



Dietmar Findeisen
Siegfried Helduser

Ölhydraulik

Handbuch der hydraulischen Antriebe
und Steuerungen

6. Auflage

VDI

 Springer Vieweg

Dietmar Findeisen
Siegfried Helduser

Ölhydraulik

Handbuch der hydraulischen Antriebe
und Steuerungen

6. Auflage

VDI

 Springer Vieweg

Ölhydraulik

Dietmar Findeisen • Siegfried Helduser

Ölhydraulik

Handbuch der hydraulischen Antriebe
und Steuerungen

6., neu bearbeitete Auflage

Dietmar Findeisen
Berlin
Deutschland

Siegfried Helduser
Krefeld
Deutschland

Die 1. und 2. Aufl. erschienen im Schweizer Verlagshaus AG, Zürich

ISBN 978-3-642-54908-3

ISBN 978-3-642-54909-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-54909-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1978, 1992, 2006, 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 6. Auflage

Hydraulische Antriebe leisten einen wichtigen Beitrag zur Automatisierung und konstruktiven Vereinfachung von Maschinen und Anlagen. Sie haben einige prinzipbedingte Vorteile, die diesen Erfolg begründen: Die hohe Energiedichte ermöglicht eine sehr kompakte Bauweise mit geringen bewegten Massen; die Komponenten eines hydraulischen Systems lassen sich freizügig in einer Maschine anordnen, und ihr hoher technischer Entwicklungsstand ermöglicht eine gute Steuer- und Regelbarkeit von Antriebssystemen mit exzellentem Zeitverhalten. Hinzu kommt, dass hydraulische Antriebe Linearbewegungen effizient und direkt, ohne Zwischenschaltung von Gewindetrieben erzeugen können. Dies hat der Hydraulik ein breites Anwendungsgebiet im stationären Maschinenbau, in fahrenden Arbeitsmaschinen, in Kraftfahrzeugen sowie in der Luft- und Raumfahrt gesichert.

Das Buch „Ölhydraulik“ soll einen möglichst umfassenden Überblick über moderne Komponenten und Systeme der hydraulischen Antriebs-, Steuerungs- und Regelungstechnik vermitteln. Es ist konzipiert für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure in der Praxis sowie Studierende des Maschinenbaus und der Mechatronik an Universitäten und Fachhochschulen. Daher kann es auch als Leitfaden für Lehrveranstaltungen dienen sowie für Studierende und Berufstätige zum Selbststudium, zur Weiterbildung oder als Nachschlagewerk. Eine anschauliche und anwendungsorientierte Darstellung der fachlichen Zusammenhänge erleichtert den Zugang zu diesem interessanten und hochaktuellen Fachgebiet, ohne auf die notwendigen physikalischen und mathematischen Grundlagen zu verzichten. Sie sind für den Ingenieur unerlässlich.

Bereits seit der Erstauflage im Jahre 1962 wird Wert darauf gelegt, durch Hervorhebungen wesentlicher Begriffe und Zusammenhänge den Leser beim Auffinden und Einarbeiten in spezifische Themengebiete zu unterstützen. So steht am Anfang jedes Kapitels eine kurze Zusammenfassung. Außerdem erleichtern „Hinweise für die Praxis“ die Umsetzung der technisch-physikalischen Zusammenhänge. Die enge Verbindung von Wissensvermittlung und praktischer Anwendung bietet die Möglichkeit zu einer intensiven, erfolgversprechenden Auseinandersetzung mit den Inhalten.

Als Einstieg in die Ölhydraulik dient eine kurze Einordnung der hydrostatischen Leistungsübertragung in die Getriebesystematik. Verallgemeinerte Beurteilungskriterien erleichtern eine vergleichende Bewertung von Leistungsübertragern und Bewegungs-

erzeugern unterschiedlicher Energieart. Das Kap. 2 widmet sich den Grundlagen der Strömungsmechanik und den Druckflüssigkeiten. Besonders biologisch schnell abbaubare Druckflüssigkeiten stehen zunehmend im Blickpunkt.

