WERKZEUGMASCHINEN

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Denis Özdemir

Optimierung von Vorschubantrieben mit objektorientierten Verhaltensmodellen

Edition Wissenschaft Apprimus

Optimierung von Vorschubantrieben mit objektorientierten Verhaltensmodellen

Optimization of Feed Drives with Object-oriented Behavior Models

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Denis Özdemir

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2016

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Denis Özdemir

Optimierung von Vorschubantrieben mit objektorientierten Verhaltensmodellen

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 18/2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Denis Özdemir:

Optimierung von Vorschubantrieben mit objektorientierten Verhaltensmodellen

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2016
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-436-7

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Wesentliche Teile wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt „Optimierung des Systementwurfs von Maschinen und Anlagen auf Basis komponentenorientierter Verhaltensmodelle“ gefördert.

Professor Christian Brecher danke ich für die Betreuung meiner Arbeit sowie für das entgegengebrachte Vertrauen und die Entwicklungsmöglichkeiten an seinem Lehrstuhl. Professor Welf-Guntram Drossel danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie Professor Georg Jacobs für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Abteilung Steuerungstechnik und Automatisierung am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen wurde während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Werner Herfs und später von Wolfram Lohse geleitet. Beiden verdanke ich zum einen die Freiheit, den Freiraum und das Vertrauen, um neue Ideen entwickeln zu können und zum anderen die kritischen Diskussionen, um aus den Ideen Projekte werden zu lassen.

Meine Arbeit wurde durch zahlreiche Studenten unterstützt. Besonders hervorheben möchte ich die Unterstützung von Ilker Dogan, der durch seine strukturierte und durchdachte Vorgehensweise die Basis für alle späteren Software-Implementierungen gelegt hat. Darüber hinaus haben Nils Heierhoff, Oner Hanay und Stefan Baier wichtige Beiträge zur Implementierung geleistet.

Zum Juli 2014 habe ich die Geschäftsführung des Aachener Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ übernommen. Den Mitarbeitern aus der Geschäftsstelle, Anja Weber, Claudia Kreutz, Günter Wasserberg, Anja Wassong und Sabrina Gellissen, möchte ich dafür danken, mir den Rücken so freigehalten zu haben, dass ich meine Arbeit auch mit den neuen Aufgaben fertigstellen konnte.

Den Mitarbeitern aus EDV danke ich dafür, dass ich mir um die Rechner- und Softwareinfrastruktur nie Gedanken machen musste und mich auf die eigentliche Arbeit konzentrieren konnte. Für das Gelingen dieser Arbeit war auch unsere Institutsbibliothek hilfreich, die von Frau Sistemich stets in bester Ordnung gehalten wird.

Meinem Kollegen Tobias Motschke danke ich für die kritische Durchsicht der Dissertationsschrift. Natürlich möchte ich auch allen WZL-Kollegen für ein Klima danken, in dem jeder über seine ursprüngliche Leistungsgrenze hinausgeht und in dem man sich immer auf den anderen verlassen kann.

Ich danke außerdem Viviane Dreessen und meiner Familie für die große Geduld in Bezug auf diese Arbeit und für die stetige Unterstützung.

Die Arbeit möchte ich meinem Großvater, Professor Hermann Stegemann, widmen, ohne den ich wahrscheinlich nicht zur Wissenschaft gekommen wäre.

Aachen, im Mai 2016 Denis Özdemir

Inhaltsverzeichnis

Table of Contents

1 Einleitung 1

Introduction 3

2 Stand der Technik 5

2.1 Anforderungen an Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen 5
2.2 Komponenten und Aufbau von Vorschubantrieben 6
2.2.1 Pneumatische Vorschubantriebe 6
2.2.2 Hydraulische Vorschubantriebe 7
2.2.3 Elektrische Vorschubantriebe 8
2.2.4 Beurteilungsverfahren für Vorschubantriebe 14
2.3 Auslegung von elektrischen Vorschubantrieben 16
2.3.1 Motordaten des permanenterregten Synchronmotors 16
2.3.2 Vorgehen zur Auslegung von Vorschubantrieben 17
2.4 Software zur Berechnung und Auslegung 20
2.4.1 Spezifische Software zur Antriebsauslegung 20
2.4.2 Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme 22
2.5 Forschungsansätze zur Auslegung von Vorschubantrieben 24
2.5.1 Algebraische Rechnerprogramme (seit ca. 1970) 24
2.5.2 Auslegung mit Regelkreissimulation (seit ca. 1980) 26
2.5.3 Modellintegration und Co-Simulation (seit ca. 2000) 28
2.5.4 Auslegung mit Optimierungsalgorithmen (seit ca. 2000) 29
2.6 Fazit aus dem Stand der Technik 31

