

**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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Umformtechnik</b> .....	<b>4</b>
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 Serenumformprozesses.....	11
2.5 Versagensarten und Qualitätsmängel von Karosserieblechteilen.....	13
2.5.1 Virtuelle Beurteilung von Reißen .....	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 Serenumformprozess .....	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



<b>3</b>	<b>Grundlagen der Stochastik und des maschinellen Lernens</b> .....	<b>40</b>
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
<b>4</b>	<b>Motivation und Zielsetzung</b> .....	<b>49</b>
4.1	Motivation .....	49
4.2	Zielsetzung .....	51
<b>5</b>	<b>Vorgehensweise</b> .....	<b>53</b>
5.1	Prozessanalyse .....	53
5.2	Implementierung des Bedienerassistenzsystems .....	60
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel und Fertigungsprozess</b> .....	<b>63</b>
6.1	Untersuchtes Bauteil .....	63
6.2	Blechwerkstoff .....	63
6.3	Ziehwerkzeug und Fertigungsprozess .....	65
<b>7</b>	<b>Analyse stochastisch schwankender Prozessparameter</b> .....	<b>68</b>
7.1	Werkstoffkennwerte von CR180B2 .....	69
7.2	Dicke der Blechplatte.....	74
7.3	Tribologisches System .....	76
7.3.1	Schmiermittelaufgabe und -verteilung .....	77
7.3.2	Oberflächenfeingestalt der Blechplatte und des Werkzeugs ...	79
7.3.3	Reibungskoeffizient.....	82
7.4	Platinenposition und Platinenmaße .....	85
7.5	Fazit .....	86

---

<b>8</b>	<b>Variantensimulationen und Metamodellierung</b>	<b>87</b>
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
<b>9</b>	<b>Opportunität eines Assistenzsystems</b>	<b>104</b>
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
<b>10</b>	<b>Umsetzung eines Bedienerassistenzsystems</b>	<b>126</b>
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
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>147</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b>	<b>175</b>
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