

Christian Pfister

**Anwendung von elastischen  
Mehrkörpersystemen  
für effiziente Dynamiksimulationen  
in KFZ-Lenksystemen**

**SHAKER  
VERLAG**



**Band 66 (2021)**

# Anwendung von elastischen Mehrkörper- systemen für effiziente Dynamik- simulationen in KFZ-Lenksystemen

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

Vorgelegt von  
**Christian Pfister**  
aus Albstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Tag der mündlichen Prüfung: 19. November 2020

Institut für Technische und Numerische Mechanik  
der 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 66/2021

**Christian Pfister**

**Anwendung von elastischen Mehrkörpersystemen für  
effiziente Dynamiksimulationen in KFZ-Lenksystemen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Düren 2021

**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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8063-6

ISSN 1861-1651

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

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Zeit als Doktorand bei der Robert Bosch Automotive Steering GmbH (Bosch AS) und dem Institut für Technische und Numerische Mechanik (ITM) der Universität Stuttgart. Ich blicke auf eine sehr spannende Zeit zurück, in der ich unglaublich viel lernen durfte und die in vielerlei Hinsicht prägend für mich war. Mein besonderer Dank gilt daher zunächst den beiden Initiatoren des Projekts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard und Herrn Dipl.-Math. Markus Schuster, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und auch für den stets gegebenen Rückhalt in allen Phasen des Projekts. Ihnen ist auch die konstruktive Atmosphäre zwischen Bosch AS und ITM zu verdanken, die mir sehr viele Freiheiten bei der Gestaltung meiner Arbeit ermöglichte – ein Umstand, der nicht selbstverständlich ist und den ich sehr zu schätzen weiß.

Ein weiterer besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Jens Pfister für seine fachliche Begleitung der Arbeit bei Bosch AS. In unseren zahlreichen, oft stundenlangen Diskussionen, hatte er mit seinen wertvollen Kritiken und Ratschlägen zu den Themen Kontaktmechanik und numerischen Simulationen einen sehr wichtigen Anteil am Gelingen der Arbeit. Umso mehr freue ich mich, dass ich aktuell auch weiterhin mit ihm als Kollegen arbeiten kann. Ebenfalls ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei M.Sc. Lorin Kazaz, mit dem ich den Großteil meiner Zeit gemeinsam am GTM-Projekt arbeitete, und Dr.-Ing. Pascal Ziegler, der als Erstbearbeiter des GTM-Projekts die Basis für die in meiner Arbeit gemachten Entwicklungen bereitstellte. Schließlich danke ich auch meinem ehemaligen Betreuer zu Studentenzeiten und späteren Institutskollegen, Dr.-Ing. Igor Iroz, der mich als Erster für das Thema Kontaktmechanik begeistern konnte und somit den Startpunkt für meinen weiteren Weg legte.

Zuletzt möchte ich nicht unerwähnt lassen, dass ich besonders auch die sehr familiäre Atmosphäre am ITM immer sehr genossen habe. Die zahlreichen fachlichen und nicht-fachlichen Gespräche – nicht sehr selten auch in gemütlicher Runde nach Feierabend – haben die Zeit zusätzlich bereichert. Dies ist nur möglich aufgrund der zahlreichen „gleichgesinnten“ Kolleginnen und Kollegen, die diese schöne Stimmung aktiv vorleben. In dieser Hinsicht möchte ich mich vor allem bedanken bei Dr.-Ing. Dirk Schnabel, Prof. Dr.-Ing. Michael Hanss, Prof. Dr.-Ing. Jörg Fehr, Dr.-Ing. Benjamin Fröhlich, M.Sc. Fabian Matter, M.Sc. Alexander Brauchler, M.Sc. Henrik Ebel und B.Sc. Andreas Schöngle, um nur einige zu nennen.



