Hydraulik und Pneumatik

Holger Watter

Hydraulik und Pneumatik

Grundlagen und Übungen -
Anwendungen und Simulation

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Springer Vieweg

Holger Watter
FH Flensburg
Flensburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-07859-1
DOI 10.1007/978-3-658-07860-7

ISBN 978-3-658-07860-7 (eBook)

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 Fachmedien Wiesbaden 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Danksagung

Eine Vorlesung mit anschaulichen Beispielen vorzubereiten, erfordert mehr Arbeit, als Studierende oder Laien erraten: Viele Stunden Recherche, Aufarbeitung von Gefundenem, Verwerfen von Grafiken und Beispielen, die sich in der Lehre nicht bewährt haben. All dies geschieht im Verborgenen und wird vom „Kunden“ stillschweigend mit hoher Aktualität erwartet.

Aus einer erprobten Vorlesung ein Buch zu machen, müsste dann doch wohl relativ einfach sein! Weit gefehlt! Die Stichworte aus der Vorlesung müssen ausformuliert sein; Dinge, die aus der Erfahrung „eben mal aus dem Handgelenk geschüttelt“ und vorgelesen werden, müssen nun didaktisch eingebunden werden; handschriftliche Folien und Tafelskizzen müssen fürs Layout elektronisch aufbereitet werden ... wieder mehr Arbeit als man denkt.

Ich möchte mich daher bei Menschen bedanken, die mich bei der Arbeit und im Rahmen von Projekten unterstützt haben:

- Herr *Dipl.-Ing. Stefan Claußen* hat bei zurückliegenden Buchprojekten bereits hilfreiche Arbeit geliefert. Insbesondere die Teile über die Schmierstoffeigenschaften basieren auf dieser Zusammenarbeit!
- Frau *Dr.-Ing. Sylvia Ullmer* hat mich bei der Durchführung des EU-Projektes LLIN-CWA (loss/lost lubrication in coastal and inland water activities) tatkräftig unterstützt. Der Teil zu den biologisch-abbaubaren Schmierstoffen entstand aus dieser Zusammenarbeit.
- Herr *Dipl.-Ing. Siegfried Prust* stand als Mitarbeiter des *Labors für Hydraulik und Pneumatik (H&P)* an der *Hochschule für Angewandte Wissenschaft (HAW) Hamburg* immer wieder beratend zur Seite. Offene Fragen und Lösungsansätze konnten durch Laborversuche schnell und unkompliziert evaluiert werden. Ich danke insbesondere für die Anfertigung der Fotos.
- Bei Herrn *Dipl.-Ing. Thomas Zipsner* bedanke ich mich für die Initiative zu diesem Buch, das Vertrauen, die Beratung und die tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung.
- Bei der *Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg* bedanke ich mich für die Bereitstellung der Laborkapazitäten sowie der Ressourcen und Kompetenzen.

- Bei meiner Familie, insbesondere bei meiner Frau *Petra Watter*, bedanke ich mich für ihr Verständnis und die Unterstützung. Zahlreiche Stunden am PC (oft bis in die späte Nacht und am Wochenende) wurden ohne Murren akzeptiert.
- „Last but not least“ bei den Studierenden für Verbesserungs- und Korrekturvorschläge zur 2. bis 4. Auflage!

Tarp, Februar 2015

Holger Watter

Vorwort

Die Fluidtechnik ist eine interdisziplinäre Paradedisziplin des Maschinenbaus. Aufbauend auf Grundlagenkenntnisse aus den Bereichen

- der technischen Mechanik (Belastungen, Dimensionierung, Spezifikation),
- der Betriebsstofflehre (Eigenschaften und Charakteristika der Fluide),
- der Strömungslehre und Thermodynamik (kompressible, inkompressible Medien, Zustandsänderungen, Strömungsverluste) sowie
- der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (Automatisierung, Peripherie)

werden vertiefende Kenntnisse aus den Bereichen

- der Systemtechnik (Schnittstellenproblematik, Interaktionen der Systeme, Simulationstechnik) und
- der Anlagen- und Antriebstechnik benötigt (Verdrängerpumpen, -maschinen und -kompressoren, Hydro- und Druckluftmotoren, Wandler, hydrodynamische -Kupplungen).

