

OPTIMIERUNG VON HALTERUNGEN IN DER FLUGZEUGKABINE

E.M. Kitili, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg,
Fakultät Technik und Informatik, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Berliner
Tor 9, 20099 Hamburg, Deutschland

In Zusammenarbeit mit ELAN GmbH, Channel Tower,
Karnapp 25, 21079 Hamburg, Deutschland

Abstract

Die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen (FVW) in der Luft- und Raumfahrt- und in der Automobilindustrie nimmt immer stärker zu. Die Luftfahrt ist eines der größten Anwendungsgebiete von FVW, wo vor allem Sicherheit und Gewicht eine sehr wichtige Rolle spielen. Bei einem geschätzten Bedarf von 25.000 Neuflygezeugen in den kommenden 25 Jahren und den ständigen Preiserhöhungen von metallischen Rohstoffen und Treibstoffen ist es eine Herausforderung der Luftfahrtindustrie, sowohl Strukturoptimierungs- und Gewichtsreduktionsmaßnahmen durchzuführen als auch den Treibstoffverbrauch künftiger Flugzeuge deutlich zu reduzieren.

Die herkömmlichen Halterungen in der A380 Kabine (A, B & C Brackets)¹ sind derzeit meistens aus Aluminium. Bei über 5.000 Fräshalterungen, die in den unterschiedlichen Kabinenkonfigurationen und Ausstattungsoptionen der Flugzeuge vorkommen, wiederholt sich die Geometrie bei mehreren Teilen. Obwohl sie eigentlich gleich und austauschbar sind, sind die Halterungen „Einzelfertigungen“, weil sie einzeln gefräst werden müssen, was im Endeffekt sehr aufwendig und teuer ist.

In dieser Arbeit werden drei von diesen Fräshalterungen untersucht, Geometrieoptimierungen durchgeführt und für diese ein Herstellungsverfahren gefunden, in dem sich die Halterungen aus FVW anfertigen lassen würden. Dies führt nicht nur zur Kostensenkung bei der Herstellung, sondern auch zur Gewichtsreduzierung des Flugzeugs, was im Endeffekt Treibstoffersparnis oder mehr Payload bedeutet.

1. AUFGABENSTELLUNG

Auf Grund ständiger Preiserhöhungen der Treib- und metallischer Rohstoffe, ist es eine unvermeidbare Herausforderung der Luftfahrtindustrie andere Materialien außer Metalle zu verwenden, Leichtbau anzuwenden und Strukturoptimierungen durchzuführen, um den Treibstoffverbrauch künftiger Flugzeuge zu reduzieren.

Die herkömmlichen Brackets sind zur Zeit meistens aus Aluminium gefräst, was sehr aufwendig und kostspielig ist. Mit dem aktuellen Wissen und der Erfahrung im Bereich FVK (Faserverstärkten-Kunststoffe), ist es möglich, je nach Anwendung und Zweck, die Brackets aus Kunststoff und FVK, anstatt aus Aluminium, herstellen. Dies würde nicht nur zur Kostensenkung bei der Herstellung führen, sondern auch zu Gewichtsreduzierung des Flugzeugs, was im Endeffekt für die Hersteller geringere Selbstkosten bzw. mehr Gewinn bedeutet, und für die Kunden (Airlines) Treibstoffersparnis oder mehr Payload Beförderung.

Hier sollen Statik und FE (Finite Elemente) Berechnungen von den ausgewählten Halterungen durchgeführt werden, welche die selbe Geometrie wie die Aluminiumhalterungen haben. Wenn nötig, soll die

Geometrieoptimierung anhand der Berechnungen gemacht werden.

2. DAS BRACKET KONZEPT

Die Brackets (Halterungen) dienen als Schnittstelle der Primär- und Sekundärstruktur, und zu Befestigung aller Bestandteile der Flugzeugkabine. Diese sind in drei unterschiedliche Gruppen aufgeteilt:

- 1) A - Brackets (fixed brackets) – Direkt an dem Flugzeugrumpf (Primärstruktur) angebracht. Sie werden der Primärstruktur angepasst.
- 2) B - Brackets (movable brackets) – Anbindungshalterungen für die A und C Brackets. Sie werden auf die A-Brackets fixiert. Manche davon sind verstellbar.
- 3) C - Brackets (Standard ATA 25 brackets) – Halterungen an den Monumenten und Verkleidungen. Sie sind entweder ausgestattet mit den Kabinemonumenten und Bestandteile der Kabinenverkleidung oder zusammen mit den B-Brackets.

¹ A Brackets – Direkt an dem Flugzeugrumpf angebracht

B Brackets – Anbindungshalterungen für die A und C Brackets

C Brackets – Halterungen an den Monumenten und Verkleidung

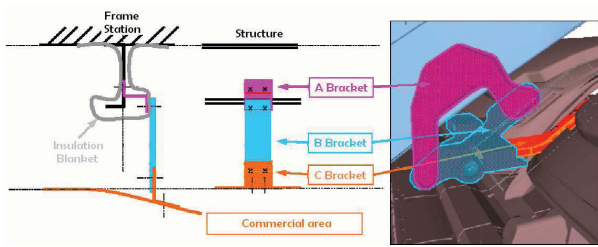


BILD 1. Das Bracket Konzept. A, B, und C Brackets

3. DAS PROJEKT

In diesem Projekt werden die Brackets untersucht und dafür ein Herstellungsverfahren gefunden, in dem die Halterungen aus FVW angefertigt werden. Dies führt, wie schon erwähnt, nicht nur zur Kostensenkung bei der Herstellung, sondern auch zur Gewichtsreduzierung des Flugzeugs, was im Endeffekt Treibstoffersparnis oder mehr Payload Beförderung bedeutet.

