

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

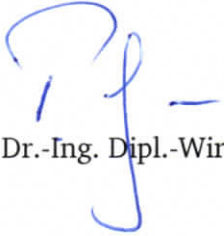
Modeling and Control of a Mechanical Forming Press using Machine Learning Methods

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	ix
Tabellenverzeichnis	xi
1 Einführung	1
1.1 Abgrenzung zu vorherigen Arbeiten	2
1.2 Vorgehensweise	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Modellierungsansätze	5
3 Ausblick	9
Literaturverzeichnis	11



Symbole und Abkzungen

Operatoren und Funktionen

Symbol	Beschreibung
*	Faltung
$\Theta(\cdot)$	Heaviside-/Sprung-Funktion

Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
b	Integrationskonstante	N

Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
ϵ	Rauschprozesses der Kraftmessung	N
φ	Umformgrad	

Abkürzungen

Kel	vollstige Bezeichnung
-----	-----------------------

AI	Analog Input
----	--------------

AO	Analog Output
----	---------------

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verschiedene mathematische Modelle von White-Box- bis zu Black-Box-Modellen .	7
-----	---	---



Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften theoretischer und experimenteller Modellierungsansätze [5]	6
-----	--	---------	---



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 [3]. Nach [2] 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 [9] 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 Werkzeugverfahren zum Einsatz [3]. Dadurch ist die Adaptionfähigkeit auf Nachfrageschwankungen sehr eingeschränkt [7]. Dagegen bietet bringt die Integration von Servomotoren in Pressen neue Möglichkeiten der Flexibilisierung mit [4]. 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 [8]. Durch den Einsatz der 3D-Servo-Presse soll damit dem Anspruch nach höherer Flexibilisierung und der damit einhergehenden höheren Wirtschaftlichkeit gerecht werden.

Zusätzlich zum Thema Flexibilisierung von Fertigungssystemen hat sich das Thema Industrie 4.0 als weiterer Forschungsgegenstand in der Literatur etabliert. Nach [1] stellt die Integration von Sensoren und die damit ermöglichte Zustandsüberwachung einer Werkzeugmaschine ein Teilaspekt der Industrie 4.0 dar. Durch die Zustandsüberwachung ist eine frühzeitige Detektion von Ausfällen möglich. Darüber hinaus können durch die Erfassung des Betriebszustandes Prognosen zur zukünftigen Funktionsfähigkeit der Werkzeugmaschine gemacht werden. Diese erlauben im weiteren Verlauf das Initiieren von Maßnahmen zur Behebung von möglich auftretenden Ausfällen, Defekten etc. [1]

Sowohl für die Regelung der 3D-Servo-Presse während des normalen Betriebsfalles als auch für die Zustandsüberwachung der 3D-Servo-Presse ist eine Modellbildung dieser notwendig. Im Gegensatz zu vergangenen Arbeiten kommt in dieser Arbeit kein White-Box-Ansatz, in dem a priori alle Modellierungsparameter und Einflüsse genau ermittelt werden, sondern ein Blackbox-Ansatz zur Anwendung. Für die Parametrisierung des Black-Box-Modells kommen Methoden des maschinellen Lernens zum Einsatz, um anhand gemessener Eingangs- und Ausgangsgrößen ein dynamisches Modell zu erstellen. Auf Basis dieses Modells sollen Konzepte zur Zustandsüberwachung als auch zur Regelung der 3D-Servo-Presse entwickelt werden. Als Grundlage dieser Arbeit dient der Prototyp der 3D-Servo-Presse. Diese steht als Forschungsobjekt am PtU an der Technischen Universität Darmstadt zur Verfügung.

1.1 Abgrenzung zu vorherigen Arbeiten

Wie bereits erwähnt verfügt die 3D-Servo-Presse über drei Servo-Motoren, welche die Antriebsmomente liefern. Mit der Hilfe von ungleich übersetzenden Koppelgetrieben werden nicht nur die Drehmomente in die auf den Stößel wirkende Zustellkraft übersetzt, sondern auch eine Kippbewegung des Stößels in zwei rotatorische Freiheitsgraden ermöglicht. Für diese Presse sind in mehreren Vorarbeiten bereits Pressenmodelle entwickelt worden.

