

## Reihe 8

Mess-,  
Steuerungs- und  
Regelungstechnik

Nr. 1265

M.Sc. Mario Aldag,  
Amelinghausen

## Regelung rotativer Direktantriebe bei Servoanwendungen



# Regelung rotativer Direktantriebe bei Servoanwendungen

Von der Fakultät für Elektrotechnik der  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

Dissertation  
vorgelegt von

Mario Aldag, M.Sc.  
aus Hamburg

Hamburg, 2019

Erstgutachter:  
Zweigutachter:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn  
Univ. Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn

Tag der mündlichen Prüfung:

29.03.2019

# Fortschritt-Berichte VDI

## Reihe 8

Mess-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

M.Sc. Mario Aldag,  
Amelinghausen

## Nr. 1265

## Regelung rotativer Direktantriebe bei Servoanwendungen

VDI verlag

Aldag, Mario

## **Regelung rotativer Direktantriebe bei Servoanwendungen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1265. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

166 Seiten, 74 Bilder, 14 Tabellen.

ISBN 978-3-18-526508-2 ISSN 0178-9546,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

**Für die Dokumentation:** Zwei-Massen-Schwinger – Polkompensation – Notch-Filter – Systemidentifikation – echtzeitfähige Resonanzfrequenzerkennung – Servoantrieb – Kaskadenregelung

Diese Arbeit wendet sich an Ingenieure der Regelungstechnik, die Resonanzfrequenzen anwendungsnah auf einer echtzeitfähigen Systemplattform unter begrenzten Ressourcen identifizieren und kompensieren möchten. Mechanische Resonanzfrequenzen, wie sie beispielsweise beim automatisierten Werkstückwechsel bei Maschinen auftreten können, können zu einem resonanten und instabilen Regelverhalten führen. Liegen die Resonanzfrequenzen außerhalb der Reglerbandbreite, kann die statische Reglerauslegung eines kaskadierten Servoreglers dies lediglich über eine geringere Kreisverstärkung kompensieren. Dies führt jedoch bei dynamischen Verfahrensbewegungen zu höheren Positionsabweichungen im Servosystem. Diese Arbeit stellt als Lösungsmöglichkeit einen Algorithmus vor, der eine unbegrenzte Anzahl an Resonanzfrequenzen auf einem industrietypischen digitalen Signalprozessor bei einer Abtastrate von 32 kHz detektieren und kompensieren kann.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-526508-2

## DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Regelungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg als Drittmittelprojekt mit einem norddeutschen Maschinenbauunternehmen. Für die Einrichtung des Drittmittelprojekts und die Ermutung zum Forschen an diesem spannenden, aktuellen und praxisnahen Thema möchte ich mich bedanken.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn, dem Lehrstuhlinhaber der Professur für Regelungstechnik an der Fakultät für Elektrotechnik für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, die stets guten und fruchtbaren Diskussionen zum Thema und die Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn danke ich für die Übernahme des Zweitreferats, das fachliche Interesse am Thema und seine fachlichen Anregungen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich möchte mich auch bei meinen Kollegen an der Professur für Regelungstechnik an der Helmut-Schmidt-Universität und den Kollegen des Industriepartners für die Anregungen, Korrekturen zur Arbeit und Arbeitshilfen, zum Beispiel zur Fertigung des Teststands, bedanken. Die vielfältigen und intensiven inhaltlichen Diskussionen haben sehr zum Ergebnis dieser Arbeit beigetragen.

Dieses Vorhaben wäre ohne die Unterstützung meiner Verlobten Christin, meiner Familie sowie von Freunden nicht möglich gewesen. Daher gilt auch ihnen mein herzlichster Dank.

