

Multidisziplinäre numerische Parameter- und Shapeoptimierung von Karosseriebauteilen am Anwendungsbeispiel Fußgängerschutz

Dipl.-Ing. Harald Bachem (Geschäftsbereich Karosserie, ika Aachen)
Dr.-Ing. Dominik Schwarz (Leiter Geschäftsbereich Karosserie, fka Aachen)
Dipl.-Ing. Jan Bordasch (Geschäftsbereich Karosserie, fka Aachen)

Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, bachem@fka.de, Aachen, Deutschland

Abstract:

For the realisation of light weight design during the development of new constructions in the automotive industry an increasing usage of numerical optimisation tools that are based on Finite Element Methods (FEM) takes place. During the application of the programs static and dynamical loads are applied on the basic model and this is optimised with respect to different target functions (e.g. maximum stiffness and minimum weight). A special efficiency of the optimisation tools is reached if the system response is dependent on a multitude of parameters, which is mostly the case in the field of crash simulation. In this study a methodology for a purposeful optimisation of vehicle structures with respect to the impact of subsystems from the European directive for pedestrian safety is presented based on examples for different impact scenarios. Apart from a pure parametric optimisation the implemented morphing functionality allows complex geometric variations of the finite element mesh during the optimisation process. In the presented examples the objective refers directly to the Head Injury Criterion.

Keywords:

Pedestrian Safety, Multidisciplinary Numerical Optimisation, Finite Element Method, LS Dyna, Morphing, Head Injury Criterion

1 Einleitung

Zur Verringerung des Gefährdungspotenzials für den Fußgänger bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen sind bereits seit mehreren Jahrzehnten intensive Bemühungen des Gesetzgebers und der Automobilindustrie zu verzeichnen. In der Europäischen Union wurde eine Prüfroutine erarbeitet, die zum Ende des Jahres 2003 als Erweiterung der Richtlinie 70/156/EWG in das Typengenehmigungsverfahren von Kraftfahrzeugen aufgenommen wurde [1]. Die darin vorgesehene stufenweise Implementierung des Testverfahrens bis zum Jahre 2010 bedingt Fahrzeugfrontstrukturen, die hinsichtlich des Beinaufpralls gegen den Stoßfänger, des Oberschenkelanpralls an der vorderen Haubenkante und des Kopfaufpralls auf Motorhaube, Scheinwerfer, Kotflügel, Windschutzscheibe und A-Säule optimiert sind. Bei Kopfaufpralltests dient der HIC-Wert als Bewertungskriterium, dessen Berechnung durch die Auswertung der Verzögerungsverläufe erfolgt. Im Hüftanpralltest werden maximale Summenkraft und Biegemoment am Hüftimpactor, beim Beinaufprall Biegewinkel und Querverschiebung im Kniegelenk, sowie die maximale Beschleunigung am Schienbein beurteilt. Zusammenfassend sind die Anforderungen des Prüfverfahrens in Bild 1 dargestellt.

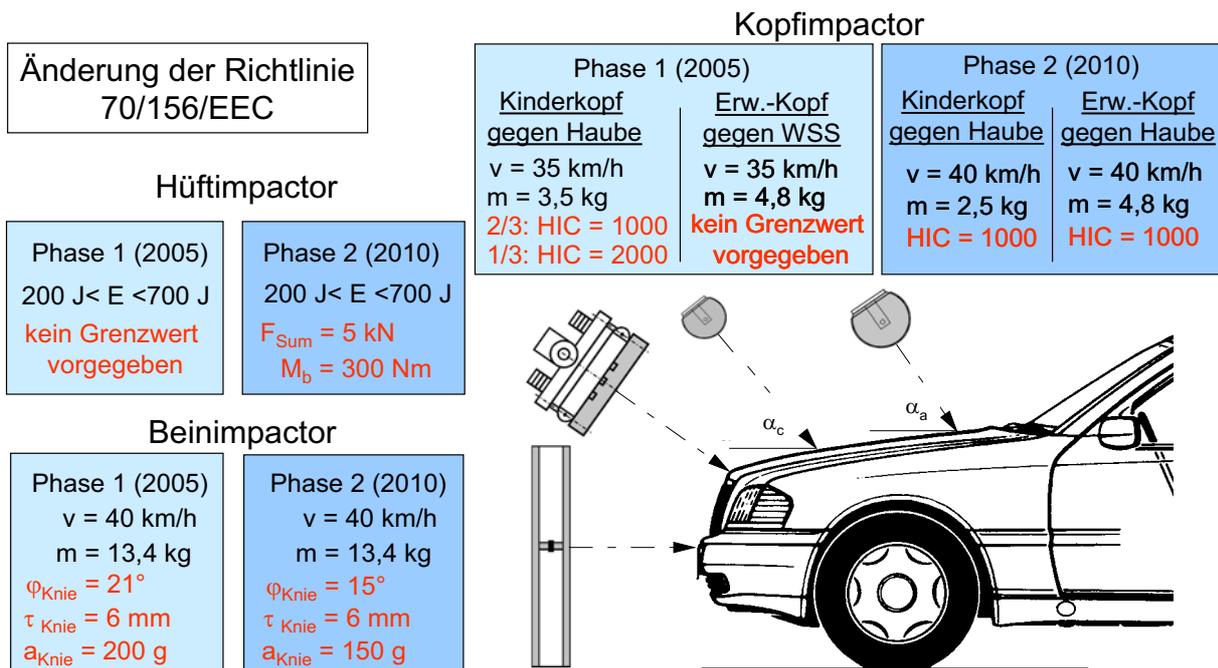


Bild 1: Richtlinie des Europäischen Parlaments [2]

Insbesondere im Hinblick auf die Umsetzung des Leichtbaupotentials bei der Entwicklung neuer Konstruktionen erfolgt in der Automobilentwicklung seit einigen Jahren der Einsatz von numerischen Optimierungstools. Die Programme basieren auf der Finiten-Elemente-Methode (FEM) und sind in der Lage, komplexe Strukturen hinsichtlich verschiedener Zielfunktionen (z.B. maximale Steifigkeit bei minimalem Gewicht) zu optimieren. Zur Auslegung bzw. Optimierung der vorhandenen Struktur können dabei auch mehrere, unterschiedlich gewichtete Lastfälle kombiniert werden (multidisziplinäre Optimierung).

