

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Murrenhoff

Umdruck zur Vorlesung

Servohydraulik - Geregelte hydraulische Antriebe

3., neu überarbeitete Auflage 2008

unter Mitwirkung von:

Matthias Liermann,
Maxim Reichert,
Kristof Schlemmer

sowie

Matthias Schmidt, Ulf Piepenstock, David Prust, und
Christian Stammen

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Verfassers

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Umschlagbild:

In Äquatorialregionen, in denen aufgrund der geographischen Gegebenheiten ständig regelmäßige Winde vorliegen, konnten Windkraftanlagen nicht erfolgreich eingesetzt werden. Die bei tropischen Stürmen auftretenden extremen Belastungen können durch Anpassung der mechanischen Konstruktion nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohen Investitionskosten berücksichtigt werden. Die Windkraftanlage ist mit einem hydraulisch angetriebenen Klappmechanismus ausgestattet und kann bei einem drohenden Tropensturm in eine bodennahe Position gebracht werden. Die Montanhydraulik GmbH hat die Anlage dazu mit Hydraulikzylindern von 8,20 m bzw. 3,80 m Hub ausgestattet, am IFAS wurden für diese besonderen Dimensionen eine geeignete hydraulische Schaltung und darauf abgestimmte Regelung entworfen. Die in Abhängigkeit der Stellung und Bewegung der Windkraftanlage wirkenden Kräfte wurden analytisch berechnet, die Sollwege und –geschwindigkeiten sind so gewählt, dass die Zylinder minimale Belastungen erfahren. Die Zylinder werden mit Verstellpumpen im Lageregelkreis betrieben. Zur Auslegung des hydraulischen Systems und der Regelung wurde ein DSHplus-Simulationsmodell genutzt, die erfolgreiche Inbetriebnahme beim französischen Kunden weist die Leistungsfähigkeit der Simulation für die Entwicklung neuartiger Hydrauliksysteme nach.

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7067-4

ISSN 1437-8434

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407/95 96 - 0 • Telefax: 02407/95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

INHALTSVERZEICHNIS

0	FORMELZEICHEN	VI
1	EINLEITUNG	15
1.1	Einführung in die grundlegenden Begriffe.....	15
1.2	Aufbau des Umdrucks	18
1.3	Historisches und Anwendungsbeispiele	21
2	HYDRAULISCHE ANTRIEBE	27
2.1	Übersicht und Systematik	28
2.2	Ventilgesteuerte Antriebe	30
2.2.1	Systematik der Ventilsteuerungen	30
2.2.1.1	<i>Hydraulische Brückenhalfglieder</i>	31
2.2.1.2	<i>Hydraulische Vollbrückenschaltungen</i>	33
2.2.2	Quadrant I – Ventilsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom....	36
2.2.3	Quadrant II – Ventilsteuerung am Konstantdrucknetz.....	37
2.3	Verdrängergesteuerte Antriebe.....	38
2.3.1	Quadrant III – Primärsteuerung oder hydrostatisches Getriebe	39
2.3.2	Quadrant IV – Sekundärsteuerung am Konstantdrucknetz	44
3	STELLGLIEDER	47
3.1	Stetigventile	47
3.1.1	Aufbau und Funktionsweise	48
3.1.1.1	<i>Elektrische Eingangsstufe (elektro-mechanischer Umformer)</i>	49
3.1.1.2	<i>Hydraulische Vorsteuerstufe (mechanisch-hydraulischer Umformer)</i>	52
3.1.1.3	<i>Hydraulische Hauptstufe</i>	55
3.1.2	Einstufige Stetigventile.....	55
3.1.3	Mehrstufige Stetigventile.....	62
3.1.3.1	<i>Zweistufige Stetigventile</i>	63
3.1.3.2	<i>Dreistufige Stetigventile</i>	69
3.1.3.3	<i>Sonderbauformen</i>	72
3.1.4	Statisches Verhalten von Stetigventilen	73
3.1.4.1	<i>Kennlinienfeld (Volumenstrom-Lastfunktion)</i>	74

