

Genetische Optimierung von punktgeschweißten Strukturen im Fahrzeugbau

Dr.-Ing. Johannes Will, DYNARDO/CAD-FEM, Weimar

Dipl.-Ing. Toros Akgün, MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG, Graz

Prof. Dr. techn. Christian Bucher, DYNARDO/Bauhaus Universität, Weimar

Dipl.-Ing. Jörg Riedel Bauhaus Universität Weimar

Summary

Highly nonlinear multidisciplinary optimization with a large number of binary variables (spot welds) can be handled successfully utilizing genetic optimization algorithms combined with robustness analysis. The genetic optimization procedure can consider many arbitrarily defined constraints or objectives. In many cases, only a few analyses are required to identify most important parameters or constraints, and to improve them. In particular, if the start design is far from optimal, significant design improvement can be achieved with little effort. For nonlinear problems it is essential to keep the optimal design robust. It is therefore mandatory to analyze the robustness of the optimal design with respect to the most important random variations of the parameters. By introducing constraints relevant for robustness, it is possible to automatically keep the design in the robust range.

Keywords

multidisziplinäre Optimierung, Stochastik, Robustheitsbewertung, Crash, Schweißpunkte, Genetik

0. Einführung

Eine der größten Herausforderungen im CAE-Umfeld der Fahrzeugindustrie ist das zunehmende virtual Prototyping möglichst umfangreicher Test- und Analyseprogramme von Bauteilen, Bauteilgruppen oder Gesamtfahrzeugen. Multidisziplinäre Optimierung von Gewicht, Kosten oder Performance ist dabei ein wichtiger Bestandteil. Weil notwendige Simulationsprozesse immer komplexer werden, wird eine Automatisierung unter Verwendung mathematischer/stochastischer Optimierungsmethoden zwingend notwendig. Die Robustheit von Fahrzeugen gegenüber in Natura vorhandenen Streuungen ist vor allem für Crashberechnungen ein weiteres wesentliches Kriterium für die Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit. Können durch Streuungen initiierte Effekte signifikant auf die Systemantwort durchschlagen, ist eine Robustheitsbewertung unbedingt notwendig. Dabei erhöht das virtual Prototyping die Notwendigkeit stochastischer Berechnungen. Neben unvermeidlichen Streuungen von Belastungen müssen die im Hardwareversuch noch vorhandenen Streuungen der Konstruktion (Material, Geometrie) im virtual Prototyping berücksichtigt werden. Performance, Kosten oder gewichtsoptimierte Strukturen, optimiert ohne Berücksichtigung vorhandener Streuungen, tendieren allerdings häufig dazu, Robustheit zu verlieren. Dann müssen schon bei der Optimierung wichtige Gesichtspunkte unvermeidlicher Streuungen berücksichtigt werden. Deshalb ist aus Sicht der optimalen Auslegung die angemessene Berücksichtigung von unvermeidlichen zufälligen Streuungen ein besonders wichtiger Punkt. An Hand des folgenden Beispiels wird ein möglicher Simulationsablauf mit dem Softwareprodukt OptiSLang [1] gezeigt und Methoden robustheitsrelevanter genetischer Optimierung diskutiert werden.

1. Multidisziplinäre Optimierung und Robustheitsbewertung im Fahrzeugbau

1.1 Multidisziplinäre Optimierung

Wegen der ausgeprägten interdisziplinären Wechselwirkungen zwischen Crash, Festigkeit, Akustik oder Lebensdauer ist ein Optimierungsprozess unter integrierter Beteiligung aller Disziplinen der Fahrzeugauslegung notwendig. Seit einigen Jahren werden Optimierungsplattformen entwickelt, an die eine beliebige Anzahl von Simulationsprogrammen via ASCII-Inputdeck angeschlossen werden kann. Nach Definition einer kompatiblen Parametrisierung der Optimierungsparameter in den diversen Solvern können multidisziplinäre Aufgabenstellungen bearbeitet werden. Klassischerweise werden dabei heute multidisziplinäre Optimierungsprobleme unter Berücksichtigung von Crashlastfällen bis maximal 10 **kontinuierlichen** Optimierungsparametern mit Gradientenverfahren oder Response Surface Approximationen erfolgreich bearbeitet.

Wenn allerdings die Optimierungsparameter diskret (z. B. Blechdicken oder unterschiedliche Airbags) binär (z.B. Schweißpunkte) sind, der binäre/diskrete Charakter auf die Systemantwort durchschlägt oder die Anzahl der Optimierungsparameter sich nicht sinnvoll auf einige Wenige begrenzen lässt, lassen sich die Aufgabenstellungen oft nur unzureichend mit Gradientenverfahren oder Response Surface Strategien bearbeiten. Als Alternative bieten sich dann **stochastische Suchstrategien**, insbesondere Genetische (GA) und Evolutionäre Algorithmen (EA) an. DYNARDO und die Bauhaus Universität haben für obige Aufgabentypen **evolutionäre/genetische Optimierungsstrategien (EA/GA)** entwickelt [5,6] sowie mit MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik die Eignung für den multidisziplinären Optimierungsprozess von punktgeschweißten Blechstrukturen untersucht.

1.1.1 Genetische Algorithmen zur Optimierung punktgeschweißter Strukturen

GA/EA wenden natürliche Gesetzmäßigkeiten der Evolution und der Genetik für technische Aufgabenstellungen an. Der Designraum wird dabei teilweise gezielt, teilweise zufällig nach besseren Designs abgesucht. Im Gegensatz zu Gradientenverfahren oder Response Surface Approximationen können mit genetischen Strategien kontinuierliche, diskrete und binäre Optimierungsparameter gleichzeitig bearbeitet werden. GA/EA sind bezüglich der Anzahl der Parameter, Nebenbedingungen oder konkurrierenden Zielfunktionsbestandteile unempfindlicher. DYNARDO hat schon erfolgreich Aufgabenstellungen mit bis zu 30.000 Optimierungsparametern und Nebenbedingungen bearbeitet [6]. Weil GA/EA stochastische Suchstrategien sind, besitzen sie eine langsame Konvergenz gegenüber einem globalen Optimum. Oft ist das Auffinden eines globalen Optimum allerdings zweitrangig, vielmehr ist von Bedeutung, ob eine gewünschte Designverbesserung mit einer

beherrschbaren Anzahl von Solverdurchläufen erzielt werden kann. Zielstellung von EA/GA ist dann nicht das Auffinden von Optima, sondern eine **schnelle Designverbesserung**.

Um eine rasche Verbesserung des Designs zu erreichen, wird versucht:

- alles vorhandene Expertenwissen zu berücksichtigen. (Startgeneration, Randbedingungen, Wichtungen der Zielfunktionsbestandteile)
- stochastische Komponenten (Startgeneration, Mutation) zu integrieren.
- mit speziellen genetischen Algorithmen für Selektion (Wer darf sich fortpflanzen), Rekombination (Wie erfolgt die Fortpflanzung) und Mutation (Wie werden zufällige Änderungen der Gene berücksichtigt) ein kollektives Gedächtnis aufzubauen, das dominante Parameter schnell identifiziert und verbessert.

Dabei ist es von Vorteil, alle vorhandenen Restriktionen (Steifigkeit, Crash, Fatigue) und alle Wünsche an die Designverbesserung (Gewicht, Crashperformance, Werkzeug- und Materialkosten) durch Nebenbedingungen oder Zielfunktionsbestandteile bei der Bewertung der Fitness (Welches ist das beste Design) zu berücksichtigen. Oft lassen sich schon nach wenigen Generationen Aussagen über dominante Restriktionen oder wahrscheinliche Designverbesserungen treffen. Die Berechnung kann dabei jederzeit unterbrochen und modifiziert werden. Ein Restart oder ein Replay (Neubewertung aller bisherigen Designs) ist jederzeit möglich. GE/EA kann sehr effizient parallelisiert werden und ist gegenüber einem Hardware- oder Softwarecrash sehr robust.