*Für meine lieben Eltern*





# Inhalt

Formelzeichen und Notation . . . . .	XI
Kurzfassung . . . . .	XVII
Abstract . . . . .	XIX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Stand der Technik . . . . .	2
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Einige Grundlagen zu elastischen Mehrkörpersystemen</b>	<b>7</b>
2.1 FE-Beschreibung elastischer Körper . . . . .	8
2.1.1 Modellierung . . . . .	8
2.1.2 Spannungsberechnung im Element . . . . .	11
2.1.3 Bewegungsgleichung eines FE-Körpers . . . . .	11
2.2 Modellreduktion . . . . .	12
2.2.1 Modale Reduktion . . . . .	13
2.2.2 Spannungen in reduzierten elastischen Körpern . . . . .	13
2.3 Ansatz des mitbewegten Referenzsystems . . . . .	14
2.3.1 Kinematik . . . . .	14
2.3.2 Kinetik . . . . .	17
<b>3 Kontaktinteraktionen mittels Bounding Volume Hierarchien und nodaler Kontaktsuche</b>	<b>19</b>
3.1 Grobe Kontaktsuche . . . . .	21
3.1.1 Discrete Oriented Polytopes . . . . .	21
3.1.2 Bounding Volume Hierarchien . . . . .	24

3.2	Feine Kontaktsuche und Berechnung der Kontaktkräfte . . . . .	28
3.2.1	Kontaktkinematik . . . . .	29
3.2.2	Penalty-Kontaktkraftmodelle . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Modulares Softwarekonzept zur Simulation von EMKS mit Reibkontak-</b>	<b>35</b>
	<b>ten</b>	
4.1	Umsetzung des Softwarekonzepts . . . . .	36
4.1.1	Das Gear Train Module . . . . .	36
4.1.2	Gear Train Module in der Bosch AS Simulationsumgebung . . . . .	38
4.1.3	Erweiterung des Gear Train Modules . . . . .	41
4.1.4	Entwicklung der allgemeinen Kontakttroutine . . . . .	44
4.2	Parameterwahl für Bounding Volume Hierarchien bei Verzahnungen . . . . .	47
4.2.1	Art des $k$ -DOPs . . . . .	48
4.2.2	Einfluss der Parallelisierung . . . . .	50
4.2.3	Einfluss der Aktualisierungsstrategien . . . . .	50
4.2.4	Einfluss der absteigenden Tiefe in der Hierarchie . . . . .	51
4.2.5	Zwischenfazit . . . . .	52
<b>5</b>	<b>EMKS-Kontakte mit EPS-Verzahnungen</b>	<b>53</b>
5.1	Zahnstangenverzahnungen . . . . .	54
5.1.1	Vorabuntersuchung an einem Stoßlastfall . . . . .	55
5.1.2	Durchlenkvorgang . . . . .	57
5.1.3	Klemmlastsituation . . . . .	61
5.1.4	Miteinbeziehung des Druckstücks . . . . .	64
5.2	Schneckenverzahnungen . . . . .	66
5.2.1	Vorabuntersuchung an einem Stoßlastfall . . . . .	67
5.2.2	Dynamische Spannungsuntersuchungen . . . . .	69
5.2.3	Durchlenkvorgang . . . . .	73
5.2.4	Selbsthemmung . . . . .	76
5.3	Zwischenfazit . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Anwendung des modularen Softwarekonzepts</b>	<b>81</b>

6.1	Erstellung und Auswertung eines Modells . . . . .	82
6.2	Validierung des modularen Softwarekonzepts . . . . .	85
6.3	Modellierung eines umgebenden MKS . . . . .	87
6.3.1	Kopplung des EMKS an umgebende Komponenten . . . . .	87
6.3.2	Modellierung der Schneckenlagerung in Amesim . . . . .	89
6.3.3	Anwendung im Bosch AS eigenen MKS/Simulationsprogramm SimPro	90
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>93</b>
<b>Anhang</b>		<b>97</b>
A.1	Wahl des Integrationskonzepts für die Zustände der elastischen Körper . .	97
<b>Literatur</b>		<b>105</b>