3.1.4.2	<i>Volumenstrom-Signalfunktion</i>	74
3.1.4.3	<i>Nennvolumenstrom</i>	75
3.1.4.4	<i>Druck-Signalfunktion</i>	76
3.1.4.5	<i>Nulldurchfluss</i>	77
3.1.4.6	<i>Summendruck</i>	78
3.1.5	Dynamisches Verhalten von Stetigventilen.....	80
3.1.5.1	<i>Verhalten im Zeitbereich</i>	80
3.1.5.2	<i>Verhalten im Frequenzbereich</i>	82
3.2	Verstellpumpen und -motoren	85
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise	85
3.2.2	Statisches Verhalten.....	90
3.2.2.1	<i>Verluste eines Servoverdrängers</i>	90
3.2.2.2	<i>Eigenverstellkräfte eines Servoverdrängers</i>	96
3.2.3	Dynamisches Verhalten	98
3.3	Drehzahlveränderliche Konstantpumpen	103
4	HYDRAULISCHE AKTOREN	105
4.1	Aufbau und Eigenschaften von Linearmotoren.....	105
4.2	Aufbau und Eigenschaften von Schwenkmotoren	114
4.3	Aufbau und Eigenschaften von Rotationsmotoren.....	116
4.4	Wirkungsgrad von Rotationsmotoren.....	120
4.4.1	Hydraulisch-mechanische Verluste	121
4.4.2	Volumetrische Verluste	123
5	SENSOREN UND REGELEINRICHTUNGEN	125
5.1	Sensoren zur Erfassung der Position	126
5.1.1	Potentiometrische Positionsaufnehmer.....	127
5.1.2	Induktive Positionssensoren	130
5.1.3	Magnetoresistive Positionssensoren.....	133
5.1.4	Magnetostriktive Positionssensoren	136
5.1.5	Optische Positionssensoren	138
5.1.6	Zusammenfassung	144
5.2	Sensoren zur Druckmessung.....	144
5.2.1	Aufbau von resistiven Druckaufnehmern.....	145
5.2.2	Piezoelektrische Drucksensoren	147
5.3	Reglerbaugruppen.....	149

6	STATISCHE KENNWERTE VENTILGESTEUERTER ANTRIEBE	160
6.1	Typen und Eigenschaften hydraulischer Widerstände	160
6.2	Definition der Kenngrößen und Kennlinienfelder	164
6.2.1	Brückenschaltungen mit Konstantdruckquelle	165
6.2.1.1	<i>Halbbrücken</i>	165
6.2.1.2	<i>Vollbrücken</i>	175
6.2.2	Brückenschaltung bei Konstantstromquelle	186
6.2.2.1	<i>Vollbrücke A+A</i>	187
6.3	Linearisierung der Kennfelder	190
6.3.1	Linearisierung der negativ überdeckten Vollbrücke A+A	190
6.3.2	Linearisierung der nullüberdeckten Vollbrücke A+A	191
6.4	Ermittlung der Kenngrößen aus Ventildatenblättern	193
6.5	Experimentelle Ermittlung der Kenngrößen	197
6.6	Wirkungsgrad von Ventilsteuerungen	202
6.6.1	Konstantdrucksystem	203
6.6.2	Konstantstromsystem	207
6.7	Kosten-Nutzen-Betrachtung zu den Vollbrückenschaltungen	209
7	MODELLBILDUNG HYDRAULISCHER ANTRIEBE	211
7.1	Mathematische Modelle hydraulischer Komponenten	213
7.1.1	Stetigventil	213
7.1.1.1	<i>Nichtlineares Modell 5. Ordnung</i>	213
7.1.1.2	<i>Linearisiertes Modell 3. Ordnung</i>	227
7.1.1.3	<i>Linearisiertes Modell 2. Ordnung</i>	229
7.1.2	Verdrängerstellsystem	231
7.1.2.1	<i>Nichtlineares Modell 5. Ordnung</i>	232
7.1.2.2	<i>Linearisiertes Modell 2. Ordnung</i>	233
7.1.2.3	<i>Nichtlineares Modell 1. Ordnung</i>	236
7.1.3	Verstellpumpe	237
7.1.4	Drehzahlveränderliche Konstantpumpe	238
7.1.5	Konstantmotor	240
7.1.5.1	<i>Rotationsmotor</i>	240
7.1.5.2	<i>Linearmotor</i>	245
7.1.6	Verstellmotor	248
7.2	Frequenzgänge und dynamische Kennwerte	250
7.2.1	Steuerkette Typ 1	250

