

Optimierung mit LS-OPT hinsichtlich der Anforderung Fußgängerschutz

Dipl.-Ing. Susanne Niedermeyer, Dr.-Ing. Harald Bachem, Dr.-Ing. Xing Yu

CDH AG, Ingolstadt, Deutschland

Abstract:

In the automotive industry since some years more and more numerical tools for optimization are used to find optimized solutions for the highly nonlinear problems in the area of pedestrian safety. But not all optimization algorithms are suitable for this task. In this article different optimization algorithms are presented and evaluated with respect to usability for structural optimization for pedestrian head impact. In a first example it is shown which influence the chosen algorithm can have on the optimization result. Further, based upon this example the advantages and the availability of multidisciplinary and multicriterially optimization studies are shown. Additionally possibilities for the evaluation of the robustness of the optimization results are discussed.

Keywords:

Optimierung, Robustheit, Fußgängerschutz, LS-OPT

1 Hintergrund

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 Bestandteil der Richtlinie 2003/102/EC in das Typengenehmigungsverfahren von Kraftfahrzeugen aufgenommen wurde. 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 das Head-Injury-Criterion (HIC-Wert) als Bewertungskriterium, dessen Berechnung durch die Auswertung der Verzögerungsverläufe erfolgt. Im Hüftanpralltest werden maximale Summenkraft und Biegemoment am Hüftimpaktor, beim Beinaufprall Biegewinkel und Querverschiebung im Kniegelenk sowie die maximale Beschleunigung am Schienbein beurteilt. Zusammenfassend sind die Anforderungen des Prüfverfahrens in Bild 1 dargestellt. Nach einer durchgeführten Machbarkeitsstudie befindet sich Phase 2 derzeit in Diskussion. Zudem wurde jüngst ein Vorschlag für eine weltweit gültige Gesetzgebung zum Fußgängerschutz veröffentlicht [5], die sich stark an die Kriterien anlehnt, die im Rahmen der Machbarkeitsstudie für Phase 2 vorgeschlagen werden.

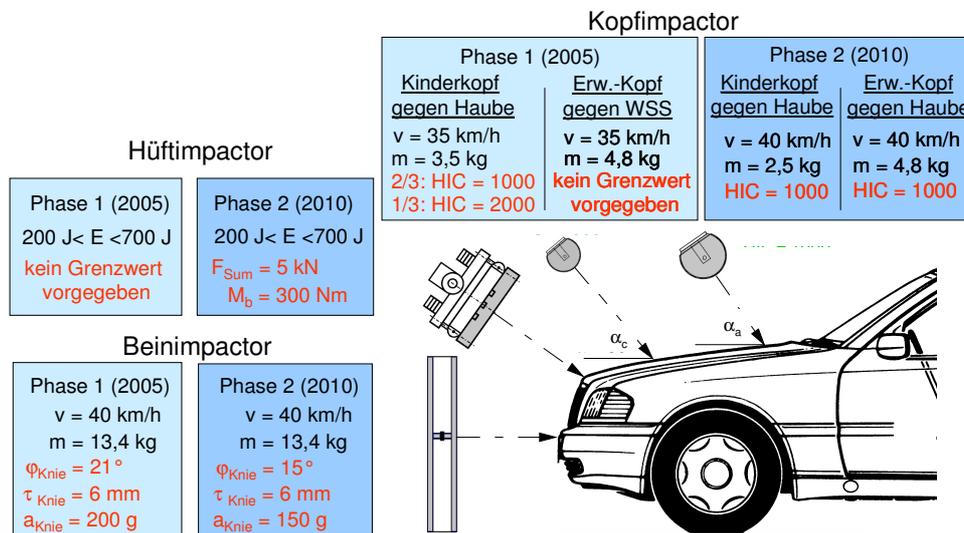


Bild 1: Richtlinie des Europäischen Parlaments.

Die Höhe der verschiedenen Verletzungskriterien wird durch eine Vielzahl an Parametern beeinflusst. Zum einen beeinflussen Steifigkeit und Geometrie der betroffenen Komponenten des Fahrzeugvorderbaus die Verletzungskriterien. Zum anderen werden die Verletzungskriterien auch durch Lage und Beschaffenheit des Package im Motorraum beeinflusst. Bild 2 zeigt zusammenfassend die wesentlichen Maßnahmen in den Bereichen Materialanwendung, Bauteilgestaltung und Strukturentwurf, die zur fußgängerschutzgerechten Gestaltung der Fahrzeugfront genutzt werden können.

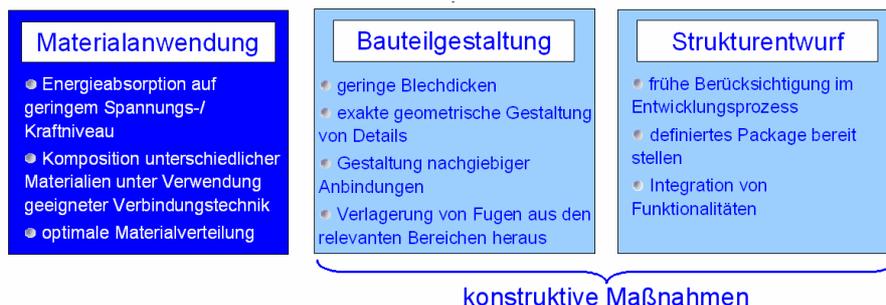


Bild 2: Maßnahmen zur fußgängerschutzgerechten Gestaltung.

Der Zusammenhang zwischen den aus diesen Bereichen denkbaren Parametern und den Verletzungskriterien ist größtenteils stark nicht linear. Teilweise existieren sogar diskontinuierliche Abhängigkeiten. Beispielsweise treten im Zusammenhang mit einem Sekundäranprall der Motorhaube mit darunter liegenden Motorraumkomponenten sprunghafte Änderungen des HIC-Wertes bei geringfügiger Änderung der Parameter auf. Dennoch werden bei der Automobilentwicklung für die Anforderung Fußgängerschutz seit einigen Jahren verstärkt numerische Optimierungstools eingesetzt. Vor dem Hintergrund der oben aufgeführten Nichtlinearitäten ist jedoch für die Anwendung dieser Werkzeuge ein fundiertes Know-How erforderlich, um durch einen effektiven Prozess mit geringem Aufwand eine robuste technische Lösung für das Fußgängerschutzsystem zu entwickeln.

