



Volker Andreas Lange

Identification of Coupled Solution Spaces for Vehicle Crash Structure and Restraint System Design

Fachgebiet für Computational Mechanics
Prof. Dr.-Ing. Fabian Duddeck
Technische Universität München



Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Identification of Coupled Solution Spaces for Vehicle Crash Structure and
Restraint System Design

Volker Andreas Lange

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende/-r: Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger

Prüfende/-r der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck
2. Prof. Dr.-Ing. Matthias Kröger
3. Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias Gerdts

Die Dissertation wurde am 04.06.2020 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 11.11.2020 angenommen.

Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics

Band 13

Volker Andreas Lange

**Identification of Coupled Solution Spaces for
Vehicle Crash Structure and Restraint System Design**

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.: München, Techn. Univ., Diss., 2020

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 978-3-8440-7934-0

ISSN 2193-2700

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

Zusammenfassung

Am Beispiel des frontal Crashtests mit starrer Barriere wird in dieser Arbeit eine Methode vorgestellt, welche die Flexibilität von Fahrzeugkonzepten in der frühen Entwicklungsphase ermitteln kann. Die Berücksichtigung von Flexibilität ist Teil eines allgemeinen Paradigmenwechsels, der durch die Zunahme von Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit (VUCA) entlang aller Aspekte der Automobilindustrie verursacht wird. Beispiele hierfür sind wechselnde Kundenwünsche bzgl. der Antriebsform oder die wachsende Zahl unterschiedlicher Crashtest-Lastfälle. Anstatt an einem vermeintlich optimalem, aber veraltetem Musterdesign festhalten zu müssen, ermöglicht die Entwicklung mit Blick auf Flexibilität auch in späten Phasen noch die Berücksichtigung von Alternativen, die neue oder geänderte Anforderungen umsetzen.

Im untersuchten Crash-Lastfall sind die relevanten Fahrzeugsysteme die deformierende Fahrzeugstruktur (VS) und das Rückhaltesystem (RS). Zwischen ihnen wirkt der „Crashpuls“ der deformierenden Struktur als Schnittstelle, da er die Wirkung des RS behindern oder erleichtern kann. Dieser mechanische Zusammenhang wurde hier in die mathematische Form eines Bilevel-Optimierungsproblems übersetzt. Die Flexibilität des Gesamtkonzepts — ausgedrückt als Maß für die zulässige Variation des Crashpuls — wurde dabei unter der Bedingung maximiert, dass die Teilsysteme genügend Flexibilität vorhalten müssen, um ihre eigene Entwicklung zu ermöglichen.

Die ganzheitliche Formulierung dieses gekoppelten Crashworthiness-Problems erforderte zunächst die Auseinandersetzung mit den jeweiligen Teilproblemen. Zur Modellierung der VS wurde das Deformationsraum-Modell (DSM) ausgewählt und gezielt erweitert, um die Verbindung von Lastpfaden zu ermöglichen. Die Bewertung der Flexibilität jedes Teilsystems geschah durch Lösungsräume unter Verwendung des MWIW-Maß (Minimum der gewichteten Intervallbreiten). Ein hierfür neugeschaffener Ansatz zur adaptiven Lockerung der Umsetzbarkeitseigenschaft der Lösungsräume erlaubt es, die Flexibilität zu erhöhen, während gleichzeitig eine benutzerdefinierte Wahrscheinlichkeit der Umsetzbarkeit gewahrt bleibt. Die Kopplung der Lösungsraum-Identifikationsprobleme (SSIP) der Teilsysteme erforderte sodann eine Schnittstellengröße; bestehende Crashpuls-Kriterien wurden jedoch als ungeeignet bewertet. Daher folgte die datengetriebene Entwicklung eines neuen Kriteriums. Dieses Geschwindigkeits-Weg-Kriterium (VLC) wurde für das DSM im SSIP implementiert und ebenfalls zur Erstellung eines prototypischen RS-Modells verwendet. Schlussendlich konnten alle Komponenten zum gekoppelten Problem kombiniert werden.

Die erfolgreiche Lösung des Problems für eine beispielhafte Fahrzeugarchitektur zeigt, dass das VLC und die beiden Teilsystem-SSIPs die vorgesehenen Rollen im Bilevel-Problem übernehmen können. Durch die vorgeschlagenen Modelle, Methoden und Vorgehen sind Entwickler somit in der Lage, Fahrzeugkonzepte in der frühen Phase hinsichtlich ihrer Eignung für eine Weiterentwicklung unter VUCA-Bedingungen zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind somit für Entwicklungsstrategien im Automobilssektor geeignet, um die nötigen Anpassungen an das heutige, sich ständig ändernde Umfeld vorzunehmen und so den Vorteil des Kunden zu maximieren.

Abstract

This thesis proposes a method to identify the flexibility of vehicle concepts in the early development phase for the example of the full frontal rigid barrier crash test. The consideration of flexibility is part of an overall paradigm shift caused by the increase of volatility, uncertainty, complexity, and ambiguity (VUCA) along all aspects of the automotive industry. Examples include changing demand for different drivetrains or the growing number of varied crash test load cases. Rather than having to adhere to a supposedly optimal but out-of-date master plan, development with flexibility in mind allows to consider alternatives that implement new or adjusted requirements during later design phases.

In the investigated crash load case, the relevant vehicle subsystems are the deforming vehicle structure (VS) and restraint system (RS). Between them, the “crash pulse” of the deforming structure acts as an interface that impedes or facilitates the performance of the RS. This mechanical relation was translated here to the mathematical form of a bilevel optimization problem. The flexibility of the overall concept — expressed as a measure how much the crash pulse can vary — was maximized under the condition that the subsystems themselves are provided sufficient flexibility to allow for their development.

