



**Dennis Otten**

**Abschätzung des  
Simulationsfehlers  
bei Statik- und Prozess-  
simulationen mittels  
semi-empirischer Ansätze**

**Abschätzung des Simulationsfehlers bei Statik- und  
Prozesssimulationen mittels semi-empirischer Ansätze**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dennis Otten M.Sc.  
aus  
Aachen

Erstgutachter: Prof. Dr. - Ing. F. Rieg

Zweitgutachter: Prof. Dr. - Ing. G. Fischerauer

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2020

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD  
Universität Bayreuth  
2020



# **Fortschritte in Konstruktion und Produktion**

herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg und  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Band 55

**Dennis Otten**

**Abschätzung des Simulationsfehlers bei Statik- und  
Prozesssimulationen mittels semi-empirischer Ansätze**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7317-1

ISSN 1612-2364

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)

## **Geleitwort der Herausgeber**

Das erfolgreiche Industrieunternehmen von heute ist ein aktives Element der global zunehmend vernetzten Welt.

Mit hohem Innovationstempo steigern neue Märkte und Technologien die Arbeitsanforderungen, vergrößern neue Werkstoffe und Verfahren, die Informationstechnik und ein Wertewandel der Kundenwünsche aber auch die Gestaltungs- und Entfaltungsmöglichkeiten des Ingenieurs.

Die Konstruktion ist die Königsdisziplin des Ingenieurs. Die Produktion ist die technische Dienstleistung am König Kunde. Beide Aufgabenfelder zusammengekommen bilden den Kern des industriellen Wertschöpfungsprozesses.

Mit der hier vorgelegten Reihe "Fortschritte in Konstruktion und Produktion" ist es den Herausgebern ein Anliegen, Beiträge von wissenschaftlicher Seite zu fördern, die durch Entwicklung neuer Denkansätze, methodischer Vorgehensweisen und zugehöriger Instrumente die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung verbessern und erweitern. Nicht nur technische Lösungen, sondern auch ökonomische, ökologische und soziale Fortschritte stehen hierbei im Blickpunkt oder zumindest am Horizont.

Hierfür bietet die Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften mit ihrer interdisziplinären Ausrichtung und Einbindung in die Universität Bayreuth ein glückliches Umfeld.

Das Engagement der beiden Herausgeber ist dort vertreten als

- Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
- Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik.

Mögen also die von uns betreuten Dissertationen, die in dieser Buchreihe erscheinen, zu den wünschenswerten Fortschritten in Konstruktion und Produktion beitragen.

Den Autoren der einzelnen Bände dieser Reihe sei für Ihre wissenschaftliche und redaktionelle Arbeit gedankt, den Lesern wünschen wir eine interessante Lektüre und hoffentlich manch wertvolle Anregung für eine erfolgreiche Anwendung der Forschungsergebnisse in ihrer beruflichen Praxis.