Die Kap. 3 und 4 behandeln die zentralen hydraulischen Komponenten zur Energieumformung (Pumpen, Motoren, Zylinder) und zur Energiesteuerung (Ventile, Ventilmontagesysteme). Erhöhte Forderungen nach Geräuscharmheit, günstiger Wirkungsgradcharakteristik und Ressourceneffizienz haben zu konstruktiven Weiterentwicklungen bei den Verdrängereinheiten beigetragen, wie geräuschreduzierte Pumpen, drehzahlvariable Pumpenantriebe und kompakte, leistungsfähige Hydromotoren in Schrägscheibenbauweise, die eine räumliche Integration in die Radachse mobiler Arbeitsmaschinen ermöglichen. Hinzu kommen Stetigventile mit integrierter digitaler Regelelektronik und serieller Datenübertragung sowie modular integrierten Linearachsen. Im Kap. 5 werden Geräte zur Übertragung, Speicherung und Aufbereitung der Druckflüssigkeit vorgestellt. Sie sind für den zuverlässigen Betrieb eines jeden hydraulischen Systems notwendig.

In der Behandlung der systemtechnischen Aspekte gesteuerter und geregelter Antriebe (Kap. 6) sowie der Entwicklung von Komponenten und Systemen mithilfe der numerischen Simulation (Kap. 7) unterscheidet sich die Neuauflage von den vorangegangenen Auflagen. Elektrohydraulische Komponenten und Systeme sind mechatronische Produkte. Die Anwendung der mechatronischen Entwicklungsmethodik und die Einbeziehung virtueller Prototypen in den Entwicklungsprozess haben zu zahlreichen Verbesserungen und Neuerungen geführt. Neu hinzugekommen ist auch das Kap. 8 über Funktionale Sicherheit elektrohydraulischer Systeme. Die Methodik der neuen Europäischen Sicherheitsnorm und die Regeln bei der Auslegung einer Sicherheitsfunktion sind am Beispiel eines elektrohydraulischen Vorschubantriebs einer Werkzeugmaschine erläutert. Die Kap. 6 bis 8 wurden von Herrn Professor Dr.-Ing. Siegfried Helduser neu bearbeitet, der in der vorliegenden 6. Aufl. als Koautor mitwirkt. Zum Abschluss werden im Kap. 9 hydrostatische Antriebe nach branchentypischer Aufgabenstellung anhand ausgeführter Beispiele aus der Stationär- und Mobilhydraulik vorgestellt.

Die Autoren danken den Mitarbeitern des Fachgebietes Konstruktion von Maschinensystemen am Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik (Prof. Dr.-Ing. H. J. Meyer) der TU Berlin sowie den Kollegen des Instituts für Fluidtechnik der TU Dresden (Prof. Dr.-Ing. J. Weber) für die wertvollen fachlichen Anregungen und die tatkräftige Unterstützung bei der Textverarbeitung und Bilderstellung. Henning Jürgen Meyer verfasste den Abschnitt über die Hydraulik in Kraftfahrzeugen. Den im Text genannten Firmen und Forschungseinrichtungen danken wir für die Bereitstellung von Informationsmaterial und Bildern. Dem Springer-Verlag gilt unser Dank für die angenehme Zusammenarbeit und die gute, bewährte Qualität der Ausstattung des Buches.

Nicht zuletzt gilt unser Dank auch unseren Familien und persönlichen Freunden, die mit großem Verständnis für den erforderlichen zeitlichen Aufwand und mit praktischer Unterstützung zur Entstehung des Buches beigetragen haben.

Wir hoffen sehr, dass dieses Buch den Technikern und Ingenieuren der Fluidtechnik eine gute Hilfe beim Erarbeiten grundlegender Zusammenhänge ist und auch als Nachschlagewerk gute Dienste leistet.