The task to formulate this coupled crashworthiness problem warrants the discussion of the following topics. First, the Deformation Space Model (DSM) was selected to represent the VS, but required the development of an extension to allow for the connection of load paths. To assess the flexibility of each subsystem, the concept of Solution Spaces was employed using the minimum weighted interval width (MWIW) measure. A specifically created adaptive approach for feasibility relaxation now allows to increase flexibility while asserting a user-defined probability of design feasibility. The coupling of the Solution Space identification problems (SSIP) for each subsystem then required an interface quantity; but existing crash pulse criteria were found to be lacking. Consequently, a novel criterion was purposefully developed following a data driven approach. This Velocity-Length-Criterion (VLC) was then implemented with the DSM for the SSIP and also used to create a prototypical RS model. Finally, these components were combined into the coupled problem.

The successful solution of this problem for an exemplary vehicle architecture shows that the VLC and the two subsystem SSIPs can fill the intended roles in the bilevel problem. Using the proposed models, methods, and processes, developers are capable of assessing early phase vehicle concepts with respect to their viability for further development under VUCA circumstances. This makes the results of this thesis suitable for development strategies in the automotive sector that embrace the necessary adjustment to today’s ever-changing environment for the advantage of the customer.

List of essential abbreviations

A list of the essential abbreviations used in this thesis, together with page references to their first occurrence and — where applicable — more extensive introduction.

- CFC** Channel Frequency Class, p. 102
- DSM** Deformation Space Model, p. 13 and p. 27
- FEM** Finite- Element-Method, p. 12
- FMVSS** Federal Motor Vehicle Safety Standard, p. 3 and p. 11
- FSM** Finite state machine, p. 71
- GSM** Geometry Space model, p. 13 and p. 27
- IPM** Interior Point Method, p. 10
- LMS** Lumped mass-spring, p. 13 and p. 23
- LP** Linear problem, p. 9 and 9
- MWIW** Minimum weighted interval width, p. 19 and 68
- NCAP** New Car Assessment Program, p. 3 and p. 11
- NHTSA** National Highway Traffic Safety Administration of the United States Department of Transportation, p. 11
- OLC** Occupant Load Criterion, p. 13 and p. 102
- OoD** Order of Deformation, p. 13 and p. 31
- PC** Principal Component, p. 112 and p. 113
- PCA** Principal Component Analysis, p. 112 and p. 113
- RS** Restraint system, p. 3
- SM25** Sliding Mean 25 Maximum criterion, p. 102 and p. 103
- SM36** Sliding Mean 36 Maximum criterion, p. 14 and p. 103
- SSIP** Solution Space Identification problem, p. 8 and p. 63
- TI** Tibia Index, p. 108 and p. 164
- VLC** Velocity-Length Criterion, p. 20 and p. 133
- VS** Vehicle structure, p. 3

Contents

1	Motivation	2
2	State of the art and Research Question	5
2.1	Development frameworks.....	5
2.2	Bilevel optimization.....	9
2.3	Full frontal vehicle crash with a rigid barrier	11
2.4	Solution Spaces and their identification.....	14
2.5	Gap of knowledge	18
2.6	Research question.....	19
2.7	Structure of this thesis.....	21
3	Low-fidelity model for the vehicle structure in front crash	22
3.1	Models for the vehicle structure — state of the art.....	22
3.2	The basic GSM/DSM	27
3.3	The advanced GSM/DSM	34
3.4	Generation of advanced Deformation Space Models.....	36
3.5	Creation of sections in the deformation space	47
3.6	Formulation of Order of Deformation constraints	51
4	Extending the direct method for the Solution Space Identification problem	60
4.1	The Solution Space concept.....	60
4.2	Related work	65
4.3	Constraints and corridors	72
4.4	Choosing a measure of Solution Space flexibility	75
4.5	Solving the bottleneck problem through Solution Space scouting	79
4.6	Advanced aspects of feasibility relaxation.....	85
4.7	Adaptive feasibility relaxation.....	89
5	Vehicle structure–restraint system interface	100
5.1	Desirable properties for a criterion from the structural design point of view	100
5.2	Existing crash pulse criteria.....	101
5.3	Data-driven approach to derive a new criterion.....	107
5.4	Reducing dimensionality of output data	110
5.5	Representing the crash pulse for structural design	120
5.6	Predicting the influence of the crash pulse.....	124
5.7	Proposal of the Velocity-Length Criterion (VLC)	131
5.8	The VLC as a pulse criterion	133
6	Assembly of the coupled crashworthiness problem and application	139
6.1	Implementing the VLC for a DSM in the VS SSIP	139
6.2	Adaptive feasibility relaxation for the vehicle structure SSIP	143
6.3	Solution Space scouting and adaptive feasibility relaxation.....	146
6.4	Solving the coupled crashworthiness problem.....	147
6.5	Problem setup for the application	148
6.6	Summary and result of the validation	154

7 Reflection and Outlook	155
7.1 Retrospective	155
7.2 Limitations and Outlook	156
8 Conclusion	159
A Supplemental material	162
A.1 Basic terminology, definitions and notations	162
A.2 NHTSA Database.....	168
A.3 Generic crash pulses	169
A.4 Correlations of VLC and occupant loads	172
A.5 Restraint system configurations.....	173
A.6 Additional data for the validation problem	173
Bibliography	177