2 Optimierungsalgorithmen

Sämtlichen Optimierungsalgorithmen liegt das Prinzip zugrunde, dass n vordefinierte Parameter, die Designvariablen, so variiert werden, dass das Optimierungsziel unter den gegebenen Restriktionen erreicht wird. Als Designvariablen kommen zum Beispiel Geometrieparameter wie Wandstärken und Sickenformen oder auch Materialparameter wie die Dichte in Betracht. Als Zielgröße einer Optimierung können relativ einfache Werte, wie das Bauteilgewicht oder die Bauteilsteifigkeit, aber auch komplexe Kenngrößen, wie die Eigenfrequenz oder der HIC-Wert, definiert werden. Eine mögliche Restriktion im Rahmen einer Optimierung kann beispielsweise die Beschränkung des zulässigen HIC-Wertes sein. Grafisch gesehen spannen die n Designvariablen mit der Zielgröße einen $(n+1)$ -dimensionalen Designraum auf. Jede zulässige Kombination an Designvariablen wird als Design bezeichnet. Als Design of Experiments (DOE) bezeichnet man einen Versuchsplan, nachdem eine bestimmte Anzahl an Designs aus dem Designraum ausgewählt wird. Als Optimierungsalgorithmen stehen zahlreiche mathematische Verfahren zur Verfügung, die entsprechend ihres Ansatzes in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden können. Im Folgenden werden die meist verbreiteten Optimierungsalgorithmen kurz charakterisiert.

2.1 Suchmethoden

Bei Verwendung von Suchmethoden wird für jeden Iterationsschritt eine bestimmte Anzahl an Designs aus dem Designraum ausgewählt. Die Auswahl des Variablensatzes kann dabei entweder zufällig oder nach einem bestimmten Versuchsplan (DOE) erfolgen. Für jedes Design wird anschließend der zugehörige Wert der Zielgröße berechnet. Als Optimum eines Iterationsschritts wird das Design ausgewählt, das die Zielgröße unter den gegebenen Restriktionen am besten erreicht. Ein Abbruchkriterium für die Routine kann beispielsweise die Bedingung sein, dass sich der Wert der Zielgröße für das optimale Design um weniger als eine vorgegebene Toleranz ändert. Zu den Suchmethoden zählen die *Monte-Carlo-Suche* und die *Random Search Methode*.

Vorteile der Suchmethoden sind:

- universelle Einsetzbarkeit hinsichtlich der Struktur der Optimierungsaufgabe, da z.B. keine Gradienten verwendet werden
- stabil, da im Verlauf der Routine einzelne Ergebnisse verloren gehen dürfen, ohne dass dadurch der Optimierungsprozess blockiert wird
- gute Parallelisierbarkeit, da die Reihenfolge der Berechnungen innerhalb eines Iterationsschritts beliebig ist

Nachteile sind:

- geringe Effektivität, da viele Simulationsläufe zum Erreichen des Optimums erforderlich sind
- vergleichsweise schlechte Konvergenz, da lediglich Information über das jeweils berechnete Design und keine Information über die Veränderung der Zielgröße über den Designraum betrachtet wird
- geringe Robustheit der Lösung in Bezug auf kleine Änderung der Designvariablen

2.2 Gradientenmethoden

Gradientenmethoden basieren darauf, dass ausgehend vom Basisdesign Gradienten der Zielfunktion zur Suche des Optimums verwendet werden. Anschließend dient das Optimum des vorhergehenden Iterationsschrittes als Startwert für den nächsten Schritt. Zu den Gradientenmethoden gehören die *Methode des steilsten Abstiegs* und die *Newton-* und die *Quasi-Newton-Methode*. Die Gradientenmethoden eignen sich sehr gut für einfache lineare Problemstellungen, für die die

Gradienten der Zielfunktion leicht berechnet werden können. Für hoch nicht lineare Probleme oder Aufgabenstellungen mit verrauschten Antworten – wie beispielsweise beim Kopfaufprall – sind sie weniger gut geeignet. Bei den Gradientenmethoden ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass der Algorithmus in einem lokalen Optimum konvergiert.

2.3 Genetische und evolutionäre Methoden

Bei genetischen und evolutionären Methoden wird der Designraum teils zufällig unter Verwendung von populationsbasierten Ansätzen und stochastischen Elementen nach besseren Designs abgesucht. Genetische Algorithmen wie Selektion, Rekombination und Mutation werden eingesetzt, um das Verfahren zu beschleunigen. Wie auch bei den Suchmethoden ist der wesentliche Vorteil der genetischen und evolutionären Methoden in ihrer universellen Einsetzbarkeit zu sehen, da nur diskrete Designs und keine Gradienten oder Approximationsmodelle berechnet werden müssen. Daraus resultieren allerdings auch die wesentlichen Nachteile der genetischen und evolutionären Methoden. In Analogie zu den Suchmethoden sind sie vergleichsweise ineffektiv und das Optimum ist häufig nicht robust.

2.4 Approximationsmethoden

Bei der Verwendung von Approximationsmethoden wird das Optimierungsproblem in mehreren Iterationsschritten durch unterschiedliche analytische Funktionsansätze approximiert. Im Unterschied zu den Gradientenmethoden wird allerdings nicht ausgehend von einem Startpunkt eine lokale Approximation durchgeführt, sondern die Approximation erfolgt mittels ausgewählter Designs im Designraum. Für jeden Iterationsschritt kann der Wert der Zielgröße für diese ausgewählten Designs parallel berechnet werden. Mit den resultierenden Ergebnissen werden die Koeffizienten der analytischen Funktionen mittels kleinster Fehlerquadrate festgelegt. Als Approximationsansätze kommen zum Beispiel lineare und quadratische Polynome, aber auch neuronale Netze in Betracht. Das Optimum des analytischen Approximationsmodells kann anschließend in der Regel mit geringem Aufwand ermittelt werden. Je nach Approximationsmethode wird in der folgenden Iteration entweder nur für das optimale Design der Wert der Zielgröße ermittelt, oder es wird in der Nähe des Approximationsoptimums für mehrere Designs der Wert der Zielgröße berechnet. Entsprechend der Iterationsregel erfolgt wiederum die Berechnung des Approximationsmodells mit anschließender Optimierung. Die Iterationsschleife wird verlassen, sobald ein Abbruchkriterium erreicht ist.

Die bekannteste Approximationsmethode ist die *Response Surface Methode*. Einen Sonderfall der *Response Surface Methode* stellt die *Successive Response Surface Methode* dar, bei der in jedem Iterationsschritt nur ein Teilgebiet des Designraums untersucht wird, und anschließend im ermittelten Optimum der Mittelpunkt des neuen Suchgebietes definiert wird. Gleichzeitig wird die Größe des Suchgebietes verringert. Im Gegensatz zu den Gradientenverfahren eignen sich die Approximationsmethoden besser für verrauschte Zielgrößen, wobei aber auch die Möglichkeit der Konvergenz in einem lokalen Optimum besteht. Da das Optimum basierend auf einem Approximationsmodell ermittelt wird, besteht die Möglichkeit, dass der Wert der Zielgröße für das optimale Design die Restriktionen der Optimierungsstudie verletzt.

