KOMBINIERTE TOPOLOGIE- UND PARAMETEROPTIMIERUNG DES AUFHÄNGUNGSSYSTEMS VON HECKINSTALLIERTEN TURBOFANTRIEBWERKEN

A. Zuchlinski¹, A. Kühhorn¹, M. Kober¹
L. Wehrenpfennig²

 Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen, Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU), D-03046 Cottbus, Germany
 Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG, D-15827 Blankenfelde-Mahlow, Germany

Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom Land Brandenburg (BBG) geförderten Forschungsprojektes wurden am Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen (SMF) der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (BTU) die nachfolgend gezeigten Optimierungen des Aufhängungssystems von heckinstallierten Turbofantriebwerken durchgeführt. Der vorliegende Beitrag zeigt einen kombinierten Topologie- und Parameteroptimierungsprozess, welcher im Bereich der Antriebsintegration für Langstrecken-Geschäftsreiseflugzeuge, in Zusammenarbeit mit dem deutschen Gesamttriebwerkshersteller Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG (RRD), entwickelt werden konnte. Hierbei wurden die Komponenten der Triebwerksaufhängung strukturmechanisch analysiert und optimiert, d.h. bei geringstem Gewicht sollten hohe Steifigkeiten und niedrige Materialbeanspruchungen erreicht werden. Als Grundlage für die Modellerstellung diente ein validiertes und voll parametrisiertes generisches Gesamttriebwerksmodell, wobei sich dieses auf wesentliche Strukturbauteile konzentriert. Zusätzlich dazu wurden weitere benötigte Strukturmodelle, wie z.B. der Flugzeugrumpf, nachgebildet und Ziel- bzw. Randbedingungen der Optimierung definiert. Nach Interpretation und Auswertung der Topologieoptimierungsergebnisse konnten diese in Balkenstrukturen überführt werden. Innerhalb einer sich anschließenden Parameteroptimierung wurden dann Bauteileigenschaften gefunden, welche eine Auslegung bzw. Dimensionierung nahe der optimalen Lösung widerspiegeln.

1. EINFÜHRUNG

Große Geschäftsreiseflugzeuge stellen besondere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Antriebssystems bzgl. Reichweite (bis über 13000 km), Flughöhe (über 15 km), Reiseflug-

geschwindigkeit (bis Mach 0,9) und Kabinenkomfort (Lärm, Vibrationen). Auch die Vorgaben hinsichtlich der Geräuschemissionen werden immer strenger und anspruchsvoller. Die Triebwerke dieser Flugzeuge haben ein vergleichsweise geringes Nebenstromverhältnis (Verhältnis zwischen dem Luftmassenstrom, der außen am Kerntriebwerk vorbeigeführt wird, und dem Luftmassenstrom, welcher die Brennkammer passiert) und sind typischerweise am Rumpfheck installiert (BILD 1).



BILD 1: Heckinstallation des Antriebssystems an einem Geschäftsreiseflugzeug (Gulfstream G550 mit Rolls-Royce BR710) (Quelle: RRD)

Diese Installation bedingt eine spezifische Integration und Interaktion des Triebwerks mit dem Flugzeug. Hierzu wurden innerhalb dieser Arbeit für eine realistische Antriebskonfiguration Auslegungsmethoden angewendet und verifiziert. Eine Auslegung hinsichtlich der Strukturfestigkeit der Aufhängung unter verschiedensten Belastungen bei gleichzeitig minimiertem Gewicht und verbesserter Funktionalität wird durch die Anwendung der Topologieoptimierung gewährleistet. Das Verfahren der Topologieoptimierung für Strukturen ersetzt hierbei im Auslegungsprozess die bisherigen zeitintensiven Methoden zur Generierung der Erstgeometrie für ein Bauteil, die in der Vergangenheit durch die Intuition und Erfahrung des Konstrukteurs geprägt waren. Hierbei werden vorgegebene Lasten und Randbedingungen an den Lasteinleitungspunkten bzw. Lagerstellen des Triebwerks definiert. Zur Modellierung des Referenzantriebes wurde das am Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen der BTU Cottbus entwickelte parametrische Gesamttriebwerksmodell ausgewählt, mit welchem grundlegende strukturelle Eigenschaften des Triebwerks mit einer ausreichenden Genauigkeit wiedergegeben werden können. Dieses parametrisierte Turbofantriebwerksmodell wurde über einen maximalen Designraum (für die Aufhängungsstruktur) mit dem Flugzeugrumpf verbunden. Ausschnitte aus dem Vorgehen innerhalb der Topologie- als auch Parameteroptimierung werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