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

# Inhaltsverzeichnis

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>	<b><u>VII</u></b>
<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b><u>X</u></b>
<b><u>TABELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b><u>XIII</u></b>
<b><u>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b><u>XIV</u></b>
<b><u>1 KURZZUSAMMENFASSUNG</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>2 MOTIVATION</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>3 STAND DER TECHNIK</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b>3.1 FEHLERQUELLEN IN DER FINITE ELEMENTE ANALYSE</b>	<b>2</b>
3.1.1 NUMERISCHE STEUERPARAMETER	3
3.1.2 MATERIALBESCHREIBUNG	4
3.1.3 RANDBEDINGUNGEN	5
<b>3.2 FEHLERBESTIMMUNG IN DER FINITEN ELEMENTE ANALYSE</b>	<b>6</b>
3.2.1 FEHLERABSCHÄTZUNG IN DER FINITEN ELEMENTE ANALYSE	7
<b>3.3 ALLGEMEINE QUALITÄTSKRITERIEN IN DER FINITE ELEMENTE ANALYSE</b>	<b>7</b>
3.3.1 QUALITÄTSKRITERIEN IN DER STATISCHEN FINITE ELEMENTE ANALYSE	9
3.3.2 QUALITÄTSKRITERIEN IN DER PROZESSSIMULATION AM BEISPIEL DES TIEFZIEHPROZESSES	11
<b>3.4 FEHLENDE KRITERIEN UND METHODEN ZUR FEHLERABSCHÄTZUNG</b>	<b>16</b>
<b><u>4 VORGEHEN ZUR BESTIMMUNG DER SIMULATIONSQUALITÄT</u></b>	<b><u>17</u></b>
<b>4.1 PRIORISIERUNG VON PARAMETERN</b>	<b>17</b>
<b>4.2 PROZESSSIMULATION AM BEISPIEL DES MEHRSTUFIGEN TIEFZIEHPROZESSES</b>	<b>23</b>
4.2.1 PROGRAMM ZUM LAUFLÄNGENBASIERTE VERGLEICH VON SIMULATIONS- UND MESSDATEN	30
4.2.2 EINFLUSS DER MATERIALMODELLIERUNG AUF DAS RÜCKSPRUNGVERHALTEN IM MEHRSTUFIGEN TIEFZIEHPROZESS	55
4.2.3 EINFLUSS DER WERKZEUGEOMETRIE AUF DAS RÜCKSPRUNGVERHALTEN IM MEHRSTUFIGEN TIEFZIEHPROZESS	59
4.2.4 BESTIMMUNG VON VERFESTIGUNGSWERTEN IM TIEFZIEHPROZESS	61
<b>4.3 STATIKSIMULATION</b>	<b>68</b>

---

4.3.1	EINFLUSS DER DISKRETISIERUNG AUF DIE STATIKSIMULATION	68
4.3.1.1	EINFLUSS DER DISKRETISIERUNG AUF DIE KERBSpannung	68
4.3.1.2	EINFLUSS DER DISKRETISIERUNG AUF DIE Abbildung von Spannungsverläufen in Bögen	70
4.3.1.3	EINFLUSS DER DISKRETISIERUNG BEI DER Spannungsdarstellung bei Balkenprofilen	71
4.3.2	EINFLUSS DES ELEMENTQUALITÄTSPARAMETERS SEITENVERHÄLTNIS AUF DIE STATIKSIMULATION	75
<b>5.</b>	<b>ERGEBNISSE DER BESTIMMUNG DER SIMULATIONSQUALITÄT</b>	<b>79</b>
<b>5.1</b>	<b>PRIORISIERUNG VON PARAMETERN (ERGEBNIS)</b>	<b>79</b>
<b>5.2</b>	<b>PROZESSSIMULATION AM BEISPIEL DES MEHRSTUFIGEN TIEFZIEHPROZESSES</b>	<b>82</b>
5.2.1	EINFLUSS DER MATERIALMODELLIERUNG (ERGEBNIS)	82
5.2.2	EINFLUSS DER WERKZEUGMODELLIERUNG (ERGEBNIS)	92
5.2.3	MESSEMPFEHLUNG ZUR BESTIMMUNG VON VERFESTIGUNGSWERTEN AN INHOMOGEN VERFORMTEN ZUGPROBEN (ERGEBNIS)	99
<b>5.3</b>	<b>STATIKSIMULATION</b>	<b>106</b>
5.3.1	ERGEBNISSE DES DISKRETISIERUNGSEINFLUSSES AUF DIE KERBSpannung	106
5.3.2	ERGEBNISSE DES DISKRETISIERUNGSEINFLUSSES AUF DIE Abbildung von Spannungsverläufen in Bögen	109
5.3.3	ERGEBNISSE DES DISKRETISIERUNGSEINFLUSSES AUF DIE Abbildung von Spannungsverläufen in Balkenprofilen	114
5.3.4	ERGEBNISSE DES SEITENVERHÄLTNISEINFLUSSES IN DER STATIKSIMULATION	121
<b>6.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>128</b>
<b>7.</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>129</b>
<b>ABSTRACT</b>		<b>130</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>		<b>132</b>
<b>VERÖFFENTLICHUNGEN</b>		<b>139</b>
<b>BETREUTE ABSCHLUSSARBEITEN</b>		<b>140</b>
<b>LEBENS LAUF</b>		<b>141</b>
<b>DANKSAGUNG</b>		<b>143</b>

---