Die Hauptaufgabe dieses Projekts ist, die herkömmlichen Aluminiumhalterungen in der A380, die zahlreich verwendet wurden (≥ 10), ziemlich schwer ($\geq 50g$) oder teuer waren, durch Kunststoffe und FVK zu ersetzen. Des Weiteren ist, das am besten geeignete Material und Herstellungsverfahren auszuwählen. Mit Hilfe der FEM Untersuchungen wird die Geometrie der ausgewählten Halterungen optimiert. Ziel ist die Herstellungskosten der Halterungen zu minimieren bei einer gleichzeitigen Gewichtsreduktion der Halterungen.

Nach Abschluss aller Untersuchungen muss die Masse jeder optimierten Halterung mit seinem Vorgänger aus Aluminium verglichen werden, um festzustellen ob sie leichter sind. Da es sich um Spritzguss handelt, wird sich die Produktion der Halterungen höchstwahrscheinlich kostengünstiger darstellen, als die der Vorgänger.

3.1. Auswahl der Brackets

Das Hauptkriterium zur Auswahl der Brackets ist ihre Anzahl. Alle Brackets, die mehr als 5 Mal vorkommen, wurden aufgelistet. Auf Grund folgender Wahlkriterien wurde die Auswahl getroffen:

- 1) Kosten
- 2) Geometrie
- 3) Ähnlichkeit

Für die Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Hatrack Halterungen des Maindecks ausgewählt. Folgende Wahlkriterien wurden berücksichtigt:

- 1) Sie sind sich sehr ähnlich in der Geometrie
- 2) Sie sind sehr kostspielig bei der Herstellung, mit einer relativ einfachen Geometrie.
- 3) Es gab schon eine Studie an einem dieser Bauteile (Halterung 1 welche in diesem Manuskript beschrieben wird) aber aus einem nicht-für die Luftfahrt-zertifizierten Werkstoff (PEEK / CF 60) mit einem patentierten Verfahren.

- 4) Aus diesen Halterungen kann man eine Harmonisierung anderer Halterungen mit ähnlicher Geometrie schaffen.

3.2. Vergleich der Materialien

Hier wurde ein Vergleich zwischen Aluminium und den FVK, die in Frage kämen, und die für die Luftfahrt zertifiziert sind, gemacht. Diese waren:

- 1) EP/E-GF (Epoxydharz mit Elektrische Glasfaser)
- 2) PEI/GF 30 (Polyetherimid mit 30% bei Gewicht Glasfaser)
- 3) PEEK/GF 30 (Polyetheretherketone mit 30% bei Gewicht Glasfaser)
- 4) PEEK/CF 30 (Polyetheretherketone mit 30% bei Gewicht Kohlefaser)

Vergleicht man die Zug-E-Module und Zugfestigkeiten der Werkstoffe, so ist folgendes zu festzustellen:

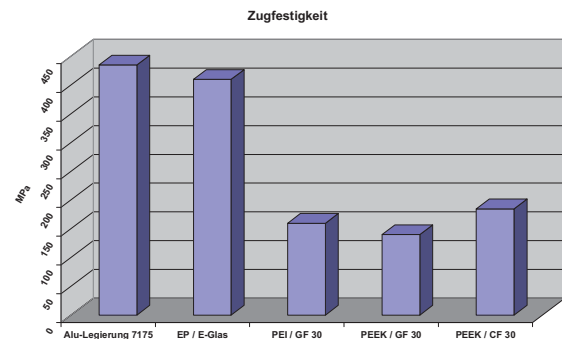


BILD 2. Zugfestigkeitsvergleich

Die Aluminiumlegierung, die für die Halterungen benutzt wird, hat in allen Punkten hervorragende mechanische Eigenschaften, die besser als die von den FVK sind, aber bei einer deutlich höheren Dichte. Dies ist jedoch aus Leichtbaugründen nicht ausreichend.