1.2 Robustheitsbewertung

Zur Bewertung der Robustheit eines gefundenen optimalen Designs wird eine Gruppe (Sampleset) zufälliger Realisierungen der Struktur mit möglichen (ggf. zufälligen) Belastungen erzeugt und hinsichtlich Zielfunktion und Restriktionen analysiert. OptiSLang nutzt für die Robustheitsanalyse die umfangreichen stochastischen Möglichkeiten des Programmsystems SLang /3,4/. Einige grundlegende Verfahren der Stochastik zur Erzeugung des Sampleset beruhen auf Varianten der Monte-Carlo-Simulation. In OptiSLang stehen Plane Monte Carlo und Latin Hypercube als Samplingverfahren zur Verfügung. Mit geeigneten Verteilungsfunktionen (Normal-, Lognormal-, abgeschnittene Normal-, Weibull-, Gleichverteilung oder diskrete Verteilung) müssen die wichtigsten Charakteristika der zufällig streuenden Parameter beschrieben werden.

Ziel der Robustheitsbewertung ist es, mögliche Instabilitäten im Design, die z.B. im Laufe einer Optimierung entstehen können, aufzudecken. Zur Identifikation von Robustheitsproblemen wird der Sampleset mit statistischen Mitteln auf Auffälligkeiten bezüglich der Robustheit der Antwort, das heißt, der Sensivität/Stabilität der Systemantwort gegenüber vorhandenen zufälligen Streuungen von Inputparametern (Lasten, Randbedingungen, Materialwerte) untersucht. Dabei sollten Auffälligkeiten von einzelnen Parametern, Parameterpaaren sowie von Parametergruppen untersucht werden:

Statistische Bewertung einzelner Parameter

- Mittelwert und Variationskoeffizient sowie Histogramme der Eingangsgrößen. Dies dient zur statistischen Absicherung der gezogenen Stichproben. Die Verteilungen werden mit den Sollverteilungen verglichen.
- Mittelwert und Variationskoeffizient der Ausgangsgrößen. Dies erlaubt eine Beurteilung der Sensitivität der Systemreaktion. Auffällig sind Variationskoeffizienten von Ausgangsgrößen, die wesentlich größer als die der Eingangsgrößen sind.
- Histogramme der einzelnen Ausgangsgrößen. Dies erlaubt das Erkennen von Clusterbildungen, die auf Verzweigungen hinweisen können.

Statistische Bewertung von Parameterpaaren

- Paarweise Anthill-Plots von Eingangs/Ausgangsvariablen. Dies ermöglicht die visuelle Beurteilung vorhandener Häufungen (Cluster) von Parameterkombinationen. Ebenso können nichtlineare Zusammenhänge erkannt werden.
- Korrelationsmatrix aller Eingangs- und Ausgangsgrößen. Daraus kann auf einen möglichen linearen Zusammenhang zwischen den Variablen geschlossen werden.

Statistische Bewertung von Parametergruppen

- Principal Component Analysis (PCA) der Korrelationsmatrix. Die Eigenwertzerlegung der linearen Korrelationsstruktur zeigt die dominierenden Korrelationsmodi von Parametergruppen. Dies erlaubt das Erkennen dominierender zufälliger Komponenten in den Ausgangsgrößen und deren Verknüpfung mit den Eingangsgrößen.

2.0 Genetische Optimierung einer Boxbeamstruktur

2.1 Aufgabenstellung

Zur Verifikation einer geeigneten Optimierungsmethode wird eine Boxbeamstruktur untersucht. MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik hat die Boxbeamstruktur voroptimiert und über die Performance des Boxbeam liegen umfangreiche Testergebnisse vor. Die punktgeschweißte Boxbeamstruktur soll hinsichtlich Gewicht, Anzahl der Schweißpunkte, Steifigkeit (Verformungen, Biege-Torsionsmode), Spannungen (Lebensdauer) und der Crashperformance (Stauchlänge, Energieabsorption) optimiert werden.

Es werden Modalanalyse sowie statische Biege- und Torsionslastfälle mit ANSYS berechnet. Hier werden die ersten beiden Eigenmoden sowie maximale Verformungen und Spannungen der Biege- und Torsionslastfälle bewertet. Das Crashverhalten wird mit LS-DYNA berechnet. Die maximale Stauchlänge, die Gleichmäßigkeit der Energieabsorption und die Robustheit werden bewertet. Zur Optimierung und Robustheitsbewertung wird die Optimierungsplattform OptiSLang /1/ verwendet.

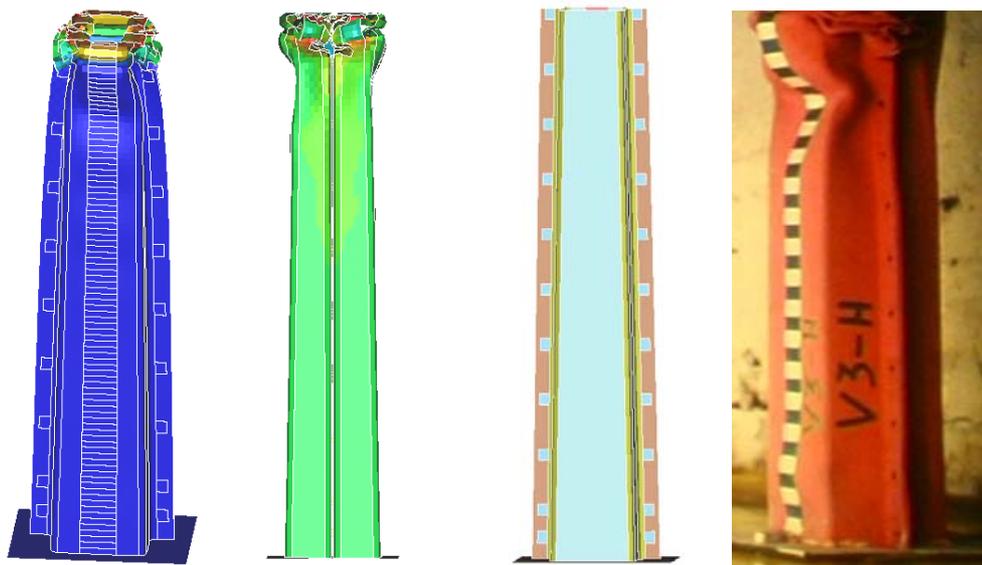


Fig. 1 links: Referenzstruktur im Lastfall Crash
rechts: Crashtest eines Boxbeam

Design	Anzahl SP Blechdicke	Standard- abweichung Kontaktkraft	Stauch- länge	Biege- Torsions- mode	Biege- Torsions- spannung	Biege- Torsions- verformung
Referenz	22 / 1.5	25 896	7.45	537/620 Hertz	140/130 N/mm ²	2.61/mm

Tab. 1 Performance der Referenzstruktur

Das voroptimierte Design (Fig. 1) hat 22 Schweißpunkte mit einem relativ konstanten Abstand von 50 mm und eine Blechstärke von 1.5 mm. Die Performance der Referenzstruktur bezüglich der zu optimierenden Eigenschaften betrug. Um einen großen Designraum möglicher Designs zu untersuchen, wurde eine Ausgangsstruktur mit 40 Schweißpunkten generiert. Die Schweißpunkte des

symmetrischen Boxbeam wurden paarweise parametrisiert. Der mögliche Designraum wird dann mit insgesamt 20 binäre Variablen (paarweise Schweißpunkte) und einer diskreten Variable (5 Blechstärken 1.5, 1.4, 1.3, 1.2 und 1.1 mm) definiert und umfasst mehr als 5 Millionen mögliche Designs.