Berlin und Krefeld, Januar 2014

Dietmar Findeisen
Siegfried Helduser

Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
A	Strömungsquerschnitt, wirksame Fläche, Wärmeaustauschfläche	L^2	$\text{cm}^2 = 10^{-4}\text{m}^2$
A_D	Drosselquerschnitt		
A_1	Kolbenfläche		
A_2	Kolbenringfläche		
ΔA	Kolbenstangenfläche		
a, a_a	Beschleunigung	LT^{-2}	m/s^2
a_b	Verzögerung	LT^{-2}	m/s^2
C_h	Hydraulische Kapazität	$M^{-1}L^4T^2$	$\text{cm}^5/\text{N} = 10^{-10}\text{m}^5/\text{N}$
c	Federkonstante, Federsteife	MT^{-2}	N/m
c_h	Hydraulische Federsteife		$\text{N/mm} = 10^3 \text{N/m}$
$c_{h,T}$	Hydraulische Drehsteife	ML^2T^{-2}	Nm
C	Kolbengeschwindigkeit	LT^{-1}	m/s
c_E	Vorlaufgeschwindigkeit des Kolbens im Eilgang		
c_R	Rücklaufgeschwindigkeit des Kolbens		
c_V	Vorlaufgeschwindigkeit des Kolbens		
c_a	Schallgeschwindigkeit	LT^{-1}	m/s
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
c_v	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	J/(kg · K)
$D, \dot{\gamma}$	Geschwindigkeitsgefälle, Schergeschwindigkeit	T^{-1}	s^{-1}
D, ϑ	Systemdämpfung, Dämpfungsgrad	1	
D	Innerer Durchmesser der Rohrleitung	L	mm = 10^{-3} m
d	Durchmesser (der Drosselöffnung)	L	mm
d_i, d	Rohr-Innendurchmesser		
d_a	Rohr-Außendurchmesser		
d_h	Hydraulischer Durchmesser		
d_1, D	Zylinderbohrung		
d_2, d	Kolbenstangendurchmesser		
E	Elastizitätsmodul	$ML^{-1}T^2$	$N/mm^2 = 10^6$ N/m^2
E, W	Energie	ML^2T^{-2}	J = Nm
e	relative Volumenänderung, Volumendilatation	1	%
F	Amplitudenverhältnis	1	
	Übertragungsmaß	1	dB
F	Kraft	MLT^{-2}	$N = kg \cdot m/s^2$
F_0, F_A	Anlaufkraft		
F_e, F_{max}	Effektive Kolbenkraft, Nutzkraft		
F_G, G	Gewichtskraft		
F_i	Aktive Kolbenkraft		
F_L	Lastkraft		
F_R	Reibungskraft, Zylinderreibungskraft		
f	Frequenz, Periodenfrequenz	T^{-1}	Hz = s^{-1}
f_0	Kennfrequenz des gedämpften, Eigenfrequenz des ungedämpften Schwingers	T^{-1}	Hz = s^{-1}

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
$f_{-3\text{ dB}}$	Eckfrequenz		
f_{-90°	Phasenkritische Frequenz		
g, g_{loc} g_n	Örtliche Fallbeschleunigung = 9,80665 m/s ² Normfallbeschleunigung	LT ⁻²	m/s ²
H	Energiehöhe, gewichtskraftbezogene Energie	L	J/N = m
H	Hysterese (Übertragungskenngröße Stetigventile)	1	%
h	Geodätische Höhe	L	m
h	Spalthöhe	L	$\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$
I_e	Elektrische Stromstärke	I	A
	Als Eingangsgröße u		$\text{mA} = 10^{-3}\text{ A}$
J	Trägheitsmoment, Massenmoment 2. Grades	ML ²	kg · m ²
\bar{K}	Mittlerer isentropischer Kompressionsmodul	ML ⁻¹ T ⁻²	bar = 10 ⁴ Pa
$K_V, K_p,$	Übertragungsfaktor, Steilheit	1	%
k	Äquivalente Rohrrauheit	L	$\text{mm} = 10^{-3}\text{ m}$
k	Wärmedurchgangskoeffizient	MT ⁻³ Θ	W/(m ² · K)
L	Rohrlänge	L	m
l	Spaltlänge	L	mm
L_h	Hydraulische Induktivität	ML ⁻⁴	N/(m ⁵ · s ²)
L_p	Schalldruckpegel	1	dB
L_W	Schalleistungspegel	1	dB
L_{WA}	A-bewerteter Schalleistungspegel		
m	Masse	M	kg
n	Drehzahl, Umdrehungsfrequenz	T ⁻¹	s ⁻¹ , min ⁻¹ = (1/60)s
P	Leistung	ML ² T ⁻³	W = J/s, kW = 10 ³ W