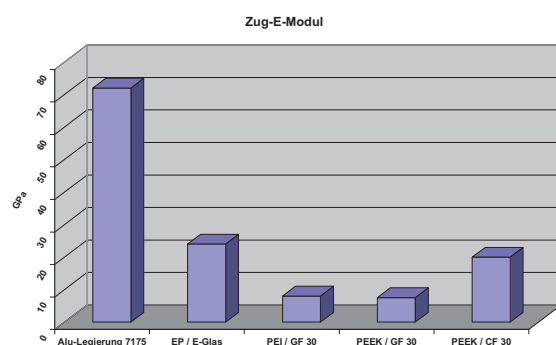


BILD 3. Zug-E-Modulvergleich

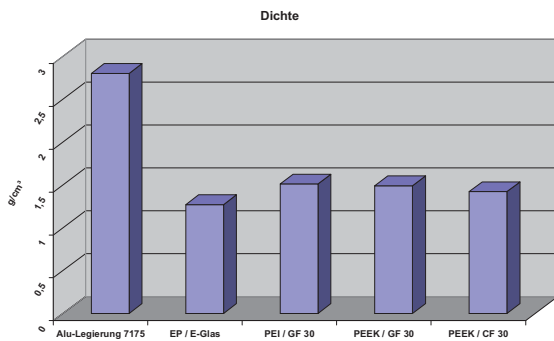


BILD 4. Dichtevergleich

Zwischen den drei thermoplastischen Kunststoffen hat PEEK / CF 30 wesentlich bessere mechanische Eigenschaften, wegen den ausgezeichneten Eigenschaften von Kohlenstofffasern. Glasfaserverstärkte Kunststoffe werden trotz ihrer höheren Dichte und schlechteren mechanischen Eigenschaften, jedoch günstigeren Preisen, sehr häufig und in vielen industriellen Gebieten verwendet.

Da PEEK / CF 30 ein Hochleistungskunststoff ist und wesentlich bessere Eigenschaften hat, ist es besonders geeignet für die Brackets. Der einzige Nachteil hier sind seine hohen Anschaffungs- und Verarbeitungskosten. Da die Querträger an denen die Halterungen montiert werden geerdet sind, ist die Leitfähigkeit von Kohlefaser (CF) zu vernachlässigen.

4. DURCHFÜHRUNG DER OPTIMIERUNGEN

Hier sollen Statik und Finite Elemente (FE) Berechnungen von den ausgewählten Aluminiumhalterungen durchgeführt werden, um einen Vergleich der auftretenden Spannungen und Verschiebungen erhalten zu können. Anschließend soll bewertet werden, ob für die Halterungen aus Kunststoff eine ähnliche Geometrie anwendbar wäre. Anhand der Berechnungen sind Topologieoptimierungen durchzuführen.

Es sollen am Ende der Untersuchungen herstellbare Bauteile entworfen werden, welche:

- 1) die vorgesehenen Lasten tragen können
- 2) an die vorgesehenen Anbindungspunkte (an das Crossbeam) angeschlossen werden können

Die wichtigste Frage hier ist, was muss das Teil aus FVK aushalten, um das aus Aluminium ersetzen zu können. Die Vorgaben, wie z.B. welche Kräfte auszuhalten sind und die Einsatzbedingungen, sind sehr wichtig und dürfen bei dem Modellieren nicht übersehen werden. Folgende Ziele müssen erreicht werden:

- 1) Kein Bruch des Bauteils
- 2) Begrenzte Verformungen
- 3) Instabilitätsvermeidung

4.1. Die zu untersuchenden Lasten

Die folgenden Lastfälle sind für die Halterungen H1 und H2 zu untersuchen:

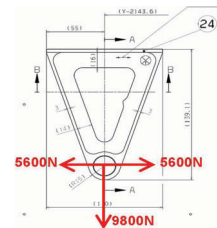


BILD 5. Lastfälle für H1 und H2

Man kommt auf diesen Lasten, in dem man das maximale Gewicht, welches in Hatracks geladen werden darf ($m = 100\text{Kg}$), mit den maximalen vorgegebenen Beschleunigungen bei Notlandungen in den jeweiligen Richtungen multipliziert.

Die Zulassung der Einbauten in der Kabine von großen Flugzeugen wird allgemein von der CS/FAR 25 geregelt (Siehe auch ATA 25: Cabin Furnishings). Die Praxis zeigt deutlich, dass bei Notlandungen die Passagiere diese Beschleunigungen aushalten können, jedoch können sie von Geschossen in der Kabine verletzt oder von den Hatracks erschlagen werden, was somit lebensgefährlich sein kann.

Die Hatracks sind heutzutage meistens überfüllt. Deswegen müssen sehr hohe Sicherheitsfaktoren (k) von bis zu 2 bei den Berechnungen eingebaut werden, um gewährleisten zu können, dass die Hatracks im Worst Case Scenario (Notlandung, bei der diese Beschleunigungen erreicht werden) in Position bleiben.

$$(1) \quad F = M * n * g * k$$

In Z Richtung:

$$(2) \quad 100\text{Kg} * 6 * 9,81\text{m/s}^2 * 1,66 = 9771\text{N}$$

In Y Richtung:

$$(3) \quad 100\text{Kg} * 3 * 9,81\text{m/s}^2 * 1,9 = 5592\text{N}$$

Die Halterung H3 ist weniger belastet, weil sie nur zur richtigen Positionierung der Hatracks benötigt wird. Sie wird nur in Z-Richtung belastet, da sie ein Ende eines Tie Rods aufnimmt.

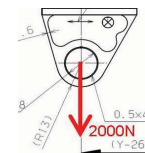


BILD 6. Lastfall für H3

Die folgenden Programme wurden bei der Optimierung angewandt:

- 1) CATIA V5 – Zum Modellieren
- 2) Hypermesh (**Pre Processor**) – Zur Vernetzung, zur Eigenschaften und Bedingungen Zuweisung.