3 Zielsetzung und Vorgehensweise 33

4 Entwurf des Grobkonzeptes 37

4.1 Produktentstehungsprozess im Werkzeugmaschinenbau 37
4.2 Prozessmodell zur Auslegung von Vorschubantrieben 39
4.3 Grobarchitektur der Auslegungsumgebung 41

5 Objektorientierte Verhaltens- und Anforderungsmodellierung 47

5.1 Konzept zur mechatronischen Verhaltensmodellierung 48
5.1.1 Konnektoren zur Beschreibung der Systemtopologie 49
5.1.2 Verhaltensmodellierung mit DAE-Systemen 51
5.1.3 Simulationstechnische Aspekte 53
5.1.4 Sprachen und Software für objektorientierte Verhaltensmodelle 54
5.2 Konzept zur Anforderungsmodellierung 56
5.2.1 Grundlagen zur Gestaltung einer Verhaltensmetrik 56
5.2.2 Methoden und Sprachen der Anforderungsmodellierung 59
5.3 Objektorientierte Modelle für Motoren von Vorschubantrieben 60
5.3.1 Modell des permanenterregten Synchronmotors (PSM) 60

5.3.2 Modell des permanenterregten Synchronmotors mit Feldschwächoption (PSM-FW) ... 74
5.3.3 Modell des Linearmotors ... 76
5.4 Objektorientierte Modelle für mechanische Übertragungselemente ... 79
5.4.1 Modell für Kugelgewindetriebe ... 80
5.4.2 Modell für Ritzel-Zahnstange-Antriebe ... 82
5.4.3 Modell für Lineareinheiten mit Zahnriemen ... 83
5.4.4 Modell für Zahnriemengetriebe ... 83
5.4.5 Modelle für Zahnradgetriebe ... 85
5.4.6 Modelle für Kupplungen ... 86
5.4.7 Modell für lineare Wälzführungen ... 87
5.4.8 Modelle aus verketteten Übertragungselementen ... 88

6 Objektorientierte Optimierung ... 97

6.1 Konzept zur objektorientierten Optimierung ... 97
6.1.1 Einführendes Optimierungsbeispiel ... 97
6.1.2 Allgemeiner Lösungsansatz ... 100
6.1.3 Anforderungen an die Optimierung ... 103
6.1.4 Methoden zur Lösung des Optimierungsproblems ... 110
6.1.5 Optimierungssoftware ... 114
6.2 Architektur der Optimierungsumgebung ... 116
6.3 Implementierung ... 118
6.4 Auslegungsszenarien ... 119
6.4.1 Auslegung ohne Schwingungsverhalten ... 119
6.4.2 Optimierung des Schwingungsverhaltens ... 133

7 Zusammenfassung und Ausblick ... 147

Summary and Outlook ... 149

8 Literaturverzeichnis ... 151

Zeichen, Einheiten und Benennungen[1]