[6] entwickelte in seiner Arbeit ein mechanisches Mehrkörpermodell des Getriebes der 3D-Servo-Presse. Bei diesem Pressenmodell berücksichtigt er sowohl die Nachgiebigkeiten als auch die Massenträgheiten aller Getriebeglieder, um damit dynamische Vorgänge, wie z.B. Schwingungen und das Verfahren der Getriebestellung, zu untersuchen. [6] kommt zum Ergebnis, dass das Mehrkörpermodell steifer ist als das reale Getriebe. Nach einer erneuten Parameteridentifikation zeigte sich in den Messdaten eine Hysterese und mechanisches Spiel. Nach [6] konnten diese nicht durch das Modell abgebildet werden. Weiterhin kommt [6] zum Schluss, dass die aus der Identifikation entspringenden Parameter einer Unsicherheit unterliegen. Daraufhin untersuchte [6] die Auswirkungen der Parameterunsicherheit und wählte aus den unsicheren Parametern zwei Parametersätze, aus welchen zwei Grenzmodelle hervorgingen, ein weiches und

steifes Pressenmodell. Mit diesen konnte [6] letztlich die Zustandsüberwachung durchführen.

In dieser Arbeit soll nun im Gegensatz zu [6] ein Black-Box-Modell an Stelle eines White-Box-Modells entwickelt werden. Die Parametrisierung des Modells findet dabei über Methoden des maschinellen Lernens statt. Das Ziel besteht darin, bisher in White-Box-Modellen nicht abgebildete Effekte, wie z.B. die nicht lineare Reibung, Fertigungstoleranzen, statische Dehnungen, Lagerreibung, Abnutzungserscheinungen, etc. durch Methoden des maschinellen Lernens abzubilden.

1.2 Vorgehensweise



2 Theoretische Grundlagen

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, ein Ersatzmodell für den Prototypen der 3D-Servo-Pressen zu entwickeln. Die Parametrisierung erfolgt über Methoden des maschinellen Lernens. Auf Basis des Ersatzmodells folgt im weiteren Verlauf die Entwicklung von Konzepten zur Zustandsüberwachung und Regelung der 3D-Servo-Pressen. Zunächst soll jedoch auf die Grundlagen der Modellbildung eingegangen werden.

2.1 Modellierungsansätze

Nach [5] gibt es mehrere Möglichkeiten der Modellbildung, die theoretische, die experimentelle und theoretisch-experimentelle Mischformen. Zunächst erfolgt die Beschreibung der theoretischen Modellbildung.

Bei der theoretischen Modellierung findet die Beschreibung des Systems entweder über partielle oder gewöhnliche Differentialgleichungen statt. Da reale Systeme in vielen Fällen zu komplex und/oder kompliziert sind, ist es üblich, das Modell zu vereinfachen, z.B. durch das Ignorieren bestimmter real auftretender Effekte (z.B. nichtlineare Reibungseffekte). In der Regel ist es nach [5] möglich, das Modell durch vier Arten von Gleichungen zu beschreiben:

- *Bilanzgleichungen*: Dazu gehören die Massen-, Energie- und Impulserhaltung.
- *Physikalische oder chemische Zustandsgleichungen*: Diese sogenannten konstitutiven Gleichungen beschreiben reversible Vorgänge, wie z.B. das 2. Newtonsche Gesetz.
- *Phänomenologische Gleichungen*: Diese beschreiben irreversible Vorgänge, wie z.B. Reibung.
- *Verbindungsgleichungen*: Dazu gehören die Kirchhoffschen Regeln, Momentengleichgewichte, etc.

