannung U_0 liegt, liefert am Schleifkontakt eine dem Drehmoment M_1 analoge Spannung U_{12} . U_{11} und U_{12} werden über Verstärker (rückwirkungsfrei) auf einen Multiplizierer geschaltet, dessen Ausgangsspannung U_{13} der Antriebsleistung N_1 proportional ist.

Die der Abtriebsleistung N_2 proportionale Spannung U_{23} wird in gleicher Weise erzeugt.

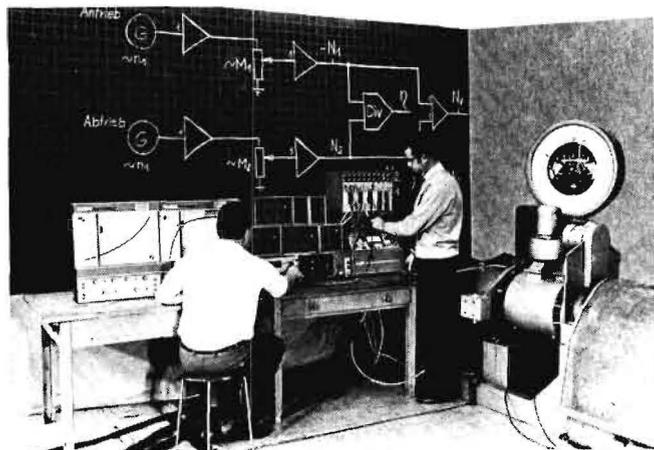


Bild 2: Analoge Gerätekette zur Bestimmung der Verlustleistung und des Wirkungsgrades

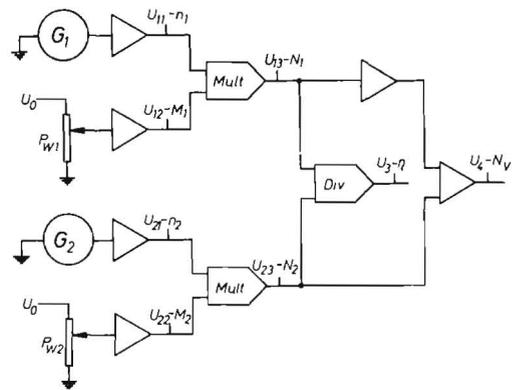


Bild 3: Strukturskizze mit Multiplizierern für An- und Abtriebsleistung

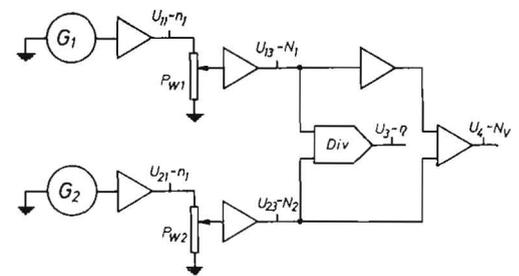


Bild 4: Strukturskizze für direkte Berechnung der An- und Abtriebsleistung

Mit Hilfe eines Dividierers wird der Wirkungsgrad $\eta = \frac{N_2}{N_1}$ ermittelt. Eine der Verlustleistung $N_v = N_1 - N_2$ proportionale Spannung erhält man durch Differenzbildung zwischen U_{13} und U_{23} .

Ein wesentlicher Nachteil dieser Schaltung liegt in der Verwendung von drei nichtlinearen Recheneinheiten, den beiden Multiplizierern und dem Dividierer. Diese nichtlinearen Recheneinheiten stellen bei schlechter Aussteuerung eine unzulässige Fehlerquelle dar [4]. Bei weniger guten Multiplizierern können Fehler in der Größenordnung von einigen Prozent auftreten. Um diese zu vermeiden, wurde eine Schaltung ohne Multiplizierer verwendet.

3.2. Berechnung der Leistungen durch vereinfachte Schaltung

3.2.1. Verfahren

Die Ermittlung der den Leistungen proportionalen Spannungen kann bei geschickter Ausnutzung der Schaltungsmöglichkeiten (Bild 4) auch ohne Multiplizierer durchgeführt werden. Die möglichen Fehlerquellen sind dabei, wie in Abschnitt 3.2.2. gezeigt werden wird, sehr viel kleiner. Die der Drehzahl n_1 analoge Spannung U_{11} wird an die Enden des Potentiometers P_{W1} gelegt und durch die Spannungsteilung entsprechend dem Drehmoment M_1 reduziert. Die Spannung U_{13} am Schleifkontakt von P_{W1} ist damit der Drehzahl n_1 und dem Drehmoment M_1 , also der Leistung N_1 proportional.