Characters, Units and Names

Lateinische Zeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
a_0, a_1, a_2	-	Getriebekonstanten bzgl. der Getriebeerwärmung
$a_{L,max}$	m/s^2	Maximale Beschleunigung der Last
C_{0am}	N	Modifizierte statische axiale Tragzahl eines Kugelgewindetriebs
C_{am}	N	Modifizierte dynamische axiale Tragzahl eines Kugelgewindetriebs
C_M	J/K	Wärmekapazität des Motors
$\mathbf{c}$	-	Vektor mit Komponentenindizes
c	N/m	Federkonstante
c_{AL}	N/m	Federkonstante einer verspannten Spindellagerung
$c_{kT,M}$	-	Drehmomentkoeffizient der Drehmomentkonstante
$c_{kT,T}$	-	Temperaturkoeffizient der Drehmomentkonstante
c_M	N/m	Federkonstante der Gewindemutter
c_p	J/(K kg)	Spezifische Wärmekapazität
c_{Sp}	N/m	Axiale Federkonstante der Gewindespindel
c_{SpM}	N/m	Axiale Federkonstante der Gewindespindel und Mutter
c'_{Sp}	N/m^2	Längenspezifische Federkonstante der Spindel
$c_{T,dyn}$	Nm/rad	Dynamische Torsionsfederkonstante einer Kupplung
c_{To}	Nm/rad	Torsionsfederkonstante
$c_{To,M}$	Nm/rad	Torsionsfederkonstante des Motorwellenendes
$c_{To,Sp}$	Nm/rad	Torsionsfederkonstante der Gewindespindel
con	-	Grenzwertvariable (Constraint)
D_{mech}	-	Dämpfungsgrad
D_{mech}	-	Dämpfungsgrad eines mechanischen Schwingers
$D_{mech,1}$	-	Dämpfungsgrad eines mechanischen Übertragungsglieds als 1-Massenschwinger

[1] Verwendung von Formelzeichen nach Möglichkeit entsprechend [GROS06b].

DN_{zul}	mm min^{-1}	Drehzahlkennwert als Maß für die Kugelbahngeschwindigkeit
d	-	Differenzgröße
d_{Sp}	m	Spindeldurchmesser
d_V	N s/m	Dämpfungsbeiwert, lineare Bewegung
d_ω	Nm s/rad	Dämpfungsbeiwert, rotatorische Bewegung
F	N	Kraft
F_{2M}	-	Frequenzgang des Zweimassenschwingers $F_{2M} = \omega_M / M_M$
F_A	-	Frequenzgang des Antriebs
$F_{a,VM}$	N	Vorspannkraft der Gewindemutter
ΔF_L	N	Lastkraftsprung
F_M	N	Motorkraft, Linearmotor
F_{ma}	N	Äquivalente dynamische axiale Belastung am Kugelgewindetrieb
F_{mech}	-	Frequenzgang der Mechanik $F_{mech} = \varphi_L / \varphi_M$
$F_{R1,zul}$	N	Zulässige Umfangskraft für die Last am Zahnriemenritzel
F_{Sn}	-	Frequenzgang der Regelstrecke des Drehzahlregelkreises $F_{Sn} = \omega_M / M_M$
F_{Sp}	N	Kraft in Gewindespindelrichtung
$F_{Sp,max}$	N	Maximal auftretende Kraft in Gewindespindelrichtung
F_V	N	Vorschubkraft
$F_{V,max}$	N	Maximale Vorschubkraft
F_{wI}	-	Führungsfrequenzgang des Stromregelkreises $F_{wI} = I_A / I_{A,soll}$
F_{wL}	-	Führungsfrequenzgang des Lageregelkreises $F_{wL} = \varphi_L / w_x$
f	-	Flussgröße
f_d	Hz	Eigenfrequenz
$f_{d,min}$	Hz	Minimal zulässige Eigenfrequenz
f_N	Hz	Nullstellenfrequenz
f_P	Hz	Polstellenfrequenz
H	dB	Resonanzüberhöhung des Frequenzgangs