Amelinghausen im Juli 2019

Mario Aldag





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Nomenklatur</b>	<b>VIII</b>
<b>Symbole</b>	<b>IX</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Regelung permanentmagnetenerregter Synchronmaschinen . . . . .	7
2.1.1 Koordinatensysteme / Raumzeigerdarstellung . . . . .	7
2.1.2 Modellierung des dynamischen Verhaltens von Drehfeldmaschinen .	11
2.1.3 Flussverkettungen . . . . .	12
2.1.4 Permanentmagnetenerregte Synchronmaschine . . . . .	13
2.1.5 Regelung von PMSM . . . . .	16
2.2 Modellierung der mechanischen Regelstrecke . . . . .	20
2.3 Regelung des Gesamtsystems . . . . .	23
2.4 Identifikationsverfahren von Regelstrecken . . . . .	27
2.5 Messverfahren zur Spektrumsschätzung . . . . .	30
2.5.1 DFT . . . . .	32
2.5.2 Goertzel-Algorithmus . . . . .	33
2.5.3 Yang-Methode . . . . .	35
2.5.4 Welch-Methode . . . . .	36
<b>3 Entwicklung eines Simulationsmodells</b>	<b>39</b>
3.1 Modellbildung . . . . .	39
3.2 Parametrierung des Modells . . . . .	45
<b>4 Gütemaß zur Beurteilung des Regelverhaltens</b>	<b>49</b>
4.1 Einführung eines quantitativen Gütemaßes . . . . .	51
4.2 Einfluss von sich ändernden Streckeneigenschaften . . . . .	51
4.3 Simulationen . . . . .	52
<b>5 Identifikation von Regelstrecken bei rotativen Direktantrieben</b>	<b>56</b>
5.1 Relay-Feedback-Experiment . . . . .	56
5.2 Identifikation der Parameter des ZMS . . . . .	59

5.3	Identifikation eines parametrischen Modells . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Entwicklung adaptiver Notch-Filter zur Resonanzunterdrückung</b>	<b>62</b>
6.1	Verfahren zur Schätzung des Leistungsdichtespektrums . . . . .	62
6.1.1	Methode von Yang . . . . .	63
6.1.2	Scanning-Verfahren . . . . .	66
6.1.3	Berechnungsmethodik Notch-Filter . . . . .	67
6.2	Detektion mehrerer Maxima in einer Messung . . . . .	69
6.2.1	Berechnung des relativen Maximums . . . . .	70
6.2.2	Nachverarbeitung der Messdaten . . . . .	71
6.3	Identifikation der Notch-Filtertiefe sowie -breite . . . . .	72
6.4	Simulation . . . . .	74
6.5	Validierung am Teststand . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Validierung des Gesamtsystems an Maschinen</b>	<b>79</b>
7.1	Messsystem / Maschine . . . . .	79
7.2	Messkonzept . . . . .	81
7.2.1	PRBS-Anregung zur Frequenzgangsmessung . . . . .	83
7.2.2	Relay-Feedback-Experiment . . . . .	84
7.2.3	Identifikation adaptiver Notch-Filter . . . . .	85
7.2.4	Zeitbereichsmessungen . . . . .	86
7.3	Messungen an Maschine 1 . . . . .	86
7.3.1	Verwendete Testwerkstücke . . . . .	86
7.3.2	Messung der Regelstrecke . . . . .	87
7.3.3	Frequenzgang des Drehzahlregelkreises . . . . .	88
7.3.4	Relay-Feedback-Experiment . . . . .	89
7.3.5	Messung der Lageabweichung im Zeitbereich . . . . .	91
7.4	Messungen an Maschine 2 . . . . .	92
7.4.1	Verwendete Testwerkstücke . . . . .	93
7.4.2	Messung und Identifikation der Regelstrecke . . . . .	94
7.4.3	Messung des Frequenzgangs des geschlossenen Drehzahlregelkreises . . . . .	94
7.4.4	Relay-Feedback-Experiment . . . . .	97
7.4.5	Automatische Identifikation von Resonanzfrequenzen für adaptive Notch-Filter . . . . .	99
7.4.6	Identifikation der Notch-Filtertiefen und -breiten . . . . .	101
7.4.7	Validierung der Regelgüte bei Anwendung adaptiver Notch-Filter . . . . .	102
7.5	Zusammenfassung der Messungen . . . . .	108
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>110</b>
<b>Anhang</b>		<b>112</b>
<b>A</b>	<b>Stabilitätsbetrachtung der kaskadierten Regelung</b>	<b>113</b>
A.1	Systembeschreibung . . . . .	114
A.1.1	PID-Regler . . . . .	115
A.1.2	Notch-Filter . . . . .	117

