

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

Umdruck zur Vorlesung

Servohydraulik - Geregelte hydraulische Antriebe

4., neu überarbeitete Auflage 2012

unter Mitwirkung von:

Sebastian Sgro,
Sebastian Drumm,
Kristof Schlemmer

sowie

Christoph Siebert, Matthias Liermann, 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.

Der Airbus A380 ist ein vierstrahliger Großraumflugzeug des europäischen Flugzeugherstellers Airbus. Der Tiefdecker mit zwei durchgängigen Passagierdecks ist das größte zivile Verkehrsflugzeug, das bisher in Serienfertigung produziert wurde. Die A380 besitzt im Unterschied zu herkömmlichen Verkehrsflugzeugen nur noch zwei Hydraulikkreisläufe. Das Titelbild zeigt den Schaltplan sowie die technische Ausführung eines sekundäreregelten Antriebs zur Betätigung von Klappen, den sogenannten Flaps, die im Hochauftriebssystem eines A380 eingesetzt werden. Jede Antriebseinheit besteht aus einem sekundäreregelten Verstellmotor mit Kupplung, Stellantriebsgetriebe sowie mechanischem Spindel-Mutter-Getriebe zur Klappenverstellung. Die Lageregelung der Klappe erfolgt über die Erfassung des Drehwinkels an der Spindel des Stellantriebs. Insgesamt können bis zu fünf solcher Antriebseinheiten pro Tragfläche eingesetzt werden. Aufgrund geringerer Verluste der Sekundärregelung lässt sich der mittlere Leistungsbedarf um 50% im Vergleich zum Antrieb mit ventilgesteuertem Konstantmotor (Quadrant II) senken. Dadurch wird die Wärmeeinbringung in das Hydrauliksystem des Flugzeugs halbiert. Bei einem Gewicht von 58 kg wird eine Leistung von 93 kW pro Antriebseinheit erreicht.

Bildnachweis: www.liebherr.com

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0947-7

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	26
2.1	Übersicht und Systematik	27
2.2	Ventilgesteuerte Antriebe.....	29
2.2.1	Systematik der Ventilsteuerungen	30
2.2.1.1	<i>Hydraulische Brückenhalbglieder</i>	30
2.2.1.2	<i>Hydraulische Vollbrückenschaltungen</i>	32
2.2.2	Quadrant I – Ventilsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom....	35
2.2.3	Quadrant II – Ventilsteuerung am Konstantdrucknetz	36
2.3	Verdrängergesteuerte Antriebe.....	37
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	56
3.1.3	Mehrstufige Stetigventile	63
3.1.3.1	<i>Zweistufige Stetigventile</i>	64
3.1.3.2	<i>Dreistufige Stetigventile</i>	70
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	106
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	143
5.2	Sensoren zur Druckmessung	143
5.2.1	Aufbau von resistiven Druckaufnehmern	144
5.2.2	Piezoelektrische Drucksensoren	146
5.3	Reglerbaugruppen	148

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>	166
6.2.1.2	<i>Vollbrücken</i>	176
6.2.2	Brückenschaltung bei Konstantstromquelle.....	195
6.2.2.1	<i>Vollbrücke A+A</i>	196
6.3	Linearisierung der Kennfelder	199
6.3.1	Linearisierung der negativ überdeckten Vollbrücke A+A.....	200
6.3.2	Linearisierung der nullüberdeckten Vollbrücke A+A	201
6.4	Ermittlung der Kenngrößen aus Ventildatenblättern	203
6.5	Experimentelle Ermittlung der Kenngrößen.....	207
6.6	Wirkungsgrad von Ventilsteuerungen.....	213
6.6.1	Konstantdrucksystem	213
6.6.2	Konstantstromsystem	219
6.7	Kosten-Nutzen-Betrachtung zu den Vollbrückenschaltungen.....	220
7	MODELLBILDUNG HYDRAULISCHER ANTRIEBE	223
7.1	Mathematische Modelle hydraulischer Komponenten.....	226
7.1.1	Stetigventil.....	226
7.1.1.1	<i>Nichtlineares Modell 5. Ordnung</i>	226
7.1.1.2	<i>Linearisiertes Modell 3. Ordnung</i>	240
7.1.1.3	<i>Linearisiertes Modell 2. Ordnung</i>	243
7.1.2	Verdrängerstellsystem.....	245
7.1.2.1	<i>Nichtlineares Modell 5. Ordnung</i>	246
7.1.2.2	<i>Linearisiertes Modell 2. Ordnung</i>	247
7.1.2.3	<i>Nichtlineares Modell 1. Ordnung</i>	251
7.1.3	Verstellpumpe	251
7.1.4	Drehzahlveränderliche Konstantpumpe.....	252
7.1.5	Konstantmotor.....	255
7.1.5.1	<i>Rotationsmotor</i>	255
7.1.5.2	<i>Linearmotor</i>	261
7.1.6	Verstellmotor	264
7.2	Frequenzgänge und dynamische Kennwerte	266
7.2.1	Steuerkette Typ 1	266

