

Steffen Maier

Simulation of a Novel Restraint Safety Concept for Motorcycles



SHAKER
VERLAG

Band 79 (2023)

Simulation of a Novel Restraint Safety Concept for Motorcycles

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

von
Steffen Georg Maier
aus Bad Friedrichshall

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. Jörg Fehr
Mitberichter: Prof. Alessandro Scattina, PhD

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Juli 2023

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2023

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

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

Band 79/2023

Steffen Maier

**Simulation of a Novel Restraint
Safety Concept for Motorcycles**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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 978-3-8440-9219-6

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 • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Das Thema dieser Arbeit entstand aus einer Idee des Erfinders Laurent Doléac, der sich das große Ziel gesetzt hat, die passive Sicherheit von Motorradaufsassen zu revolutionieren. Durch seine Initiative fand sich ein Konsortium aus industriellen und akademischen Partnern unter Förderung des Wirtschaftsministeriums Baden-Württembergs. Gemeinsam mit den Unternehmen Doléac Models, SAS-TEC GmbH, DYNAmore GmbH und ZF Friedrichshafen AG hat das Institut für Technische und Numerische Mechanik (ITM) an dieser neuen Sicherheitsidee geforscht. Ich danke allen am Projekt Beteiligten für die fruchtbaren Diskussionen und die Zusammenarbeit. Ganz besonders wünsche ich Laurent Doléac weiterhin den Pioniergeist, das Durchsetzungsvermögen und die Leidenschaft sein Vorhaben zu verfolgen. Ich hatte großes Glück, dass seine Idee und die daraus entstandene ingenieurwissenschaftliche Aufgabe, das Sicherheitskonzept zu entwerfen und zu untersuchen, mich gefunden hat.

Die Möglichkeit am ITM und mit diesem Thema zu promovieren zu können verdanke ich maßgeblich der Teilnahme an einem Auslandsstudienprogramm am Georgia Institute of Technology in Atlanta in den USA. Das Stipendium, das vom ITM organisiert wurde, hat meinen Forschungsdrang geweckt und mir letztendlich die Möglichkeit eröffnet, diesen anschließend als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand in Stuttgart weiter auszuleben.

Die letzten fünf Jahre waren für mich sehr prägend und bereichernd, nicht nur wegen des fachlichen Diskurses mit meinen tollen Kollegen und anderen Forschern, sondern auch besonders wegen der engen Betreuung durch Prof. Jörg Fehr. Ich möchte mich bei ihm bedanken, dass er mich stets motiviert und fokussiert hat, für unsere unzähligen aufschlussreichen Diskussionen über viele Themen und für die vielen Gelegenheiten, meine Arbeit zu präsentieren. Seine ansteckende Energie und Motivation, Dinge anzupacken, und immer positiv an Herausforderungen heranzugehen werden mich noch lange prägen. Des Weiteren danke ich auch Prof. Peter Eberhard, Prof. Michael Hanss und Dr. Pascal Ziegler für die von Vertrauen und gegenseitigem Respekt geprägte Arbeitsatmosphäre am Institut, bei der auch der Spaß nicht zu kurz kam. Ich habe die Freiheit, die ich bei meiner Forschung hatte, stets genossen und ich werde nicht nur die humorvollen Kaffeepausen sehr vermissen. Ich durfte während meiner Zeit am ITM viele studentische Arbeiten betreuen, die zu meiner Forschung viel beigetragen haben. Außerdem möchte ich meinem Mitberichter Prof. Alessandro Scattina dafür danken, dass er sich bereit erklärt hat, diese Arbeit zu lesen und zu begutachten.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und all den Menschen, die meinen Lebensweg positiv beeinflusst haben, für ihre beständige Unterstützung danken. Insbesondere gilt der Dank meinen Eltern, die mich mein ganzes Leben lang bestmöglich und bedingungslos unterstützen und meiner Frau Franziska, die jederzeit hinter mir steht.

Stuttgart, im August 2023

Steffen Maier

Contents

Zusammenfassung	IX
Abstract	XI
1 Introduction	1
1.1 The Excessive Risk of Motorcycling	3
1.2 Restraint Safety Concept of the <i>Safe Motorcycle</i>	6
1.3 Virtual Methods in Crashworthiness Design	8
1.4 Objectives and Outline of the Thesis	9
2 Accident Behavior of Motorcycles and Motorcyclists	13
2.1 Types of Powered Two-Wheelers	13
2.2 Traffic Accident Scenarios of Powered Two-Wheelers	16
2.2.1 Accident Scenario Statistics	16
2.2.2 Representative Accident Configurations	19
2.3 Passive Safety Equipment for Motorcyclists	21
2.3.1 Motorcycle Accident Behavior	22
2.3.2 Motorcycle Safety Design	24
2.3.3 Personal Protective Equipment	31
2.3.4 Current Usage of Passive Safety Equipment	33
2.4 Traffic Accident Consequences for Motorcyclists	35
2.4.1 Injury Statistics	35
2.4.2 Correlation with Injury Criteria	37
3 Computational Models for Crashworthiness	43
3.1 Models for Vehicle Crashworthiness	43