3 Anwendungsbeispiel: Single Solver Optimierung

Der Einfluss verschiedener Optimierungsalgorithmen soll anhand einer einfachen Single Solver Optimierung exemplarisch aufgezeigt werden. Als Optimierungsproblem wird der Aufprall eines Erwachsenenkopfpimpaktors nach 2003/102/EC (vgl. Bild 1) auf eine Motorhaube unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Algorithmen betrachtet. Durch Optimierung einzelner Designvariablen soll der erforderliche Bauraum unter der Motorhaube unter Berücksichtigung der zulässigen Kopfverletzungskriterien optimiert werden. Das Gewicht der Haube wird für diesen Vergleich nicht betrachtet.

Im betrachteten Lastfall entsprechend Bild 3 wird der Kopfpimpaktor mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h beaufschlagt und unter einem Winkel von 65° zur Horizontalen gegen die Haube bewegt. Die Bauraumbegrenzung wird durch eine starre Box, die zentrisch unter dem Aufprallpunkt angeordnet ist, repräsentiert. Der unverbaute Bereich ist auf maximal 77,65 mm Abstand vom Außenblech beschränkt. Die Motorhaube ist an den Anbindungspunkten von Scharnieren und Schlössern eingespannt. Zwei zusätzliche Auflagerpunkte in Form von Einstellpuffern werden ebenfalls berücksichtigt.

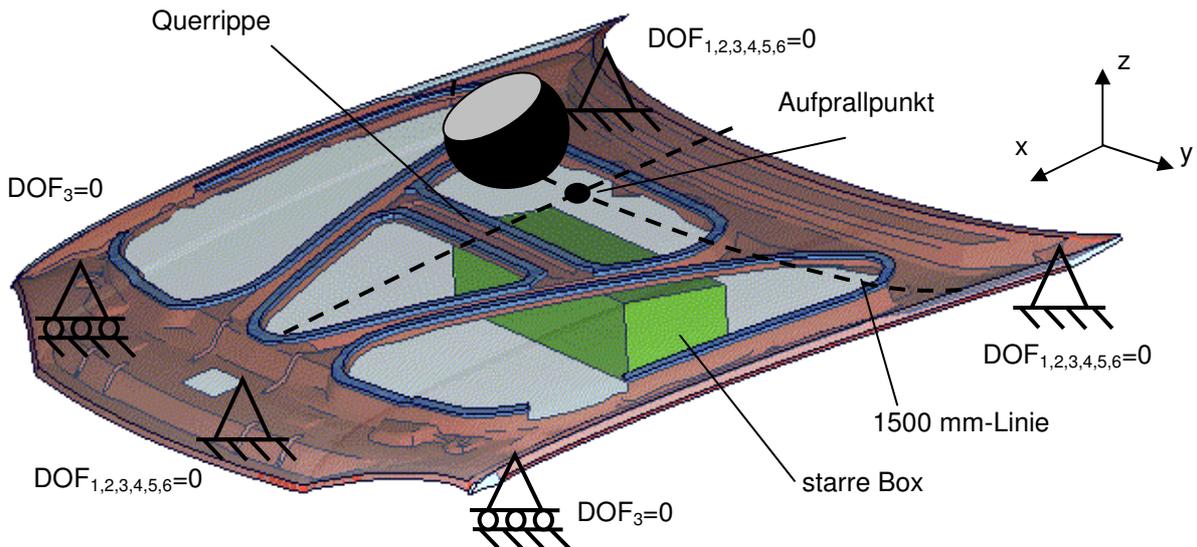


Bild 3: Finite Element Modell der Motorhaube mit Erwachsenenkopffimpaktor.

Die Restriktion dieses Optimierungsproblems ist der HIC₁₅-Wert, der auf 1000 limitiert wird. Mit steigender Nachgiebigkeit der Motorhaube ist grundsätzlich ein niedrigerer HIC₁₅-Wert zu erwarten. Die Zielgröße in diesem einfachen Optimierungsbeispiel ist der zulässige Bauraum unter der Motorhaube, der durch die Höhe der starren Box repräsentiert wird. Der zulässige Bauraum ist umso größer, je kleiner die Durchbiegung der Motorhaube ist. Aufgabe ist es, die Steifigkeit der Motorhaube so einzustellen, dass einerseits die Durchbiegung minimal wird, aber andererseits der zulässige HIC₁₅-Wert nicht überschritten wird.

Die Steifigkeit der Motorhaube wird durch die Blechdicken des Außen- und des Innenbleches sowie durch die Form der Rippen im Innenblech beeinflusst. Als Designvariablen werden neben der Höhe der starren Box daher die beiden Blechdicken der Motorhaube ($t_{\text{außen}}$ und t_{innen}) sowie die Höhe der Querrippe in der unmittelbaren Umgebung des Aufprallpunktes definiert. Die Höhe der starren Box wird über die z-Koordinate z_{Box} der Knoten auf der Oberseite der starren Box gesteuert.

In Tabelle 1 sind der Startwert und die Bandbreiten für die einzelnen Designvariablen aufgeführt. Die Variation der Rippenhöhe wird mit Hilfe einer Morphing-Funktionalität realisiert. Beim Morphing werden Shapevektoren des Finite Element Netzes abgespeichert und mit Hilfe von Variablen parametrisiert (vgl. Bild 4). Als Startwert für die Höhe der starren Box wird die maximale Höhe gewählt, bei der der HIC₁₅-Wert für die aktuelle Motorhaubensteifigkeit kleiner als 1000 ist.

| Designvariable | untere Grenze | Startwert | obere Grenze |
|-------------------------|---------------|-----------|--------------|
| $t_{\text{außen}}$ [mm] | 0,5 | 0,7 | 1,2 |
| t_{innen} [mm] | 0,5 | 0,55 | 1,2 |
| h_{Rippe} [-] | -1 | 0 | 1 |
| z_{Box} [mm] | 570,85 | 583,5 | 648,5 |

Tabelle 1: Definition der Designvariablen.

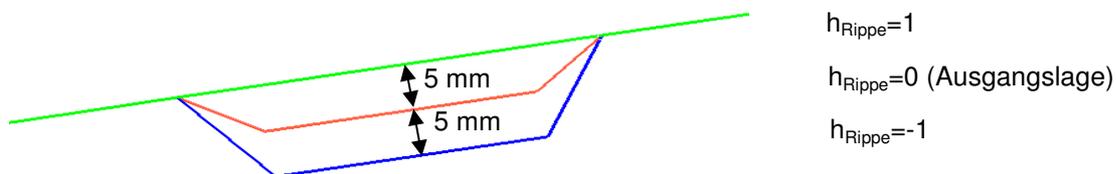


Bild 4: Definition der Shapevariable für die Querrippe.