2. VEREINFACHTES GESAMTTRIEBWERKSMODELL (GWEM - GENERIC WHOLE ENGINE MODEL)

Moderne Flugzeugtriebwerke sind hochkomplex und bestehen aus einer großen Anzahl unterschiedlicher Komponenten. Im Allgemeinen enthalten auch detailreiche Gesamttriebwerksmodelle der Herstellerfirmen (siehe Bild 2) viele Vereinfachungen im Bezug auf die reale Konfiguration.

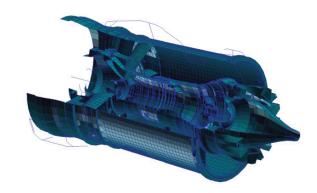


BILD 2: Detailliertes Gesamttriebwerksmodell des Triebwerksherstellers Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG (Quelle: RRD)

Daher wurde innerhalb dieses Optimierungsprozesses auf das am Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen der BTU Cottbus entwickelte parametrische Gesamttriebwerksmodell (siehe Bild 3) zurückgegriffen.

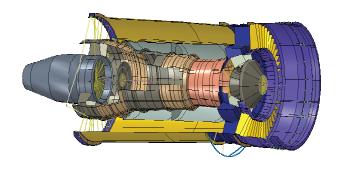


BILD 3: Vereinfachtes generisches Triebwerksmodell (gWEM)

Der Grad der Vereinfachung des gWEM (engl. generic whole engine model) wird als angemessen angesehen um eine zufriedenstellende Lösung des Randwertproblems hinsichtlich der Verschiebungen, Kräfte und Eigenfrequenzen zu gewährleisten, wie sich in vorhergehenden Studien zeigte [4]. Die verwendeten strukturellen Elemente des vereinfachten Modells sind Schalen und Balken sowie diskrete Einzelmassen und Federn (siehe Bild 4).

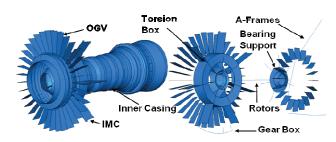


BILD 4: Vereinfachte Triebwerksgeometrie [4]

Berücksichtigung findet lediglich das Triebwerk. Äußere Verkleidungen (engl. nacelle), Einlauf (engl. intake) und Schubumkehrer (engl. thrust reverser) werden lediglich über verteilte Ringmassen (engl. non-structural masses) am Triebwerk abgebildet, um das Gesamtgewicht und den Massenschwerpunkt realitätsnah abzubilden. Die Geometrie jedes Bauteils wird über einen eindeutigen Parametersatz repräsentiert und durch festgelegte Bauteilpositionen sowie geometrische Abhängigkeiten bestimmt. Dieses sorgt für eine schnelle und einfache Modelldefinition und verringert die Anzahl der Parameter drastisch gegenüber dem detailgetreuen WEMM (engl. whole engine mechanical model) des Triebwerksherstellers.

3. IMPLEMENTIERUNG UND VALIDIERUNG DES REFERENZTRIEBWERKS UND -AUFHÄNGUNG

Die Implementierung der Referenztriebwerke in die Abaqus-Umgebung erfolgte auf Grundlage der Konzeptpläne (engl. general arrangements) des Triebwerksherstellers. Es wurden alle benötigten Bauteileigenschaften, wie Geometriedaten und Materialien (siehe Bild 5.), innerhalb der gWEM Benutzeroberfläche implementiert und dadurch ein vollständig parametrisiertes Triebwerksmodell definiert.

