



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Konzeptentwicklung eines Flugzeugsitzes mittels computerunterstützten Optimierungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Grafinger

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik Forschungsbereich
Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung)

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Diego Zuniga

Matr.Nr. 1027908



Wien, im Oktober 16

Diego

Zuniga



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Oktober 16

Diego

Zuniga

Kurzfassung

Für den wirtschaftlichen Erfolg im Flugzeugbau sind geringes Gewicht und kompakte Maße entscheidend. Dieses Prinzip gilt auch für die Entwicklung von Flugzeugsitzen.

Die Firma EK Design möchte daher die Methoden des Leichtbaus auf die Primärstruktur einer Flugsitzreihe, sowie deren Rückenlehne anwenden, um neue Konzepte für deren Konstruktion zu entwickeln. Die topologische Optimierung der Strukturen durch eine Kopplung von CAD- und FE- Werkzeugen soll zu einer Reduzierung des Gesamtgewichts, sowie einer Reduzierung des Bauraumes, bei Einhaltung aller sicherheitsrelevanten Kriterien, führen.

Ziel der Arbeit ist die Ausarbeitung und Simulation von innovativen Ansätzen für eine Flugzeugsitzstruktur mithilfe von Bauteiloptimierungsverfahren wie CAO (Computer Aided Optimization).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Sitzbauteile	5
2.2	Zulassung von Fluggastsitzen	8
2.3	Zertifizierungstests	10
2.4	Zulassungskriterien	13
3	Aufgabenstellung und Methoden	15
3.1	EK Design AG	15
3.2	Front Loading - Design & Engineering	15
3.3	Methodik der Topologieoptimierung	16
3.4	Methodik der Composite-Optimierung	17
4	Bestehender Fluggastsitz	23
4.1	Mögliche Änderungen und Optimierungspotentiale	26
5	Erste Berechnung und Lastpfaduntersuchung	28
5.1	Lastpfade in der bestehenden Sitzstruktur	28
5.1.1	Rückenlehne	29
5.1.1.1	Vereinfachen des Bauteils	29
5.1.1.2	Lagerung, Randbedingungen, Lastfälle	29
5.1.1.3	Erste Ergebnisse und Erkenntnisse	31
5.1.1.4	Weitere Experimente	33
5.1.2	Sitzteiler	36
5.1.2.1	Vereinfachen des Bauteils	36
5.1.2.2	Lagerung, Randbedingungen und Lastfälle	37
5.1.2.3	Erste Ergebnisse und Erkenntnisse	39
5.1.2.4	Weitere Experimente	40
5.1.3	Sitzfüße	43
5.1.3.1	Vereinfachen des Bauteils	43
5.1.3.2	Lagerung, Randbedingungen und Lastfälle	43
5.1.3.3	Erste Ergebnisse und Erkenntnisse	44
6	Erste Composite-Optimierung der Rückenlehne	46
6.1	Modell, SPC und Lastfälle	46

6.2	Optimierungsparameter, Lagen- und Materialeigenschaften	47
6.3	Ergebnisse der Composite-Optimierung	48
6.3.1	Ergebnis CFK-Rückenlehne mit Schaumstofflagen.....	48
6.3.2	Ergebnis CFK-Rückenlehne ohne Schaumstofflagen.....	50
6.3.3	Vergleich beider Ergebnisse	51
7	Konzeptfindung.....	52
7.1	Innovative Konzepte.....	52
7.2	Erste Konzeptideen	58
7.2.1	Rückenlehnentragarm.....	60
7.2.2	Sitzteiler und Rückenlehnentragarm.....	64
7.2.3	Sitzboden aus CFK	66
7.3	Neues Sitzkonzept	69
8	Optimierung des neuen Flugsitzkonzeptes	71
8.1	Rückenlehne	71
8.1.1	CFK-Lagen 0°, 45°, -45°, 90°	72
8.1.2	CFK-Lagen 0°, 30°, -30°, 45°, -45°, 60°, -60°, 90°	74
8.1.3	Endgültige Rückenlehne Mit Rahmenstruktur.....	75
8.2	Sitzschale	79
8.2.1	Erste Optimierung	80
8.2.2	Mit Verstärkungen.....	81
8.3	Armlehnenenträger	83
8.4	Tischarm	85
8.5	Sitzfuß	87
8.5.1	Einteilig	88
8.5.2	Geteilt.....	89
9	Finite-Elemente-Analyse der optimierten CFK-Rückenlehne	90
9.1	Modell und Lastfälle	90
9.2	Ergebnis	92
9.2.1	Verschiebung	92
9.2.2	Composite Failure	94
9.3	Aussage	97
10	Schlussfolgerung	100

10.1	Gewicht	102
10.2	Living Space.....	103
11	Literaturverzeichnis	105
12	Abbildungsverzeichnis.....	107
13	Tabellenverzeichnis.....	111

1 Einleitung

Der Fluggastsitz ist einer der wichtigsten Komponenten in einem Passagierflugzeug. Der durchschnittliche Passagier verbringt 95% der Flugzeit im Sitzen. Die Flugzeughersteller und Fluglinien legen also einen sehr hohen Wert bei der Auslegung und Auswahl an Flugzeugsitzen. Ein Fluggastsitz dient heutzutage nicht nur zum Sitzen sondern bietet auch eine Vielzahl von anderen Funktionen.

In erster Linie muss ein Flugzeugsitz den Passagieren Sicherheit gewährleisten. So wird die tragende Primärstruktur eines Fluggastsitzes für das Aushalten von Notfallsituationen und Turbulenzen ausgelegt. Weiters sollen die Sitze möglichst ergonomisch gestaltet werden, damit die Passagiere während des Fluges eine angenehme Sitzposition einnehmen können. Sind die Sitze ergonomisch, so finden die Passagiere diese auch bequem und bevorzugen jene Fluglinie, die komfortable Sitze hat.

Je nach Flugstrecke und Buchungsklasse sind die Flugzeugsitze unterschiedlich ausgestattet. Die meisten Flugzeugsitze lassen sich verstellen und bieten eine On-Board-Unterhaltung (Bildschirm, Musik) an. Die Ausstattung der Sitze und die verschiedenen Funktionen bestimmen unter anderen Faktoren auch den Flugticketpreis.

In dieser Arbeit soll ein bestehender Flugzeugsitz auf Optimierungsmöglichkeiten untersucht werden. Mit den Optimierungsvorschlägen soll im Nachhinein der bestehende Sitz optimiert werden oder wenn möglich ein neues Konzept für einen neuen Fluggastsitz entwickelt werden. Das Hauptziel der Optimierung soll eine Gewichtsreduktion und eine Living-Space-Verbesserung sein. Durch eine Gewichtsreduktion sparen die Fluglinien Kraftstoffkosten und durch einen besseren Living-Space lassen sich mehreren Sitzreihen anbringen oder die Passagiere haben mehr Platz zur Verfügung.

Als Hilfsmittel für die Ausarbeitung von neuen Ansätzen sollen das Computer Aided Engineering CAE und insbesondere rechnerunterstützte Optimierungsverfahren (Computer Aided Optimization CAO) verwendet werden. Eine enge Zusammenarbeit mit der Designabteilung von der Firma EK Design ist vom Anfang an bevorzugt, um schon in den ersten Entwurfsphasen die Ästhetik der Flugzeugsitzstruktur mit einzubeziehen.

2 Grundlagen

Flugzeugsitze sind Bestandteil aller Passagierflugzeuge und haben die Hauptfunktion: Passagieren einen sicheren und bequemen Sitzplatz zu gewährleisten. Je nach Größe des Flugzeuges, Sitzklasse und Dauer der Flugstrecke, sind Flugzeugsitze verschieden ausgestattet, dimensioniert und angeordnet. Die Dimensionen eines Sitzes derselben Kategorie können auch von Fluglinie zu Fluglinie variieren.

Die Sitze werden unterschiedlich, je nach Flugzeuggröße, nebeneinander und hintereinander in einer Reihe angeordnet. Die Anordnungen der Sitze in einer Reihe können von 1-1 (ein Sitz, gang, ein Sitz) in sehr kleinen Maschinen bis zu 3-4-3 in einem Boeing 747 reichen. Weiters ist die Anzahl an Sitzreihen auch durch die Flugzeuglänge beschränkt.

Die Breite der Sitze hängt von der Breite des Flugzeugsrumpfes und von der Buchungsklasse ab. Denn je nach Buchungsklasse zahlt der Passagier mehr oder weniger für die entsprechende Bequemlichkeit. Die zwei üblichen Buchungsklassen sind „Economy Class“ und „Business Class“. Es gibt aber auch Flugzeuge die mit drei Sitzklassen ausgestattet sind: First Class, Business Class und Economy Class oder Business Class, Economy Plus Class und Economy Class.



Abbildung 1: Sitzplan in einem Airbus A330-300 - Economy Class, Economy Plus Class und Business Class¹

Sitze der First Class und Business Class unterscheiden sich im wesentlichen durch ihre Ausstattung, die Verstellbarkeit des Sitzes und der Servicegrad von den Flugbegleitern. In der Business Class sind die Sitze sehr breit und in manchen Fällen

¹ Quelle: <https://www.flyedelweiss.com/DE/about-edelweiss/Pages/fleet.aspx>, Zugriff am 24.7.16

sogar schräg zur Flugrichtung positioniert. Die Economy-Class-Sitze hingegen sind in der Regel in Flugrichtung ausgerichtet. Sitze derselben Buchungsklasse variieren auch in ihrer Breite je nach Breite des Flugzeugrumpfes.



Abbildung 2: Economy Sitz CL3710 von Recaro Aircraft Seating ²



Abbildung 3: Business-Class-Sitz CL4400 von Recaro Aircraft Seating ³

Es variiert nicht nur die Breite der Sitze derselben Klasse, sondern auch der Sitzabstand. Sitzreihen für Langstrecken haben in der Regel einen größeren Abstand zueinander um mehr „Living Space“ und somit auch mehr Bequemlichkeit zu ermöglichen. Der so genannte Living Space ist der Raum, der einem Passagier beim Sitzen zur Verfügung steht (siehe Abbildung 4). Sitze der Economy Plus Klasse sind in der Regel dieselben Sitze der Economy Klasse, sie haben aber einen größeren Abstand zur Vorderreihe und weisen somit mehr Living Space und Beinfreiheit auf. Der Abstand zwischen Sitzreihen wird Pitch genannt und beträgt bei Economy Sitzen zwischen 28 und 32 Zoll (ca. 71 bis 81cm)

Verschiedene Fluglinien haben auch unterschiedlichen Sitzreihenabstand, denn mit einem kleineren Sitzabstand und daraus folgend einen kleineren Living Space, können mehrere Sitzreihen in einem Flugzeug angebracht werden. Dies bedeutet einerseits mehr Passagiere, die für den Flug zahlen, aber auch beschränkte Bequemlichkeit. So können Fluglinien mit einem kleinen Living Space weniger für ein Flugticket als andere Fluglinien verlangen. Optimal wäre also mehr Sitzreihen ohne Reduzieren des Living Spaces anbringen zu können.

² Quelle: <http://de.recaro-as.com/produkte/economy-class/cl3710.html>, Zugriff am 24.7.16

³ Quelle: <http://de.recaro-as.com/produkte/business-class/cl4400.html>, Zugriff am 24.7.16

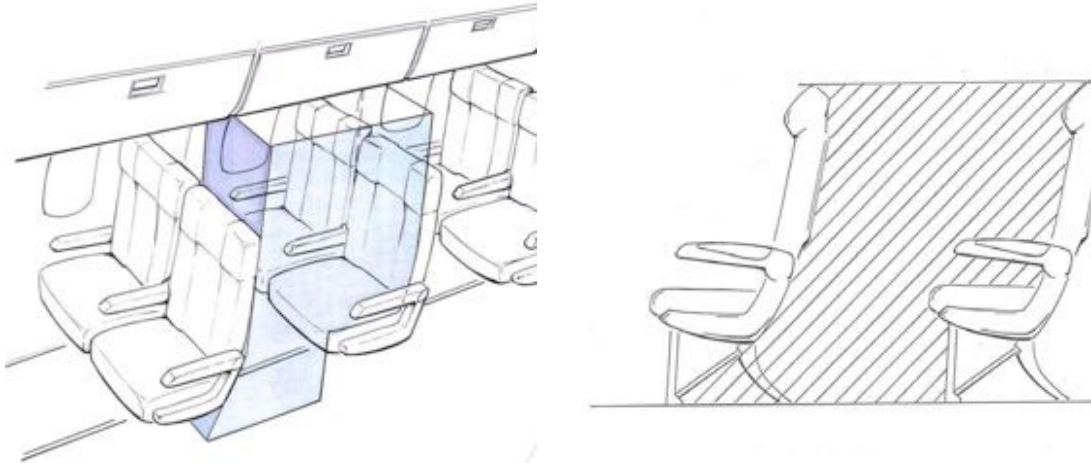
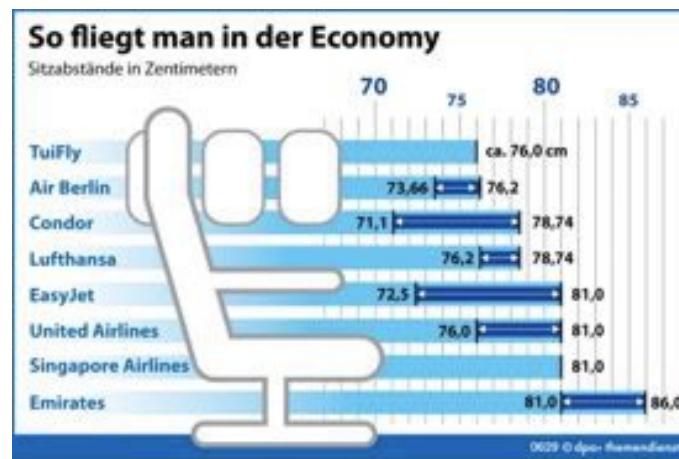


Abbildung 4: Living Space [1]

Abbildung 5: Sitzabstände der verschiedenen Fluglinien ⁴

⁴ Quelle: <http://www.derwesten.de/leben/der-platz-ueber-den-wolken-sitzabstaende-in-der-economy-id9399232.html>, Zugriff am 24.7.16

2.1 Sitzbauteile

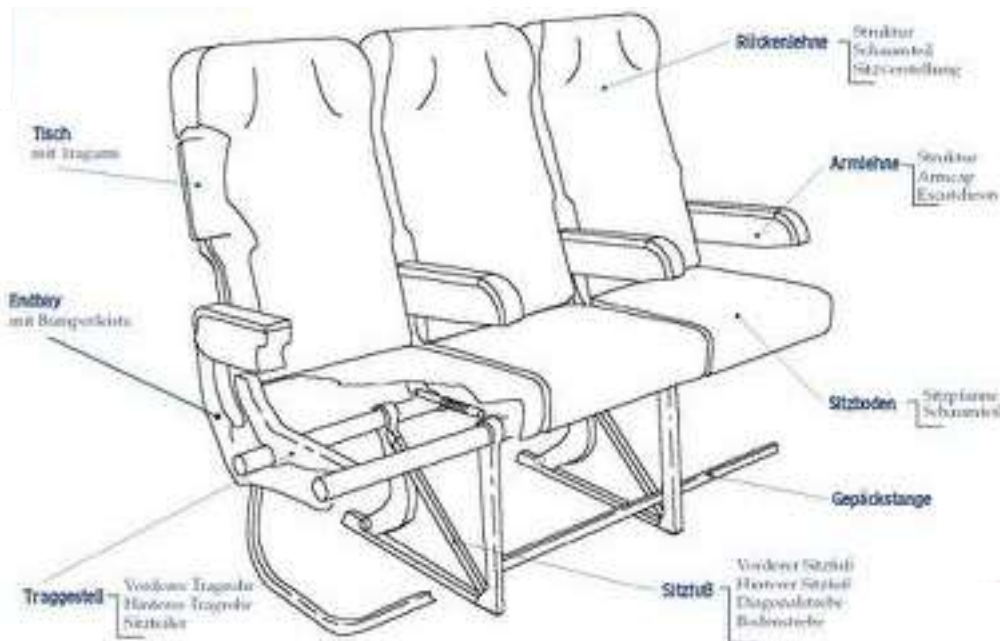


Abbildung 6: Bauteile - Sitzreihe [1]

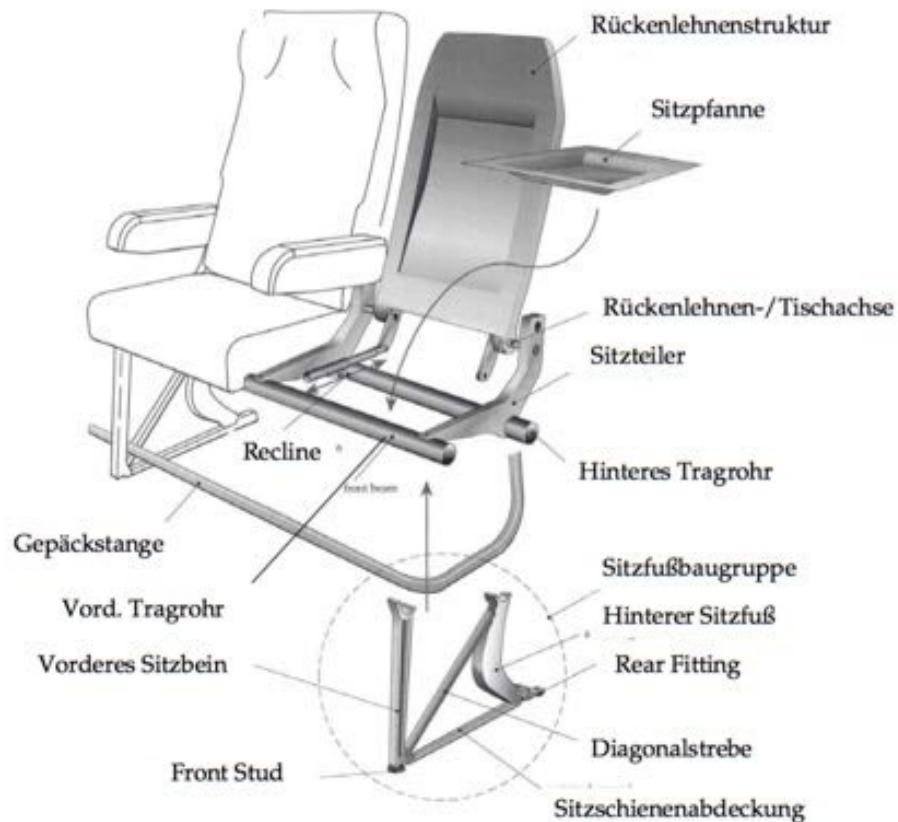


Abbildung 7: Bauteile - Tragende Struktur [1]

Eine Economy Sitzreihe mit drei Sitzen ist wie in Abbildung 6 dargestellt und besteht aus folgenden Bauteilen:

- **Rückenlehne:**

Hat die Hauptfunktion den Rücken der Passagiere während des Sitzens zu stützen. Sie ist üblicherweise zweifach beidseitig an den Sitzteilern drehbar gelagert. Die Drehbarkeit der Lager ermöglicht ein Verstellen der Rückenlehne. Die Rückstellung beziehungsweise die Halterung erfolgt über einen Gaszylinder, der sich unter dem Sitzboden befindet. Vorne wird eine Polsterung angebracht und hinten befindet sich im Normalfall eine Kunststoffbedeckung. Die Kunststoffbedeckung dient einerseits zum Decken der Tragstruktur und zum Design und andererseits zum Abringen der verschiedenen Ausstattungen: wie zum Beispiel einen Bildschirm, ein Magazinfach, eine Tischhalterung oder Taschen für persönliche Sachen.

- **Sitzboden:**

Der Sitzboden dient zum Sitzen und ist ergonomisch für Kurz- und Langstrecken ausgelegt. Die Polsterung kann verschiedene Härtegrade besitzen und wird auf einer Sitzpfanne oder einem Sitztrapez mit Klettverschluss fixiert. Die Sitzpfanne (üblicherweise aus Aluminium) wird auf die Tragrohre gelegt oder an den Sitzteilern angebracht. Ein Sitztrapez besteht aus einem Vorder- und einem Hinterrohr, die an den Sitzteilern gelagert sind, und einem Stoff, der vom vorderen zum hinteren Rohr aufgespannt wird.

- **Armlehne:**

Befindet sich auf beiden Seiten eines Sitzes. Wobei eine Armlehne, die zwischen zwei Sitzen ist, von den Passagieren geteilt werden muss (in der Economy Class). Sie ist in den meisten Fällen hochklappbar. Weitere Bedienungselemente können auch auf der Armlehne angebracht werden, zum Beispiel: Rückenlehnenverstellungsknopf, Kopfhörerbuchse oder Entertainment-Controller / -Knöpfe.

- **Traggestell:**

- **Vorderes und hinteres Tragrohr:**

Die Tragrohre im Traggestell dienen dazu die Kräfte von den Sitzteilern und Sitzpfanne/Sitztrapez in der Fußstruktur zu

übertragen und gleichzeitig die Sitze der Sitzreihe zu tragen. Die Biegebeanspruchung hängt von der Position der Sitzfüße und von der Anzahl der Sitze ab.

- **Sitzteiler:**

Die Sitzteiler oder im Englischen „Spreader“ tragen die Rückenlehne, die Armlehne, den Tisch (wenn ausgeklappt) und das Sitztrapez. Die Gurtbefestigung wird auch an den Spreadern angebracht. Alle Kräfte der zuvor genannten Elemente leitet der Sitzteiler in die Tragrohre und diese in die Sitzfußstruktur weiter. In einer Zweiersitzreihe befinden sich drei Sitzteiler und in einer Dreiersitzreihe befinden sich vier Sitzteiler. Dies bedeutet, dass ein Sitzteiler, der sich zwischen Sitzen befindet, das Doppelte im Vergleich zu einem Außenstehenden Sitzteiler trägt.

- **Sitzfuß**

Es gibt verschiedene Sitzfußstrukturen und Bauweisen, deswegen muss die Sitzfußbaugruppe nicht zwangsweise wie in Abbildung 7 aussehen. Viele Sitzfußbaugruppen und vor allem die in dieser Arbeit betrachtete Sitzfußstruktur bestehen aber aus folgenden Komponenten:

- **Vorderer und hinterer Sitzfuß**

Die Sitzfüße sind die Teile, die an der Flugzeugsitzschiene befestigt werden. Die Sitzschienen verlaufen in Längsrichtung des Flugzeuges und verfügen in ihrer Gesamtlänge über Befestigungsmöglichkeiten (1“-Rasterung). So kann je nach Wahl die Position in Längsrichtung der Sitzreihe festgelegt werden. In der Regel handelt es sich bei einer Sitzfußbefestigung um eine Fest-Los-Lagerung. Der Hinterfuß ist in der Schiene fest gelagert und der Vorderfuß ist so gelagert, dass er sich in Längsrichtung bewegen kann aber in Vertikalrichtung fixiert ist. Eine Fußstruktur, die aus mehreren Teilen besteht, ist erst in Verbindung mit den Tragrohren und Sitzteiler als Gesamt stabil.

- **Diagonalstrebe**

Sie sorgt für Stabilität der Fußstruktur in dem sie den Vorderfuß und Hinterfuß verbindet. Die Position und Ausrichtung der Diagonalstrebe kann beliebig gewählt werden.

- **Bodenstrebe**

Die Bodenstrebe kann je nach Fußstruktur tragend oder nichttragend ausgeführt werden und wird als Schienenabdeckung benützt. Eine nichttragende Bodenstrebe dient nur als Schienenabdeckung, damit die Sitzschiene für die Passagiere nicht zu sehen ist, und kann deshalb dünn und leicht ausgeführt werden. Eine tragende Bodenstrebe muss hingegen so ausgelegt werden, dass sie die Kräfte aushält.

- **Gepäckstange**

Die Gepäckstange hält Gepäckstücke, die sich unter den Sitzen befinden, auf ihrem Platz. Dies ist vor allem bei Verzögerungen des Fliegers (zum Beispiel die Bremsverzögerung beim Landen) wichtig, damit das Gepäck nicht nach vorne geschleudert wird und andere Passagiere verletzt.

- **Tisch**

Ist klappbar ausgeführt, sodass er beim Nichtbenützen weggeräumt werden kann. Der Tisch ist im vorderen Sitz gelagert und verfügt üblicherweise über zwei Tragarme, welche dieselbe Drehachse wie die Rückenlehne an den Sitzteilern haben. Bei der vordersten Sitzreihe und Sitzreihen bei Notfallausgängen werden die Tische seitlich in der Armlehne gelagert und weggeräumt.

2.2 Zulassung von Fluggastsitzen

Während des Fliegens kann es zu Turbulenzen oder sogar zu Notlandungen kommen und so wird die Sitzstruktur stärker belastet. Da bei solchen Situation die Sicherheit der Passagiere gefährdet ist, gibt es bestimmte Normen und Rahmenvorschriften mit Zulassungsbedingungen, die ein Sitz erfüllen muss um in einem Flugzeug eingebaut werden zu dürfen.

