

Dirk Schnabel

**Transient Simulation of Cutting-Fluid  
Flow and Chip Evacuation in Micro  
Deep-Hole Drilling with Coupled  
Lagrangian Methods**

**SHAKER**  
**VERLAG**



**Band 63 (2021)**

# Transient Simulation of Cutting-Fluid Flow and Chip Evacuation in Micro Deep-Hole Drilling with Coupled Lagrangian Methods

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
**Dirk Schnabel**  
aus Berlin (Tempelhof)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Februar 2021

Institut für Technische und Numerische Mechanik  
Universität Stuttgart

Erscheinungsjahr 2021



Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische  
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 63/2021

**Dirk Schnabel**

**Transient Simulation of Cutting-Fluid Flow and Chip  
Evacuation in Micro Deep-Hole Drilling with Coupled  
Lagrangian Methods**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7913-5

ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

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

*To whom it may concern,  
... and to my mother.*



## Vorwort

Joah, ... nun sitz' ich hier, knapp zwei Wochen nach der erfolgreichen Verteidigung, eigentlich nur noch einen winzigen Schritt von meiner Doktorurkunde entfernt und bin endlich mal wieder Nullinger angespannt, ... hab' aber leider keinen Plan was ich in dieses Vorwort schreiben soll ...

Die Arbeit entstand während meiner Zeit am Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart und ist dementsprechend eng mit dieser Zeit und dem Institut verknüpft. Deshalb wird mir das Institut unter anderem immer als wichtiger Teil dieser Arbeit in Erinnerung bleiben ebenso wie ich mit dieser Arbeit immer meine Zeit am Institut assoziieren werde. Ich könnte jetzt natürlich über die Arbeit schreiben, ... aber sei mer mal ehrlich, wer weder diese Arbeit noch den Abstract lesen will, der wird hier ja wohl auch keine Kurzzusammenfassung erwarten. Deshalb schreibe ich einfach über meine Zeit am Institut, da dies den äußeren Rahmen der Arbeit und das Umfeld in welchem die Arbeit entstand am besten beschreibt. Ist jetzt nur die Frage was ich über die Zeit am Institut schreiben soll.

Klar, es war eine unglaubliche geile Zeit am Institut, mit vielen echt super Freunden und Kollegen. Und klar, es war natürlich auch eine tolle Zeit vom wissenschaftlichen und akademischen Standpunkt aus gesehen, aber diese Zeit jetzt einfach als tolle menschliche und akademische Erfahrung, abzustempeln würde ihr nicht gerecht werden.

Klar, wir haben wie wild herum gebrösel, jeden neuen Ansatz ausprobiert und dabei regelmäßig die Partikel fliegen lassen. Wir waren wahrscheinlich die dreckigsten Simulanten von allen am Institut, ... so eine Brösel Simulation brauch' halt ihre Ressourcen. Aber hat es uns gestört, dass die Studenten PCs 80 % ihrer Kapa für meine Simulationen reserviert hatten? Nein, natürlich nicht. Ebenso wenig die Studenten, zumindest diejenigen nicht, die an einem weniger ausgelasteten PCs saßen. Es war also auch eine Zeit jugendlicher Unbeschwertheit, in welcher man seinem Forschungsdrang freien Lauf lassen konnte, um wie ein junges Forschungsfohlen auf all die saftig grünen Forschungswiesen zuzurennen. Klar, diese waren natürlich größten Teils bereits abgegrast. Aber hat uns das gestört? Nein, natürlich nicht, ... es gab ja stets unzählige weitere aus der Ferne noch saftiger wirkende Forschungswiesen, welche man noch nicht erforscht hatte. Aber auch diese Unbeschwertheit beschreibt meine Zeit am Institut nur unzureichend.

Vielleicht nicht ganz so klar, aber auf keinen Fall zu vergessen, die ersten Schritte als wissenschaftlicher Mitarbeiter in einer der echten Arbeitswelt recht ähnlichen Anstellung, jedoch noch im schützenden Kreis der Universität. Also war es auch eine Zeit des Reifens und des Wachsens. Reifen, natürlich nicht im Sinne der Fahrzeugdynamik, sondern im Sinne einer Reifeprüfung, und Wachsen nicht im Kerzen Sinne, auch wenn mir hier und da ein Lichtlein aufging, sondern im Sinne menschlichen Heranwachsens. Also war es auch eine wichtige Zeit für meine persönliche Entwicklung in der ich nicht nur als Forscher und Arbeitnehmer gereift bin, sondern auch menschlich als Kollege gewachsen.