Die Gliederung dieses Buches orientiert sich an diesen Anforderungen. Es wendet sich an angehende Ingenieure und Ingenieurinnen in der Bachelor- und Masterausbildung sowie Praktiker im Betrieb. Nach der Darstellung des Grundlagenwissens zu den Betriebsstoffen (Kap. 2) und zur Fluidmechanik (Kap. 3) werden die wichtigsten Systemkomponenten und deren Wirkmechanismen vorgestellt (Kap. 4). Zahlreiche Beispiele verdeutlichen exemplarisch diese Zusammenhänge. Dabei steht weniger die Konstruktion ausgewählter Bauteile im Vordergrund, sondern vielmehr das Verständnis um die komplexen Wirkzusammenhänge und die Systemdynamik: Messen – Steuern – Regeln – Antreiben: Keine „Schräubchenkunde“ – Beschränkung auf die ingenieurgerechte Beschreibung der Wirkmechanismen. Es wird das verallgemeinerte Betriebsverhalten und die Betriebscharakteristik der mechatronischen Komponenten vorgestellt, soweit diese für die Anlagenkonfiguration, den Betrieb und die Störungssuche hilfreich sein können (Kap. 4). Konstruktive Details können den umfangreichen Web-Seiten der Komponentenhersteller entnommen werden; eine Auswahl dazu wird auf der Verlagsseite als Online-Service (vgl. Anhang A6) bereitgehalten.

Obwohl der Schwerpunkt des Buches wegen der besonderen Bedeutung der Mobilhydraulik auf dem Gebiet der Ölhydraulik liegt, wird immer wieder versucht, Parallelen und Differenzen zum Systemverhalten der Pneumatik herauszuarbeiten.

Einen besonderen Schwerpunkt bildet dabei die moderne Simulationstechnik (Kap. 5), hier soll eine erkannte Lücke in der deutschsprachigen Fachliteratur geschlossen werden. Die dazu notwendigen mathematischen Grundkenntnisse werden in den vorgenannten Abschnitten konsequent gelegt sowie dazu wichtige Randgebiete in den Anhängen A1 bis A4 behandelt. Anhand von anschaulichen Beispielen aus der Fluidtechnik wird die Herangehensweise zur Lösung von interdisziplinären dynamischen Problemstellungen vorgestellt. Durch Kenntnisse in der Simulationstechnik kann der Leser die Ergebnisse von kommerziellen Softwaretools kritisch hinterfragen – eine fachliche Qualifikation, die zunehmend wichtiger für die berufliche Praxis wird.

Die vorliegende 4. Auflage wurde als E-Book grundständig überarbeitet und ergänzt um ein Abkürzungsverzeichnis, didaktisch-methodische Verbesserungen, angepasstes Layout (z. B. durch farbige Abbildungen) sowie vertiefenden Inhalte zur Auslegung von Hydrospeichern, weitere Beispiele zur Simulations- und Visualisierungstechnik (nun auch in SCILAB).

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

a	Schallgeschwindigkeit [m/s]
A	Fläche [m ²]
B	magn. Induktion [Vs/m ² = T]
b	Dämpfungskonstante [N/(m/s)]
c	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
c_p	spez. Wärmekapazität [J/kg K]
C	Kapazität [m ³ /bar]
D	Dämpfungsgrad
D	Geschwindigkeitsgefälle [s ⁻¹]
e	EULER-Zahl: $e = 2,71828$
f	Erregerfrequenz [Hz = 1/s]
f_0	Eigenfrequenz [Hz = 1/s]
F	Kraft [N]
g	Erdbeschleunigung, Gravitationskonst. 9,81 m/s ²
$G(s)$	Übertragungsfunktion
G	(laminarer/turbulenter) Leitwert [(Ltr/min)/bar] [(Ltr/min) ² /bar]
H	Feldstärke [A/cm]
Im	Imaginärteil einer komplexen Zahl
J	Massenträgheitsmoment [kg m ²]
K	Kompressionsmodul [bar]
L	Induktivität [bar/(Ltr/min)/s]
m	Masse [kg]
$\dot{m}$	Massenstrom [kg/s]
M	Drehmoment [Nm]
M	molare Masse [kg/kmol]
p	Druck [bar]