Die Vorschriften werden von der FAA (Federal Aviation Administration) und von der EASA (European Aviation Safety Agency) herausgegeben. Diese Vorschriften sind die Certification Standards CS (früher Joint Aviation Regulations JAR) und die

Federal Aviation Regulations FAR. Die CS/FAR 25 beschäftigt sich allgemein mit der Zulassung von großen Flugzeugen und deren Einbauten. Somit ist die CS/FAR 25 die Kernvorschrift. [2],[3]

Im Normalfall wird ein Flugzeug nicht zusammen mit den Sitzen zugelassen. Würde ein Flugzeug mit eingebauten Sitzen zugelassen, dann würde es als eine Einheit zertifiziert sein und eine Änderung des Layouts (Sitzanordnung) oder die Verwendung von anderen Sitzen wäre nicht möglich. Eine Zertifizierung des Flugzeuges ohne Sitze erlaubt also das Einbauen von verschiedenen zugelassenen Sitzen in einem zertifizierungsfähigen Layout. [3]

Die Technical Standard Orders TSO oder genauer die ETSO/TSO-127a (Aircraft Seats and Berths) regelt die Zulassung von Fluggastsitzen. Bei den Anforderungen der ETSO/TSO-127a handelt es sich um Mindestanforderungen für eine Zulassung. Üblicherweise haben die Flugzeughersteller und die Fluglinien weitere Anforderungen, die strenger als die Mindestanforderungen sind. So entsteht eine Hierarchie der Vorschriften wie in Abbildung 8 zu erkennen ist. Sind zum Beispiel die Anforderung der Airline die strengsten und ein Sitz wird nach deren Anforderungen zugelassen, ist dieser Sitz auch nach den Mindestanforderungen von der ETSO/TSO-127a und CS/FAR-25 zertifiziert. [3],[4]



Abbildung 8: Hierarchie der Vorschriften [1]

Die ETSO/TSO-127a verweist zunächst auf die SAE AS8049b (Performance Standard for Seats in Civil Rotorcraft, Transport Aircraft and General Aviation Aircraft) welche das wichtige Dokument für die Sitzentwicklung ist. In der SAE Norm werden die notwendigen Strukturtests, Brandtests und der detaillierte Ablauf der Zulassung festgelegt.

2.3 Zertifizierungstests

Die Zertifizierungstests laut TSO-127a beziehungsweise SAE AS8049b lassen sich in einem statischen Teil und einem dynamischen Teil unterteilen [1],[2],[3],[4],[6]:

Statischer Test:

- 9g forward (längs in Flugrichtung)
- 4g sideward (quer zur Flugrichtung)
- 3g upward (nach oben in der Hochachse)
- 6g downward (nach unten in der Hochachse)
- 1,5g rearward (längs gegen die Flugrichtung)

Dynamischer Test:

- 16g forward
- 14g downward

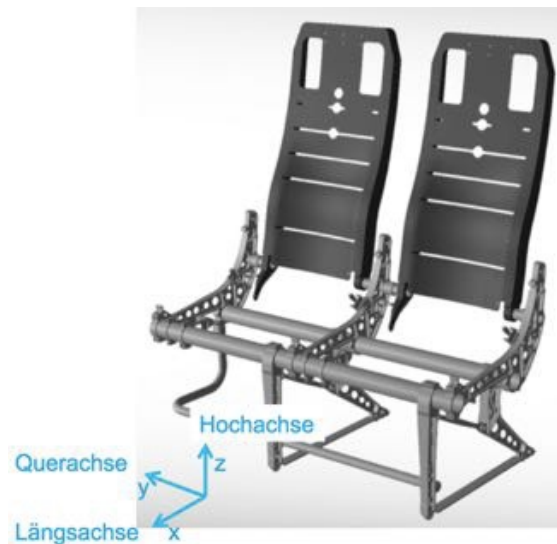


Abbildung 9: Koordinatensystem und Achsen des Flugzeugsitzes

Bei den statischen Tests wird die Prüfkraft quasistatisch über einem Body Block aufgebracht, der mit dem Sitzgurt befestigt wird. Aus der Inertialkraft von Sitzmasse, Passagier (77kg) und allen sonstigen durch den Sitz zurückzuhaltenden Massen (Gepäck unter dem Sitz) ergibt sich die Prüfkraft.

Die Prüfkräfte der statischen Tests sind rein in den Längs-, Hoch- und Querachsen des Sitzes ausgerichtet. Bei den dynamischen Tests hingegen wird der Sitz oder Sitzreihe folgendermaßen positioniert und vorbereitet:

- **Test 1: 14 g downward**

Die Verzögerung erfolgt nach unten um 30° versetzt wie in Abbildung 10 links zu sehen ist.

- **Test 2: 16 g forward**

Der Sitz oder Sitzreihe wird um 10° in seiner Hochachse rotiert und die Verzögerung erfolgt in Richtung des Pfeils wie in Abbildung 10 rechts zu sehen ist.

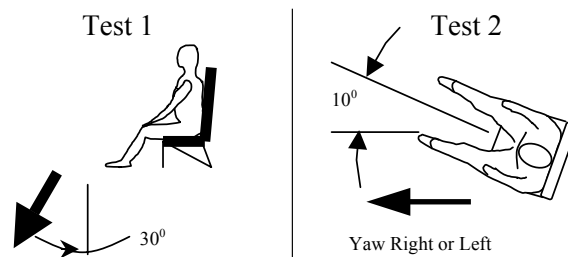


Abbildung 10: Dynamischer Test1: 14g down (links) und Test2: 16g forward (rechts) [6]

Bei den dynamischen Tests ist der Sitz mit Dummies besetzt. Weiters ist eine Vorschädigung des Bodens durch eine vordefinierte Verformung der Sitzschienen gegeben, welche Zwangskräfte in das Sitzgestell leitet. Die Verformungen sind wie in Abbildung 11 definiert: eine der Sitzfüße wird um 10° in der Querachse nach oben oder unten rotiert (10° Pitch) und der andere Sitzfuß um 10° in der Längsachse verdreht (10° roll).

Falls die Sitzreihe mehr als zwei Sitzfüße besitzt, erhält ein Sitzfuß 10° -Roll und alle anderen 10° -Pitch (Abbildung 12).

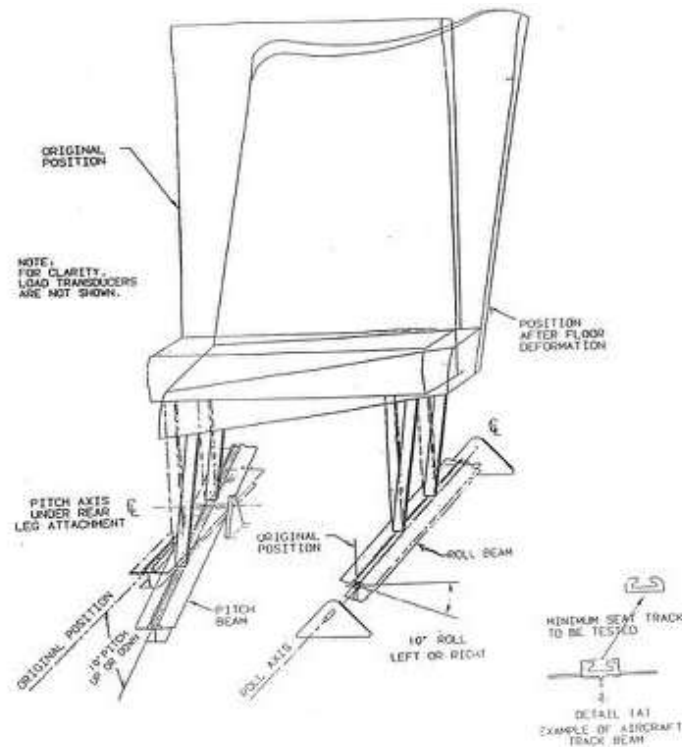


Abbildung 11: Simulation der Verformung des Bodens bei einem einzelnen Sitz [6]

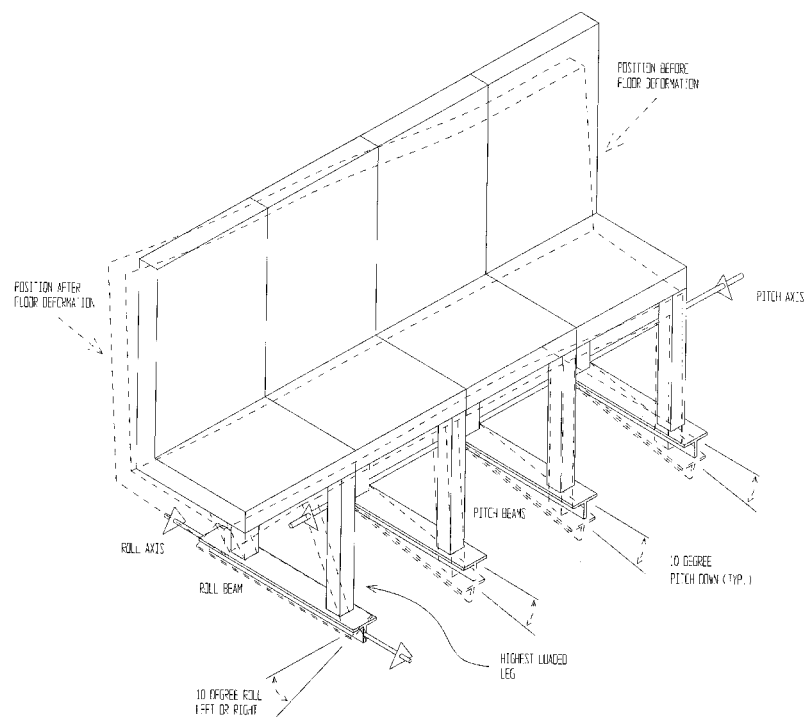


Abbildung 12: Simulation der Verformung des Bodens bei einer Sitzreihe [6]

Wie bereits erwähnt stellt eine Zulassung nach TSO-127a beziehungsweise SAE AS8049b eine Sitzzulassung nach Mindestanforderungen dar. So stellen manche Flugzeughersteller und Fluglinien höhere Anforderungen. Zum Beispiel bei einem Airbus 320 ist die Kraft beim statischen Test nach unten (downward) mit 8,6g Böenlast anstatt mit den konventionelle 6g Notlandung definiert [3]. Erfüllt der Sitz alle anderen Bedingung, aber beim statischen downward Test nur die 6g Notlandungskraft, so ist der Sitz nach den TSO-127a Mindestanforderungen zugelassen aber nicht nach Airbus. Der Sitz darf also nicht in Airbus Maschinen eingebaut werden.

Weitere Kräfte wie Handling Loads und Sitzschienenlasten sind nicht von der TSO-127a abgedeckt. Die Flugzeughersteller legen jedoch großen Wert auf diese Lasten und haben diese in ihren Lastheften spezifiziert. Handling Loads sind statische Lasten auf den Sitzbauteilen (Rückenlehne, Tisch, Armlehne, usw.) in der Größenanordnung wie sie von Passagieren aufgebracht werden können und Sitzschienenlasten sind die Kräfte, die von einem Sitz in die Sitzverankerung eingeleitet werden.

2.4 Zulassungskriterien

Da es zahlreiche Kriterien für eine Sitzzulassung gibt, und diese wieder von Hersteller zu Hersteller variieren, werden an dieser Stelle nur einige davon aufgelistet. Die Auflistung soll lediglich klar machen, wie viele Kriterien bei einer Sitzauslegung zu betrachten und bedenken sind. [1],[2],[3],[4],[5],[6]:

- HIC - Head Injury Criterion ist ein Kopf-Verletzungs-Faktor zur Bewertung von beschleunigungsbedingten Kopfverletzungen. In der Regel ist ein maximal Wert gegeben. (z.B. HIC-1000)
- Lumbar Load - es wird eine maximal ertragbare Last der Wirbelsäule in Newton angegeben.
- Femur Load - maximal ertragbare Last im Oberschenkelbereich
- Trajektorie der Insassen - Bei einer Crash-Situation oder Notlandung ist die Trajektorie der Insassen von großer Bedeutung. Vor allem die Trajektorie des Kopfes und der Extremitäten werden streng analysiert. Dabei wird die Bahn, welche der Kopf zurücklegt, betrachtet und die Bauteile des Sitzes , auf welche der Insasse aufprallen könnte, auf Gefährdungsgrad untersucht (z.B. spitze Teile)

- Versagen der Hauptstruktur - Ein komplettes Versagen der tragenden Struktur wird bei einem Test mit „nicht Bestanden“ bewertet. Eine Deformation ist erlaubt, sie muss aber in gewissen vordefinierten Grenzen bleiben.
- Gurtsicherheit und Gurtbefestigung
- Brennbarkeit und Brenndauer der eingesetzten Werkstoffe
- Rauchgasemissionen und Toxizität der Werkstoffe
- Mindestabstand - zwischen den Sitzreihen und Sitze. Da eine Verformung des Sitzes erlaubt ist, wird der Abstand zwischen den Sitzen nach der Verformung untersucht.
- Fluchtwege - sind immer frei zu bleiben. Ein verformter Sitz darf nicht im Bereich des Fluchtweges eindringen.
- Schienenlasten - maximale Kraft die ein Sitz in den Sitzschienen einleiten darf.
- Lebensdauer - in der Regel von der Fluglinie angegeben
- Wartbarkeit - nicht in den Mindestanforderungen abgedeckt aber oft von den Fluglinien gewünscht.
- Gepäckunterbringung - Gepäckstange muss das Gepäck unter dem Sitz aushalten.
- Verstellbarkeit - Nach einer Crash-Situation oder Notlandung wird die Verstellbarkeit der Sitzbauteile und deren Rückstellung untersucht. (z.B. Armlehne nach einer Notlandung wieder hochklappbar, damit das Verlassen des Flugzeuges leichter wird)

3 Aufgabenstellung und Methoden

3.1 EK Design AG

Die Firma EK Design beschäftigt sich unter anderen Projekten mit dem Design und Entwicklung von Fluggastsitzen. Es wurde bereits ein Projekt mit einem namhaften Flugzeugsitzhersteller erfolgreich abgeschlossen. Nun ergibt sich ein internes Projekt, indem der bereits entwickelte Fluggastsitz weiter zu untersuchen ist. Ziel ist es Optimierungsmöglichkeiten des bestehenden Sitzes zu finden so wie neue Konzepte der Gesamtsitzstruktur zu erstellen.

Als Werkzeug für die ersten Analysen der Flugzeugsitzreihe wurde das Programm Hyper Works von Altair [7] verwendet. Mit diesem Programm lassen sich Bauteile mittels Finite Elemente Methoden analysieren. Weiters bietet das Programm ein Modul für Topologieoptimierung und eins für die ersten Auslegungsphasen von Composites-Bauteilen.

3.2 Front Loading - Design & Engineering

Front Loading bezeichnet im Produktentstehungsprozess das frühe Einbeziehen von digitalen Modellen, Simulationen und Analysen. Somit ist das frühe Vorhersagen von Eigenschaften, Funktionen und Verhalten eines Produktes möglich - ohne Versuche und Tests mit realen Prototypen durchführen zu müssen.

Eine Besonderheit beziehungsweise ein Ziel dieser Arbeit war die enge Projektzusammenarbeit zwischen Engineering und Design in einer sehr frühen Phase der Produktentwicklung. In einem kleinen interdisziplinären Team konnte, auf Grund der kurzen Kommunikationswege, das Design und die Optimierung zu einem gemeinsamen Prozess verschmelzen.

Aus der Designabteilung entstanden „design constraints“ (design Randbedingungen) und Ideen, welche dann in den Optimierungen berücksichtigt wurden. Auf der anderen Seite gewann man mit den Optimierungsergebnissen auch wichtige Erkenntnisse, die von der Designabteilung für weitere Konzeptideen benützt wurden. Durch diese Rückkopplung und iteratives Arbeiten zwischen Design und Optimierung konnten neue Konzepte schnell und aussagekräftig ausgewertet und optimiert werden.

3.3 Methodik der Topologieoptimierung

In einer Topologieoptimierung wird mittels computerbasierten Berechnungsverfahren und Algorithmen die günstigste Grundgestalt eines Bauteils unter mechanischer Belastung ermittelt. Es werden so die Lastpfade und Schwachstellen des Körpers sichtbar und es wird nur dort Material vorgesehen wo es wirklich gebraucht wird. Im Folgenden sollen die Phasen einer Topologieoptimierung grob dargestellt werden.

Zuerst werden die so genannten Design-Spaces und NonDesign-Spaces definiert. NonDesign-Spaces sind Räume oder Bereiche eines Bauteils, welche nicht verändert werden dürfen (z.B. Lagerung oder Schraubenverbindung). Und Design-Spaces sind diejenige Räume, die sich verändern dürfen und optimiert werden sollen.

Sind diese Räume definiert, werden zunächst die Randbedingungen und Lagerungen festgelegt. Danach werden die Lasten und deren Lastfälle definiert und angebracht. Ein Bauteil kann für verschieden Lastfälle optimiert werden. Werden mehrere Lastfälle während einer Optimierung berücksichtigt, so steigt der Komplexitätsgrad der Berechnung und die Rechenzeit kann auch deutlich höher werden. Der Diskretisierungsgrad der Volumenräume hat auch einen großen Einfluss in der Rechenzeit der Optimierung. Je nach Feinheit der Diskretisierung, können aber die Details in den Optimierungsergebnissen besser dargestellt werden.

Weiters ist das Ziel der Topologieoptimierung festzulegen. Es können verschiedene Varianten ausgewählt werden, wie:

- Die steifste Struktur mit einem vorgegebenen maximalen Volumen des Design-Spaces oder maximalen Gewicht
- Die leichteste Grundgestalt unter Einbehaltung einer maximalen Spannung oder sogar einer maximal erlaubten Verschiebung
- Minimieren der Eigenfrequenz oder das Vermeiden eines Frequenzbereichs

Mit einem vorgegebenen Ziel, erkennt also der Rechenalgorithmus in welche Richtung die Optimierung gehen soll. Was aber auch in der obigen Zielaufstellung zu erkennen ist, sind die dazu erwähnten Nebenbedingungen. Diese Nebenbedingungen oder sogenannte Constraints geben also Grenzwerte oder Begrenzungen für die Topologieoptimierung. Diese Constraints können ein exakter Wert sein oder auch eine Ober- beziehungsweise Untergrenze bedeuten.

Letztendlich können weitere Parameter im Programm für die Topologieoptimierung ausgewählt und definiert werden. Problematisch ist immer bei einer Topologieoptimierung, dass die Ergebnisse des optimierten Bauteils oft nicht gefertigt werden können oder nur sehr schwer mit einem Fertigungsverfahren hergestellt werden können. So bietet das User-Profil Optistruct in HyperWorks folgende Parameter zur Beeinflussung der Fertigbarkeit:

- Minimale Dimension - damit zum Beispiel eine Rippe oder Strebe nicht dünner als eine bestimmte Dimension wird.
- Maximale Dimension - um Materialansammlung an bestimmten Stellen zu vermeiden
- Extrusionsrichtung
- Muster Gruppierung
- Muster Wiederholung
- Symmetrieebenen

Durch all diese Variablen und Parameter kann eine Topologieoptimierung gesteuert werden. Die Ergebnisse einer Topologieoptimierung weisen in der Regel eine zerklüftete Struktur auf. Um mit den Ergebnissen weiter rechnen und arbeiten zu können, müssen deswegen weitere CAD-Modelle abgeleitet werden. Für Beispiele und eine ausführlichere Erläuterung wird auf [8] verwiesen.

3.4 Methodik der Composite-Optimierung

Verbundwerkstoffe oder im Englischen „Composites“ sind Werkstoffe aus zwei oder mehreren verbundenen Materialien. Die Besonderheit von einem Verbundwerkstoff liegt darin, dass er andere Materialeigenschaften als seine einzelnen Komponenten besitzt. Insbesondere Faserverbundwerkstoffe besitzen höherwertige Eigenschaften als jede der beiden einzelnen Komponenten.

Faserverbundwerkstoffe bestehen aus einer Matrix und Fasern, die in der Matrix eingebettet sind. Beide können aus verschiedenen Materialien sein und ein verschiedenes Verhältnis zu einander im Gesamtvolumen haben. Je nach Material und Faservolumenanteil variieren natürlich auch die Materialeigenschaften. Die extrem dünnen Fasern geben dem Faserverbundwerkstoff sehr gute Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Und die Matrix hingegen dient zum Verbinden der Fasern und Füllen der Zwischenräume.

In dieser Arbeit wird in späteren Kapiteln mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff KFK (oder carbonfaserverstärktem Kunststoff CFK) gearbeitet. CFKs bestehen aus einer Kunststoffmatrix und, wie der Name sagt, Kohlenstofffasern.

Eine CFK-Konstruktion besteht aus mehreren dünnen CFK-Schichten oder Lagen. Eine unidirektionale Schicht besitzt Fasern, die nur in eine Richtung ausgerichtet sind. Die Festigkeit und Steifigkeit solcher Lagen ist in Faserrichtung wesentlich höher als quer zur Faserrichtung. Quer zur Faserrichtung kann die Festigkeit sogar geringer als bei einer unverstärkten Matrix sein. Der Faserverbund-Konstrukteur ordnet aber die CFK-Schichten so an, dass die lasttragenden Fasern ebenfalls in verschiedene Richtungen ausgerichtet sind und somit die Festigkeit in mehreren Richtungen hoch ist. So entsteht durch Stapeln mehrerer Einzelschichten mit unterschiedlicher Faserrichtung ein sogenannter Mehrschichten-Verbund MSV oder ein Laminat. [9]

Weiters können die einzelnen Schichten in einem Laminat auch unterschiedliche Formen haben. Eine Schicht muss also nicht die ganze Fläche des Laminats decken. Sie können geschnitten und positioniert werden, sodass sich die lasttragenden Fasern genau dort wo sie notwendig sind, in der dazugehörigen Richtung, befinden.

Da Faser-Kunststoff-Verbunde eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitiger niedrigen Dichte aufweisen, kommen diese sehr oft im Leichtbau vor. Die Herstellung und Fertigung von Bauteilen aus CFK ist aber heutzutage immer noch teurer als diejenige von Metallbauteilen. Trotzdem werden solche Bauteile verwendet, und zwar vor allem in den Bereichen wo die Kosten-Einspar-Potentiale (meist durch die Gewichtseinsparung) höher als die Herstellungskosten sind. Besonders im Flugzeugbau beziehungsweise bei Bauteilen im Inneren eines Flugzeuges kommen solche Werkstoffe und Bauweisen zum Einsatz. Denn in der Luftfahrtindustrie bedeutet eine Gewichtseinsparung eine wesentliche Kraftstoffeinsparung und somit eine Kostenreduktion von mehreren tausend Euro pro Jahr.

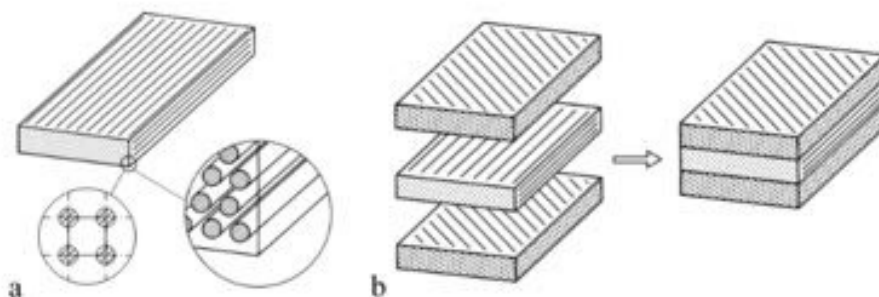


Abbildung 13: (a) Unidirektionale Schicht, (b) Mehrschichtenverbund aus miteinander verklebten Einzelschichten bestehend [9]

Bei einer Auslegung eines Bauteils aus CFK sind die Richtung der Fasern, die Form und Position der Lagen, Anzahl der Schichten und die Reihenfolge der einzelnen Schichten im Laminat festzulegen. Die Festlegung der einzelnen Parameter ist also höchst komplex und mit viel Erfahrung verbunden. Es ist vor allem aufwendig, wenn es keine ähnlichen Bauteile zum Vergleich oder zur Orientierung gibt.

Genau in dieser Auslegungsphase eines CFK-Bauteiles ist das Computer-Aided Engineering CAE (rechnergestützte Entwicklung) von großem Vorteil und großer Hilfe. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein spezielles Modul vom Programm HyperWorks [7] für die Auslegung von Bauteilen im Fluggastsitz verwendet. Dieses Modul heißt Composite-Optimization und erlaubt es eben Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen optimal auszulegen.