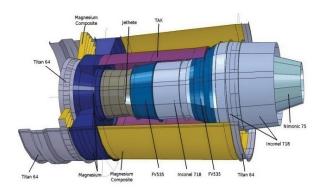


BILD 5: Materialien des vollständig parametrisierten Triebwerkmodells

Bezüglich der bisherigen Aufhängungselemente wurden zunächst verschiedene Modellierungsansätze erprobt, wobei sich ein kombiniertes Schale-Balkenmodell als praktikabelste Lösung erwies. Zur Validierung dieser neu angelegten Konstruktionen mit dem detaillierten Gesamttriebwerksmodell des Herstellers wurden verschiedene Lastfälle untersucht wie z.B. Schub, Umkehrschub oder normierte Gravitationslasten. Hierbei wurden, trotz des beschriebenen Abstraktionsgrades des gWEM, zufriedenstellende Übereinstimmungen der Reaktions- und Schnittlasten sowie Triebwerksverschiebungen erzielt.

4. TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

Das Ziel einer topologischen Optimierung ist es, Informationen über ideale Materialverteilungen für Kraftübertragungen innerhalb eines definierten Bereiches (Designraum) zu erhalten. Hierfür wird der zu optimierende Bereich mit finiten Elementen vernetzt und mit Randbedingungen wie Lasten und Lagern versehen. Als Ergebnis können dann Aussagen darüber getroffen werden, welche finiten Elemente für die Übertragung der Lasten am notwendigsten sind. Darauf aufbauend können schließlich optimierte Strukturen modelliert werden. Zur Steuerung des Beitrags der finiten Elemente zur Tragfähigkeit der Gesamtstruktur kam die Dichtemethode zum Einsatz [1].

4.1. Optimierung mit Altair OptiStruct

OptiStruct ist speziell für die Optimierung von Strukturen und mechanischen Systemen ausgelegt. Es besitzt Kapazitäten für Topologie-, Topografie-, Parameter- und Form-Optimierung [1]. Bei der in dieser Arbeit beschriebenen Topologieoptimierung der Aufhängungsstruktur greift die verwendete Software zur Modifikation der Elementsteifigkeit u. a. auf die Dichtemethode (engl. density method) zurück.

4.1.1. Dichtemethode

In der Dichtemethode werden die Materialeigenschaften direkt anhand einer dimensionslosen Dichte skaliert, um den Einfluss der einzelnen Elemente auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur zu ermitteln und darzustellen. Ein Element mit der Dichte 1 repräsentiert einen Bereich des Modells mit den vom Benutzer angegebenen Materialeigenschaften (Steifigkeit K₀). Hat ein Element einen sehr geringen Dichtefaktor (z.B. ρ =0,01), so hat es auch eine entsprechend geringe Steifigkeit, jedoch noch sein ursprüngliches Volumen. Elemente mit Dichten zwischen 0 (aus numerischen Gründen immer ρ>0) und 1 repräsentieren Bereiche fiktiven Materials, deren Steifigkeiten Km als linear abhängig von ihrer Dichte ρ angenommen werden.

$$\mathbf{K}_m(\rho) = \rho \mathbf{K}_0$$

Hohe Dichten stellen am Ende der Optimierung demzufolge die Bereiche im Designraum dar, über die die aufgebrachten Kräfte optimal abgeleitet werden. Allgemein enthalten auf diese Weise topologieoptimierte Lösungen Bereiche mittlerer Dichten, die für eine technische Umsetzung der Lösung nicht sinnvoll sind (Farben zwischen Rot und Grau in Bild 6). Um den Anteil dieser Bereiche in der Lösung zu reduzieren werden Elemente mittlerer Dichten während der Optimierung so modifiziert, dass ihre Existenz in der Struktur einem optimalen Ergebnis künstlich im Wege steht. OptiStruct ersetzt dafür die ursprüngliche Steifigkeitsmatrix Ko der Elemente durch eine mit einem Strafterm modifizierte Ersatzmatrix Ke der Form:

$$\mathbf{K}_e(\rho) = \rho^p \mathbf{K}_0.$$

Dabei repräsentiert ρ die aktuelle (dimensionslose) Dichte des Elementes und p einen Bestrafungsexponenten. Mit steigendem Wert für p wird das Verhältnis der resultierenden Steifigkeit (und darüber auch Tragfähigkeit) des Elementes zur eingesetzten Materialmenge bei mittleren Dichten zunehmend schlechter. Solche Elemente sind für die Optimierung einer Struktur nicht einträglich [5]. Der Optimierer wird deshalb in folgenden Iterationsschritten versuchen, diese Elemente entweder ganz zu entfernen, oder deren Dichtewert stark zu erhöhen. Der Wert von p wird in der Regel im Verlauf der Optimierung automatisch erhöht. Eine manuelle Vorgabe zu Beginn der Optimierung kann dazu führen, dass sich der Optimierer sehr schnell auf ein lokales Minimum zubewegt und andere mögliche Lösungen entfallen. Die Dichtemethode wird in der Literatur auch als SIMP (engl. solid isotropic material with penalization) Methode bezeichnet.

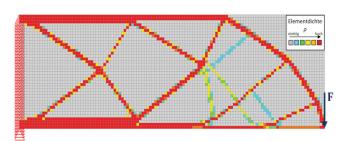


BILD 6: Kragbalkenbeispiel einer Topologieoptimierung

4.2. Modellbildung in Altair OptiStruct

Zusätzlich zu dem in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen generischen Triebwerksmodell wurden innerhalb der Optimierungssoftware OptiStruct Modelle des maximalen Bauraums (siehe Bild 7) und der Flugzeugstruktur (siehe Bild 8) integriert. Dabei wurde der Flugzeugrumpf um interne Stützstreben, Lagerungsstruktur und Spanten ergänzt, da diese das Optimierungsergebnis nachhaltig mitbestimmen.

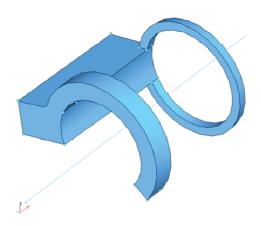


BILD 7: Maximaler Designraum (Quelle: RRD)



BILD 8: Flugzeugstruktur (Quelle: RRD)

Insgesamt wurden 12 Lastfälle am Triebwerk aufgetragen, welche sich unter anderem aus folgenden Einzellasten zusammensetzen:

- Trägheitslasten (g-Lasten) in den drei Raumrichtungen
- Trägheitslasten durch Rotationsbeschleunigungen in den drei Raumrichtungen
- Schub- und Umkehrschublasten
- Drehmoment des Triebwerks durch plötzlichen Rotorstillstand

Der Schub wird mit Hilfe von steifen Balken über den Umfang verteilt in den inneren Bereich des Zwischengehäuses (engl. intermediate casing - IMC) eingeleitet. Im Falle des Umkehrschubes wird der nach hinten gerichtete Lastanteil am Umfang des hinteren Aufhängungsringes angetragen (siehe Bild 9). Im montierten Zustand des Triebwerks ist der Schubumkehrer (engl. thrust reversal unit) dort befestigt. Die g-Lasten wirken auf alle Knotenpunkte des Modells. Die Rotationsbeschleunigungen werden

bezüglich der vorderen Aufhängungsebene beschrieben.

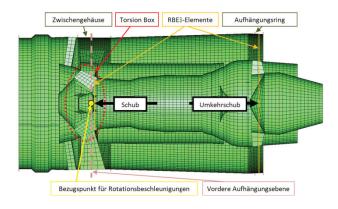


BILD 9: Einleitung von Lasten in das Triebwerksmodell

4.3. Formulierung der Optimierungsaufgabe

Nach der Erläuterung der Erstellung des Optimierungsmodells wird im folgenden Abschnitt die Formulierung der eigentlichen Optimierungsaufgabe und die Integration dieser in OptiStruct veranschaulicht. Das Ziel ist es, im vorgegebenen Designraum eine optimierte Aufhängungsstruktur für die Montage des Referenztriebwerks am Heck von Geschäftsreisefliegern zu ermitteln. Hierbei soll die Aufhängung nach Möglichkeit einen Gewichtsvorteil gegenüber den bisherigen Konzepten aufweisen. Dafür wurde als Zielfunktion eine Minimierung der gesamten im Modell gespeicherten Verzerrungsenergie (engl. compliance) gewählt (siehe Abschnitt 4.3.1.) und gleichzeitig das maximal zulässige Volumen (was einer Masse entspricht) der Aufhängungsstruktur schränkt, wodurch der Forderung nach einer Steifigkeitsmaximierung des gesamten Modells (siehe Bild 10) entsprochen wird. Durch dieses Optimierungsziel ist gewährleistet, dass jeweils das steifste Design für einen definierten Volumenanteil gefunden wird, da es sich um ein konvexes Optimierungsproblem (siehe Abschnitt 4.3.2.) handelt [3].