Design	Anzahl SP / Blechdicke	σ -Kontaktkraft	Stauchlänge	Biege-Torsionsmode	Biege-Torsionsspannung	Biege-Torsionsverformung
Start Design	40 / 1.5	26 178	7.2	555/622 Hertz	157/165 N/mm ²	2.80/1.00 mm

Tab. 2 Performance Start Design

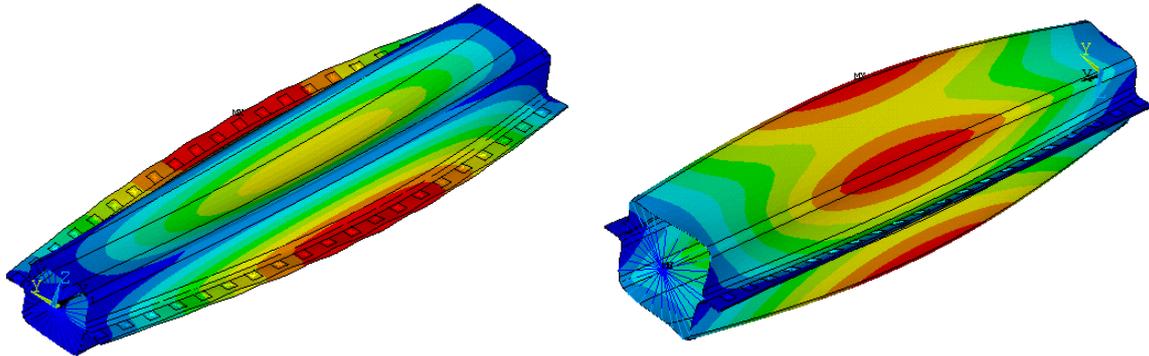


Fig. 2 Start Design links: Biegemode, rechts: Torsionsmode

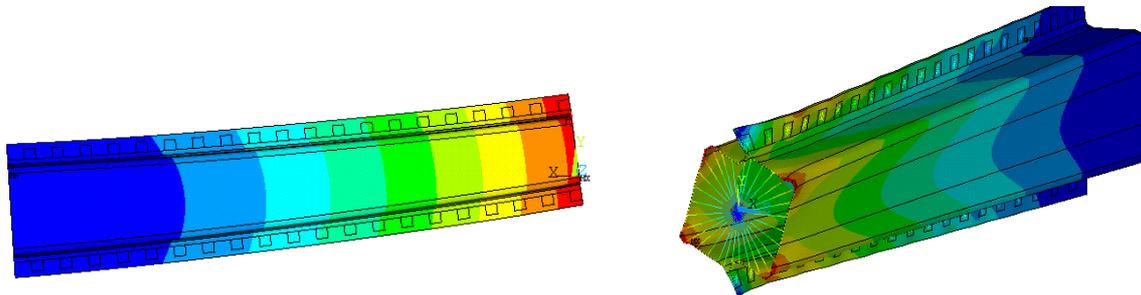


Fig. 3 Verformungen Start Design links: Lastfall Biegung, rechts: Lastfall Torsion

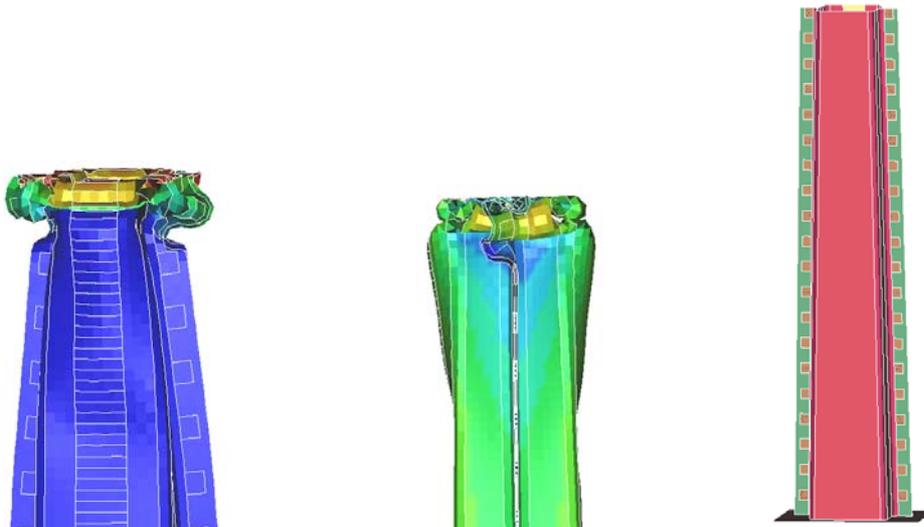


Fig. 4 Start Design im Lastfall Crash

In den Abbildungen 2-4 ist die Performance des Ausgangsdesigns der Optimierung abgebildet. Die Zielfunktion (Fitnessfunktion) der Optimierung setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- möglichst große Gewichtseinsparung (möglichst kleine Wandstärke)
- möglichst kleine Anzahl Schweißpunkte
- möglichst Kontinuität der Energieabsorption beim Crash
- Stauchlänge nicht größer als 15 cm
- sowie aus Penaltytermen bei Verletzung von Nebenbedingungen Steifigkeit/NVH

Die Kontinuität der Energieabsorption wird über die Standardabweichung der resultierenden Kontaktkraft bewertet. Für eine kontinuierliche Energieabsorption wird eine minimale Standardabweichung angestrebt.

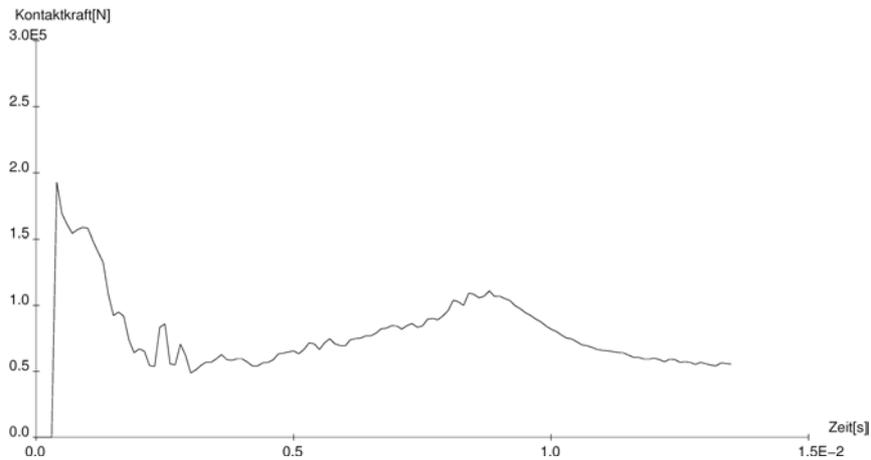


Fig. 5 resultierende Kontaktkraft des Referenzdesigns im Lastfall Crash

Die Zielfunktionsbestandteile wurden bezüglich der Ausgangsstruktur auf kg Gewicht (40 Schweißpunkte = 1kg, Standardabweichung Ausgangsstruktur = 1kg, Stauchlänge Ausgangsstruktur = 0kg) normiert.

$$\begin{aligned}
 \text{Zielfunktion/Fitness} = & 2 * \text{Gewicht} \\
 & + \frac{\text{Anzahl Schweißpunkte}}{40} \\
 & + \frac{\text{Standardabweichung Kontaktkraft}}{26187} \\
 & + \frac{(\text{Stauchlänge} - 0.072)^2}{(0.15 - 0.072)^2} \\
 & + \text{Penaltyterm aus Nebenbedingungen Steifigkeit/NVH}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Das Gewicht als Hauptoptimierungsziel wird mit einem Wichtungsfaktor von 2 belegt.

Die Erhöhung der Stauchlänge wird mit einer quadratischen Funktion auf die Fitness addiert. Das Ausgangsdesign hat mit einer Stauchlänge von 0.072 m keinen Beitrag zur Fitnessfunktion. Bei einer Stauchlänge von 0.15 m wird die Fitness mit 1kg bestraft. Bei größeren Stauchlängen steigt der Strafterm quadratisch an.

