

Einfluss von Toleranzen auf das Betriebsverhalten von elektromagnetischen Ventilen

Markus Gerd Heinz Küster



Universitätsverlag Ilmenau
2016

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 Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 1. Juli 2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Eberhard Kallenbach
(Steinbeis Transferzentrum Mechatronik Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattel
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
(Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)

Tag der Verteidigung: 15. Januar 2015

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 978-3-86360-131-7 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015000610](http://nbn:de:gbv:ilm1-2015000610)

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Präzisierung der Aufgabenstellung	3
2	Elektromagnetische Ventile und deren Toleranzen	6
2.1	Grundstruktur eines elektromagnetischen Antriebs	6
2.2	Berechnung der Magnetkraft	7
2.3	Toleranzen	11
2.3.1	Einteilung der Toleranzen	14
2.3.2	Eigenschaften magnetischer Werkstoffe	16
2.3.3	Form-, Maß- und Lagetoleranzen	26
3	Radialkräfte an Gleichstrommagneten infolge Lagetoleranzen	35
3.1	Einflussparameter	37
3.2	Berechnung und Vorhersage von Radialkräften	37
3.2.1	Lineare Modelle	39
3.2.2	Nichtlineare Modelle	45
3.3	Untersuchungen an einem Proportionalmagneten	52
3.3.1	Dreidimensionale Finite Elemente Methode (3D FEM)	55
3.3.2	Ergebnisse	58
3.3.3	Verhalten bei kleiner Ansteuerung	63
3.3.4	Radialarbeit	68
3.4	Ermittlung von Radialkräften an realen Teilen	72
3.5	Vergleich zwischen Versuch und Simulation	77
3.6	Statik des Ankers	78
3.7	Anwendungsbeispiel: Lebensdauerberechnung	82
3.8	Zusammenfassung	85
4	Statistik	86
4.1	Verteilungen	86
4.2	Fehlerfortpflanzungsgesetz	89
4.3	Zentraler Grenzwertsatz	91

4.4	Beziehung zwischen Toleranz und Standardabweichung	93
4.5	Klassenbildung	94
4.6	Stochastische Analyse	95
4.6.1	Statistisches Verhalten eines einfachen elektromagnetischen Ventils	96
4.6.2	Statistisches Verhalten eines segmentierten quasi radial magnetisierten Permanentmagneten	100
4.7	Zusammenfassung	104
5	Einfluss von Toleranzen auf einen Linearaktor	105
5.1	Funktion und Modellbildung des Aktors	105
5.2	Untersuchungen an dem Linearaktor	110
5.3	Dichteschwankungen des Sintermaterials	111
5.4	Verifizierung des Netzwerkmodells	114
5.5	Analyse der Varianten	116
5.5.1	Statistische Auswertung	117
5.5.2	Vergleich und Bewertung	118
5.6	Vergleich zwischen Versuch und Simulation	122
5.7	Einfluss der Eingangsverteilungen	123
5.8	Vergleich von Justageprozessen	124
5.9	Fehlerfortpflanzungsgesetz	127
5.10	Zusammenfassung	129
6	Berücksichtigung von Toleranzen im Entwurfsprozess	130
6.1	Zusammenhang zwischen Nennmaß und Toleranz	130
6.2	Prinzipieller Ablauf der entwickelten Vorgehensweise	133
6.3	Robuste Optimierung	136
6.4	Vergleich der Berechnungsverfahren	137
6.5	Kosten-Toleranz-Optimierung	139
6.6	Zusammenfassung	142
7	Zusammenfassung und Ausblick	145
	Literaturverzeichnis	147