Diese Methode der Leistungsermittlung, die in gleicher Weise für N_2 erfolgt, ist sehr einfach. Es werden nur wenige (geringe Anzahl Fehlerquellen) lineare (kleine Fehlerquellen) Recheneinheiten verwendet. Die Fehler liegen in der Größenordnung von einigen $\frac{0}{100}$. Verlustleistung und Wirkungsgrad werden in gleicher Weise berechnet wie in Bild 3 gezeigt.

Für die Schaltung in Bild 4 sollen im folgenden weitere Einzelheiten angegeben und in Form einer Programmierskizze (Bild 5) erläutert werden. Der Generator G_1 erzeugt bei der Drehzahl $n_1 = 3000$ U/min eine Spannung von 60 Volt, die mit Hilfe des Potentiometers P_1 so reduziert wird, daß am Ausgang des Verstärkers V_1 bei $n_1 = 3000$ U/min noch 10 Volt vorhanden sind. Diese Ausgangs-

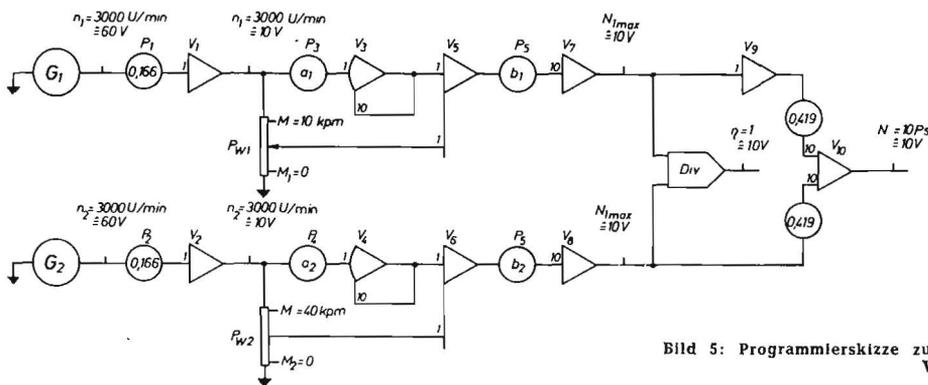


Bild 5: Programmierskizze zur Berechnung der Verlustleistung und des Wirkungsgrades

spannung von V_1 wird an die Enden des Potentiometers P_{W1} gelegt und entsprechend der Stellung des Schleifkontaktes aufgeteilt. Da der Schleifkontakt bei $M_1 = 0$ kpm nicht genau am Ende des Widerstandes steht, liegt am Mittelabgriff in dieser Stellung noch eine kleine Spannung, die durch die negative Spannung des Verstärkers V_3 aufgehoben wird. Die Größe der Ausgangsspannung von V_3 wird durch das Potentiometer P_3 eingestellt. Am Verstärker V_5 liegt nun eine der Drehzahl n_1 und dem Drehmoment M_1 proportionale Spannung, die über P_5 und V_7 so verstärkt wird, daß am Ausgang von Verstärker V_7 bei $n_1 = 3000$ U/min und $M_1 = 10$ kpm (98,1 Nm) eine Spannung von 10 Volt liegt. Die gleiche Schaltung wie für den Antrieb wird für den Abtrieb verwendet. Auch hier steht der Schleifkontakt des Potentiometers P_{W2} bei $M_2 = 0$ kpm nicht genau am Ende des Widerstandes. Durch P_4 und V_4 wird wieder der Nullpunkt eingestellt und durch P_6 und V_8 wird eine Verstärkung in der Weise vorgenommen, daß am Ausgang des Verstärkers V_8 bei $n_2 = 3000$ U/min und $M_2 = 10$ kpm (98,1 Nm) oder bei $n_2 = 1500$ U/min und $M_2 = 20$ kpm (196,2 Nm) eine Spannung von 10 Volt vorhanden ist.

Die Ausgänge von V_7 und V_8 werden auf einen Dividierer geschaltet, dessen Spannung bei $\eta = 1$ 10 Volt beträgt.

Zur Berechnung der Verlustleistung $N_v = N_1 - N_2$ wird die der Antriebsleistung N_1 analoge Spannung zunächst mit umgekehrtem Vorzeichen gebildet und dann zusammen mit der der Abtriebsleistung analogen Spannung auf den Verstärker V_{10} geschaltet. Die Potentiometer P_7 und P_8 werden so eingestellt, daß die Ausgangsspannung von V_{10} bei 10 Volt einer Leistung von 10 PS (7,35 kW) entspricht.