Strukturoptimierungen im Bereich des Fußgängerschutzes erfolgen heute im Wesentlichen durch die zeitintensive Trial & Error Methode. In der vorliegenden Untersuchung wurde daher eine Methodik entwickelt, die durch den Einsatz von Algorithmen die Möglichkeit schafft, komplexe Strukturen zielgerichtet, kostengünstig und unmittelbar hinsichtlich der oben aufgeführten Kriterien (HIC,...) zu optimieren. Weitere im Lastenheft gestellte Restriktionen (Fertigungstechnik, Einbaumaße, Serientauglichkeit,...) werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Die entwickelte Methodik wird im Anschluss in Form eines Anwendungsbeispiels an einer Motorhaube dargestellt.

2 Multidisziplinäre Optimierung unter Berücksichtigung von Crasheszenarien

Das Design von Komponenten ist heute noch immer eine klassische Ingenieurleistung. Form und Funktion des Bauteils sind Ergebnis der Umsetzung von Anforderungen und Belastungen, die vorher ermittelt wurden. Nun sollen Bauteile aber nicht nur ihre Funktion erfüllen, sie sollen zudem noch möglichst klein, leicht und kostengünstig sein. Daraus ergibt sich, dass das resultierende Design hinsichtlich verschiedener Größen zu optimieren ist.

Beim klassischen Entwicklungsansatz liefert die Simulation komplexer Strukturen mittels der FE-Methode dem Ingenieur eine Reihe von Ergebnissen hinsichtlich des mechanischen Verhaltens des untersuchten Bauteils. Steht eine Optimierung an, so werden die Berechnungsergebnisse ausgewertet und in ein Re-Design umgesetzt. Dieser Prozess wird iterativ so lange wiederholt, bis ein verbessertes Design der Komponenten hinsichtlich der gestellten Anforderungen erzielt ist.

Um den iterativen Prozess zu automatisieren, sind seit einigen Jahren vermehrt so genannte Optimierungs-Programme im Einsatz. Durch den Einsatz dieser numerischen Werkzeuge werden die Arbeitsschritte Auswertung und Re-Design eigenständig abgearbeitet. In Bezug auf die zu optimierende Struktur erfolgt eine Unterscheidung zwischen Programmen zur Form- und Gestaltoptimierung und solchen zur Parameter- bzw. Dimensionsoptimierung. Der Unterschied ist in der Designvariable begründet, dem Wert, der durch den Optimierer verändert wird. [3]

Sämtlichen Optimierungsalgorithmen liegt das Prinzip zugrunde, dass sie vordefinierte Designvariablen hinsichtlich einer Zielgröße variieren. Als Zielgröße einer Optimierung können relativ einfache Werte, wie etwa Reaktionskraft, Bauteilgewicht oder -steifigkeit, aber auch komplexe Kenngrößen, wie beispielsweise Eigenfrequenz oder das Head-Injury-Criterion (HIC) für den Kopfaufprallvorgang, definiert werden [4]. Nach Start der automatischen Optimierung wird vom Programm zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hier wird ermittelt, wie sensibel das Bauteil auf die Änderung jeweils einer Variable reagiert. Nach Abschluss der Analyse werden dann Kombinationen errechnet, die eine positive Tendenz versprechen. Anhand der eingegebenen Zielgröße ändert die Software nach jedem Iterationsschritt die Designvariable(n) entsprechend und startet den Solver neu.

Die auf dem Markt erhältlichen Software-Lösungen bieten dem Anwender zum Teil mehrere Lösungsalgorithmen an, um Extrema zu finden. Das Gradientenverfahren verwendet Gradienten der Zielfunktion bei der Suche des Optimums. Es eignet sich gut für einfache lineare Problemstellungen. Globale Optimierungsmethoden wie die Response-Surface-Methode (RSM) sind universeller einsetzbar. Zur Berechnung werden Polynome höherer Ordnung verwendet, welche durch Approximation das Optimierungsproblem sehr genau nachbilden und einen großen Wertebereich von Designvariablen berechnen können. Auf der sich durch Stützstellen ergebenden Response Surface wird das Optimum bestimmt. Iterativ geschieht dies auch bei nicht glatten linearen Problemen relativ schnell, so dass die RSM auch bei Crash-Untersuchungen sehr effektiv ist. Evolutionäre Strategien werden bei nicht-linearen Problemen eingesetzt. Hier wird der Designraum teils zufällig nach besseren Designs abgesehen. Genetische Algorithmen wie Selektion, Rekombination und Mutation werden eingesetzt, um das eher langsame Verfahren zu beschleunigen. Je nach Art der Problemstellung muss der Anwender somit das effektivste Verfahren auswählen und einsetzen.

Im Rahmen der Crashberechnung, die in der Regel mit großen Rechenzeiten und verrauschten Signalen einhergeht, ist derzeit der Einsatz der Response Surface Methode als zielführend einzustufen. Die hohen Ansprüche bezüglich Aussagekräftigkeit, Prognosesicherheit und Geschwindigkeit der Optimierungsroutine können damit in ausreichenden Maße erfüllt werden. Die Anzahl der zu definierenden Designvariablen ist zunächst unbegrenzt. Eine hohe Anzahl von Variablen erhöht jedoch den Rechenaufwand zusätzlich. Daher ist auch hier eine sinnvolle Auswahl zu treffen, um nicht zuletzt den Zeit- und Kostenaufwand zu beschränken.

Die Anwendung der Optimierungstools zur Auslegung von Strukturen im Bereich des Fußgängerschutzes ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Im Rahmen der Studie wird das Optimierungstool HyperStudy zusammen mit dem expliziten FE Solver LSDYNA angewandt. In einer Sensitivitätsanalyse wird zunächst die Veränderung der Zielfunktion in Relation zur Änderung der einzelnen Designvariablen ermittelt. Aufgeschlüsselt nach Eingabewerten kann so der „sensitivste“ und damit in der näheren Umgebung des betrachteten Ergebnisses entscheidendste Eingabewert ermittelt werden. Aus der Mathematik ist jedoch bekannt, dass zwischen globalen und lokalen Extrema unterschieden werden muss. Ein Optimierungsverfahren ist grundsätzlich immer in der Lage, ein globales Extremum zu finden. Allerdings besteht die große Gefahr, hierfür einen unverhältnismäßigen Rechen- und Spei-

cheraufwand betreiben zu müssen. Daher ist es sinnvoll, die Optimierung mit relativ engen Grenzwerten und einem geeigneten Startwert zu versehen. Diese sind oft Ergebnis von grundsätzlichen Überlegungen und/oder Voruntersuchungen. Zudem können bei Parameteroptimierungen Restriktionen bezüglich des Designs und der Fertigungseignung bestehen. Im Rahmen der eigentlichen Parameteroptimierung wird eine Gebietsvariation und eine Variation der Ansatzfunktion durchgeführt. Auf der resultierenden Response Surface wird die optimale Konstellation hinsichtlich der definierten Designvariablen ausgewählt.