Das Auslegungsverfahren für Composites wird in drei Phasen unterteilt: [8],[10],[11]

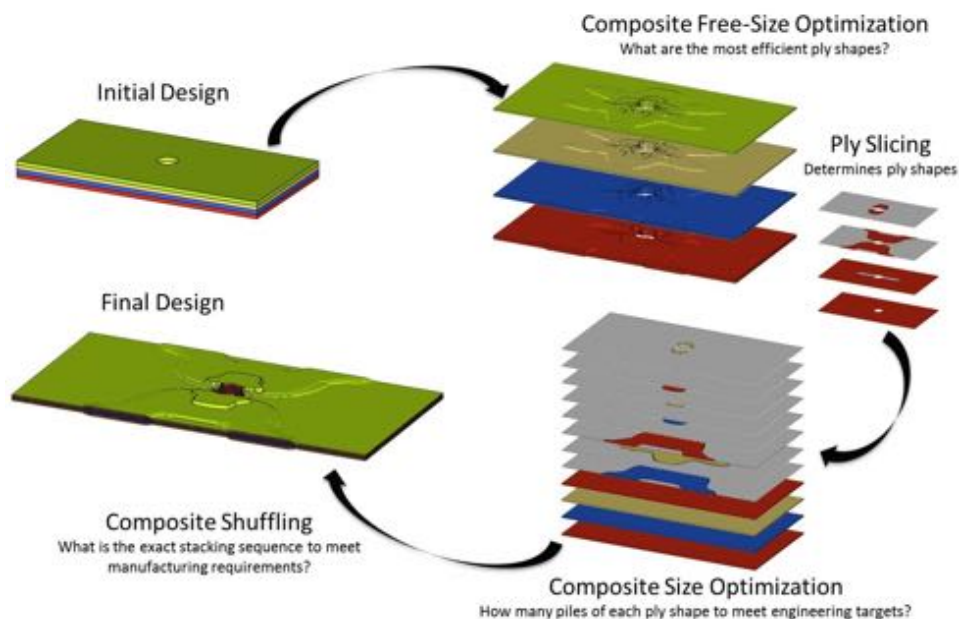


Abbildung 14: Phasen einer Composite-Optimierung ⁵

⁵ Quelle: <http://www.compositesworld.com/articles/software-update-simulation-saves>, Zugriff am 27.7.16

1.Phase: Free Size

In der ersten Phase werden, wie in einer Topologieoptimierung, die Design-Spaces und NonDesign-Spaces festgelegt. Für die Design-Spaces (zu optimierenden Räume/Flächen) werden dann sogenannte Anfangslagen definiert, die auch eine vorgegebene Richtung besitzen. Üblicherweise werden vier Hauptrichtungen gewählt: 0° , 45° , -45° und 90° , es können aber mehr Lagen definiert werden (z.B.: 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 75^\circ$ und 90°). Je mehr Lagen und Richtungen das Modell besitzt, desto länger braucht das Optimierungsverfahren. Diese Anfangslagen decken den kompletten Designraum/Designfläche ab und besitzen eine vorgegebene Anfangsdicke (z.B. 2mm).

Um die Berechnung der ersten Phase starten zu können braucht man genau wie in einer Topologieoptimierung auch Ziele, Nebenbedingungen und veränderbare Variablen. So kann zum Beispiel eine Gewichtsminimierung oder die steifste Struktur als Ziel gewählt werden. Als Constraints oder Nebenbedingungen der Optimierung kann eine maximale Verschiebung, Spannung, maximales Gewicht, etc. festgelegt werden.

In der ersten Berechnung wird die Dicke jeder einzelnen Lage kontinuierlich variiert. Es werden die Lastpfade berechnet und die Dicke der Lagen mit den dazugehörigen Richtungen optimiert. Die Lagen werden aber nur dort, wo die Lastpfade durchlaufen und die jeweilige Faserrichtung gebraucht wird, dicker. Es entstehen also CFK-Schichten, die an verschiedenen Stellen unterschiedliche Stärke/Dicke besitzen.

Da eine CFK-Lage nicht unterschiedliche Stärken haben kann, wird die optimierte Lage in vier weiteren Lagen unterteilt (siehe Abbildung 14). Durch dieses Unterteilen (Ply-Slicing) entstehen dann Lagen mit verschiedenen Formen, welche für die Lastpfade im Bauteil optimiert sind.

2.Phase: Size

Aus den vier Anfangsschichten mit Fasern in den vier Hauptrichtungen sind also 16 Lagen nach der ersten Berechnung geworden (jeweils 4 Lagen pro Faserrichtung). Die Form der Lagen ist bereits optimiert, aber die Stärke der einzelnen Lagen ist noch zu optimieren. Wie bereits erwähnt kann eine Lage nicht unterschiedliche Stärken in verschiedenen Bereichen haben, aber die Lagen untereinander im Laminat können unterschiedliche Stärken besitzen (siehe Abbildung 15).

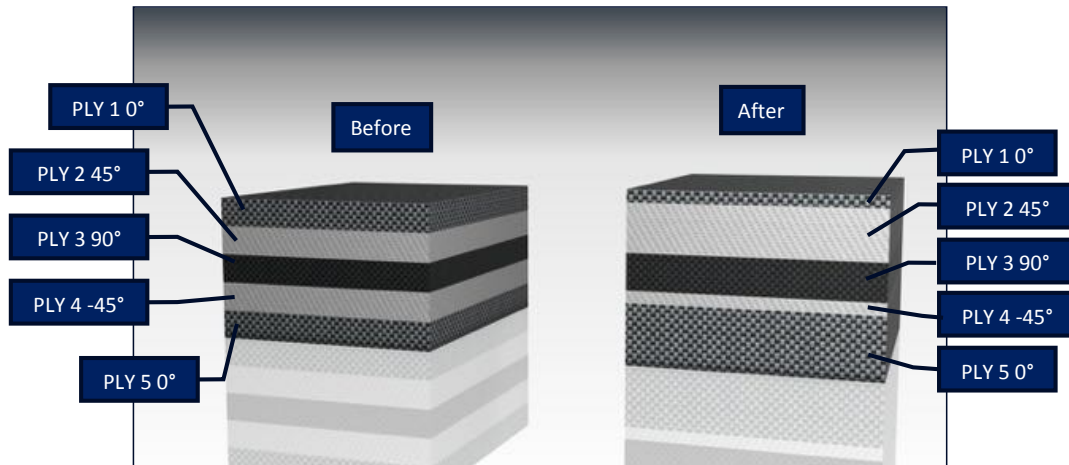


Abbildung 15: Size-Optimierung der einzelnen CFK-Lagen [11]

Die Dicke der Lagen kann kontinuierlich oder diskret ermittelt werden. Das Ergebnis des kontinuierlich optimierten Laminats hat bessere Eigenschaften als das von der diskreten Optimierung.

Die Dicke der Lagen kann in der kontinuierlichen Berechnung jede beliebige Stärke annehmen (z.B.: 0,385mm). Eine Lage mit solcher exakten Stärke kann wenn überhaupt nur unter sehr umständlichen Verfahren hergestellt werden und ist mit sehr hohen Herstellungskosten verbunden. Deswegen gibt man üblicherweise als Nebenbedingung eine diskrete Dicke für die Lagen vor der Berechnung an (z.B.: 0,1mm). So können die Lagen nur Stärken von 0,1mm oder ein Vielfaches von 0,1 annehmen (entweder 0,3mm oder 0,4mm aber nicht 0,385mm).

Das resultierende Laminat aus der diskreten Optimierung hat vielleicht nicht dieselben Eigenschaften, wie in einer kontinuierlichen Optimierung, aber immer noch sehr gute und ausreichende Eigenschaften und die einzelnen Lagen sind für die Herstellung besser geeignet.

3.Phase: Shuffle

In der letzten Phase wird die Reihenfolge der bereits form- und stärkenoptimierten Lagen berechnet und optimiert. Es wird also die beste Stapelungsreihenfolge/ Stacking Sequence ermittelt.

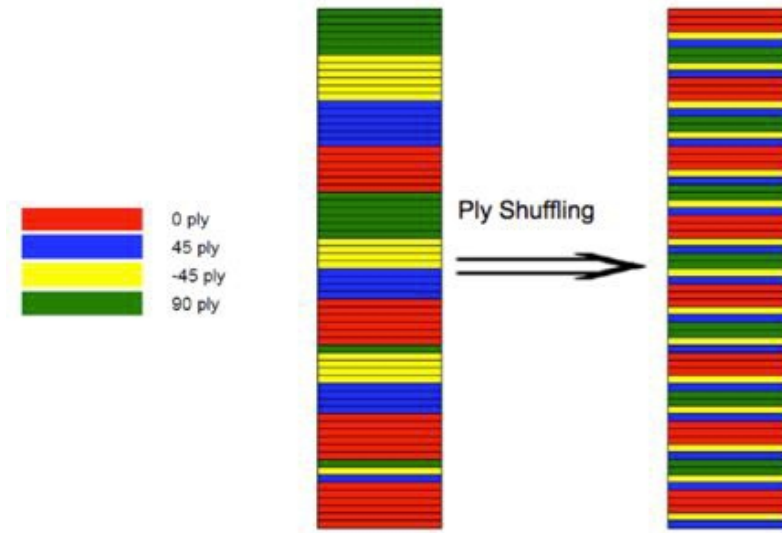


Abbildung 16: Schuffle - Stapelungsreihenfolgenoptimierung

Als Ergebnis erhält man nach den drei Phasen ein Modell, welches aus formoptimierten Lagen mit optimierten Stärke und Stapelungsreihenfolge besteht. Für Beispiele wird auf [8],[10],[11] verwiesen.

4 Bestehender Fluggastsitz

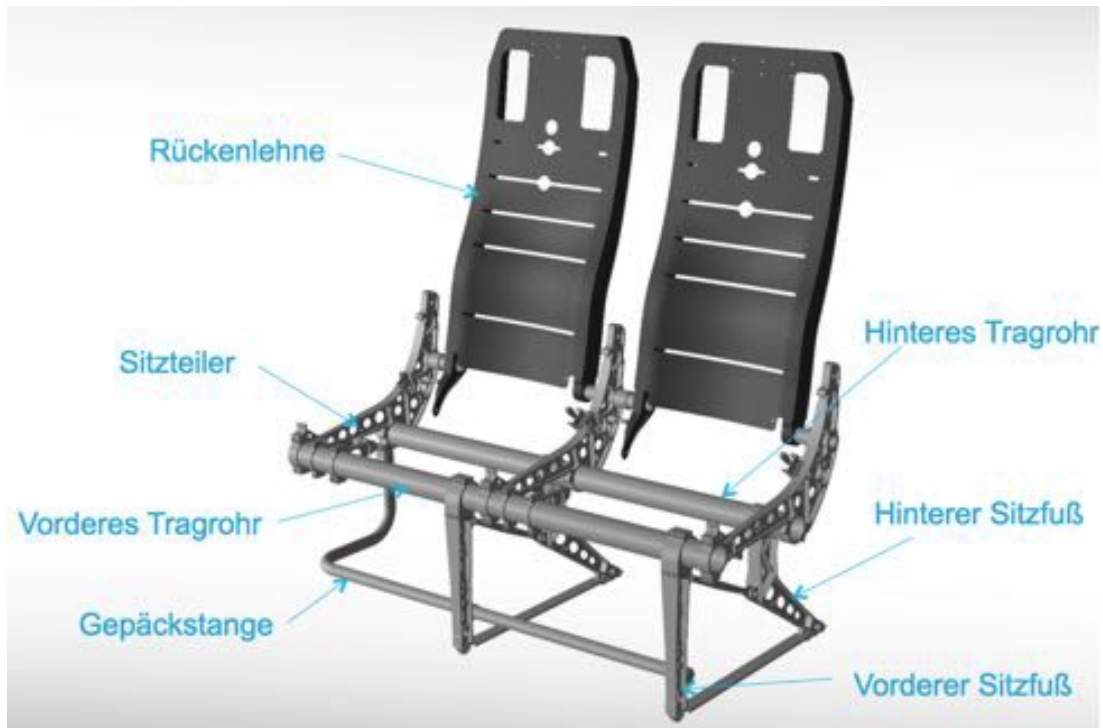


Abbildung 17: Bestehender Fluggastsitz und Komponente

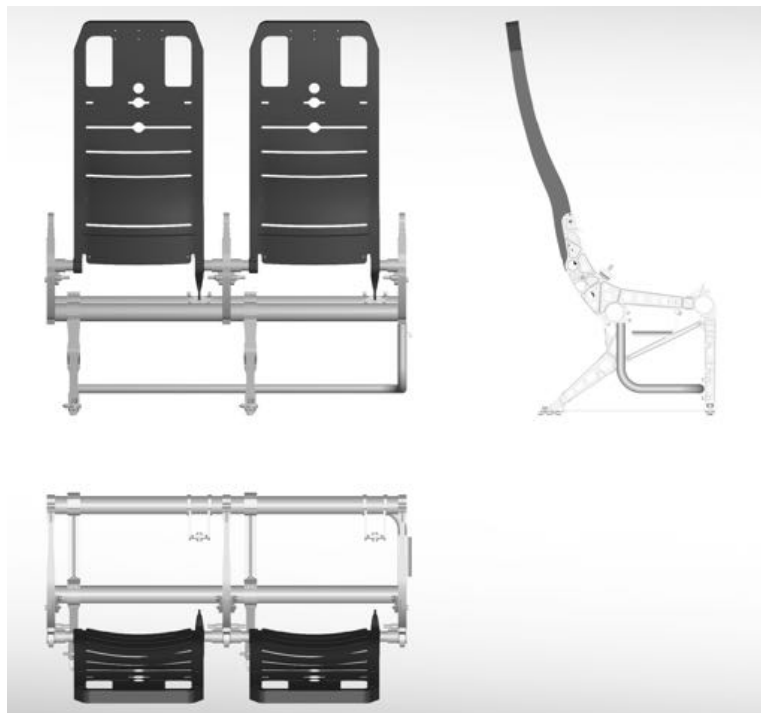


Abbildung 18: Bestehende Sitzstruktur - 3 Hauptansichten

Wie in den obigen Abbildungen zu erkennen ist, besteht die Primärstruktur des bestehenden Sitzes aus den typischen Bauteilen eines Fluggastsitzes: Rückenlehne, Sitzteiler, Tragrohre, Gepäckstange und Sitzfüße. Die Rückenlehne besteht aus carbonfaserverstärktem Kunststoff CFK und alle anderen Teile aus einer Aluminiumlegierung.

Die Rückenlehne ist beidseitig drehbar an den Sitzteilern gelagert. Die Verstellung/Rückstellung der Rückenlehne erfolgt über einen Gaszylinder, welcher sich unter dem Sitzboden befindet und seitlich an der Rückenlehne angreift. Die tragende Struktur ist eine Rahmenstruktur. Es wird Schaumstoff innerhalb der Rahmenstruktur verwendet und Aluminium-Inserts für die Lagerung und Rückstellung. Wegen der seitlichen Rückstellung ist die Rückenlehne asymmetrisch belastet, und obwohl die Rückenlehne symmetrisch aussieht ist sie asymmetrisch im inneren des Rahmens durch verschiedene Lagenanordnungen (CFK Lagen) aufgebaut.

Die Sitzteiler verbinden das vordere und hintere Tragrohr und geben somit die erforderliche Stabilität für das Traggestell und die Sitzfußstruktur. Die Lagerung der Rückenlehne, Armlehne und Gurtverbindung befindet sich auch in den Sitzteilern. Die Tischtragarme benützen dieselbe Lagerung wie die Rückenlehne. Der Sitzboden besteht aus einem Sitztrapez, welches aus zwei Tragrohren und einem aufgespannten Stoff besteht. Die zwei Tragrohre des Sitztrapezes werden an den Sitzteilern angebracht (eins vorne und eins hinten) und der Stoff wird zwischen den Trapezrohren aufgespannt.

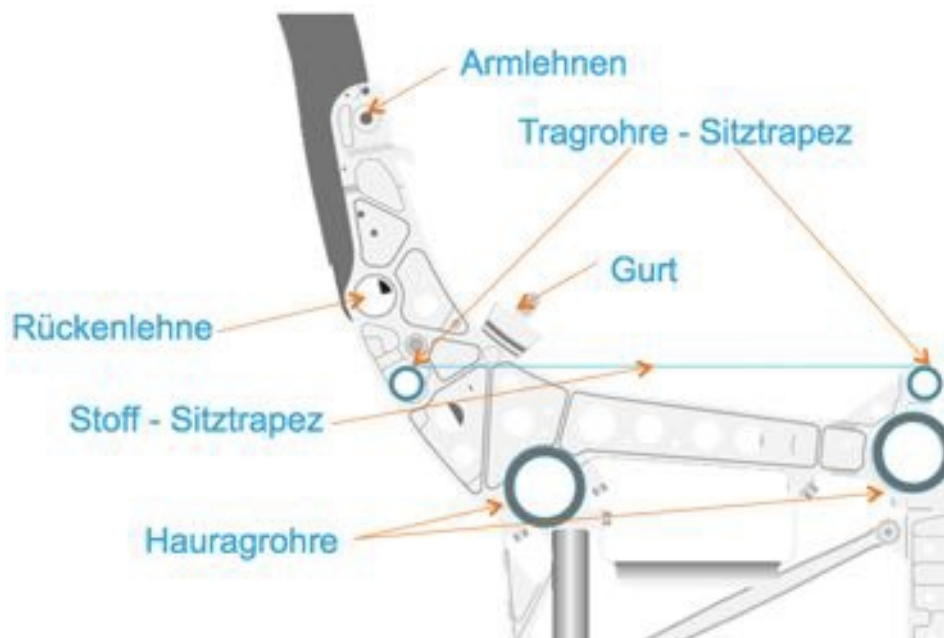


Abbildung 19: Sitzteiler / Spreader

Die Sitzfußstruktur besteht aus einem vorderen und einem hinteren Fuß, eine Diagonalstrebe, eine Gepäckstange, eine Schienenabdeckung und die Schienenbefestigungen. Der Vordere Sitzfuß ist oben mit dem vorderen Tragrohr verbunden und verläuft vertikal nach unten bis zur Schienenverbindung. Die Schienenbefestigung des vorderen Sitzfußes ist nur in Vertikalrichtung fixiert und kann sich in Längsrichtung (Flugrichtung) leicht verschieben.

Der hintere Sitzfuß verläuft vom hinteren Tragrohr nach unten zur Schienenverbindung mit einem „Knick“. Dieser Knick ist absichtlich an der Stelle, wo die Diagonalstrebe angreift, damit sich im Falle einer Notlandung oder bei den Zulassungstests sich genau diese Stelle verformt. Eine Verformung an dieser gewollten Stelle fungiert als Dämpfer und absorbiert die Aufprallenergie. So wird das Einleiten von zu hohen Kräften in die Schienenstruktur und ein komplettes Versagen der Sitzstruktur vermieden. Der hintere Sitzfuß ist leicht oberhalb der Schienenbefestigung rotationsfähig, was die Sitzfußstruktur unstabil macht. Die Sitzfußstruktur wird erst stabil wenn diese an den Tragrohre verbunden ist und diese an den Sitzteilern. Es ist also nur die Gesamtsitzstruktur als Ganzes stabil und selbsttragend.

Die Schienenabdeckung ist eine nichttragende Strebe. Die Diagonalstrebe hingegen ist als eine Zug/Druckstrebe eingebaut und gibt, wie gesagt, der ganzen Struktur Stabilität. Weiters verläuft die Gepäckstange von einer Seite der Sitzreihe bis zur anderen Seite vorne unten durch.

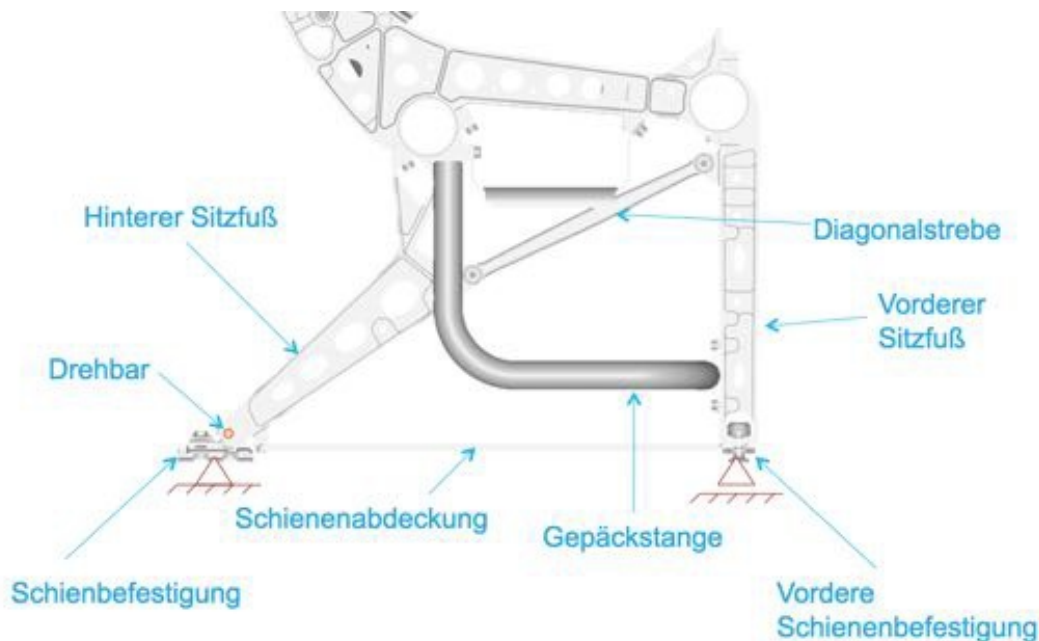


Abbildung 20: Sitzfußstruktur

Noch ein wichtiger Punkt der zu erwähnen ist, ist dass eine Sitzreihe aus einem, zwei oder sogar drei Sitzen bestehen kann. Die Sitzreihe besitzt aber in jeder Konfiguration nur zwei Sitzfüße. Der Schienenabstand und die Position der Schienen im Flugzeugrumpf sind auch in den verschiedenen Flugzeugen unterschiedlich. So müssen also die Sitzfüße seitlich verstellbar sein (Abbildung 21). Da die Sitzfüße verschiedene Positionen in der Querachse annehmen können, werden diese auch je nach Einbauposition unterschiedlich belastet. Für die Auslegung und Berechnung der Sitzfüße soll dies berücksichtigt werden und die Sitzfußstruktur für die kritischste Position ausgelegt werden.

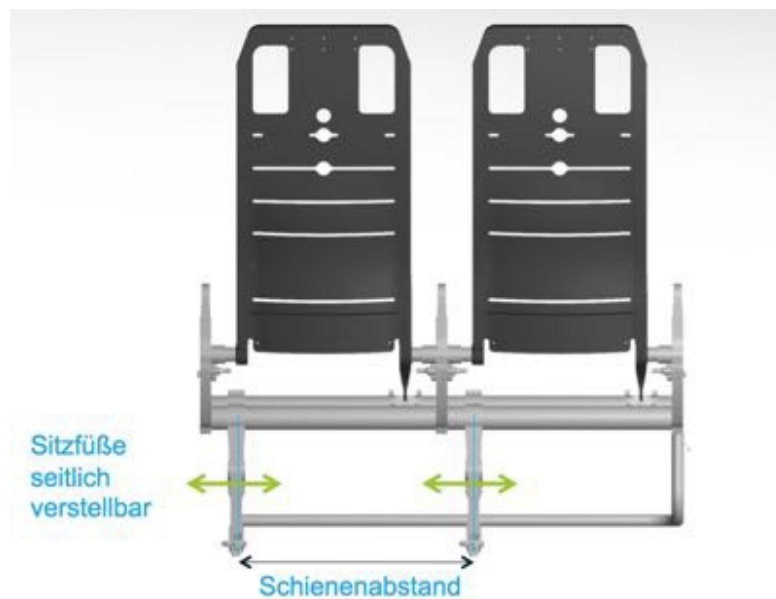


Abbildung 21: Verstellbarkeit der Sitzfüße

4.1 Mögliche Änderungen und Optimierungspotentiale

Es stellt sich gleich am Anfang durch Betrachtung der bestehenden Struktur heraus, dass es sich um eine Leichtbaustruktur handelt. Die gefrästen Aluminiumteile weisen bereits eine sehr optimierte Topologie auf und man stellt sich die Frage ob eine weitere Gewichtsreduktion durch eine Topologieoptimierung überhaupt möglich ist.

Bei der Rückenlehne wurde die Rahmenstruktur aus einer alten Rückenlehne übernommen. In der alten Rückenlehne bestand die Rahmenstruktur aus Aluminium und es wurde dann über den Rahmen einen Stoff für die Lehnenfläche aufgespannt.

In der neuen Rückenlehne besteht die ganze Rahmenstruktur aus CFK und für die Lehnenfläche werden zwei CKF-Lagen eingebaut, die von einer Seite zur anderen verlaufen. So bleibt die Rückenlehne mit derselben Form wie früher, allerdings besteht diese aus CFK. Hier stellt sich die Frage ob diese Rahmenstruktur wirklich die Optimale ist.

Es wird auch überlegt eine Living-Space-Optimierung als Ergänzung der Topologieoptimierung durchzuführen. In einer Living-Space-Optimierung wird versucht die Bein- und Kniefreiheit zu verbessern ohne dass es zu einer Gewichtserhöhung des Sitzes kommt. So werden also die Position der Tragrohre und die Dimensionen der Sitzteiler analysiert und das Living-Space-Optimierungspotential untersucht.

5 Erste Berechnung und Lastpfaduntersuchung

5.1 Lastpfade in der bestehenden Sitzstruktur

Um die einzelnen Bauteile noch besser zu verstehen und deren kritische Stellen festzulegen wurde zuerst eine einfache Topologieoptimierung durchgeführt. So eine Topologieoptimierung gibt nicht die exakte Dimensionierung der Bauteile an und auch nicht, ob es zu einer Gewichtsreduktion kommen kann. Sie weist lediglich die Lastpfade auf.