Als Nebenbedingungen werden die ersten beiden Eigenmoden der Modalanalyse (1. Mode > 450 Herz, 2. Mode > 550 Herz) sowie die max. Verformungen der Struktur ($\geq 4\text{mm}$) und die max. Spannungen der Schweißpunkte ($\geq 250 \text{ N/mm}^2$) im statischen Lastfall Biegung und Torsion restringiert. Bis 10 % Überschreitung der Nebenbedingungen (1 & 2 Mode. Verschiebungen, Spannungen) werden die normierten Überschreitungen aller Nebenbedingungen auf den Zielfunktionswert addiert. Werden Nebenbedingungen > 10 % überschritten, werden Kliffs (Strafterme) zu je 10 kg für Überschreitung von den Modalanalyse, Biegung & Torsion auf die Zielfunktion addiert.

2.2 Optimierungsstufe 1

Für die Bearbeitung der Problemstellung waren die Rechenzeiten des Crashlastfalls mit ca. 6 Stunden auf einer PC-CPU ausschlaggebend. Es wurde ein Zielkorridor von 50 bis 100 Berechnungen für die Optimierung angestrebt. Deshalb wurde festgelegt, 5 Generationen zu je 12 Designs zu berechnen. Die Startgeneration wurde stochastisch unter Annahme einer Gleichverteilung der Optimierungsvariablen erzeugt. Zur Reproduktion der Designs in der genetischen Optimierung wird das Crossover Verfahren mit 50 % Austauschrate verwendet. Um eine schnelle Designverbesserung zu erreichen, wird ein Elit mit *strengem Elitismus* (90 % Selektionsdruck) berücksichtigt /1/.

Das beste Design wurde nach 58 Designbewertungen in der 5. Generation aufgefunden. Verglichen mit der Referenzstruktur konnte ein Design mit 27 % Einsparung von Schweißpunkten und einer Gewichtseinsparung von 13 % gefunden werden (Blechdicke 1.3 mm). Die Standardabweichung der resultierenden Kontaktkraft (Gleichmäßigkeit der Energiedissipation) konnte um 24 % verbessert werden. Die Stauchlänge im optimierten Design liegt unterhalb 10 cm.

Die erste Optimierungsstufe zeigte, dass die Anforderungen an die Crashperformance das Optimierungsproblem dominieren und Designs mit den Wandstärken 1.1 und 1.2 bezüglich der Crashperformance nicht konkurrenzfähig sind. Die Nebenbedingungen aus den statischen und dynamischen Lastfällen in konkurrenzfähigen Designs mit 1.3, 1.4 und 1.5 mm dicken Blechen sind sicher erfüllt.

Design	Anzahl SP / Blechdicke	Standardabweichung Kontaktkraft	Stauchlänge	Biege-Torsionsmode	Biege-Torsionsspannung	Biege-Torsionsverformung
Referenz	22 / 1.5	25 896	7.45	537/620 Hertz	140/131 N/mm ²	2.61/0.65 mm
Startdesign	40/1.5	26 187	7.2	555/622 Hertz	157/165 N/mm ²	2.60/0.60 mm
Best_Design1	16/1.3	19 636	9.7	466/578 Hertz	131/198 N/mm ²	3.04/1.31 mm
gegenüber Referenz (100%)	27%/13 %	24 %	30 %	alle NB erfüllt	alle NB erfüllt	alle NB erfüllt

Tab. 3 Ergebnis 1. Optimierungsstufe

Schon das Berechnen des aufgefundenen „optimierten Design“ auf einer anderen Hardwareplattform zeigte jedoch im Crashlastfall Robustheitsprobleme auf. Die Systemantwort war unter Linux wesentlich schlechter als unter SGI (Fig.6).

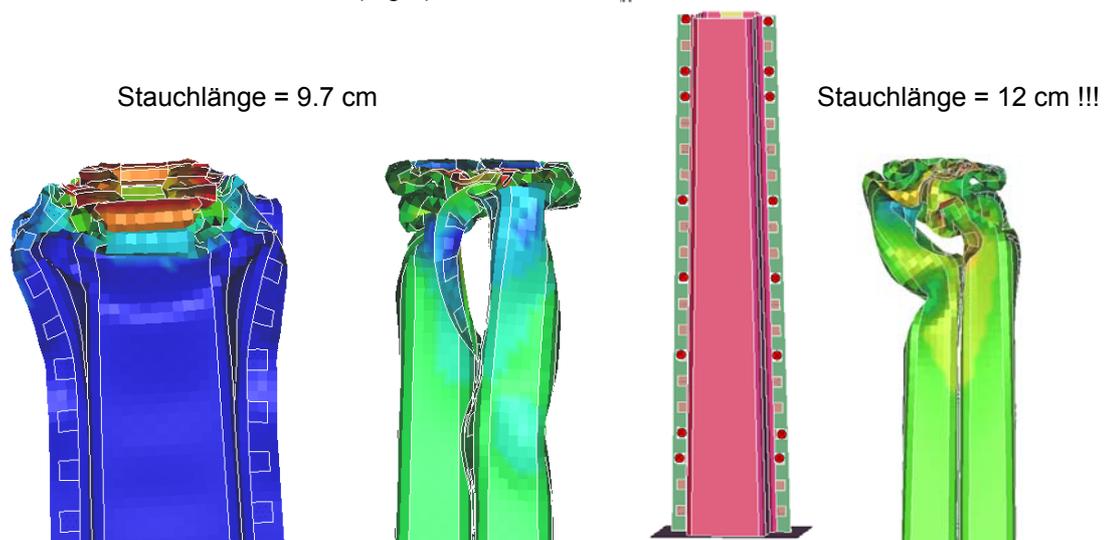


Fig. 6 Best_Design1 im Lastfall Crash, links: SGI, rechts Linux

Es wurde auf eine detaillierte Untersuchung, ob physikalische oder numerische Instabilität Hauptursache des Robustheitsproblems sind, verzichtet. Aus Sicht der Robustheitsbewertung ist das aufgefundene „Optimum“ sehr instabil. Ähnliche Robustheitsprobleme sind tendenziell sehr häufig bei Optimierungen von Crashlastfällen oder ähnlich stark nichtlinearen Problemen zu erwarten.

Zum Auffinden eines auch bezüglich der Robustheit besseren (optimaleren) Designs wird es notwendig, wichtige Robustheitseffekte schon bei der Optimierung zu berücksichtigen. Algorithmisch ist eine Verknüpfung von genetischer Optimierung und Robustheitsbewertung möglich. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass dann Robustheitsbetrachtungen (wie unter Kap. 2.4) zahlreicher Optimalitätskandidaten notwendig sind und eine automatische Übertragung der statistischen Ergebnisse auf die genetische Optimierung (Fitnessfunktion, Nebenbedingungen) definiert werden muss.

Um einen Zielkorridor von etwa 50 bis 100 Simulationsläufen für die Optimierung einzuhalten, wurden deshalb ingenieurmäßig robustheitsrelevante Nebenbedingungen in die genetische Optimierung eingeführt. Damit sollte erreicht werden, dass angestrebte Designverbesserungen in robusteren Bereichen des Designraumes gesucht werden. Das Design dadurch von den in den robustheitsrelevanten Nebenbedingungen erfassten Instabilitäten einen ausreichenden Abstand besitzt.

2.3 Optimierungsstufe 2

Bei der Boxbeamstruktur treten Instabilitätsprobleme durch das Ausknicken des Profils in den Querschnittsachsen auf. Diese Tendenz verstärkt sich mit zunehmender Stauchlänge. Eine erwünschte robuste Crashperformance ist mit einem gleichmäßigen Auffalten des Profils und einer kleinen Stauchlänge verbunden. Um ein robusteres Design zu erzwingen, wurde deshalb die Restriktion der Stauchlänge in der Bewertung der Fitness verschärft. Schon ab 10 cm wurde die Fitnessfunktion mit einem 1kg Gewicht bestraft.

$$\text{neuer Term der Fitness für die Stauchlänge: } \frac{(Stauchlänge - 0.072)^2}{(0.10 - 0.072)^2} \quad (2)$$

Es wurden wiederum 5 Generationen zu je 12 Designs berechnet. Die Einstellungen der genetischen Optimierung wurden analog Optimierungsstufe 1 übernommen.