Zusammenfassend war es einfach ein mega geiler und lehrreicher Lebensabschnitt, der zwar phasenweise sehr anstrengend aber auch höchst befriedigenden war. Deshalb bin ich ebenso stolz wie dankbar dafür, dass mir das Privileg zuteil wurde, mit solch tollen und vortrefflichen Menschen an einem solch tollen Institut arbeiten zu dürfen.

All diese Erfahrungen wären so mit Sicherheit nicht möglich gewesen, wenn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard damals, als ich mich bei ihm auf eine Halbtagsstelle beworben habe, um mein Mathematik-Diplom noch mit einem Abschluss in Physik zu veredeln, der Verwirklichung dieses Traums nicht im Wege gestanden hätte. Denn er bot mir die Möglichkeit, einen noch sehr viel cooleren Traum zu träumen, den Traum das Mathematik-Diplom mit einem Dr.-Ing. zu verwedeln! Dafür natürlich ein ganz herzliches Dankeschön, Peter. Aber nicht nur dafür. Mindestens genauso wichtig, wenn nicht sogar noch viel wichtiger, waren die menschliche Atmosphäre am Institut, die unzähligen fachlichen Diskussionen, die Ressourcen und dein Vertrauen, das war prima!

Natürlich waren auch all die Institutskollegen eine besondere Hilfe. Speziell die Brösel Dr.-Ing. Alexandra Müller, Dr.-Ing. Florian Beck und Dr.-Ing. Florian Fleissner sollen an dieser Stelle explizit erwähnt werden. Erstere, die Alex, da ein Großteil ihrer Implementierungen die Basis bilden für diese und eigentlich alle SPH basierten Arbeiten am Institut. Zweiterer, der Becky, da ich als sein kleiner Padawan nicht nur sehr vieles von ihm lernen durfte und seine Arbeiten die Grundlage für diese Arbeit bildeten, sondern auch weil ich gerne und viel mit ihm Lachen durfte, während der Arbeitszeiten und auch danach beim gemütlichen Feierabendbier. Der letzte der drei Brösel, also der Flo (bei dem wenigstens der Artikel zum Genus des Namens passt), weil er als Papa-Brösel mit Pasimodo nicht nur die Software Grundlage für meine Arbeit schuf, sondern auch, weil er mir stets mit seiner Erfahrung und tollen Ratschlägen zur Seite stand. Wobei der letzte Punkt eigentlich für alle drei Legacy-Brösel, die Alex, den Becky und den Flo, gilt.

Da der Umfang dieses Vorworts den der Arbeit nicht übertreffen soll, nur kurz ein paar Worte des Dankes an Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann und Dr.-Ing. Ekrem Oezkaya vom Institut für Spanende Fertigung (ISF), TU Dortmund, für die tolle Kooperation, welche fundamental wichtig war für diese Arbeit ebenso wie die Übernahme des Mitberichts.

Besonderer Dank gilt auch meinen zwei Edelhiwis Amelie Zeller und Veit Woerner die speziell beim Pre- und Postprocessing eine Riesenhilfe waren und mir aufgrund ihrer tollen Art nicht nur fachlich, sondern auch menschlich stets in schöner Erinnerung bleiben werden.

Der Vollständigkeit halber auch noch ein fettes Dankeschön an M.J., den Bauer und den Schuh!

Am meisten zu verdanken hab' ich aber meiner Familie. Besonders hervorheben möchte ich dabei meine Mutter. Die Frau, welche mich länger ertragen musste und durfte als sonst irgendjemand. Trotz aller Widrigkeiten war sie als alleinerziehende Mutter stets ein unverwüstlicher Fels in der Brandung. Speziell die Lehren, welche ich aus ihren Erziehungsversuchen mitnehmen konnte, waren und werden mir stets ein verlässlicher und verständlicher Kompass sein. Am besten lassen sich diese Lehren mit den Worten des Polonius aus Shakespears Hamlet zusammenfassen:

”This above all: To thine own self be true.  
... Thou canst not then be false to any man.”

