

Methodik zur Berechnung des Betriebsverhaltens von Landmaschinenantrieben

Dr.-Ing. W. Schmidt, KDT/Dr.-Ing. W. Rebelein, KDT, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik

Verwendete Formelzeichen

a	m/s ²	Regelstangenbeschleunigung
J	Nm · s ²	Trägheitsmoment
k _{i, p, v}		Maschinenkonstanten
M	Nm	Moment
M _b	Nm	Verlustmoment infolge Trägheit
M _p	Nm	Verlustmoment infolge druckabhängiger Reibkräfte
M _v	Nm	Verlustmoment infolge viskoser Reibung
m	kg	Masse
n	U/min	Drehzahl
P	kW	Leistung
p	MPa	Druck
Q	l/min	Volumenstrom
Q _i	l/min	Leckvolumenstrom
s	mm	Weg (Bedienhebel, Regelstange)
t	s	Zeit
V	dm ³	Volumen
v	m/s	Regelstangengeschwindigkeit
ε	s ⁻²	Winkelbeschleunigung
η	N · s/m ²	Viskosität
θ	°C	Temperatur
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

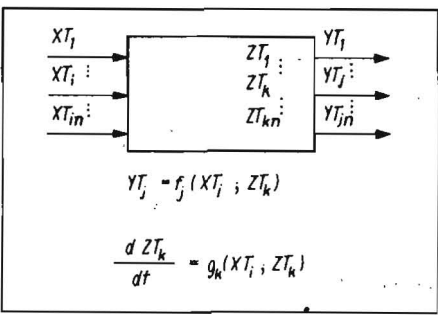
Indizes

a	Auslaß
ATL	Abgasturbolader
B	Bedienhebel, Brennstoff
M	Motor
P	Pumpe
T	Turbine
th	theoretisch
TS	Teilsystem
V	Verdichter

Einleitung

Neben der technischen Weiterentwicklung heutiger mobiler Landmaschinen kommt auch der Frage nach ihrer Wirtschaftlichkeit immer mehr Gewicht zu. Eine optimale wirtschaftliche Auslegung von Systemen (Antriebssysteme, Hydrauliksysteme u. a.) gewinnt ihre Bedeutung bereits in der Phase der konstruktiven Entwicklung. Die Untersuchung von Einflüssen auf den energetischen Prozeß kann jedoch nicht nur von stationären Betrachtungen ausgehen. So können z. B. für einen Häcksler niederfrequente dynamische Vorgänge, die im wesentlichen durch eine nicht kontinuierliche Erntegutzufuhr angeregt werden, nicht unberücksichtigt bleiben. Im allgemeinen sind stets Nichtlinearitäten einzubeziehen, die das Gesamtverhalten entscheidend beeinflussen. Aufgrund des Kompliziertheitsgrades der modernen Maschinen lassen sich ohne die Rechentechnik nur sehr wenige Aussagen treffen. Infolge der schnellen Entwicklung der

Bild 1. Teilsystemaufbau



Digitalrechner – steigende Leistung bei geringeren Kosten – wird die digitale Berechnung mit geeigneten Programmpaketen als einfach zu handhabendes Instrument zu einer wichtigen Entscheidungshilfe. Nachfolgend soll die methodische Vorgehensweise zur Lösung zukünftiger Aufgaben dargestellt werden. Der grundlegende Aufbau eines Systemprogramms, erste Ergebnisse und die spätere Anwendung auf Landmaschinen werden gezeigt.

Systemprogramm ASTADY

In den meisten Fällen setzen sich Gesamtstrukturen aus einer großen Anzahl teilweise kompliziert aufgebauter Bauelemente zusammen. Typisch ist die vielfältige signaltechnische Kopplung. Vorzugsweise werden deshalb innerhalb von Systemprogrammen Strukturbilder aus der Regelungstechnik zur anschaulichen Beschreibung des Zeitverhaltens verwendet [1, 2]. Für eine aus maschinenbautechnischer Sicht günstigere Behandlung der mathematisch-physikalischen Zusammenhänge steht das Programmsystem ASTADY (Auslegung statisches dynamisches Verhalten), das an der Sektion Schiffstechnik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock entwickelt wurde, zur Verfügung [3].