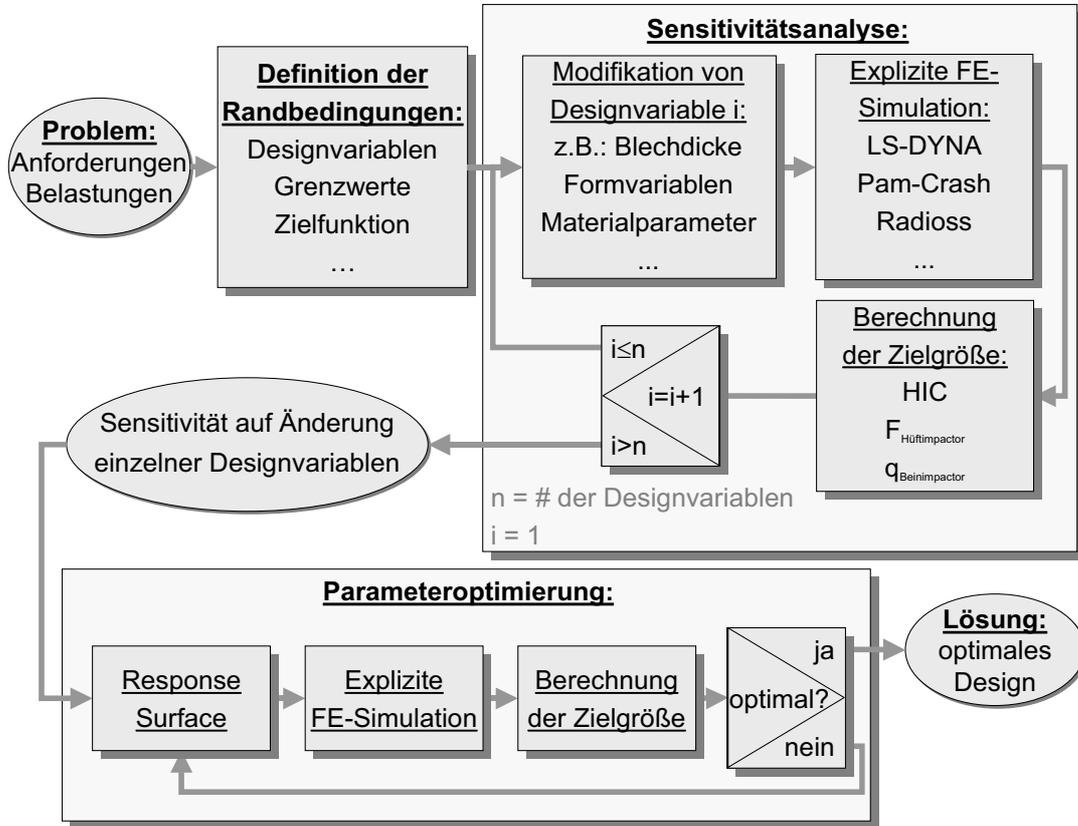


Bild 2: Numerische Optimierungsmethodik für Fußgängerschutzszenarien

Die numerische Optimierung von Karosseriebauteilen hinsichtlich einzelner Anforderungen oder Restriktionen (vgl. Bild 3) birgt in der Regel ein großes Potenzial hinsichtlich der zu erwartenden Zeit- und Kostenersparnis bei der Entwicklung der Strukturen.

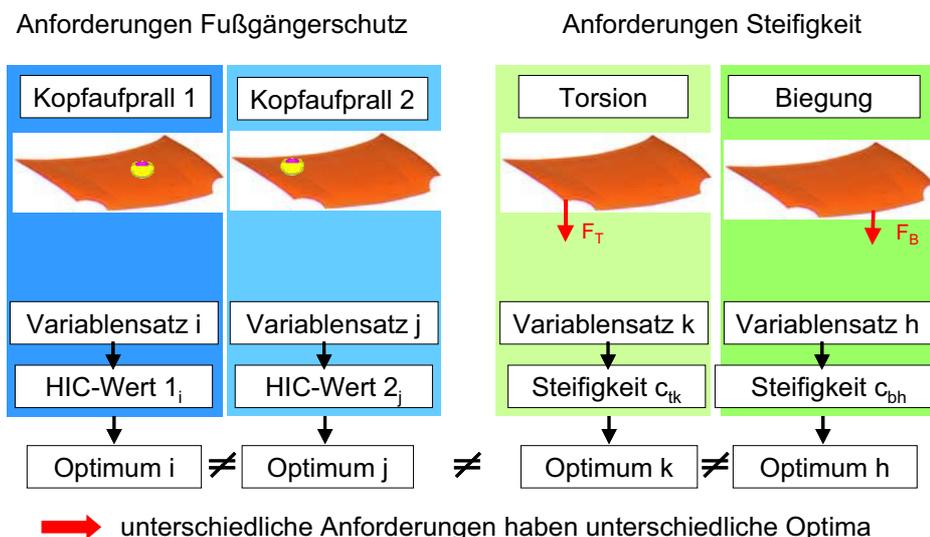


Bild 3: Konventionelle Vorgehensweise am Beispiel Motorhaube

Dennoch ist es eine wesentliche Schwachstelle, dass die separate Optimierung hinsichtlich einzelner Zielfunktionen (z. B. globale Steifigkeit oder Kopfaufprall) insbesondere in Verbindung mit starken Zielkonflikten zwischen den einzelnen Anforderungen zu grundlegend unterschiedlichen Designvorschlägen führen können. Hier setzt die multidisziplinäre Optimierungsmethodik entsprechend Bild 4 an, mit der die Einzelanforderungen verknüpft werden und aus deren Anwendung daher zielgerichtete Designentwürfe zu erwarten sind.