3.2.2. Fehlerabschätzung

Um über die Genauigkeit der ermittelten Werte für Verlustleistung und Wirkungsgrad Angaben machen zu können, wird für die Meßwertaufnahme und für die Auswertung eine Fehlerabschätzung durchgeführt. Dazu werden die wichtigsten Fehlerquellen der analogen Meßwertaufnahme abgeschätzt und in Form einer Tabelle mit den Fehlerquellen bei der herkömmlichen Meßwertaufnahme (Ablesen der Werte) verglichen (Tafel 1).

Bei der herkömmlichen Meßwertaufnahme ist die Genauigkeit für die Drehzahlablesung bei Verwendung von Lochscheibe und Zähler ± 1 U/min, der Fehler bei der Ablesung der Drehmomente ± 2 ‰ von Skalenwert. Die Ablesung der vier Einzelwerte M_1 , n_1 und M_2 , n_2 erfolgt zeitlich nacheinander, so daß der letzte Meßwert bei einem etwas anderen Betriebszustand des Getriebes als der erste ermittelt wird.

Bei der Berechnung der Verlustleistung und des Wirkungsgrades (Rechenschiebegerauigkeit ± 1 ‰) und bei der Auftragung der Werte in Diagramme (Genauigkeit ± 2 ‰) können weitere Fehler entstehen. Bei der Meßwertablesung, bei der Auswertung und bei der Auftragung der Ergebnisse sind Fehler bis zu 1 ‰ möglich.

Bei der analogen Meßwertaufnahme ist die Genauigkeit für die Drehzahlermittlung ± 3 U/min, der Fehler bei der Ermittlung der analogen Spannungen für die Drehmomente ± 1 ‰ vom Skalenendwert. Alle Meßwerte werden gleichzeitig aufgenommen und dem Rechner laufend zur Verfügung gestellt. Die Verlustleistung und der Wirkungsgrad werden ohne zeitliche Verzögerung berechnet und durch XY-Schreiber aufgezeichnet. Die Fehler bei der Auswertung mit dem Analogrechner können durch Verwendung hochwertiger Recheneinheiten klein gehalten werden. Für die Verstärker liegt der Maximalfehler unter 1 ‰ bezogen auf den Momentwert, für den Dividierer unter 2 ‰ vom Maximalwert. Die Aufzeichnung durch den XY-Schreiber ist mit einem Fehler < 2 ‰ der vollen Aussteuerung behaftet. Für die gesamte Auswertung und Aufzeichnung ist ein Fehler < 1 ‰ zu erreichen. Ein Test der verwendeten Auswertkette erbrachte Fehler $< 0,5$ ‰.

Diese Gegenüberstellung der möglichen Fehler bei der herkömmlichen Auswertung und bei der Auswertung mit dem Analogrechner zeigt, daß bei guter Ausnutzung der Möglichkeiten des Analogrechners die Fehler keinesfalls größer sind als bei der herkömmlichen Auswertung.

Am Ende der Fehlerbetrachtung sei noch erwähnt, daß die angegebenen Maximalwerte der Einzelfehler von Prüfstand

Tafel 1: Fehlerabschätzung für Meßwertaufnahme

Meßwert	Meßbereich	Fehler bei herkömmlicher Meßwertaufnahme	Fehler bei analoger Meßwertaufnahme
Drehzahl n_1	0 ... 3 000 U/min	Lochscheibe + Zähler ± 1 U/min	Tachogenerator ± 3 U/min
Drehmoment M_2	0 ... 10 kpm (98,1 Nm)	Lagerreibung der Pendelaufhängung $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)	Lagerreibung der Pendelaufhängung $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)
		Fehlanzeige der Waage $\pm 0,01$ kpm (0,1 Nm)	Fehlanzeige der Waage $\pm 0,01$ kpm (0,1 Nm)
		Ablesung $\pm 0,02$ kpm (0,2 Nm)	Potentiometer $\pm 0,01$ kpm (0,1 Nm)
Drehzahl n_1	0 ... 3 000 U/min	Lochscheibe + Zähler ± 1 U/min	Tachogenerator ± 3 U/min
Drehmoment M_2	0 ... 40 kpm (392,4 Nm)	Lagerreibung der Pendelaufhängung $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)	Lagerreibung der Pendelaufhängung $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)
		Fehlanzeige der Waage $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)	Fehlanzeige der Waage $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)
		Ablesung $\pm 0,08$ kpm (0,8 Nm)	Potentiometer $\pm 0,04$ kpm (0,4 Nm)

