Piezoelektrische Antriebstechnologie für Kleinventile: Gesamtkonzept, Ansteuerelektroniken und inhärente Sensorfunktionen

Der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Tobias Dreher

geb. am 11.03.1980 in Berlin

Tag der Einreichung: 04.12.2014

Tag der Verteidigung: 17.06.2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Weber
o.Univ.Prof. DI Dr. R. Scheidl

Vorsitzender der Promotionskommission Prof. Dr.-Ing. M. Beitelschmidt

Fluidmechatronische Systeme

Tobias Dreher

Piezoelektrische Antriebstechnologie für Kleinventile: Gesamtkonzept, Ansteuerelektroniken und inhärente Sensorfunktionen

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3835-4
ISSN 2196-2340

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

- meiner Familie -

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand währen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Fluidtechnik der TU Dresden (IFD).

Ich danke dem Institutsdirektor Herrn Prof. Dr.-Ing. Weber für die konstruktive Betreuung, seine wertvollen Ratschläge und die Begutachtung meiner Dissertation. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Helduser. Er leitete bis 2010 das IFD und gab mir die Möglichkeit, mich als wissenschaftlicher Mitarbeiter intensiv mit der Ventiltechnik zu beschäftigen.

Herrn o.Univ.Prof. Dr. Scheidl danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Beitelschmidt, Herrn Dr.-Ing.habil. Dipl.-Math. Röbenack und Herrn Prof. Dr.-Ing.habil. Eulitz bedanke ich mich für ihr Mitwirken in der Promotionskommission.

Für die gute Zusammenarbeit gilt mein Dank der Firma Bürkert Werke GmbH. Sie gab den Anstoß für das Thema des piezoelektrischen Kleinventils und begleitete weite Teile der Arbeiten.

Den Kollegen des IFD danke ich für die herzliche und gute Arbeitsatmosphäre. Die fachlichen und nicht fachlichen Diskussionen waren immer eine Bereicherung. Zum Gelingen der Arbeit haben darüber hinaus das fachkundige Werkstattpersonal und zahlreiche Studenten beigetragen. Ihnen sei für die Unterstützung gedankt.

Besonderer Dank gilt meiner Frau Maria, meinen Kindern Marlene und Konstantin sowie meiner Familie für die stete Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis. Ihr Rückhalt hat mir das Erstellen dieser Arbeit wesentlich erleichtert.

Dresden im August 2015 Tobias Dreher

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einleitung ... 1

2 Stand der Technik ... 3

2.1 Grundlagen zu piezoelektrischen Aktoren ... 3

2.1.1 Wirkprinzip und Herstellung ... 3

2.1.2 Bauformen und Eigenschaften ... 7

2.2 Wissenschaftliche Arbeiten zu piezoelektrischen Ventilen – Beispiele ... 8

2.3 Kommerziell verfügbare piezoelektrische Ventile ... 13

2.4 Wissenschaftliche Arbeiten zu Ansteuerelektroniken ... 15

2.5 Analyse und Systematisierung – Teilsysteme ... 19

2.6 Wissenschaftliche Problemstellung ... 23

3 Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise ... 25

4 Entwurf eines piezoelektrischen Kleinventils ... 27

4.1 Entscheidungsfindung nach Kepner-Tregoe ... 27

4.2 Definition der Entscheidungssache ... 27

4.3 Definition und Gewichtung der Zielsetzungen ... 27

4.4 Entwicklung von Systemvarianten ... 29

4.5 Bewertung der Systemvarianten ... 32

4.6 Gesamtkonzept für ein piezoelektrisches Kleinventil ... 35

4.6.1 Die fluidtechnische Stufe ... 36

4.6.2 Das Aktor- und Hebelsystem ... 36

4.6.3 Die elektrische Steuerung ... 37

5 Entwurf einer elektrischen Steuerung für einen piezoelektrischen Ventilantrieb ... 39

5.1 Anforderungen ... 39

5.2 Grundkonzept ... 40

5.3 Schaltungsvarianten und Bewertung ... 41

5.4 Steuerungsarten und Bewertung ... 48

6 Steuerelektronik für ein Schaltventil ... 49

6.1 Aufgabenstellung ... 49

6.2 Grundkonzept und Funktionsweise ... 49

6.3 Schaltungstechnische Implementierung ... 50

6.4 Experimentelle Analyse ... 52

6.4.1 Schaltzeiten ... 52
6.4.2 Leistungsaufnahme ... 55
6.4.3 Temperaturentwicklung ... 56

6.5 Zusammenfassung Schaltelektronik ... 58

7 Steuerelektronik für ein Proportionalventil ... 59

7.1 Schaltungstechnische Implementierung Proportionalelektronik ... 59

7.2 Theoretische Auslegung und Dimensionierung ... 62

7.3 Messtechnische Analyse der nichtlinearen Aktoreigenschaften ... 65

7.4 Messen und Regelung der Aktorladung ... 68

7.4.1 Messprinzip ... 68
7.4.2 Regelungsalgorithmus ... 68
7.4.3 Kompensation der elektrischen Drift und des mechanischen Kriechens ... 69
7.4.4 Simulationsgestützter Entwurf und SMD-Aufbau der Ansteuerelektronik ... 71
7.4.5 Prüfstand für messtechnische Analysen ... 73
7.4.6 Messtechnische Analyse ... 74