Jede Gesamtstruktur, denkbar sind Motor, Fahrwerk u. a., läßt sich in Teilsysteme und in ihre Verbindungen zerlegen. Bei der Berechnung treten charakteristische Rechenabläufe auf. Das Systemprogramm erfaßt diese Struktur, arbeitet die mathematischen Verbindungen (Kopplungen) ab und benutzt die allgemeinen Rechenabläufe, während der Nutzer die Modelle der konkreten Teilsysteme zu erstellen hat. Folgende wesentliche Forderungen werden erfüllt:

- Benutzung übersichtlicher Teilsysteme, die identisch mit einem Bauteil sein können
- Möglichkeiten der Verarbeitung beliebiger Programmvarianten für die Teilsysteme
- Aufbau flexibler Verbindungen zwischen den Teilsystemen
- dynamische Berechnung der Modelle
- moderne übersichtliche Form der Auswertung (Grafik).

Jedes Teilsystem hat eine bestimmte Anzahl von Eingangsgrößen X_T , Ausgangsgrößen Y_T und Speicherkenngößen Z_T (Bild 1). Speicherkenngößen kennzeichnen auftretende Speichereffekte bei dynamischen Vorgängen. Die zeitlichen Ableitungen dieser Größen sind aus den Bilanzgleichungen (Masse, Energie, Impuls) ermittelbar. Zwischen den genannten Größen bestehen folgende Abhängigkeiten:

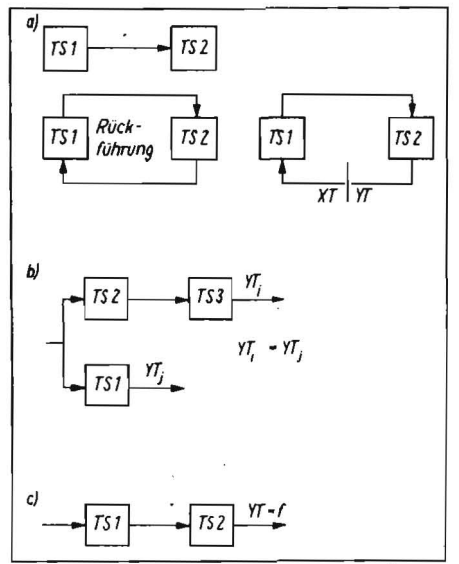
$$Y_T = f_j(X_T, Z_T) \quad (1)$$

$$\frac{dZ_T}{dt} = g_k(X_T, Z_T) \quad (2)$$

Speicherkenngößen müssen als Anfangswerte oder Annahmen vorgegeben werden und errechnen sich bei dynamischen Betrachtungen für nachfolgende Zeitpunkte aus der Integration der Bilanzgleichungen. Kopplungen können sehr vielfältig gebildet werden. Nach Verbindungen, in denen Teil-

systemausgangsgrößen in nachfolgenden Teilsystemen zu einer Eingangsgröße oder mehreren Eingangsgrößen werden, bestehen auch in sich zurück laufende Kopplungen (Bild 2), sog. Rückführungen. Eine direkte Durchrechnung ist nicht möglich. Für eine numerische Lösung wird in ASTADY die Rückführung „aufgeschnitten“ und eine angenommene Unbekannte an der Schnittstelle eingeführt. Ergibt sich numerisch eine Lösung – im Programm wird dies durch schrittweise Verstellung der Annahme und Lösen eines Gleichungssystems nach Gauß vorgenommen –, so besteht Verträglichkeit (Gleichgewicht) und es gilt Ausgang gleich Eingang. Vollständig wiedergegeben werden alle Bedingungen in der Programmbeschreibung [4], z. T. sind sie im Bild 2 enthalten. Bei dynamischen Problemen müssen alle gestellten Bedingungen zu jedem Zeitpunkt erfüllt werden. Die in den Gleichungen auftretenden partiellen Differentialquotienten werden numerisch als Differenzenquotienten ermittelt, indem das System ebenso zunächst mit Startwerten und dann mit gegenüber den Startwerten verstellten Annahmen innerhalb vorzugebender Genauigkeitsschranken durchgerechnet wird. Die Dynamik des Gesamtmodells kann durch die Vorgabe einer Systemeingangs-, Systemausgangs- bzw. Teilsystemausgangsgröße als zeitabhängiger Funktionswert, als Stützstellenwert oder als konstanter Wert untersucht werden. ASTADY ist in FORTRAN geschrieben. Der Nutzer muß zur Erstellung der Teilsysteme Kenntnisse dieser Sprache haben. Das Programm läuft auf der Anlage ESER1056 im Dialog, kann aber auch in einer Version auf einem Personalcomputer betrieben werden.