3.1.1	General Model Classification	43
3.1.2	Model Categories for Investigating Crashworthiness	44
3.1.3	Methods and Models in This Work	47
3.2	Multibody Systems	48
3.2.1	Fundamentals	48
3.2.2	Procedure for Computational Multibody Systems	49
3.3	Finite Element Method	51
3.3.1	Fundamentals	51
3.3.2	Procedure for Computational Finite Element Models	51
4	Modeling	55
4.1	Modeling and Simulation Strategy	56
4.2	Motorcycle and Opposing Vehicles	58
4.2.1	Multibody Model	58
4.2.2	Coupled Finite Element Rider Interaction Model	65
4.2.3	Full Finite Element Model	66
4.3	Passive Safety Systems	68
4.3.1	Collision Detection	68
4.3.2	Thigh Belts	69
4.3.3	Airbags	71
4.3.4	Leg Impact Protectors	76
4.4	Rider Surrogates	84
4.4.1	Riding Posture	85
4.4.2	Standardized Anthropometric Test Devices	86
4.4.3	Human Body Models	88
4.5	Simulation Workflow and Model Overview	91
5	Simulation Results	95
5.1	Stage I – Combined Multibody and Finite Element Simulations	95
5.1.1	Impact Behavior in Representative Accident Scenarios	96
5.1.2	Biomechanical Impact Loading	100

5.1.3	Frontal Impact Kinematics and Chronology	103
5.2	Stage II – Coupled Finite Element and Multibody Simulations	106
5.2.1	Rider Energy Balance	108
5.2.2	Anthropometric Test Devices vs. Human Body Models	110
5.2.3	Accident Response of Human Body Model Variants	115
5.3	Stage III – Full Finite Element Simulations	117
5.3.1	Motorcycle Frontal Deformation	118
5.3.2	Structural Interaction and Vehicle Intrusion	119
5.3.3	Impact Behavior and Biomechanical Loading in Representative Accident Scenarios	120
6	Discussion	127
7	Conclusions and Outlook	135
	Appendix	139
A.1	Exemplary Determination of Injury Criteria	139
A.2	Causes of Deaths	141
A.3	Human Body Model Accident Response	144
A.4	Full FE Response of a Small Female ATD	145
	Bibliography	149

Zusammenfassung

Unfälle mit motorisierten Zweirädern sind komplexe Ereignisse, deren Ausgang von vielen Faktoren abhängt. Ein gewaltsamer Abwurf der Fahrerin oder des Fahrers vom Motorrad ist ein sehr wahrscheinlicher Unfallhergang. Durch einen Aufprall gegen einen anderen Verkehrsteilnehmer, die Straße oder Straßenbegrenzungsobjekte erleidet der Aufsasse dabei oft mehrere schwere Verletzungen an allen Körperregionen, die zu bleibenden Schäden oder sogar zum Tod führen können. Ein neuartiges Rückhaltekonzept will dieses Problem der unzureichenden passiven Sicherheit von Motorradfahrern und -fahrerinnen lösen, ohne dabei die Vorteile eines motorisierten Zweirads als kompaktes Verkehrsmittel, wie z.B. die gute Rundumsicht und Wendigkeit, zu beeinträchtigen und ohne das einzigartige Fahrverhalten zu verlieren. Die innovative Idee sieht vor, dass der Aufsasse im Falle eines Unfallaufpralls durch Oberschenkelgurte, mehrere Airbags und Beinanprallprotektoren am Motorrad zurückgehalten wird.

Das Ziel dieser Arbeit ist, das vorgeschlagene Sicherheitskonzept rechnerisch zu modellieren, zu simulieren und zu untersuchen. Die wichtigsten Forschungsfragen sind: *Ist es sicherer, auf einem Motorrad zurückgehalten zu werden, als der intrinsischen Unvorhersehbarkeit eines konventionellen Motorradunfalls ausgesetzt zu sein? Welche virtuellen Modelle und numerischen Methoden erlauben es uns, dies zu beantworten?*