Design	Anzahl SP Blechdicke	Standard- abweichung Kontaktkraft	Stauch- länge	Biege- Torsions- mode	Biege- Torsions- spannung	Biege- Torsions- verformung
Referenz	22 / 1.5	25 896	7.45	537/620 Hertz	140/131 N/mm2	2.61/0.65 mm
Startdesign	40/15	26 187	7.2	555/622 Herz	157/165 N/mm2	2.60/0.60 mm
Best_Design2 3. Generation	18/1.4	23 913	7.8	460/590 Herz	130/208 N/mm2	2.84/0.90 mm
Verbesserung gegenüber Referenz 100%	18% / 7 %	8 %	5 %	alle NB erfüllt	alle NB erfüllt	alle NB erfüllt

Tab. 4 Ergebnis 2. Optimierungsstufe

Wiederum konnte nach relativ wenigen Designbewertungen (33) eine deutliche Designverbesserung erzielt werden. Die Blechdicke 1.3 mm war mit verschärfter Stauchlänge nicht mehr in den best Designs konkurrenzfähig. Verglichen mit der Referenzstruktur konnte ein Design mit 14 % Einsparung von Schweißpunkten und einer Gewichtseinsparung von 7 % gefunden werden (Blechdicke 1.4 mm). Die Standardabweichung der resultierenden Kontaktkraft (Gleichmäßigkeit der Energiedissipation) konnte um 8 % verbessert werden. Die Stauchlänge ist erwartungsgemäß deutlich kleiner und liegt nur um 5 % über der Stauchlänge des Referenzdesigns.

Es konnten stabile Schweißpunktmuster in den best Designs im oberen Faltungsbereich des Boxbeam beobachtet werden (1./4./5./6. Schweißpunkt). Die Schweißpunkte im mittleren und unteren Bereich variierten in den best Designs noch relativ stark. Weil deren Sensivität auf das Crashverhalten im oberen Bereich schwach ist, können diese Gene mit nur 50 Berechnungen nicht optimiert werden.

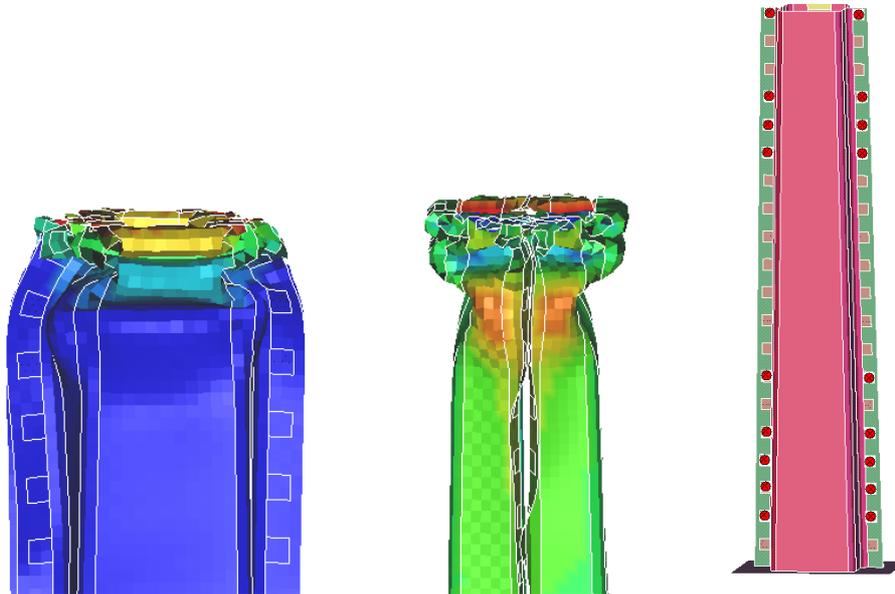


Fig. 7 Best_Design2 im Lastfall Crash

Nach der Identifikation optimierter Schweißpunktanordnung im oberen Bereich des Boxbeam aus der Auswertung der 2. Optimierungsstufe sowie unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen (max. Schweißpunktabstände) wurden per Hand zwei nahezu symmetrische Design definiert und untersucht:

- stabile Schweißpunktpaare der Best_Designs 2. Optimierungsstufe (1./4./5./6.)
- dazwischen maximale Abstände von Schweißpunkten von 75 mm
- möglichst symmetrische Schweißpunktmuster

Design	Anzahl SP / Blechdicke	Standard-abweichung Kontaktkraft	Stauch-länge	Biege-Torsions-mode	Biege-Torsions-spannung	Biege-Torsions-verformung
Referenz	22 / 1.5	25 896	7.45	537/620 Hertz	140/131 N/mm ²	2.61/0.65 mm
Symm13	18/1.3	19 936	9.48	474/597 Hertz	130/152 N/mm ²	3.07/0.82 mm
Symm14	18/1.4	23 062	8.26	497/599 Hertz	127/141 N/mm ²	2.83/0.74 mm

Tab. 5 Ergebnis symmetrisierte Designs

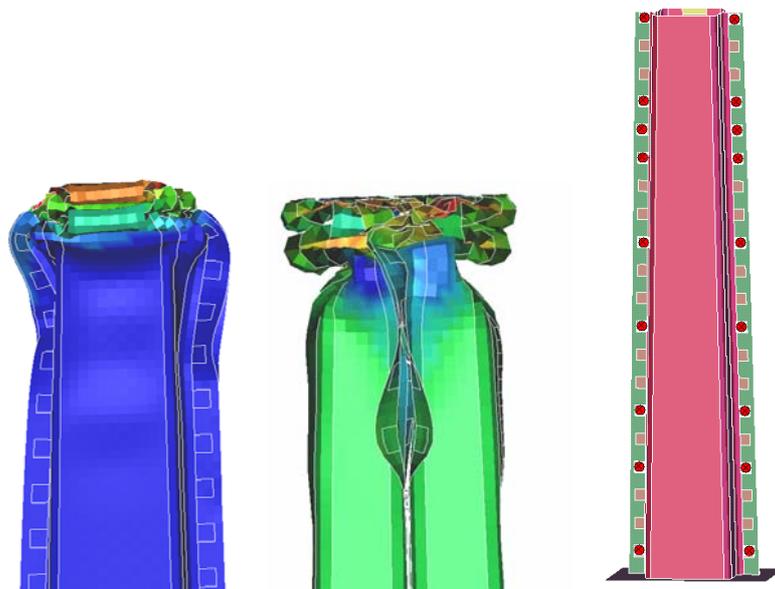


Fig. 8 Design Symm13 Lastfall Crash

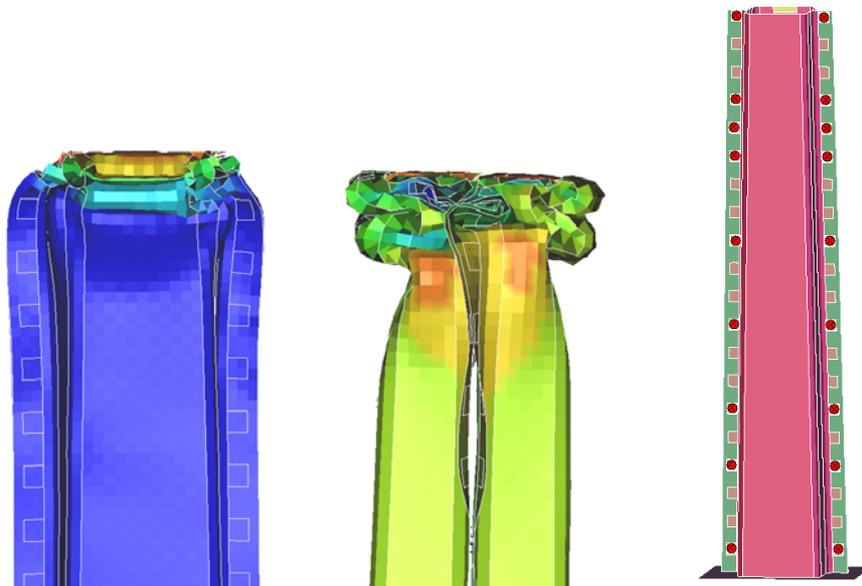


Fig. 9 Design Symm14 im Lastfall Crash

In den nahezu symmetrischen Designs können gegenüber der Referenzstruktur 18 % der Schweißpunkte eingespart werden. Das 1.3er Blech mit symmetrisierten Schweißpunktmuster weist mit 9.5 cm eine moderate Stauchlänge auf und erscheint auch unter verschärfter Restriktion der Stauchlänge wieder konkurrenzfähig. Stauchlänge und Gleichmäßigkeit der Energieabsorption sind dabei wie in den vorangegangenen Optimierungen gegenläufige Zielkriterien für Gewicht und Anzahl der Schweißpunkte.