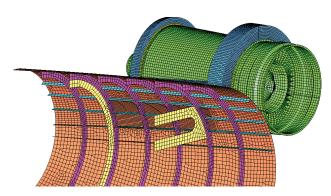


BILD 10: OptiStruct - Gesamtmodell

4.3.1. Compliance

Die Compliance entspricht der Verzerrungsenergie (engl. strain energy) im Modell (auch als innere Arbeit oder Formänderungsenergie bezeichnet) [1]. Sie wird in OptiStruct über die Beziehung:

$$C = \frac{1}{2}u^T f = \frac{1}{2}u^T K u$$

berechnet. Die Verzerrungsenergie kann als Reziproke der Struktursteifigkeit interpretiert werden. Daher ist es möglich, mit Hilfe der von OptiStruct ausgegebenen Werte der Compliance, die Steifigkeiten der verschiedenen Optimierungsergebnisse miteinander zu vergleichen.

4.3.2. Konvexität

Da es sich bei der "Konvexität" um eine Eigenschaft von Mengen und Funktionen handelt, welche eine große Rolle in der Optimierung spielt, wird diese im folgenden Abschnitt erläutert. In einer konvexen Menge muss die Verbindungslinie zweier beliebiger Punkte der Menge ebenfalls innerhalb dieser Menge liegen. (siehe Abbildung 11). Grob formuliert bezeichnet man eine Funktion f als konvex wenn die Verbindungslinie zweier beliebiger Punkte dieser Zielfunktion immer oberhalb des Graphen verläuft und diesen nicht schneidet [2]. Auf ein Optimierungsproblem bezogen, kann gesagt werden, dass zwei Punkte im zulässigen Entwurfsraum mit einander linear verbunden werden können, ohne dass diese Verbindungslinie die Zielfunktion berührt und sich diese oberhalb des Graphen befindet. Aus diesem Grund ist bei einer

konvexen Zielfunktion (siehe Bild 12) das lokale gleich dem globalen Optimum, weshalb lokale Optimierungsstrategien in solch einem Fall bevorzugt werden sollten, da diese eine schnelle Konvergenz zum Minimum zeigen und sehr Effizient in Bezug auf die Anzahl der Funktionsauswertungen sind. Bei nicht konvexen Zielfunktionen besteht die Gefahr, dass lokale Optimierungsstrategien nicht das globale Optimum finden, weshalb bei solchen Optimierungsproblemen eine globale Optimierungsstrategie, z.B. mit genetischen Algorithmen, verfolgt werden sollte.

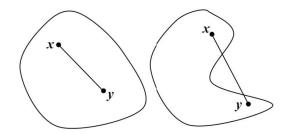


BILD 11: Konvexe Menge (links) und nichtkonvexe Menge (rechts) [6]

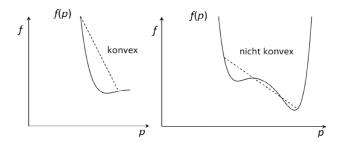


BILD 12: Vergleich einer konvexen und nicht konvexen Zielfunktion [6]

4.4. Ergebnisauswertung und Parametrisierung

In Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Bauraumvolumens wurden 20 verschiedene Optimierungsläufe durchgeführt (siehe Bild 13). Hierbei wurde sowohl die Struktursteifigkeit als auch die maximal e Gesamttriebwerksverschiebung (maximale Verschiebungsamplitude) der einzelnen Ergebnisse über der restringierten Masse (entspricht dem zugehörigen Volumen) aufgetragen. Der zulässige Optimierungsbereich wurde durch die Referenzsteifigkeit und – masse bestimmt.