7.2.1.1	Stetigventil – Rotationsmotor	266
7.2.1.2	Stetigventil – Linearmotor (Gleichgangzylinder).....	276
7.2.1.3	Servopumpe – Rotationsmotor.....	278
7.2.1.4	Servopumpe – Linearmotor (Gleichgangzylinder).....	280
7.2.1.5	Stetigventil – Linearmotor (Differentialzylinder).....	282
7.2.2	Steuerkette Typ 2	289
7.3	Nichtlinearitäten in realen servohydraulischen Antrieben	290
7.3.1	Nichtlinearitäten des Druckaufbaus.....	291
7.3.2	Nichtlinearitäten ventiltgesteuerter Servoantriebe	292
7.3.2.1	Einfluss des nichtlinearen Kennlinienfeldes des Stetigventils	292
7.3.2.2	Einfluss der Überdeckungsverhältnisse des Steuerschiebers	295
7.3.3	Nichtlinearitäten pumpengesteuerter Servoantriebe.....	296
7.3.3.1	Einfluss der Speise- und Spüleinheit.....	298
7.3.3.2	Einfluss der Druckbegrenzungsventile.....	301
7.3.3.3	Einfluss der Leitungslänge zwischen Pumpe und Motor.....	303
7.3.3.4	Eingepanntes hydrostatisches Getriebe.....	304
8	REGELUNG HYDRAULISCHER ANTRIEBE	309
8.1	Kraft-, Momenten- und Druckregelung.....	311
8.1.1	Kraft-, Momenten- und Druckregelung für Typ 1.....	312
8.1.1.1	Linearisiertes Modell der Kraftregelung	313
8.1.1.2	Konzepte für die Kraftregelung	315
8.1.1.3	Druckregelung mit Widerstandssteuerung.....	320
8.1.1.4	Druckregelung mit Verstellpumpe.....	324
8.1.1.5	Druckregelung mit Konstantpumpe und drehzahlveränderbarem Elektromotor	330
8.1.2	Kraft-, Druck- und Momentenregelung für Typ 2.....	332
8.1.2.1	Linearisiertes Modell der Momentenregelung.....	332
8.1.2.2	Konzepte für die Momentenregelung.....	333
8.2	Geschwindigkeitsregelung.....	337
8.2.1	Geschwindigkeitsregelung für Typ 1	338
8.2.1.1	Einschleifige Regelung.....	340
8.2.1.2	Mehrschleifige Regelung.....	345
8.2.2	Geschwindigkeitsregelung für Typ 2.....	350
8.3	Lageregelung	366
8.3.1	Lageregelung für Typ 1	366
8.3.1.1	Einschleifige Regelung.....	366
8.3.1.2	Mehrschleifige Regelung.....	390

8.3.2	Lageregelung für Typ 2	406
8.3.2.1	<i>Einschleifige Regelung</i>	407
8.3.2.2	<i>Mehrschleifige Regelung</i>	415
9	ANHANG – REGELUNGSTECHNISCHE GRUNDLAGEN	417
9.1	Regelungstechnische Darstellungsweisen	417
9.1.1	Der Wirkungsplan	418
9.1.2	Elementare lineare Übertragungsglieder	419
9.2	Beschreibung von Regelkreisgliedern durch Differentialgleichungen	424
9.2.1	Hydraulisches RC-Glied mit PT_1 -Verhalten	424
9.2.2	Schwingungsfähiges hydraulisches System mit PT_2 -Verhalten ..	426
9.3	Beschreibung von Regelkreisgliedern durch Frequenzganggleichungen ..	430
9.4	Zusammenschaltung von Übertragungsgliedern	431
9.5	Untersuchungsmethoden	432
9.5.1	Zeitbereich	432
9.5.2	Frequenzbereich	433
9.6	Linearisierung von Kennlinien	435
9.7	Der Regelkreis	436
9.7.1	Regelstrecke mit und ohne Ausgleich	436
9.7.2	Führungs- und Störverhalten	437
9.7.3	Stabilität des Regelkreises	438
9.7.3.1	<i>Nyquist-Kriterium</i>	438
9.7.3.2	<i>Hurwitz-Kriterium</i>	442
9.7.3.3	<i>Wurzelortskurven-Verfahren</i>	443
9.7.4	Die Kreisverstärkung	444
9.8	ITSE- und ITAE-Kriterium zur Bewertung der Regelkreisdynamik	447
10	LITERATURVERZEICHNIS	451
11	INDEX	457