A.2	Stabilitätsbetrachtung . . . . .	117
A.2.1	PID-Regler ohne Notch-Filter . . . . .	117
A.2.2	PID-Regler mit Notch-Filter . . . . .	119
A.2.3	Charakteristische Gleichung . . . . .	125
A.3	Geschlossener Lageregelkreis . . . . .	126
<b>B</b>	<b>Resonanzfrequenzverschiebung</b>	<b>128</b>
<b>C</b>	<b>Auswirkung von Reglerparametern auf Regelgüte</b>	<b>133</b>
<b>D</b>	<b>Herleitung Gleichungen ZMS</b>	<b>136</b>
<b>E</b>	<b>Erprobung an einem Teststand</b>	<b>139</b>
E.1	Konstruktion . . . . .	139
E.2	Inbetriebnahme des Teststands . . . . .	143
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>144</b>

# NOMENKLATUR

CNC	Computerized <b>N</b> umerical <b>C</b> ontrol
DFT	<b>D</b> iscrete <b>F</b> ourier <b>T</b> ransformation
DGL	<b>D</b> ifferenzial <b>g</b> leichung
DTFT	<b>D</b> iscrete <b>T</b> ime <b>F</b> ourier <b>T</b> ransformation
EMS	<b>E</b> in- <b>M</b> assen- <b>S</b> chwinger
FFT	<b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransformation
IPMSM	<b>I</b> nterior mounted <b>P</b> ermanent <b>m</b> agnet <b>S</b> ynchronous <b>M</b> otor
MMS	<b>M</b> ehr- <b>M</b> assen- <b>S</b> chwinger
PMSM	<b>P</b> ermanent <b>m</b> agnet erregte <b>S</b> ynchron <b>m</b> aschine
PRBS	<b>P</b> seudo- <b>R</b> andom- <b>B</b> inary- <b>S</b> ignal
PWM	<b>P</b> uls <b>w</b> eiten <b>m</b> odulation
SPMSM	<b>S</b> urface mounted <b>P</b> ermanent <b>m</b> agnet <b>S</b> ynchronous <b>M</b> otor
ZMS	<b>Z</b> wei- <b>M</b> assen- <b>S</b> chwinger

# SYMBOLS

## Mechanische Parameter

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$D_{12}$	$\text{N m}^{-1} \text{s}^{-1}$	mechanische Dämpfung
$d$	$\text{N m}^{-1} \text{s}^{-1}$	mechanische Dämpfung als Modellparameter
$d$	$\text{kg m}^{-3}$	Stoffdichte
$C_{12}$	$\text{N m}^{-1}$	mechanische Drehfedersteifigkeit
$c$	$\text{N m}^{-1}$	mechanische Drehfedersteifigkeit als Modellparameter
$k_F$	$\text{N A}^{-1}$	Kraftkonstante des Motors
$m_1$	kg	Masse
$\Theta_A$	$\text{kg m}^2$	Massenträgheit Arbeitsmaschinen-seite
$\Theta_M$	$\text{kg m}^2$	Massenträgheit Motor-seite
$\lambda$	-	Verhältnis von Motor- zu Summenträgheit
$\Theta_{\text{Sum}}$	$\text{kg m}^2$	Summenträgheit des Antriebsstrangs
$G$	$\text{N m}^{-2}$	Schubmodul
$\omega_{\text{Max}}$	rad	Resonanzfrequenz des ZMS
$\omega_{\text{Min}}$	rad	Anti-Resonanzfrequenz des ZMS
$R_{\text{Max}}$	dB	Betrag der Übertragungsfunktion des ZMS für $\omega = \omega_{\text{Max}}$
$R_{\text{Min}}$	dB	Betrag der Übertragungsfunktion des ZMS für $\omega = \omega_{\text{Min}}$
$d_W$	mm	Wellendurchmesser
$d_L$	mm	Wellenlänge
$r_Z$	mm	Zylinderradius
$h_Z$	mm	Zylinderhöhe
$\xi_C$	N	Coulombscher Reibungskoeffizient
$\xi_V$	$\text{N/rad sec}$	Viskoser Reibungskoeffizient

## Grundlagen Antriebstechnik

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$U_E$	V	Effektivwert d. Spannung in Erregerwicklung
$U_{1a}$	V	Effektivwert d. Spannung in der Statorwicklung a
$u_{1a}(t)$	V	Momentanwert d. Spannung in der Statorwicklung a
$U_{1b}$	V	Effektivwert d. Spannung in der Statorwicklung b
$u_{1b}(t)$	V	Momentanwert d. Spannung in der Statorwicklung b
$U_{1c}$	V	Effektivwert d. Spannung in der Statorwicklung c