Zur finalen Auswahl zwischen Blechstärke 1.3 und 1.4 werden Robustheitsberechnungen der beiden konkurrierenden Designs mit der Berücksichtigung von Streuungen maßgebender Materialwerte (Blehdicken, Materialwerten) und Lastwerte durchgeführt.

2.4 Robustheitsbewertung

Typischerweise unterliegen sowohl einige Optimierungsvariablen signifikanten Streuungen als auch müssen Streuungen von Widerständen, Lasten oder Randbedingungen berücksichtigt werden. Im Beispiel wurden insgesamt Streuungen von 6 Inputvariablen berücksichtigt.

Optimierungsvariablen: Blechdicke
 Widerstände: Streckgrenze Material
 Lasten: Geschwindigkeit Impaktor
 Winkel des Impaktor um Querschnittsachse Y
 Winkel des Impaktor um Querschnittsachse Z
 Lagerungsbedingungen: Reibbeiwert

Variable	Verteilungstyp	Mittelwert	Standardabweichung	untere Grenze	obere Grenze
Blechdicke	normal	1.3 mm	3.25 E-2 mm		
Streckgrenze	normal	180 E+6 N/mm ²	9.0 E+6 N/mm ²		
Winkel um Y	truncated normal	0.0	0.02268 (1.3°)	-0.087 (-5°)	0.087 (5°)
Winkel um Z	truncated normal	0.0	0.02268 (1.3°)	-0.087 (-5°)	0.087 (5°)
Reibbeiwert	uniform	0.15	8.33E-3		
Geschwindigkeit Impaktor	normal	7.0 m/s	0.07 m/s		

Tab. 6 Streuungen der Inputparameter

Die Robustheit von insgesamt 4 Outputvariablen wurde untersucht:

- maximale Stauchlänge
- maximale Querverschiebung in Y-Richtung
- maximale Querverschiebung in Z-Richtung
- Standardabweichung der resultierenden Kontaktkraft

Untersucht wurden die beiden Design symm13 und symm14. Als Samplingmethode wurde Monte Carlo verwendet. Es wurden jeweils 32 Designs erzeugt und statistisch bewertet.

Der Mittelwert der Stauchlänge weicht in beiden Designs signifikant von der Stauchlänge der optimierten Design ab (symm13: 9.48 ⇒ 10.8, symm14: 8.26 ⇒ 9.1). Die Zunahme der mittleren Stauchlänge bei der Berücksichtigung von Streuungen der Impaktwinkel ist erwartungsgemäß. Die Tendenz der genetischen Optimierung der 2. Optimierungsstufe, dass Designs mit der Blechdicke 1.3 mm infolge von Robustheitsprobleme nicht mehr konkurrenzfähig sind, ist im Histogramm und Anthill plot gut wiederzuerkennen. Im Anthill plot des Design 13 weisen 4 stochastische Versuche mit Stauchlängen von bis zu 14 cm große Robustheitsprobleme auf. Der Mittelwert der Stauchlänge des Designs symm14 ist unterhalb der Zielgröße 10 cm und die Streuungen der Stauchlänge sind moderater. Analoge Tendenzen weisen die maximalen Verschiebungen in den Querschnittsachsen Y und Z in beiden Designs auf.

In den linearen Korrelationsstrukturen (Fig. 11) sind keine signifikanten (> 0.70) linearen Abhängigkeiten festzustellen. Die größte lineare Abhängigkeit besteht in beiden Designs zwischen der Blechdicke und der Stauchlänge. Erwartungsgemäß nimmt die Stauchlänge bei kleinerer Blechdicke zu. In den Anthill plots (Fig. 12) sind die negativen linearen Korrelationen gut zu sehen.

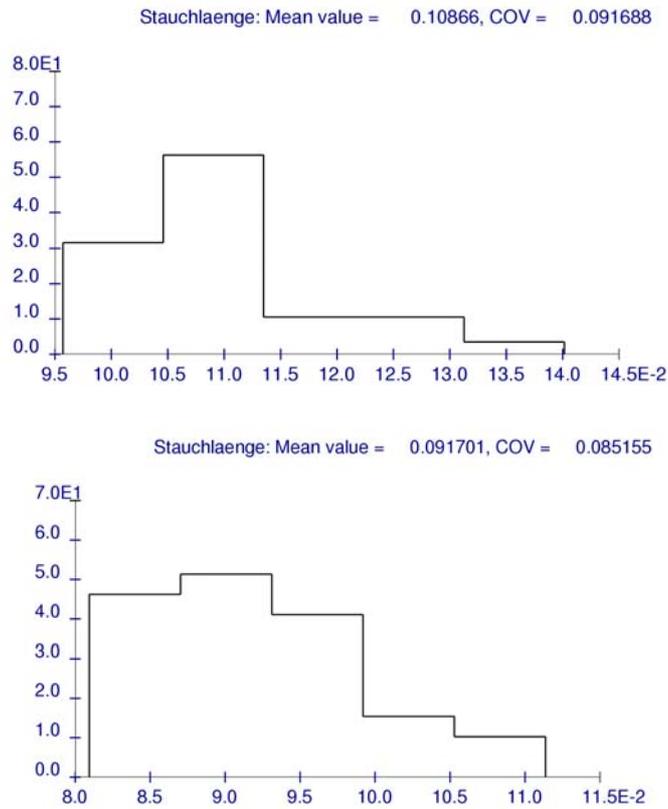


Fig. 10 Histogramm, Mittelwert, Korrelationskoeffizient der Stauchlänge (oben: symm13, unten: symm14)

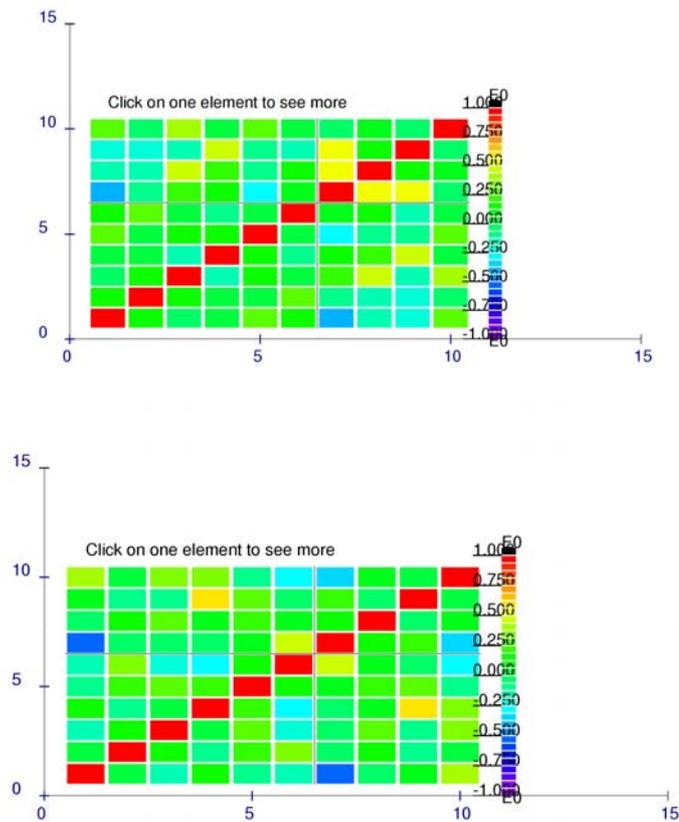


Fig. 11 lineare Korrelationsmatrix* (oben: symm13, unten: symm14)

