

**Ein Beitrag zum modellbasierten
Regelungsentwurf
elektropneumatischer
Applikationen**

Christian Busch



Universitätsverlag Ilmenau
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 28. Oktober 2013

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Oliver Sawodny
(Universität Stuttgart)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steven Lambeck
(Hochschule Fulda)

Tag der Verteidigung: 27. Februar 2014

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-098-3 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000090](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000090)

Titelfoto: photocase.com

Inhaltsverzeichnis

Formel- und Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Ausgewählte Aspekte der Regelung technischer Systeme	5
2.1 Aufbau digitaler Reglerplattformen	5
2.2 Kennzahlen und Prozesse	7
2.3 Grundkenntnisse zeitdiskreter Systeme	11
2.3.1 Signalerfassung und zeitliche Diskretisierung	11
2.3.2 Quantisierungseffekte in digitalen Systemen	15
2.3.3 Signalrekonstruktion und Stellgröße . . .	17
2.4 Systemmodelle im Zustandsraum	21
2.4.1 Kontinuierliche Zustandsraummodelle . .	21
2.4.2 Zeitdiskrete Zustandsraummodelle	23
2.5 Regelungsstrategien	25
2.5.1 Der Stabilitätsbegriff	25
2.5.2 Das optimale Regelgesetz	28
2.5.3 Verbreitete Regelungsmethoden innerhalb der Elektropneumatik	30
2.5.4 Exakte Linearisierung eingangsafliner Sys- teme	34

3	Modellierung pneumatischer Druck- und Durchflussstrecken	41
3.1	Grundbegriffe und Definitionen	41
3.2	Massenerhaltung und Kontinuität	44
3.3	Massenstrom und Luftmenge	47
3.4	Strömungsvorgänge kompressibler Medien	47
3.4.1	Strömungsgeschwindigkeit c	49
3.4.2	Strahlkontraktion und Geschwindigkeitsreduktion	51
3.4.3	Strömungen in pneumatischen Rohren	53
3.5	Generalisierung und Analogie zur Elektrotechnik	56
3.5.1	Generalisierte Koordinaten	56
3.5.2	Analogiebetrachtungen	57
3.6	Stellglieder für Pneumatikventile	63
3.6.1	Aufbau elektromechanischer Ventilstellglieder	63
3.6.2	Modellierung des elektromechanischen Antriebs	65
3.7	Modellstruktur pneumatischer Regelstrecken	67
4	Zustandsschätzung bei Systemen mit unsicheren Parametern	73
4.1	Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme	76
4.2	Nichtlinearer Normalform-Beobachter	77
4.3	High-Gain-Beobachter für nichtlineare Systeme	80
4.4	Simultane Zustands- und Parameterschätzung	83
4.4.1	Allgemeine Herangehensweise	83
4.4.2	Linearisierende Beobachterprinzipien	84
4.5	Adaptive Zustandsschätzung	94
4.5.1	Ljapunov basierende Methodik	95
4.5.2	Beobachter mit simultaner Parameteroptimierung	100
4.6	Zeitdiskrete Berechnung von Zustandsgrößen	113

4.6.1	Numerisches Differenzieren	113
4.6.2	Zustandsvariablenfilter	116
5	Regelungskonzept pneumatischer Systemmodelle	119
5.1	Maßnahmen zur Modellvereinfachung	120
5.1.1	Die geeignete Strategie	120
5.1.2	Regelung mit Strukturvarianz	126
5.1.3	Entwurf des unterlagerten Regelkreises	132
5.1.4	Messergebnisse	134
5.2	Reduzierte Gesamtmodellstruktur	135
5.3	Entwicklung der Regelungsstruktur	137
5.3.1	Verallgemeinerung der Problemstellung	139
5.3.2	Kompensationsmethodik	140
5.4	Reglerauslegung	144
5.4.1	Auslegung nach Standardverfahren	145
5.4.2	Darstellungsformen unsicherer Streckenmodelle	148
5.4.3	Robustheitsanalyse	150
5.4.4	Auslegung unter Parameterunsicherheiten	156
5.5	Anwendungsbeispiele und Regelungsergebnisse	158
5.5.1	Druckregelung für konstante Volumina	159
5.5.2	Luftmengenregelung	162
5.5.3	Regelung pneumatischer Antriebe	167
6	Konzepterweiterung für Strecken mit Transportvorgängen	171
6.1	Lineare Modellierungsformen von Totzeiteffekten	173
6.1.1	Padé-Approximation	173
6.1.2	Approximation der Exponentialfunktion	174
6.1.3	Zeitdiskrete Modellierungsform	175
6.1.4	Methodenvergleich	176
6.2	Erweiterte Gesamtmodellstruktur	177
6.3	Beobachtergestützte Totzeitstreckenregelung	180

6.4	Alternative Totzeitstreckenregelung	181
6.5	Regelungsergebnisse	183
7	Zusammenfassung und Ausblick	185

Anhang

A	Digitale Signalverarbeitung	191
A.1	Zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung	191
A.2	Zeitdiskretes Kalman-Filter	192
A.3	Rekursiv gleitende Signalauswertung	195
A.4	Schrittweitenoptimierung für das Gradientensuchverfahren	197
B	Pneumatische Modellgleichungen	199
B.1	Pneumatisches Ersatzmodell	199
B.1.1	Kompakte Modellgleichung der unterlagerten Druckregelung	200
B.1.2	Vollständige Modellgleichung der unterlagerten Druckregelung	201
B.2	Koordinatentransformation Druckluftmotor . . .	202
B.3	Koordinatentransformation pneumatischer Linearantriebe	203
C		207
C.1	Ungleichung von geometrischen und arithmetischen Mittel	207
C.2	Matrix-Riccati-Differentialgleichung	208
C.2.1	Zeitkontinuierliche Matrix-Riccati-Differentialgleichung	208
C.2.2	Zeitdiskrete Matrix-Riccati-Differenzgleichung	208

C.3 Ablaufplan zur Reglerauslegung unter Parameterunsicherheiten	209
--	-----

Literaturverzeichnis	228
-----------------------------	------------