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$u_{1c}(t)$	V	Momentanwert d. Spannung in der Statorwicklung c
$I_E$	A	Strom in Erregerwicklung
$I_{1a}$	A	Strom in der Statorwicklung a
$I_{1b}$	A	Strom in der Statorwicklung b
$I_{1c}$	A	Strom in der Statorwicklung c
$\Psi_d$	Wb	Verketteter magnetischer Fluss in Längsrichtung
$\Psi_{PM}$	Wb	Fluss der Permanentmagnete
$\Psi_q$	Wb	Verketteter magnetischer Fluss in Querrichtung
$L_d$	H	Induktivität in d-Richtung
$L_q$	H	Induktivität in q-Richtung
$\Omega_L$	rad/sec	Elektrische Kreisfrequenz
$\Omega_M$	rad/sec	Mechanische Kreisfrequenz
$P_{Klemmen}$	W	An die Klemmen der elektrischen Maschine abgegebene Wirkleistung.
$P_{el,mech}$	W	An die Klemmen der elektrischen Maschine abgegebener Anteil an mech. Leistung
$P_{el,v}$	W	An die Klemmen der elektrischen Maschine abgegebener Anteil an Verlustleistung
$Z_p$	-	Polpaarzahl
$U_d$	V	Spannung in Längsrichtung
$\tilde{U}_d$	V	Entkoppelte Spannung in Längsrichtung
$U_q$	V	Spannung in Querrichtung
$\tilde{U}_q$	V	Entkoppelte Spannung in Querrichtung
$I_d$	A	Statorstrom in Längsrichtung
$I_D$	A	Strom in Längsrichtung der Dämpferwicklung
$I_{d,r}$	A	Sollwert des Statorstroms in Längsrichtung
$M$	H	Gegeninduktivität im Motor
$I_Q$	A	Strom in Querrichtung der Dämpferwicklung
$I_{q,r}$	A	Sollwert des Statorstroms in Querrichtung
$^K\Omega$	rad/sec	Kreisfrequenz des Rotors in Bezug zum Stator
$^K\beta$	rad	Elektrischer Winkel des Rotors bezogen auf den Stator.
$^L\Omega$	rad/sec	Kreisfrequenz des Rotors in Bezug zum Stator
$^L\beta$	rad	Elektrischer Winkel des Rotors bezogen auf den Stator.
$^S\vec{\Psi}_1$	Wb	Statorfluss im ortsfesten Statorkoordinatensystem
$^L\vec{\Psi}_1$	Wb	Statorfluss im Rotorkoordinatensystem
$^S\vec{U}_1$	V	Allgemeine Spannung in vektorieller Form, zum Beispiel in Motorwicklung
$^S\vec{i}_1$	A	Allgemeiner momentaner Strom in vektorieller Form, zum Beispiel in Motorwicklung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
${}^L\vec{U}_1$	V	Statorspannung in vektorieller Form bezogen auf das Rotor-system
$U_{1\beta}$	V	Komponente der Statorspannung
$u_{1\beta}$	V	Komponente der Statorspannung als Momentanwert
$U_{1\alpha}$	V	Komponente der Statorspannung
$u_{1\alpha}$	V	Komponente der Statorspannung als Momentanwert
${}^S\beta_{U1}$	rad	Winkel der Statorspannung bezogen auf das Statorsystem
$\vec{I}_1$	A	Allgemeiner Strom in vektorieller Form, zum Beispiel in Motorwicklung
$I_{1A}$	A	Komponente des Statorstroms
$I_{1\beta}$	A	Komponente des Statorstroms
$I_{1\alpha}$	A	Komponente des Statorstroms
${}^S\vec{I}_1$	A	Vektorieller Statorstrom bezogen auf das ortsfeste Statorkoordinatensystem
${}^S\beta_{I1}$	rad	Winkel des Stroms bezogen auf das Statorsystem
${}^S\Omega_1$	rad/ sec	Winkelgeschwindigkeit bezogen auf das Statorsystem
${}^L\vec{I}_2$	A	Rotorstrom in vektorieller Form, zum Beispiel in Motorwicklung
${}^L\vec{I}_1$	A	Statorstrom in vektorieller Form bezogen auf das Rotorsystem
${}^K\vec{I}_1$	A	Allgemeiner Strom in vektorieller Form, zum Beispiel in Motorwicklung
${}^K\beta$	rad	Winkel des Stroms bezogen auf das Statorsystem
$L_2$	H	Rotorinduktivität
$M_{M\alpha}$	N m	Beschleunigungsmoment der Mechanik
$M_{Mi}$	N m	Inneres Drehmoment des Motors
$M_r$	N m	Reibmoment aus der Mechanik
$R_2$	$\Omega$	Rotorwiderstand
$U_p$	V	Polradspannung
$L_1$	H	Statorinduktivität
$R_1$	$\Omega$	Statorwiderstand
$T_D$	sec	elektrische Ankerzeitkonstante über das Längsteil des Rotors
$T_Q$	sec	elektrische Ankerzeitkonstante über das Querteil des Rotors
$G$	-	Effektivwert der allg. komplexen Zeitfunktion