(* in den Matrixdarstellungen sind die Input und Outputvariablen nach der Definitionsreihenfolge geordnet: 1- Blechdicke, 2-Streckgrenze, 3-Winkel um Y, 4-Winkel um Z, 5-Reibbeiwert, 6-Geschwindigkeit, 7- Strauchlänge, 8-max. Y-Verschiebung, 9-max. Z-Verschiebung, 10-Standardabweichung Kontaktkraft)

Die PCA zeigt die mehrdimensionalen Auffälligkeiten der Verknüpfung von Inputparametern zu Outputparametern an. Die wichtigste mehrdimensionale Auffälligkeit im Design symm13 verknüpft die Streckgrenze sowie die Y-Z-Winkel des Impaktors mit der Stauchlänge. Die wichtigste mehrdimensionale Auffälligkeit im Design symm14 verknüpft die Streckgrenze sowie den Z-Winkel des Impaktors mit der Stauchlänge und der Standardabweichung der Kontaktkraft (Fig.13). Die Streuung der Blechdicke spielt für die wichtigste mehrdimensionale Korrelation von Input- und Outputvariablen keine dominierende Rolle.

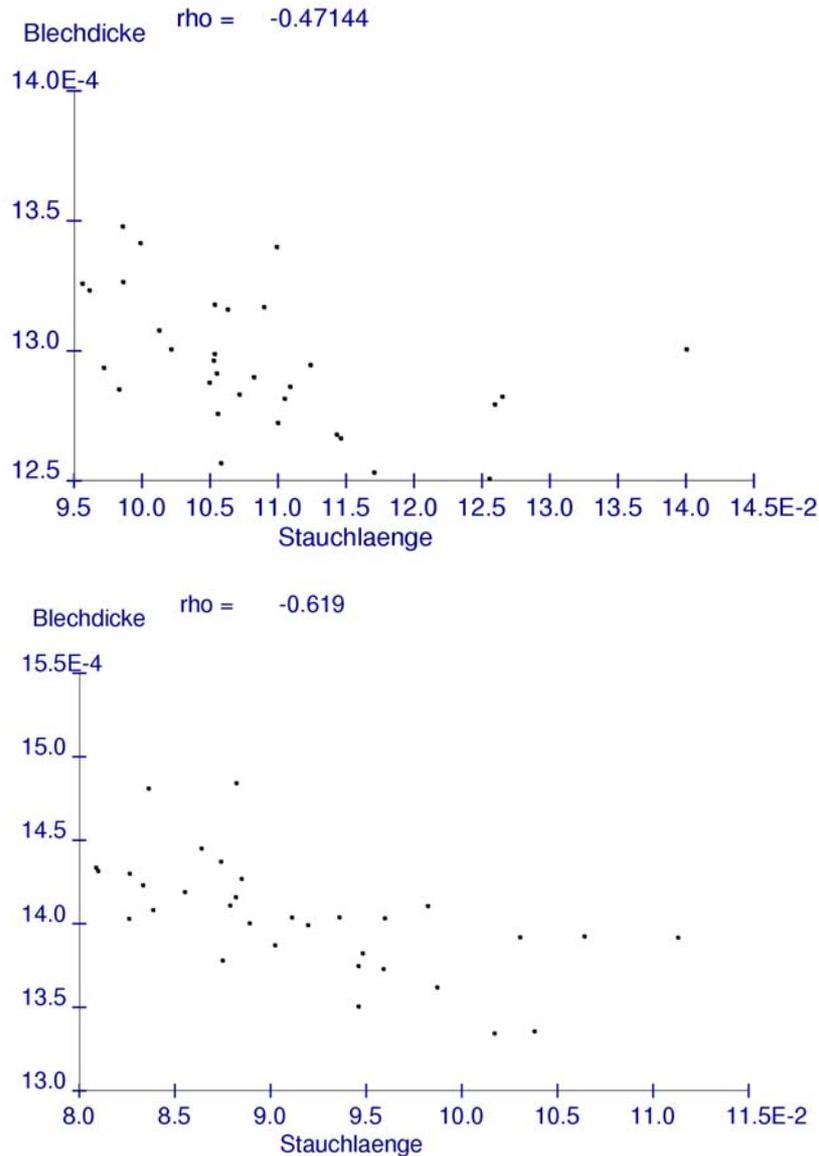


Fig. 12 Anthill Plott Blechdicke versus Stauchlänge (oben: symm13, unten: symm14)

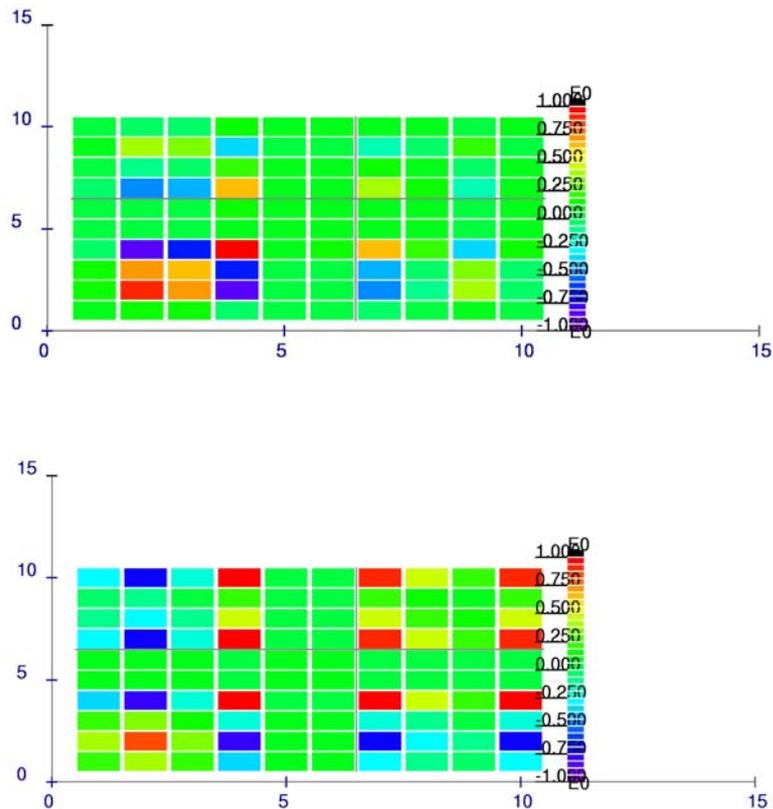


Fig. 13 erste Principal Component**(oben: symm13, unten: symm14)

(** in der Matrixdarstellung der PCA sind die Input und Outputvariablen nach der Definitionsreihenfolge geordnet: 1-Blechdicke, 2-Streckgrenze, 3-Winkel um Y, 4-Winkel um Z, 5-Reibbeiwert, 6-Geschwindigkeit, 7-Strauchlänge, 8-max. Y-Verschiebung, 9-max. Z-Verschiebung, 10-Standardabweichung Kontaktkraft)

2.5 Auswertung

In den beiden Optimierungsstufen konnten wichtige Parameter, dominierende Zielfunktionsbestandteile oder Nebenbedingungen identifiziert sowie wichtige Designverbesserungen in den ersten 3 bis 5 Generationen erzielt werden (Fig.14). Die Anforderungen an die Crashperformance dominieren das Optimierungsproblem. In konkurrenzfähigen Designs waren die Nebenbedingungen aus Steifigkeit und NVH sicher erfüllt.