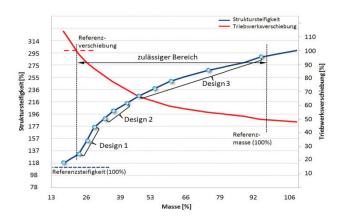


BILD 13: Verlauf von Struktursteifigkeit und Triebwerksverschiebung über restringierter Masse

Es zeigten sich drei strukturell unterschiedliche Designs, welche innerhalb von Klassen zusammengefasst sind. Ein Beispiel eines Ergebnisses der Aufhängungsoptimierung ist in Bild 14 erkennbar. Strukturen innerhalb einer Designklasse zeigen lokale Dickenänderungen jedoch eine identische Topologie. Nach einer Transformation in das *.iges Dateiformat konnten dann die abstrahierten netzartigen Strukturen aus den Ergebnissen der Topologieoptimierung (siehe Bild 15) in Unigraphics überführt werden.



BILD 14: Beispiel eines Topologieoptimierungsergebnisses

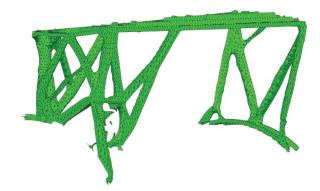


BILD 15: Strukturen der Topologieoptimierung

Bei jeder Optimierungsaufgabe und -methode ist es nötig und wichtig das Ergebnis nicht einfach zu übernehmen, sondern kritisch zu analysieren und zu interpretieren. Besonders bei der in dieser Arbeit angewandten Topologieoptimierung ist das Ergebnis der Berechnungen keinesfalls eine einsatzfähige Struktur. Um die für die Parametrisierung notwendigen Geometriemodelle zu erzeugen, wurden erforderliche Koordinaten lokalisiert und sinnvolle Vereinfachungen durchgeführt (siehe Bild 16). Diese erzeugten Linienstrukturen wurden über das *.iges Dateiformat innerhalb der Abagus-Umgebung importiert und implementierte Balkeneigenschaften konnten dann den Geometrien zugewiesen werden (siehe Bild 17).

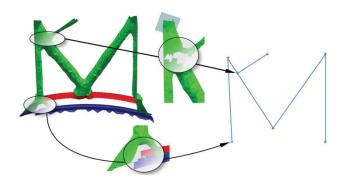


BILD 16: Linienabstraktion (rechts) der netzartigen Strukturen (links) in Unigraphics

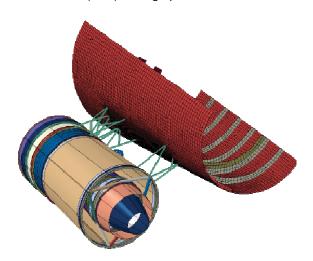


BILD 17: Optimierungsmodell in Abaqus Umgebung

Die nun erstellte parametrisierte Aufhängungsstruktur kann im nachfolgenden Arbeitsschritt hinsichtlich ihrer Geometrieparameter optimiert werden.

5. PARAMETEROPTIMIERUNG

Die Parameteroptimierung ist die Basis fast aller Optimierungsverfahren. Es existieren allerdings einige wenige spezialisierte Optimierungsverfahren, die ohne Parameter auskommen [6]. Die Zielfunktion ist bei der Parameteroptimierung von einer definierten Anzahl von Variablen (den Optimierungs-Parametern) abhängig, die variiert werden können. Diese können Beschränkungen unterliegen. Das vorgestellte Optimierungsproblem ist charakterisiert durch viele Designparameter, Zwangsbedingungen und verschiedene Zielfunktionen.

5.1. Mehrkriterienoptimierung

Bei der Mehrkriterienoptimierung existieren mehrere Zielfunktionen welche gleichzeitig optimiert werden sollen. In diesen Fällen muss immer ein Kompromiss eingegangen werden. In der Regel liegen die Minima der einzelnen Funktionen nicht am gleichen Ort im Entwurfsraum. Es können also in den seltensten Fällen alle Zielfunktionen gleichzeitig ihr Optimum erreichen (Beispiel: Das Volumen eines Behälters maximieren, während die Oberfläche minimiert werden soll). Zur Verdeutlichung sind in Bild 18 zwei Zielfunktionen mit unterschiedlichen Minima und dem sogenannten Pareto-optimalen Bereich (staffiert) zwischen den beiden globalen Minima dargestellt.