Die Studie wird unter Verwendung des Optimierungstools LS-OPT unter Einbindung der Morphing-Funktionalität über Hyperworks durchgeführt. Die Crashesimulationen erfolgen mit dem Programmcode LS-DYNA und die Simulationsstudie mit den folgenden zwei Optimierungsalgorithmen:

- Sequential Random Search Methode (SRaSM)
 - Algorithuskategorie: Suchmethode
 - DOE: Latin Hypercube mit 20 Simulationen je Iteration
- Successive Response Surface Methode (SRSM)
 - Algorithuskategorie: Approximationsmethode
 - DOE: D-optimal mit 8 Simulationen je Iteration auf Basis Full Factorial mit 7 Punkten je Designvariable
 - Regressionsfunktion: lineare Polynome

Als Abbruchkriterium wird für beide Studien AND mit einer Zielgrößen- und Designtoleranz von 0,001 verwendet. In Bild 5 und Bild 6 sind die Veränderungen der Zielgröße und des HIC₁₅-Werts im Verlauf beider Optimierungsroutinen dargestellt. Unter Verwendung der SRSM werden bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums 41 Simulationen (5 Iterationsschritte) benötigt, bei der SRaSM sind es demgegenüber 80 Simulationen (4 Iterationsschritte). Die Optima beider Algorithmen sind in Tabelle 2 gegenüber gestellt.

Mit beiden Optimierungstools konnte das Optimierungsziel erreicht werden. Mit der SRaSM konnte der zulässige Bauraum um 14,4 mm, mit der SRSM sogar um 18 mm vergrößert werden. Wie zu erwarten war, wurde die Vergrößerung des zulässigen Bauraums durch eine Versteifung der Motorhaube erreicht, was mit einer Erhöhung der Blechdicken einhergeht. Die SRaSM bezieht zur Versteifung der Motorhaube zusätzlich die Querrippe mit ein, indem sie deren Höhe um 25 % erhöht. Während sich der HIC₁₅-Wert bei der SRSM geringfügig gegenüber dem Startwert erhöht, wird er bei der SRaSM um 10 % abgesenkt.

| | Startwert | Optimum SRSM | Optimum SRaSM |
|------------------------------|-----------|--------------|---------------|
| $t_{\text{außen}} [\%]$ | 100% | 170% | 117% |
| $t_{\text{innen}} [\%]$ | 100% | 130% | 170% |
| $h_{\text{Rippe}} [-]$ | 0 | 1 | -0,259 |
| $z_{\text{Box}} [\text{mm}]$ | 583,5 | 601,45 | 597,85 |
| HIC ₁₅ [-] | 956 | 992 | 860 |

Tabelle 2: Vergleich der Optima von beiden Optimierungsalgorithmen.

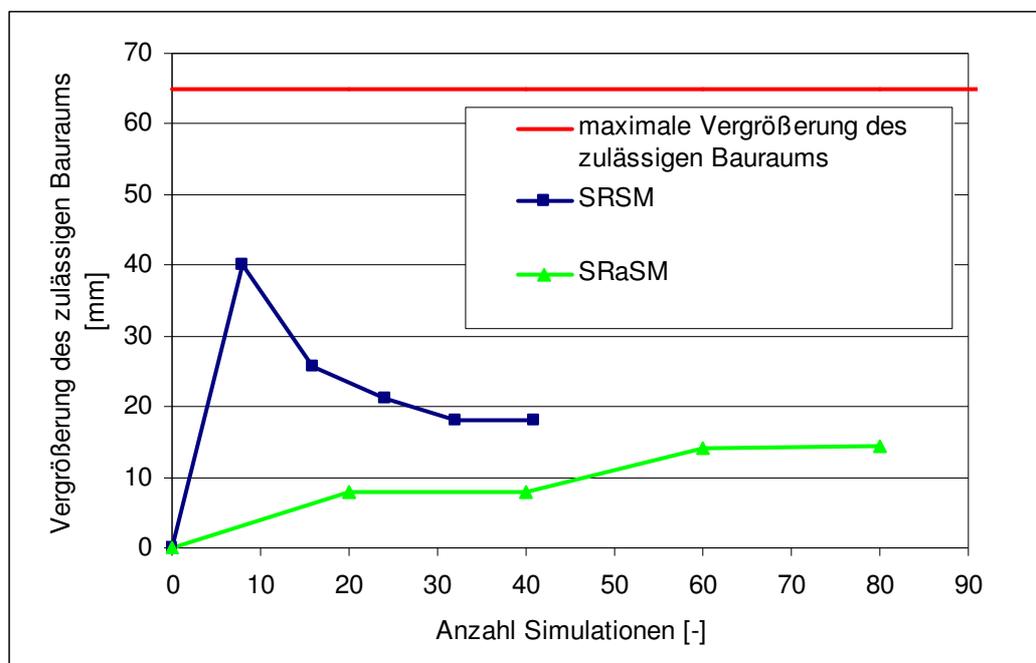


Bild 5: Veränderung des zulässigen Bauraums im Laufe der Optimierung.

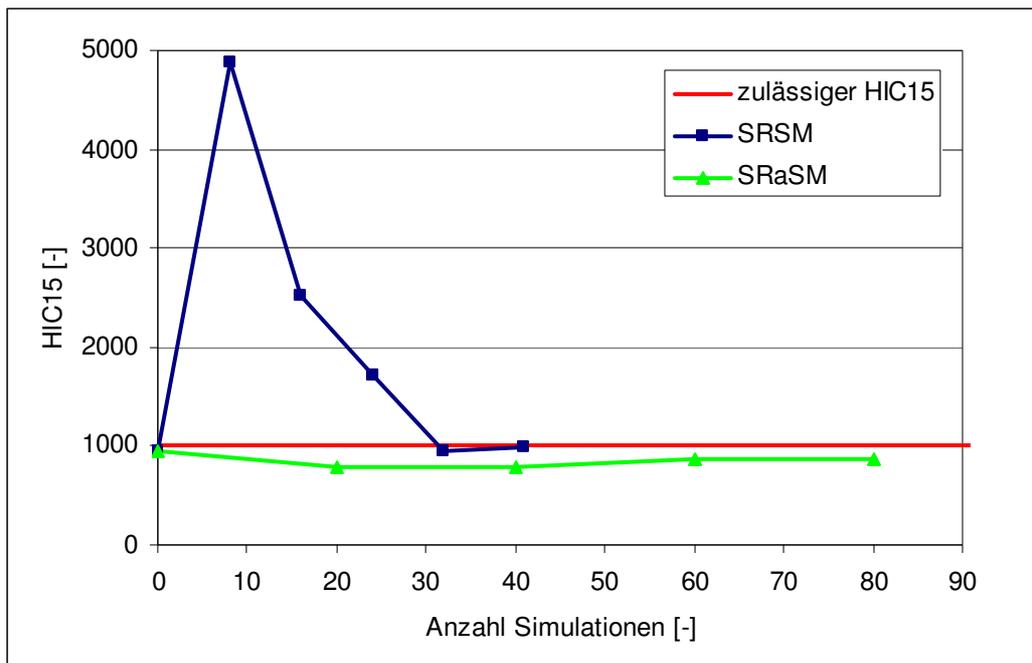


Bild 6: Veränderung des HIC_{15} -Werts im Laufe der Optimierung.