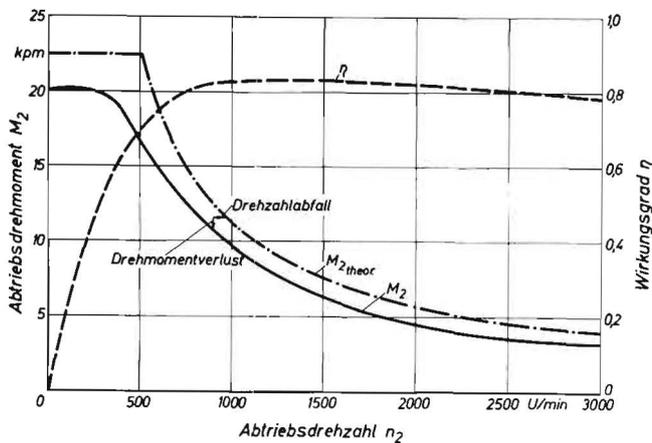


Bild 6: Drehzahl-Drehmomentkennfeld eines hydrostatischen Getriebes mit Verstellpumpe und Verstellmotor
Antriebsdrehmoment $M_1 = 6$ kpm, Antriebsdrehzahl $n_1 = 2000$ U/min

zu Prüfstand verschieden sind und nicht gleichzeitig mit dem jeweils ungünstigen Vorzeichen auftreten.

4. Ermitteltes Drehzahl-Drehmomentkennfeld eines hydrostatischen Getriebes

Als Beispiel für eines der Kennfelder zur Beurteilung eines hydrostatischen Getriebes [7; 8; 9] sei hier das Drehzahl-Drehmomentkennfeld angegeben. Bild 6 zeigt das Abtriebsdrehmoment M_2 und den Gesamtwirkungsgrad η in Abhängigkeit von der Abtriebsdrehzahl n_2 . Die Linie $M_{2\text{theor.}} = f(n_2)$, die für ein Getriebe ohne Verluste gilt, ist unterhalb $n_2 = 600$ U/min durch den Maximaldruck, eingestellt am Druckbegrenzungsventil, festgelegt. Oberhalb $n_2 = 600$ U/min ist die Leistung $N_2 = M_2 \cdot n_2$ konstant. Die Linie $M_{2\text{theor.}} = f(n_2)$ ist eine Hyperbel. Der wirkliche Verlauf der Drehzahl-Drehmomentkennlinie weicht infolge eines Drehzahlabfalles (volumetrische Verluste) und infolge eines Drehmomentverlustes (mechanische und Druckverluste) vom theoretischen Verlauf ab. Der Wirkungsgrad steigt mit zunehmender Abtriebsdrehzahl zunächst steil an und bleibt

bei 0,8 (relativ gutes Getriebe) etwa konstant. Das gezeigte Kennfeld gilt für Getriebe mit Verstellpumpe und Verstellmotor.

5. Zusammenfassung

Die Verwendung eines Analogrechners zur Ermittlung der Verlustleistungen und Wirkungsgrade eines hydrostatischen Getriebes weist gegenüber der herkömmlichen Methode des Ablesens der Meßwerte und des Berechnens und Aufzeichnens der Ergebnisse eine Reihe von Vorteilen auf. Während bisher nach Beendigung der Versuche erst die Auswertung begann, werden bei Verwendung des Analogrechners schon während der Versuche die Ergebnisse in Form von Diagrammen aufgezeichnet. Dadurch können einmal Fehlmessungen sofort erkannt werden und zum anderen können durch kurzfristige Erweiterung des Versuchsprogramms bestimmte Tendenzen genauer untersucht werden. Eine Fehlerabschätzung hat ergeben, daß die Auswertung mit dem Analogrechner hinsichtlich der Genauigkeit den Anforderungen gerecht wird.