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
P_h	Hydraulische Leistung		
P_i	Theoretische Leistung		
P_m^P, P_m	Pumpen- oder Antriebsleistung ^d		
P_m^M, P_m	Motor- oder Abtriebsleistung ^d		
P_s	Verlustleistung		
P_{St}	(elektrische) Steuerleistung		mW = 10^{-3} W
p	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$	bar = 10^5 Pa
p_A	Arbeitsdruck ^e		
p_{abs}	absoluter Druck, Absolutdruck		
p_{amb}	(absoluter) Atmosphärendruck		
p_n	= 1,01325 bar Normdruck		
p_b	Einstelldruck		
p_{calc}	Berechnungsdruck ^e		
p_e	Überdruck, atmosphärische Druckdifferenz		
$p_{e,zul}$	Zulässiger Betriebsüberdruck		
p_{rat}	Bemessungsdruck, Auslegungsdruck ^e		
p, p_{stat}, p_{st}	Statischer Druck		
p_k, p_{kin}	Kinetischer Druck, Staudruck		
p_t, p_{tot}	Gesamtdruck, Totaldruck		
Δp	Nutzbare Betriebsdruckdifferenz		
$\Delta p^P, \Delta p$	Druckdifferenz der Pumpe (Förderdruck) ^d		
$\Delta p^M, \Delta p$	Druckdifferenz des Motors (Druckabfall) ^d		
Δp_R	Reibungsdruck (Druckverlust in geraden Rohrleitungen)		
$\Delta p_V \Sigma \Delta p_s$	Verwirbelungsverlust (Druckverlust in Einbauteilen oder Formstücken) (gesamter) Druckverlust		

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
q_V, \dot{V}	Volumenstrom	L^3T^{-1}	l/min = $(10^{-4}/6)$ m ³ /s
q_{Vc}	Schleppstrom (infolge bewegter Wand)		
q_{Vd}	Leckstrom (infolge Druckdifferenz)		
q_{Vi}, \dot{V}_i	Theoretischer Volumenstrom		
q_{Ve}, \dot{V}_e	Effektiver Volumenstrom		
q_{Ve}^P, q_{Ve}	Förderstrom der Pumpe ^d		
q_{Ve}^M, q_{Ve}	Schluckstrom des Motors ^d		
q_{Vs}, \dot{V}_s	Volumetrischer Verlust, Leckvolumenstrom		
Q	Wärme, Wärmemenge	MLT^{-2}	J
Re	Reynolds-Zahl	1	
Re^*, Re_{crit}	Kritische Reynolds-Zahl		
S	Kolbenhub	L	mm = 10^{-3} m
S	Umkehrspanne (Übertragungskenngröße Stetigventile)	1	%
s	Weg längs Strömungsrichtung, Stellweg	L	mm
s_b	Betätigungshub		
T, Θ	Thermodynamische Temperatur	Θ	K
T_n	= 273,15 K Normtemperatur		
$\Delta T, \Delta J$	Temperaturdifferenz		
T	Periodendauer, Schwingungsdauer, Dauer einer Umdrehung, Ersatz-Zeitkonstante	T	s
T_g	Ausgleichszeit		
T_U	Verzugszeit		
t	Zeit, Zeitspanne, Dauer	T	s
$t_A; t_{A, n}$	Anlaufzeit; Normalanlaufzeit		ms = 10^{-3} s
t_U	Umlaufzeit		min

