

**Methodik zur
Entwicklung eines
Bedienerassistenzsystems
für das Presswerk**

Matthäus Kott

**BAND
132**

Methodik zur Entwicklung eines Bedienerassistenzsystems für das Presswerk

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Matthäus Kott, M. Sc.

aus Tarnowitz

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

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Tag der Einreichung: 10.01.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 11.05.2022

Darmstadt 2022

D17

*Berichte aus Produktion
und Umformtechnik*

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

**Methodik zur Entwicklung eines Bediener-
assistenzsystems für das Presswerk**

Matthäus Kott

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

BAND
132

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8744-4

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 Doktorand im Werkzeugbau der Opel Automobile GmbH am Standort Rüsselsheim. Wissenschaftlich wurde die Arbeit von Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, dem Leiter des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt, betreut. Ihm gilt mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit sowie die Anfertigung des Erstgutachtens. Weiterer großer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des PtU bedanke ich mich für die außergewöhnliche Kollegialität sowie konstruktive und offene Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich mich bei den Kollegen der Abteilung Tribologie für den fachlichen Austausch sowie die wertvollen Anregungen bedanken.

Mein besonderer Dank seitens der Opel Automobile GmbH gebührt Theo Stauder sowie Lutz Renger, Mustafa Celik, Martin Hörstge und Matthias Kraft für ihre stetige Unterstützung und hilfreichen Ratschläge. Ein außergewöhnlicher Dank gilt Dr.-Ing. Albert Emrich für seine kritischen Anregungen und die entgegengebrachten Freiheiten im Rahmen meiner Arbeiten. Ebenfalls danke ich den von mir betreuten Studenten. Besonders seien hier Christian Erz und Daniel Echler genannt. Letztgenanntem danke ich insbesondere für die vielen Jahre der vertrauensvollen Zusammenarbeit und für seine herausragenden wissenschaftlichen Leistungen, die wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Weiterer Dank gilt Dr.-Ing. Matthias Moneke sowie Dr. rer. nat. Mathis Fricke für die finale Korrektur meiner Dissertation.

Zu guter Letzt gebührt großer Dank meiner Familie und insbesondere meinen Eltern Regina und Heinrich für die Ermöglichung meiner Ausbildung sowie stetige Bestärkung meiner Entscheidungen. Von ganzem Herzen möchte ich meiner Frau Nadine und meinem Sohn Theo für ihre uneingeschränkte Unterstützung, ihren geduldigen Verzicht und fortwährende Motivation danken, mit der sie mich auf meinem Weg begleitet haben.

Darmstadt, im Juni 2022

Matthäus Kott

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Umformtechnik	4
2.1 Der Umformprozess von Karosserieblechteilen	4
2.2 Tribologie beim Tiefziehen	6
2.3 Ansätze zur Modellierung von Reibung.....	8
2.4 Einflussgrößen des Serienumformprozesses.....	11
2.5 Versagensarten und Qualitätsmängel von Karosserieblechteilen.....	13
2.5.1 Virtuelle Beurteilung von Reißern	17
2.5.2 Virtuelle Beurteilung von Falten	18
2.5.3 Virtuelle Beurteilung sonstiger Fehler	19
2.6 Ansätze zur Erhöhung der Prozessrobustheit.....	20
2.6.1 Einsatz von Simulationen zur Robustheitsoptimierung.....	21
2.6.2 Halbzeugsensoren	24
2.6.3 Werkstücksensoren.....	25
2.6.4 Produktsensoren	27
2.6.5 Einsatz von Aktoren während des Ziehprozesses	28
2.6.6 Einsatz von Aktoren im Serienumformprozess	29
2.6.7 Steuerungs- und Regelungsstrategien	31
2.7 Assistenzsysteme in der Produktionstechnik	35
2.7.1 Einordnung im Rahmen von Industrie 4.0.....	35
2.7.2 Assistenzsysteme in der Fertigung	36

3	Grundlagen der Stochastik und des maschinellen Lernens	40
3.1	Grundlagen der Regressionsanalyse	40
3.2	Maschinelles Lernen	41
3.2.1	Grundlagen künstlicher neuronaler Netze	43
3.2.2	Training künstlicher neuronaler Netze	45
3.3	Methoden der Sensitivitätsanalyse	45
3.3.1	Varianzbasierte globale Sensitivitätsanalyse nach Sobol	47
4	Motivation und Zielsetzung	49
4.1	Motivation	49
4.2	Zielsetzung	51
5	Vorgehensweise	53
5.1	Prozessanalyse	53
5.2	Implementierung des Bedienerassistenzsystems	60
6	Anwendungsbeispiel und Fertigungsprozess	63
6.1	Untersuchtes Bauteil	63
6.2	Blechwerkstoff	63
6.3	Ziehwerkzeug und Fertigungsprozess	65
7	Analyse stochastisch schwankender Prozessparameter	68
7.1	Werkstoffkennwerte von CR180B2	69
7.2	Dicke der Blechplatine	74
7.3	Tribologisches System	76
7.3.1	Schmiermittelaufgabe und -verteilung	77
7.3.2	Oberflächenfeingestalt der Blechplatine und des Werkzeugs	79
7.3.3	Reibungskoeffizient	82
7.4	Platinenposition und Platinenmaße	85
7.5	Fazit	86

8	Variantensimulationen und Metamodellierung	87
8.1	Numerische Abbildung des Umformprozesses	87
8.1.1	Validierung der Basissimulation	92
8.1.2	Auswahl der Qualitätsmerkmale	94
8.1.3	Generierung und Auswahl fähiger Metamodelle.....	98
9	Opportunität eines Assistenzsystems	104
9.1	Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse nach Sobol.....	104
9.2	Robustheit	108
9.3	Steuerbarkeit und Kompensation	112
9.3.1	Experimentelle Analyse der Steuerbarkeit.....	112
9.3.2	Virtuelle Analyse der Steuerbarkeit.....	115
9.4	Beobachtbarkeit.....	120
9.5	Fazit.....	125
10	Umsetzung eines Bedienerassistenzsystems	126
10.1	Bewertung und Auswahl relevanter Sensorsysteme.....	126
10.2	Prozessüberwachung durch Identifikation des Bauteilzustandes	130
10.2.1	Einfluss der Temperatur auf den Blechkanteneinzug	131
10.2.2	Warn- und Eingriffsgrenzen des Ziehprozesses	136
10.3	Modell zur Entscheidungsunterstützung	138
10.4	Erprobung des Bedienerassistenzsystems	141
10.5	Fazit.....	145
11	Zusammenfassung	147
12	Literaturverzeichnis	151
13	Anhang	175
13.1	Berücksichtigung von Reibmodellen in FEM.....	175
13.2	Ergänzungen zu Kapitel 2.6	177
13.3	Prozessfähigkeit und Fehlerquote.....	178

13.3.1	Prozesspotential	178
13.3.2	Kritische Prozessfähigkeit	178
13.3.3	Fehlerquote	178
13.4	Ergänzungen zu Kapitel 3.2	179
13.5	Ergänzungen zu Kapitel 3.3	179
13.6	Ergänzungen zu Kapitel 7.1	181
13.7	Ergänzungen zu Kapitel 9.3	182
13.8	Ergänzungen zu Kapitel 10.1	184
13.9	Ergänzungen zu Kapitel 10.2	184
13.10	Ergänzungen zu Kapitel 10.3	185
13.11	Ergänzungen zu Kapitel 10.4	186