



Institut für
Maschinelle Anlagentechnik
und Betriebsfestigkeit

Innovationen der
Fabrikplanung und -organisation
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Band 39

Verena Ritz

**Entwicklung einer numerischen
Simulationsmethode zur digitalen
Abbildung des automobilen
Decklackierprozesses**



**SHAKER
VERLAG**

Entwicklung einer numerischen Simulationsmethode zur
digitalen Abbildung des automobilen Decklackierprozesses

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
DIPL.-ING. VERENA RITZ
aus Bocholt

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:
13. März 2018

DEKAN

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

VORSITZENDER DER PROMOTIONSKOMMISSION

Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller

BETREUER

Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Karl Roll

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 39

Verena Ritz

**Entwicklung einer numerischen
Simulationsmethode zur digitalen Abbildung
des automobilen Decklackierprozesses**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6067-6

ISSN 1615-5211

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muss jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teillebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muss bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Mit dem inzwischen zur Realität gewordenen ganzheitlichen Ansatz der Digitalen Fabrik kann jetzt – auf Basis eines umfassenden integrierten Datenmanagements durch rechnergestützte Einzelmethoden bis hin zur Virtuellen Realität – der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

VORWORT DER VERFASSERIN

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin im Team Prozess-Simulation der Daimler AG in Sindelfingen.

Ich danke Herrn Professor Uwe Bracht, Leiter des Instituts für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal, für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung meiner Arbeit. Für die Übernahme der Mitberichterstattung bedanke ich mich herzlich bei Herrn Professor Karl Roll und Herrn Professor Wolfram Volk.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Oliver Kurz, Leiter des Teams für Prozess-Simulation, für die Unterstützung meiner Arbeit auch über die Zeit meiner Beschäftigung als Doktorandin im Team hinaus. Ich freue mich, dass ich ein Teil eines besonderen Teams sein konnte, das sich vor allem durch Kollegialität und viel Humor auszeichnet. Vielen Dank an all die Kollegen, deren Verdienst es war, dass ich jeden Tag gern ins Büro gekommen bin – auch in den wohl für eine Doktorarbeit typischen schwierigeren Zeiten. Für die fachlichen (und außerfachlichen) Diskussionen danke ich insbesondere Herrn Jochen Rathfelder und Herrn Dr. Sebastian Roller.

Meinen Freunden danke ich für das Mit-Freuen, das Mit-Leiden und das ständige Ermutigen. Besonderer Dank gebührt dabei Dr. Antje Muntzinger auch für die schnellen und messerscharfen Korrekturen meiner Arbeit, Anke Beckmann, Dr. Johannes Eckstein, Stefan Hartweg, Melanie Quéré, Dr. Christian Kästle, Christoph Kaiser, Florian Fink, Dr. Margaret Spies, Dr. Bernhard Spies, Nora zur Nieden, meinem Bruder Simon und natürlich meinem Freund Julius Klinger.

Der größte Dank gilt meinen Eltern. Mit ihrer uneingeschränkten Unterstützung haben sie Bildung auf höchstem Niveau stets wie eine Selbstverständlichkeit für mich erscheinen lassen. Sie tragen den größten Verdienst an dieser Arbeit und sie sei ihnen gewidmet.

... τὸ εὐδαίμον τὸ ἐλεύθερον, τὸ δ' ἐλεύθερον τὸ εὐψυχον ...
das Geheimnis des Glücks liegt in der Freiheit, das der Freiheit aber im Mut
(frei übersetzt)

Perikles (494 - 429 v. Chr.)

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird eine numerische Simulationsmethode entwickelt, um einen automobilen Decklackierprozess digital abzubilden und zu optimieren. Dabei wird nicht nur die Beschichtung einfacher Geometrien oder einzelner Bauteile untersucht. Die simulative Betrachtung erstreckt sich erstmalig auf eine komplette Fahrzeugkarosserie im Umfeld der Decklackierkabine und umfasst reale Prozesseinstellungen und Roboterbewegungspfade.

Das System wird über einen Euler-Lagrange Ansatz für Mehrphasenströmungen abgebildet und mit Hilfe eines kommerziellen CFD (Computational Fluid Dynamics) Software-Pakets gelöst. Die entwickelte Methode gliedert sich in einzelne Teilschritte, deren Komplexität sukzessive zunimmt. Die Idee dieser Vorgehensweise ist es, in Vorabsimulationen Eingangsdaten für den letzten Teilschritt zu generieren, welcher die Simulation der gesamten Decklackierkabine darstellt. Dadurch erst kann der hochkomplexe Decklackiervorgang unter sinnvollem Rechenaufwand abgebildet werden.