Da eben das Gewicht und Dimensionierung außer Acht gelassen werden, ist das Material und Ziel der Optimierung frei zu wählen. Es wurde für alle Bauteile in der ersten Berechnung die Aluminiumlegierung Al-Li2090 als Werkstoff ausgewählt. Als Ziel der Optimierung wurde die steifste mögliche Struktur mit einem vorgegebenen Prozentsatz des Anfangsvolumen ausgewählt (z.B.: steifste Struktur mit maximal 20% des Anfangsvolumen). Es wurden verschiedene Prozentsätze (10%, 15%, 20%, 30%, 50%) als Begrenzung ausprobiert und die, mit den besten Ergebnissen, weiterverwendet.

Um die aktuellen Bauteile von deren Form zu lösen und möglichst wenige Formbedingungen vor zu geben, wurden die Bauteilformen vereinfacht und diskretisiert. Da es sich um eine Lastpfadanalyse handelt, wurde auf die typischen NonDesign-Spaces bei den Lagerungen verzichtet. Die genaue Position der Lagerungen, Verbindungen und Krafteinleitung wurde aber von den bestehenden Bauteilen übernommen.

5.1.1 Rückenlehne

5.1.1.1 Vereinfachen des Bauteils

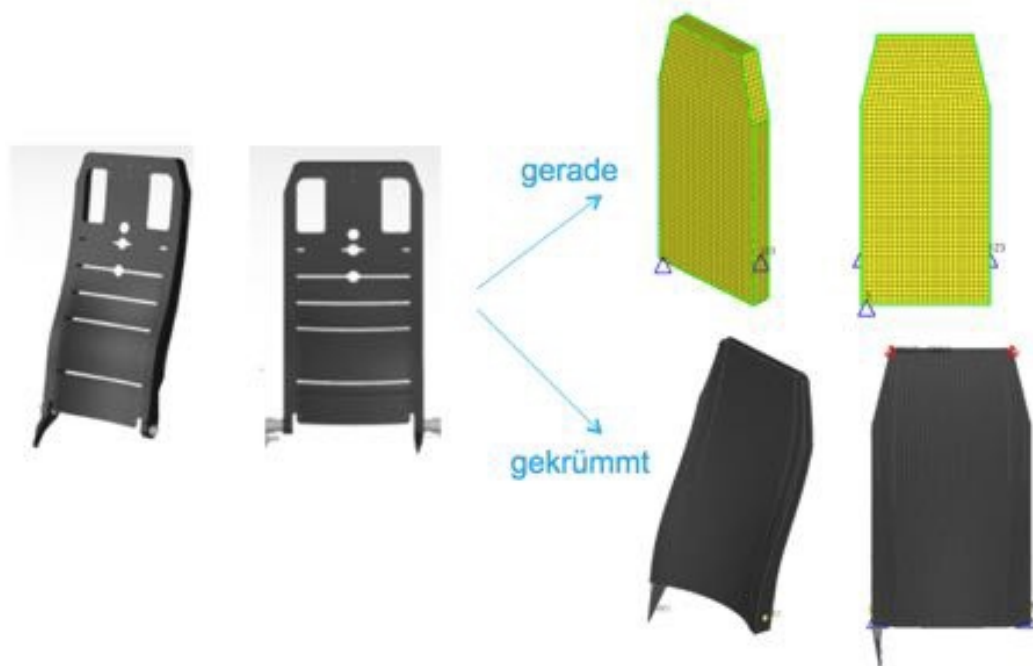


Abbildung 22: Vereinfachung der Rückenlehne - gerade und gekrümmt

Für die Rückenlehne wurden zwei Vereinfachungen durchgeführt und berechnet. Bei einer Vereinfachung wurde die Krümmung der Rückenlehne vernachlässigt und bei der anderen berücksichtigt. Es ist an dieser Stelle wichtig zu erwähnen, dass die gekrümmte Version eine größere Krümmung besitzt als die originale Rückenlehne. Es fiel nämlich auf, dass je größer die Krümmung bei der Rückenlehne, desto mehr Kniefreiheit gewonnen werden kann. Denn wenn die Krümmung größer ist, kann die Lagerung und somit auch die Sitzteiler weiter vorne positioniert werden. Da die Lagerung und Sitzteiler genau im Kniebereich sind, bringen kleine Verschiebungen einen sehr großen Vorteil.

In der Vereinfachung mit der geraden Rückenlehne, wurde der Körper bis zur Rückstellung (unterster Punkt) erweitert. Bei der gekrümmten Vereinfachung wurde die Erweiterung nicht durchgeführt. Sondern die Rückstellung wurde mit Rigid-Elementen (starrten Elementen) ausgeführt.

5.1.1.2 Lagerung, Randbedingungen, Lastfälle

Im Lastenheft von ZIM Flugsitz [12] befinden sich die Lastfälle und Zulassungskriterien für die einzelnen Komponenten einer Sitzreihe. Die

verschiedenen Lastfälle der Rückenlehne werden daraus übernommen und die Zulassungskriterien vernachlässigt, weil in der ersten Berechnung nur die Lastpfade von Interesse sind.

Für die Rückenlehne sind eine Grenzbelastung und eine Bruchlast vorgegeben. Die Grenzbelastung oder im englischen „Limit Load LL“ beträgt 900N und die Bruchlast oder im englischen „Ultimate Load UL“ beträgt 1800N. Die Kraft wird auf der gegenüberliegenden Seite der Rückstellung oben in der Ecke angebracht. Der Kraftvektor besitzt nur eine Komponente in der X-Achse und ist nach hinten (gegen die Flugrichtung) ausgerichtet. Um beide Ecken zu untersuchen wurde ein zweiter Lastfall definiert indem die Last auf derselben Seite wie die Rückstellung angebracht wird.

Auf den Seiten wird die Rückenlehne drehbar gelagert. Es sind also die translatorischen Freiheitsgrade in den Lagerungspunkten gesperrt und die rotatorischen Freiheitsgrade frei. Dort wo der Gaszylinder für die Rückstellung angreift, wird der Freiheitsgrad in x-Richtung gesperrt. Die Kräfte und Lager-Randbedingungen oder Single Point Constraint SPC sind im geraden und gekrümmten Modell gleich.

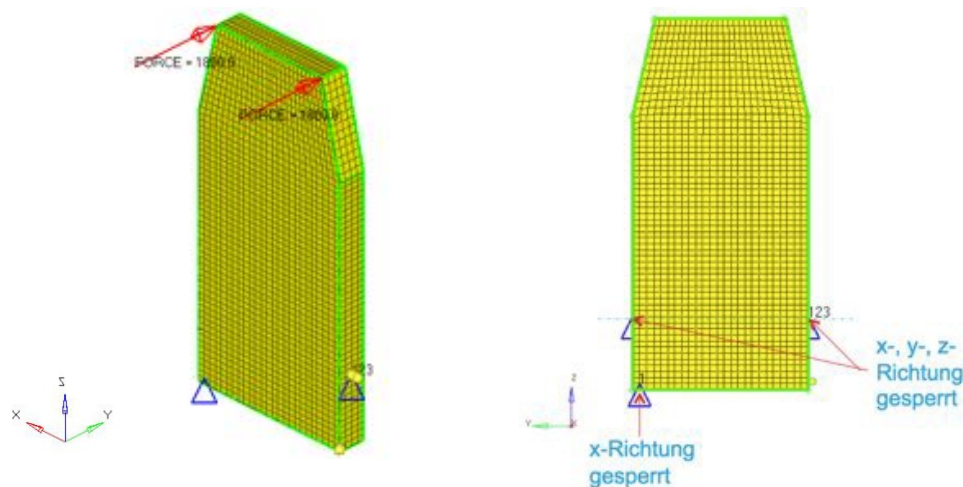


Abbildung 23: SPC und Kräfte - gerade Rückenlehne

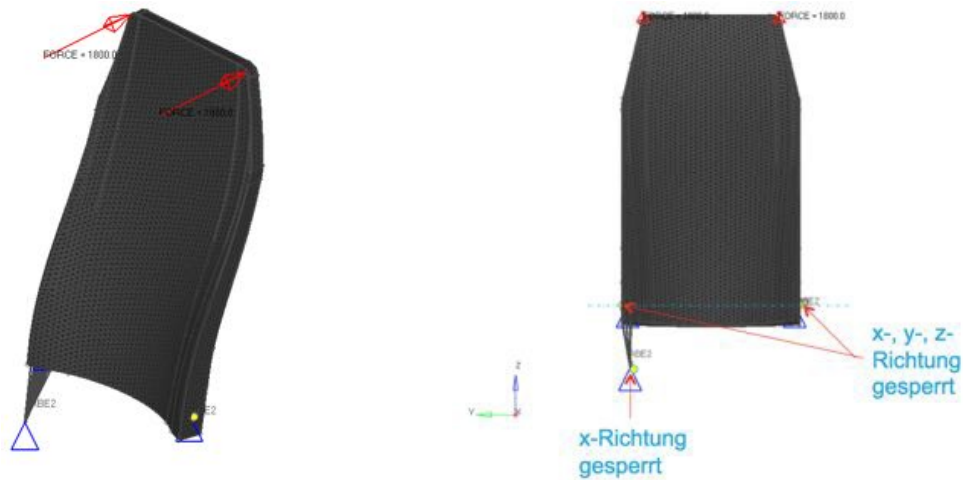


Abbildung 24: SPC und Kräfte - gekrümmte Rückenlehne

5.1.1.3 Erste Ergebnisse und Erkenntnisse

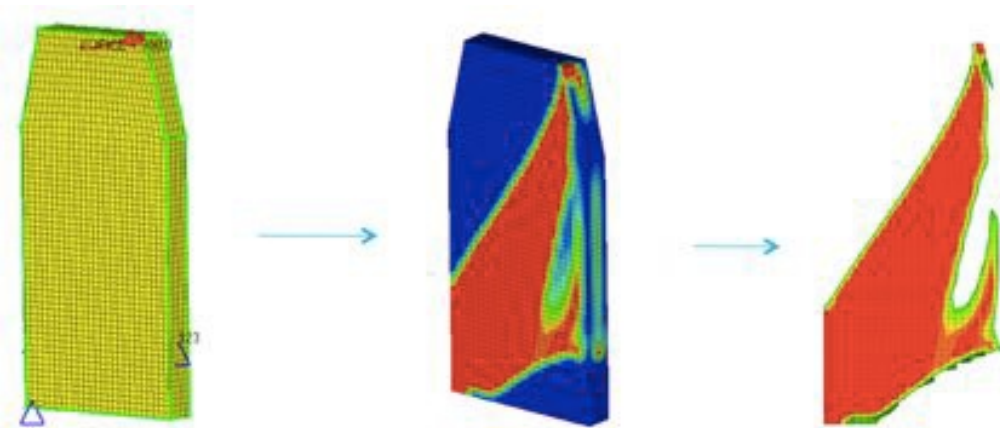


Abbildung 25: Ergebnis Rückenlehne - gerade und einseitig belastet

Wie in der Abbildung 25 zu sehen ist, sind die Lastpfade in der geraden Rückenlehne komplett asymmetrisch. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Belastung auch asymmetrisch ist und nämlich auf der gegenüberliegenden Seite wie die Rückstellung angreift (wie im Lastenheft für die Zulassung definiert).

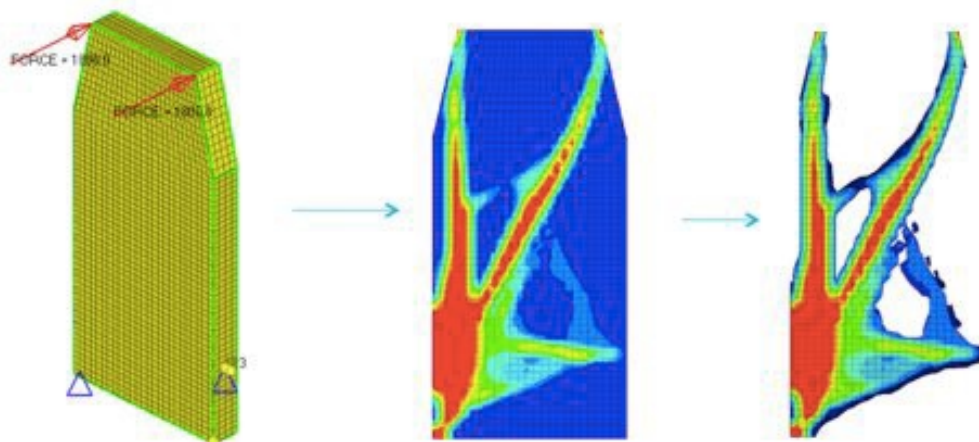


Abbildung 26: Ergebnis Rückenlehne - gerade und beidseitig belastet

Um eine symmetrische Belastung zu analysieren, wurde eine beidseitige Belastung auf beiden obigen Ecken angebracht. Da die Rückstellung von der Rückenlehne auf einer Seite liegt, sind die Lastpfade trotz symmetrischer Belastung asymmetrisch.

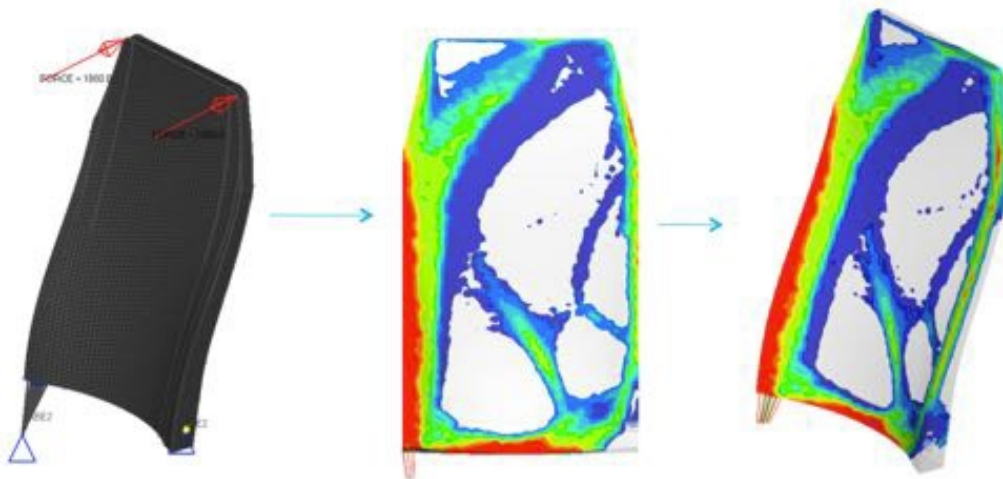


Abbildung 27: Ergebnis Rückenlehne - gekrümmt und beidseitig belastet

Um die Krümmung von der Rückenlehne zu untersuchen wurde dieselbe Topologieoptimierung/Berechnung wie mit der geraden Rückenlehne durchgeführt. Dabei wurde nur eine symmetrische Belastung angebracht. Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, schauen die Lastpfade in der gekrümmten Rückenlehne ähnlich wie in der geraden aus (symmetrische Belastung). Allerdings ist eine bessere Aufteilung der Lastpfade auf der Gesamtfläche zu sehen.

5.1.1.4 Weitere Experimente

- Um symmetrische Lastpfade zu erzeugen und einen symmetrischen Aufbau der Rückenlehne zu ermöglichen, wurde mit der Position der Rückstellung experimentiert.

Zuerst wurde eine mittige Rückstellung im geraden und gekrümmten Modell untersucht:

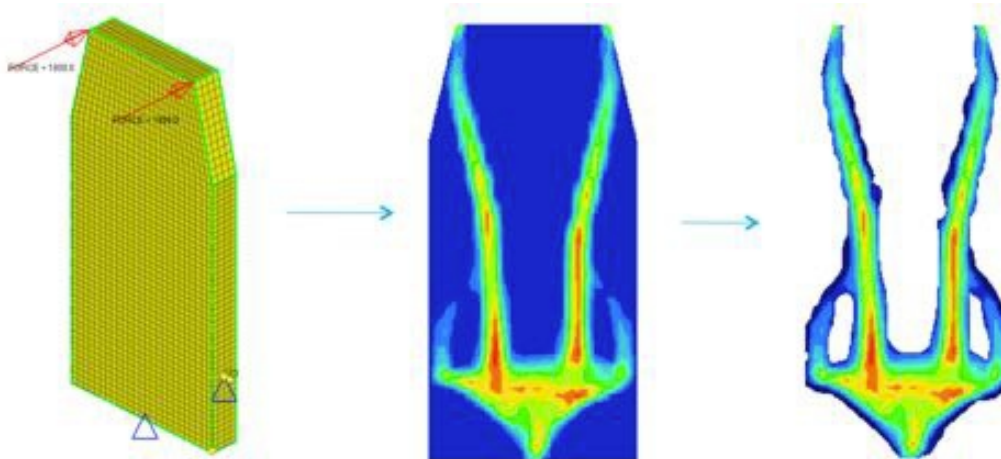


Abbildung 28: Ergebnis Rückenlehne - gerade, beidseitig belastet und mittige Rückstellung

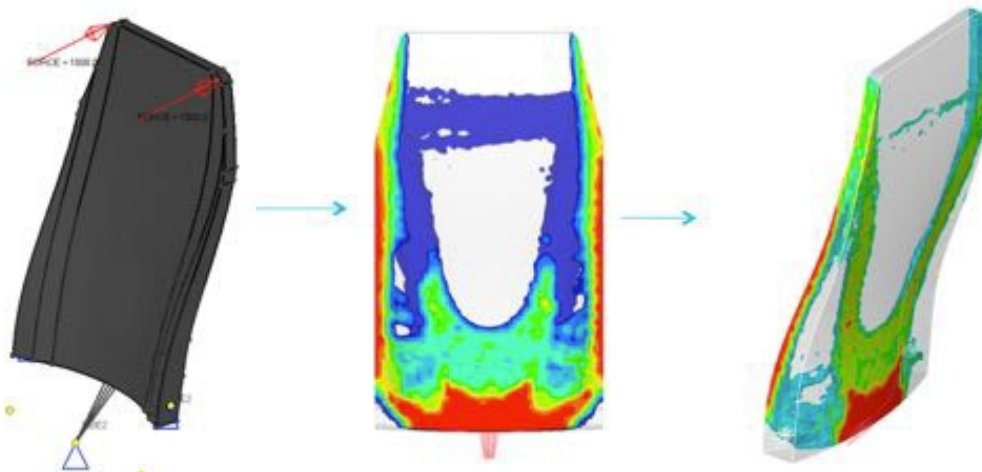


Abbildung 29: Ergebnis Rückenlehne - gekrümmt, beidseitig belastet und mittige Rückstellung

- Weiters wurde eine beidseitige Rückstellung untersucht, was aber zu zwei Rückstellgaszylinder führen würde. Auch wenn diese zwei Gaszylinder kleiner dimensioniert sein könnten und dasselbe wie ein großer Gaszylinder wiegen

würden, sind mehrere Bauteile im Sitz unerwünscht. Aus diesem Grund wurde diese Variante nicht weiter verfolgt.

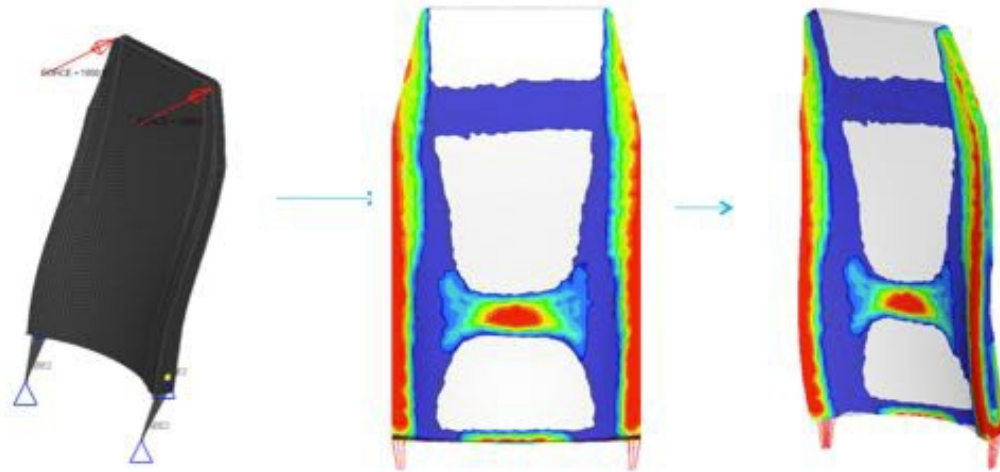


Abbildung 30: Ergebnis Rückenlehne - gekrümmt, beidseitig belastet und beidseitige Rückstellung

- In einem nächsten Experiment, wurde eine mögliche Lagerung der Rückenlehne unterhalb des Sitzes bedacht. So eine Lagerung würde keine Lagerung an den Sitzteilern mehr brauchen und die Sitzteiler könnten eventuell kleiner dimensioniert werden. Dadurch wäre es möglich mehr Kniefreiheit zu gewinnen.

Problematisch bei einer solchen Lagerung hat sich der Rotationspunkt gezeigt. Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, würde sich die ganze Rückenlehne um den Lagerpunkt unterhalb des Sitzes drehen. Was eine Verschiebung in dem Kniebereich bedeuten würde und dies natürlich nicht erwünscht ist. Trotzdem wurde so eine Rückenlehnenlagerung nicht komplett ausgeschlossen und weiter in der Konzeptfindungsphase betrachtet.

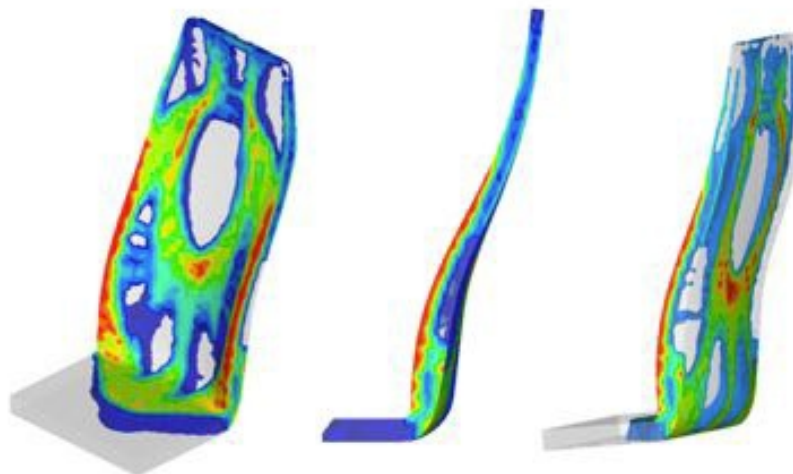


Abbildung 31: Ergebnis Rückenlehne - Lagerung unterhalb des Sitzes

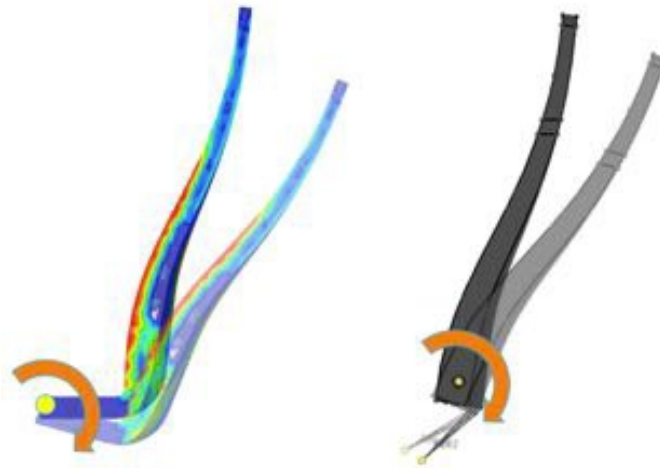


Abbildung 32: Lagerung unterhalb des Sitzes - Vergleich des Drehpunktes mit der Originalrückenlehne (rechts)

- Als nächster Versuch wurde die Rückenlehne mit Schalenelementen und nicht mehr als Vollkörper modelliert. In so einem Modell werden nur Flächen diskretisiert. Schalenelemente schauen in einem Modell dünn aus, sie besitzen aber in deren Eigenschaften eine benutzerdefinierte Dicke „t“ und diese wird in der Berechnung berücksichtigt.

Das Modell mit der Lagerung unterhalb des Sitzes und die bestehende Rückenlehne mit einseitiger Rückstellung wurden mit Schalenelementen modelliert. Wie in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu erkennen ist, sind die Lastpfade deutlich sichtbarer geworden. So wurde entschieden die Rückenlehne nur als Flächenmodell weiter zu untersuchen und eventuell mit CFK auszulegen.

