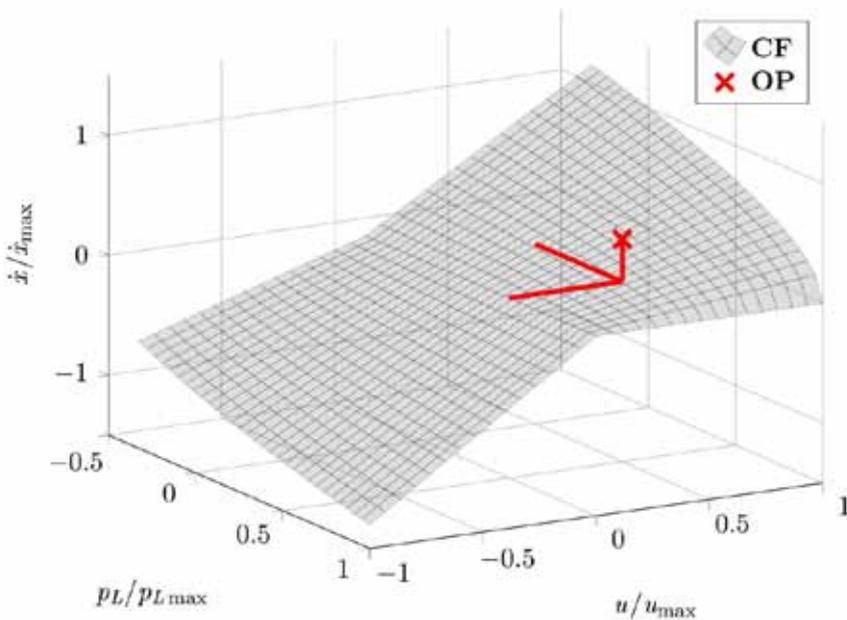


Simon Ströbel

# Modellbasierte Vorsteuerung ventilgesteuerter hydraulischer Linearantriebe im Lageregelkreis



# Modellbasierte Vorsteuerung ventilgesteuerter hydraulischer Linearantriebe im Lageregelkreis

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

M.Sc. Simon Ströbel  
geb. am 14. Juli 1981 in Rottweil

Tag der Einreichung: 26. September 2017

Tag der Verteidigung: 14. Mai 2018

## **Gutachter:**

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Peter Anders, Hochschule Furtwangen University

## **Vorsitzender der Promotionskommission:**

Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht, Technische Universität Dresden



Für Anja und Lukas



# Kurzfassung

In Zwei-Freiheitsgrade-Regelungskonzepten kommen sowohl klassische Regeleinrichtungen auf Basis der rückgekoppelten Regelgröße (Feedback-Regler), als auch rein vorwärts gerichtete Regeleinrichtungen (Feedforward-Regelungen) parallel zum Einsatz. In letzteren werden meist invertierte mathematische Modelle der Regelstrecke verwendet und man spricht daher auch von modellbasierten Vorsteuerungen. Die resultierende Regelgüte ist dabei prinzipiell umso höher, je genauer das in der Vorsteuerung implementierte mathematische Modell das real vorliegende, im Allgemeinen nichtlineare, Übertragungsverhalten der Regelstrecke abbildet.

In der vorliegenden Arbeit werden Verfahren zum theoretischen Entwurf und zur messdatenbasierten Optimierung mathematischer Modelle hergeleitet, welche zur modellbasierten Vorsteuerung ventilgesteuerter hydraulischer Antriebssysteme geeignet sind. Bekannte und etablierte Entwurfskonzepte auf Basis dynamischer und stationärer Modellgleichungen werden dabei verallgemeinert, so dass diese auf eine Vielzahl von konkreten Antriebsbeziehungsweise Ventiltypen anwendbar sind. Ein wesentliches Entwurfsergebnis ist dabei das stationäre Antriebskennfeld, welches alle vom Antriebssystem realisierbaren stationären Arbeitspunkte abbildet und in Form einer zweidimensionalen numerischen Wertetabelle vorliegt. Im Kennfeld können dabei insbesondere einfach und flexibel Nichtlinearitäten des Übertragungsverhaltens eines Antriebssystems abgebildet werden. Das Antriebskennfeld bildet darüber hinaus die Grundlage für das in dieser Arbeit entwickelte messdatenbasierte Optimierungsverfahren, welches in Form von echtzeitfähigen Softwarealgorithmen auf digitalen Regelrechnern implementiert und als Hintergrundprozess der eigentlichen Antriebsregelung aufgefasst werden kann. Dieses Optimierungsverfahren basiert dabei auf zeitdiskreten Filteralgorithmen und Radialen-Basisfunktionen-Netzen, einer speziellen Klasse Künstlicher Neuronaler Netze. Ein wesentliches Merkmal ist dabei, dass in den optimierten Vorsteuerungsentwurf sowohl theoretische White Box Informationen als auch messdatenbasierte Black Box Informationen mit eingehen und somit ein auf beiden Informationsquellen basierendes Gray Box Antriebskennfeld synthetisiert wird.