P	Leistung [W, kW]
$Q = \dot{V}$	Volumenstrom [m^3/s , Ltr/min]
Re	REYNOLDS-Zahl
Re	Realteil einer komplexen Zahl
R	allg. Gaskonstante 8,314 kJ/kmol K
R	spez. Gaskonstante [J/kg K]
R_{lam}	laminarer Widerstand [bar/(Ltr/min)]
R_{turb}	turbulenter Widerstand [bar/(Ltr/min) ²]
s	Wandstärke [mm]
s	Sollwert [%]
$s = \frac{d}{dt}$	LAPLACE-Operator
W	Arbeit [Nm = J = Ws]
VI	Viskositätsindex
V	Verstärkungsfunktion, Amplitudengang
V	Volumen [m^3]
$\dot{V} = \frac{dV}{dt}$	Volumenänderung [m^3/s]
V_H	Schluckvolumen [cm^3]
x	Wegposition [m]
$\dot{x}$	Geschwindigkeit [m/s]
$\ddot{x}$	Beschleunigung [m/s^2]
z	Zylinderzahl, Zähnezahl
α	Winkel [rad]
α	Durchflusszahl (Strömungseinschnürung)
α_L	BUNSEN-Koeff.
$\beta = \frac{1}{K}$	Kompressibilität/Pressziffer [1/bar]
β_{10}	Filterfeinheit
δ	Abklingkonstante [1/s]
δ	Ungleichförmigkeitsgrad
ε	Dehnung
η	Wirkungsgrad
η	dynamische Viskosität [Pa s]
φ	Drehwinkel [rad]
$\dot{\varphi} = \omega$	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
$\ddot{\varphi} = \dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung [rad/s^2]
λ	Liefergrad
μ	magn. Permeabilität [$\Omega\text{s}/\text{m}$]
μ	Haftungs-/Reibungsbeiwert
κ	Isentropenexponent
ν	kinematische Viskosität [mm^2/s]
ν	Querkontraktionszahl, POISSON-Zahl
ρ	Dichte [kg/m^3]
σ	Normalspannungen [N/mm^2]

$\tau = t$	Zeit [s]
τ	Schubspannung [N/mm ²]
ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
ω_0	Eigenkreisfrequenz [rad/s]
Ω	Erregerkreisfrequenz [rad/s]
ζ	Widerstandsbeiwert
Ψ	Durchflussfunktion (Druckverhältnis vor/hinter Düse, Blende o. Ä.)

Abkürzungen

API	American Petroleum Institute (u. a. Klassifizierung von Ölen)
ATF	Automatic Transmission Fluid
BN	Base Number = Basenzahl
CAN	Controller Area Network (Bussystem)
CEC	Coordinating European Council (Normenausschuss u. a. für Schmierstoffe)
COC	CLEVELAND open cup (Flammpunkt im offenen Tiegel)
dB(A)	dezi-Bell-A = A-bewerteter Schalldruckpegel (log.-Verhältnis)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EP	Extreme-Pressure-Zusätze verschleißmindernd u. a. für hohe Flächenpressungen
H...	Normbezeichnung Hydrauliköl
HD	High Duty (Schmieröl u. a. mit Extreme-Pressure-Zusätze)
HL, HLP	Normbezeichnung für legierte Hydrauliköle (vgl. Kap. 2)
HF...	Normbezeichnung für schwer entflammbare Hydrauliköle
HE...	Normbezeichnung für biolog. schnell abbaubare Hydrauliköle
HEES	Hydraulic Environmental Ester Synthetic
HEPG	Hydraulic Environmental Polyglycol
HETG	Hydraulic Environmental Triglyceride
ISO	International Standardisation Organisation
LS	Load Sensing (= feinfühligke Steuerung mit geringen Verlusten)
NZ	Neutralisationszahl
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PAO	Polyalphaolefine
PEG	Polyethylenglycol
PIB	Pyly-Iso-Buten
PMCC	PENSKY-MARTENS close cup (Flammpunkt im geschlossenen Tiegel)
PPG	Polypropylenglykol
SAE	Society of Automotive Engineers (u. a. Schmierstoffklassifizierung)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TAN	Total Acid Number (Säurezahl)
TBN	Total Base Number (auch BN = Base Number = Basenzahl)

VDMA	Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer
VG	Viscosity Grade (Viskositätsklasse)
VI	Viskositäts-Index
VwVsS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe
WGK	Wassergefährdungsklasse

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
	Literatur	5
2	Fluide und Fluideigenschaften	7
2.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften der Druckflüssigkeiten	7
2.1.1	Dichte	8
2.1.2	Viskosität	10
2.1.3	Luftaufnahmevermögen	17
2.1.4	Wassergehalt	18
2.1.5	Flammpunkt/Brennpunkt	19
2.1.6	Aschegehalt, Verkokungsrückstand	19
2.1.7	Stockpunkt/Pour Point	20
2.1.8	Alterung	20
2.2	Druckflüssigkeitsarten	20
2.2.1	Additivierung	21
2.2.2	Synthetische Schmierstoffe	25
2.2.3	Klassifikation/Normung	28
2.3	Biologisch abbaubare Hydraulikflüssigkeiten	35
2.3.1	Problemfelder: Verlustschmierungen und technische Havarien	35
2.3.2	Betriebstechnisches Umfeld: Juristische Bewertung	36
2.3.3	Was sind umweltverträgliche Schmierstoffe?	36
2.3.4	Erfahrungen/Stand der Technik	41
2.4	Druckluft	45
2.4.1	Stoffwerte von Luft	45
2.4.2	Zustandsänderungen	45
2.4.3	Feuchte Luft	46
2.5	Übungsbeispiele	49
	Literatur	51
3	Grundlagen der Fluidmechanik	55
3.1	Kontinuitätsgleichung	55