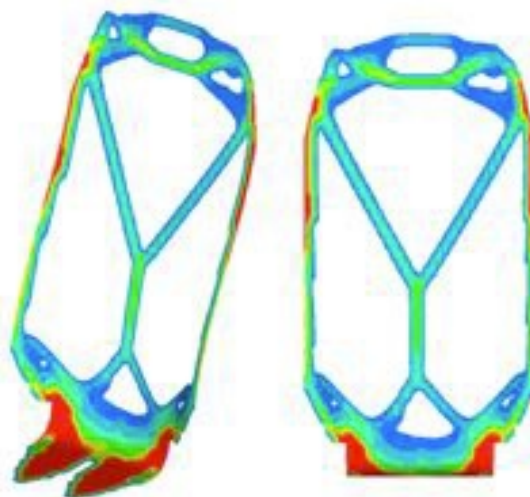


Abbildung 33: Ergebnis Rückenlehne - Schalenelemente - Lagerung unterhalb des Sitzes

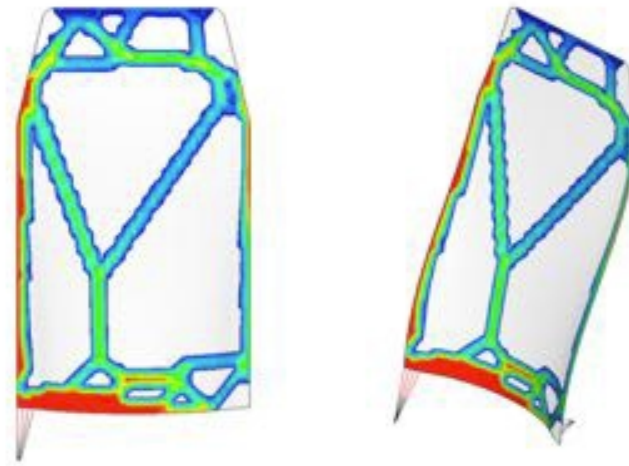


Abbildung 34: Ergebnis Rückenlehne - Schalenelemente - bestehende Rückenlehne

5.1.2 Sitzteiler

5.1.2.1 Vereinfachen des Bauteils

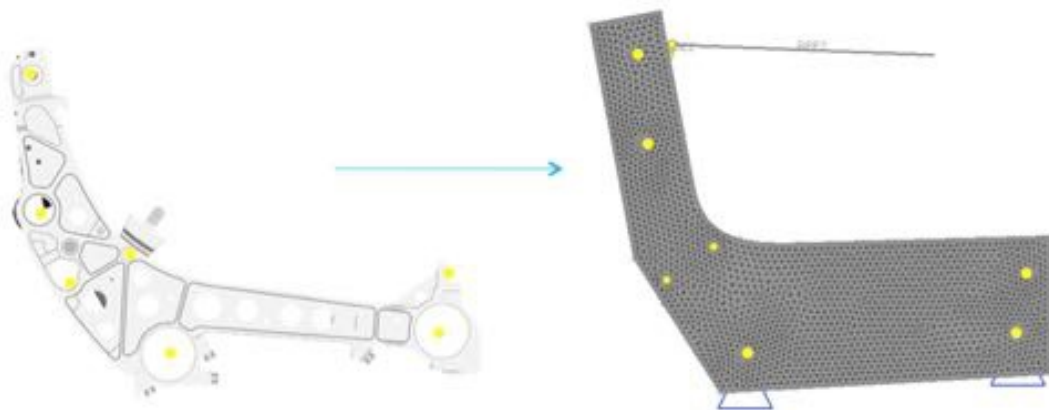


Abbildung 35: Vereinfachung der Sitzteiler

Die Sitzteiler wurden wie in Abbildung 35 vereinfacht und deren Lagerungen und Krafteinleitungspunkte wurden vom Originalbauteil übernommen. Die Armlehne wurde mit Rigid-Elementen auch mitkonstruiert, um die Kräfte der Armlehne anbringen zu können. Die Lagerungspunkte und Bohrungen wurden kleiner als im Originalteil modelliert, weil die Materialanhäufung im Lager-/Bohrungsbereich von Interesse ist. Die Elementknoten in den Lochbereichen wurden ebenfalls durch Rigid-Elemente mit dem Lochmittelpunkt verbunden. Diese Art von Verbindung im

Lochbereich wird Rigid-Spinne genannt und erlaubt es Kräfte und Randbedingungen im Lochmittelpunkt anzubringen.

5.1.2.2 Lagerung, Randbedingungen und Lastfälle

Die Lagerung (SPC) und Kraftaufbringungspunkte der Sitzteiler wurden folgendermaßen definiert (siehe auch Abbildung 36):

- **SPC** (Single Point Constraint): in der Lagerung des hinteren Tragrohres wurden alle drei translatorischen Freiheitsgrade gesperrt. Bei der vorderen Lagerung wurden nur die Freiheitsgrade in y- und z-Richtung gesperrt, weil das vordere Tragrohr mit dem vorderen Sitzfuß verbunden ist und dieser auch nur in y-, und z-Richtung gesperrt ist.
- **1. Kraft auf der Armlehne:** Die Armlehne wurde in erster Näherung mit einer Länge von 280mm angenommen. Auf der Armlehne greift eine Kraft von 1335N in negativer z-Richtung an. Diese Last wurde aus dem ZIM-Lastenheft [12] entnommen und entspricht dem Lastfall der Grenzbelastung (limit Load).
- **2. Lagerkräfte der Rückenlehne:** die Lagerkräfte wurden als Reaktionskräfte vom Rückenlehnenmodell (1800N auf der oberen Ecke) übernommen. Diese sind in x- und z-Richtung ausgerichtet.
- **3. Gurtkraft:** Die Kraft, die an der Gurtverbindung angreift, wurde laut Zulassungstest Dynamic-16g-forward und Static-3g-upward berechnet. Im ersten beträgt die Kraft $F_{vorne} = 16g \cdot 80kg = 12556,8N$ und ist nach vorne ausgerichtet und im zweiten beträgt die Kraft $F_{3g_upward} = 3g \cdot 80kg = 2354,4N$ und ist nach oben ausgerichtet. Diese Kraft wird durch 2 dividiert weil sich die Kraft auf den linken und rechten Gurtteil aufteilt, aber dann wieder mal 2 multipliziert, weil der Sitzteiler in der Mitte zwei Gurtverbindungen besitzt. Die Gurtverbindung wurde mit einem Rigid-Element modelliert, welches sich um die y-Achse (Querachse) drehen kann und an der Rigid-Spinne der Gurtverbindungsbohrung angreift.
- **4. Kraft auf dem Sitz:** hier wurden zwei Kräfte definiert. Im ersten Fall sitzt eine Person mit 80 kg auf dem Sitz und im zweiten wird die Testsituation Dynamic-14g-down berücksichtigt. So beträgt die Sitzkraft 784,8N und die Testkraft $F_{unten} = 14g \cdot 80kg = 10987,2N$. Das Sitztrapez wurde mit zwei Rigid-Elementen

modelliert, welche sich um die y-Achse drehen können und mit einem Winkel von 15° zur Mitte nach unten verlaufen.

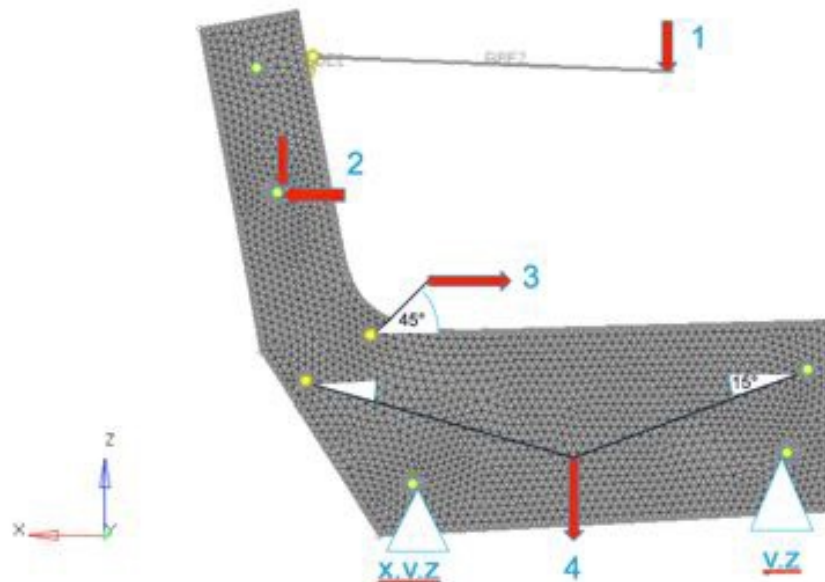


Abbildung 36: SPC und Kräfte - Sitzteiler

Weiters wurden 5 verschiedene Lastfälle für die Berechnung vom Sitzteiler festgelegt. Wie bereits erwähnt dauert eine Berechnung mit verschiedenen Lastfällen länger. Sie berücksichtigt alle Lastfälle und kombiniert die Lastpfade der einzelnen Ergebnisstrukturen. Das Ergebnis weist allerdings nur die kombinierten Lastpfade in einer Ergebnisstruktur auf. Um die Lastpfade der einzelnen Lastfälle separat zu betrachten, müsste man für jeden Lastfall ein eigenes Modell erstellen und eine eigene Berechnung durchführen.

Nr.	Lastfall	Beschreibung
1	Sitzen	Rückenlehne wird nach hinten gedrückt und eine 80kg schwere Person sitzt auf dem Sitz
2	Lehne nach vorne	die Rückenlehne wird nach vorne gedrückt (Lagerkräfte umgekehrt zum Lastfall 1)
3	3g-upward	eine 80kg schwere Person wird mit 3g nach oben geschleudert. Die Kraft wird am Gurt aufgebracht
4	16g-forward	Kraft (Gewicht der Person mit 16g nach vorne) wirkt auf den Gurt
5	14g-downward	Kraft (Gewicht der Person mit 14g nach unten) wirkt auf das Sitztrapez

Tabelle 1: Lastfälle - Sitzteiler

5.1.2.3 Erste Ergebnisse und Erkenntnisse

In der Abbildung 37 ist die Struktur mit den kombinierten Lastpfaden zu erkennen.

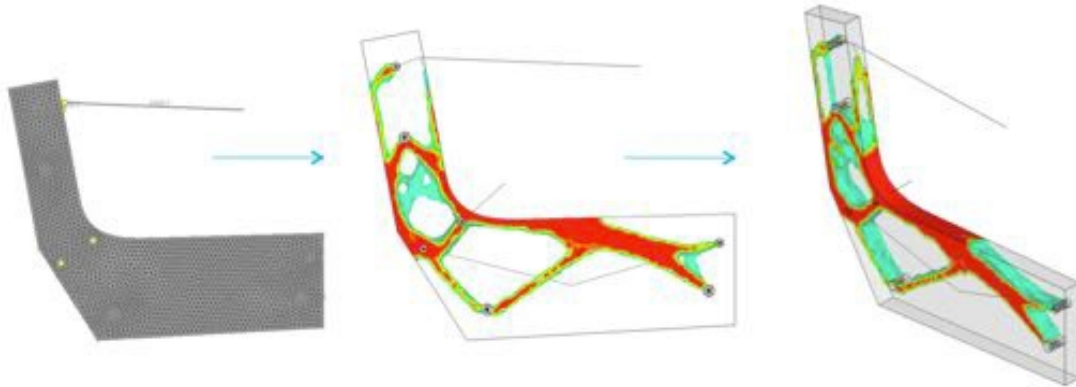


Abbildung 37: Ergebnis Sitzteiler

Wenn man das Ergebnis des Sitzteilers mit dem bestehenden Sitzteiler vergleicht, sieht die Ergebnisstruktur so aus als würde sie weniger Material als die bestehende Struktur brauchen. Dies hängt damit zusammen, dass die durchgeführte Topologieoptimierung lediglich für eine Lastpfaduntersuchung verwendet wurde. Es können also keine Aussagen über das Gewicht und exakte Dimensionierung getroffen werden.

Im bestehenden Sitzteiler sind Rippen in der Struktur zu erkennen. Die Stellen der Rippen deuten auf verstärkungsbedingte Stellen und somit mögliche Lastpfade hin. Die Rippen der bestehenden Struktur und Lastpfade des Ergebnisses sind nicht 100-Prozent exakt zueinander. Der Grund dafür liegt darin, dass NonDesign-Spaces (Lagerung und Kraftanbringungspunkte) nicht berücksichtigt wurden und dass eventuell der bestehende Sitzteiler für andere/verschiedenene Lastfälle ausgelegt worden ist.

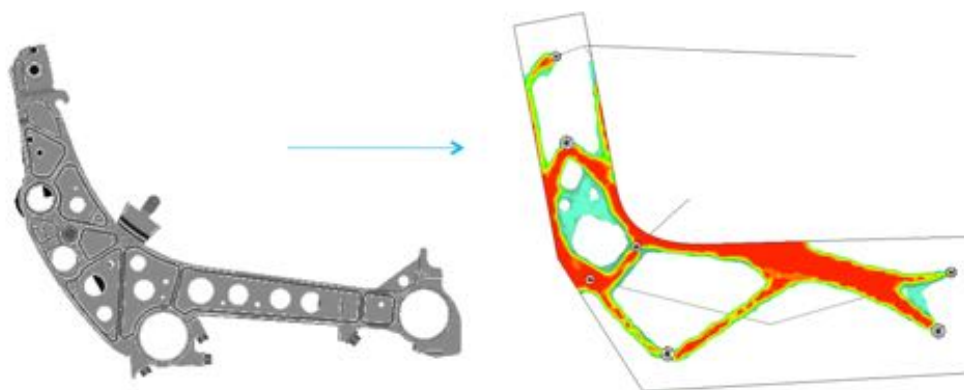


Abbildung 38: Vergleich des Ergebnisses mit dem bestehenden Sitzteiler (a)

Wie man in der Abbildung 39 auch feststellen kann, liegen einige Krafteinleitungspunkte nicht exakt auf derselben Position wie im bestehenden Sitzteiler. Grund dafür ist, dass bereits Änderungen des Sitzteilers fest liegen. Die Änderungen wurden vorgenommen, um einige Zentimeter im Living-Space zu gewinnen. Es gibt also eine neue Version des Sitzteilers und diese wurde in der Berechnung betrachtet. Da die neue Version noch nicht konstruiert/modelliert wurde, wurden die Ergebnisse der Berechnung mit dem „alten“ Sitzteiler verglichen.

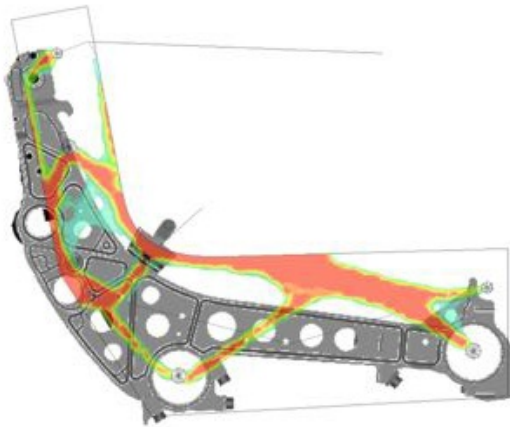


Abbildung 39: Vergleich des Ergebnisses mit dem bestehenden Sitzteiler (b)

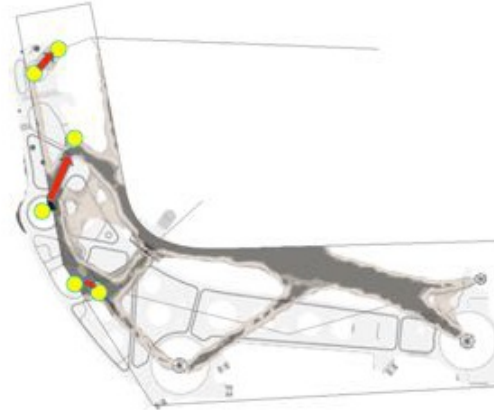


Abbildung 40: neue Krafteinleitungspunkte

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Strukturen ist, dass der Hauptlastpfad, der nach vorne zum vorderen Tragrohr läuft, weiter oben als in der bestehenden Struktur liegt. Der Grund dafür ist, dass die Grenze des Design-Spaces für die Berechnung weiter oben liegt und deshalb der Optimierungsrechner mehr Raum zur Verfügung hat.

5.1.2.4 Weitere Experimente

Da der bestehende Sitzteiler eine sehr optimierte und durchdachte Struktur besitzt, wurden im Folgenden eher Versuche zur Living-Space-Optimierung durchgeführt. Um Living-Space-Optimierungspotentiale zu erkennen wurden in erster Linie die Position der Tragrohre und der Design-Space geändert.

- Als Erstes wurden beide Tragrohre leicht zur Mitte verschoben: das hintere Tragrohr nach vorne und das vordere Tragrohr nach hinten. Der Lastpfad im vorderen Bereich des Sitzteilers ist anders aber ansonsten sind eine ähnliche Struktur und Lastpfade zu erkennen.

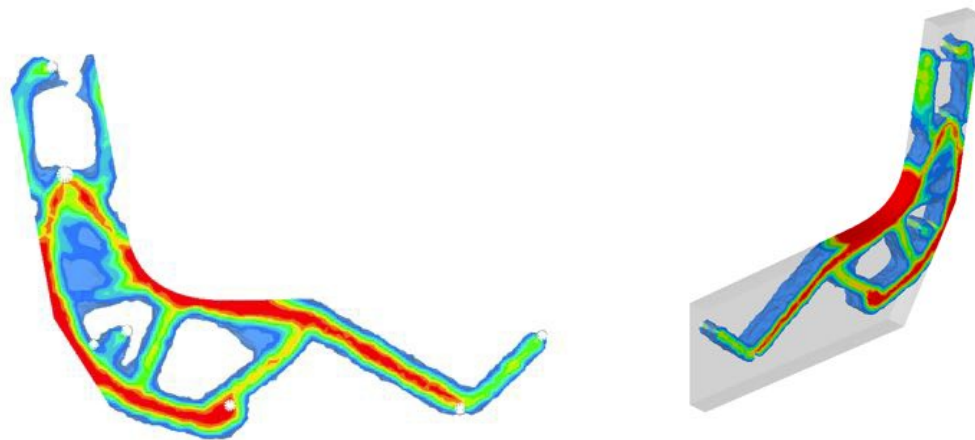


Abbildung 41: Ergebnis Sitzteiler - Tragrohre zur Mitte Verschieben

- Danach wurden, in ähnlicher Weise, die Tragrohre zur Mitte und weiter nach unten Verschieben:

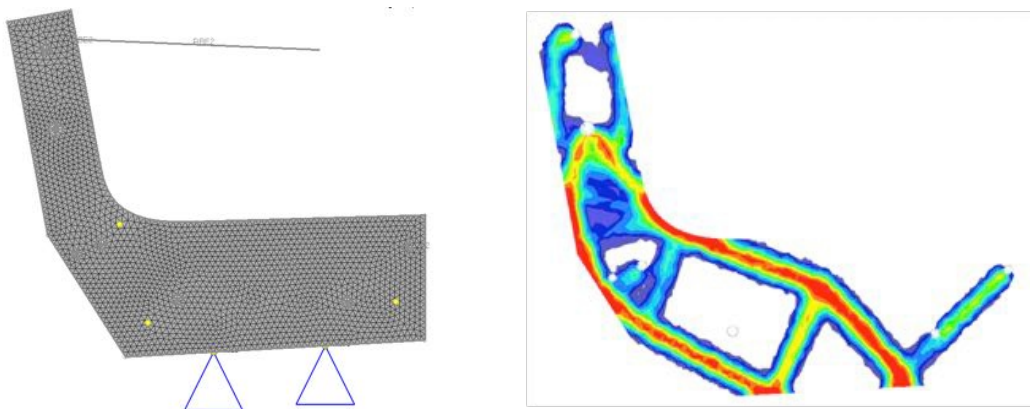


Abbildung 42: Ergebnis Sitzteiler - Tragrohre zur Mitte und nach unten verschoben

- Weiters wurde der Fall untersucht, in dem es nur ein Tragrohr gibt. Das Tragrohr befindet sich unten in der Mitte des Sitzteilers:

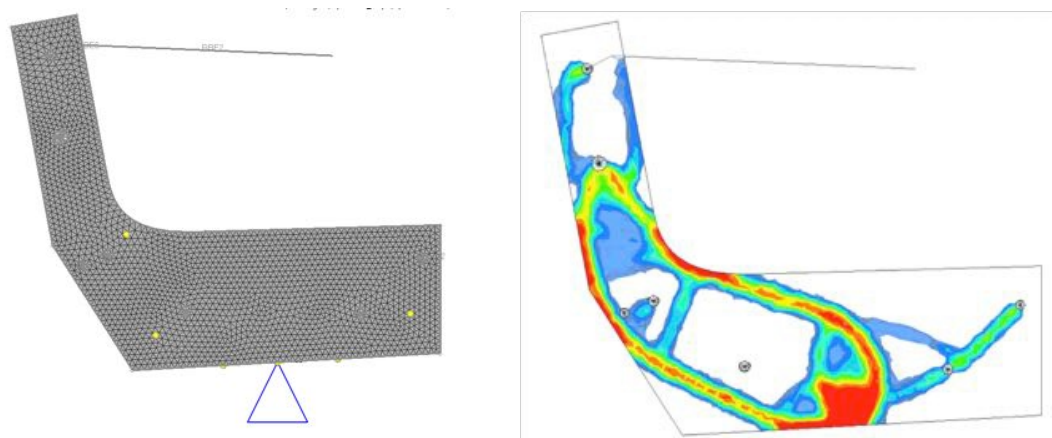


Abbildung 43: Ergebnis Sitzteiler - nur ein Tragrohr

- Als letztes Experiment wurde der Design-Space, wie in Abbildung 44 zu sehen ist, vergrößert. Dabei wurde versucht die Höhe der Lastpfade nicht durch den Design-Space zu begrenzen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lastpfade anders und weiter oben durchlaufen. Allerdings würde so ein Sitzteiler deutlich weiter vorne und zwischen den Sitzen positioniert sein und möglicherweise die Passagiere belästigen (Abbildung 45 links).

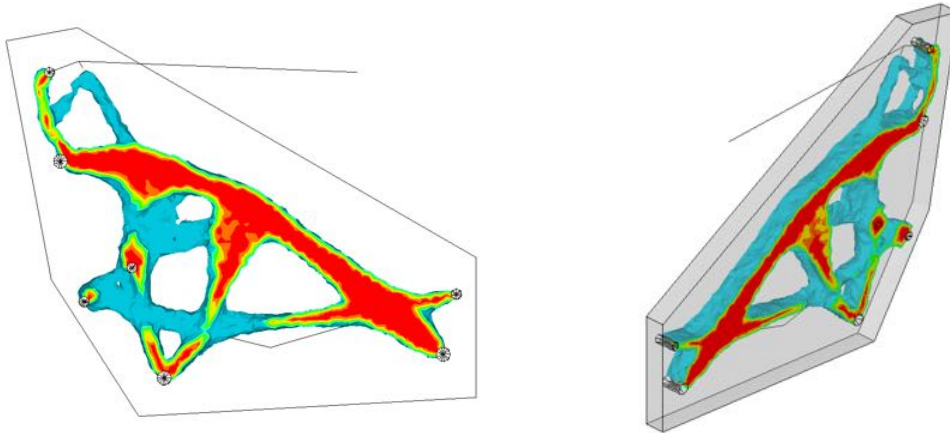


Abbildung 44: Ergebnis Sitzteiler - Design-Space größer

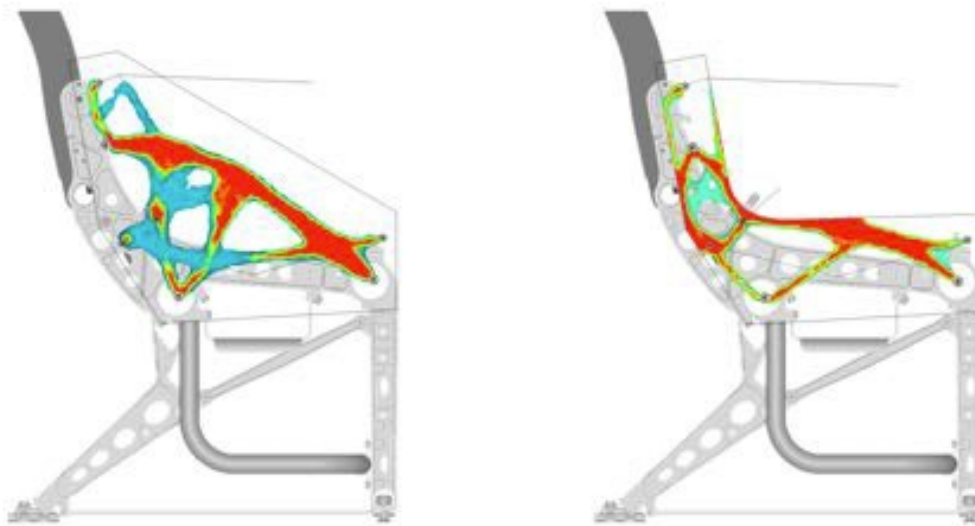


Abbildung 45: Ergebnis Sitzteiler - Vergleich der Design-Spaces und Lastpfade

5.1.3 Sitzfüße

5.1.3.1 Vereinfachen des Bauteils

In der ersten Analyse wurde die Gesamtsitzfußstruktur wie in Abbildung 46 als Block vereinfacht. Die Position der Tragrohre und Schienenverankerung wurde vom Originalteil übernommen und die Löcher der Tragrohre wurden mit Rigid-Spinnen vorgesehen. Die Diagonalstrebe und der Sitzteiler wurden als starre Elemente modelliert. In der Realität sind diese Bauteile nicht starr sondern sie weisen eine Verschiebung auf und besitzen eine bestimmte Steifigkeit. Man könnte also anstatt starren Elemente eine Ersatzfeder mit derselben Steifigkeit einbauen. Für die erste Analyse und Lastpfaduntersuchung reicht aber die Darstellung dieser Bauteile mit starren Elementen.