Nach [5] setzt sich die theoretische Modellbeschreibung des Systems aus einer Mehrzahl von Gleichungen zusammen. Die Lösung des Gleichungssystems ist zwar explizit nicht immer möglich, aber trotzdem können individuelle Gleichungen wichtige Anhaltspunkte bezüglich der Modellstruktur liefern. [5]

Die experimentelle Modellbildung basiert auf Messdaten, welche im Zuge von Versuchen aufgenommen werden. Die Messdaten teilen sich auf in Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems. Als Eingangsgrößen können entweder reale Eingangsstellgrößen oder künstlich erzeugte Testsignale mit bestimmten Eigenschaften fungieren. Im Fall der 3D-Servo-Pressen seien der Exzenteranschub und die beiden Spindelanschübe die Eingangsgrößen des Systems, da sie die Höhenverstellung des Stößels als Ausgangsgröße festlegen. Das Ziel der theoretischen Modellbildung

besteht nun darin, für eine ausgewählte Modellstruktur die Parameter so zu identifizieren, dass ein möglichst guter Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen hergestellt wird. Der dafür in der Literatur standardmäßig verwendete Begriff ist Systemidentifikation. [5]

Die Bezeichnung der Modellstruktur, welche aus der theoretischen Modellbildung hervorgeht, lautet White-Box-Modell. Das Gegenstück dazu ist das Black-Box-Modell, welches aus der experimentellen Modellbildung hervorgeht. Nach [5] haben White-Box- und Black-Box-Ansätze verschiedene Vor- und Nachteile, aber dennoch sind die komplementär zueinander. Um Vorteile beider Modellierungsansätze zu vereinen, sind ebenfalls sogenannte Gray-Box-Modell-Ansätze in verschiedenen Abstufungen (Light-Gray-Box-Modell, Dark-Gray-Box-Modell) entstanden. Eine Übersicht über alle Modellierungsansätze liefert Abbildung 2.1. Die wesentlichen Eigenschaften beider Modellierungsansätze sind in Tabelle 2.1 zu finden.

Tabelle 2.1: Eigenschaften theoretischer und experimenteller Modellierungsansätze [5]

Theoretische Modellbildung	Experimentelle Modellbildung (Systemidentifikation)
Modellstruktur folgt Naturgesetzen	Modellstruktur muss angenommen werden
Modellierung des Übertragungsverhaltens und innerer Systemvorgänge	lediglich Identifizierung des Übertragungsverhaltens
Gültigkeit des Modells für eine Reihe von Prozessen ähnlichen Types und unterschiedlicher Randbedingungen	Modell ist nur für das untersuchte System innerhalb der Betriebsgrenzen gültig
Modellkoeffizienten sind nicht exakt bekannt	exaktere Bestimmung der Modellkoeffizienten für das gegebene System innerhalb der Betriebsgrenzen
Modell kann für nicht existente Systeme entwickelt werden	Modell kann nur für ein bereits existierendes System entwickelt werden
das interne Systemverhalten muss bekannt und mathematisch beschreibbar sein	Identifikationsmethoden sind unabhängig vom untersuchten System und können auf andere Systeme angewendet werden
üblich langsamer Prozess mit hohem Zeitaufwand	schneller Prozess bei bereits bekannten Identifikationsmethoden
Modelle können sehr komplex und detailliert ausfallen	Modellgröße kann auf den Anwendungsfall des Modells angepasst werden

Wie in Tabelle 2.1 zu erkennen ist, umgehen Black-Box-Modelle einen wesentlichen Nachteil von White-Box-Modellen, nämlich die exakte Kenntnis der Systemzusammenhänge, das Aufstellen von mathematischen Gleichungen zur Beschreibung dieser und die explizite Lösung des