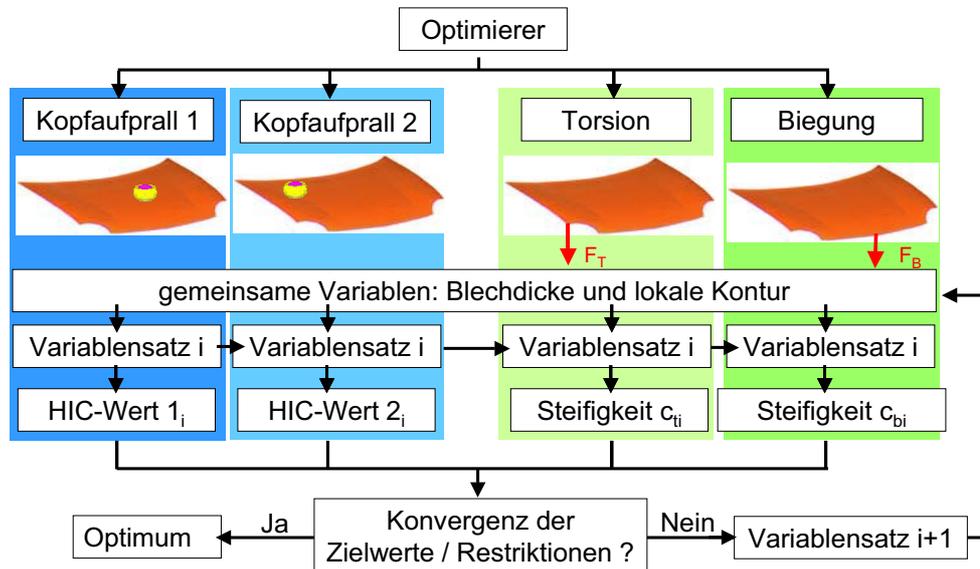


Bild 4: Multidisziplinäre Vorgehensweise

3 Anwendungsbeispiel Motorhaube

Der Einsatz der entwickelten Methodik wird im Anschluss exemplarisch anhand der Entwicklung einer fußgängerfreundlichen Motorhaubenstruktur beschrieben. Weitere Anwendungsbeispiele sind darüber hinaus aber auch in den Aufprallbereichen des Kinderkopfmultipactors im Windschutzscheibenbereich oder beim Oberschenkel- und Beinprall zu finden.

Aufgrund der in der Prüfprozedur definierten Aufprallbereiche konzentriert sich die Optimierung für den Kopfaufprall bei vielen gängigen Fahrzeugen auf den Motorhaubenbereich. Als besonders kritisch erweisen sich die seitlichen Haubenfugen sowie die Anbindungspunkte der Haube.

Im ersten Schritt der vorliegenden Untersuchung erfolgt zunächst eine Validierung der Simulation anhand von vorliegenden Ergebnissen von Kopfmultipactorversuchen entsprechend Phase II der europäischen Richtlinie an einem Serienfahrzeug.

Basierend auf den Resultaten der experimentellen Untersuchungen soll eine optimierte Stahlhaube unter Einsatz der neuen Methodik entwickelt werden. Ziel ist es, eine steife, kompakte Haubenstruktur zu konstruieren, welche gleichzeitig die Anforderungen der europäischen Gesetzgebung in Bezug auf den Fußgängerschutz erfüllt. Darüber hinaus müssen bei der Entwicklung der Haube wirtschaftliche und fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt werden.

Zunächst ist dazu die Pkw-Motorhaube aus Stahl zu digitalisieren und ein Finite Elemente (FE) Modell zu erstellen. Die Haubenoberfläche wird anhand einer ausreichenden Anzahl an Stützstellen vermessen. Wichtige Straklinien und komplexere Bereiche werden genauer abgetastet. Aus den ermittelten Punktdaten der Digitalisierung werden die Profile des Innenblechs und die Kontur des Außenblechs in Form von Linien und Flächen aufgebaut. Auf Basis dieser CAD-Daten wird ein FE-Schalenmodell der Motorhaube erzeugt, Bild 5. Dabei werden sowohl Innen- und Außenblech als auch die bestehenden Verbindungen und Verstärkungsbleche berücksichtigt. Die Haube wird an den Anbindungspunkten von Scharnieren und Schlössern eingespannt, zusätzliche Auflagepunkte in Form von Einstellpuffern werden berücksichtigt. Das Package wird vereinfacht durch näherungsweise Modellierung der relevanten Komponenten des Motorraumes erfasst.

Der Kopffimpactor wird nach Phase II der europäischen Gesetzgebung mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h beaufschlagt und unter einem Winkel von 50° gegen die Haube bewegt. Die auftretende Beanspruchung wird anhand des Verletzungskriteriums Head-Injury-Criterion (HIC) bewertet und ist auf $HIC_{15} < 1000$ begrenzt. Das Berechnungsmodell für den Impactor wurde entsprechend der zugrunde liegenden Kalibriervorschrift [2] von ika/fka kalibriert.

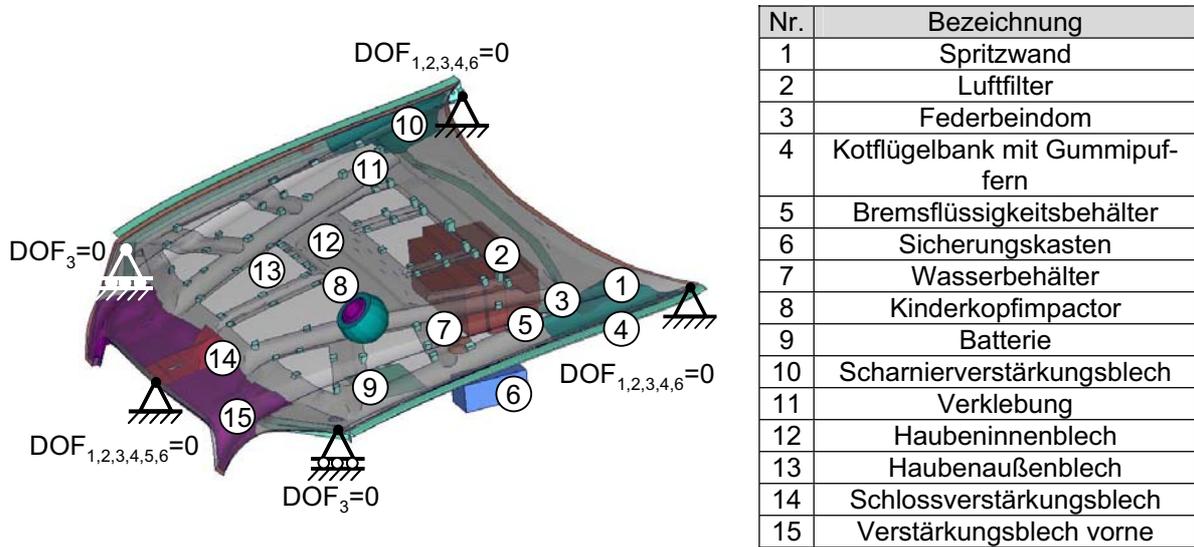


Bild 5: FE-Modell von Motorhaube und Package

Die Vorstellung der Methodik erfolgt im Anschluss anhand der Optimierung der Haubenstruktur hinsichtlich des Aufpralls an zwei ausgewählten Kinderkopfaufprallstellen auf die Stahlhaube (CH-L-2). Bild 6 zeigt den qualitativen Vergleich von Versuch und Simulationsergebnis für einen betrachteten Aufprallpunkt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des Deformationsverhaltens der Haube, der maximal auftretenden Haubendeformation und des Abrollvorgangs am Kopffimpactor.