- Bild 2. Bedingungen im Blockschaltbild [4];
- Teilsystemausgang = Teilsystemeingang
 - Teilsystemausgang = Teilsystemausgang
 - Teilsystemausgang = konstanter Wert = einer vorzugebenden Funktion = einer vorzugebenden Stützstelle



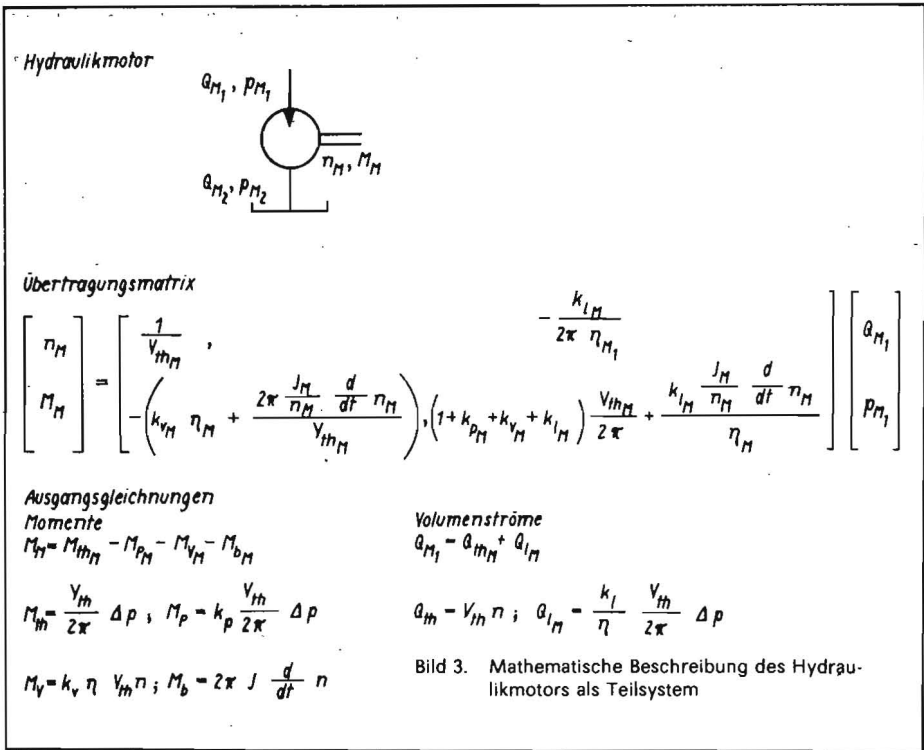


Bild 3. Mathematische Beschreibung des Hydraulikmotors als Teilsystem

Modellierung von Teilsystemen

Bei der Aufstellung eines Modells für ein Teilsystem wird von den mathematisch-physikalischen Zusammenhängen ausgegangen. So gelten z. B. in der Hydraulik für Verdrängermaschinen, wie Hydraulikpumpe und Hydraulikmotor, unter Vernachlässigung sämtlicher Irreversibilitäten bekanntlich folgende grundlegenden Beziehungen:

Hydraulikpumpe

$$Q_P = V_{thP} n_P$$

$$p = \frac{2\pi}{V_{thP}} M_P \quad (3)$$

Hydraulikmotor

$$n_M = \frac{Q_M}{V_{thM}}$$

$$M_M = \frac{V_{thM}}{2\pi} P_M \quad (4)$$

Die sich hieraus ergebende Volumenstrom- und Momentenbilanz widerspiegelt nicht das durch eine Vielzahl stofflicher und konstruktiver Gegebenheiten verursachte reale, sondern vor allem das dynamische Verhalten. Für Abweichungen vom stationären Betriebspunkt können auf der Grundlage der Modelle von Schlösser [5, 6] einige notwendige Erweiterungen vorgenommen werden. Für den Hydraulikmotor ist das Ergebnis in Form einer Übertragungsmatrix im Bild 3 dargestellt, wobei die Gln. (4) selbstverständlich Bestandteil dieser Matrix sind. Neben einem Leckvolumenstrom wurden Verlustmomente infolge viskoser und druckabhängiger Reibung sowie Trägheit so berücksichtigt, wie sie aus den Ausgangsgleichungen ersichtlich sind.