7.2.1.1	Stetigventil – Rotationsmotor	250
7.2.1.2	Stetigventil – Linearmotor (Gleichgangzylinder).....	258
7.2.1.3	Servopumpe – Rotationsmotor.....	259
7.2.1.4	Servopumpe – Linearmotor (Gleichgangzylinder).....	261
7.2.1.5	Stetigventil – Linearmotor (Differentialzylinder).....	262
7.2.2	Steuerkette Typ 2	269
7.3	Nichtlinearitäten in realen servohydraulischen Antrieben	270
7.3.1	Nichtlinearitäten des Druckaufbaus.....	271
7.3.2	Nichtlinearitäten ventilsteuerter Servoantriebe	272
7.3.2.1	Einfluss des nichtlinearen Kennlinienfeldes des Stetigventils.....	272
7.3.2.2	Einfluss der Überdeckungsverhältnisse des Steuerschiebers.....	274
7.3.3	Nichtlinearitäten pumpengesteuerter Servoantriebe.....	275
7.3.3.1	Einfluss der Speise- und Spüleinheit	277
7.3.3.2	Einfluss der Druckbegrenzungsventile	280
7.3.3.3	Einfluss der Leitungslänge zwischen Pumpe und Motor.....	282
7.3.3.4	Eingespanntes hydrostatisches Getriebe.....	283
8	REGELUNG HYDRAULISCHER ANTRIEBE	287
8.1	Kraft-, Momenten- und Druckregelung.....	289
8.1.1	Kraft-, Momenten- und Druckregelung für Typ 1.....	290
8.1.1.1	Linearisiertes Modell der Kraftregelung.....	291
8.1.1.2	Konzepte für die Kraftregelung	293
8.1.1.3	Druckregelung mit Widerstandssteuerung.....	297
8.1.1.4	Druckregelung mit Verstellpumpe.....	301
8.1.1.5	Druckregelung mit Konstantpumpe und drehzahlveränderbarem Elektromotor	307
8.1.2	Kraft-, Druck- und Momentenregelung für Typ 2.....	309
8.1.2.1	Linearisiertes Modell der Momentenregelung.....	309
8.1.2.2	Konzepte für die Momentenregelung.....	310
8.2	Geschwindigkeitsregelung.....	314
8.2.1	Geschwindigkeitsregelung für Typ 1	315
8.2.1.1	Einschleifige Regelung	317
8.2.1.2	Mehrschleifige Regelung.....	322
8.2.2	Geschwindigkeitsregelung für Typ 2	327
8.3	Lageregelung	343
8.3.1	Lageregelung für Typ 1	343
8.3.1.1	Einschleifige Regelung	343
8.3.1.2	Mehrschleifige Regelung.....	358

8.3.2	Lageregelung für Typ 2	376
8.3.2.1	<i>Einschleifige Regelung</i>	377
8.3.2.2	<i>Mehrschleifige Regelung</i>	385
9	ANHANG – REGELUNGSTECHNISCHE GRUNDLAGEN	387
9.1	Regelungstechnische Darstellungsweisen	387
9.1.1	Der Wirkungsplan	388
9.1.2	Elementare lineare Übertragungsglieder	389
9.2	Beschreibung von Regelkreisgliedern durch Differentialgleichungen	394
9.2.1	Hydraulisches RC-Glied mit PT_1 -Verhalten	394
9.2.2	Schwingungsfähiges hydraulisches System mit PT_2 -Verhalten	396
9.3	Beschreibung von Regelkreisgliedern durch Frequenzganggleichungen ..	400
9.4	Zusammenschaltung von Übertragungsgliedern	401
9.5	Untersuchungsmethoden	402
9.5.1	Zeitbereich	402
9.5.2	Frequenzbereich	403
9.6	Linearisierung von Kennlinien	405
9.7	Der Regelkreis	406
9.7.1	Regelstrecke mit und ohne Ausgleich	406
9.7.2	Führungs- und Störverhalten	407
9.7.3	Stabilität des Regelkreises	408
9.7.3.1	<i>Nyquist-Kriterium</i>	408
9.7.3.2	<i>Hurwitz-Kriterium</i>	412
9.7.3.3	<i>Wurzelortskurven-Verfahren</i>	413
9.7.4	Die Kreisverstärkung	414
9.8	ITSE- und ITAE-Kriterium zur Bewertung der Regelkreisdynamik	417
10	LITERATURVERZEICHNIS	421
11	INDEX	427