Zur Beantwortung dieser Fragen fasst die Arbeit die wichtigsten Aspekte des Unfallverhaltens von Motorrädern und ihren Aufsassen zusammen und analysiert den Stand der Technik der passiven Sicherheit von Motorrädern. Die Arbeit skizziert Modelle und Simulationen einer rechnergestützten Strategie für eine zeit- und kosteneffiziente Auslegung und Untersuchung des Rückhaltekonzepts für Motorräder. Die Modellierungs- und Simulationsstrategie kombiniert mehrere einzelne Entwicklungsaufgaben in einer Methodik, die aus drei aufeinanderfolgenden virtuellen Entwicklungsstufen mit kontinuierlich steigendem Detaillierungsgrad und erwarteter Wiedergabetreue in Mehrkörper- und Finite-Elemente-Simulationsumgebungen besteht. Für ein robustes Design werden verfügbare numerische Modelle von Crashtest-Dummies und moderne Menschmodelle verwendet, die den Bewegungsapparat, das Nervensystem und die inneren Organe eines Menschen detailliert abbilden. Die Fahrzeug- und Aufsassensersatzmodelle werden in empfohlenen repräsentativen Unfallszenarien simuliert und in kinematischen, kinetischen und energiebasierten Analysen sowie hinsichtlich einer breiten Auswahl biomechanischer Verletzungskriterien für den gesamten Körper bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, was mit einer vollständig virtuellen Konzeptstudie möglich ist. Es ist eine effiziente und effektive Simulationsstrategie, die die individuellen Vorteile der verschiedenen Simulationsmodelle ausnutzt um das Unfallverhalten des Motorrads, seiner passiven Sicherheitssysteme und verschiedener Aufsassen vorherzusagen. Die Simulationen zeigen eine geführte und kontrollierte Trajektorie und Verzögerung des Motorradaufsassen,

was zu weniger kritischen biomechanischen Belastungen im Vergleich zu einem Aufprall mit einem herkömmlichen Motorrad führt. Die Ergebnisse sind eine aussagekräftige Beschreibung der Funktionsprinzipien und der kausalen Zusammenhänge des Rückhaltesystems und eine quantifizierte Leistungsbewertung des Konzepts. Die Kombination mehrerer passiver Sicherheitssysteme zeigt sich sehr vielversprechend, um das Unfallverhalten positiv zu beeinflussen und die Unfallfolgen zu mindern. Eine Limitierung dieser Studie besteht darin, dass nur die primäre Unfallphase untersucht wurde – die unmittelbare Zeitspanne nach dem ersten Kontakt zwischen den gegnerischen Fahrzeugen, bei Kollisionskonfigurationen mit einem Pkw nach einer anerkannten Norm. Die Studie ist der erste Schritt zu einer ganzheitlichen Bewertung der innovativen Idee aber ihre Modellierung muss noch durch Laborexperimente verifiziert werden, und ihre Untersuchung muss letztendlich viel mehr mögliche Unfalltypen umfassen, um schädliche Auswirkungen in auslegungsüberschreitenden Szenarien auszuschließen.

Abstract

Accidents of powered two-wheelers are complex events whose outcome depends on many factors. Violent ejection of a rider from the motorcycle is a very likely accident pathway. The rider, striking objects in its path and the ground, often suffers multiple serious injuries at all body regions, resulting in permanent harm or even death. A novel restraint concept wants to solve this problem of insufficient passive safety of motorcycle riders without compromising a powered two-wheeler's advantages as a compact means of transport, such as great all-around visibility and maneuverability, and without losing its unique driving behavior. The innovative idea envisages that in case of an accident impact, the rider is restrained by thigh belts, multiple airbags, and leg impact protectors to the motorcycle.

This work aims to model, simulate, and investigate the proposed safety concept computationally. The main research questions are: *Is it safer to be restrained to a motorcycle than to be exposed to the intrinsic unpredictability of a conventional motorcycle accident? What virtual models and numerical methods allow us to answer this?*

To answer these questions, the work summarizes the most important aspects of the accident behavior of motorcycles and their riders and analyses the state-of-the-art in motorcycle passive safety. The work delineates models and simulations of a computational strategy for a time and cost-efficient design and investigation of the restraint concept for motorcycles. The modeling and simulation strategy combines multiple individual development tasks in a methodology that consists of three successive virtual development stages with a continuously increasing level of detail and expected fidelity in multibody and finite element simulation environments. Aiming for a robust design, it uses available numerical models of anthropomorphic test devices, better known as crash test dummies, and multiple state-of-the-art human body models that detail the musculoskeletal system, the nervous system, and the internal organs of a human. The vehicle and rider surrogate models are simulated in recommended representative accident scenarios and evaluated in kinematic, kinetic, and energy-based analyses as well as regarding a broad range of biomechanical injury criteria for the whole body.

The results show what is possible with an entirely virtual concept study. It is an efficient and effective simulation strategy that exploits individual advantages of the different simulation models to predict the accident behavior of the motorcycle, its passive safety systems, and diverse riders. The simulations show a guided and controlled trajectory and deceleration of the motorcycle rider, resulting in fewer critical biomechanical loads compared to an impact with a conventional motorcycle. The results are a meaningful description of the functional principles and causal relationships of the restraint and a quantified performance evaluation of the concept. The combination of several passive safety systems shows much promise in positively influencing accident behavior and mitigating consequences. A limitation of this study is that only the primary impact phase was investigated – the immediate period

XII

after the first contact between the opposing vehicles in collision configurations with a passenger car according to a recognized standard. The study is the first step towards a holistic assessment of the innovative idea, but its modeling still needs to be verified by laboratory experiments, and its investigation must ultimately include many more possible accident types to exclude detrimental effects in off-design scenarios.