Betrachtet man den Verlauf des HIC_{15} -Werts während der Optimierung so fällt auf, dass die Optima der einzelnen Iterationen der SRaSM den zulässigen Wert von 1000 niemals überschreiten. Im Gegensatz dazu wird der zulässige HIC_{15} -Wert bei der SRSM in den ersten drei Iterationsschleifen verletzt. Dies steht im Einklang mit Abschnitt 2, wo auf die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Algorithmen bezüglich der Verletzung von Optimierungsrestriktionen eingegangen wird. Bei der SRaSM wird unter allen berechneten Designs das Design ausgewählt, dass die Zielgröße unter den gegebenen Restriktionen am besten erreicht. Nur wenn es für einen Iterationsschritt kein Design gibt, das alle Restriktionen erfüllt, so wird das Design ausgewählt, bei der die geringste Verletzung der Restriktionen vorliegt. Die Gefahr einer Restriktionsverletzung ist daher sehr gering. Im Gegensatz dazu wird das Optimum bei den Approximationsmethoden auf einem Approximationsmodell ermittelt. Es besteht daher eine große Gefahr, dass der Wert der Zielgröße für das optimale Design die Restriktionen der Optimierungsstudie verletzt.

Zunächst könnte die SRSM als der Optimierungsalgorithmus angesehen werden, der besser für die untersuchte Aufgabenstellung geeignet ist. Die SRSM schöpft den zulässigen HIC_{15} -Wert von 1000 optimal aus und kann auf diese Weise den Bauraum um 3,6 mm mehr als die SRaSM vergrößern. Darüber hinaus benötigt die SRSM bis zum Erreichen des Optimums nur halb so viele Simulationen wie die SRaSM. Dies steht im Einklang mit Abschnitt 2, wo auf die Uneffektivität von Suchmethoden eingegangen wird. Allerdings ist die in diesem Beispiel, bei dem bewusst auf die Einbeziehung der Masse verzichtet wurde, mit der SRSM gefundene Lösung hinsichtlich eines Einsatzes in der realen Struktur nicht sinnvoll. Insbesondere da das Potenzial der Erhöhung des Rippenquerschnitts nicht ausgenutzt wurde und stattdessen eine Erhöhung der Blechdicke am Außenblech auftrat. Dies soll exemplarisch zeigen, wie wichtig eine sinnvolle Definition der Designvariablen und deren Bandbreite im Zusammenspiel mit dem verwendeten Algorithmus ist.

4 Anwendungsbeispiel: Multidisziplinäre und multikriterielle Optimierung

Speziell bei der Auslegung von Komponenten hinsichtlich der Anforderung Fußgängerschutz ist es häufig erforderlich, ein Bauteil bezüglich mehrerer Lastfälle, beispielsweise bezüglich verschiedener Aufprallpunkte des Impaktors, und mehrerer Zielgrößen zu betrachten. In diesem Zusammenhang werden multidisziplinäre (mehrere Lastfälle) und multikriterielle (mehrere Zielgrößen) Optimierungsprobleme definiert. In diesem Abschnitt wird dazu das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 um einen Lastfall und eine Zielgröße erweitert.

Neben dem Lastfall Erwachsenenkopfaufprall wird zusätzlich ein Kinderkopfaufprall nach 2003/102/EC an derselben Stelle berücksichtigt. Der Kinderkopfimpaktor wird mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h beaufschlagt und unter einem Winkel von 50° zur Horizontalen gegen

die Motorhaube geschossen. Als zusätzliche Restriktion wird der HIC_{15} -Wert des Kinderkopfpfaktors auf 1000 beschränkt.

Während die Masse der Motorhaube bei der Optimierungsstudie in Abschnitt 3 bewusst außer Acht gelassen wurde, soll diese nun als zusätzliche Zielgröße berücksichtigt werden. Im Gegensatz zum zulässigen Bauraum soll die Motorhaubenmasse minimiert werden. Damit handelt es sich bei den beiden Zielgrößen um konkurrierende Ziele. Der zulässige Bauraum ist umso größer, je kleiner die Durchbiegung der Motorhaube ist. Die Durchbiegung ist jedoch umso kleiner, je steifer die Motorhaube ist. Die Motorhaube ist wiederum umso steifer, je größer ihre Blechdicken, und je höher damit ihre Masse ist. Aufgabe des Optimierungstools ist es somit, ein Mittelmaß für die Steifigkeit der Motorhaube zu finden, so dass weder die Durchbiegung noch die Masse der Motorhaube unverhältnismäßig groß werden, und die zulässigen HIC_{15} -Werte für beide Kopfpfaktoren nicht überschritten werden.

Für die multidisziplinäre und multikriterielle Optimierungsstudie werden dieselben Designvariablen mit den gleichen Startwerten und Bandbreiten wie in Abschnitt 3 verwendet.

Bei einem multikriteriellen Optimierungsproblem müssen die einzelnen Zielgrößen zu einer Zielfunktion zusammengefasst werden. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die drei bekanntesten Möglichkeiten sind:

- gewichtete Zielfunktion
- zielbasierte Zielfunktion
- Optimierung über zusätzliche Restriktionen

Bei der gewichteten Zielfunktion werden die einzelnen Zielgrößen f_i mit einem Gewichtungsfaktor ω_i multipliziert und aufsummiert. Diese Vorgehensweise eignet sich besonders gut für gleichgerichtete Zielgrößen. Für unseren Fall mit zwei konkurrierenden Zielgrößen ist sie nicht geeignet.

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i \quad (1)$$

Bei der zielbasierten Zielfunktion wird für jede Zielgröße f_i ein Zielwert z_i definiert. Die Zielfunktion ergibt sich als euklidische Norm aus der Summe der Abstände der einzelnen Zielgrößen von ihrem Ziel. Wie bei der gewichteten Zielfunktion können auch bei der zielbasierten Zielfunktion Gewichtungsfaktoren ω_i berücksichtigt werden.