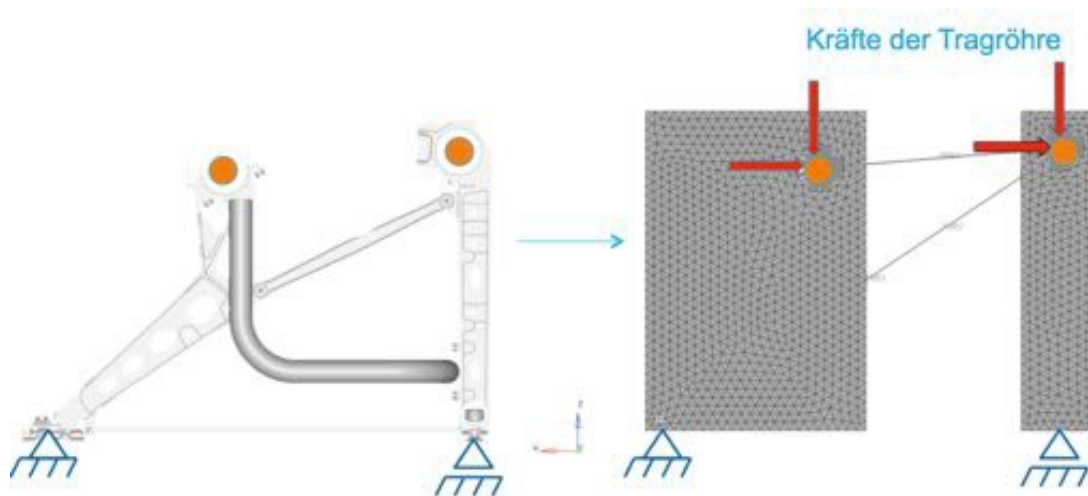


Abbildung 46: Vereinfachung der Sitzfüße, SPC und Kräfte

5.1.3.2 Lagerung, Randbedingungen und Lastfälle

Die Sitzteiler sind mit den Tragrohren verbunden, und die Tragrohre wiederum mit den Sitzfüßen. So wurden die Lagerkräfte vom Sitzteiler-Modell übernommen und an den Stellen der Tragrohre angebracht. Diese Kräfte sind in der Realität nicht gleich, weil die Sitzfüße seitlich verstellbar sind und weil sie sich nicht direkt unterhalb der Sitzteiler befinden. Für eine exakte Auslegung müsste also dies berücksichtigt werden und mit der kritischen Position beziehungsweise mit Kräften berechnet werden. Da es sich in dieser Phase um eine Lastpfaduntersuchung handelt, reicht es die Kräfte gleich anzunehmen um Rechenzeit zu ersparen.

Die starren Elemente sind in der y-Achse rotationsfähig gelagert und die Position der Schienenbefestigung wurde vom bestehenden Modell übernommen. Der hintere

Sitzfuß ist in x-, y- und z-Richtung gesperrt und der vordere Sitzfuß nur in y- und z-Richtung. Die Gepäckstange wurde nicht dargestellt.

Die Lastfälle für die Sitzfußstruktur wurden von dem Sitzteiler-Modell übernommen. Es wurden die Lagerkräfte der Sitzteiler in den verschiedenen Lastfällen betrachtet und diese in verschiedenen Lastfällen auf den Sitzfuß angebracht. Die Lastfälle wurden also gleich wie die im Kapitel 5.1.2.2 definiert. Einige Kräfte sind mit unterschiedlicher Farbe für die jeweiligen Lastfälle in Abbildung 47 links zu erkennen.

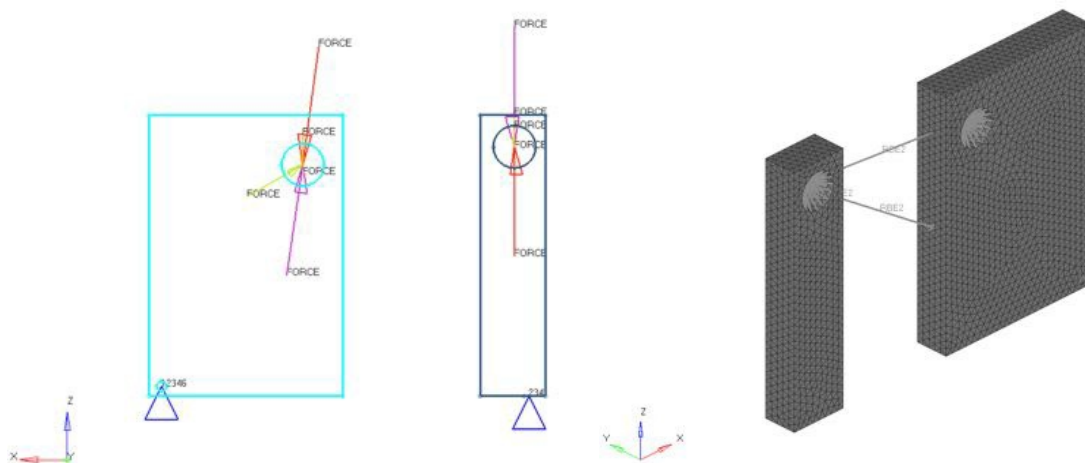


Abbildung 47: Sitzfuß - Verschiedene Lastfälle und isometrische Ansicht

5.1.3.3 Erste Ergebnisse und Erkenntnisse

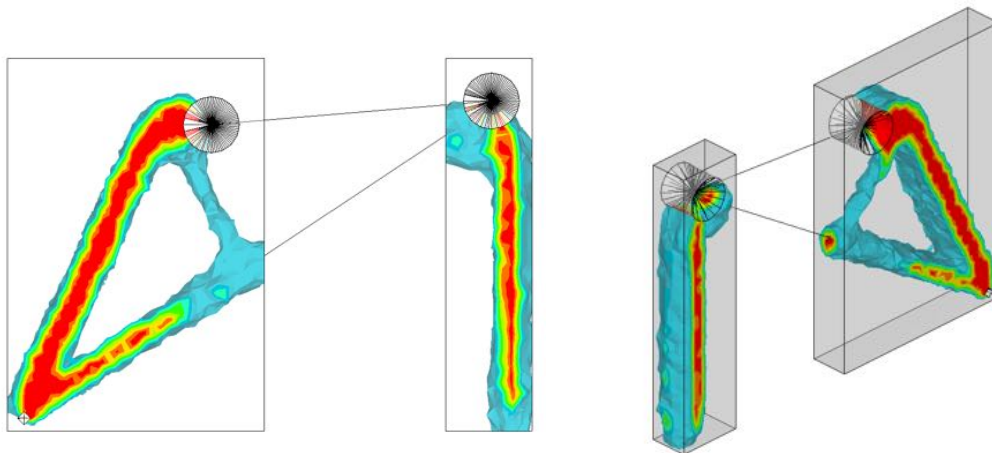


Abbildung 48: Ergebnis Sitzfuß

Wie zu erwarten war, ergab sich eine Struktur mit ähnlichen Lastpfaden wie der bestehende Sitzfuß. Die Ergebnisstruktur hat allerdings keinen Knick im hinteren Sitzfuß. Wie im Kapitel 4 erklärt wurde besitzt aber der bestehende Sitzfuß einen

Knick, um die Aufprallenergie zu absorbieren und nicht weil der Lastpfad mit einem Knick durchläuft.

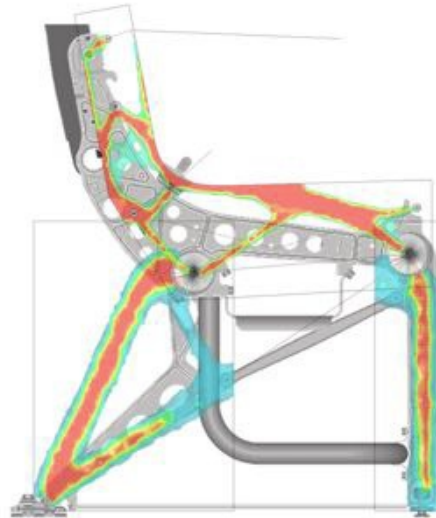


Abbildung 49: Ergebnis Sitzfuß und Sitzteiler - Vergleich mit der bestehenden Sitzstruktur

6 Erste Composite-Optimierung der Rückenlehne

6.1 Modell, SPC und Lastfälle

Wie in den vorherigen Kapiteln erläutert wurde, besteht die aktuelle Rückenlehne aus CFK und besitzt eine Rahmenstruktur, die außen rundherum durchläuft. In der Lastpfaduntersuchung wurde die Rückenlehne nicht als ein Mehrschichten-Verbund MSV aus CFK analysiert. Um die Rückenlehne aus CFK analysieren zu können wurde das Modell der Rückenlehne, wie in Abbildung 50 zu erkennen ist, verändert.

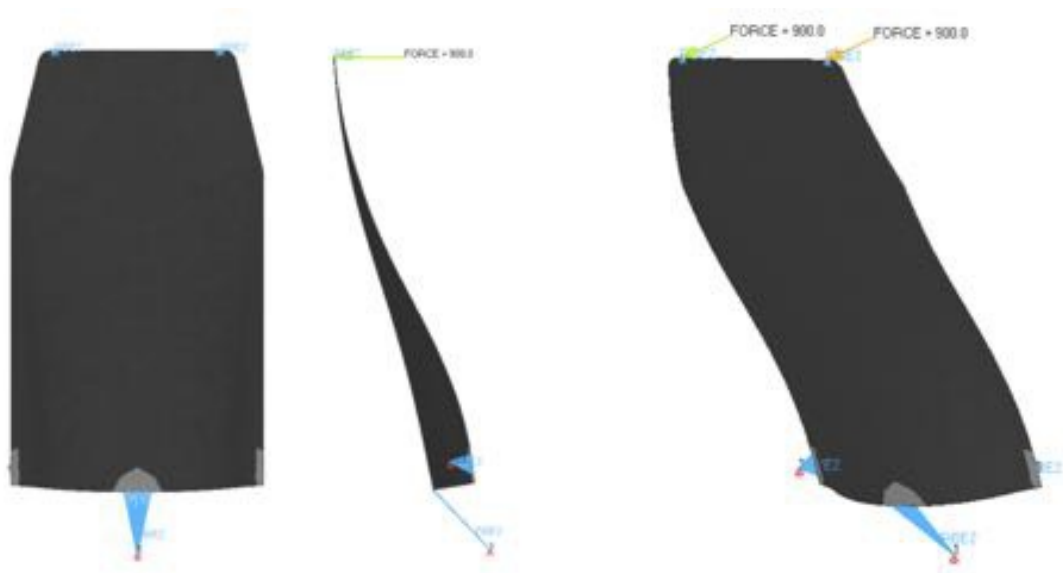


Abbildung 50: Rückenlehne - CFK Modell

Es wurde nur die vordere Fläche des aktuellen Modells übernommen und diskretisiert. Die Rückenlehne wurde, wie die bestehende, seitlich drehbar gelagert und die Rückstellung aber mittig positioniert. Die Rückstellung wurde so gewählt, weil die Struktur dann symmetrisch wird und weil es eventuell eine Veränderung mit hohem Potential sein könnte. Die eingreifenden Kräfte betragen 900N und sind in zwei Lastfälle unterteilt. Im ersten Lastfall wird die Rückenlehne oben auf der linken Ecke belastet und im zweiten Fall auf der rechten Ecke.

6.2 Optimierungsparemeter, Lagen- und Materialeigenschaften

Für die CFK-Optimierung wurde wie im Kapitel 3.4 beschrieben vorgegangen. Es wurden die Bereiche, auf welche die Rigid-Elemente der Lagerung und Rückstellung angreifen, als NonDesign-Spaces definiert (graue Bereiche in der Abbildung 50). Den Rest der Fläche des Modells ist der Design-Space (schwarz).

Die Materialeigenschaften für die CFK-Lagen wurden laut Tabelle 2 definiert. Diese Eigenschaften gehören zu den typischen Werten eines kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes mit HT Kohlenstofffasern (High Tensity / hochfest) und eine Epoxidharz Matrix mit einem Faservolumenanteil von 60%. Wobei die Eigenschaften in einem $||$ - $\perp$ -Koordinatensystem gegeben sind: $||$ für die Richtung parallel zu den Fasern und $\perp$ für die Richtung senkrecht zu den Fasern.

Für den Design-Space wurden vier CFK-Lagen mit den Faserrichtungen 0° , 45° , -45° und 90° definiert und eine fünfte Lage aus Rohacell - ein Hartschaumstoff mit den Materialeigenschaften aus Tabelle 3. Diese Schaumstofflage wird als Sandwich-Element betrachtet. Sandwich-Konstruktionen geben der Konstruktion höhere Biegesteifigkeit und Festigkeit ohne, dass es zu einer nennenswerten Gewichtserhöhung kommt. Die Schaumstofflage wird wie die CFK-Lagen auch form- und dickenoptimiert.

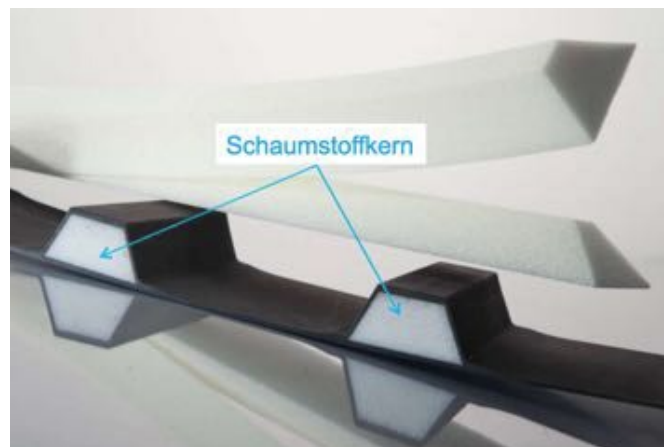


Abbildung 51: Beispiel für eine Sandwichkonstruktion mit einem Schaumstoffkern ⁶

In den NonDesign-Spaces wurden Aluminium Inserts vorgesehen. In den NonDesign-Spaces sind also vier CFK-Lagen mit den Faserrichtungen 0° , 45° , -45° und 90° definiert und eine fünfte Lage aus einer Aluminiumlegierung mit den

⁶ Quelle: <http://www.rohacell.com/sites/lists/PP-HP/Documents/ROHACELL-Newsletter-2010-EN.pdf>, Zugriff am 28.7.16

Materialeigenschaften aus Tabelle 4. Die Alu-Inserts dienen dazu die Kräfte der Lagerung und Rückstellung in der CFK-Konstruktion einzuleiten. Alle Lagen der NonDesign-Spaces bleiben während der Berechnung konstant und werden nicht optimiert.

$E_{ }$	140 000 N/mm ²
$E_{\perp}$	12 000 N/mm ²
$G_{ \perp}$	5 800 N/mm ²
$G_{\perp\perp}$	5 400 N/mm ²
$\nu_{ \perp}$	0,26
ρ	1,5 g/cm ³
$R_{ }^{+}$	2 000 N/mm ²
$R_{ }^{-}$	1 500 N/mm ²
$R_{\perp}^{+}$	70 N/mm ²
$R_{\perp}^{-}$	230 N/mm ²
$R_{ \perp}$	90 N/mm ²

**Tabelle 2: CFK -
Materialeigenschaften**

E	36 N/mm ²
ν	0,385
ρ	0,32 g/cm ³
R^{+}	1 N/mm ²
R^{-}	0,4 N/mm ²
R_T	0,4 N/mm ²

**Tabelle 3: Rohacell -
Schaumstoff
Materialeigenschaften**

E	79300 N/mm ²
ν	0,3
ρ	2,57 g/cm ³
R_e	485 N/mm ²
R_m	515 N/mm ⁿ

**Tabelle 4: Al-Li 2090 -
Aluminiumlegierung
Materialeigenschaften**

Als Ziel der Composite-Optimierung wurde die Minimierung der Masse gewählt und als Randbedingung wurde eine maximale Verschiebung von 50 mm an den oberen Ecken der Rückenlehne festgelegt. Es werden die CFK-Lagen und Schaumstofflagen optimiert. Als Ergebnis erhält man die leichteste mögliche Konstruktion, die sich unter den beiden Lastfällen nicht mehr als 50mm verschiebt. Nach den drei Phasen der Composite-Optimierung kam folgendes Ergebnis zustande.

6.3 Ergebnisse der Composite-Optimierung

6.3.1 Ergebnis CFK-Rückenlehne mit Schaumstofflagen

In der Abbildung 52 ist die Elementdicke nach Farben dargestellt. Die roten Bereiche haben eine maximale Wanddicke von 36mm und in den blauen Bereichen eine minimale von 4,4mm. Die roten Bereiche kann man auch als die Lastpfade der Struktur verstehen und diese werden deswegen mit mehreren Lagen versehen. Die höhere Wanddicke wird durch aufeinander Stapeln von den verschiedenen CFK-Lagen und ein Schaumstoffkern erreicht.

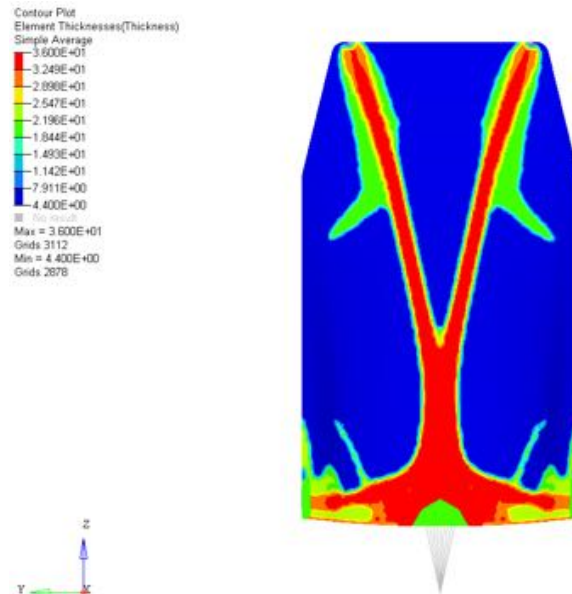


Abbildung 52: Rückenlehne - Composite-Optimierung: Element-Dicke

Die Schaumstofflagen werden also formoptimiert, so dass sie sich nur an den zu verstärkenden Stellen befinden (Y Form). In Abbildung 53 rechts sind beispielsweise einige CFK-Lagen im Inneren der Konstruktion dargestellt. Man erkennt, dass auch die CFK-Lagen formoptimiert wurden. Verschiedene Faserrichtungen werden in der Abbildung durch unterschiedliche Farben dargestellt und man merkt, dass Lagen mit unterschiedlicher Faserrichtung in anderen Bereichen sind und andere Formen besitzen.

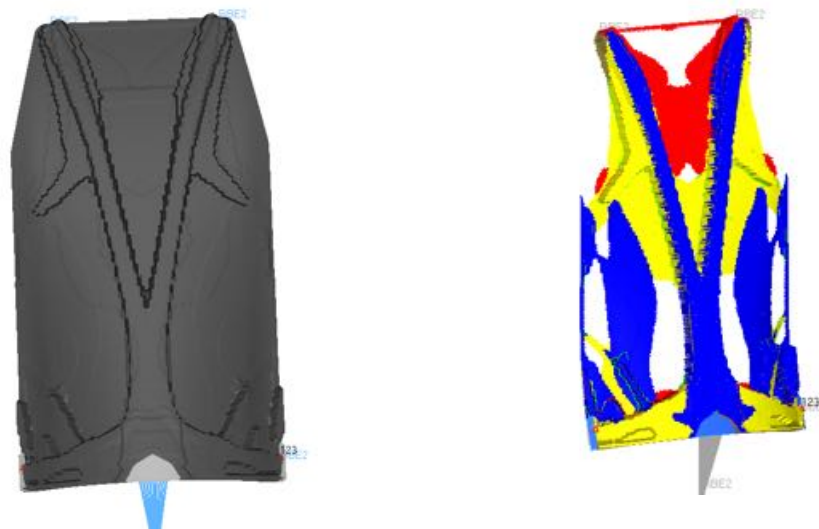


Abbildung 53: Rückenlehne - Composite-Optimierung: Struktur (links) und Innenlagen (rechts)

Es entsteht also nach der Berechnung eine gewichtsoptimierte Rückenlehne, die aus form- und dickenoptimierten Lagen besteht. Die sich dadurch ergebende Rückenlehne sieht aber komplett anders als die bestehende aus. Grund dafür ist, dass die Rückstellung mittig positioniert ist. Wie schon erwähnt wäre diese mittige Positionierung der Rückstellung möglich und könnte eventuell eine Optimierung schaffen.

Allerdings lassen sich in der ergebenden Rückenlehne einen Tisch, ein Magazinfach oder ein möglicher Screen schwer anbringen, weil die tragende Struktur mit Y-Form genau durch die Mitte läuft.

6.3.2 Ergebnis CFK-Rückenlehne ohne Schaumstofflagen

In einer zweiten Berechnung der Rückenlehne aus CFK wurde der Design-Space mit denselben CFK-Lagen definiert, aber ohne die Schaumstofflage. Das Ziel der Optimierung wurde gleich gewählt (Gewichtsreduktion) aber die Randbedingung wurde mit einer maximalen Verschiebung von 70 mm anstatt 50 mm festgelegt. Die Elementdicke und Form der sich ergebenden Rückenlehne sind in Abbildung 54 zu sehen.

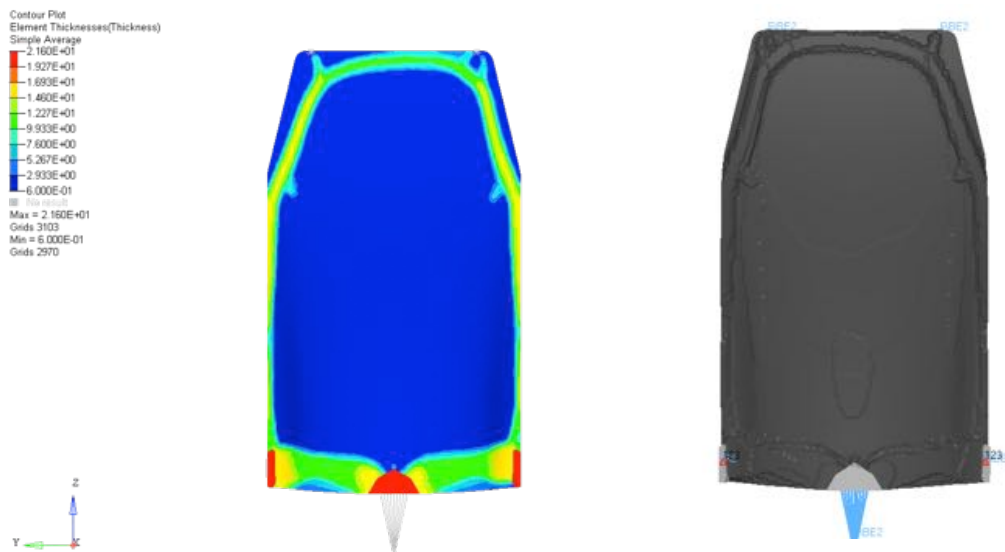


Abbildung 54: Rückenlehne - Composite-Optimierung ohne Schaumstofflage

Zu erwarten wäre dieselbe Struktur mit Y-Form gewesen. Da in der zweiten Konstruktion kein Schaumstoff zur Erhöhung der Biegesteifigkeit zu Verfügung war, wurde aber anstatt der Mitte der Rückenlehne, der Außenrahmen verstärkt. Die maximale Wanddicke im Rahmenbereich beträgt 16 mm.

6.3.3 Vergleich beider Ergebnisse

Wie gesagt, verläuft in der ersten Berechnung die tragende Struktur durch die Mitte der Rückenlehne, was problematisch für die Anbringung der hinteren Funktionen sein könnte. Im zweiten Ergebnis ist das nicht der Fall, denn die tragende Struktur verläuft im äußeren Rahmen und lässt mehr als genug Platz für die Anbringung von Tisch, Magazinfach und Screen.

Weiters verläuft der rote Bereich im ersten Fall von der mittigen Rückstellung horizontal zu der seitlichen Lagerung. Diese verstärkte Wanddicke befindet sich genau im Kniebereich und ist somit suboptimal. Allerdings beträgt die Wandstärke in diesem Bereich 36mm und in der bestehenden Rückenlehne 48mm. Somit würde dies eine Verbesserung des Living-Spaces im Kniebereich von 12mm bedeuten.

Im Zweiten Ergebnis ist die maximale Wanddicke diejenige wo sich die Alu-Inserts befinden und beträgt 21,6mm. Wie gesagt beträgt die Tiefe der aktuellen Rückenlehne im Bereich der Lagerung 48mm. In der Berechnung wurde aber angenommen, dass diese Lagerung eventuell mit einem anderen Material oder Bauweise kleiner dimensioniert werden könnte und auf 20 mm reduziert werden könnte. Die maximale Wanddicke hängt also nur von der Dimensionierung der Lagerung ab. Je kleiner man die Lagerung dimensionieren kann, desto besser ist die Living-Space-Optimierung.