Natürlich darf an dieser Stelle mein kleines Schwesterlein Vera mit ihrer Familie, Manu, Mats und Milan nicht unerwähnt bleiben, da ich mich stets auf ihre Unterstützung verlassen konnte.

Gezwungenermaßen allein zu Hause in Ehningen bei Böblingen,  
während des Corona Lockdowns im Februar 2021,  
Dirk Schnabel

# Contents

Zusammenfassung . . . . .	XI
Abstract . . . . .	XIII
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 CFD, SPH and its Grand Challenges . . . . .	3
1.2.1 CFD in the Context of Machining . . . . .	3
1.2.2 SPH and coupled SPH-DEM approaches . . . . .	5
1.2.3 The Grand Challenges of SPH . . . . .	6
1.3 Choice of Methods . . . . .	7
1.4 Scope of Thesis . . . . .	8
1.5 Layout of Thesis . . . . .	10
<b>2 Numerical Fundamentals</b>	<b>13</b>
2.1 Smoothed Particle Hydrodynamics . . . . .	14
2.1.1 Fundamentals of Smoothed Particle Hydrodynamics . . . . .	15
2.1.2 Boundary Conditions . . . . .	25
2.1.3 Correction Methods . . . . .	30
2.1.4 Turbulence Models . . . . .	34
2.2 Discrete Element Method . . . . .	38
2.2.1 Fundamentals of the Discrete Element Methods . . . . .	38
2.2.2 Contact . . . . .	39
2.2.3 Friction . . . . .	39
2.2.4 Multispheres . . . . .	40
2.3 Methodical Comparisons . . . . .	41

<b>3</b>	<b>Software and Implementation Details</b>	<b>45</b>
3.1	Software Specifications . . . . .	46
3.1.1	Pasimodo . . . . .	46
3.1.2	Simulation Components . . . . .	48
3.1.3	SPH Plugin . . . . .	53
3.1.4	Simulation Workflow . . . . .	55
3.2	Dam Break Application . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Description of Fluid-Solid Systems</b>	<b>61</b>
4.1	Different Approaches for the Coupling of SPH and DEM . . . . .	64
4.1.1	Coupling for Large Scale Applications . . . . .	66
4.1.2	Coupling for Small Scale Applications . . . . .	68
4.2	Applications . . . . .	70
4.2.1	Dam Break with Dynamic Obstacles 3D . . . . .	70
4.2.2	Sinking Cylinder in a High Viscosity Medium 2D . . . . .	73
4.2.3	Unstable Equilibrium of Rectangular Cylinder 2D . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Modelling and Simulation of Cutting Fluid</b>	<b>83</b>
5.1	Model Specifications . . . . .	84
5.1.1	Technological Model . . . . .	85
5.1.2	Numerical Model . . . . .	86
5.1.3	Creation of Chips . . . . .	87
5.2	Simulation of Cutting-Fluid Flow . . . . .	89
5.2.1	Single-Lip Drill with Kidney Shaped Channel . . . . .	89
5.2.2	Single-Lip Drill with Two Cooling Channels . . . . .	92
5.2.3	Single-Lip Drill with Tracer Particles . . . . .	100
5.2.4	Twist Drill . . . . .	103
5.2.5	Possible Modifications for Single-Lip Drill . . . . .	109
5.3	Simulation of Cutting Fluid and Chip Transport . . . . .	114
5.3.1	Single-Lip Drill with Randomly Placed Multisphere Chips . . . . .	114
5.3.2	Twist Drill with Chips Smoothly Moving into the Borehole . . . . .	118
5.3.3	Twist Drill with Chips Smoothly Moving into the Borehole II . . . . .	125

<b>6 Conclusions</b>	<b>131</b>
6.1 Summary . . . . .	131
6.2 Future Work . . . . .	133
<b>Appendix</b>	<b>137</b>
A.1 Adaptive Particle Splitting and Merging for SPH . . . . .	137
A.1.1 Adaptive Workflow . . . . .	140
A.1.2 Application . . . . .	149
<b>Symbols</b>	<b>153</b>
<b>Literature</b>	<b>155</b>