Δh	-	Relative Überschwingweite
h_{Sp}	m	Steigung der Gewindespindel oder Schnecke
I	A	Strom
$I_{0,100K}$	A	Motorstrom für $M_{0,100K}$
$I_{0,60K}$	A	Motorstrom für $M_{0,60K}$
I_A	A	Effektivwert des Ankerstroms an den Klemmen
$I_{A,RMS}$	A	Quadratischer Mittelwert des Effektivwerts des Ankerstroms
$I_{A,max}$	A	Maximalwert des Ankerstrom-Effektivwerts I_A
$I_{A,tL}$	A	Effektivwert des Ankerstroms über die gesamte Lastzykluszeit t_L
$I_{M,max}$	A	Zulässiger Motorstrom
$I_{N,100K}$	A	Motorstrom für $M_{N,100K}$
I_d	A	Effektivwert des flussbildenden Stroms
I_q	A	Effektivwert des drehmomentbildenden Stroms
I_{soll}	A	Stromsollwert
i_d	A	Flussbildender Strom
i_q	A	Drehmomentbildender Strom
i	-	Getriebeübersetzung: Ein-/Abtriebsdrehzahl
J	-	Skalare Zielgröße
J	kg m^2	Trägheitsmoment
J_{Ges}	kg m^2	Gesamtträgheitsmoment auf die Motorwelle bezogen
J_K	kg m^2	Trägheitsmoment der Kupplung
J_L	kg m^2	Lastträgheitsmoment auf die Motorwelle bezogen
J_M	kg m^2	Motorträgheitsmoment
J_{R1}	kg m^2	Trägheitsmoment der kleinen Zahnscheibe
J_{R2}	kg m^2	Trägheitsmoment der großen Zahnscheibe
K_E	V s/rad, V/1000 min^{-1}	Spannungskonstante bei 20 °C
K_F^*	N/A	Kraftkonstante in Abhängigkeit von Temperatur und Drehmoment
K_{Pn}	Nms/rad, A s/rad	Proportionalbeiwert des Drehzahlreglers
K_p	Pa/$(m^3/s)^{1,75}$	Druckverlustfaktor

K_V	s^{-1},(m/min)/mm	Proportionalbeiwert des Lagereglers, K_V-Faktor
K_T	Nm/A	Drehmomentkonstante bei 20 °C
K_T^*	Nm/A	Drehmomentkonstante in Abhängigkeit von Temperatur und Drehmoment
k_R	$W/(rad/s)^{1,5}$	Proportionalitätskonstante für drehzahlabhängige Motorverluste
$k_{Sp,L}$	-	Korrekturfaktor für die Spindelsteifigkeit ($k_{Sp,L} = 1$ bei einseitiger Einspannung, $k_{Sp,L} = 4$ bei beidseitiger Einspannung)
$k_{Sp,Kn}$	N/m^2	Faktor zur Berechnung der Knickfestigkeit
$k_{Sp,n}$	m min^{-1}	Faktor zur Berechnung der kritischen Drehzahl
L_D	H	Wirksame Drehfeldinduktivität eines Strangs
L_h	h	Nominelle Lebensdauer eines Kugelgewindetriebs
$L_{h,min}$	h	Geforderte nominelle Lebensdauer eines Kugelgewindetriebs
l_{Sp}	m	Länge der Gewindespindel
$M_{0,100\,K}$	Nm	Stillstandsdrehmoment eines Servomotors für 100 K Übertemperatur
$M_{0,60\,K}$	Nm	Stillstandsdrehmoment eines Servomotors für 60 K Übertemperatur
M_2	Nm	Abtriebsdrehmoment eines Servogetriebes
$M_{2,Dzul}$	Nm	Zulässiges Abtriebsdrehmoment eines Servogetriebes im Dauerbetrieb
$M_{2,eff3}$	Nm	Effektives Abtriebsdrehmoment eines Servogetriebes
$M_{2,Kzul}$	Nm	Zulässiges Abtriebsdrehmoment eines Servogetriebes
M_L	Nm	Lastdrehmoment auf die Motorwelle bezogen
M_M	Nm	Motordrehmoment
$M_{M,eff}$	Nm	Effektives Drehmoment eines Belastungsspiels
$M_{M,Imax}$	Nm	Motordrehmoment an der Stromgrenze
$M_{M,max}$	Nm	Maximal auftretendes Motordrehmoment
$M_{N,100\,K}$	Nm	Bemessungsdrehmoment eines Servomotors für 100 K Übertemperatur
ΣM_R	Nm	Summe der Drehmomente für Reibung und Verluste, auf die Motorwelle bezogen

