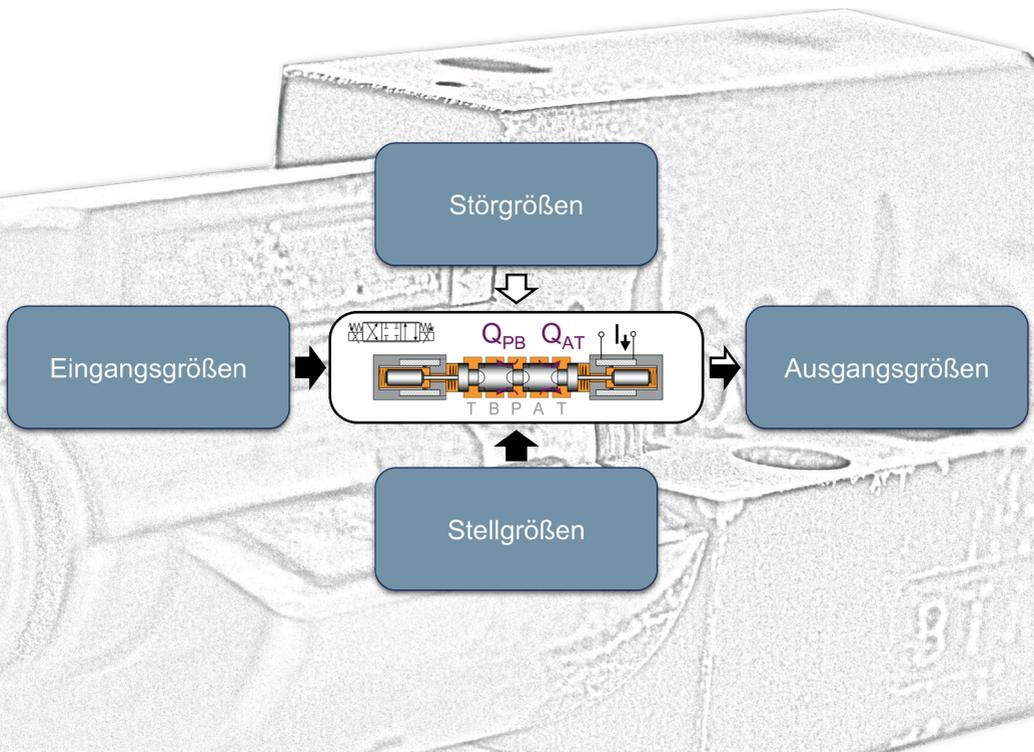




Ralf Tautenhahn

Ein Beitrag zur ganzheitlichen Toleranzbetrachtung bei Wegeventilen





Ein Beitrag zur ganzheitlichen Toleranzbetrachtung bei Wegeventilen

Ralf Tautenhahn

Geboren am: 5. Juli 1982 in Zschopau

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Erstgutachter

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber

Zweitgutachter

Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Eingereicht am: 25. Juni 2020

Verteidigt am: 11. Dezember 2020

Fluidmechatronische Systeme

Ralf Tautenhahn

**Ein Beitrag zur ganzheitlichen Toleranzbetrachtung
bei Wegeventilen**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8044-5

ISSN 2196-2340

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidtechnik bzw. an der daraus hervorgegangenen Professur für Fluid-Mechatronische Systemtechnik am Institut für mechatronischen Maschinenbau der Technischen Universität Dresden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Weber danke ich herzlich für die wissenschaftliche Betreuung und fortwährende Unterstützung in dieser Zeit sowie für die Begutachtung meiner Dissertation. Auch möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Helduser bedanken, der mir den Zugang zur Fluidtechnik und zum wissenschaftlichen Arbeiten ermöglichte. Weiterhin bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. P. F. Pelz, dem Leiter des Instituts für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt, sehr dankbar für die Erstellung des Zweitgutachtens. Danken möchte ich ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission sowie den Herren Prof. Dr.-Ing. B. Schlecht und Prof. Dr.-Ing. S. Ihlenfeldt für ihr Mitwirken in ebendieser.

Die untersuchte Thematik wurde durch eine Reihe von Forschungsprojekten inspiriert, gefördert und begleitet. Ein besonderer Dank gilt dem projektbegleitenden Arbeitsausschuss „Pneumatik“ des Forschungsfonds Fluidtechnik im VDMA, der Fa. Bürkert GmbH & Co. KG sowie der Fa. Bosch Rexroth AG für die bereitgestellte materielle und finanzielle Unterstützung. Darunter hervorzuheben sind die Herren Dr.-Ing. J.-P. Reibert und M. Fuchs, bei denen ich mich für die sehr gute, partnerschaftliche und konstruktive Zusammenarbeit stellvertretend persönlich bedanken möchte.

Die zurückliegende Zeit war durch eine Vielzahl an fachlichen und organisatorischen Herausforderungen geprägt. Aber die vielen gemeinschaftlichen Aktivitäten, der freundschaftliche und hilfsbereite Umgang untereinander sowie die zahlreichen fachlichen und nicht ganz so fachlichen Diskussionen im Kollegium konnten das stets gut kompensieren. Ich danke euch allen, die ihr mir Wegbegleiter ward und hoffentlich auch an der ein oder anderen Stelle bleibt. Dank gebührt ebenfalls den engagierten Mitarbeitern der Werkstätten, deren Geschick zum Gelingen der experimentellen Untersuchungen maßgeblich beigetragen hat, sowie allen Studierenden, die mir durch ihre Tätigkeit geholfen haben.