0 FORMELZEICHEN

Zeichen	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	cm^2
A_2	Kolbenfläche des Linearmotors	cm^2
A_S	Stellkolbenfläche	cm^2
A_V	Kolbenfläche des Ventilschiebers	cm^2
a	allgemeines Ansteuersignal	
a_i	Koeffizienten des Nennerpolynoms	-
b	allgemeine Bewegungsgröße	
b_i	Koeffizienten des Zählerpolynoms	-
b_{sohl}	Sollwert der allgemeinen Bewegungsgröße	
B	Durchflussbeiwert	$1/(\text{min mm})\sqrt{\text{bar}}$
C_0	Geschwindigkeitsverstärkung	$(\text{m/s})/\text{mm}$
C_H	hydraulische Kapazität	$1/\text{bar}$
C_{HA}	hydraulische Kapazität der Zylinderkammer A	$1/\text{bar}$
C_{HB}	hydraulische Kapazität der Zylinderkammer B	$1/\text{bar}$
c_0	Volumenstromverstärkung	$(\text{l/min})/\text{mm}$
c_{ges}	Gesamtfedersteifigkeit des Torquemotors	Nm/rad
$c_{\text{öl}}$	Ölfedersteifigkeit	N/mm
$c_{\text{öl,A}}$	Ölfedersteifigkeit in Kompressionsraum A	N/mm
$c_{\text{öl,B}}$	Ölfedersteifigkeit in Kompressionsraum B	N/mm
c_F	Federsteifigkeit der Rückführbiegefeder	Nm/rad
$c_{F,\text{max}}$	maximale Federsteifigkeit der Rückführbiegefeder	Nm/rad
c_T	Federsteifigkeit der Torquemotorhülse	Nm/rad
D_E	Dämpfungsgrad des elektrischen Systems	-
D_H	Dämpfungsgrad des hydraulischen Systems	-
D_T	Dämpfungsgrad des Torquemotors	-
D_S	Dämpfungsgrad des Stellsystems	-
D_V	Dämpfungsgrad des Ventils	-
d_i	Innendurchmesser der Torquemotordüsen	mm
d_T	drehgeschwindigkeitsproportionaler Dämpfungskennwert des Torquemotor-Ankers	$\text{Nm}/(\text{rad/s})$

$d_{\dot{x}}$	geschwindigkeitsproportionaler Reibkennwert des Linearmotors	Ns/cm
d_{zu}	Durchmesser der Zulaufblende	mm
d_{ϕ}	drehgeschwindigkeitsproportionaler Reibkennwert des Rotationsmotors	Nm/(rad/s)
E_0	Kraftverstärkung	N/mm
e_0	Druckverstärkung	bar/mm
$E_{\dot{\sigma}_I}$	Kompressionsmodul	bar
$E'_{\dot{\sigma}_I}$	Ersatzkompressionsmodul	bar
F_C	Coulomb'sche Reibkraft	N
F_F	Federkraft	N
F_R	Reibkraft	N
F_S	Strömungskraft	N
F_{SL}	Eigenverstellkraft des Stellzylinders	N
f	Frequenz	Hz
f_E	Eigenfrequenz des drehzahlgeregelten Konstantpumpensystems	Hz
f_H	Eigenfrequenz des hydraulischen Systems	Hz
G_{hyd}	Hydraulischer Leitwert	l / (min bar)
s	Abstand Düse-Prallplatte	mm
s_0	Abstand Düse-Prallplatte in Mittelstellung	mm
h	Höhe eines ebenen Spaltes einer Spaltdrossel	mm
i	Strom (Eingangssignal)	A
i_L	Schleiferstrom bei Spannungsteiler	A
i_{max}	maximaler Strom (Eingangssignal)	A
i_{nenn}	Nennstrom	A
i_T	Spulenstrom des Torquemotors	A
J	Massenträgheitsmoment	Nm s ²
J_T	red. Massenträgheitsmoment des Torquemotors	Nm s ²
J_2	Massenträgheitsmoment des Rotationsmotors	Nm s ²
K_{1Lip}	Kennwert der internen druckabhängigen Pumpenleckage	l/U
K_{2LeA}	Kennwert der externen Leckage der Motorseite	(l/min)/bar
	A	