7.5 Hybrides Regelungskonzept – Berechnung der Aktorladung ... 78

7.5.1 Arbeitsprinzip ... 79
7.5.2 Berechnungsalgorithmus ... 83
7.5.3 Messtechnische Analyse ... 84

8 Inhärente Sensorfähigkeiten piezoelektrischer Aktoren ... 88

8.1 Motivation und Aufgabenstellung ... 88

8.2 Vereinfachtes Vierpolersatzschild des Piezoaktors ... 89

8.3 Technische Daten des eingesetzten Aktors ... 91

8.4 Stand der Technik ... 92

8.5 Systematisierung messbarer sensorischer Effekte und Wechselwirkungen ... 96

8.6 Verfahren zum Auswerten der Messeffekte ... 100

8.6.1 Bestimmung von Kraft und Auslenkung mit einem Modell ... 101
8.6.2 Bestimmung von Kraft und Auslenkung mit Kennlinienfeldern ... 102
8.6.3 Bestimmung der Temperatur mittels der Aktorkapazität C_{PA} ... 103
8.6.4 Bestimmung der Temperatur mittels der Aktorspannung U_{PA} ... 104
8.6.5 Bestimmung der Temperatur mittels des Stroms I_{PA} ... 105
8.6.6 Bewertung und Auswahl geeigneter Verfahren ... 106
8.6.7 Zusammenfassung nutzbarer Verfahren ... 107

8.7 Messtechnische Analyse der inhärenten Sensorfähigkeiten ... 107

8.7.1 Versuchspläne ... 107
8.7.2 Versuchsstände ... 109
8.7.3 Messergebnisse des Krafteinflusses ... 111
8.7.4 Messergebnisse des Temperatureinflusses ... 115

8.8 Beispielhafte Umsetzung der Sensorfunktionen ... 123

8.8.1 Umsetzung der Kraftrekonstruktion mit PC und Mikrocontroller 123
8.9 Validierung der sensorischen Fähigkeiten 125
8.10 Einschätzung und Ausblick 129

9 Zusammenfassung 131

10 Literaturverzeichnis 135
10.1 Kapitel 1 135
10.2 Kapitel 2 135
10.3 Kapitel 3 141
10.4 Kapitel 4 141
10.5 Kapitel 5 142
10.6 Kapitel 6 142
10.7 Kapitel 7 142
10.8 Kapitel 8 143
10.9 Kapitel 9 146

Formelzeichen und Abkürzungen

1 Formelzeichen

A	mm^2	Fläche
C	µF	Kondensator/ Kapazität
D	C/m^2	elektrische Flussdichte
d	pm/V	piezoelektrische Ladungskonstante
E	V/mm	elektrische Feldstärke
F	N	Kraft
g	Vm/N	piezoelektrische Spannungskonstante
h	mm	Hub
I	A	elektrischer Strom
k_{eff}		Kopplungsfaktor
k_{PA}	N/µm	Steifigkeit
L	mH	Induktivität
L_{PA}	mm	Aktorlänge
ΔL	µm	Auslenkung
M	g	Masse
n		Anzahl
P	C/m^2	Polarisation
Q	C	elektrische Ladung
R	Ω	Widerstand
r	mm	Radius
S		mechanische Dehnung
s	m^2/N	elastische Nachgiebigkeitskonstante
T_{PA}	°C	Temperatur
T	N/m^2	mechanische Spannung
T_x	s	Zeitpunkt
t_x	s	Zeitintervall
U	V	elektrische Spannung
v	µm/s	Geschwindigkeit
Z	µm/V	Auflösung
α	K^{-1}	thermischer Ausdehnungskoeffizient
ε	As/Vm	elektrische Permittivität
ϑ	°C, K	Temperatur
τ	s	Zeitkonstante
Γ		nichtlinearer Übertragungsfaktor

2 Indizes

1..2	Aufzählung
aus	Ausschaltzustand
DS	Drain-Source
E	Endstufe
aen	Einschaltzustand
Ext	Extern
GS	Gate-Source
ist	Istwert
leck	Leckage
max	Maximalwert
nenn	Nennwert
min	Minimalwert
PA	Piezoaktor
r	Rekonstruiert
ref	Referenzwert
rel	Relativwert
S	Zwischenspeicher
soll	Sollwert
th	theoretisch
V	Vorstufe

3 Abkürzungen

A/D	Analog / Digital
AP	Arbeitspunkt
D/A	Digital / Analog
DAC	Digital-Analog-Wandler (englisch Digital-Analog-Converter)
VDC	Gleichspannung (englisch Volts Direct Current)
IFD	Institut für Fluidtechnik Dresden
ISR	Interrupt-Service-Routine
MOSFET	Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor
OPV	Operationsverstärker
PWM	Pulsweitenmodulation
µC	Mikrocontroller