6. Schrifttum

- [1] SACHT, H.-O.: Einsatz elektronischer Analogie-Rechenmaschinen für die Lösung landtechnischer Probleme. Landtechnische Forschung 15 (1965) S. 76—82
- [2] KAHRS, M.: Die Entwicklung einer hydrostatischen Leistungsbremse zur Prüfung von Fahrzeug- und Schleppergetrieben. Grundlagen der Landtechnik 17 (1967) S. 15—22
- [3] KAHRS, M.: Eine ölhydrostatische Leistungsbremse. Ölhydraulik und Pneumatik 11 (1967) S. 419—423
- [4] KUTZBACH, H.-D.: Moderne Meß- und Auswerteverfahren in der Landtechnik. Landtechnische Forschung 19 (1971) S. 9—14
- [5] AMELING, W.: Aufbau und Wirkungsweise elektronischer Analogrechner. Vieweg-Verlag, Braunschweig 1963
- [6] GILOI, W. und R. LAUBER: Analogrechnen. Springer-Verlag, Berlin 1963
- [7] KAHRS, M.: Wirkungsgrade mechanischer und hydrostatischer Schlepper- und Fahrzeuggetriebe. Ölhydraulik und Pneumatik 12 (1968) S. 102—107
- [8] KAHRS, M.: Verlustleistung und Wirkungsgrad von Hydro-Axialkolbengetrieben und ihre Abhängigkeit von konstruktiven Merkmalen. Grundlagen der Landtechnik 19 (1969), S. 37—46
- [9] HOFFMANN, D.: Verlustleistungen und Wirkungsgrade eines Hydro-Axialkolbengetriebes mit sphärischen Kolben. Landtechnische Forschung 18 (1970) S. 65—69

Institut für Datenverarbeitung in der Technik gegründet

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde ein Institut für Datenverarbeitung in der Technik gegründet, das sich mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der angewandten Informatik befassen wird.

Ausgehend von den Erfahrungen des Kernforschungszentrums in der Datenverarbeitungsanwendung für Kernphysik, Kerntechnik, rechnergestützter Meßtechnik und Systemanalyse soll das Institut über die Kernforschung hinaus Grundlagenwissen für zukunftsorientierte Anwendungen, besonders im industriellen Produktionsbereich und in der Labor- und Versuchstechnik erarbeiten. Die Forschungs- und Entwicklungsvorhaben werden von interdisziplinären Arbeitsgruppen aus Fachleuten der Datenverarbeitung (Informatik) sowie der Meß-, Regelungs- und Prozeßtechnik unter beratender Mitwirkung erfahrener Spezialisten aus der Industrie durchgeführt.

Die Planungen sind mit dem 2. Förderungsprogramm Datenverarbeitung der Bundesregierung, das gegenwärtig erarbeitet wird, abgestimmt. Eine enge Zusammenarbeit und Aufgabenteilung mit der Universität Karlsruhe und anderen Forschungseinrichtungen ist in Vorbereitung. Die Arbeiten werden insbesondere in engem Kontakt mit industriellen Herstellern und Anwendern von Datenverarbeitungssystemen abgestimmt und nach den gewonnenen Erfahrungen und neuen Anforderungen weitergeführt werden.

(Gesellschaft für Kernforschung m. b. H., Karlsruhe)

Landmaschinen und Ackerschlepper 1970

Mitgliederverzeichnis der Landmaschinen- und Ackerschlepper-Vereinigung im VDMA

Herausgegeben von der Landmaschinen- und Ackerschlepper-Vereinigung (LAV) im VDMA. Maschinenbau-Verlag GmbH, Frankfurt/Main 1970, 224 Seiten. DIN A 5.

Preis: kart. 18,— DM.

Die Landmaschinen- und Ackerschlepper-Vereinigung (LAV) hat die neunte Auflage ihres Mitgliederverzeichnisses vorgelegt. Diese Ausgabe ist umfangreicher als die vorhergehenden, da Teil A dieser Broschüre — Lieferprogramme aller Mitgliedfirmen — erstmalig viersprachig angelegt wurde.

Teil B enthält den Bezugsquellennachweis, der nach Landmaschinen und Ackerschleppern aufgeteilt ist. Beide Gruppen sind nach den Fachabteilungen der LAV geordnet. Dieser Teil ist, wie schon bei den vorausgegangenen Auflagen, viersprachig angelegt.

Teil C gibt einen Überblick über nationale und internationale Normenarbeiten.

Teil D bringt eine Zusammenstellung über die Organisationsform der LAV (Präsidium, Vorstände, Geschäftsstelle).

Teil E enthält das alphabetische Register aller im Mitgliederverzeichnis genannten Maschinen mit dem Seitenhinweis. Dieses Register ist ebenfalls viersprachig angelegt.