K_{2LeB}	Kennwert der externen Leckage der Motorseite B	(l/min)/bar
K_{2Lip}	Kennwert der internen druckabhängigen Motorleckage	(l/min)/bar
K_{2Lix}	Kennwert der internen geschwindigkeitsabhängigen Leckage des Linearmotors	l/cm
$K_{2Li\phi}$	Kennwert der internen drehgeschwindigkeitsabhängigen Leckage des Rotationsmotors	l/U
K_E	Übertragungsbeiwert des AC-Motors	Nm/Hz
K_I	Übertragungsbeiwert (I-Regler)	
$K_{I,max}$	maximaler Übertragungsbeiwert (I-Regler)	
K_R, K_P	Übertragungsbeiwert (P-Regler)	
K_{SLip}	Kennwert der internen druckabhängigen Leckage des Pumpenstellzylinders	(l/min)/bar
K_{SLiy}	Kennwert der internen geschwindigkeitsabhängigen Leckage des Pumpenstellzylinders	l/cm
K_U	Übertragungsbeiwert des Umrichters	Hz/V
$k_{aus,ein}$	Proportionalitätskonstante der Aus- bzw. Einströmkante	N/(mm bar)
k_{aus}	Proportionalitätskonstante der Ausströmkante	N/(mm bar)
k_{ein}	Proportionalitätskonstante der Einströmkante	N/(mm bar)
k_{Mi}	Proportionalitätskonstante zwischen Spulenstrom und elektromagnetischem Moment	Nm/A
$k_{M\phi}$	Proportionalitätskonstante zwischen Ankerwinkel und magnetischem Moment	Nm/rad
$k_{Q,ab}$	Proportionalitätskonstante des abfließenden Volumenstroms	l/min/ \sqrt{N}
$k_{Q,zu}$	Proportionalitätskonstante des zufließenden Volumenstroms	l/min/ \sqrt{bar}
k_V	Verstärkungsfaktor des Operationsverstärkers	-
L	Statische Laststeifigkeit eines lagegeregelten Antriebs	Nm/rad bzw. N/mm
L_T	Induktivität der Torquemotor-Spule	H
l_D	Abstand der Düse zum Federdrehpunkt	mm
l_y	Abstand der Schieberachse zum Federdrehpunkt	mm
M	Drehmoment	Nm

M_E	Drehmoment des AC-Motors	Nm
M_L	Lastmoment	Nm
M_{DP}	Moment durch Druckdifferenz am Düse-Prallplatte-System	Nm
m	Masse	kg
m_2	bewegte Masse des Linearmotors	kg
m_S	Masse des Pumpenstellkolbens	kg
m_V	Masse des Ventilschiebers	kg
n	Drehzahl	1/min
n_1	Pumpendrehzahl	1/min
n_2	Motordrehzahl	1/min
n_{soll}	Solldrehzahl	1/min
P	Leistung	kW
p	Druck	bar
p_0	Versorgungsdruck	bar
p_{0m}	Druck am unbelasteten Zylinder im Ventilnullpunkt bei einem Konstantstromsystem	bar
p_A	Druck auf Seite A	bar
\dot{p}_A	Druckänderung auf Seite A	bar/s
p_{VA}	Vorsteuerdruck auf Ventilseite A	bar
\dot{p}_{VA}	Änderung des Vorsteuerdrucks auf Ventilseite A	bar/s
p_B	Druck auf Seite B	bar
\dot{p}_B	Druckänderung auf Seite B	bar/s
p_{VB}	Vorsteuerdruck auf Ventilseite B	bar
\dot{p}_{VB}	Änderung des Vorsteuerdrucks auf Ventilseite B	bar/s
P_H	hydraulische Leistung der Verstellpumpe	kW
p_L	Lastdruck	bar
\dot{p}_L	Lastdruckänderung	bar/s
p_m	Druck im Arbeitspunkt	bar
p_N	statisches Druckniveau	bar
p_{nenn}	Nennversorgungsdruck	bar
P_{Nutz}	Nutzleistung	kW