- 3) Optistruct (**FE Solver und Optimierer**) – Zur Berechnung
- 4) Hyperview (**Post Processor**) – Zur Bewertung der Ergebnisse

Das reine Modellieren der Geometrie wurde in Catia V5 R16 gemacht. Die Konstruktion würde sich komplexer in Hypermesh auf Grund der Geometrie der Halterungen gestalten.

Die folgenden Schritte sind bei der Optimierung abgearbeitet worden:

- 1) Modell in **Catia V5** konstruieren
- 2) IGS File ausschreiben und in **Hypermesh** laden (Pre Processor)
- 3) In Hypermesh das Teil vernetzen, die Properties (Material Eigenschaften), Randbedingungen und Load cases (Lastfälle) zuweisen.
- 4) Optimierungskriterien wie z.B. Maximale zulässige Spannung eingeben
- 5) Mit **Optistruct** die Berechnungen ausführen (FE Solver)
- 6) In **Hyperview** die Ergebnisse bewerten (Post Processor)
- 7) Die optimierte Geometrie mit **OSSmooth** (Tool in Hypermesh) als IGS File ausschreiben.
- 8) In Catia laden
- 9) Mit der neuen Geometrie Schritt 1 bis 8 durchführen.

Als erstes sind statische Berechnungen mit den Teilen aus Aluminium durchgeführt worden, um einen Vergleich zwischen Aluminium und PEEK / CF 30 zu erhalten. Es ergaben sich folgende maximale Verschiebungen des Augenmittelpunkts für die Teile aus Aluminium:

Teile Nummer	Max. Verschiebung auf Grund Z-Last [mm]	Max. Verschiebung auf Grund Y-Last [mm]
H1	0,31	0,77
H2	0,19	0,84
H3	0,064	

TAB 1. Verschiebungen an den Aluminium Teilen auf Grund der Z und Y-Lasten

Laut den FE-Berechnungen würden die Brackets H1 und H2 (mit der selben Geometrie als die Aluminium Brackets) nicht halten, wären sie aus PEEK / CF 30 gebaut. Die einzuhaltende maximale zulässige Spannung für PEEK / CF 30 ist 160 Mpa. Dies wird deutlich überschritten, wie Bild 7 anzeigt. Alles was Rot ist, zeigt Stellen an denen dieser Wert überschritten wird. An diesen Stellen, bei diesen Belastungen, würde es zum Versagen des Bauteils kommen.

Die Halterung H3 würde halten, wäre sie aus PEEK / CF 30 gebaut, aber sie ist in dieser Form schwer herstellbar. Das Teil aus Aluminium ist überdimensioniert. Es ist ein Frästeil, und um Herstellungskosten zu sparen, wird beim Fräsen viel unnötiges Material am Bauteil gelassen.

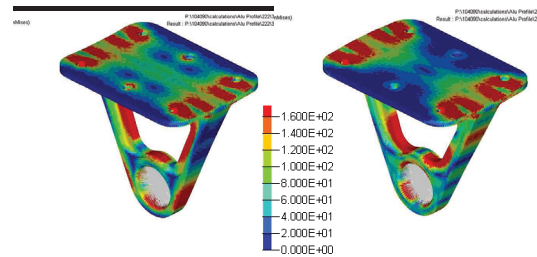


BILD 7. Spannungverlauf am Aluminium Profil von H1 gerechnet mit PEEK / CF 30 E-Modul. Rechts Z-Belastung, Links Y-Belastung

Bild 8 zeigt trotzdem ein Paar Spannungsspitzen an den Befestigungslochern. Diese hohen Spannungen sind auf Grund der Lagerungsbedingungen aufgetreten.

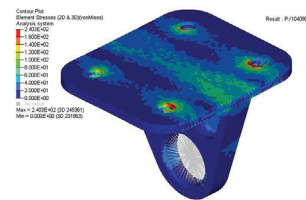


BILD 8. Spannungverlauf am Aluminium Profil von H3 gerechnet mit PEEK / CF 30 E-Modul

Bei der Lagerung handelt es sich um eine Idealisierung. Hier wurde die Fläche von den angewendeten Unterlegscheiben genommen, da diese Kontaktfläche, im Idealfall, als die Kraftübertragungsfläche zu den Schrauben angenommen werden kann. Die Teile werden an den Querträgern befestigt. Bei einer Belastung ist die Kontaktfläche zwischen der Halterung und dem Querträger eine zusätzliche „Lagerung“. Das heißt, dass die Kräfte auf eine größere Fläche verteilt werden, was im Endeffekt niedrigere Spannungen an diesen Stellen bedeutet.

Bei den Nachbarelementen der gelagerten Elemente entsteht nach den Berechnungen eine sehr hohe Steifigkeit. Grund dafür ist, wie schon oben genannt, die Lagerung; alle DOFs sind gesperrt, das heißt, dass die gelagerten Elemente sich gar nicht bewegen können und theoretisch unbelastet sind. Solch eine hohe Spannung ist in der Realität nicht möglich, da die Schraubverbindung auf Grund der Belastung nachgibt. Diese Spannungsspitzen sind somit nicht relevant.