Außer der eigenständigen Modellierung verbleibt, wie am Beispiel Hydraulikmotor zu sehen ist, generell die Möglichkeit der Nut-

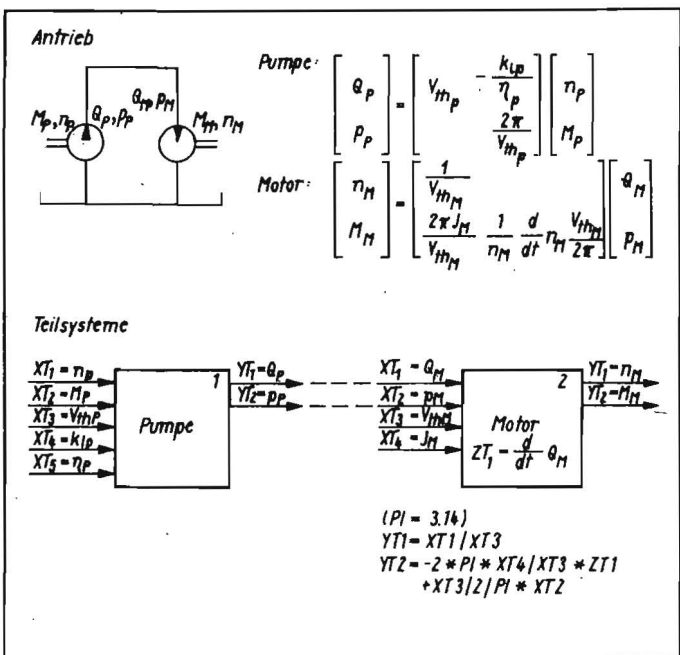


Bild 4. Einfacher hydraulischer Antrieb

zung bereits bestehender Modelle für entsprechende Bauteile. Dabei gilt auch hier der Grundsatz, so einfach wie möglich dem Ausgangswert angepaßt das Teilsystem aufzustellen.

Einen kleinen Einblick in den formalen Übergang von der mathematischen Beschreibung zur Grundstruktur, wie sie das Systemprogramm verlangt, soll Bild 4 geben. Der stark vereinfachte hydraulische Antrieb stellt einen offenen Kreislauf mit druckfreiem Pumpenzulauf und Motorablauf dar. Lediglich der Leckvolumenstrom der Pumpe und die Massenträgheit der rotierenden Motorteile werden berücksichtigt. An beiden Teilsystemen sind die entsprechenden Eingangs- und Ausgangsgrößen dargestellt. Für den Motor ist die Speichergröße Drehzahl indirekt durch den Volumenstrom angegeben. Exemplarisch aufgeführt sind die in FORTRAN geschriebenen Gleichungen für den Motor, die an der dafür vorgesehenen Stelle im Programm selbst benötigt werden. Eine der möglichen Berechnungen an diesem einfachen Antrieb wäre der zeitliche Verlauf von Druck und Volumenstrom am Pumpenausgang, von Motordrehzahl und Pumpenmoment bei bekannter Pumpendrehzahl und bei Vorgabe einer zeitabhängigen Motorlast.

Aufgeladener Dieselmotor

Der aufgeladene Dieselmotor JaMS238-NB verdeutlicht einerseits die Leistungsfähigkeit des Programms, andererseits wird aber auch der ständig steigenden Bedeutung dieses Antriebs für die Landtechnik Rechnung getragen. Das Blockschaltbild ist im Bild 5 dargestellt. Zu erkennen sind die einzelnen Baugruppen und ihre Verbindung, die zum einen mechanisch (z. B. Turbine und Verdichter über den Abgasturbolader-Läufer), aber vor allem stofflich (Brennstoff, Öl, Gas) besteht. Nicht alle in das Gesamtmodell einfließenden Eingangsgrößen sind aufgrund der Übersichtlichkeit eingezeichnet worden. Diese zumeist konstanten Größen umfassen Nennwerte, Wirkungsgrade, geometrische Abmessungen oder Stoffkennzahlen. Das Teilsystem Motor in zentraler Stellung beinhaltet den Innenprozeß als ein offenes quasistationäres System und basiert in den Grundzügen auf den Ergebnissen von Rudert und Stieper [7, 8]. Möchte man die Anzahl der Annahmen minimal halten, so ergibt sich eine günstige Reihenfolge für die Teilsysteme mit 3, 4, 8, 6, 7, 5, 1, 2, 9.