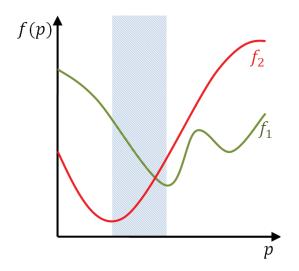


BILD 18: Zwei Zielfunktionen und Bereich möglicher optimaler Entwürfe (straffiert)

Ein Mehrkriterienproblem wird in der Regel auf

ein skalares Ersatzproblem reduziert. Hierfür stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung. Beispielhaft seien genannt: gewichtete Kriterien, hierarchische Optimierung, Kompromiss- Methode und Distanz-Methoden [7].

5.2. Optimierung mit Nebenbedingungen

Die Variation der Optimierungs-Parameter hat Grenzen oder muss spezielle Forderungen erfüllen. Dies schränkt den Entwurfsraum ein. Diese Grenzen dürfen für eine zulässige Lösung nicht überschritten werden. In Bild 19 rechts ist die Optimierungsaufgabe um die Nebenbedingung $p_2 \geq p_N$ (straffiert) erweitert worden. Die Werte für das (zulässige) Optimum \boldsymbol{p}^*_N sind nun andere.

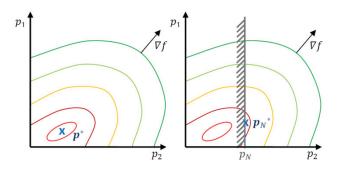


BILD 19: Zielfunktion ohne (links) und mit (rechts)
Nebenbedingung (straffiert)

5.3. Optimierung mit Isight und Abaqus

Um umfangreiche Parameterstudien zu vermeiden und die beste Lösung zu erhalten, werden eine Prozessintegration und numerische Optimierungstechniken mithilfe eines kommerziellen Programms angewandt. Isight ist eine Softwareanwendung für die Prozessintegration und Designoptimierung der Firma Simulia. Das Programm ermöglicht die Kopplung von verschiedenen Ingenieuranwendungen und die Definition von Abläufen zur automatischen Ausführung mehrerer Designschritte [8]. Nach Festlegung des Ausgangsdesigns werden mittels der grafischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 20) des Triebwerkmodells alle Parameter innerhalb der Abagus "input files" gespeichert und gleichzeitig Zielfunktionen und Zwangsbedingungen innerhalb des Optimierers spezifiziert.

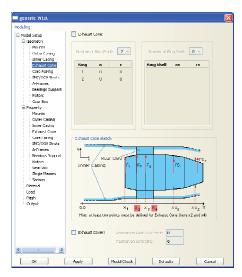


BILD 20: Grafische Benutzeroberfläche des generischen Triebwerksmodells (gWEM)

Diese Schritte müssen einmalig vor dem ersten Start der Optimierung durchgeführt werden. Die Prozessintegration und die automatische Modellaktualisierung innerhalb eines Optimierungsschrittes erfordern Programme, welche im Batch-Modus (ohne interaktiven Benutzerzugriff) arbeiten. Einmal gestartet, manipuliert Isight vorher definierte Parameter (z.B. Innenund Außenradien der Balkenelemente) der Aufhängungsstrukturen. Basierend auf diesen Daten löst der Abaqus Solver das Randwertproblem und kreiert eine Ausgabedatei (Abagus Output File). Diese wird anschließend mittels eines auf der Programmiersprache Python basierenden Konverters ausgelesen und benötigte Ausgabegrößen werden Isight in einer zusätzlich erzeugten Textdatei (generic WEM report file) zugänglich gemacht. Der Optimierer vergleicht die Ergebnisse der Rechnung dann mit den Zielvorgaben und Zwangsbedingungen und erstellt anschließend einen neuen Parametersatz. Die einzelnen Programme und Skripte werden automatisch von Isight gestartet, sodass eine geschlossene Optimierungsprozedur (siehe Bild 21) die pareto-optimalen Parametersätze (bei Mehrkriterienoptimierung) bestimmen kann.