## Parameter der Signalflusspläne

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\varphi$	rad	Drehwinkel
$\varphi_A$	rad	Drehwinkel der Antriebsseite

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\varphi_M$	rad	Drehwinkel der Motorseite
$\varphi_r$	rad	Sollwert des Drehwinkels
$\dot{\varphi}_r$	rad/sec	Sollwert der Winkelgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$	rad/sec <sup>2</sup>	Winkelbeschleunigung
$\dot{\varphi}_A$	rad/sec	Winkelgeschwindigkeit der Antriebsseite
$\dot{\varphi}_M$	rad/sec	Winkelgeschwindigkeit der Motorseite
$T_{PWM}$	sec	Abtastzeit des Stromrichters
$f_R(\cdot)$	Nm sec / rad	Funktion zur Beschreibung des Reibverhaltens
$T_t$	sec	Totzeit des Stromrichters
$T_e$	sec	Ersatzzeitkonstante des Stromregelkreises
$T_u$	sec	Ersatzzeitkonstante des Stromrichters
$K_P$	A/U	Proportionalverstärkung des PID Reglers
$T_N$	s	Nachstellzeit des PID Reglers
$T_V$	s	Vorhalt des PID Reglers
$T_{N,d}$	sec	Nachstellzeit des PI-Drehzahlreglers
$K_{P,d}$	A/U min	Proportionalverstärkung des Drehzahlreglers
$K'_{P,d}$	-	Proportionalverstärkung des Drehzahlreglers normiert
$K_{P,i}$	V A <sup>-1</sup>	Proportionalverstärkung des Stromreglers
$T_{N,i}$	sec	Nachstellzeit des PI-Stromreglers

## Übertragungsfunktionen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$G_{BP}(s)$	-	Übertragungsfunktion eines Bandpasses
$G_{R,\varphi}(s)$	-	Übertragungsfunktion des Lagereglers
$G_{R,\omega}(s)$	-	Übertragungsfunktion des Drehzahlreglers
$G_{o,\varphi}$	-	Übertragungsfunktion des offenen Lageregelkreises
$G_{w,\varphi}(s)$	-	Führungsübertragungsfunktion des Lageregelkreises
$G_N(s)$	-	Übertragungsfunktion von Notch Filtern
$G_s(s)$	-	Übertragungsfunktion der Regelstrecke
$G_{AA}(s)$	-	Übertragungsfunktion der Lastseite mit Wirkung auf die Lastseite
$G_{AM}(s)$	-	Übertragungsfunktion der Lastseite mit Wirkung auf die Motorseite
$G_{el}(s)$	-	Übertragungsfunktion des elektrischen Teils der Regelstrecke
$G_{MA}(s)$	-	Übertragungsfunktion des mechanischen Teils der Regelstrecke mit Wirkung auf die Lastseite
$G_{MA,e}(s)$	-	Übertragungsfunktion des elastischen Anteils der mechanischen Übertragungsfunktion mit Wirkung auf die Lastseite



Symbol	Einheit	Bezeichnung
$G_{\text{MM},e}(s)$	-	Übertragungsfunktion des elastischen Anteils der mechanischen Übertragungsfunktion mit Wirkung auf die Motorseite
$G_{\text{M}3}(s)$	-	Übertragungsfunktion der Motorseite auf die Antriebsseite
$G_{\text{M},s}(s)$	-	Übertragungsfunktion des starren Anteils der mechanischen Übertragungsfunktion
$G_{\text{MM}}(s)$	-	Übertragungsfunktion des mechanischen Teils der Regelstrecke mit Wirkung auf Motorseite
$G_{\text{R},i}(s)$	-	Übertragungsfunktion des Strom PI-Reglers