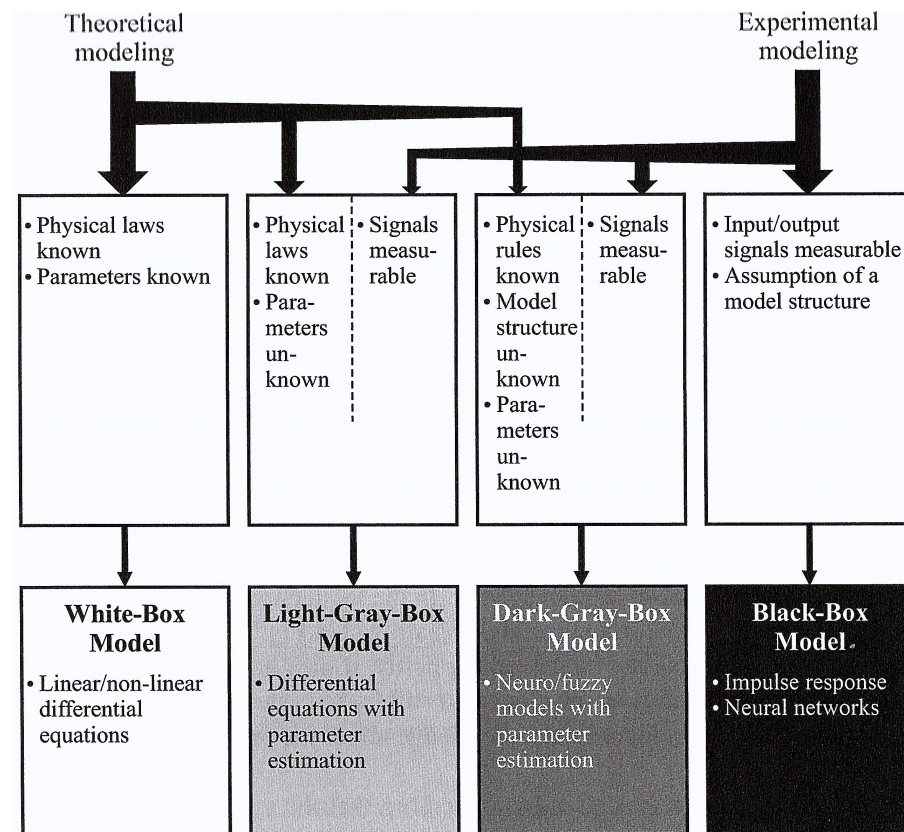


Abbildung 2.1: Verschiedene mathematische Modelle von White-Box- bis zu Black-Box-Modellen

Gleichungssystems. Für komplexe Systeme wie der 3D-Servo-Pressen stößt der White-Box-Ansatz auf viele Probleme, siehe Abschnitt 1.1. Deshalb fungiert das Black-Box-Modell als Grundlage für die Modellbildung des Prototypen der 3D-Servo-Pressen. Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, können Neuronale Netze als Methode zur Parameteridentifikation von Black-Box-Modellen dienen. Neuronale Netze stellen ein Teilgebiet des Maschinellen Lernens dar. Die Grundlagen der Neuronalen Netze werden in Kapitel QUELLE beschrieben. Das Black-Box-Modell dient als Grundlage für die Regelung und die Zustandsüberwachung der 3D-Servo-Pressen. Zunächst sollen im nächsten Abschnitt die Grundlagen der Regelung vermittelt werden.



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 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 dui 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 dui 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 dui dolore te feugait nulla facilisi.

Literaturverzeichnis

- [1] ANDERL, R., A. PICARD, Y. WANG, S. DOSCH, B. KLEE und J. BAUER: *Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*, 2018.
- [2] GERWIN, D.: *Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective*. Management Science, 39(4):395–410, 1993.
- [3] GROCHE, P., M. SCHEITZA, M. KRAFT und S. SCHMITT: *Increased total flexibility by 3D Servo Presses*. CIRP Annals, 59(1):267–270, 2010.
- [4] 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.
- [5] ISERMANN, R. und M. MÜNCHHOF: *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [6] RAKOWITSCH, M.: *Modellierung der Dynamik eines Koppelgetriebes am Beispiel der 3D-Servo-Presse: Studienarbeit*. Darmstadt, 2018.
- [7] SCHMOECKEL, D.: *Developments in Automation, Flexibilization and Control of Forming Machinery*. CIRP Annals, 40(2):615–622, 1991.
- [8] SINZ, J.: *Die 3D-Servo-Presse - von der Forschungsversion zur industriellen Standardmaschine*, 2018.
- [9] 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.