P_S	hydraulische Leistung des Pumpenstellsystems	kW
p_{S1}	Druck an der Schieberstirnseite 1	bar
p_{S2}	Druck an der Schieberstirnseite 2	bar
p_{SL}	Lastdruck am Stellkolben	bar
p_{VL}	Lastdruck am Ventilschieber	bar
\dot{p}_{VL}	Lastdruckänderung am Ventilschieber	bar/s
P_{Vers}	Versorgungsleistung	kW
Δp	Druckdifferenz	bar
Q	Volumenstrom	l/min
$Q_{0,ges}$	Nulldurchfluss	l/min
$Q_{0,max}$	maximaler Volumenstrom bei p_0	l/min
Q_{01}	Volumenstrom durch Vorsteuerung	l/min
Q_{02}	Nulldurchfluss durch Hauptstufe	l/min
Q_{1Lip}	interne druckabhängige Leckage der Pumpe	l/min
Q_{1max}	maximaler Pumpenvolumenstrom	l/min
Q_{1th}	theoretischer Pumpenvolumenstrom	l/min
Q_{2Le}	externe Leckage des Motors	l/min
Q_{2LeA}	externe Leckage der Motorseite A	l/min
Q_{2LeB}	externe Leckage der Motorseite B	l/min
Q_{2Li}	interne Leckage des Motors	l/min
Q_{2Lip}	interne druckabhängige Leckage des Motors	l/min
$Q_{2Li\dot{\varphi}}$	interne drehzahlabhängige Leckage des Motors	l/min
Q_{2th}	theoretischer Motorvolumenstrom	l/min
Q_A	Volumenstrom vom/zum Anschluss A	l/min
$Q_{A,ab}$	abfließender Steuervolumenstrom auf Seite A	l/min
$Q_{A,zu}$	zufließender Steuervolumenstrom auf Seite A	l/min
Q_B	Volumenstrom vom/zum Anschluss B	l/min
$Q_{B,ab}$	abfließender Steuervolumenstrom auf Seite B	l/min
$Q_{B,zu}$	zufließender Steuervolumenstrom auf Seite B	l/min
Q_L	Lastvolumenstrom	l/min
Q_{max}	maximaler Volumenstrom	l/min
Q_{nenn}	Nennvolumenstrom	l/min

Q_S	Volumenstrom des Stellsystems	l/min
Q_{sch}	gesamter Schaltvolumenstrom	l/min
Q_{schA}	Schaltvolumenstrom auf Seite A	l/min
Q_{schB}	Schaltvolumenstrom auf Seite B	l/min
$Q_{spül}$	gesamter Spülvolumenstrom	l/min
$Q_{spülA}$	Spülvolumenstrom auf Seite A	l/min
$Q_{spülB}$	Spülvolumenstrom auf Seite B	l/min
Q_{th}	theoretischer lastfreier Ventilvolumenstrom	l/min
Q_{VL}	Lastvolumenstrom der Ventilvorstufe	l/min
Q_{Vth}	theoretischer Volumenstrom der Ventilvorstufe	l/min
Q_{vor}	Vorsteuervolumenstrom im Ventil	l/min
R_A	Ausgangswiderstand	bar min/l
R_E	Eingangswiderstand	bar min/l
R_{mess}	Messwiderstand	Ω
R_{hyd}	Hydraulischer Widerstand	bar min/l
R_T	Innenwiderstand der Torquemotor-Spule	Ω
T	Zyklusdauer	s
T_E	Zeitkonstante des AC-Motors (PT ₁ -Verhalten)	s
T_H	hydraulische Zeitkonstante	s
T_i	Zeitkonstante bei stromproportionaler Ansteuerung	s
T_M	mechanische Zeitkonstante	s
T_u	Zeitkonstante bei spannungsproportionaler Ansteuerung	s
T_V	Zeitkonstante des Ventils	s
t	Zeit	s
t_A	Anregelzeit	s
u	Spannung	V
u_{aus}	Ausgangsspannung des Operationsverstärkers	V
u_{ein}	Eingangsspannung des Operationsverstärkers	V
u_{mess}	Messspannung	V
u_T	Spannung an der Torquemotor-Spule	V
u_U	Spannung am Frequenzumrichter	V