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i - z_i}{\omega_i} \right)^2} \quad (2)$$

Bei der Optimierung über zusätzliche Restriktionen wird keine Zielfunktion definiert. Stattdessen wird für jede Zielgröße f_i eine zusätzliche Restriktion definiert. Die zusätzlichen Restriktionen werden dabei so gewählt, dass sie von der jeweiligen Zielgröße stets verletzt werden. Aufgabe des Optimierungsalgorithmus ist es, die Restriktionsverletzungen zu minimieren. Eine Restriktion, die stets verletzt wird, ist beispielsweise:

$$\left| \frac{f_i - z_i}{\omega_i} \right| \leq 0 \quad (3)$$

Das vorliegende Optimierungsproblem soll unter Verwendung der SRSM zum Vergleich mit einer *zielbasierten Zielfunktion* und über *zusätzliche Restriktionen* optimiert werden. Für die Zielgröße Motorhaubenmasse wird als Zielwert die minimale Masse m_{\min} gewählt, die sich für die minimal zulässigen Blechdicken und die minimal zulässige Höhe der Querrippe ergibt. Für die Zielgröße zulässiger Bauraum wird als Zielwert die maximale Höhe der starren Box z_{\max} (maximale z-Koordinate) verwendet. Als Gewichtungsfaktor wird der jeweilige Zielwert genommen. Für die Optimierung über zusätzliche Restriktionen werden die folgenden beiden zusätzlichen Restriktionen eingeführt:

$$\frac{\text{Masse}}{m_{\min}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\frac{z}{z_{\max}} \geq 1 \quad (5)$$

In Bild 7 und Bild 8 sind die Veränderungen der Zielgrößen und der HIC₁₅-Werte für beide Optimierungsroutinen dargestellt. Die Zielgrößen in Bild 7 sind normiert, als Verhältnis der Abweichung vom Zielwert zum Zielwert, dargestellt. Die Optimierung auf Basis der zielbasierten Zielfunktion benötigt bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums 178 Simulationen (11 Iterationsschritte). Demgegenüber benötigt die Optimierung über zusätzliche Restriktionen bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums nur 130 Simulationen (8 Iterationsschritte). Die Optima beider Algorithmen sind in Tabelle 3 dargestellt.

| | Startwert | zielbasierte Zielfunktion | zusätzliche Restriktionen |
|------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|
| t _{außen} [mm] | 0,7 | 0,5 | 0,501 |
| t _{innen} [mm] | 0,55 | 0,53 | 0,637 |
| h _{Rippe} [-] | 0 | -0,84 | 1 |
| z _{Box} [mm] | 583,5 | 570,85 | 577,03 |
| HIC _{15 erw} [-] | 956 | 984 | 969 |
| HIC _{15 kind} [-] | 1005 | 700 | 818 |
| m _{Motorhaube} [kg] | 11,91 | 9,66 | 10,43 |

Tabelle 3: Vergleich der Optima von beiden Zielfunktionsdefinitionen.

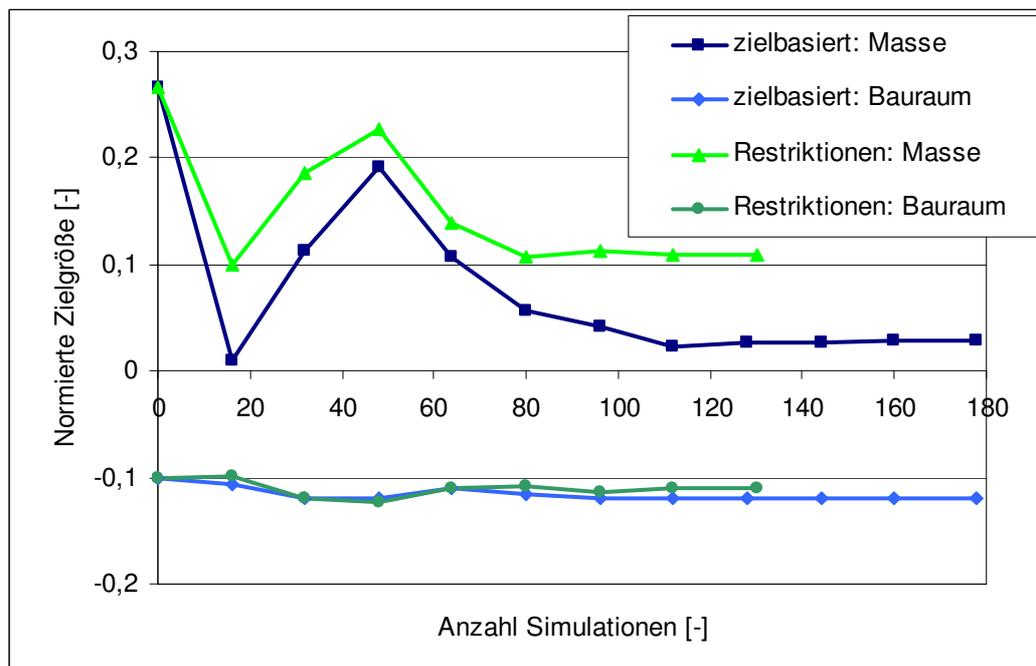


Bild 7: Veränderung der Zielgrößen im Laufe der Optimierung.

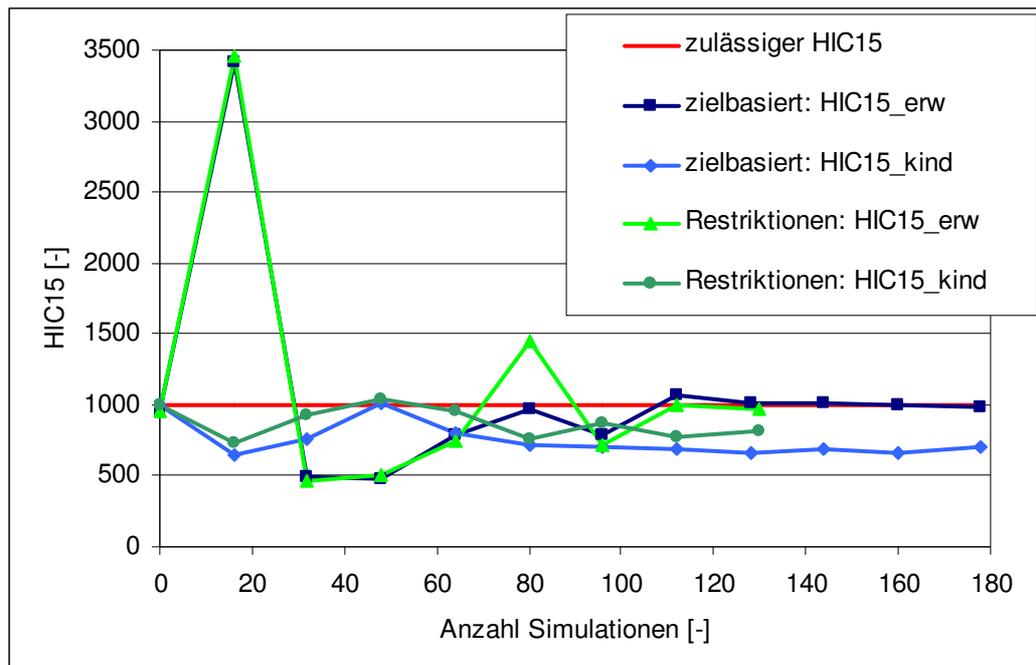


Bild 8: Veränderung der HIC_{15} -Werte im Laufe der Optimierung.