Bei Schraubverbindungen tritt Lochleibungsdruck auf. Dies erklärt zusätzlich auch die Spannungsspitzen im Bild. Als Lochleibungsdruck bezeichnet man die auftretende Flächenpressung bei Bolzen und Nieten. Dieser Druck ist eine wichtige statische Kenngröße für die Berechnung von Materialstärken in Abhängigkeit der Lasteinwirkung. Der maximale Lochleibungswert ist immer größer, als die maximale zulässige Spannung. Dieses Thema wurde ausführlich in der Bachelorarbeit „Optimierung von Halterungen in der Flugzeugkabine“ behandelt.

4.2. Die Optimierung

Bei gleichzeitiger Erfüllung vorgegebener Optimierungsparameter und Randbedingungen, handelt es sich bei der Topologieoptimierung um die Suche nach der optimalen Materialanordnung, mit dem Ziel das Gewicht zu minimieren. Die gegebenen maximalen zulässigen Spannung müssen eingehalten werden.

In diesem Manuskript wird die Optimierung von H1 beschrieben. Dieses Teil wird mit sechs Schraubverbindungen am Querträger (Crossbeam) befestigt. Diese Befestigungspunkte sind bei der Optimierung beizubehalten, damit das Teil ausreichend befestigt ist und der Querträger nicht verändert werden muss.

Abgebildet sind Von-Mises Vergleichsspannungen. Die Vergleichsspannung bezeichnet eine fiktive einachsige Spannung, die dieselbe Materialbeanspruchung darstellt wie ein realer, mehrachsiger Spannungszustand. Damit kann der wirkliche dreidimensionale Belastungszustand im Bauteil, bestehend aus Normalspannungen und Schubspannungen, in allen drei Raumrichtungen, direkt mit den Kennwerten aus dem einachsigen Zugversuch (Materialkennwerte, z.B. Streckgrenze oder Zugfestigkeit) verglichen werden. Von-Mises Spannungen können keiner Richtung zugeordnet werden und sind nur skalare Werte.

Die Spannungsspitzen an den Befestigungslöchern sind ausführlich auf der vorherigen Seite erklärt und sind also zu vernachlässigen.

Bei der Optimierung werden Elemente bzw. Material nur weggenommen. Man sollte dem Optimierungsprogramm soviel Spielraum wie möglich für die erste Optimierung lassen. Dies bedeutet, dass man erst ein Blockmodell erzeugen soll, um dieses dann zu optimieren.

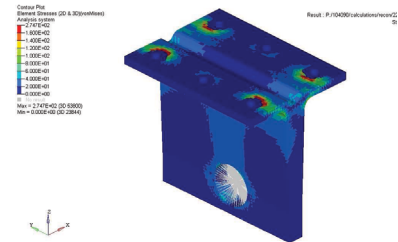


BILD 11. Spannungverlauf auf Grund der negativen Y-Last

Als erstes Optimierungsergebnis erhält man:

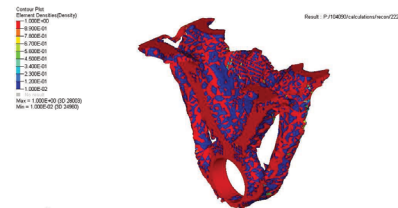


BILD 12. Erste Optimierungsergebnisse

Die Topologieoptimierung erfolgt über eine Kopplung zwischen der Steifigkeit und den Elementdichtewerte des Bauteils. Dies wird dargestellt durch rote Elemente mit 100 % Dichte und blaue Elemente mit 0 % Dichte, wie oben angezeigt. Elemente mit einer Dichte von über 51% werden üblicherweise bei der Optimierung als Ergebnis übernommen.

Nach der Nach-Konstruktion der neuen Geometrie in Catia V5 und anschließende FE Modellerzeugung in Hypermesh sind neue Berechnungen durchzuführen. Jede Optimierungsberechnung an einer neuen Geometrie ergibt neue Ergebnisse.

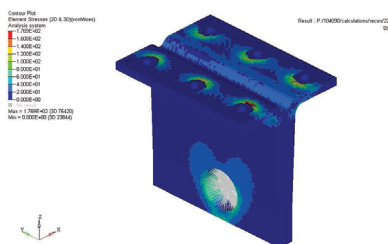


BILD 9. Spannungverlauf auf Grund der Z-Last

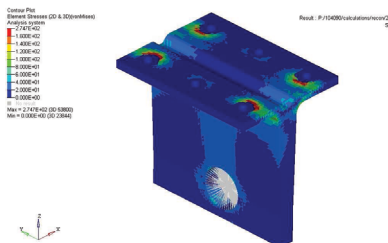


BILD 10. Spannungverlauf auf Grund der positiven Y-Last

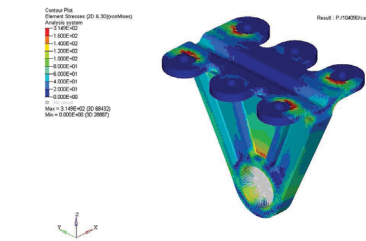


BILD 13. Spannungverlauf auf Grund der positiven Y-Last an der vierten Optimierung

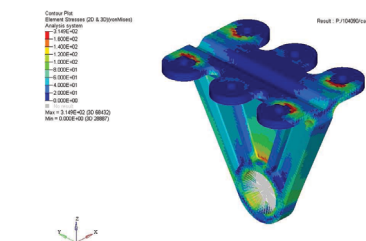


BILD 14. Spannungverlauf auf Grund der negativen Y-Last an der vierten Optimierung

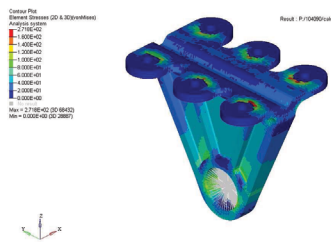


BILD 15. Spannungsverlauf auf Grund der Z-Last an der vierten Optimierung

Es ist deutlich erkennbar, dass es noch Raum gibt dieses Bauteil weiter zu optimieren (Siehe Bild 16). Die Befestigungslöcher und die Wand zwischen den Stegen müssen aus Fertigungsgründen (besseres Fließen des Materials bei der Herstellung) beibehalten werden.