Als letzter Punkt soll das Gewicht der beiden Ergebnisse verglichen werden. Es ist aber wichtig zu erwähnen, dass die Modelle unterschiedliche Randbedingungen hatten. Das erste Modell wurde mit einer maximalen Verschiebung von 50mm begrenzt und das zweite mit 70mm. Hätten beide Modelle die gleiche Grenze als Randbedingung, so würde man erwarten, dass das Modell mit Schaumstofflagen leichter ist. Allerdings bewirkt eine strengere Begrenzung der Zielfunktion eine schlechtere Optimierung.

Die sich ergebende CFK-Struktur des Modells mit Schaumstoffkern hat ein Gewicht von 1,528 kg und die Struktur des Modells ohne Schaumstoffkern ein Gewicht von 1,202kg. Die bestehende Rückenlehne hat ein Gewicht von ca. 1,2 kg.

Obwohl das erste Modell einen Schaumstoffkern zur Verfügung hatte und so biegesteifer sein konnte, wurde wegen der strengeren Begrenzung der Zielfunktion (50mm anstatt 70mm) eine geringere Gewichtsreduktion erzielt. Somit wurde an dieser Stelle bewiesen, dass die Randbedingungen einer Optimierung von höchster Bedeutung sind. Zur Festlegung der Randbedingung wird eine detaillierte Analyse empfohlen um die Optimierungsergebnisse nicht zu verfälschen.

7 Konzeptfindung

Nach den ersten Berechnungen und Analysen der Ergebnisse begann die nächste Phase: die Konzeptfindung. Wie man mit den ersten Ergebnissen gesehen hat, ist der bestehende Sitz sehr weit gewichtsoptimiert. Deswegen wurde zusammen mit der Designabteilung von EK Design beschlossen, ein komplett neues Konzept für einen Flugzeugsitz zu erfinden anstatt den bestehenden Sitz zu optimieren.

7.1 Innovative Konzepte

Um auf neue Ideen zu kommen und ein gutes neues Konzept entwerfen zu können, wurden in erster Linie innovative Flugzeugsitze und deren Konzepte recherchiert. Viele dieser Konzepte sind nur Ideen oder Prototypen und werden in der naheliegenden Zukunft noch nicht zum Einsatz kommen. In der Konzeptfindungsphase helfen aber solche innovativen Konzepte sich von den typischen Denkweisen und Grenzen zu lösen und in andere Richtungen zu denken. Im Folgenden werden einige Konzepte dargestellt und deren Besonderheit kurz erläutert:

- **Sitzanordnung:** Diese zwei Sitzanordnungskonzepte erlauben es die Sitzreihen kompakter anzuordnen und mehrere Sitzreihen in einem Flugzeug anzubringen.
 - Im linken Bild sind die Sitze in unterschiedlichen Richtungen ausgerichtet. In den Sitz rein- und rauszukommen könnte aber kompliziert sein.
 - Im Rechten Bild sind die Sitze zu einander versetzt. Es wird sogar eine seitliche Ablage für den Kopf geschaffen.



Abbildung 55: Sitzanordnungskonzepte ^{7, 8}

⁷ Quelle: <http://www.flugrevue.de/zivilluftfahrt/flugzeuge/mehr-sitze-an-bord-durch-neue-anordnung/636842>, Zugriff am 28.7.16

⁸ Quelle: <http://www.tagesanzeiger.ch/leben/reisen/sitzplatz-mit-gewissen-vorzuegen/story/24421781>, Zugriff am 28.7.16

- **Kompakt**

In der linken Abbildung sind die Sitze entworfen worden, sodass man beim Sitzen weniger Living-Space benötigt und somit die Sitzreihen näher aneinander positioniert werden können. In der rechten Abbildung werden die Sitzreihen ebenfalls näher positioniert, allerdings wird es in diesem Konzept durch einen hochklappbaren Sitzboden ermöglicht.



Abbildung 56: Kompakte Sitzstruktur ⁹



Abbildung 57: Hochklappbarer Sitzboden ¹⁰

- **Kniefreiheit:**

- Recaro schafft mehr Kniefreiheit indem sie die Lagerung der Rückenlehne sehr klein dimensionieren.
- ZIM-Flugsitz hingegen entwarf zusammen mit EK Design den dargestellten Sitz, in dem der Tischarm mittig gelagert wird. So befinden sich die Tischarme beim Ausklappen nicht in dem Kniebereich sondern in der Mitte der beiden Knie.
- Monarch Airlines entwickelte einen Sitz der nicht verstellbar ist. Sie führten eine Befragung durch und kamen zum Ergebnis, dass die meisten Passagiere die Rückstellung von der Lehne des vorderen Sitzes belästigend finden. In der Abbildung 60 kann man erkennen, dass der Living-Space wegen der fehlenden Rückenlehnenlagerung optimiert wurde. Es gibt mehr Raum im Kniebereich.

⁹ Quelle: <http://inhabitat.com/new-ultra-compact-airplane-seats-pack-in-the-passengers/>, Zugriff am 28.7.16

¹⁰ Quelle: <http://www.sueddeutsche.de/reise/fliegen-in-der-zukunft-ein-stehplatz-am-fenster-bitte-1.1036666-5>, Zugriff am 28.7.16



Abbildung 58: klein dimensionierte Rückenlehnenlagerung von Recaro ¹¹



Abbildung 59: ZIM Flugsitz - ECO0 Unique ¹²



Abbildung 60: Non-reclining Rückenlehne - Monarch Airlines ¹³



- **Leichtbau:**

- Expliseat geht einen Schritt weiter in den Leichtbau, indem sie einen Ultra Light Seat entwerfen. Der Sitz besteht aus Titanium-Bauteilen und einer CFK-Sitzfußstruktur und soll nur 4 kg pro Passagier schwer sein.
- Zodiac Aerospace und Hexcel entwickelten einen Sitz, der nur aus CFK besteht und der weniger als 4kg pro Passagier wiegen soll.
- Beide Sitze gehören zu der Ultra Light Weight Klasse aber wahrscheinlich auch zu den teureren Varianten.

¹¹ Quelle: <http://de.recaro-as.com/produkte/economy-class/sl3510.html>, Zugriff am 28.7.16

¹² Quelle: <http://www.zim-flugsitz.de/produkte/economy-class/ec00-zimunique/>, Zugriff am 28.7.16

¹³ Quelle: <http://www.dailymail.co.uk/travel/article-2643647/Monarch-Airline-bans-reclining-seats-planes-90-passengers-vote-ditch-them.html>, Zugriff am 28.7.16



Abbildung 61: Ultra Light Seats - Expliseat ¹⁴ (links) und Zodiac Aerospace Hexcel ¹⁵ (rechts)

- **Verstellbare Sitzbreite**

- The Morph ist ein Sitzkonzept von Seymourpowell dessen Breite verstellbar ist. Die Idee ist die Flugtickets nach Breite des Sitzes zu verkaufen. Je breiter der Sitz, desto teurer das Flugticket.



Abbildung 62: The Morph - Innenstruktur ¹⁶

¹⁴ Quelle: <http://www.aerotelegraph.com/neuer-flugzeugsitz-leichter-boeing-737-airbus-a320>, Zugriff am 28.7.16

¹⁵ Quelle: <http://www.zodiac aerospace.com/en/news/group-news/zodiac-aerospace-and-hexcel-present-l3>, Zugriff am 28.7.16

¹⁶ Quelle: http://www.huffingtonpost.ca/2013/11/20/morph-airline-seats-video_n_4305127.html, Zugriff am 28.7.16

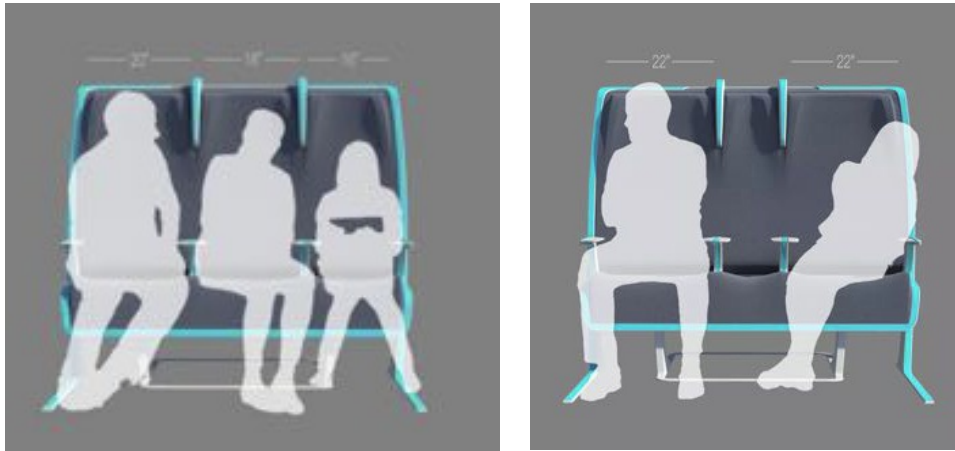


Abbildung 63: The Morph - mögliche Breitenkonfigurationen ¹⁶

- **Armlehnenkonzepte:**

- In der Abbildung 64 ist ein sehr innovatives Verstellungssystem der Armlehne dargestellt. Mit so einer Armlehne müsste der Sitzteiler nicht bis zur Höhe der Armlehne verlaufen.
- Eine nicht hochklappbare Armlehne würde eine vordere Abstützung ermöglichen und zu einer kleineren Dimensionierung des Sitzteilers im Bereich der Armlehnenlagerung führen. (zweite Abbildung)
- In der letzten Abbildung sind verschiedene Armlehnenkonzepte für Armlehnen dargestellt, die von Passagieren geteilt werden müssen.



Abbildung 64: Armlehnenkonzept - Panasonic Quantum Seat ¹⁷

¹⁷ Quelle: <https://www.behance.net/gallery/13965607/Panasonic-Quantum-Seat>, Zugriff am 28.7.16



Abbildung 65: Nicht hochklappbare Armlehne¹⁸



Abbildung 66: Geteilte Armlehnenkonzepte¹⁹

- **Ergonomie**

- Der innovative Sitz von Yanko Design wurde auf bestmögliche Ergonomie ausgelegt. Die Luftpolsterung der Rückenlehne und Sitzboden lässt sich automatisch verstellen und am Körper adaptieren.



Abbildung 67: Ergonomischer Sitz - Yanko Design²⁰

¹⁸ Quelle: <http://www.journal-aviation.com/actualites/26152-expliseat-le-titanium-seat-recompense-au-salon-jec-europe>, Zugriff am 28.7.16

¹⁹ Quelle: <http://www.core77.com/posts/26878/Paperclip-Design-LTDs-Airplane-Interior-Design-Innovations-Part-1-Dual-Level-Armrests-n-Economy-to-Business-Seat-Conversions>, Zugriff am 28.7.16

²⁰ Quelle: <http://www.yankodesign.com/2010/08/03/theres-something-in-the-seat/>, Zugriff am 28.7.16

7.2 Erste Konzeptideen

In der Konzeptfindungsphase setzte man sich das Ziel, den Living-Space so weit wie möglich zu verbessern und im selben Gewichtsspektrum wie der bestehende Sitz zu bleiben. Natürlich wäre eine Verbesserung des Gesamtgewichts auch optimal, aber in erster Linie fokussiert man sich auf den Living-Space.

Durch Analysieren der 3D-Daten des bestehenden Sitzes merkt man, dass die Sitzteiler und der Rückenlehnenrahmen genau im Kniebereich sind. Eine Verbesserung, die bereits implementiert wurde, ist die Rückenlehne mit einer größeren Krümmung zu konstruieren. So verschieben sich die Lagerungspunkte um einige Zentimeter nach vorne und es können auch die Sitzteiler weiter nach vorne verschoben werden (Abbildung 69).

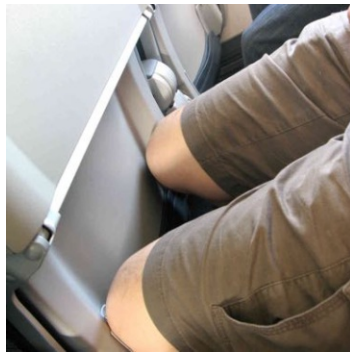


Abbildung 68: Sitzteiler und Rückenlehne im Kniebereich^{21 22}

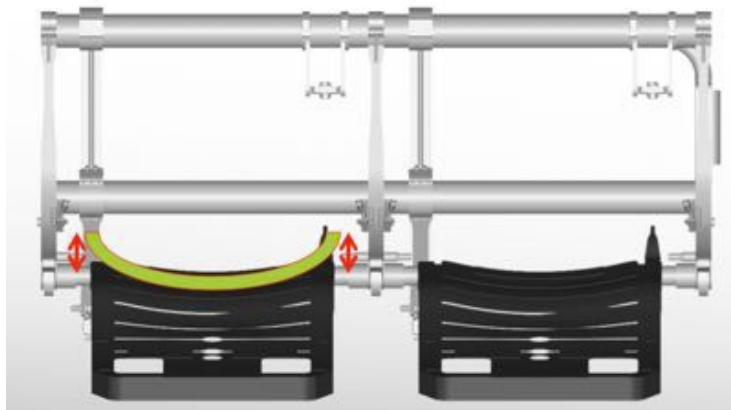


Abbildung 69: Kniefreiheitsverbesserung durch größere Krümmung der Rückenlehne

²¹ Quelle: <http://news.fluege.de/allgemein/bequem-fliegen-auf-den-sitzabstand-kommts-an/21247.html>, Zugriff am 28.7.16

²² Quelle: http://www.lalasreisen.de/html/sitzplatzabstand_germanwings.html, Zugriff am 28.7.16

Eine Optimierungsmöglichkeit wäre die Sitzteiler auf irgendeine Art noch weiter nach vorne zu verschieben oder die Struktur anders zu gestalten, sodass die Sitzteiler nicht mehr im Kniebereich sind. So kam man auf die Idee die Rückenlehne wie bei einem Bürosessel zu lagern.

Wie in der Abbildung 70 zu sehen ist, verläuft der Tragarm der Rückenlehne durch die Mitte. Der Drehpunkt der Rückenlehne für die Verstellung befindet unterhalb des Sitzes. Bei einem Bürosessel ist solche Lagerung optimal, denn es kann sogar der Sitzboden verstellbar gelagert werden. Allerdings würde so eine Lagerung in einem Flugzeugsitz suboptimal sein, wie schon im Kapitel 5.1.1.4 und Abbildung 32 erklärt wurde. Denn wie auch in der Abbildung 71 wieder zu sehen ist, dreht sich die Rückenlehne inklusive Tragarm um den Drehpunkt unterhalb des Sitzbodens. Und so dringt der Tragarm samt Rückenlehne noch weiter in den Kniebereich ein.



Abbildung 70: Bürosessel ²³



Abbildung 71: Drehpunkt der Rückenlehne bei einem Bürosessel ²⁴

²³ Quelle: <http://www.bueroausstattung-shop24.de/Buerostuhl-RH-Mereo-220-Silber-mit-hoher-Rueckenlehne.htm>, Zugriff am 28.7.16

²⁴ Quelle: <http://www.schaefer-shop-blog.de/blog/category/buero/>, Zugriff am 28.7.16

Wegen des Problems mit dem Drehpunkt unterhalb des Sitzes wurde dann versucht eine andere Lagerungsart der Rückenlehne zu entwerfen: eine mit dem Tragarm mittig positioniert und wo der Kniebereich ungestört bleibt. So entstand das Konzept eines mittigen Tragarms, der den Drehpunkt auf derselben Höhe wie der bestehende Sitzteiler hat. So als würde man die Sitzteiler einfach zur Mitte der Rückenlehne verschieben wie in der nächsten Abbildung gezeigt wird.

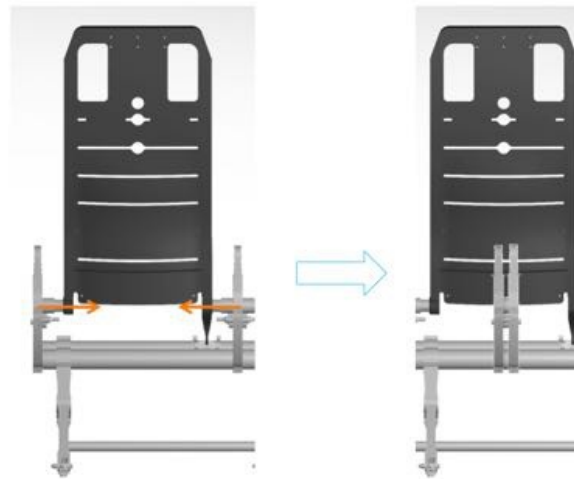


Abbildung 72: Sitzteiler zur Mitte verschoben

7.2.1 Rückenlehnentragarm

Um sich vorstellen zu können, wie so ein Rückenlehnentragarm aussehen würde und wie die Lastpfade im Tragarm sind, wurde ein einfaches Modell konstruiert und eine Lastpfaduntersuchung durchgeführt.

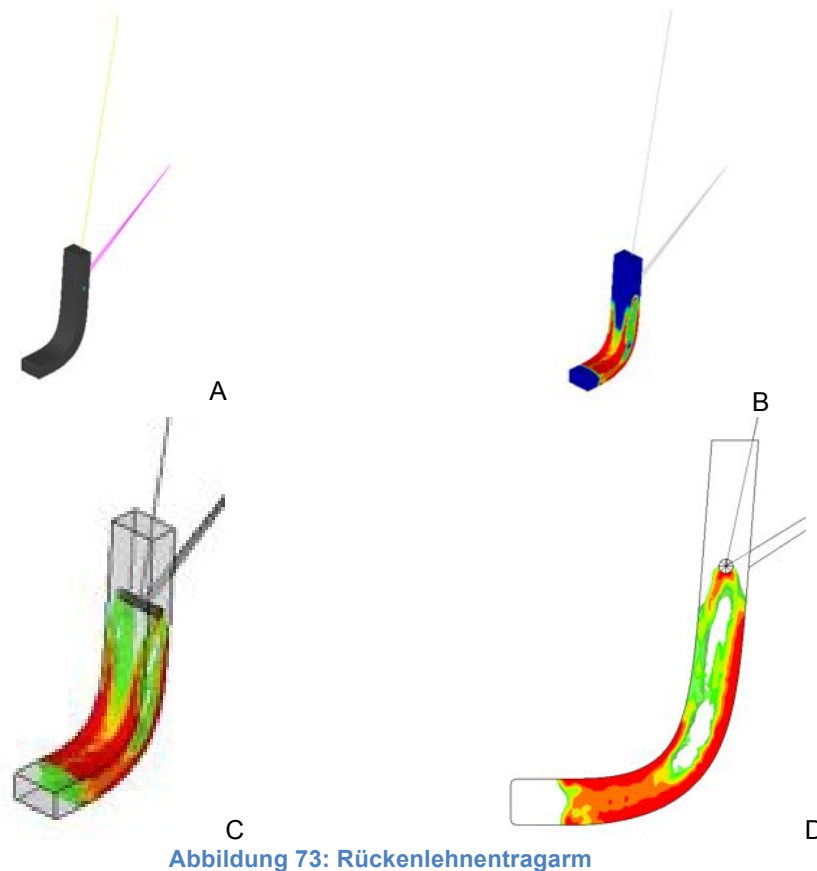


Abbildung 73: Rückenlehnentragarm

In der Abbildung A) oben symbolisiert das grüne Rigid-Element die Rückenlehne und das rosa Element den Tisch in ausgeklappter Position. Der Tragarm wurde vorne eingespannt und die Kräfte von der Rückenlehne und dem Tisch angebracht. Es entstanden die Lastpfade und Struktur, die auf C) und D) zu sehen sind.

Das Konzept eines mittigen Tragarms hat sich mit einem hohen Potential bewiesen und wurde weiter verfolgt. Allerdings gibt es andere Probleme:

- Eine seitliche Rückstellung der Rückenlehne würde den Tragarm tordieren.
- Das Sitztrapez wird im bestehenden Sitz von den Sitzteilern getragen. Also ist ein kompletter Ausfall der Sitzteiler nicht möglich oder es müsste eine andere Lösung gefunden werden.
- Die Armlehne wird ebenfalls auf dem Sitzteiler montiert.
- Der Gurt wird auch am Sitzteiler befestigt.

Da ein kompletter Ausfall der Sitzteiler nicht möglich wäre, müsste die Sitzstruktur wie in Abbildung 74 aussehen. Zwei Sitzteiler, auf denen das Sitztrapez, die

Armlehne und der Gurt angebracht werden und einen mittigen Tragarm für die Rückenlehne. Im Vergleich zum bestehenden Sitz würde dieses Konzept ein zusätzliches Bauteil besitzen (den Tragarm). Vielleicht könnten die Sitzteiler kleiner dimensioniert werden, weil sie die Rückenlehne nicht mehr tragen, aber trotzdem wurde dieses Konzept nicht weiter untersucht.

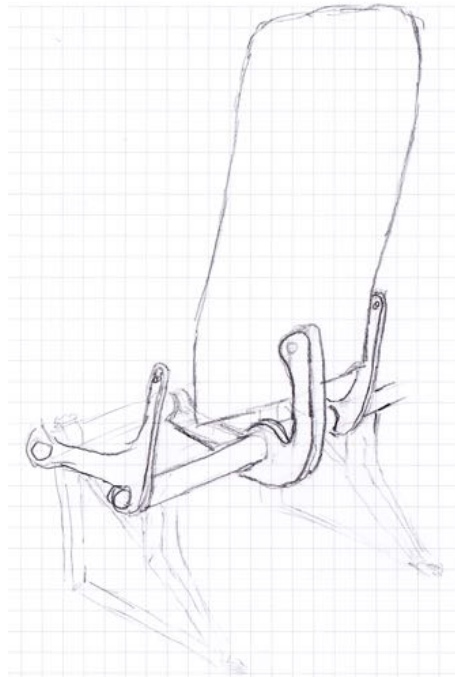


Abbildung 74: Sitzkonzept mit mittigen Tragarm und zwei Tragrohre

Man hat versucht ein Konzept zu finden, das keine Sitzteiler benötigt oder wo sie zumindest nicht im Kniebereich sind. In den Skizzen der Abbildung 75 kann man sehen, wie die Bauteile für ein mögliches Sitzkonzept mit nur einem elliptischen Tragrohr aussehen könnten:

- Bauteil (A) würde der mittige Tragarm für die Rückenlehne sein,
- Bauteil (B) wäre die Befestigung des Gaszylinders am Tragrohr für die Rückstellung der Rückenlehne. Baugruppe (C) ist A und B zusammengebaut.
- Bauteil (D) wäre die Sitzfußstruktur für ein elliptisches Tragrohr und
- Bauteil (E) wäre eine Art Sitzteiler, wo das Sitztrapez und die Gurtbefestigung angebracht werden.

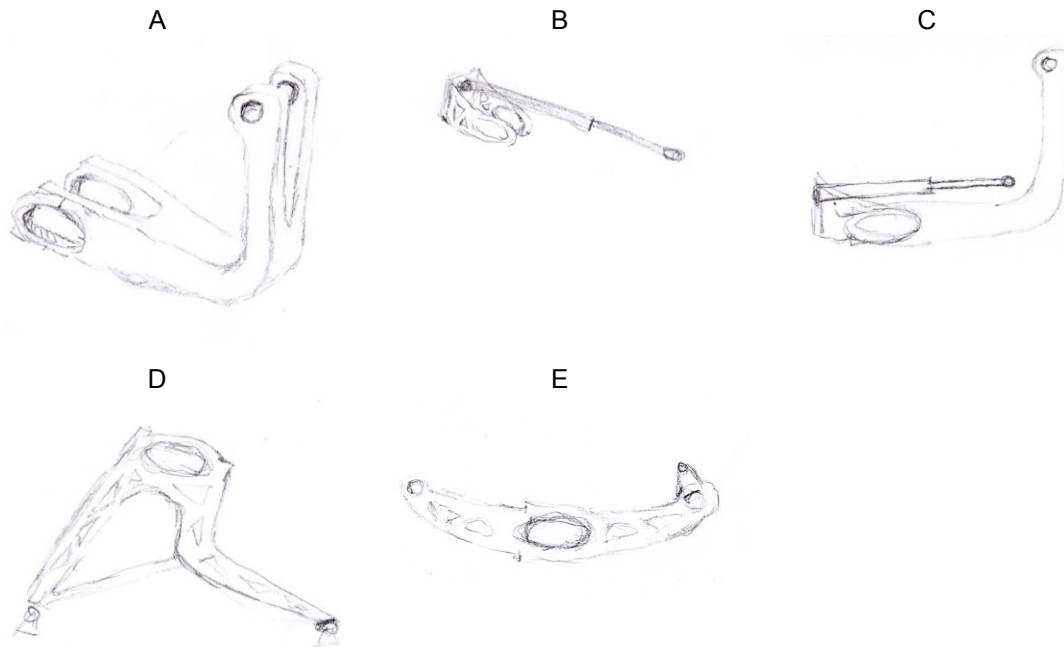


Abbildung 75: Mögliche Bauteile für Sitzkonzept

Da bei dieser Bauweise der Sitzteiler nicht nach oben zur Armlehne verläuft, würde der Living-Space im Kniebereich optimiert werden. Allerdings würde es keine Armlehne geben oder man müsste ein anderes Konzept finden, wo die Armlehne keinen Sitzteiler benötigt.

