

Modellierung und Regelung einer mechanischen Presse mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens

Tajinder Singh Dhaliwal
Master-Thesis 28. April 2015
Betreuer: Florian Hoppe



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachgebiet für Produktionstechnik
und Umformmaschinen



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

Master-Thesis

Für

Herrn B. Sc. Tajinder Singh Dhaliwal

Thema: Modellierung und Regelung einer mechanischen Presse mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens

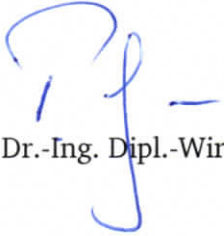
Modeling and Control of a Mechanical Forming Press using Machine Learning Methods

Für die Überwachung und Regelung von Pressen sind präzise Modelle notwendig. Im Gegensatz zu klassischen White-Box Modellierungsansätzen, in dem a priori alle Modellparameter und Einflüsse genau ermittelt und beschrieben werden, soll im Rahmen dieser Arbeit ein Ansatz für die lernende Modellierung der 3D-Servo-Presse verfolgt werden. Hierzu sollen Methoden aus dem maschinellen Lernen genutzt werden, um ein dynamisches Modell anhand gemessener Ein- und Ausgangsdaten der Presse zu erstellen. Hiermit sollen zum einen das Maschinenverhalten überwacht und zum anderen ein inverses Modell für die Regelung bereitgestellt werden.

Im Einzelnen sind folgende Tätigkeiten durchzuführen:

- Recherche zum Stand der Technik über den Einsatz von maschinellem Lernen bei der Modellierung von Maschinen
- Auswahl und Implementierung von Verfahren in Matlab/Python
- Untersuchung der Verfahren anhand eines Simulationsmodells der 3D-Servo-Presse
- Experimentelle Untersuchung und Bewertung der Verfahren am Prototypen
- Zusammenstellen der Ergebnisse in einer schriftlichen Ausarbeitung

Beginn: 10.09.2018
Abgabe: 11.03.2019
Betreuer: M. Sc. Florian Hoppe



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. P. Groche



Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 und § 23 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Tajinder Singh Dhaliwal, die vorliegende Master-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§ 38 Abs. 2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß § 23 Abs. 7 ABP überein.

Bei einer Thesis des Fachbereichs Architektur entspricht die eingereichte elektronische Fassung dem vorgestellten Modell und den vorgelegten Plänen.

Datum:

Unterschrift:

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Verfahrens zur Beherrschung von Unsicherheiten in Drei-Punkt-Richtprozessen. Beim Richten ist sowohl die Prozessgeschwindigkeit als auch Prozessgenauigkeit die genaue Prädiktion der Rückfederung des Bauteils von entscheidender Rolle. Dabei stellen oftmals schwankende Bauteileigenschaften eine Herausforderung dar, die eine Regelstrategie benötigt, die diese Schwankungen erkennen und kompensieren kann. Hierzu wird in dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, parallel zu einem Biegeprozess in Echtzeit alle relevanten Bauteilinformationen aus der Kraft-Weg-Messung des Bauteils zu identifizieren und damit zu jedem Zeitpunkt die Rückfederung zu prädizieren.

Anhand der Ergebnisse an einer Drei-Punkt-Richtmaschine wird gezeigt, dass mit diesem Verfahren auch ohne Kenntnis der Materialeigenschaften mit nur einem Richthub eine hohe Genauigkeit erzielt werden kann. Darüber hinaus werden in Versuchen auch die Grenzen der Robustheit gegenüber Schwankungen in der Bauteilgeometrie getestet. Als Ausblick zu diesem Verfahren wird ein Lösungsansatz geliefert, mit dem ein höheres Maß an vertrauenswürdiger Information gewonnen werden kann und durch eine stochastische Modellierung der Unsicherheiten eine weitere Optimierung ist.

Schlüsselwörter: Drei-Punkt-Richten, Unsicherheit, Unwissen, Materialeigenschaft, Bauteileigenschaften, Robustheit

Abstract

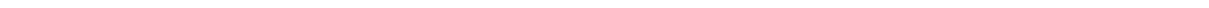
This thesis deals with the development of a method to control uncertainties in three-point straightening processes. Speed and accuracy in straightening processes are determined by its quality of springback prediction. Alternating material and part properties are a challenging task for springback prediction and require a control strategy which is able to detect and compensate those uncertainties. Therefore this thesis presents a method which is able to extract all essential information from the online force-displacement curvature during the straightening process and provides a real-time springback prediction.

Results from real processes on a three-point straightening machine have shown that this method is able to handle unknown uncertainties in material properties and achieve a high accuracy within one stroke. Additional results show the robustness of this method and its limits regarding uncertainties in part properties. A further solution is provided which gives an outlook on how to increase the amount of available, reliable information and therefore optimize the method with a stochastic uncertainty.