Nach der Validierung des Berechnungsmodells ergibt sich der in Bild 7 dargestellte Abgleich zwischen Versuch und Simulation. Die quantitative Abweichung der maximal auftretenden Verzögerung und des HIC-Wertes liegt in einer Größenordnung unter 5%. Der Anprall des Impactors auf die Motorhaube selbst ($t < 4ms$) wird genau abgebildet. Die Abweichungen im weiteren Kurvenverlauf sind durch die näherungsweise Abbildung der Komponenten unterhalb der Motorhaube bedingt. Für die im Rahmen dieser Studie angestrebte Untersuchung der Optimierungsmethodik weist das Modell damit eine ausreichende Genauigkeit auf.

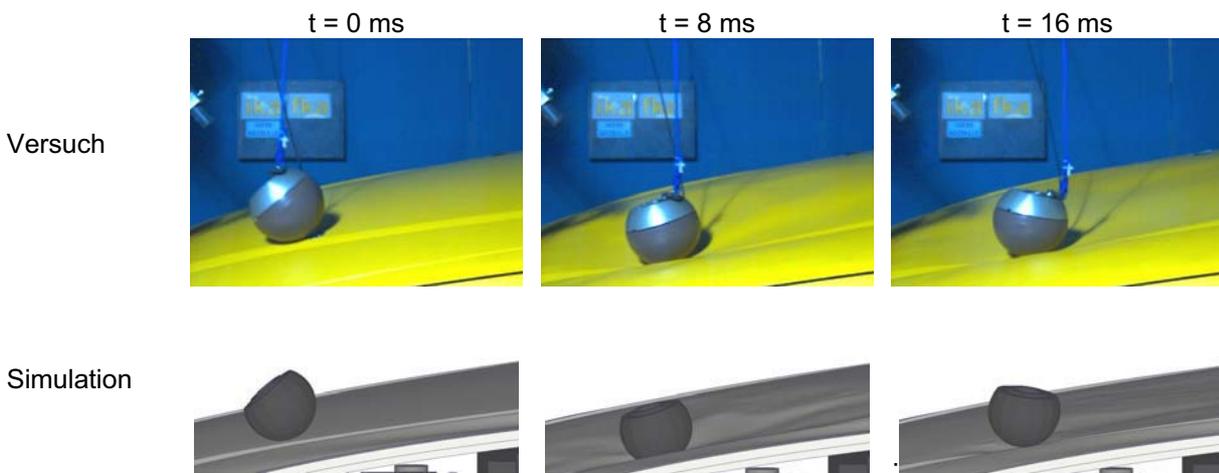


Bild 6: Kinderkopfaufprall auf die Motorhaube (Ch-L-2)

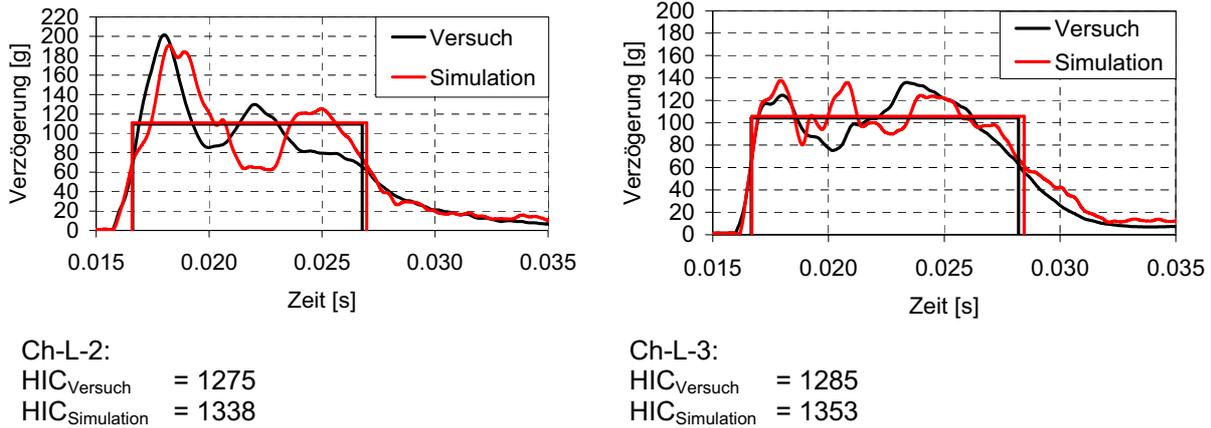


Bild 7: Validierung des Simulationsmodells

Die Ermittlung und die Quantifikation der wichtigsten beeinflussenden Parameter bezüglich der Systemantwort kann in Form von vorgeschalteten Parameterstudien mit modernen Simulations- und Optimierungsmethoden stattfinden. Eine Analyse des Einflusses der durchgeführten Änderungen auf die Haubensteifigkeit erfolgt während der Optimierungsphase durch Definition der Torsions- und Biegesteifigkeit als zusätzliche Designvariablen. (Multidisziplinäre Optimierung, Bild 8)