3.2	Leistung/Energie/Satz von Bernoulli	56
3.3	Druckverluste (Strömungsverluste R)	59
3.3.1	Strömungsverluste in geraden Rohrleitungen	60
3.3.2	Strömungsverluste an Einbauten und Ventilen	62
3.3.3	Reihen- und Parallelschaltung von Ventilen und Einbauten	64
3.4	Trägheitswirkung (Induktivität L)	65
3.4.1	Beschleunigung des Fluids	66
3.4.2	Induktivität L einer Rohrleitung	66
3.4.3	Berücksichtigung der Trägheit von mitbewegten Bauteilen	67
3.4.4	Berücksichtigung der Trägheit bei rotatorischen Hydraulik- antrieben	68
3.5	Kompressibilität (Kapazität C)	69
3.5.1	Kapazität C	69
3.5.2	Hydraulische Kapazität einer Rohrleitung	70
3.6	Kraftwirkungen strömender Flüssigkeiten/Impulssatz	71
3.7	Leckverluste/Volumenstrom durch Drosselung Q	72
3.7.1	Leckströmungen infolge von Druckdifferenzen im parallelen Spalt	73
3.7.2	Leckstrom im Ringspalt	75
3.7.3	Leckströmungen in röhrenförmigen Strömungskanälen	75
3.7.4	Ausfluss an Drosselstellen (Pneumatik)	75
3.8	Schallgeschwindigkeit (Druckwellengeschwindigkeit)	78
3.9	Simulationsbeispiel	79
3.10	Übungen und Beispiele	80
	Literatur	84
4	Komponenten und Bauteile	85
4.1	Grundprinzip, Leistungsübertragung und Energiewandlung	85
4.2	Statische Anlagenkennlinie	90
4.3	Schaltzeichen (DIN ISO 1219)	91
4.4	Verdrängermaschinen	92
4.4.1	Pumpen	92
4.4.2	Hubkolbenverdichter	105
4.5	Ventile	110
4.5.1	Hydraulikventile	110
4.5.2	Pneumatikventile	138
4.6	Linear- und Schwenkmotoren (Aktoren)	144
4.6.1	Hydromotoren	144
4.6.2	Pneumatikzylinder	155
4.7	Hydrostatische Antriebe/hydrodyn. Getriebe und Wandler	156
4.7.1	Hydrostatische Antriebe	157
4.7.2	Hydrodynamische Antriebe	157
4.8	Zubehör	164

4.8.1	Rohre, Schläuche	164
4.8.2	Speicher	166
4.8.3	Tank	173
4.8.4	Filter	175
4.8.5	Kühler	176
4.8.6	Schalldämpfer (Pneumatik)	177
4.9	Simulationsbeispiel	181
4.10	Visualisierung von Widerstand und Leitwert eines Regelventils	183
4.11	Übungen und Beispiele	185
4.11.1	Pumpen und Verdichter	185
4.11.2	Hydraulische Maschinen	186
4.11.3	Zusammenwirken von Pumpe und Anlage (Anlagenkennlinie)	186
4.11.4	Zylinder und Schwenkmotoren	187
4.11.5	Ventile und Einbauten	188
4.11.6	Wärmeverluste/Kühlerdimensionierung	190
4.11.7	Speicher	191
4.11.8	Dynamische Vorgänge	191
	Literatur	192
5	Steuern, Regeln, Simulieren	195
5.1	Steuerungen	195
5.1.1	Konventioneller Aufbau logischer Schaltungen	197
5.1.2	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	198
5.1.3	Bussysteme	200
5.2	Regelungen	206
5.2.1	Pumpenregelung	206
5.2.2	Sekundärregelung	210
5.2.3	Positionierung einer hydraulischen Achse	214
5.3	Modellbildung und Simulation	215
5.4	Übungen und Beispiele	225
	Literatur	226
	Anhang	227
	Sachverzeichnis	271