Keywords: three-point straightening, stochastic uncertainty, unknown uncertainty, material properties, part properties, robustness

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkungen	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einführung	1
2 Grundlagen	3
3 Ausblick	5
Literaturverzeichnis	7



Symbole und Abkzungen

Operatoren und Funktionen

Symbol	Beschreibung
*	Faltung
★	Kreuzkorrelation
$\delta(\cdot)$	Dirac-Funktion
$\frac{\partial f}{\partial x}$	partiell Differential
$\frac{df}{dt}$	totales Differential
$\Theta(\cdot)$	Heaviside-/Sprung-Funktion

Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Bauteilfl in der x - z -Ebene	mm^2
a_f	Parameter der Kaltfliecurve	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
b	Integrationskonstante	N
b_f	Parameter der Kaltflieve	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
E	Elastizitsmodul	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
F	aktuelle Reaktionskraft des Bauteils	N
F_m	Reaktionskraft des Bauteils zu Beginn der m -ten Entlastung	N
\bar{F}_m	Reaktionskraft des Bauteils nach der m -ten Entlastung	N
F_n	Reaktionskraft des Bauteils im n -ten Abtastschritt	N
$\mathbf{F}_{1:n}$	Vektor der Reaktionskre vom ersten bis n -ten Abtastschritt	N
F_Y	Bauteilflieenze	N
h	Bauteilhe	mm
I_y	Flentrsmoment um die y -Achse	mm^4
k	Bauteilsteifigkeit	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
\hat{k}	gescte Bauteilsteifigkeit	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
\hat{k}_{el}	verbesserte Scung der Bauteilsteifigkeit	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
\hat{k}_{pl}	gesctes Tangentenmodul im plastischen Bereich	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
$\hat{k}_{\text{el},m}$	verbesserte Schng der Bauteilsteifigkeit nach der m -ten Rderung	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
k_f	Fliepannung der Kaltfliee	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
l	Bauteille	mm
l_{eff}	effektive Bauteillge zwischen den Auflagern	mm

Symbol	Beschreibung	Einheit
M_y	Biegemoment um die y -Achse	Nmm
t	Zeit	s
T_{abt}	Abtastzeit der Ein- und Ausge	s
U	Steuerspannung des Proportionalventils	V
\dot{V}	Volumenstrom durch das Proportionalventil	$\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$
w	aktuelle Bauteildurchbiegung	mm
w_n	Bauteildurchbiegung im n -ten Abtastschritt	mm
w_m	Bauteildurchbiegung zu Beginn der m -ten Entlastung	mm
$\mathbf{w}_{1:n}$	Vektor der Bauteildurchbiegungen vom ersten bis n -ten Abtastschritt	mm
\dot{w}	aktuelle Biegegeschwindigkeit	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
\tilde{w}	geschte Bauteildurchbiegung nach Entlastung	mm
\bar{w}	Bauteildurchbiegung nach Entlastung	mm
\bar{w}_m	Bauteildurchbiegung nach der m -ten Entlastung	mm
\bar{w}_{soll}	Solldurchbiegung des Bauteils nach Entlastung	mm
w_0	Anfangsbauteildurchbiegung	mm

Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
ϵ	Rauschprozesses der Kraftmessung	N
ε	mechanische Dehnung	
ε_{el}	elastische Dehnung	
ε_{pl}	plastische Dehnung	
η	Verfestigungsexponent des Bauteils	
η_f	Verfestigungsexponent der Kaltfließe	
λ	Vergessensfaktor	
μ_R	Reibungskoeffizient	
μ	Mittelwertvektor der Zufallsvariablen k und b	
ν	Rauschprozess der Wegmessung	
ρ_0	Krgsradius des Balkens	
Σ	Kovarianzmatrix der Zufallsvariablen k und b	
σ	mechanische Spannung	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
σ_{ϵ}^2	Varianz der Kraftmessung	N^2
σ_{ν}^2	Varianz der Wegmessung	mm^2
σ_F^2	Varianz der Zufallsvariable F	N^2
σ_Y	Materialfließen	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
φ	Umformgrad	

Abkungen

Kel	vollstige Bezeichnung
AI	Analog Input
AO	Analog Output
BNF	Beobachter-Normalform
BIBO	Bounded Input Bounded Output
CAD	Computer-Aided Design
DAQ	Data Aquisition
DCOM	Distributed Component Object Model
DGL	Differenzialgleichung
DI	Digital Input
DO	Digital Output
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
I/O	Input/Output
LS	Least Squares
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Wegsensor)
OLE	Object Linking and Embedding
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control
OPC-DA	OPC Data Access
OPC-UA	OPC Unified Architecture
pdf	probability density function
RLS	Recursive Least Squares
RMS	Root Mean Square
RT	Real-Time
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSI	Synchronous Serial Interface