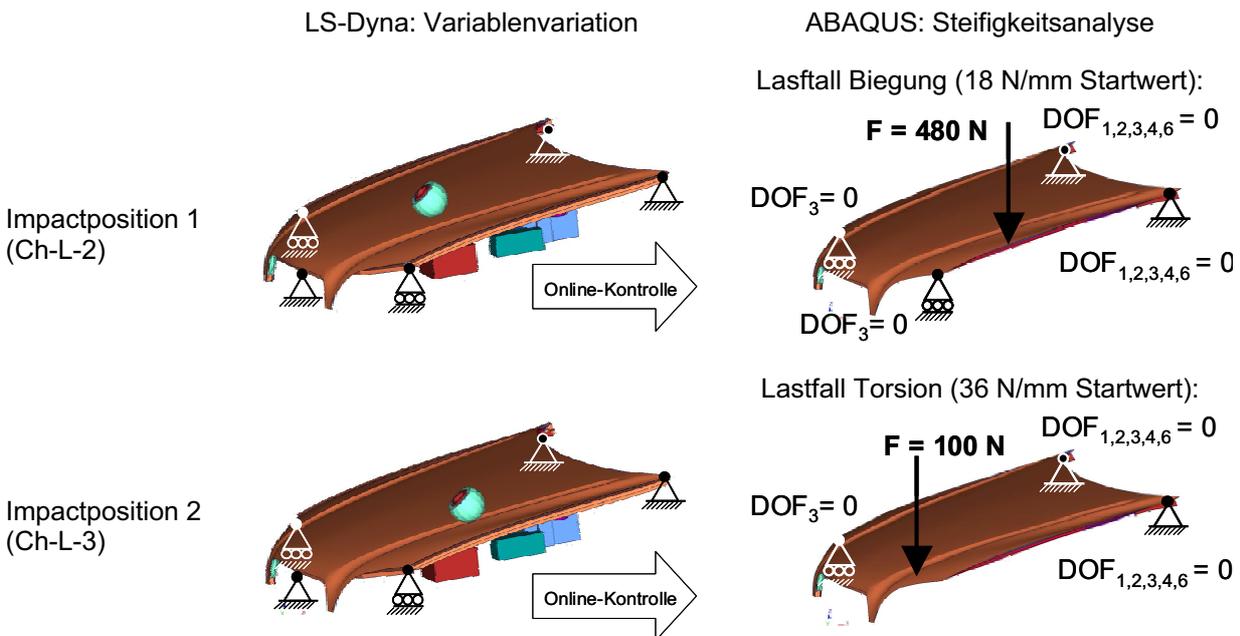
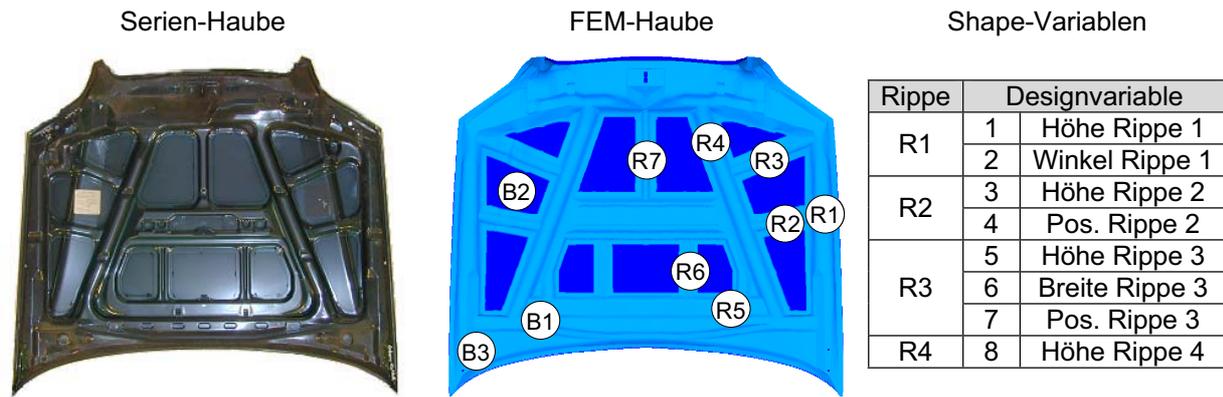


Bild 8: Durchführung der multidisziplinären Optimierung

Als wesentliche Einflussparameter auf die resultierende Verzögerung und das HIC können für die betrachteten Aufprallpunkte die Blechdicke des Außen ($t_{\text{außen}}$)- und Innenbleches (t_{innen}) erfasst werden. Darüber hinaus hat auch die Rippenhöhe Δh am Innenblech und insbesondere der Abstand zu den unter der Motorhaube befindlichen Komponenten maßgebliche Auswirkung auf die HIC-Werte. In Bild 9 sind der definierte Startwert und die Bandbreiten für die einzelnen Größen aufgeführt. Wesentliche Einschränkungen ergeben sich für die Blechdicken durch die Fertigungsrestriktionen und Leichtbauanforderungen. Die geometrischen Parameter (Shape-Variablen) werden durch die Anforderungen bezüglich des Packages limitiert.



Parametrisierte Blechdicken

Nr.	Designvariable	Startwert	Untergrenze	Obergrenze
B1	9 Innenblechdicke	0,61 mm	0,5 mm	1.0 mm
B2	10 Außenblechdicke	0,71 mm	0,52 mm	1.0 mm
B3	11 Scharnierdicke	3,3 mm	2,0 mm	4,0 mm

Bild 9: Designvariablen mit Startwert und Bandbreite

In Bild 10 ist die Variation der Shape-Variablen beispielhaft anhand der Variation einer Rippe verdeutlicht. Durch sogenanntes „Morphing“ ist eine einfache Veränderung der Geometrie auf Basis des vorhandenen FE-Netzes möglich, ohne auf die zugrunde liegende CAD-Parametrik zuzugreifen. So können Shapevariationen von z.B. den Sicken des Innenblechs bezüglich Sickenhöhe, Krümmungsradius, Flankenwinkel und/oder Querschnittsform erstellt und für die Shapeoptimierung parametrisiert werden. Die Auslenkung entlang der Verschiebevektoren in den einzelnen Iterationsschritten erfolgt im Verlauf der Optimierungsroutine prozentual auf Basis eines vordefinierten Verformungszustandes.

