

# Lacktrocknungssimulation mit Kalibrationsmethoden

**-Modifikation von Düsensichtfaktoren mittels SPH-Methode-**

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

von  
Dipl.-Ing. Daniel Grobotek  
aus  
Vilshofen

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann  
Tag der mündlichen Prüfung: 21.01.2015

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD  
Universität Bayreuth  
2015



# **Fortschritte in Konstruktion und Produktion**

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

Band 30

**Daniel Grobotek**

## **Lacktrocknungssimulation mit Kalibrationsmethoden**

Modifikation von Düsensichtfaktoren mittels SPH-Methode

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3498-1

ISSN 1612-2364

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

Hiermit versichere ich, dass ich diese Dissertation selbständig verfasst und keine anderen, als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.



## **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>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1 Aktuelle Situation . . . . .	9
1.2 Ziel und Inhalt dieser Arbeit . . . . .	10
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>13</b>
2.1 Fahrzeugbeschichtung . . . . .	13
2.1.1 Übersicht und Eigenschaften . . . . .	13
2.2 Simulation von Lacktrocknungsprozessen . . . . .	19
2.2.1 Kalibrationsfreie CFD-Simulation . . . . .	19
2.2.2 Empirische Kalibrationsmethoden . . . . .	23
<b>3 Beschreibung der Hybridmethode</b>	<b>29</b>
3.1 Wärmeeintrag bei der empirischen Kalibrationsmethode . . . . .	29
3.2 Modifikation und Erwartung . . . . .	32
3.3 Prozessablauf . . . . .	35
3.4 Randbedingungen . . . . .	37
3.5 Anforderungen an den Solver . . . . .	43
<b>4 Implementierung des Solvers</b>	<b>45</b>
4.1 Smoothed Particle Hydrodynamics Methode . . . . .	45
4.2 Programmaufbau . . . . .	48
4.3 Schnittstellen . . . . .	49
4.4 Physikalisch-Mathematische Modelle und Hilfsroutinen . . . . .	52
4.5 Anmerkungen . . . . .	58
<b>5 Test des Solvers</b>	<b>61</b>
5.1 Verifikation des Strömungssolvers . . . . .	61
5.1.1 Stationäre Schichtenströmung . . . . .	61
5.1.2 Scherströmung . . . . .	67
5.2 Modellierungsansätze . . . . .	70
5.2.1 Abbildungsmethoden für die Düsen . . . . .	70
5.2.2 Abbildungsmethoden für die Strahlwände . . . . .	80
5.2.3 Abbildung des Fluids . . . . .	81
5.2.4 Abbildung des Fahrzeuges . . . . .	83

---

5.3	Effizienz und Stabilität . . . . .	84
5.3.1	Effizienz . . . . .	84
5.3.2	Stabilität . . . . .	87
5.4	Fazit und kritische Beurteilung . . . . .	88
5.4.1	Fazit . . . . .	88
5.4.2	Weiteres Vorgehen . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>91</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	91
6.2	Conclusion . . . . .	95
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>99</b>
7.1	Strömungsmechanik . . . . .	99
7.1.1	Thermodynamische Grundbegriffe . . . . .	99
7.1.2	Kinematische Grundbegriffe . . . . .	100
7.1.3	Erhaltungsgleichungen . . . . .	103
7.2	Numerische Strömungssimulation . . . . .	108
7.2.1	Diskretisierung . . . . .	109
7.2.2	Fehler und Genauigkeit . . . . .	112
7.2.3	Ähnlichkeitsgesetze . . . . .	115
7.3	Freistrahlen . . . . .	116
7.4	Netzfremde Partikelmethode . . . . .	119
7.4.1	Smoothed Particle Hydrodynamics . . . . .	120
7.5	Quellentexte . . . . .	129
7.5.1	Subroutine zur Berechnung der Glättungsfunktion . . . . .	129
7.5.2	Subroutine zur Berechnung der Erhaltungsgleichungen . . . . .	131
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Ablauf der Fahrzeugbeschichtung . . . . .	14
2.2	Schichtaufbau einer typischen Fahrzeuglackierung . . . . .	15
2.3	Schnitt durch einen TrocknungsOfen . . . . .	20
2.4	Fahrstuhlprinzip zur Verringerung des Modellierungsaufwandes . . . . .	21
2.5	Applikation von Temperatursensoren im Fahrzeug . . . . .	24
2.6	Messstellenlage während einer Kalibrationsmessung . . . . .	26
2.7	THESEUS-FE Ofenmodell . . . . .	27
2.8	Vergleich der Temperaturverläufe . . . . .	28
3.1	Berechnung der Düsenabstands- und Düsenwinkelfaktoren . . . . .	31
3.2	Bestimmung der Düsensichtfaktoren . . . . .	33
3.3	Erwartete Verwirbelung im Fahrzeug . . . . .	34
3.4	Kombination von Düsen . . . . .	34
3.5	Prozessablauf einer thermischen Simulation mit THESEUS-FE . . . . .	35
4.1	Programmablauf des SPH Strömungslösers . . . . .	48
4.2	Prozessablauf der Zeitintegration . . . . .	50
4.3	Algorithmen zur Nachbarsuche . . . . .	57
5.1	Versuchsaufbau für stationäre Schichtenströmungen . . . . .	65
5.2	Schichtenströmungen für $U=0$ und $K=1$ . . . . .	66
5.3	Schichtenströmungen für $U=1$ und $K=1$ . . . . .	66
5.4	Versuchsaufbau des Scherströmungsversuches . . . . .	67
5.5	Ergebnis Scherströmungsversuch . . . . .	69
5.6	Fahrzeugschnitt mit Masseneinlass und Druckauslass . . . . .	72
5.7	Vergleich der kegelförmigen Impulsquelle . . . . .	73
5.8	Verwirbelungen am Fahrzeugschnitt . . . . .	74
5.9	Modellierung einer Düse mit zylindrischem Impulsquellenprofil . . . . .	76
5.10	Ergebnisse für verschiedene Einströmgeschwindigkeiten . . . . .	77
5.11	Ergebnisse für verschiedene Strahlkernlängen . . . . .	78
5.12	Ergebnisse für verschiedene Düsendurchmesser . . . . .	78
5.13	Rückströmung an der Fahrertür . . . . .	79
5.14	Symmetrische Düsenkonfiguration . . . . .	80
5.15	Ergebnisse für verschiedene Fluidtemperaturen . . . . .	82
5.16	Nicht-physikalische Dichtelöcher durch niedriges Druckniveau . . . . .	83
5.17	Virtuelle Wandpartikel zur Verbesserung der Wandhaftbedingung . . . . .	84
5.18	Ergebnisse für verschiedene Fluidauflösungen . . . . .	85