Abbildungsverzeichnis



Tabellenverzeichnis



1 Einführung

Die Planung und Einführung von Fertigungssystemen geht mit Unsicherheiten einher. Dies ist bedingt durch die limitierte Gültigkeit von Annahmen in Bezug auf zukünftige Ereignisse während der Auswahl- und Entwicklungsphase von Fertigungstechnologien und Werkzeugmaschinen [2]. Nach [1] gibt es vier Arten von Unsicherheiten: die Marktakzeptanz von bestimmten Produkten, die Länge der Produktlebensphasen, spezifische Produkteigenschaften und die aggregierte Produktnachfrage. Ein mögliches Lösungskonzept zur Bewältigung dieser Unsicherheiten besteht darin, die Flexibilität von Fertigungssystemen zu erhöhen. Daraus ergeben sich nach [6] folgende Vorteile: durch die Erhöhung dieser können erstens eine höhere Anzahl an Produkten und Produktvariationen (Werkzeugflexibilität) in den Fertigungsprozess integriert werden, zweitens erhöht sich die Adaptionfähigkeit des Fertigungsprozesses auf eine Veränderung der Produktpalette (Produktflexibilität), drittens erhöht sich bei flexiblen Fertigungsprozessen die Adaptionfähigkeit auf Veränderungen des Prozesses, z.B. durch technologische Entwicklungen (Prozessflexibilität) und viertens kann durch solche Fertigungssysteme flexibler auf Nachfrageschwankungen reagiert werden (Nachfrageflexibilität).

Bisher kommen Umformmaschinen vor allem bei großen Stückzahlen und ausgewählten Umformmethoden oder kleinen Stückzahlen und vorher speziell festgelegten Werkzeugverfahrenwegen zum Einsatz [2]. Dadurch ist die Adaptionfähigkeit auf Nachfrageschwankungen sehr eingeschränkt [4]. Dagegen bietet bringt die Integration von Servomotoren in Pressen neue Möglichkeiten der Flexibilisierung mit [3]. Um dem Anspruch einer höheren Flexibilität für Pressen gerecht zu werden, entwickelte das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) die neuartige 3D-Servo-Presse. Diese verfügt über drei Antriebssysteme. Diese erlauben es der 3D-Servo-Presse, zuzüglich zur translatorischen Stößelbewegung eine Verkipfung orthogonal zur Translationsbewegung durchzuführen. Dadurch ergeben sich insgesamt drei Freiheitsgrade: eine translatorische Hubbewegung und zwei rotatorische Kippbewegungen. Dadurch ist die Herstellung neuartiger Produktgeometrien und das Einbringen bestimmter Materialeigenschaften in den umgeformten Produkten durch definierte Werkzeugbewegungen denkbar. Beispielsweise lässt sich durch den Einsatz der 3D-Servo-Presse die Anzahl der Prozessschritte bei der Herstellung von Bauteilen mit sehr hohen Umformgraden durch die gezielte Steuerung des Materialflusses reduzieren [5]. Durch den Einsatz der 3D-Servo-Presse soll damit dem Anspruch nach höherer Flexibilisierung und der damit einhergehenden höheren Wirtschaftlichkeit gerecht werden.



2 Grundlagen

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipiscing elit, sed diam nonumy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi.

Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipiscing elit, sed diam nonumy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipiscing elit, sed diam nonumy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi.

3 Ausblick

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue dui dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipiscing elit, sed diam nonumy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue dui dolore te feugait nulla facilisi.

Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipiscing elit, sed diam nonumy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue dui dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipiscing elit, sed diam nonumy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi.

Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat.

Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi.

Literaturverzeichnis

- [1] GERWIN, D.: *Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective*. Management Science, 39(4):395–410, 1993.
- [2] GROCHE, P., M. SCHEITZA, M. KRAFT und S. SCHMITT: *Increased total flexibility by 3D Servo Presses*. CIRP Annals, 59(1):267–270, 2010.
- [3] GROCHE, P. und R. SCHNEIDER: *Method for the Optimization of Forming Presses for the Manufacturing of Micro Parts*. CIRP Annals, 53(1):281–284, 2004.
- [4] SCHMOECKEL, D.: *Developments in Automation, Flexibilization and Control of Forming Machinery*. CIRP Annals, 40(2):615–622, 1991.
- [5] SINZ, J.: *Die 3D-Servo-Presse - von der Forschungsversion zur industriellen Standardmaschine*, 2018 (Zugriff am 13.09.2018. https://www.ptu.tu-darmstadt.de/mu_forschung/mu_prozesskettenundanlagen/abgeschlossene_forschungsprojekte_pa/die_3d_servo_presse___von_der_forschungsversion_zur_industriellen_standartmaschine/index.de.jsp,).
- [6] SON, Y. K. und C. S. PARK: *Economic measure of productivity, quality and flexibility in advanced manufacturing systems*. Journal of Manufacturing Systems, 6(3):193–207, 1987.