$u_{U\max}$	Spannungsbegrenzung am Frequenzumrichter	V
V_0	Ölvolumen	cm ³
V_1	geometrisches Fördervolumen der Pumpe (Primärseite)	cm ³ /U
$V_{1\max}$	maximales geometrisches Fördervolumen der Pumpe	cm ³ /U
V_2	geometrisches Schluckvolumen des Motors (Sekundärseite)	cm ³ /U
$V_{2\max}$	maximales geometrisches Schluckvolumen des Motors	cm ³ /U
V_A	Volumen des Kompressionsraumes A	cm ³
V_B	Volumen des Kompressionsraumes B	cm ³
V_H	hydraulische Verstärkung	bar/(l/min)
V_K	Kreisverstärkung	-
V_{KE}	Kreisverstärkung der drehzahlgeregelten Konstantpumpe	-
V_{KS}	Kreisverstärkung des Stellsystems	-
V_M	mechanische Verstärkung	rad/s/(Nm)
V_{My}	Momenten-Signal-Verstärkung des Stellmotors	Nm/A
V_{pi}	Druck-Signal-Verstärkung	bar/A
V_{py}	Druck-Signal-Verstärkung	bar/mm
V_{Qi}	Volumenstrom-Signal-Verstärkung	(l/min)/A
V_{Qp}	Volumenstrom-Druck-Verstärkung	(l/min)/bar
V_{TQp}	Volumenstrom-Druck-Verstärkung des Torquemotors	(l/min)/bar
V_{Qv}	Volumenstrom-Signal-Verstärkung	(l/min)/mm
$V_{TQ\phi}$	Volumenstrom-Signal-Verstärkung des Torquemotors	(l/min)/bar
V_{tot}	Totvolumen des Kompressionsraumes	cm ³
V_V	Ventilverstärkung	mm/A
V_{VQp}	Volumenstrom-Druck-Verstärkung des Stellventils	(l/min)/mm
V_{VQv}	Volumenstrom-Weg-Verstärkung des Stellventils	(l/min)/mm
V_{yi}	Wegverstärkung	mm/A

w	Sollwert, allgemein	
x	Weg	mm
\dot{x}	Geschwindigkeit	m/s
\ddot{x}	Beschleunigung	m/s ²
x_2	Zylinderposition	mm
x_{\max}	maximaler Weg	mm
\dot{x}_{\max}	maximale Geschwindigkeit	m/s
y	Stellweg	mm
\dot{y}	Stellgeschwindigkeit	m/s
\ddot{y}	Stellbeschleunigung	m/s ²
y_{\max}	maximaler Stellweg	mm
\dot{y}_{\max}	maximale Stellgeschwindigkeit	m/s
y_V	Ventilschieberweg	mm
\dot{y}_V	Ventilschiebergeschwindigkeit	m/s
\ddot{y}_V	Ventilschieberbeschleunigung	m/s ²
$y_{V\max}$	maximaler Ventilschieberweg	mm
$\dot{y}_{V\max}$	maximale Ventilschiebergeschwindigkeit	m/s
α	Flächenverhältnis des Zylinders	-
$\alpha_{D,ab}$	Durchflusskoeffizient der Ablaufdüse	-
$\alpha_{D,zu}$	Durchflusskoeffizient der Zulaufblende	-
φ	Drehwinkel, Phasenwinkel	rad
φ_2	Drehwinkel des Motors	rad
$\dot{\varphi}_2$	Winkelgeschwindigkeit des Motors	rad/s
$\ddot{\varphi}_2$	Winkelbeschleunigung des Motors	rad/s ²
ϑ	Öltemperatur	°C
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹
ω_0	Eigenkreisfrequenz	s ⁻¹
ω_{90°	-90°-Kreisfrequenz	s ⁻¹
ω_E	Kennkreisfrequenz des elektrischen Systems	s ⁻¹
ω_H	Kennkreisfrequenz des hydraulischen Systems	s ⁻¹
ω_S	Kennkreisfrequenz des Stellsystems	s ⁻¹
ω_V	Kennkreisfrequenz des Ventils	s ⁻¹
ω_T	Kennkreisfrequenz des Torquemotors	s ⁻¹

ω_z	Eigenkreisfrequenz des Zylinders	s^{-1}
ω_{z0}	Bezugseigenkreisfrequenz des Zylinders	s^{-1}
$\omega_{z\min}$	minimale Eigenkreisfrequenz des Zylinders	s^{-1}