

Solution Spaces for Vehicle Crash Design

Dipl.-Ing. Johannes H. W. Fender

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier
3. Prof. Dr. rer. nat. Thomas Bäck, Universität Leiden/Niederlande

Die Dissertation wurde am 08.08.2013 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 10.12.2013
angenommen.

Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics

Band 4

Johannes H. W. Fender

Solution Spaces for Vehicle Crash Design

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-2550-7

ISSN 2193-2700

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

First, I would like to express my special gratitude to Prof. Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck for supervision of my thesis at the TUM, for our thorough and critical discussions and for all the time he took in reviewing my theories and results.

I also would like to give thanks to the members of the committee, Prof. Dr. rer. nat. Thomas Bäck and Prof. Dr.-Ing. Horst Baier as well as the head of the committee, Professor Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger.

I would like to express my deep gratitude to Dr. Markus Zimmermann at BMW for giving me the opportunity to work under his guidance. He provided me with a great working environment, a very interesting problem statement, the opportunity to work as part of an outstanding team and the perspective that my work matters as part of something greater. His advice, criticism and our endless discussions were invaluable. With his prior work on solution spaces and his understanding of systems engineering in vehicle crash design, he lay the foundation for everything I was able to build.

I would like to thank all of my team at BMW, Johannes von Hasselbach, Lavinia Graff and Florian Wölfl. Special thanks to Dr. Martin Dörnfelder for our discussions and his input on mathematical problems as well as for reviewing parts of my thesis.

I would like to thank my parents and my parents in law for their support.

Lastly, I would like to thank my wife, Gesche, not only for her support and her patience but also for our technical discussions. And I would like to thank my children, Alicia and Vincent, who were always great, even when their father was stressed and had too little time for them.

Abstract

Modern vehicle crash design is confronted with ever increasing requirements, often applying to a large number of vehicles sharing many common components in varying permutations. Thus, every component of the vehicle structure must be designed, such that it works in combination with the other components to fulfill the respective vehicle's design goals.

In order to solve this problem, it is necessary to derive decoupled design goals for each component, such that fulfillment of these component goals guarantees fulfilling the design goals for the entire system. The breaking down of complex systems into subsystems, solving each subproblem and then recombining the subsystem solutions in order to obtain a solution for the entire system is a primary approach in systems engineering, e.g. illustrated in the V-model.

Also, vehicle development is usually spread out over several departments, which are responsible for separate but interacting parts of the structure. Each of these parts is not only subject to the requirements imposed by crashworthiness but also to requirements defined by acoustics, driving dynamics, NVH, cost and weight. In this context, vehicle crash design provides constraints, which have to be met in order to achieve a certain crash performance. Together with the constraints from the other disciplines, optimization with respect to cost and weight is performed under these constraints. The set of constraints for each parameter defines a feasible region, a hypercube, in the structure's parameter space, the *solution space*.

This work deals primarily with the identification of such solution spaces for vehicle crash design. After a discussion of the state of the art regarding simplified crash models and systems engineering approaches, an overview over the vehicle crash criteria for this work is provided. Then the general concept of solution spaces is illustrated and explained in detail. Also, suitable functional parameters are identified. For the particular problem of vehicle crashworthiness, two approaches are suggested.

The indirect approach is based on a stochastic algorithm for iterative identification of a solution space for a given function. A suitable substitute model which maps the functional parameters of the vehicle structure directly to the relevant target values is developed.

In the direct approach, the solution space is semi-analytically derived directly from the structure's topology and mass distribution. A mathematical framework is established in which finding the largest solution space becomes a linear, convex optimization problem.

The approaches are compared and discussed. Component optimization is performed, in order to attain the design goal defined by the solution space. The optimization is done iteratively on a submodel basis with driven nodes and regular boundary condition updates using state of the art automatic meshing, finite element solvers and evolutionary optimization strategies. The resulting design fulfills its component goal and consequently leads to fulfillment of the system goal, as stated by the underlying theory derived from systems engineering.

Finally a conclusion is drawn and an outlook on further refinement and application of the presented methods is provided.