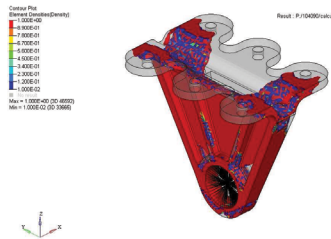


BILD 16. Fünfte Optimierung an dem Endergebnis

4.3. Fertigungsgerechtes Konstruieren

Die Teile werden im Spritzgussverfahren hergestellt (Gusstemperatur liegt bei ca. 400°C).

Bei den sogenannten Verbindungspunkten (Ecken und Kanten) ist die Faserablage, im Gegensatz zu der bei den ebenen Flächen, bei der Herstellung problematisch. Grund dafür sind die kleinen Radien, die zur Lunkerbildung führen und die Fasern dort sich nicht anschmiegen können. Günstiger wären möglichst große Radien der Verrundungen einzufügen. Das Problem dabei ist, dass an den Verbindungspunkten sich sehr viel Material sammelt und das Bauteil an diesen Stellen deswegen eine größere Materialstärke erhält.

Um gewährleisten zu können, dass die Teile aus dem Spritzgussverfahren herstellbar sind, müssen einige Veränderungen an der Geometrie vor den Optimierungen gemacht werden. Alle Verrundungen an den Ecken und Kanten müssen auf 0,5 bis 1 mm verkleinert werden. Dies versichert, dass das Material gut um die Ecken und Kanten fließen kann und verhindert Materialanhäufung an den stärkeren Stellen (wo der Verbindungsradius größer war). Das wiederum reduziert die Kerbschlagzähigkeit zu einem Minimum.

Bei der Auswahl einer Gussform sind auch die Fließlinien des Materials zu berücksichtigen. Alle möglichen Ursachen für Lunker sollten bei der Konstruktion vermieden werden. Dies kann man erreichen indem die einfachste Form zum Spritzgießen benutzt wird.

Die Dicke des gesamten Bauteils spielt eine sehr große Rolle bei der Aushärtung. Es gibt eine maximale Dicke (bis zu 6 mm), darunter wird garantiert, dass das Teil so

gleichmäßig wie möglich aushärtet. Dies verhindert die Bildung von Eigenspannungen, die zu der Zerstörung des Bauteils führen können, bei deutlich geringeren Belastungen. Bei höheren Dicken muss das Bauteil an manchen Stellen entweder erwärmt oder extra gekühlt werden, damit es nicht zum Verzug bzw. zur Eigenspannung kommt. Die Herstellung wird dadurch aufwendiger und im End-Effekt teurer. Aus diesem Grund ist es wichtig sich an die maximale Dicke von 6 mm zu halten.

Bei der Anbindungsline zwischen dem Steg und der Platte ist ein möglichst großer Verrundungsradius einzubauen, um die hohen Spannungen, die dort eintreten zu minimieren. Je größer dieser Radius ist, desto höher ist der Materialansatz an diesen Stellen. Aus Fertigungsgründen wurde eine Rille eingebaut, damit die maximale Materialdicke von bis zu 6 mm eingehalten werden kann. Dies wird in Bild 17 verdeutlicht. Es wird angezeigt, dass die Optimierungsergebnisse eine Tasche einbauen. So eine Tasche erhöht die Herstellungskosten des Bauteils, da ein zusätzlicher Schieber eingebracht und nach der Abkühlung ausgezogen werden muss.

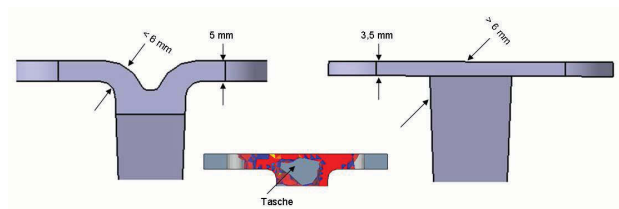


BILD 17. Auswirkung der eingebauten Rille bei dem PEEK Bauteil

Die Hauptentformungsrichtung ergibt sich aus der ausgewählten Form. Sehr kleine Verjüngungen, die so genannten Entformungsschragen bzw. Auszugsschragen von 0,5° bis 1°, sind bei den Flächen, die parallel zu der Hauptentformungsrichtung verlaufen, einzubauen. Grund hierfür ist die Ablösung der Bauteile aus der Form. Wird dies nicht berücksichtigt, bräuhete man viel höhere Kräfte um das Bauteil abzulösen. Es würde zum Zerkratzen der Oberflächen führen, was auch Schwachstellen hervorbringt, oder sogar zur Zerstörung des Gussteils führen kann. Die gelben Linien, in Bild 18, zeigen wie die Schragen bei einem vereinfachten Bauteil aussehen können.