---

5.19	Einfluss der adaptiven Glättungslänge auf die Partikelverteilung . . . .	86
5.20	Zuginstabilität beim Quintic-Spline-Kernel . . . . .	87
7.1	Kármánsche Wirbelstraße . . . . .	102
7.2	Massenbilanz an einem Fluidteilchen . . . . .	104
7.3	Impulsbilanz an einem Fluidteilchen . . . . .	105
7.4	Normal- und Schubspannungen an einem Fluidteilchen . . . . .	106
7.5	Durchführung einer numerischen Strömungssimulation . . . . .	109
7.6	Beispiele für Elementtypen im Nastranformat . . . . .	110
7.7	Zeitdiskretisierung . . . . .	111
7.8	Trajektorienfeld . . . . .	111
7.9	Grafische Darstellung der Euler-Verfahren . . . . .	112
7.10	Kummulierte Rundungsfehler . . . . .	114
7.11	Freistrah . . . . .	117
7.12	Turbulenter, ebener Freistrah . . . . .	119
7.13	Normierte Kernelfunktion von Lucy . . . . .	125
7.14	Normierter Gaußscher Kernel . . . . .	126
7.15	Normierter Cubic-Spline Kernel . . . . .	127
7.17	Normierter Quintic-Spline Kernel . . . . .	127
7.16	Normierter Quadratic Kernel . . . . .	128
7.18	Unvollständige SPH Summation . . . . .	128
7.19	Zug- und Druckinstabilität . . . . .	129

# Tabellenverzeichnis

2.1	Wand- und Düsentemperaturen per Sektor nach der Kalibration . . . . .	27
3.1	Positionen und Abmessungen von Fahrzeug und Trockner . . . . .	39
3.2	Elementstatistik des thermischen Fahrzeugmodells . . . . .	40
3.3	Aggregatzustände im Trockner . . . . .	40
3.4	Materialeigenschaften von Stahl und Aluminium . . . . .	41
3.5	Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften von Luft . . . . .	42
5.1	DüsenEinstellungen für zylindrisches Impulsquellenprofil . . . . .	75
5.2	Luft im Trockner . . . . .	82
5.3	Rechendauer eines 2D Beispiels bei verschiedenen Auflösungen . . . . .	85
7.1	Darstellbare Zahlenbereiche . . . . .	113
7.2	Historische Entwicklung von Partikelmethode n . . . . .	120



# Algorithmenverzeichnis

3.1	Düsensumptionsalgorithmus in THESEUS-FE . . . . .	32
3.2	Modifizierter Düsensumptionsalgorithmus in THESEUS-FE . . . . .	36
5.1	Subroutine zur Simulation von Strahlwänden . . . . .	81



# Abkürzungsverzeichnis

ASCII American Standard Code for Information Interchange

CFL Courant-Friedrichs-Lewy

FDM Finite Differenzen Methode

FEM Finite Elemente Methode

FVM Finite Volumen Methode

HPC High Performance Computing

KTL Kathodische Tauchlackierung

MPI Message Passing Interface

OpenMP Open Multi-Processing

SPH Smoothed Particle Hydrodynamics

UDF User-Defined Function