Die Verfahren zum Modellentwurf und zur Modelloptimierung werden dabei am konkreten Beispiel des lagegeregelten hydraulischen Zylinderantriebs hergeleitet und demonstriert, welcher als einer der klassischen Vertreter der hydraulischen Antriebstechnik angesehen werden kann. Im Kern sind diese Verfahren jedoch als eine in weiten Grenzen allgemeingültige Systematik zum Modellentwurf und zur Modelloptimierung aufzufassen, welche prinzipiell auch auf alternative Antriebssysteme und alternative Regelungsaufgaben übertragen werden kann.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1. Einführung . . . . .	1
1.2. Motivation . . . . .	8
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1. Dynamische Vorsteuerung . . . . .	10
2.2. Stationäre Vorsteuerung . . . . .	14
2.3. Zusammenfassung der Vor- und Nachteile . . . . .	20
<b>3. Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>23</b>
3.1. Zielsetzung . . . . .	23
3.2. Vorgehensweise . . . . .	24
<b>4. Modellbildung des ventilgesteuerten Zylinderantriebes</b>	<b>27</b>
4.1. Systembeschreibung . . . . .	27
4.2. Wegeventil . . . . .	29
4.3. Hydraulikzylinder . . . . .	44
4.4. Allgemeines Modell . . . . .	47
4.5. Stationäres Modell . . . . .	50
4.6. Modellfehler . . . . .	52
<b>5. White Box Vorsteuerungsentwurf</b>	<b>61</b>
5.1. Dynamische Vorsteuerung . . . . .	62
5.2. Stationäre Vorsteuerung . . . . .	70
5.3. Regelalgorithmen . . . . .	81
5.4. Prinzipien der messdatenbasierten Kennfeldoptimierung . . . . .	82
<b>6. Black Box Arbeitspunktidentifikation</b>	<b>87</b>
6.1. Messung des Systemzustandes und des Arbeitspunktes . . . . .	87
6.2. Identifikation stationärer Arbeitspunkte mittels Trackingfilter . . . . .	91
6.3. Anwendung auf die Problemstellung . . . . .	108
6.4. Identifikationsalgorithmus . . . . .	112
<b>7. Gray Box Kennfeldoptimierung</b>	<b>113</b>
7.1. Berechnung der quantitativen Modellfehler . . . . .	114
7.2. Generalisierung der Modellfehler mittels RBF-Netzen . . . . .	118
7.3. Anwendung auf die Problemstellung . . . . .	126
7.4. Optimierungsalgorithmen . . . . .	134

<b>8. Experimentelle Validierung der Verfahren</b>	<b>137</b>
8.1. Optimierung der Lageregelung eines Zylinderantriebs . . . . .	138
8.2. Identifikation des realen Kennfelds einer Ziehkissenpresse . . . . .	160
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>177</b>
9.1. Zusammenfassung . . . . .	177
9.2. Ausblick . . . . .	179
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>188</b>
<b>A. Stationäres Modell</b>	<b>199</b>
A.1. Analytische Berechnung stationärer Systemzustände . . . . .	199
A.2. Kammerdruckdiagramm und Abschätzung der Lastdruckgrenzen . . . . .	201
<b>B. Lineares Modell</b>	<b>205</b>
B.1. Linearisierung der allgemeinen Modellgleichungen . . . . .	205
B.2. Lineares Modell des Prüfstandsantriebssystems . . . . .	211
<b>C. Feedback-Lageregler</b>	<b>215</b>
C.1. Auslegung anhand des linearen Antriebsmodells . . . . .	215
C.2. Feedback-Regler für das Prüfstandsantriebssystem . . . . .	222
<b>D. Trackingfilter</b>	<b>227</b>
D.1. Zur Berechnung der Trackingfilter Übertragungsfunktion . . . . .	227
D.2. Trackingfilter für das Prüfstandsantriebssystem . . . . .	227
<b>E. Analogie Linear- und Rotationsmotore</b>	<b>229</b>

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

<b>2DOF</b>	Zwei-Freiheitsgrade-Regelungsstruktur
<b>ANN</b>	Künstliches Neuronales Netz (Artificial Neural Network)
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CAE</b>	Computer Aided Engineering
<b>CF</b>	Antriebskennfeld (Characteristic Field)
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>DBV</b>	Druckbegrenzungsventil
<b>GRNN</b>	General Regression Neural Network
<b>IAE</b>	Integral of Absolute Error
<b>LUT</b>	Look-Up Table
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MLP</b>	Multilayer Perceptron
<b>NRBFN</b>	Normalized Radial Basis Function Network
<b>OP</b>	Arbeitspunkt (Operating Point)
<b>OPT</b>	Optimierung
<b>RBFN</b>	Radial Basis Function Network
<b>SISO</b>	Single-Input Single-Output