BILD 18. Vereinfachtes Beispielbild von Spritzgießen

Das Auge bekommt auch Entformungsschragen von bis zu 1°. Die Befestigungslöcher liegen quer zu der Hauptentformungsrichtung. Zur Herstellung müssen Schieber angebracht werden, die der Fertigung der Löcher dienen. Die Schieber haben in der Regel eine

Verjüngung, damit sie leicht herausgenommen werden können.

Alle Außenkanten und Ecken am Bauteil sollen möglichst nicht scharfkantig sein, weil wichtige Kabel und Schläuche von unterschiedlichen Systemen in der Nähe der Halterungen verlaufen. Deswegen müssen sie mit einem Verrundungsradius von mindestens 0,3 mm versehen werden.

4.4. Human Factors

Für den Einbau der Bauteile müssen Einbauhilfen eingesetzt werden, um die Positionierung der nicht symmetrischen Teile zu vereinfachen und die Spiegelteile unterscheiden zu können. Bei den Vorgängermodellen wurde dies erreicht, indem eine kleine Nase an einem der Stege konstruiert wurde. Für die optimierten Teile wurde die Nase durch ein kleines Loch zwischen den Rippen ersetzt. Dieses Identifikationsloch wurde für alle drei Teile konstruiert.

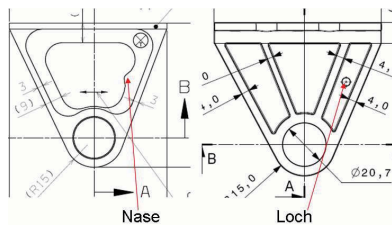


BILD 19. Ein Loch ersetzt die Nase

5. DIE ERGEBNISSE

Durch die Optimierung können die Halterungen aus Aluminium durch neue Kunststoffhalterungen ersetzt werden.

Die Herstellungszeiten bei Frästeilen sind im Vergleich zu der beim Spritzgießen relativ lang. Man muss zuerst die Aluminium Rohlinge einspannen, fräsen und dann herausnehmen, was sehr viel Zeit in Anspruch nimmt (pro Teil mindestens fünf Minuten). Die Vorgänge beim Spritzgießen sind: Form schließen, Material einspritzen, Form öffnen und Teil herausnehmen. Diese Vorgänge sind entweder automatisiert, oder geschehen unter geringem Personaleinsatz, was die Herstellung günstiger gestalten kann. Für diese Halterungen bedeutet das eine Herstellungszeit von etwa einer Minute pro Bauteil.

Das Hauptziel des Projektes ist die Herstellungskosten der Halterungen zu senken. Aus diesem Grund wurde ein relativ günstiges Verfahren gewählt. Die Preise von den Ausgangsmaterialien PEEK und CF liegen über den von Aluminium, aber die Herstellungskosten sind viel niedriger, dass die Anschaffungskosten übersehen werden können. Dazu gibt es kaum Materialverschwendung bei der Herstellung, da es in eine Form im flüssigen Zustand gespritzt wird. Beim Fräsen muss das abgeschnittene Material noch gesammelt bzw. entsorgt werden, was zusätzliche Kosten verursacht.

Ein Werkzeug zur Herstellung der Halterungen kostet um die 30.000€. Nehmen wir als Beispiel die Halterung H1, die zur Zeit um die 52€ pro Stück kostet. Erst bei 520 Stück, sind die Werkzeugkosten gedeckt. Es würde sich nur lohnen die PEEK Teile einzusetzen bei einer geschätzten Stückanzahl von 1.500. Bei über 40 Teilen pro Flugzeug, bedeutet dies eine Bestellung von mindestens 38 Flugzeugen, damit sich die Optimierungen überhaupt rentieren. Bei 1.500 Stück aus Aluminium würden sich die gesamt Kosten auf ca. 78.000€ belaufen und aus PEEK bei einem geschätzten Stückpreis von 50€, 75.000€. Je mehr Halterungen bestellt werden, desto niedriger fallen die Stückkosten aus, da die Werkzeugkosten auf alle Teile berechnet werden.

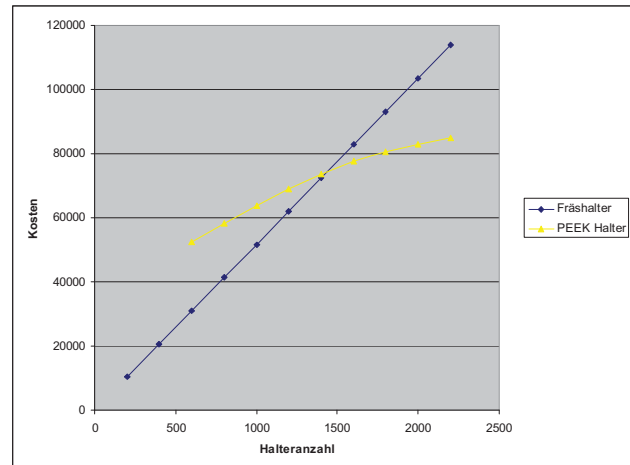


BILD 20. Vereinfachte Darstellung der Kostenvergleich. Break Even Point liegt bei ca. 1420 Halterungen

5.1. Volumen/Masse Vergleich

PEEK / CF 30 hat eine Dichte von $1,42 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$, während die der Aluminiumlegierung $2,79 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Die Dichte von PEEK / CF 30 liegt also ungefähr 50% unter der der Aluminiumlegierung. Das spiegelt sich bei dem Gewicht der Halterungen wieder. Obwohl die Halterungen aus PEEK (außer H3) ein größeres Volumen haben, ist auf Grund der relativ niedrigen Dichte trotzdem eine sehr hohe Gewichtsersparnis möglich.