In beiden Optimierungsstudien wurde die Masse der Motorhaube verringert. Mit den zusätzlichen Restriktionen konnte die Masse um 12% gesenkt werden, mit der zielbasierten Zielfunktion um 19%. Im Gegenzug wurde, aufgrund der verringerten Motorhaubensteifigkeit, der zulässige Bauraum verkleinert. Bei der Optimierung über zusätzliche Restriktionen wurde der zulässige Bauraum um 6,5 mm verkleinert. Bei der Optimierung über die zielbasierte Zielfunktion trat eine Verringerung um 12,7 mm auf, so dass die untere Grenze des möglichen zulässigen Bauraums erreicht wurde. Die zulässigen Kopfverletzungskriterien konnten in beiden Studien eingehalten werden.

Das Optimierungsziel, ein Mittelmaß für die Steifigkeit der Motorhaube zu finden, so dass weder die Durchbiegung noch die Masse der Motorhaube auffällig groß werden, konnte besser mit den zusätzlichen Restriktionen als über die zielbasierte Zielfunktion erreicht werden. Bei der Optimierung über zusätzliche Restriktionen weichen beide Zielgrößen im Optimum gleich weit, um 11%, von ihrem Zielwert ab. Zwar weicht die Masse bei der Optimierung mit Hilfe einer zielbasierten Zielfunktion nur um 3% von ihrem Zielwert ab. Dafür muss aber eine Abweichung des zulässigen Bauraums vom Zielwert um 12% in Kauf genommen werden.

Bei der Optimierung über eine zielbasierte Zielfunktion wird die Zielgröße stärker gewichtet, die stärker auf die Änderungen der Designvariablen reagiert. Dieses Verhalten steht im Einklang mit der jeweiligen Definition der Zielfunktion. Während bei der zielbasierten Zielfunktion die einzelnen Zielgrößen zu einer Zielfunktion zusammengefasst sind, wird bei der Optimierung über zusätzliche Restriktionen jede Zielgröße in Form einer eigenen zusätzlichen Restriktion berücksichtigt.

5 Robustheitsanalyse

Abschließend soll exemplarisch die Robustheit des Optimums aus Abschnitt 4 bewertet werden. Unter Robustheit ist zu verstehen, wie anfällig das ermittelte Ergebnis auf kleine Änderungen der Designvariablen reagiert. Die Robustheitsanalyse wird beispielhaft für das Optimum der Optimierung über zusätzliche Restriktionen durchgeführt. Sie erfolgt in Form einer Metamodell-basierten Monte-Carlo-Studie. Bei dieser Art von Studie wird für eine große Anzahl an zufällig ausgewählten Designs der Wert der Zielgröße bestimmt, um anschließend daraus den Mittelwert und die Standardabweichung der Zielgröße zu berechnen. Dazu werden die Mittelwerte, die Standardabweichungen und die Form der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die einzelnen Designvariablen vorgegeben.

Im Gegensatz zur üblichen Form der Monte-Carlo-Studie werden bei der Metamodell-basierten Monte-Carlo-Studie die Werte der Zielgröße nicht direkt berechnet. Stattdessen werden die Werte der Zielgröße aus einem Approximationsmodell, dem Metamodell, abgelesen. Dadurch wird die erforderliche Berechnungszeit verkürzt. Es ist jedoch zu beachten, dass das Metamodell nur eine

Approximation darstellt. Daher muss der Approximationsansatz sorgfältig ausgewählt werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen. Das Metamodell kann entweder aus einer vorgeschalteten Optimierungsstudie auf Basis einer Approximationsmethode entnommen werden oder anhand ausgewählter Designs neu ermittelt werden.

In diesem Beispiel erfolgt die Monte-Carlo-Studie auf Basis von 10^6 zufällig ausgewählten Designs. Als Wahrscheinlichkeitsverteilung wird für alle Designvariablen eine Normalverteilung und als Mittelwert das in Abschnitt 4 ermittelte optimale Design verwendet. Als Standardabweichungen werden für die beiden Blechdicken ($t_{\text{außen}}$ und t_{innen}) und für die Shapevariable der Querrippe h_{Rippe} fünf Prozent des jeweiligen Mittelwerts genommen. Aufgrund des großen Startwerts im Vergleich mit der zulässigen Bandbreite wird für die Höhe der starren Box (z-Koordinate z_{Box}) eine kleinere Standardabweichung definiert. Die Standardabweichung der Höhe der starren Box beträgt 2 mm.

Die Monte-Carlo-Studie wird mit zwei unterschiedlichen Metamodellen durchgeführt. Bei der ersten Studie werden als Metamodell lineare Polynome, bei der zweiten Studie wird ein neuronales Netz gewählt. Der Vorteil von neuronalen Netzen als Approximationsansatz liegt darin, dass auch hoch nicht lineare Designräume sehr gut approximiert werden können.

Bei der Verwendung eines linearen Approximationsansatzes für eine nicht lineare Problemstellung ist es nicht sinnvoll, ein Metamodell für den gesamten Designraum zu erzeugen. Da die Werte der Zielgröße in diesem Fall sehr stark vom Approximationsmodell abweichen können, ist es sinnvoller, sich auf das Gebiet um das Optimum zu beschränken. Daher werden im vorliegenden Fall für die Erstellung der Metamodelle nur die Designs aus dem Teilgebiet genommen, das in der letzten Iterationsschleife der Optimierungsstudie aus Abschnitt 4 untersucht wurde. Darüber hinaus wird das optimale Design miteinbezogen, und es werden noch zehn weitere Punkte in diesem Teilgebiet mit dem DOE Space Filling ausgewählt. Auf diese Weise sollen die negativen Einflüsse von lokalen Extrema, wie beispielsweise bei verrauschten Signalen, verringert werden.

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen für die beiden Zielgrößen Motorhaubenmasse und zulässiger Bauraum angegeben. Zusätzlich dazu wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen für die beiden Kopfverletzungswerte ermittelt. Auf Basis dieser Werte muss das erzielte Ergebnis für die durchgeführte Studie als nicht robust bezeichnet werden. Der HIC₁₅-Wert für den Erwachsenenkopf weist unter Verwendung beider Metamodelle eine Standardabweichung auf, die mehr als 40% des zugehörigen Mittelwerts beträgt. Damit können schon kleine Änderungen in den Designvariablen große Veränderungen der Kopfverletzungswerte bewirken. Bezüglich der beiden Zielgrößen Motorhaubenmasse und zulässiger Bauraum kann das Optimum dagegen als robust bezeichnet werden. Dies liegt daran, dass die beiden Zielgrößen nur linear von den vier Designvariablen abhängen. Wohingegen die Kopfverletzungskriterien nicht linear von den vier Designvariablen abhängen.