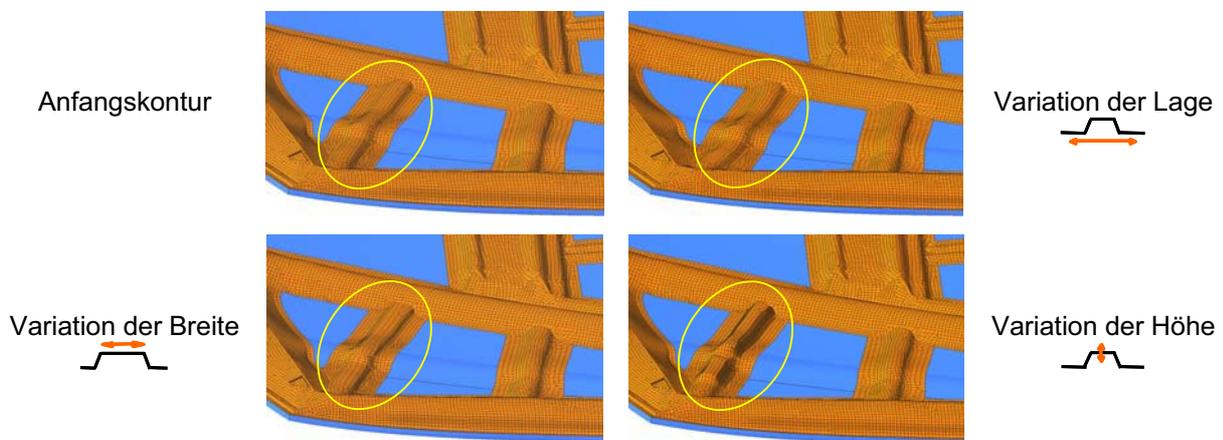


Bild 10: Variation von Shape-Variablen (Morphing)

Bei der Definition der Randbedingungen für den Optimierungslauf wird der HIC-Wert für beide Aufprallpunkte auf den Maximalwert 1000 limitiert. Gleichzeitig sollen die Verschiebungen an den Angriffspunkten der Kräfte bei den definierten globalen Steifigkeitslastfällen minimiert werden.

In Bild 11, Bild 12 und Bild 13 sind die Veränderung der Designvariablen und der Zielfunktion im Verlauf der Optimierungsroutine für die einzelnen Iterationen dargestellt. Das beste Ergebnis hinsichtlich der Zielgröße HIC wird in Iteration 61 erzielt.

Der bei der Basisversion auftretende Sekundäraufprall auf die unter der Haube befindliche Batterie wird bei der optimierten Version in Kombination mit einer stärker ausgeprägten Innenblechrippe (Rippenhöhe von Rippe 6 nimmt zu) minimiert.

Ein wesentliches Merkmal der optimierten Haube für den betrachteten Aufprallpunkt ist auch der Einsatz eines dünnen Außenbleches. Unter Abwägung von Realisierbarkeit, Außenhautqualität, Alltags-tauglichkeit und Kopfaufschlagbelastung ist bei Verwendung der Blechdicken $t_{\text{außen}}=0,52 \text{ mm}$ und $t_{\text{innen}}=0,67 \text{ mm}$ der Einsatz eines hochfesten Stahles für das Haubenblech in Betracht zu ziehen.

Durch Einsatz der numerischen Optimierung können die HIC-Werte an den beiden Kopfaufprallpunkten um etwa 26 % gesenkt werden. Mit den implementierten Maßnahmen geht gleichzeitig eine Gewichtsreduktion von 12 % einher. Die auftretende Verschlechterung hinsichtlich der globalen Steifigkeit ist aufgrund der konträren Anforderung Kopfaufprall nicht zu umgehen. Aufgrund der sehr hohen Steifigkeit der Ausgangsversion ist die vorliegende Abnahme der Steifigkeiten jedoch nicht als kritisch zu bezeichnen. Die optimierte Version der Haube kann immer noch als serientauglich bezeichnet werden.