Die genetische Optimierung konnte die für den Faltungsprozess des Boxbeam wichtigsten Schweißpunkte sowie die zulässige Blechdicke identifizieren und bezüglich der Fitnessfunktion verbessern. Für das Auffinden optimaler Schweißpunktlagen im mittleren und unteren Teil des Boxbeam benötigt die genetische Optimierung sehr viele Versuche. Hier wird vermutet, dass die schwache Sensivität der Schweißpunkte im mittleren und unteren Bereich auf den Faltungsprozess eine schnelle Identifikation wichtiger Schweißpunkte und erfolgreicher Schweißpunktmuster erschwert.

Das Ergebnis der Optimierungsstufe 1 zeigt eine hohe Instabilität des verbesserten Design gegenüber der Crashperformance schon bei der Berechnung auf unterschiedlichen Hardwareplattformen. Durch Einführung einer robustheitsrelevanten Nebenbedingung in die Optimierung werden in robusteren Bereichen bessere Design gesucht. In Optimierungsstufe 2 konnte ein optimiertes Schweißpunktmuster des oberen Bereiches der Boxbeamstruktur gefunden werden. Unter Zunahme von Fertigungsrestriktionen wurden nahezu symmetrische Design für den Boxbeam konstruiert.

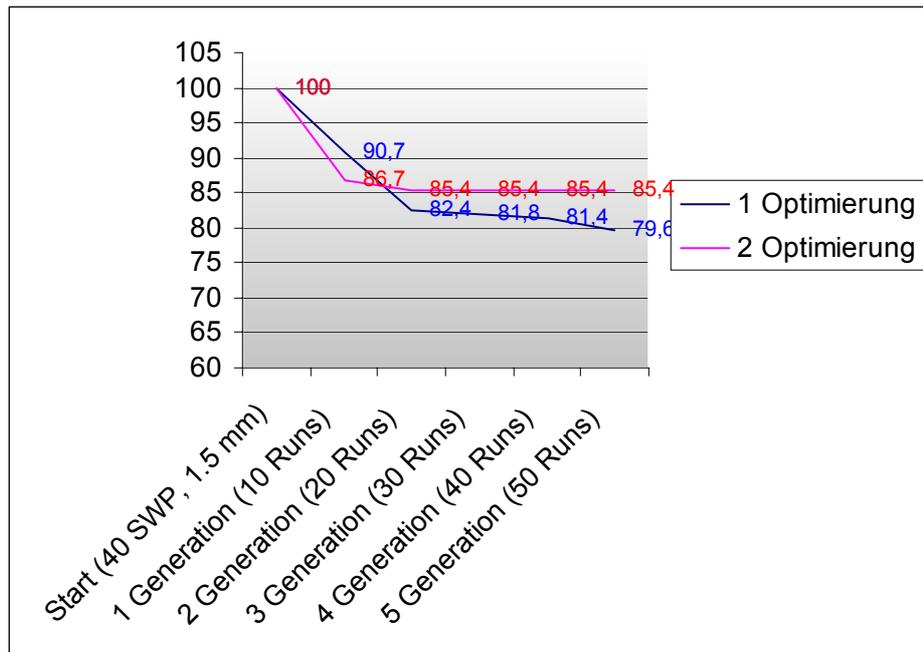


Fig.14 Prozentuale Verbesserung der Fitness bezogen auf das Startdesign

In den Robustheitsbewertungen der konkurrierenden Designs symm13 und symm14 konnten wichtige Trends der genetischen Optimierung wiedergefunden werden:

- die Blechdicke 1.3 mm ist wegen stark zunehmender Robustheitsproblemen nicht konkurrenzfähig
- die Reduktion der Verschiebungen und die angestrebte Gleichmäßigkeit der Energieabsorption sind gegenläufige Zielfunktionen.

Unter den gegebenen Streuungen ist das Design symm14 ein robustes Optimum. Zur Unterdrückung signifikanter Performancereduktion bezüglich des Crashverhaltens sind falls möglich die Streuungen der Wandstärke und der Festigkeiten klein zu halten.

3. Ausblick

Für eine effektive Optimierung sollten in einem adaptiven Optimierungsprozess alle verfügbaren Informationen und möglichst viel vorhandenes/gewonnenes Expertenwissen sowohl bezüglich der Optimierung als auch der Robustheit integriert werden. Über die im Benchmark berücksichtigten Informationen erscheinen folgende Erweiterungen notwendig.

Kosten (Materialkosten, Fertigungskosten) können bei Vorliegen entsprechender Daten ohne nennenswerten Mehraufwand in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Zufällige Wandstärkenverteilungen bzw. die Imperfektionsmuster (z.B. aus der Tiefziehsimulation) können zur Beschreibung geometrischer Imperfektionen übertragen werden. Um die Dominanz lokaler Effekte unkorrelierter Zufallsfelder zu verhindern, empfehlen wir die Verwendung von korrelierten Zufallsfeldern, deren Korrelationsstruktur sich beispielsweise aus vermessenen Geometrien ableiten lässt. Fertigungsrestriktionen des Schweißvorganges (Schweißpunktmuster, min./max Abstände), die im Beispiel erst bei der Generation der symmetrisierten Designs berücksichtigt worden sind, sollten schon bei der Generierung der Schweißpunktmuster im genetischen Verfahren berücksichtigt werden. Zur Reduzierung weiterhin vorhandener Robustheitsprobleme sollten weitere robustheitsrelevante Nebenbedingungen eingeführt werden bzw. die Streuungen auffälliger Inputvariablen möglichst klein gehalten werden. Für CPU-intensive Berechnungen empfehlen wir nach jeder Generation (5-10 Designs) wichtige Designtrends zu untersuchen und gegebenenfalls das Optimierungsproblem (Zielfunktion/Nebenbedingungen) zu modifizieren. Durch die begleitende Modifikation wird die Aussicht erhöht, mit relativ wenigen Designbewertungen eine schnelle Designverbesserung im robusten Designbereich zu erzielen. Idealerweise sollte eine Robustheitsbewertung parallel mit dem

Optimierungsprozess mitlaufen. Allerdings ist dies aus gegenwärtiger Sicht bei CPU-intensiven Aufgabenstellungen mit unakzeptabel hohen Aufwand verbunden. Hierbei können aber u.U. effektiv Response Surface Strategien zur Identifikation von Trends oder Sensivitäten unter Verwendung der bereits ausgewerteten Stützstellen (Individuen des genetischen Verfahrens) genutzt werden [6].

Für die iterative Bearbeitung der Aufgabenstellung waren ca. 150 Solveraufrufe notwendig. Moderne Hardwarefarmen bzw. Linuxclustern bieten schon heute Ressourcen an, die eine solche Anzahl von Berechnungen von Komponentenmodellen oder auch für Gesamtfahrzeugkonstruktionen ermöglichen.

References

- [1] OptiSLang - the Optimizing Structural Language Version 1.0, DYNARDO, Weimar, 2002.
- [2] Bucher C. et al.: SLang - the Structural Language Version 5.0, Institute of Structural Mechanics - Bauhaus-University Weimar, 2002.
- [3] Bucher, C.: "Some Recent Software Developments for Stochastic Structural Analysis", in N. Shiraisi et al. (ed.): Structural and Reliability, Balkema/Rotterdam/Brookfield, Vol. 1, pp 541-547, 1998
- [4] Bucher, C.: "Application of probability-based concepts in computational mechanics", in Wunderlich (ed.) Proceedings, ECCM99, Munich, 1999
- [5] Riedel J.: Gewichtsoptimierung eines Schiffes unter Spannungsrestriktionen; 6. Institutskolloquium, Institut für Stukturmechanik der Bauhaus Universität Weimar, Weimar 2000
- [6] OptiSLang Berechnungen zum Benchmark „Nichtlineare Optimierung“ des FAT-AK Crash, 2001, www.dynardo.de