Die beiden Metamodelle liefern lediglich für die Kopfverletzungskriterien unterschiedliche Ergebnisse. Dies ist ebenfalls mit der linearen Abhängigkeit der Zielgrößen und der nicht linearen Abhängigkeit der Kopfverletzungswerte von den Designvariablen zu begründen. Während ein Metamodell auf Basis von linearen Polynomen nur für lineare Problemstellungen sinnvoll geeignet ist, ist ein Metamodell auf Basis eines neuronalen Netzes auch für nicht lineare Aufgabenstellungen gut geeignet.

| | | Lineare Polynome | Neuronales Netz |
|------------------------------|--------------------|------------------|-----------------|
| HIC ₁₅ erw [-] | Mittelwert | 1120 | 1070 |
| | Standardabweichung | 562 | 446 |
| HIC ₁₅ kind [-] | Mittelwert | 820 | 822 |
| | Standardabweichung | 46,5 | 75,6 |
| m _{Motorhaube} [kg] | Mittelwert | 10,44 | 10,44 |
| | Standardabweichung | 0,358 | 0,358 |
| z _{Box} [mm] | Mittelwert | 577,165 | 577,165 |
| | Standardabweichung | 1,997 | 1,997 |

Tabelle 4: Ergebnisse der beiden Metamodell-basierten Monte-Carlo-Studien.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Studien konnte gezeigt werden, dass es bei der Verwendung von numerischen Optimierungsroutinen hinsichtlich der Anforderung Fußgängerschutz wesentliche Einflüsse durch die Auswahl des Optimierungsalgorithmus und die Definition der Optimierungsaufgabe gibt. Ein wesentliches Ziel der Studie war es dabei darzustellen, wie stark die Güte der Ergebnisse von einer sinnvollen Definition der Designvariablen und deren Bandbreiten

abhängt. Anhand einer multidisziplinären und multikriteriellen Optimierung konnte darüber hinaus gezeigt werden, wie stark die Definition der Zielfunktion das Ergebnis der Optimierungsrechnung beeinflusst. Des Weiteren hat die abschließende Robustheitsuntersuchung gezeigt, dass sich die Auswahl des Metamodells auf die Robustheitsbewertung auswirken kann. So konnte insgesamt herausgestellt werden, wie wichtig eine detaillierte Betrachtung im Vorfeld der Aufgabenstellung ist.

7 Ausblick

Ein wesentliches Ziel der Weiterentwicklung von Prozessen unter Einbindung der numerischen Optimierung ist es, die Zeitschiene zur Erarbeitung der Lösung möglichst weit zu straffen. Von besonderer Bedeutung ist dies hinsichtlich der Anforderung Fußgängerschutz, da die konstruktive Detaillierung bereits zu einem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess beginnen muss, an dem insgesamt nur ein geringer Detaillierungsgrad für das Fahrzeugmodell vorliegt. Bewertungen hinsichtlich des Potenzials für den Fußgängerschutz müssen daher sehr kurzfristig und unter Berücksichtigung detailgetreuer geometrischer Verhältnisse erfolgen.

Beispielsweise ergeben sich durch die Möglichkeiten der parametrischen Konstruktion mit CATIA V5 in diesem Kontext neue methodische Ansätze. Es liegt nahe, die Shapevariationen, die im obigen Beispiel unter Verwendung der Morphing-Funktionalität durchgeführt wurden, durch eben diese Parametrisierung in CATIA V5 zu substituieren. Im Rahmen einer derartigen Routine werden entsprechend Bild 9 die parametrisierten CAD-Daten an ein Batchmeshing-Werkzeug übergeben und das vernetzte Modell unter Berücksichtigung eines oder mehrerer Lastfälle mit dem relevanten FE-Solver berechnet. Ein Parameteroptimierer übergibt auf Basis des errechneten Ergebnisses die geänderten Designvariablen an CATIA V5, so dass ein modifizierter Stand dem Optimierungskreislauf zugeführt wird. Als Ergebnis steht schließlich ein Konstruktionsmodell, das unmittelbar zur Weiterentwicklung des Konstruktionsstands genutzt werden kann. Dabei sind exemplarisch die folgenden Anforderungen zu berücksichtigen:

- Detaillierungsgrad der CAD-Daten
- Detaillierungsgrad von Fügeinformationen
- Abhängigkeiten zwischen Lastfalldefinition und Geometrie

Das Ziel aktueller Untersuchungen der CDH AG ist es, eine prozesstaugliche Integration dieses Optimierungsprozesses, zum Beispiel zur geometrischen Gestaltung einer Motorhaube (inkl. Verstärkungsbleche), zu erzielen.

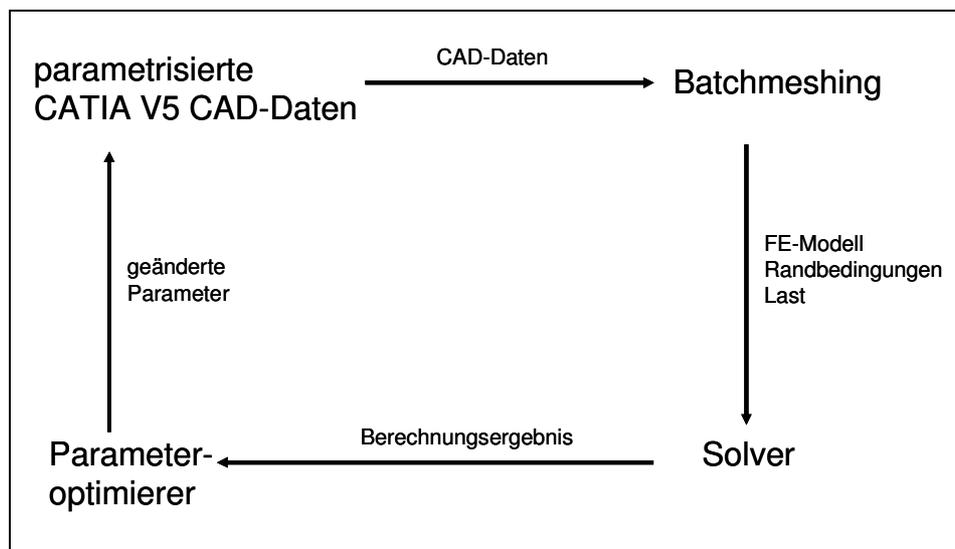


Bild 9: Shape-Optimierung unter Einbindung von CATIA V5 Konstruktionsdaten.

8 Literatur

- [1] Bachem, H.K.: „Schutzpotential von realisierbaren Lösungen zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz“, Forschungsgesellschaft Kraftfahrtwesen Aachen mbH, 2005
- [2] Blumhardt, R.: „Numerische Optimierung des Crashverhaltens von Fahrzeugstrukturen und -komponenten“, Shaker Verlag, Aachen, 2002
- [3] 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
- [4] 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
- [5] EUROPEAN COMMISSION: “ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2006/2”, Brüssel, 2006
- [6] LS-OPT Version 3.1, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA, 2000-2006
- [7] LS-DYNA Version 970, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA, 1992-2003