Model	Alu [g]	PEEK [g]	Gewichtersparnis [%]
H1	71	46	35,2
H2	152	91	40,1
H3	38	12	68,4

TAB 2. Gewichtsvergleich zwischen den Teilen aus PEEK und Aluminium

Bei 40 Teilen gäbe es eine Gewichtsersparnis von 4,5 Kg pro Flugzeug.

5.2. Steifigkeitsvergleich

Die Verschiebungen der Hatracks sollten minimal sein, denn im Worst Case Szenario, wo z. B. sehr hohe Dimensionierungsbeschleunigungen eintreten können und das Flugzeug stark beschädigt werden kann, ist es ein Muss die Sicherheit der Passagiere zu gewährleisten. Eine Vorgabe für die maximale Verschiebungen gibt es jedoch nicht.

Die resultierenden Verschiebungen des Augenmittelpunkts der Halterungen sind in Tabelle 3 abgebildet.

Teile Nummer	Max. Verschiebung aufgrund Z-Last [mm]		Max. Verschiebung aufgrund Y-Last [mm]	
	Alu	PEEK CF 30	Alu	PEEK CF 30
H1	0,31	0,32	0,77	0,75
H2	0,19	0,36	0,84	1,37
H3	0,064	0,18		

TAB 3. Steifigkeitsvergleich zwischen den Teilen aus PEEK und Aluminium

Diese Verschiebungen sind sehr klein und sind deshalb zu vernachlässigen.

und anschließend in das Auge der Brackets eingesetzt. Beim Erwärmen dehnt sich das Lager wieder aus. Auf Grund der Ausdehnung entsteht ein Druck (Vorspannung) am Lager und an der Halterung. Dieses fixiert das Lager. Diese Vorspannung ist sehr niedrig und kann bei der Dimensionierung des Bauteils in den Hintergrund treten.

- Bei dem Pressverfahren wird das Lager unter Druck in das Auge hineingepresst.

Von diesen Verfahren scheint das Pressverfahren am wenigsten geeignet zu sein. PEEK / CF 30 ist viel weicher als Stahl. Das heißt, dass das Lager durch das PEEK Bauteil durchstanzen könnte. Beim Kleben müssen in der Regel die zu klebenden Flächen aufgeraut werden. Dies kann zu Schwachstellen bzw. zur Zerstörung des Bauteils führen. Die unterschiedlichen Klebmethoden sind also genau unter die Lupe zu nehmen, um genau dies zu vermeiden.

Es gibt sehr viele Bauteile, die auf Funktion, Form, oder andere Kriterien optimiert werden können, um Gewicht und auch Materialeinsatz zu minimieren. Dieses Projekt dient als Basis für künftige Optimierungsprojekte.

Bei vielen Bauteilen ist die Geometrie sehr ähnlich. Man könnte diese Teile harmonisieren und zusammen mit dem Smart-Part-Prinzip bauen, um Produktionskosten zu minimieren. Die Herstellung von Smart-Parts mit Adaptionfähigkeiten wäre eine von weiteren Studien.

6. AUSBLICK FÜR DAS PROJEKT

Erst nach der Prototypenherstellung der Brackets und umfassenden Strukturtests kann die Optimierung umgesetzt werden. Es ist also notwendig die Teile zu testen um mögliche Schwachstellen besser zu erkennen. Es wäre sinnvoll sich nicht nur auf die Berechnungen zu verlassen, da bestimmte Faktoren nicht außer Acht gelassen werden können, die in der Praxis getestet werden müssen, wie z.B. die Faserausrichtung an den Verundungen.

Es ist vorgesehen aus dem ausgewählten Material (PEEK / CF 30) einen oder mehrere Prototypen durch das Herstellverfahren Spritzgießen produzieren zu lassen. Tests wie z.B. der Zugversuch (bei der Last in Z-Richtung) an den Prototypen sind auch vorgesehen. Die Lasten die angewendet wurden um die Teile zu dimensionieren, werden für diese Tests benutzt. Dynamische Tests sind nicht vorgesehen.

Das Auge bei allen drei Halterungen nimmt ein Lager zur Befestigung des Hatracks auf. Zu untersuchen wäre, wie die Lager dort eingebracht werden können. Die möglichen Verfahren, die bis dato in Frage kommen, sind Kleben, Pressen und Schockgefrieren.

- Beim Kleben werden die Halterung und Lager mit Hilfe eines Hochleistungsklebers zusammen geklebt.
- Beim Schockgefrieren wird das Lager auf Temperaturen von -80°C bis -100°C runtergekühlt