## Identifikation von ZMS

Symbol	Einheit	Bezeichnung
G	A	Ausgang des Zweipunktreglers
$\hat{M}_{\text{M}\alpha}$	N m	Identifiziertes Beschleunigungsmoment der Mechanik
$\omega_{\text{O}}$	U/ min	Oberer Umschaltpunkt des Zweipunktreglers
$T_{\Delta}$	sec	Periodendauer des Dreieckssignals
$\omega_{\text{U}}$	U/ min	Unterer Umschaltpunkt des Zweipunktreglers
$\bar{X}$	-	Erwartungswert einer Stichprobe
$g_{\text{ZP}}$	-	Güte der Identifikation aus dem Relay-Feedback-Experiment

## ANF-Algorithmus

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$p_{ka}$	-	Bandpassfilterparameter im Nennerpolynom
$p_{kb}$	-	Bandpassfilterparameter im Zählerpolynom
$s_{ka}$	-	Bandsperrfilterparameter im Nennerpolynom
$s_{kb}$	-	Bandsperrfilterparameter im Zählerpolynom
$\Delta f$	Hz	Aktueller Frequenzstützstellenabstand der aktuellen Iteration
$\Delta f_{\text{MD}}$	Hz	Mindestabstand zwischen zwei Maxima
$\Delta f_{\text{NB}}$	Hz	Umgebung um ein Maximum
$u[n]$	-	Diskrete Eingangssignalfolge
$f_{\text{Ende}}$	Hz	Endfrequenz
$k$	-	Index der aktuellen Frequenzstützstelle
$N$	-	Anzahl zu verarbeitender Messwerte
$n$	-	Index des aktuellen Messwerts
$f_{\text{iter}}$	Hz	Frequenz in der aktuellen Iteration
$L$	-	Maximale Anzahl Maxima im Speicher
$P[k]$	W	Leistung an der Stelle k
$P_{\text{NB}}[k]$	W	Mittlere Leistung der Umgebung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$P_{\text{Rel}}[k]$	-	Relative Leistung an der Stelle k bezogen auf eine Umgebung
$P_{\text{Rel}}[k - 1]$	-	Relative Leistung an der Stelle k-1 bezogen auf eine Umgebung. Bei der Maximumsuche ist die Stelle k-1 das Maximum, die Stellen k und k-2 die benachbarten Stützpunkte
$P_{\text{Rel}}[k - 2]$	-	Relative Leistung an der Stelle k-2 bezogen auf eine Umgebung
$\epsilon$	-	Schwellwert für die Maximumdetektion
$f_{\text{Start}}$	Hz	Startfrequenz
$\Delta\omega_{\text{BP}}$	rad/sec	Normierte Breite des Bandpass
$x_{\text{P}}$	-	Stützstelle des Maximums
$P(x_{\text{P}})$	-	Leistung des Maximums
$p_{1,l}$	-	1. Polynomparameter für $\hat{y}_l$
$p_{n,l}$	-	n. Polynomparameter für $\hat{y}_l$
$p_{1,r}$	-	1. Polynomparameter für $\hat{y}_r$
$p_{n,r}$	-	n. Polynomparameter für $\hat{y}_r$
$x_l$	-	Stützstelle links vom Maximum
$x_r$	-	Stützstelle rechts vom Maximum
$\hat{y}_l$	-	Approximierte Funktion links neben Maximum
$\hat{y}_r$	-	Approximierte Funktion rechts neben Maximum
$\Delta\omega_{\text{N}}$	rad/sec	Breite des Notch-Filters
$g_{\text{N}}$	-	Tiefe des Notch-Filters in normierter Darstellung
$\Omega$	-	digitale Kreisfrequenz
$\omega_0$	rad/sec	analoge Kreisresonanzfrequenz
$\Omega_{\text{Res}}$	-	Absolute digitale Kreisresonanzfrequenz
$r_{xx}$	-	Autokorellationsfolge des Signals $x$
$S_{xx}$	-	Z-Transformierte der AKF von $r_{xx}$
$x[n]$	-	Zeitdiskrete Signalfolge der Länge N
$X_N[k]$	-	Zeitdiskrete DFT-Transformierte der Signalfolge $x$ , Länge N
$H_k(z)$	-	Übertragungsfunktion
$W_N$	-	"Twiddle-Faktor" einer DFT zur Länge N