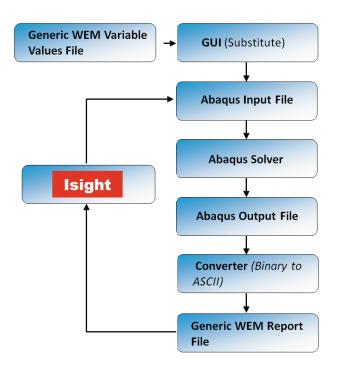


BILD 21: Parameteroptimierungsprozess

5.3.1. Formulierung der Optimierungsaufgabe

Als Zielfunktionen der multikriteriellen Parameteroptimierung wurden sowohl ein Minimierung der Gesamtmasse der Aufhängungsstruktur als auch eine Verringerung der maximalen Gesamttriebwerksverschiebung (bzgl. aller Lastfälle) definiert. Da die zu erwartenden Ergebnisse etwa dieselbe Größenordnung haben, brauchte keine Skalierung oder Gewichtung der Zielfunktionen durchgeführt zu werden. Restriktionen bilden Werte die bei Überschreiten ein Versagen des Bauteils zur Folge haben können. So wurden z.B. die maximal auftretende von Mises - Vergleichsspannung in einem Bauteil (Modul - Mises Assessement) und die maximale Schnittkraft in Stablängsrichtung (Modul - Buckling Assessement) in jeder Isight Optimierungsschleife (siehe Bild 22) mit Maximalwerten verglichen und ausgewertet. Innen- bzw. Außenradien der Balkenelemente, sowie Dicken von Schalenelementen und bestimmte Materialeigenschaften sind mögliche Variablen der Parameteroptimierung

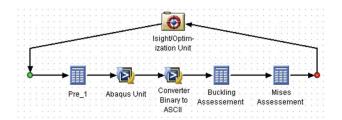


BILD 22: Optimierungsschleife in Isight

5.3.2. Ergebnisse

In der Ergebnisbetrachtung der Parameteroptimierung, für welche der genetische Algorithmus NSGAII verwandt wurde, ist die Ausbildung einer signifikanten Pareto - Front erkennbar (siehe Bild 23). Die möglichen Verbesserungen bzgl. der Referenzkonfiguration (Stern) betragen hinsichtlich einer maximalen Verschiebungsminimierung (Quader) ca. 11,25% und bezüglich einer maximalen Massenminimierung ca. 75% (Dreieck). Dieses zeigt das große Potential des gekoppelten Topologie- und Parameteroptimierungsprozesses hinsichtlich einer Gewichtsreduktion der Aufhängungsstruktur.

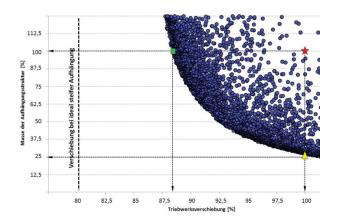


BILD 23: Ergebnis der Parameteroptimierung bei ca. 15000 Funktionsauswertungen

6. DANKSAGUNG

Gefördert wird dieses Projekt durch den Industriepartner Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG und das Land Brandenburg (BBG, Projekt: Optitheck). Die Autoren danken für die Unterstützung.

7. REFERENZEN

- [1] Altair HyperWorks (2009): Optistruct Reference Guide, Version 10.0.
- [2] Geiger, C. und Kanzow, Ch. (2002): Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- [3] Svanberg, K. (1994): On the convexity and concavity of compliances. Strucutral Optimization Volume 7, S. 42-46.
- [4] Springmann, M. (2007): Generisches Flugtriebwerksmodell für die Anwendung in der Vorentwicklungsphase, Fachaufsatz.
- [5] Bendsøe, M. P. (1995): Optimization of Structural Topology, Shape, and Material, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- [6] Kober, M. (2012): Ein Beitrag zur strukturmechanischen Optimierung realer Bauteile in metallischer und Faserverbundbauweise unter Verwendung von wirkebenenbasierten Bruchkriterien, MBV, Berlin.
- [7] Bestle, D. (1994): Analyse und Optimierung von Mehrkörpersystemen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- [8] Simulia Isight (2009): Getting Started Guide, Version 4.0.