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
T	Drehmoment	ML^2T^{-2}	Nm
T_e	Effektives Drehmoment		
T_e^M, T_e	Motor- oder Abtriebsdrehmoment ^d		kNm = 10^3 Nm
T_e^P, T_e	Pumpen- oder Antriebsdrehmoment ^d		
T_i	Theoretisches Drehmoment		
T_s	Drehmomentverlust		
T_0, T_A	Anzugs- oder Startmoment		
T_L	Lastmoment		
U_e	Elektrische Spannung	$L^2MT^{-3}I$	V
	Als Eingangsgröße u		mV = 10^{-3} V
V	Volumen	L^3	$l = 10^{-3}$ m ³
V_0	Anfangsvolumen		l
V_f	Flüssigkeitsvolumen		l
V_{ga}	Gasvolumen		l
V_g	Geometrisches Verdrängungsvolumen		cm ³ = 10^{-6} m ³
V_i	Theoretisches Verdrängungsvolumen		l
\dot{V}_{ges}	Aufgenommener Volumenstrom	L^3T^{-1}	cm ³ /s = 10^{-6} m ³ /s
\dot{V}_{St}	Steuervolumenstrom (hydraulische Kenngröße Stetigventile)		
v	Geschwindigkeit	LT^{-1}	m/s
$v(y), v(r)$	Örtliche Strömungsgeschwindigkeit		
\bar{v}, \bar{v}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit (Flächenmittelwert)		
v_K	Festkörper-, Wandgeschwindigkeit		
v	Momentanverdrängung	L^3	m ³ /rad
w	Energiedichte, volumenbezogene Energie	$ML^{-1}T^{-2}$	J/m ³ = N/m ²
x_A	Aufgabengröße als Ausgangsgröße v		
Y	spezifische Energie, massenbezogene Energie	L^2T^{-2}	J/kg = m ² /s ²

Formelzeichen ^a	Bedeutung	Dimension ^b	Übliche gesetzliche Einheit ^c
Y	Wandabstand	L	m
Z_e	Signalbereich	$L^2MT^{-3}I$	V
z	Zahl der Verdrängerelemente Kolbenzahl	1	
α	Löslichkeitskoeffizient für Luft (Bunsen-Koeffizient)	1	%
α	Schwenkwinkel	1	$1^\circ = (\pi/180)$ rad
α_1, α_2	Wärmeübergangskoeffizient	$MT^{-3}\Theta^{-1}$	W/(m ² · K)
α_a	Winkelbeschleunigung	T ⁻²	s ⁻²
α_b	Winkelverzögerung	T ⁻²	s ⁻²
α_k	Kontraktionszahl an Blenden	1	
α_D	Durchflusszahl an blendenförmigen Querschnitten	1	
α_0	Anlaufwinkelbeschleunigung	T ⁻²	s ⁻²
β, ε	Ablenkwinkel, Strömungswinkel	1	1°
δ	Schichtdicke, Grenzschichtdicke	L	$\mu\text{m} = 10^{-6}$ m
$\delta q_v, \delta T$	Ungleichförmigkeitsgrad des Volumenstroms, des Drehmoments	1	%
ε	Einstellung	1	
ε	Relative Längenänderung	1	%
ε_l	Längsdehnung		
ε_q	Querdehnung		
ζ	Druckverlustzahl	1	
η	Wirkungsgrad	1	%
η_v	Volumetrischer Wirkungsgrad		
η_{hm}	Hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad		
η_t	Gesamtwirkungsgrad		
η_t^T	Anlagenwirkungsgrad		