## Stabilitätsanalyse

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$V_{\text{Gr-}}$	-	Amplitudenreserve bei negativem Phasengradienten
$\omega_{\text{P-}}$	rad/sec	Kreisfrequenz der Amplitudenreserve bei negativem Phasengradienten
$V_{\text{Gr+}}$	-	Amplitudenreserve bei positivem Phasengradienten
$\omega_{\text{P+}}$	rad/sec	Kreisfrequenz der Amplitudenreserve bei positivem Phasengradienten

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\gamma$	-	Verhältnis der Nachstellzeit eines PID-Reglers im Verhältnis zum Startwert
$\kappa$	-	Verhältnis der Reglerverstärkung eines PID-Reglers im Verhältnis zum Startwert
$\nu$	-	Verhältnis von Nachstell- und Vorhaltzeit des PID-Reglers
$PR$	-	Phasenreserve
$\omega_{PM}$	rad/ sec	Kreisfrequenz, bei der die Phasenreserve gemessen wird.
$\xi$	-	Verhältnis der Notch-Filtermittenfrequenz im Verhältnis zur zu dämpfenden Resonanzfrequenz

## Sonstiges

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$f_s$	Hz	Abtastfrequenz (allgemein)
$T_s$	sec	Abtastzeit (allgemein)
$T_{Set}$	sec	Anregelzeit des Reglers
$B$	rad/ sec	Bandbreite eines schwingfähigen Systems (allgemein)
$Q$	-	Güte eines schwingfähigen Systems (allgemein)
$\omega$	rad/ sec	Kreisfrequenz (allgemein)
$s_p$	-	Polstelle einer charakteristischen Gleichung (allgemein)
$e_\varphi$	U	Lageabweichung
$e_\varphi^{const}$	U	Lageabweichung bei konstanter Verfahrbewegung
$e_\varphi^{dyn}$	U	Lageabweichung bei dynamischer Verfahrbewegung
$e_\omega$	U/ min	Drehzahlabweichung
$T_1$	sec	Allgemein: Größte Zeitkonstante
$T_\sigma$	sec	Allgemein: Summe aller kleineren Zeitkonstanten
$V_S$	-	Allgemein: Gesamte Streckenverstärkung

## KURZFASSUNG

**D**iese Arbeit leistet einen Beitrag zum industrietauglichen Einsatz von Identifikationsalgorithmen von Regelstrecken, die am Beispiel einer Produktionsmaschine gezeigt werden. Dabei wird das Relay-Feedback-Experiment, welches mit einem Nelder-Mead-Optimierungsalgorithmus gekoppelt ist mit einem neu entwickelten Scanning-Verfahren verglichen. Dies wird an zwei unterschiedlichen Maschinen validiert. Ziel beider Verfahren ist, Resonanzfrequenzen mit dominierendem Streckeneinfluss zu identifizieren, sodass diese mit Notch-Filtern gedämpft werden können.

Das Scanning-Verfahren berechnet das Leistungsdichtespektrum des Drehzahlwerts, welches für die automatische Identifikation der benötigten Notch-Filterparameter benutzt wird. Im Vergleich zum Relay-Feedback-Experiment wird nicht in das bestehende Regelungssystem eingegriffen, sodass es dadurch zum Beispiel auch bei endlagenbeschränkten sowie bei schwerkraftbehafteten Maschinenachsen einsetzbar ist. Da die Identifikation beim Scanning-Verfahren im geschlossenen Regelkreis durchgeführt wird, wird die Resonanzfrequenz verfälscht bestimmt. Dies wird in der Arbeit sowohl theoretisch als auch unter praktischen Gesichtspunkten betrachtet und bewertet. Die Anzahl der Resonanzfrequenzen ist dabei nicht an eine Modellordnung gekoppelt.

Die Messungen werden an serienmäßig eingesetzten Maschinen, die weltweit im Einsatz sind, direkt auf dem Frequenzumrichter auf einem Signalprozessor unter Echtzeitanforderungen umgesetzt. Das Scanning-Verfahren ist daher derart gestaltet, dass dieses echtzeitfähig mit wenig Ressourcen lauffähig ist. Die Wirksamkeit der automatisch eingemessenen Notch-Filter wird sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich nachgewiesen. Dazu werden Gütefunktionale benutzt, um Metriken zu entwerfen, die diese Wirksamkeit aufzeigen. Durch das Einführen des Gütefunktional wird die Parametrierung von Notch-Filtern auf ein Optimierungsproblem zurückgeführt.