Zusammenfassung

Die moderne Automobilentwicklung sieht sich immer schärferen Vorgaben bezüglich der passiven Sicherheit über diverse Crash-Lastfälle gegenüber. Gleichzeitig nimmt die Zahl der Fahrzeuge mit gemeinsamen Komponenten, im Sinne eines Baukastenansatzes, zu. Daher muss jede Komponente der Fahrzeugstruktur so ausgelegt werden, dass das Auslegungsziel für das Gesamtfahrzeug in jeder Kombination mit den anderen Komponenten erreicht wird.

Um dieses Problem zu lösen, ist es erforderlich, Methoden zu entwickeln, die es ermöglichen, unter Berücksichtigung vielfältiger Randbedingungen, entkoppelte Anforderungen an die einzelnen Strukturkomponenten abzuleiten, so dass die Erfüllung der Komponentenanforderungen in allen betrachteten Gesamtsystemen zur Zielerfüllung führen. Das Aufteilen von komplexen Systemen in Subsysteme, um jedes Subsystem separat lösen zu können und anschließend aus der Kombination der Subsystemlösungen die Gesamtsystemlösung zu generieren, ist ein zentrales Konzept im Systems-Engineering, wie beispielsweise im V-Modell dargestellt.

Des Weiteren ist die Fahrzeugentwicklung in der Regel auf mehrere Abteilungen aufgeteilt, die jeweils verschiedene, miteinander interagierende Teile der Struktur verantworten. An jeden dieser Teile werden nicht nur Anforderungen aus der Crash-Auslegung gestellt, sondern auch Anforderungen hinsichtlich Akustik, Fahrdynamik, NVH, Kosten und Gewicht. In diesem Zusammenhang werden in der Fahrzeugcrashauslegung Randbedingungen generiert, deren Einhaltung hinreichend ist, um ein gewünschtes Crash-Verhalten zu erreichen. Zusammen mit entsprechenden Anforderungen aus den anderen Disziplinen wird das Fahrzeugkonzept hinsichtlich Kosten und Gewicht optimiert. Dieser Satz an entkoppelten Randbedingungen spannt einen Unterraum im Parameterraum auf, einen Hyperwürfel. Dieser Hyperwürfel ist der *Lösungsraum*.

Dies Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Identifikation dieser Lösungsräume für die Fahrzeugcrashauslegung. Zunächst wird der Stand der Technik hinsichtlich vereinfachter Ersatzmodelle für die Crashberechnung und Systems Engineering diskutiert. Daraufhin wird eine Übersicht über die Kriterien für

die Bewertung der Fahrzeugcrasheigenschaften gegeben. Das Konzept von Lösungsräumen wird gesondert und detailliert ausgeführt. Für das spezielle Problem der Lösungsraumberechnung für die Fahrzeugcrashauslegung werden zwei unabhängige Verfahren vorgeschlagen.

Der indirekte Ansatz stützt sich auf einen stochastischen Algorithmus, der für eine gegebene Abbildung iterativ einen Lösungsraum bestimmt. In diesem Zusammenhang wird ein geeignetes Ersatzmodell entwickelt, dass die für den Algorithmus notwendige Abbildung der funktionalen Strukturparameter auf die relevanten Zielgrößen darstellt.

Im direkten Ansatz wird der Lösungsraum semi-analytisch hergeleitet, abhängig von Topologie und Massenverteilung der zugrundeliegenden Fahrzeugstruktur. Es wird ein mathematischer Rahmen geschaffen, innerhalb dessen das Finden des größten Lösungsraums ein lineares, konvexes Optimierungsproblem ist.

Die Ansätze werden verglichen und diskutiert. Im Anschluss wird auf der Grundlage eines Lösungsraums eine Komponentenoptimierung durchgeführt, um das durch den Lösungsraum definierte Designziel zu erreichen. Die Optimierung wird iterativ anhand eines Submodells durchgeführt. Die Knoten des Submodells werden geführt und die zugehörigen Randbedingungen regelmäßig aktualisiert. In der Implementierung werden, entsprechend dem Stand der Technik, automatisierte Vernetzung und evolutionäre Optimierungsstrategien eingesetzt. Das resultierende Design erfüllt das vorgegebene Komponentenziel und führt damit auch zu einer Erfüllung des Gesamtsystemziels, so wie die zugrundeliegende Theorie aus dem Systems-Engineering es fordert.