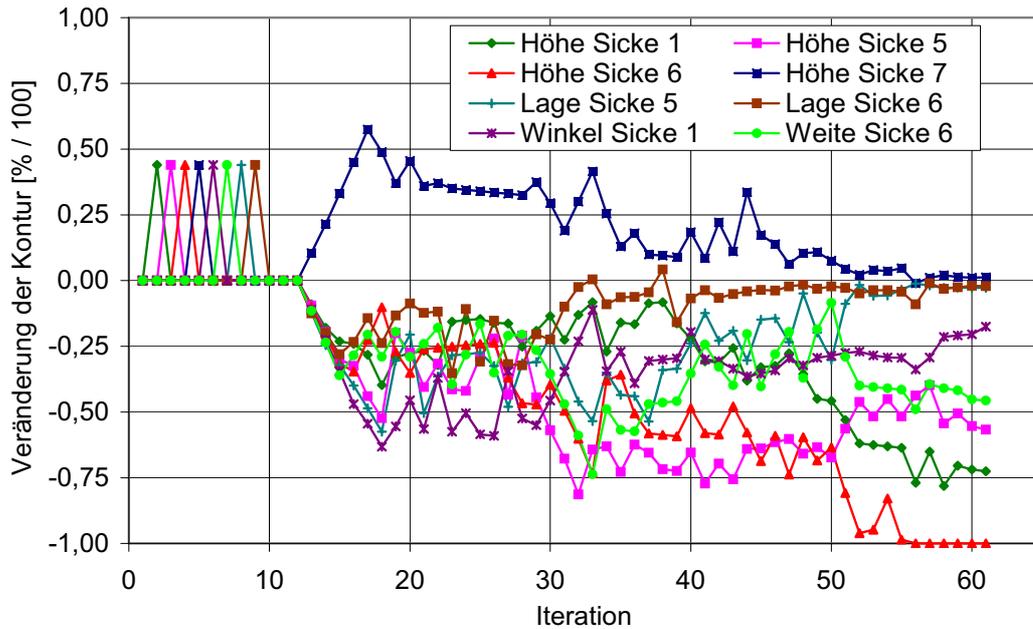


Bild 11: Veränderung der Shape-Variablen während der Optimierung

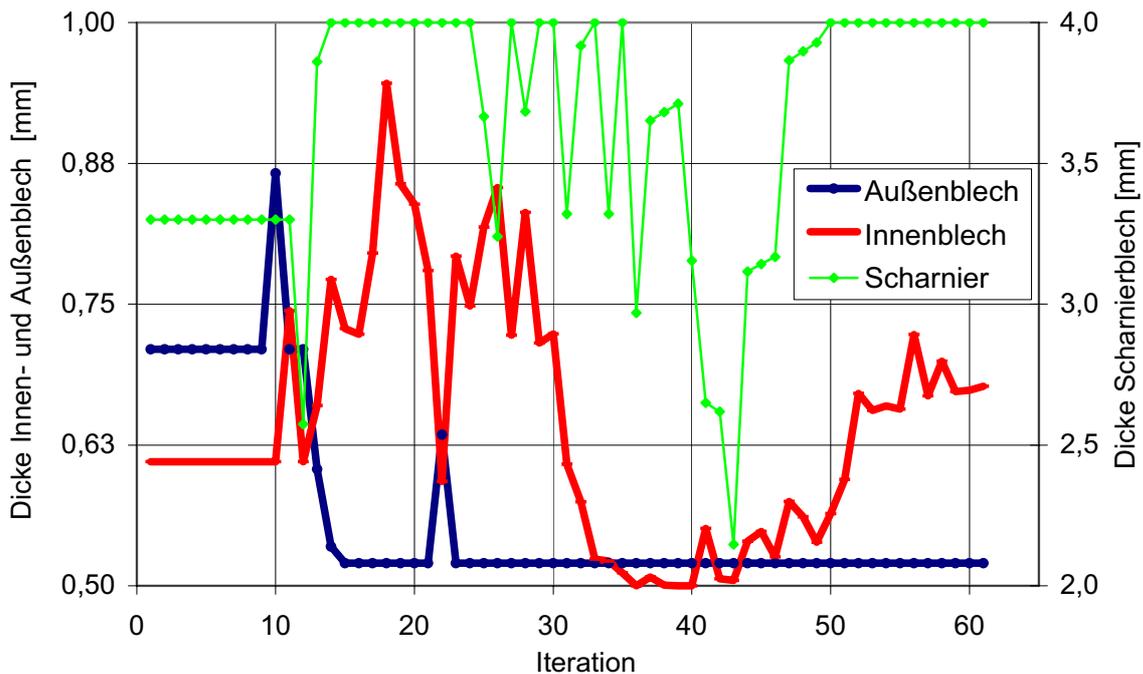


Bild 12: Veränderung der Blechstärken während der Optimierung

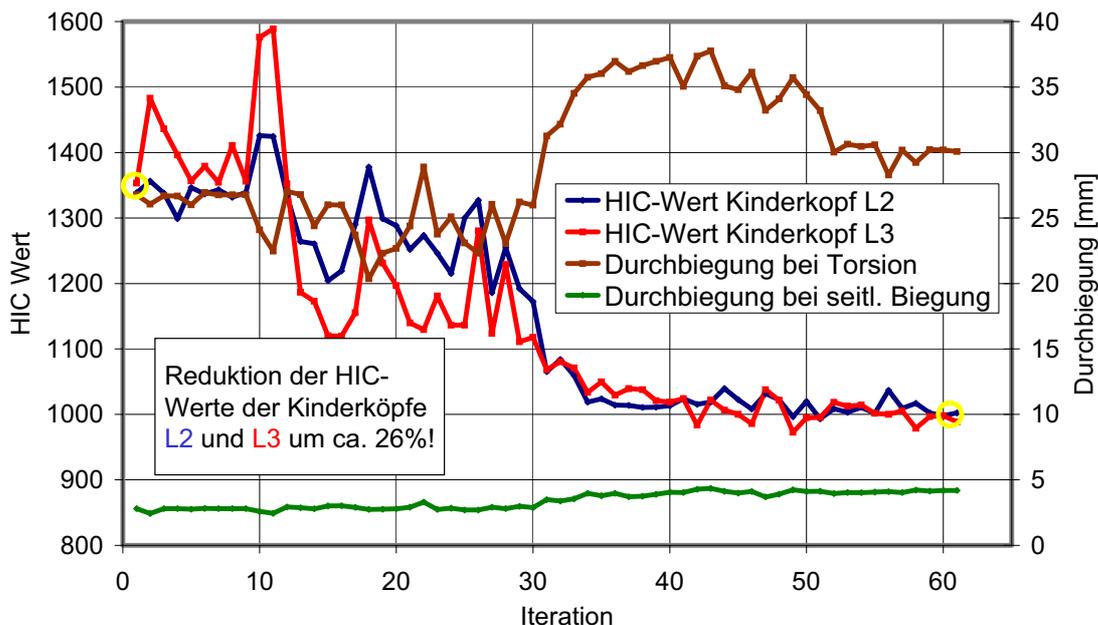


Bild 13: Veränderung der Zielgröße HIC und Durchbiegung während der Optimierung

4 Schlussfolgerungen

Die erzielten Ergebnisse belegen, dass durch den Einsatz der multidisziplinären numerischen Optimierung eine zeit- und kostensparende Identifikation wesentlicher Einflussgrößen auf die Zielwerte möglich ist. Die entwickelte Methode führt für das untersuchte Szenario, bei dem ein ausgeprägter Zielkonflikt zwischen den Lastfällen Kopfaufprall und globaler Steifigkeit vorliegt, zu deutlich verbessertem Systemverhalten. Insbesondere die automatisierte Variation der geometrischen Shape-Variablen birgt ein enormes Potenzial.

5 Formelzeichen

α	Aufprallwinkel beim Kopfanprall
Δh	Rippenhöhe
φ_{Knie}	Knie-Biegewinkel
τ_{Knie}	Kniescherung
a	Beschleunigung des Kopfschwerpunktes
DOF	Degree of Freedom
E	Energie
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
F	Kraft
FEM	Finite Elemente Methode
F_{Sum}	Summenkraft am Hüftimpactor
HIC	Head Injury Criterion
HIC_{15}	HIC mit maximaler Zeitfensterbreite von 15 ms
i	Laufvariable
M_b	Biegemoment
n	Anzahl der Designvariablen
$q_{\text{Beinimpactor}}$	Verletzungskriterien am Beinimpactor
RSM	Response Surface Methode
t	Zeit
$t_{\text{außen}}$	Außenblechdicke
t_{innen}	Innenblechdicke
v	Geschwindigkeit

6 Literatur

- [1] EUROPEAN PARLIAMENT
Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003 relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users before and in the event of a collision with a motor vehicle and amending Council Directive 70/156/EEC
Brüssel, 2003

- [2] EUROPEAN COMMISSION
Commission decision of 23 December 2003 on the technical prescriptions for the implementation of Article 3 of Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users before and in the event of a collision with a motor vehicle and amending Directive 70/156/EEC
Brüssel, 2004

- [3] SCHWARZ, D.
Gestaltung optimierter Sickenbilder für flächige Strukturen unter Einsatz numerischer Optimierungsverfahren
Dissertation, Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen, 2003

- [4] BORDASCH, J.
Gestaltung von versickten Strukturblechen durch Kombination von Parameter- und Topographieoptimierung
12. Aachener Kolloquium 2003, Aachen, 2003