$M_{R1,zul}$	Nm	Zulässiges Drehmoment an der kleinen Zahnscheibe
$M_{V,M}$	Nm	Drehmoment für Reibung und Verluste im Motor
$M_{V,N}$	Nm	Drehmoment für Reibung und Verluste im Motor am Bemessungspunkt
$M_{S1,100K}$	Nm	Motordrehmoment für Dauerbetrieb bei 100 K Übertemperatur
$M_{S1,60K}$	Nm	Motordrehmoment für Dauerbetrieb bei 60 K Übertemperatur
$M_{S3,25\%}$	Nm	Motordrehmoment für den Aussetzbetrieb bei einer relativen Einschaltdauer von 25 % und einer Übertemperatur von 100 K
M_{soll}	Nm	Solldrehmoment des Motors
$M_{Therm,\,eff}$	Nm	Effektives Abtriebsmoment bezüglich der Erwärmung
$M_{Therm,\,zul}$	Nm	Zulässiges Abtriebsmoment bezüglich der Erwärmung
M_u	Nm	Verlauf des Lastdrehmoments entsprechend einer Eingangsgröße
m	kg	Masse
m	-	Vektor der Verhaltensmetriken
m_M	kg	Masse des Motors
m_L	kg	Masse der Last
n_1	min^{-1}	Antriebsdrehzahl eines Servogetriebes
$n_{1,Dzul}$	min^{-1}	Zulässige Antriebsdrehzahl eines Servogetriebes im Dauerbetrieb
$n_{1,Kzul}$	min^{-1}	Zulässige Antriebsdrehzahl eines Servogetriebes
$n_{1,m}$	min^{-1}	Mittlere Antriebsdrehzahl eines Servogetriebes
n_M	min^{-1}	Motordrehzahl
n_m	min^{-1}	Zeitlicher Mittelwert der Drehzahl eines Kugelgewindetriebs
$n_{M,m}$	min^{-1}	Zeitlicher Mittelwert der Motordrehzahlen eines Belastungsspiels
$n_{M,zul}$	min^{-1}	Zulässige Motordrehzahl
$n_{M,max}$	min^{-1}	Maximal auftretende Motordrehzahl
n_N	min^{-1}	Bemessungsdrehzahl

n_{R1}	min^{-1}	Drehzahl der kleinen Zahnscheibe
$n_{Sp,max}$	min^{-1}	Drehzahl der Gewindespindel
$n_{Sp,max}$	min^{-1}	Maximale Drehzahl der Gewindespindel
n_u	min^{-1}	Verlauf der Lastdrehzahl entsprechend einer Eingangsgröße
obj	-	Variable für zu minimierende Zielgrößen
$\bar{P}_{el}$	W	Durchschnittliche elektrische Leistung
$P_{R1,max}$	W	Maximal auftretende Leistung an der kleinen Zahnscheibe
$P_{R1,zul}$	W	Zulässige Leistung an der kleinen Zahnscheibe (drehzahlabhängig)
P_V	W	Verlustleistung
p	-	Polpaarzahl
$\mathbf{p}_C$	-	Vektor mit Komponentenparametern
$\mathbf{p}_S$	-	Vektor mit Systemparametern
$\dot{Q}_M$	W	Wärmestrom aus dem Motor
Re	-	Reynoldszahl
R_{Str}	Ω	Strangwiderstand bei 20 °C
R^*_{Str}	Ω	Strangwiderstand in Abhängigkeit der Temperatur
R_{th}	W/K	Wärmeübergangswiderstand
S	-	Sicherheitsfaktor, z. B. S_U für Spannungsgrenze
s	m	Position
Δs_{dyn}	m	Dynamische Wegabweichung
T_{Gn}	s	Drehzahlsollwertverzögerungszeit
T_i	s	Zeit für eine Iteration des Optimierers
T_M	K	Mittlere Motortemperatur
$T_{M,0}$	K	Mittlere Motortemperatur bei t = 0
$\Delta T_{M,max}$	K	Maximale Übertemperatur des Motors
$\Delta T_{M,zul}$	K	Zulässige Übertemperatur des Motors (i. d. R. 60 K oder 100 K)
T_{nn}	s	Nachstellzeit des Drehzahlreglers
T_R	K	Rücklauftemperatur des Kühlmediums
T_U	K	Umgebungstemperatur