## Formelzeichen

### Wichtige physikalische Größen

Symbol	SI-Einheit	Beschreibung
$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$c_F$	$\text{N m}^{-1}$	Federkonstante
$C_H$	$\text{m}^3 \text{Pa}^{-1}$	Hydraulische Kapazität
$d_N$	$\text{N s m}^{-1}$	Newtonscher Reibkoeffizient
$E_{Fl}$	Pa	Elastizitätsmodul Fluid
$f$	$\text{s}^{-1}$	Frequenz
$F$	N	Kraft
$h$	m	Mechanischer Ventilschieberhub, Höhe
$l$	m	Länge
$m$	kg	Masse
$p$	Pa	Druck
$p$	$\text{N m s}^{-1}$	Impuls
$Q$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumenstrom
$R_{hyd}$	$\text{Pa s m}^{-3}$	Hydraulischer Widerstand
$t$	s	Zeit
$u$	V	Ansteuerspannung
$V$	$\text{m}^3$	Volumen
$x$	m	Position
$\dot{x}$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit
$\ddot{x}$	$\text{m s}^{-2}$	Beschleunigung
$\ddot{x}$	$\text{m s}^{-3}$	Ruck
$\alpha$	1	Flächenverhältnis
$\alpha_D$	1	Durchflussbeiwert
$\beta$	rad	Winkel
$\gamma$	$\text{K}^{-1}$	Volumenausdehnungskoeffizient
$\kappa$	$\text{m}^5 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-0.5}$	Turbulenter Blendenkoeffizient
$\nu$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Kinematische Viskosität
$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$	Dichte
$\vartheta$	K	Temperatur
$\omega$	$\text{s}^{-1}$	Kreisfrequenz

## Wichtige regelungstechnische Größen

Symbol	Beschreibung
$d$	RBF-Abstand
$D$	Dämpfung
$e$	Regelfehler, Modellfehler
$F(j\omega)$	Frequenzgang
$F(s)/F(z)$	Lineares zeitkontinuierliches/zeitdiskretes Übertragungssystem (Filter)
$G(s)$	Lineares zeitkontinuierliches Übertragungssystem
$k$	Diskreter Zeitpunkt, Reglerzyklus
$K$	Stationärer Übertragungsbeiwert
$m$	Anzahl Zeilen Look-Up Table
$M$	Modell
$n$	Anzahl Spalten Look-Up Table
$p$	Polstelle, Anzahl Elemente Look-Up Table
$R_{dyn}$	Verhältnis Eigenfrequenzen
$s$	Laplace-Variable
$T$	Zeitkonstante
$u$	Stellgröße
$w$	RBF-Gewicht
$x$	Istgröße, Look-Up Table Eingangsgröße
$x^*$	Sollgröße
$z$	z-Variable, Nullstelle, Störgröße, Optimierungszyklus
$\psi$	RBF-Basisfunktion
$\sigma$	RBF-Formparameter
$\Sigma$	Allgemeines, nichtlineares Übertragungssystem
$\omega$	Eigenfrequenz

## Vektoren, Matrizen und Tabellen

Symbol	Beschreibung
<b>A</b>	Systemmatrix Zustandsraumdarstellung
<b>B</b>	Eingangsmatrix Zustandsraumdarstellung
<b>C</b>	Beobachtungsmatrix Zustandsraumdarstellung
<b>CF</b>	Kennfeldmatrix (Look-Up Table)
<b>D</b>	Durchgangsmatrix Zustandsraumdarstellung
<b>f</b>	Vektorfunktion
<b>m</b>	Messvektor
<b>M</b>	Messdatenmatrix
<b>OP</b>	Arbeitspunkt Tripel
<b>u</b>	Eingangsvektor Zustandsraumdarstellung
<b>v</b>	RBF-Basis
<b>x</b>	Zustandsvektor, Look-Up Table Eingangsraum, RBF-Eingangsraum
<b>y</b>	Ausgangsvektor Zustandsraumdarstellung
<b>Θ</b>	Parametervektor

## Indizes

Index	Beschreibung
abs	Absolut
$A$	Kammer A, Antriebssystem, Ausfahren
Alg	Algorithmus
besch	Beschleunigung
$B$	Kammer B, Black Box, Blende
$c$	Anzahl RBF-Neuronen
$CL$	Geschlossener Regelkreis (Closed Loop)
$d, dyn$	Dynamisch
dom	Dominant
$E$	Einfahren
$f$	Filter
$FB$	Feedback
$FF$	Feedforward
$G$	Gray Box
$i$	Look-Up Table Zeilenindex
$is$	Instationär
$j$	Look-Up Table Spaltenindex
$k$	RBF-Neuron (global)
kin	Kinematisch
komp	Kompression
$K$	Kolben, Knick
$L$	Last
$m$	Messung
min	Minimal
max	Maximal
$M$	Modell
$n$	Polynomordnung
$qs$	Quasistationär
$OL$	Offener Regelkreis (Open Loop)
$P$	Pumpe, Zulauf
$PM$	Prozessmodell
rel	Relativ
$R$	Regler
$s, stat$	Stationär
$S$	Stellglied, Sampletime
$T$	Tank, Ablauf
$W$	White Box
$z$	Zylinder, Störgröße, Optimierungszyklus
$\lambda$	RBF-Neuron (lokal)