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_{soll}	Sollwert der allgemeinen Bewegungsgröße	
B	Durchflussbeiwert	$l/(\text{min mm})\sqrt{\text{bar}}$
C_0	Geschwindigkeitsverstärkung	$(\text{m/s})/\text{mm}$
C_H	hydraulische Kapazität	l/bar
C_{HA}	hydraulische Kapazität der Zylinderkammer A	l/bar
C_{HB}	hydraulische Kapazität der Zylinderkammer B	l/bar
c_0	Volumenstromverstärkung	$(l/\text{min})/\text{mm}$
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_Z	Dämpfungsgrad des Zylinders	-
d_i	Innendurchmesser der Torquemotordüsen	mm

d_T	drehgeschwindigkeitsproportionaler Dämpfungskennwert des Torquemotor-Ankers	Nm/(rad/s)
$d_{\dot{x}}$	geschwindigkeitsproportionaler Reibkennwert des Linearmotors	Ns/cm
d_{zu}	Durchmesser der Zulaufblende	mm
$d_{\dot{\phi}}$	drehgeschwindigkeitsproportionaler Reibkennwert des Rotationsmotors	Nm/(rad/s)
E_0	Kraftverstärkung	N/mm
e_0	Druckverstärkung	bar/mm
$E_{Ö1}$	Kompressionsmodul	bar
$E'_{Ö1}$	Ersatzkompressionsmodul	bar
F_C	Coulomb'sche Reibkraft	N
F_F	Federkraft	N
F_L	Lastkraft	N
F_R	Reibkraft	N
F_S	Strömungskraft	N
F_{SL}	Eigenverstellkraft des Stellzylinders	N
f	Frequenz	Hz
f_E	Eigenfrequenz des drehzahleregelten 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 A	(l/min)/bar
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 geschwindigkeits-abhängigen Leckage des Linearmotors	l/cm
$K_{2Li\phi}$	Kennwert der internen drehgeschwindigkeits-abhängigen 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_{SLix}	Kennwert der internen geschwindigkeits-abhängigen 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_{Eck}	Eckleistung	kW
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
$Q_{0,\text{ges}}$	Nulldurchfluss	l/min
$Q_{0,\text{max}}$	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
$Q_{1\text{max}}$	maximaler Pumpenvolumenstrom	l/min
$Q_{1\text{th}}$	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
$Q_{2\text{th}}$	theoretischer Motorvolumenstrom	l/min
Q_A	Volumenstrom vom/zum Anschluss A	l/min
$Q_{A,\text{ab}}$	abfließender Steuervolumenstrom auf Seite A	l/min
$Q_{A,\text{zu}}$	zufließender Steuervolumenstrom auf Seite A	l/min
Q_B	Volumenstrom vom/zum Anschluss B	l/min
$Q_{B,\text{ab}}$	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_Z	Zeitkonstante des Zylinders	s
T_1	Verzögerungszeitkonstante des Regelgliedes	s
T_2	Vorhaltzeit des Regelgliedes	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
$u_{U_{\text{max}}}$	Spannungsbegrenzung am Frequenzumrichter	V
V_0	Ölvolumen	cm ³
V_1	geometrisches Fördervolumen der Pumpe (Primärseite)	cm ³ /U
$V_{1_{\text{max}}}$	maximales geometrisches Fördervolumen der Pumpe	cm ³ /U
V_2	geometrisches Schluckvolumen des Motors (Sekundärseite)	cm ³ /U
$V_{2_{\text{max}}}$	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 Verstellmotors	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

$V_{TQ\varphi}$	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_{VQy}	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
$y_{V\text{max}}$	maximaler Ventilschieberweg	mm
$\dot{y}_{V\text{max}}$	maximale Ventilschiebergeschwindigkeit	m/s
α	Flächenverhältnis des Zylinders	-
$\alpha_{D,\text{ab}}$	Durchflusskoeffizient der Ablaufdüse	-
$\alpha_{D,\text{zu}}$	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}