Meiner Familie – vor allem aber meiner lieben Frau Madlen sowie meinen beiden wunderbaren Töchtern Thea und Elsa – bin ich zutiefst dankbar. Ohne eure Unterstützung, euren Zuspruch und leider auch durch manchen Verzicht wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Dresden, April 2021

Ralf Tautenhahn

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und wissenschaftliche Problemstellung	1
2	Stand der Forschung und Technik	3
2.1	Ventile in der Fluidtechnik	3
2.1.1	Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit in der Ventiltechnik	4
2.1.2	Fazit	6
2.2	Toleranzen zur geometrischen Produktspezifikation	6
2.2.1	Darstellung	7
2.2.2	Toleranzverknüpfung	8
2.2.3	Fazit	13
2.3	Genauigkeit	14
2.3.1	Behandlung ungenauer Informationen	16
2.3.2	Behandlung unsicherer Informationen	17
2.3.3	Fazit	22
2.4	Robustheit	23
2.4.1	Sensitivitätsanalyse	23
2.4.2	„Robust Design“-Methodik	26
2.4.3	Fazit	29
2.5	Zuverlässigkeit	29
2.5.1	Zusammenhang zwischen Unsicherheiten und Zuverlässigkeit	30
2.5.2	Zeitabhängige Kenngrößen	31
2.5.3	Zuverlässigkeitsanalyse	32
2.5.4	Fazit	33
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	35
4	Festlegung der Ausgangsgrößen und Identifikation relevanter Störgrößen	37
4.1	Untersuchungsgegenstände und Festlegung der zu analysierenden Ausgangsgrößen	37
4.1.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	37

4.1.2	Pneumatisches Schaltventil	38
4.2	Systematische Identifikation aller relevanten Störgrößen	39
4.2.1	Potenzielle Lösungsansätze	40
4.2.2	Anwendung einer standardisierten Modellierungssprache zur Formalisierung der Vorgehensweise	44
4.3	Fazit	49
5	Modellierung des Störgrößeneinflusses	51
5.1	Mathematische Ersatzmodelle	51
5.1.1	Orthogonale Polynome	54
5.1.2	Künstliche neuronale Netze	56
5.1.3	Bewertung der Anpassungsgüte	59
5.2	Funktionale Dekomposition und Störgrößeneinfluss	60
5.2.1	Energie wandeln $E_{el} \rightarrow E_{mech}$	61
5.2.2	Schließelement positionieren	67
5.2.3	Strömungswiderstand ändern	69
5.3	Exemplarische Modellierung von Wegeventilen	72
5.3.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	72
5.3.2	Pneumatisches Schaltventil	86
5.4	Fazit	97
6	Analyse des Übertragungsverhaltens im Toleranzbereich	99
6.1	Bewertung des Gültigkeitsbereichs der Modelle	99
6.1.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	100
6.1.2	Pneumatisches Schaltventil	103
6.2	Sensitivitätsanalyse	106
6.2.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	109
6.2.2	Pneumatisches Schaltventil	111
6.3	Analyse auf Normalverteilung	113
6.3.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	113
6.3.2	Pneumatisches Schaltventil	115
6.4	Fazit	115
7	Toleranzanalyse unter Berücksichtigung nicht perfekter Informationen	117
7.1	Modellierung von Störgrößen	117
7.2	Exemplarische Untersuchungen an Wegeventilen	122
7.2.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	124

7.2.2	Pneumatisches Schaltventil	129
7.3	Fazit	132
8	Toleranzsynthese	135
8.1	Formulierung als Optimierungsproblem	135
8.1.1	Numerische Lösungsverfahren	136
8.1.2	Zielfunktionen	137
8.1.3	Nebenbedingungen	142
8.2	Exemplarische Untersuchungen an Wegeventilen	143
8.2.1	Hydraulisches Proportional-Wegeventil	143
8.2.2	Pneumatisches Schaltventil	148
8.3	Fazit	151
9	Justage	153
9.1	Entwicklung eines Justagekonzepts	155
9.1.1	Abdichten	156
9.1.2	Öffnen	157
9.2	Analyse des Justagekonzepts	158
9.2.1	Funktionsnachweis	159
9.2.2	Einstellempfindlichkeit	159
9.2.3	Einstellbereich	160
9.3	Fazit	160
10	Zusammenfassung und Ausblick	163
	Literatur	169
A	Spaltberechnung	185
B	Erläuterungen zur Modellierung nicht perfekter Informationen	189
B.1	Evidenztheorie	189
B.2	Unschärfe Wahrscheinlichkeit	194
B.2.1	Unschärfe Mengen, Intervalle und Zahlen	194
B.2.2	Unschärfe Funktionen	195
B.2.3	Unschärfe Zufallsvariablen	196
B.2.4	Fuzzy-stochastische Analyse	201
C	ANOVA	205

D Kosten-Toleranz-Funktion

211