Bei der Modellierung wird auch der elektrostatisch unterstützte Lackiervorgang berücksichtigt. Auf Basis geeigneter Gleichungen aus der Literatur wird ein Modell gebildet, das die zeitabhängige Aufladung der Lackpartikel in der Umgebung einer Koronaentladung wiedergibt. Über einen Abgleich mit Technikumsversuchen werden die entwickelten Ansätze validiert. Die Bewertung erfolgt anhand der berechneten und gemessenen Schichtdickenverteilungen des Lacks an der Oberfläche.

Ziel der Arbeit ist es einerseits, zum generellen Verständnis des Decklackierprozesses beizutragen, das auf Grund der zahlreichen parallel ablaufenden Teilprozesse erschwert ist. In der Simulation können die Teilprozesse detailliert betrachtet und ihre Auswirkungen auf das integrale Prozessgeschehen untersucht werden.

Andererseits wird in der Arbeit ein digitales Analysewerkzeug entwickelt, durch dessen Anwendung Entwicklungs- und Produktionsprozesse unterstützt werden können. Da für das Aufsetzen der Simulation lediglich ein digitales Datenmodell des Fahrzeugs sowie die Bewegungsbahnen der Roboter benötigt werden, kann dies in einer sehr frühen Phase geschehen. Mit Hilfe der Berechnungsergebnisse werden Defizite in Bezug auf Prozessabläufe oder Prozesseinstellungen identifiziert. Optimierungspotentiale können generiert und digital bewertet werden, bevor sie in den realen Prozess einfließen. Auf Basis der Simulationsergebnisse werden für den Prozessschritt der Außenlackierung eine digitale Prozessanalyse durchgeführt und darin die Potentiale der Methode aufgezeigt.

INHALT

KURZFASSUNG	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIII
TABELLENVERZEICHNIS	XVII
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Aufbau der Arbeit	6
1.2 Eigene Vorgehensweise und Aufbau der Simulationsmethode	6
2 LACKIERPROZESSE IM FAHRZEUGBAU	9
2.1 Prozessschritte	9
2.2 Decklackierung	12
2.2.1 Funktionsprinzip der Hochrotationszerstäubung	15
2.2.2 ESTA	18
2.2.3 Auftragswirkungsgrad	20
2.2.4 Messverfahren	21
3 NUMERISCHE SIMULATION DER DECKLACKAPPLIKATION	25
3.1 Stand der Technik	25
3.2 Zielsetzung der Arbeit	29
3.3 Grundlagen der Strömungslehre	31
3.4 Modellierung der Partikelladung	37
3.5 Numerische Verfahren und eingesetzte Software	39

4	NUMERISCHE SIMULATION DES STRÖMUNGSFELDS	41
4.1	Segmentmodell	43
4.1.1	Vernetzung des Segmentmodells	44
4.2	Vollmodell	46
4.2.1	Vernetzung des Vollmodells	46
4.3	Simulationsergebnisse der Strömungsfeldberechnung	47
5	TECHNIKUMSVERSUCHE	55
5.1	Versuchsaufbau im Technikum	57
5.1.1	Schichtdickenmessungen	58
5.1.2	Tropfengrößenmessungen	58
5.1.3	Ermitteln des Festkörpergehalts	60
5.1.4	Bestimmung des Auftragswirkungsgrads über Wiegen	60
6	NUMERISCHE SIMULATION DES TECHNIKUMSVERSUCHS	63
6.1	Geometrisches Modell und Vernetzung	63
6.2	Physikalische Modellierung	66
6.3	Diskussion der Ergebnisse	69
6.3.1	Bewertung des Segment- und Vollmodells als Basis für die Ebene-Blech-Berechnung	70
6.3.2	Auswertung Ergebnisse Brush B1 - ohne Hochspannung	71
6.3.3	Auswertung Ergebnisse Brush B2 - ohne Hochspannung	74
6.3.4	Auswertung Ergebnisse Brush B3 - ohne Hochspannung	75
6.3.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse am ebe- nen Blech ohne Hochspannung	77
6.3.6	Auswertung Ergebnisse Brush B1 - mit Hochspannung	78
6.3.7	Auswertung Ergebnisse Brush B2 - mit Hochspannung	81
6.3.8	Auswertung Ergebnisse Brush B3 - mit Hochspannung	83
6.3.9	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse am ebe- nen Blech mit Hochspannung	85
7	NUMERISCHE SIMULATION DER DECKLACKIERKABINE	87
7.1	Geometrisches Modell, Vernetzung und Simulationsablauf	89
7.2	Diskussion der Ergebnisse	93
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	101

8	KRITISCHE REFLEXION	103
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	107
9.1	Zusammenfassung	107
9.2	Ausblick	109
	LITERATURVERZEICHNIS	113