

**Modellbasierte Regelung
der Stößelbewegung von
Servopressen**

Florian Hoppe

**BAND
127**

Modellbasierte Regelung der Stößelbewegung von Servopressen

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Florian Hoppe aus Bonn
Tag der Einreichung: 7. Januar 2021, Tag der Prüfung: 20. April 2021

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
 2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
- Darmstadt – D17



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich
Maschinenbau
Institut für
Produktionstechnik und
Umformmaschinen

Modellbasierte Regelung der Stößelbewegung von Servopressen

genehmigte Dissertation von Florian Hoppe

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

Tag der Einreichung: 7. Januar 2021

Tag der Prüfung: 20. April 2021

Darmstadt – D17



Berichte aus Produktion und Umformtechnik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Modellbasierte Regelung der Stößelbewegung von Servopressen

Florian Hoppe

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

**BAND
127**

*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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

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 978-3-8440-8131-2

ISSN 0949-4952

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

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt. Besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche einerseits für die Übernahme des Erstgutachtens, vor allen Dingen aber für das entgegengebrachte Vertrauen, die stete Motivation zu neuen Initiativen und die herausragende Lernumgebung, die er damit am PtU schafft. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger danke ich herzlich für die kritische Durchsicht der Arbeit, die Übernahme des Korreferates und den konstruktiven fachlichen Austausch.

Weiterhin danke ich dem Kollegium des PtU sowie des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805 für die entgegengebrachte Unterstützung und die solidarische Zusammenarbeit, während der viele Kooperationen und Freundschaften entstanden. Insbesondere bedanke ich mich bei Dr. Daniel Hesse, Dr. Stefan Calmano, Maximilian Knoll und Julian Sinz für den unermüdlichen Zusammenhalt beim Überwinden zahlloser Hürden und ihren maßgebenden Beitrag bei der Entwicklung der 3D-Servo-Pressen (3DSP), an die ich meine Dissertation anknüpfen durfte. Für die Förderung meiner Arbeit, der 3DSP und des SFB 805 bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Weiterhin danke ich Dr. Stefan Köhler für viele Jahre der freundschaftlichen und vertrauensvollen Zusammenarbeit sowie der Werkstatt, dem Versuchsfeld, der IT, der Buchhaltung, dem Sekretariat und nicht zuletzt den Studierenden für ihre Unterstützung. Unter Letztgenannten danke ich insbesondere Clemens Pihan, Martin Rakowitsch und Dirk A. Molitor für ihre herausragende wissenschaftliche Leistung, mit der sie einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Für die Korrektur meiner Dissertation und die offenen, konstruktiven Diskussionen bedanke ich mich bei Maximilian Knoll und Dirk A. Molitor.

Zu guter Letzt danke ich von ganzem Herzen meiner Familie, die die Räume für diese Ausbildung geschaffen hat und mir auch in den letzten Jahren bedingungslos den Rücken freihält. Insbesondere meiner Frau Sandra und meinen Töchtern Millie und Viola danke ich für ihre unermüdliche Unterstützung, ihre Bestärkung und die ruhigen Nächte vor der Prüfung.

Darmstadt, im Mai 2021

Florian Hoppe

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	3
2.1. Regelung von Produktionssystemen	3
2.1.1. Flexible, kontrollierte Führung von Bauteileigenschaften	4
2.1.2. Der Weg zur hochautomatisierten Produktion	7
2.2. Regelung der Stößelfreiheitsgrade von Pressen	10
2.2.1. Klassifizierung von Servopressen	12
2.2.2. Mehrpunkt-Servopressen	14
2.2.3. Steuerung und Regelung von Pressen	15
2.2.4. Ermittlung und Führung der Werkzeugbahn von Robotern	19
2.2.5. Methoden zur Regelung in kinematischen Singularitäten	22
2.2.6. Bewertungskriterien	26
2.3. Maschinenmodelle	28
2.3.1. Definition und Einordnung von Modellen	28
2.3.2. Dynamische Pressen- und Getriebemodelle	30
2.3.3. Modellierung mit maschinellem Lernen	33
2.4. Fazit	38
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	39
3.1. Zielsetzung	39
3.2. Vorgehensweise	41
4. Beschreibung der Versuchsstände	45
4.1. Prototyp und Forschungsversion der 3D-Servo-Pressen	45

4.2. Kinematische Modelle	47
4.2.1. Stoßelkinematik	49
4.2.2. Exzenterkinematik	53
4.2.3. Spindelkinematik	57
4.2.4. Zusammenfassung	59
5. Erfassung der Stoßellage	61
5.1. Sensorplatzierung	61
5.1.1. Positionserfassung	61
5.1.2. Prozesskraft	64
5.2. Steigerung der Genauigkeit durch elastische Pressenmodelle	68
5.2.1. Modellierung nichtlinear elastischer Getriebe	69
5.2.2. Validierung eines Stoßelbeobachters	75
5.2.3. Automatisierte Kalibrierung eines hybriden Beobachtermodells	81
5.3. Fazit	84
6. Antriebsregelung	85
6.1. Modellierung der Maschinendynamik	87
6.2. Ableitung einer Antriebsregelung aus dem Maschinenmodell	94
6.2.1. Linearisiertes Modell des geschlossenen Regelkreises	95
6.2.2. Stabilitätsbereich der Reglerparameter	98
6.2.3. Validierung und Optimierung	100
6.3. Fazit	105
7. Regelung von Pressengetrieben mit kinematischen Totpunkten	107
7.1. Ableitung von Performanzkriterien für modellbasierte Analyse	107
7.1.1. Fortpflanzung von Ruck im Antriebsstrang	108
7.1.2. Einbeziehung von Unsicherheit	112
7.2. Modellbasierte Analyse regelungstechnischer Methoden	113
7.2.1. Totpunktstabilität inverser Kinematikregelungen	114
7.2.2. Numerische Untersuchung nichtlinearer Regelungsansätze . .	123
7.3. Fazit	137
8. Regelung mehrdimensionaler Stoßelbewegungen	139
8.1. Entkopplung der Stoßelfreiheitsgrade	139



8.2. Automatisierung des Stoßelarbeitsraums	144
8.3. Experimentelle Untersuchungen unter Prozessbedingungen	151
8.3.1. Exzentrischer Lastsprung	152
8.3.2. Single Point Incremental Forming	155
8.4. Modellkalibrierung durch Lernen	157
9. Zusammenfassung	169
Literaturverzeichnis	173
A. Modellierung und Skalierung des kinetischen Modells	197
B. Geometrische Konstruktion der Lage des Stoßel-TCP	199
C. Einfluss der Abtastzeit des Steuerungssystems auf die Stabilität der Regelung	203
D. Symbole und Abkürzungen	205