T_V	K	Vorlauftemperatur des Kühlmediums
t	s	Zeit
t_B	s	Beschleunigungs- und Verzögerungszeit
t_{end}	s	Zeitpunkt am Ende eines Zeitintervalls
$t_{mech, A}$	s	Mechanische Zeitkonstante des Antriebs
t_H	s	Hochlaufzeit
$t_{th, A}$	s	Thermische Zeitkonstante des Antriebs
U	V	Spannung
U_A	V	Effektivwert der Ankerspannung an den Klemmen
$U_{A,max}$	V	Maximaler Effektivwert der Ankerspannung an den Klemmen
$U_{A,\neg FS}$	V	Effektivwert der Ankerspannung an den Klemmen ohne Feldschwächung
U_{An}	V	Effektivwert der Ankerstrangspannung
$U_{An, max}$	V	Maximaler Effektivwert der Ankerstrangspannung
U_d	V	Effektive Motorspannung in d-Koordinatenrichtung
$U_{d,max}$	V	Maximale effektive Motorspannung in d-Koordinatenrichtung
U_q	V	Effektive Motorspannung in q-Koordinatenrichtung
$U_{q,max}$	V	Maximale effektive Motorspannung in q-Koordinatenrichtung
$U_{U,max}$	V	Maximaler Effektivwert der Umrichterausgangsspannung
U_{ZK}	V	Zwischenkreisspannung
u	-	Eingangsgröße
u	-	Vektor der Eingangsgrößen
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit
v_L	m/s	Geschwindigkeit der axialen Lastträgheit
$v_{L,max}$	m/s	Maximale Geschwindigkeit der axialen Lastträgheit
v_M	m/s	Geschwindigkeit des Linearmotors
w	-	Gewichtung
W_{el}	J	Elastische Formänderungsarbeit einer Kupplung

W_D	J	Dämpfungsarbeit eines Schwingungszyklus für eine Kupplung
w_x	-	Führungsgröße des Lagereglers
x	m	Lageistwert
x	-	Zustandsvektor
x_{soll}	m	Lagesollwert
y	-	Systemgröße
y_{ref}	-	Referenzgröße
x	-	Vektor algebraischer Variablen
z_{R1}	-	Zähnezahl der kleinen Zahnscheibe
z_{R2}	-	Zähnezahl der großen Zahnscheibe

Griechische Zeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
α	Ω/K	Temperaturkoeffizient des Widerstands
α_M	rad/s^2	Winkelbeschleunigung des Motors
$\boldsymbol{\phi}$	-	Vektor mit Zielgrößen
η_{SM}	-	Wirkungsgrad der Gewindemutter
ρ	kg/m^3	Dichte
ρ'	°	Reibungswinkel
τ_P	m	Polteilung des Linearmotors
φ	rad	Drehwinkel
φ_L	rad	Drehwinkel der Last
φ_M	rad	Drehwinkel des Motors
λ	-	Rohrreibungszahl
ψ_{PM}	Wb	Effektivwert des Flusses des Permanentmagneten
ψ	-	Verhältnismäßige Dämpfung einer Kupplung
Ω	rad/s	Kreisfrequenz der harmonischen Kupplungsbeanspruchung
Ω_p	-	Definitionsbereich für $\mathbf{p}_S$
Ω_c	-	Definitionsbereich für **c**
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

ω_0	1/s	Kennkreisfrequenz
$\omega_{0,mech1}$	1/s	Kennkreisfrequenz des Ein-Massenschwingers
ω_{0A}	1/s	Kennkreisfrequenz des Antriebs
ω_{d1}	1/s	Eigenkreisfrequenz des Ein-Massenschwingers
$\omega_{d,min}$	1/s	Niedrigste mechanische Eigenfrequenz
ω_L	rad/s	Lastwinkelgeschwindigkeit
ω_M	rad/s	Motorwinkelgeschwindigkeit
ω_N	rad/s	Motorwinkelgeschwindigkeit am Bemessungspunkt
ω_N	1/s	Nullstellenkreisfrequenz
ω_P	1/s	Polstellenkreisfrequenz
ω_{soll}	rad/s	Winkelgeschwindigkeitssollwert
$\boldsymbol{\zeta}$	-	Vektor mit Nebenbedingungsgrößen