Der Rechendurchlauf soll ein dynamisches Problem behandeln. Dafür wurde an der Führungsgröße s_B (Bedienhebel des Drehzahlreglers, Teilsystem 6) eine Sprungfunktion vorgegeben, die eine Verzögerung des Motors unter Last einleitet. Wesentliche Ergebnisse sind im Bild 6 bei einer Motorlaufzeit von 5 s aufgetragen. Die Ergebnisausgabe erfolgte bei diesem Beispiel alle 0,1 s. Geht man vom physikalischen Sachverhalt aus, so muß bei Führungshebelrücksetzung der Kraftstoffmassenstrom plötzlich unterbrochen werden, bis die der neuen Stellung zugehörige Einspritzpumpendrehzahl für Nullfüllung etwas unterschritten wird. Danach beginnt ein nichtlineares Einschwingen der Regelstange in den neuen stationären Betriebspunkt des Motors. Dieser Einschwingvorgang wird nach Durchlaufen des Nullförderbereichs von einem Überschwingvorgang gekennzeichnet, bevor die neue stationäre Regelstangenstellung erreicht wird. Das wird im Bild 6 für Δs deutlich.

Interessant ist der Vergleich zu Verläufen im Bild 7, die aus früheren experimentellen Untersuchungen stammen und ebenfalls eine Verzögerung unter Last bis zum Stillstand des Motors realisierten. Es lassen sich gute qualitative Übereinstimmungen der Verläufe feststellen. Die Reglerfunktion, als eine wesentliche Voraussetzung der Motormodellierung, ist theoretisch richtig widerspiegelt, denn die Sprünge (Regelstangenwegänderung zwischen Ausgangslage $t=0$ s und nach Beendigung der Beruhigungszeit $t > 1,1$ s) erfolgten betragsmäßig in der gleichen Größenordnung und liegen vor allem zeitlich übereinstimmend. Dabei hat das Rechenmodell in bezug auf den Regelstangenweg- und den Motordrehzahlverlauf eine wesentlich höhere Auflösung gegenüber dem Experiment. So ist das Überschwingen der Regelstange u. a. für $t > 1$ s im Experiment nicht aufgelöst worden. Wichtig für die Bestätigung des Rechenmodells ist ebenfalls der übereinstimmende lineare Bereich der Drehzahlverkleinerung bis zu einer Laufzeit von 1 s. Qualitativ gut im Einklang sind auch die Beschleunigungswerte des Motors, wobei anzumerken ist, daß nach etwa einer Laufzeit von 2 s die Beschleunigung nahe Null liegt.

Mit der Vergleichbarkeit des Modells zu Meßwerten an der realen Anlage bestätigt sich die Korrektheit der theoretischen Betrachtungen.

Eine genügend genaue Diskretisierung erbringt nicht nur qualitativ, sondern ebenso quantitativ gute Ergebnisse.

Zusammenfassung

In zunehmendem Maß werden bereits in der konstruktiven Entwicklungsphase zuverlässige Aussagen über das stationäre und dynamische Verhalten der Maschinen gefordert. Die Schaffung von mathematisch-physikalischen Modellen und deren rechentechnische Verarbeitung im Systemprogramm ASTADY verwirklicht die Notwendigkeit der Bereitstellung einer anwendbaren leistungsfähigen Software in diesem Prozeß.

Vorrangig das Beispiel des aufgeladenen Dieselmotors verdeutlicht die Methodik und bietet in der Verbindung zu anderen Systemen (Arbeitsorgane, Fahrwerk, Hydraulik) die Möglichkeit, das Verhalten kompletter Maschinen zu bestimmen. Neben der Schaffung von Systemen mit hohem Wirkungsgrad können einzelne Betriebs- und Konstruktionsparameter in ihrer vielfältigen Wirkung besser beurteilt werden.