Nach der Zusammenfassung, werden im Ausblick mögliche Verbesserungen, Weiterentwicklungen und Anwendungen der vorgestellten Methoden dargestellt.

Contents

1	Introduction	1
2	State-of-the-Art	9
2.1	Simplified modeling for crash	10
2.1.1	Lumped mass models	10
2.1.2	Macro element methods	11
2.1.3	Submodeling	14
2.2	Systems engineering	15
3	Structural crash criteria	19
3.1	Regulations and additional requirements	19
3.1.1	Regulations	19
3.1.2	Consumer test ratings (NCAP)	20
3.2	The USNCAP front crash load case	20
3.3	Target values for crash structure design	22
3.3.1	Crash pulse	22
3.3.2	CFC60 and sliding mean 36 filtering	24
3.3.3	Intrusions	25
3.3.4	Order of deformation	25
3.3.5	Other structural constraints	26
4	Solution spaces	29
4.1	Why solution spaces?	30
4.1.1	Properties of solution spaces	31
4.1.2	Decoupling the system	32
4.1.3	Robustness of optimal designs	33
4.1.4	Derivation of component requirements	35

4.1.5	Consideration of multiple design disciplines	37
4.2	The choice of suitable functional properties	37
5	The indirect approach	39
5.1	The corridor method	39
5.1.1	Stochastic identification of solution spaces	39
5.2	The simplified model	42
5.2.1	Single element model	42
5.2.2	Generalization: The structural model	44
5.2.3	Influence of component mass	47
5.3	Model calibration	55
5.3.1	Example problem with two elements	57
5.3.2	The optimization problem	59
5.3.3	The objective function	60
5.3.4	Normalization	61
5.3.5	Weighting physics versus prediction	62
5.3.6	The optimization algorithm	64
5.3.7	Single model parameter identification	66
5.3.8	Multiple model parameter identification	67
5.3.9	Application to the load path concept model	69
5.3.10	Validation	69
6	The direct approach	73
6.1	Forces and deformations	73
6.1.1	Active mass and velocity in the spatial domain	73
6.2	Continuous definition of constraints	77
6.2.1	Pulse	77
6.2.2	Intrusions	77
6.2.3	Order of deformation	78
6.3	Discrete definition of constraints	78
6.3.1	Serial systems	79
6.3.2	Parallel systems	82
6.3.3	Mixed systems	84
6.3.4	Complex systems	85
6.4	Objective functions	87

6.4.1	Minimum interval width	89
6.4.2	Volume	90
6.5	Obtaining the global solution	91
6.6	Resulting linear systems of equations	94
6.7	Lagrange multipliers	94
6.7.1	Example with three sections	98
6.7.2	Handling soft constraints	105
6.8	Solutions	105
6.8.1	The global solution	106
6.8.2	Local solutions	107
6.8.3	Component solutions	108
6.8.4	Convex solution subspaces	109
6.9	Extensions	115
6.9.1	Sliding-mean filtering	115
6.9.2	Imperfect solutions	117
7	Comparison of approaches	121
7.1	Solution spaces of the direct and indirect method	122
7.2	Discussion	126
7.2.1	Characteristics and general shape	126
7.2.2	Similarities and differences	127
8	Component optimization	131
8.1	Solution spaces in component optimization	131
8.1.1	Solution spaces as a constraint	131
8.1.2	Solution spaces as part of an objective function	132
8.2	Example problem: front rail	133
8.2.1	The submodel	133
8.2.2	The objective function	134
8.2.3	Algorithms	135
8.2.4	The optimization	135
9	Critical reflection and discussion	139
9.1	Solution spaces	139
9.2	Simplified modeling	140

9.3	The direct approach	141
9.4	Restriction to pre-defined load path configurations	142
9.5	Restriction to the USNCAP crash load case	142
9.6	Component optimization	143
10	Conclusion	145
10.1	Solution spaces	145
10.2	Simplified modeling	146
10.3	Indirect and direct approaches	147
10.4	Component optimization	147
10.5	Outlook	148
A	Appendix	151
A.0.1	Derivation of active mass	151
A.0.2	Derivation of deformation-dependent velocity	151
A.0.3	Optimal solution space by volume in 2D	153
A.0.4	Derivation of the lower corner of the hypercube in case of inactive order of deformation constraints	154