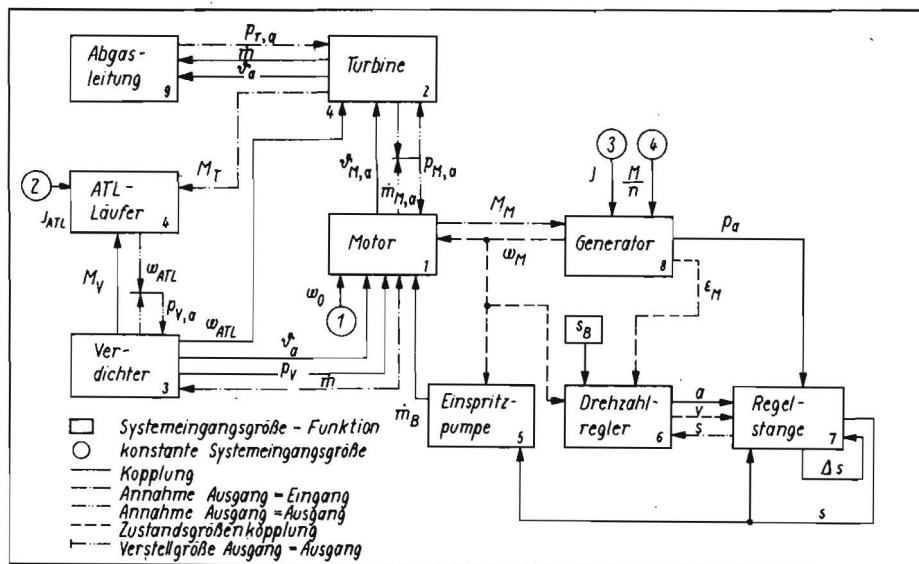


Bild 5. Blockschaubild eines aufgeladenen Dieselmotors

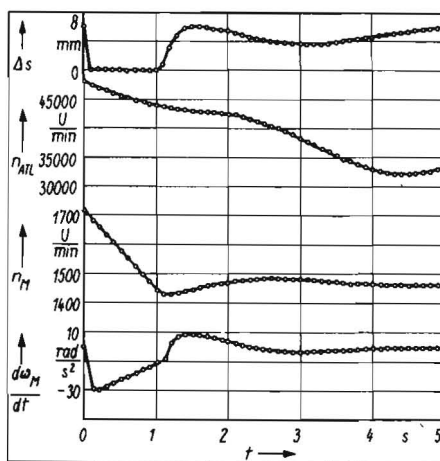


Bild 6. Theoretisches instationäres Betriebsverhalten

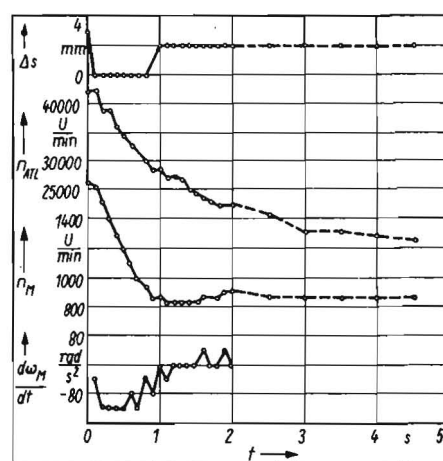


Bild 7. Experimentelles instationäres Betriebsverhalten

Literatur

- [1] Stammerjohanns, P.; Knips, D.; Sitzmann, G.: Digitale Simulation des dynamischen Verhaltens von nichtlinearen Antriebsträgern mit Hilfe der Simulationssprache SCALE/F. Konstruktion, Berlin (West) 37 (1985) 11, S. 313-319.
- [2] Röper, R.; Haberhauer, H.: Dimensionierung von Speise-Spüleinheiten für Hydrogetriebe mit geschlossenem Kreislauf. Konstruktion, Berlin (West), 36 (1984) 4, S. 137-144.
- [3] Stieper, K.; Albrecht, R.: Methoden zur Auslegung und zur Berechnung des statischen und dynamischen Verhaltens von Maschinenanlagen. Seewirtschaft, Berlin 17 (1985) 10, S. 501-506.
- [4] Stieper, K.: Programmdokumentation ASTADY.

- Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Schiffstechnik, 1984 (unveröffentlicht).
- [5] Schlösser, W. M. J.: Ein mathematisches Modell für Verdrängerpumpen und -motoren. Ölhydraulik und Pneumatik, Mainz 5 (1961) 4, S. 122-130.
 - [6] Schlösser, W. M. J.: Über den Wirkungsgrad von Verdrängerpumpen. Ölhydraulik und Pneumatik, Mainz 12 (1968) 10, S. 415-420.
 - [7] Töpfer, M.; Rudert, S.: Einführung in die Automatisierungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1979.
 - [8] Stieper, K.: Motorsystemmodelle. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Schiffstechnik, 1984 (unveröffentlicht).

A 5384

Folgende Fachzeitschriften des Maschinenbaus erscheinen im VEB Verlag Technik:

ägrartechnik; Feingerätetechnik; Fertigungstechnik und Betrieb; Hebezeuge und Fördermittel; Kraftfahrzeugtechnik; Luft- und Kältetechnik; Maschinenbautechnik; Metallverarbeitung; Schmieringstechnik; Schweißtechnik; Seewirtschaft