Für das Sitzkonzept mit nur einem elliptischen Tragrohr wurde der Tragarm ebenfalls berechnet. In dieser Analyse des Tragarms wurden die Befestigung an einem elliptischen Rohr und die Lagerung der Rückenlehne mitmodelliert und als NonDesign-Spaces definiert. Die Ergebnisse waren folgende:

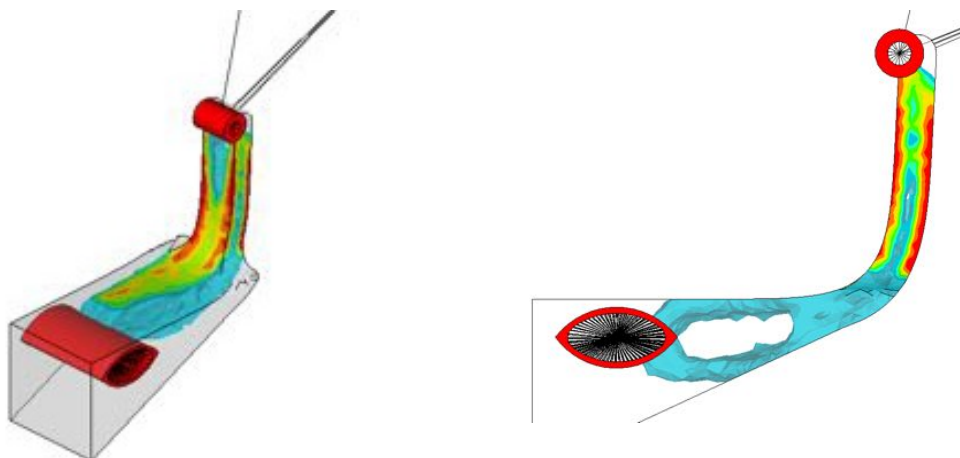


Abbildung 76: Rückenlehnentragarm mit Befestigung und Lagerung

7.2.2 Sitzteiler und Rückenlehnentragarm

Eine Sitzstruktur mit zwei Tragrohren ist stabiler und teilt die Kräfte in der Struktur besser auf. So wurde ein weiteres Konzept mit zwei Tragrohren gesucht.

Die neue Idee war die Sitzteiler mit dem mittigen Tragarm der Rückenlehne zu verbinden, sodass alle drei Bauteile zu einem Bauteil werden. Die Verbindung der Armlehne wurde in erster Linie außer Acht gelassen und erst in späteren Phasen betrachtet.

Es wurde ein Modell konstruiert, welches den zu Verfügung stehenden Bauraum darstellt und die Verbindungspunkte der Tragrohre und Rückenlehne besitzt. Es wurden der Designraum (blau) und die NonDesign-Spaces (lila) definiert und die Kräfte der Rückenlehne und dem Tisch angebracht. Nach einer einfachen Topologieoptimierung wurden die Lastpfade und die entstehende Struktur analysiert.

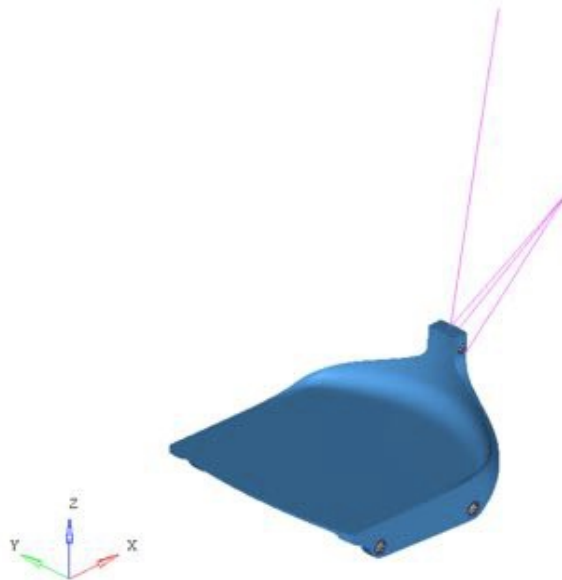


Abbildung 77: Modell - Sitzteiler mit Tragarm verbunden

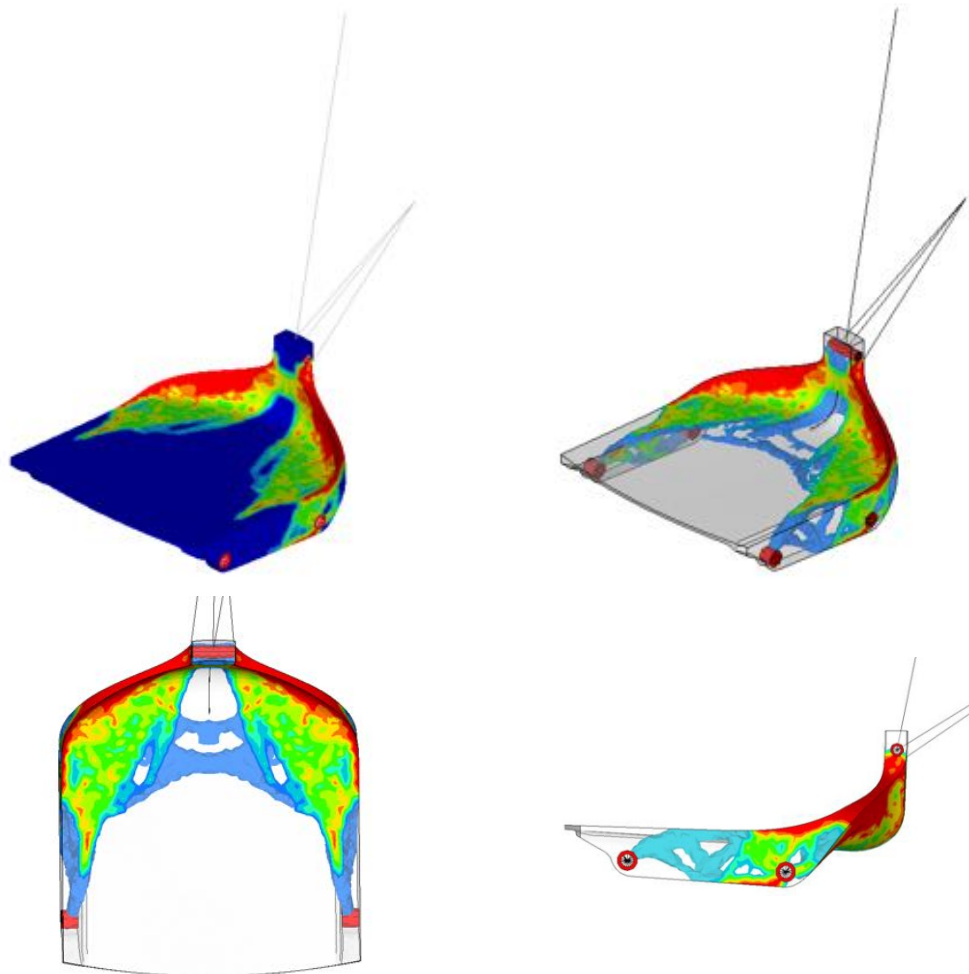


Abbildung 78: Ergebnis - Sitzteiler mit Tragarm verbunden

An so einem Bauteil, wie in den obigen Abbildungen dargestellt, könnten das Sitztrapez, der Gurt, die Rückenlehne und der Tisch angebracht werden. Die einzige fehlende Funktion wäre die Lagerung der Armlehne.

Die Grundidee dieses Konzeptes wurde weiter analysiert. Es wurde nachgedacht, wie das Bauteil leichter und besser gemacht werden könnte und wie die Armlehne gelagert werden könnte.

7.2.3 Sitzboden aus CFK

Um auf das Sitztrapez verzichten zu können und den Sitz leichter zu machen, entstand die Konzeptidee den Sitz aus CFK zu machen. Dieser würde die gesamte Sitzfläche decken und die Funktionen der Sitzteiler und des Tragarms der Rückenlehne übernehmen.

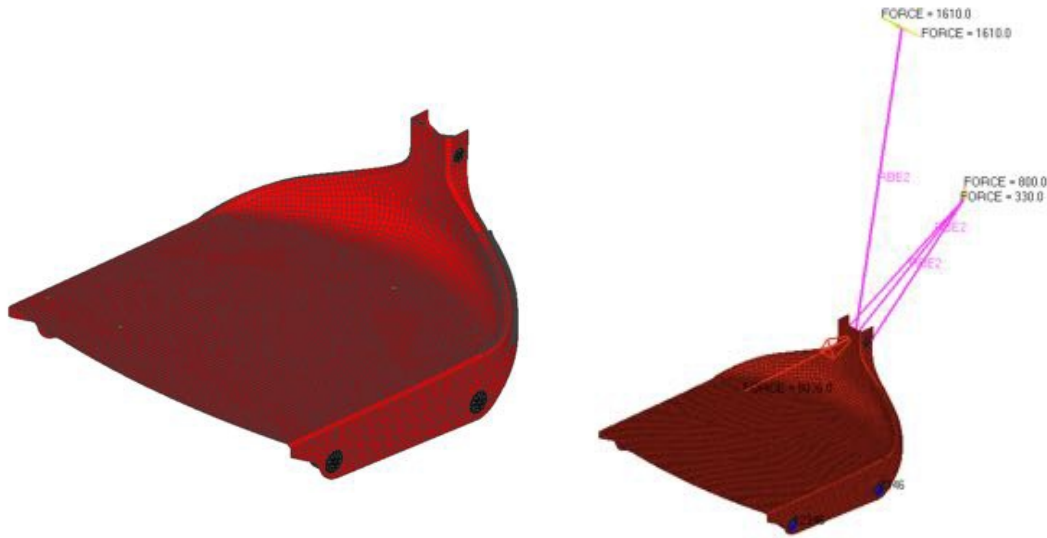


Abbildung 79: Erstes Modell - Sitzboden aus CFK

Es wurde ein Modell konstruiert, welches aus CFK-Lagen besteht, um eine Composite-Optimierung durchführen zu können. Die Verbindungspunkte der Tragrohre wurden festgelegt und die Kräfte von Rückenlehne und Tisch wurden angebracht. Die Kraft einer sitzenden Person wurde ebenfalls auf der Sitzfläche angebracht. Anschließend wurden die drei Phasen der Composite-Optimierung berechnet und die Ergebnisse analysiert.

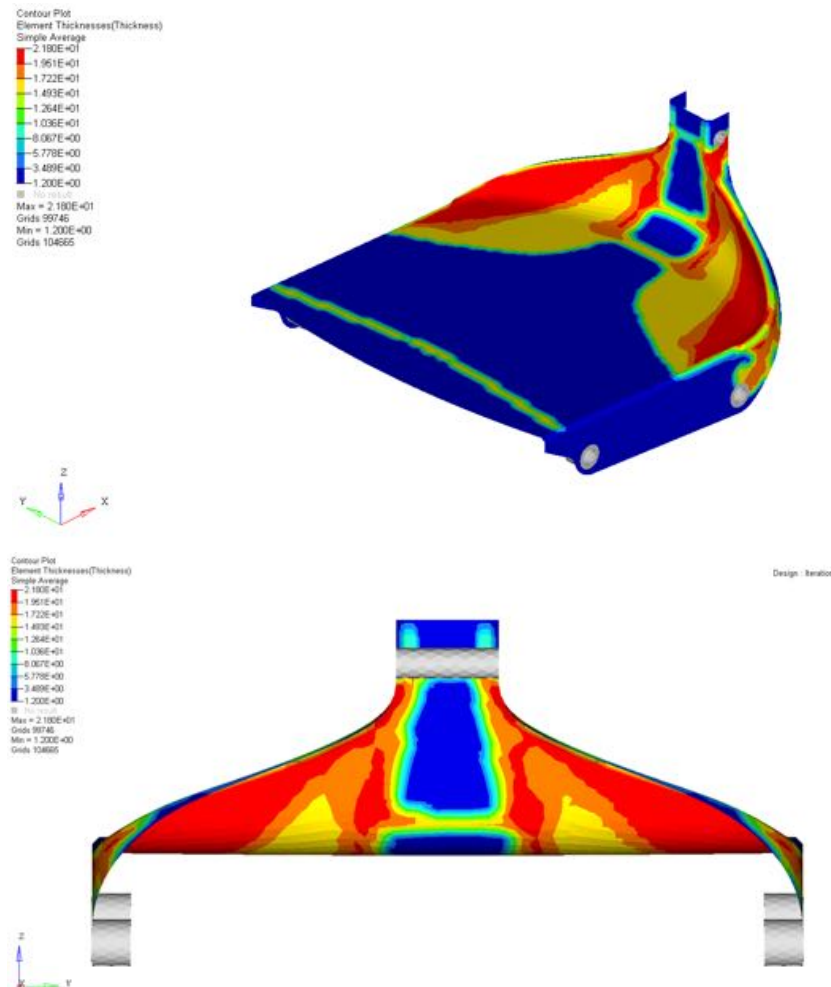


Abbildung 80: Ergebnis - Sitz aus CFK

In obiger Abbildung kann man die Dicke der verschiedenen Bereiche im Bauteil ablesen. Die verschiedenen Dicken entstehen durch das Aufstapeln der CFK-Lagen.

Die Sitzstruktur könnte wie in der nächsten Abbildung aussehen. Wie man aber erkennt, fehlt die Armlehne und die Gurtverbindung.

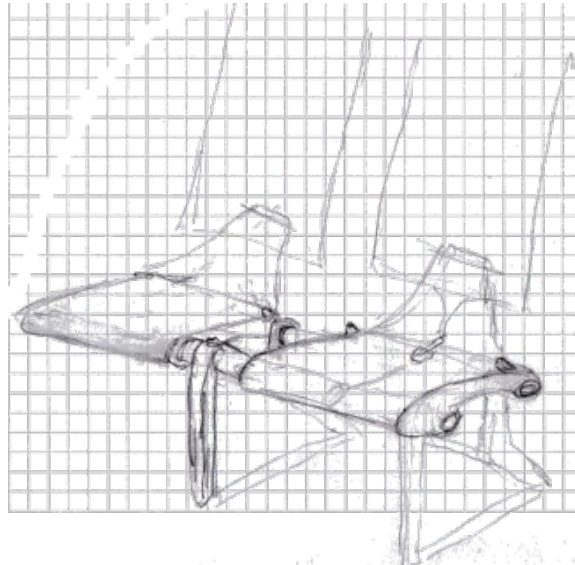


Abbildung 81: Skizze - Sitzstruktur mit Sitzboden aus CFK

Für die Lagerung der Armlehne wurden die Konzeptideen des Kapitels 7.1 und andere betrachtet. Eine mögliche Lagerung der Armlehne ist in der nächsten Abbildung dargestellt. Die Armlehne wird drehbar am Tragrohr gelagert und kann hochgeklappt werden. Da der Platz zwischen den Sitzen nicht so groß ist, könnte das runterklappen der Armlehne aber problematisch sein.

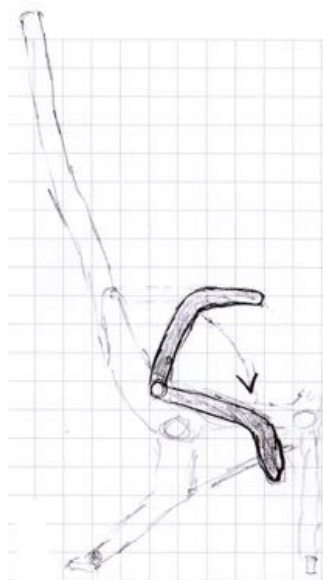


Abbildung 82: Konzept für Armlehne ohne Sitzteiler

Zwei weitere Varianten sind in der Abbildung 83 dargestellt. Auf der linken Seite verläuft der CFK-Sitz auf den Seiten bis zur Höhe der Armlehne und diese kann direkt mit der Sitzschale verbunden werden. Rechts wird ein Konzept dargestellt, wo

die Armlehne an einem sitzteiler-ähnlichen Bauteil gelagert ist. Dieses Tragelement trägt nur die Armlehne und ist mit dem hinteren Tragrohr verbunden.

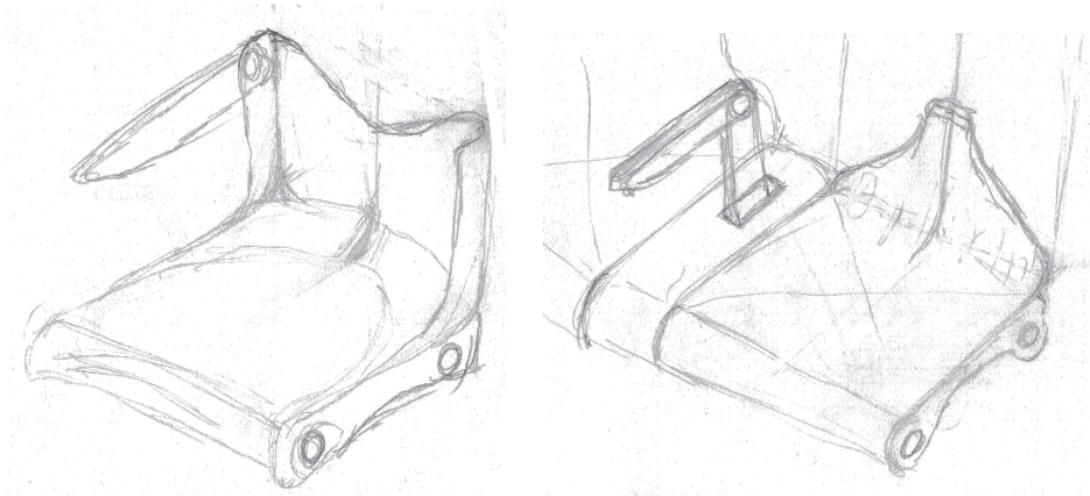


Abbildung 83: Konzepte für die Armlehne mit einem CFK-Sitz

7.3 Neues Sitzkonzept

Die vorher genannten Konzeptideen wurden analysiert und deren Vor- und Nachteile betrachtet. Nach zahlreicher Analyse, Skizzen und Konzeptentwürfen ergab sich das neue Sitzkonzept.

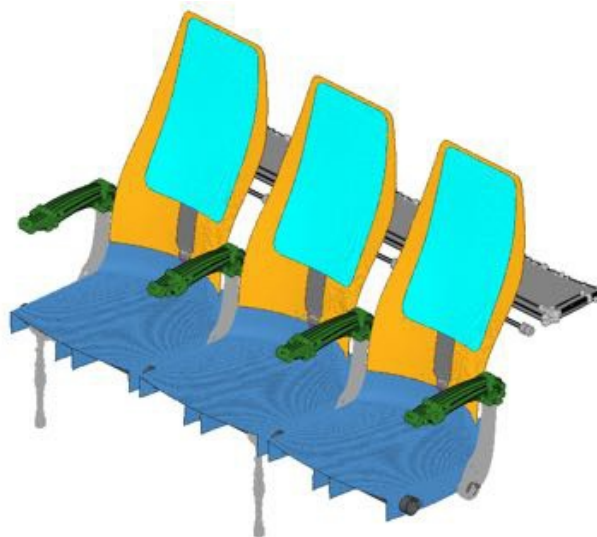


Abbildung 84: Neues Flugzeugsitzkonzept - isometrische Ansicht vorne

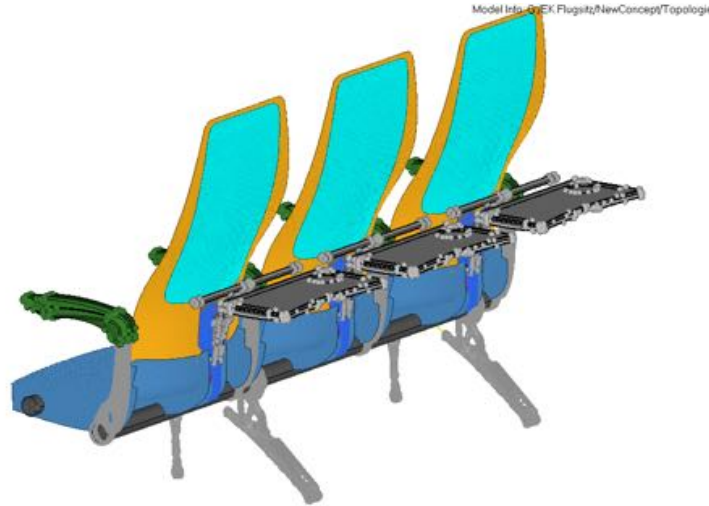


Abbildung 85: Neues Flugzeugsitzkonzept - isometrische Ansicht hinten

In den obigen Abbildungen ist das endgültige Fluggastsitzkonzept dargestellt. Es ist folgendermaßen aufgebaut:

- eine CFK-Rückenlehne, welche eine mittige Lagerung und Rückstellung besitzt.
- Der Tisch wird durch einen mittigen Tragarm an derselben Stelle wie die Rückenlehne gelagert.
- Die Sitzschale besteht auch aus CFK und verläuft auf der gesamten Breite bis zur Höhe der Rückenlehnenlagerung. Die Sitzschale übernimmt die Funktion des Sitztrapezes und verbindet das vordere und hintere Tragrohr. Sie leistet also der Gesamtstruktur Stabilität. Weiters trägt die Sitzschale die Rückenlehne und den Tisch
- Die Armlehne wird an einem eigenen Armlehnenträger gelagert. Die Gurtverbindung befindet sich ebenfalls auf dem Armlehnenträger.
- Das untere Traggestell besteht weiterhin aus zwei Tragrohren und zwei Sitzfüßen.

8 Optimierung des neuen Flugsitzkonzeptes

Nachdem das Konzept des Flugzeugsitzes und seiner Primärstruktur festgelegt wurden, begann die Optimierungsphase der einzelnen Komponenten. Für die Rückenlehne und Sitzschale wurde eine Composite-Optimierung durchgeführt, und für den Tischarm, Armlehnenräger und Sitzfuß wurde eine Topologieoptimierung gemacht.

8.1 Rückenlehne

Das Modell für die Rückenlehne wurde ähnlich wie in Kapitel 6 konstruiert. Die Fläche der Rückenlehne ist dieselbe wie in den vorherigen Modellen. Um eventuell ein Magazinfach, den Tisch und einen Bildschirm an der Hinterseite der Rückenlehne anbringen zu können, wurden NonDesign-Spaces berücksichtigt. Die NonDesign-Spaces sind mit CFK-Lagen belegt aber dürfen während der Optimierung nicht geändert werden. So bleibt die Dicke der Rückenlehne im NonDesign-Space konstant und erlaubt das spätere Einbauen von anderen Komponenten.

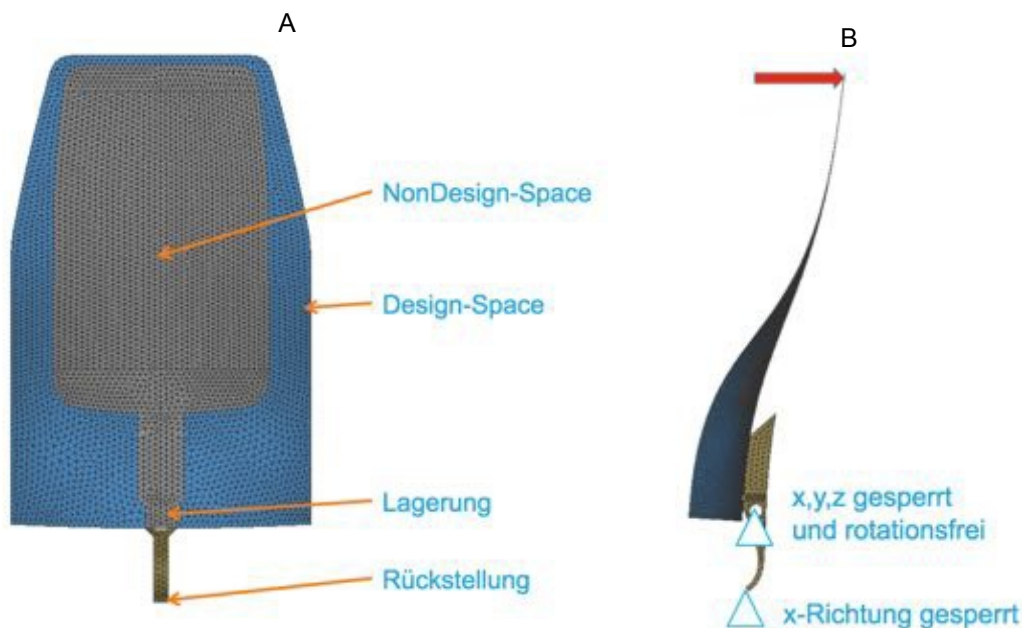


Abbildung 86: Rückenlehnenmodell - Composite-Optimierung: A) Bereiche und Komponente, B) Kräfte und Randbedingungen

Da der Tischarm auch mittig gelagert ist, verläuft der NonDesign-Space auch mittig bis zur Lagerung. Das Insert für die Rückstellung wurde auch mitmodelliert.

Die Materialeigenschaften der CFK-UD-Lagen wurden laut Tabelle 2 definiert, die für die Schaumstofflagen laut Tabelle 3 und die für das Al-Li Insert laut Tabelle 4 (Tabellen S. 48).

Die Lastfälle wurden vom Lastenheft von ZIM [12] übernommen und sind:

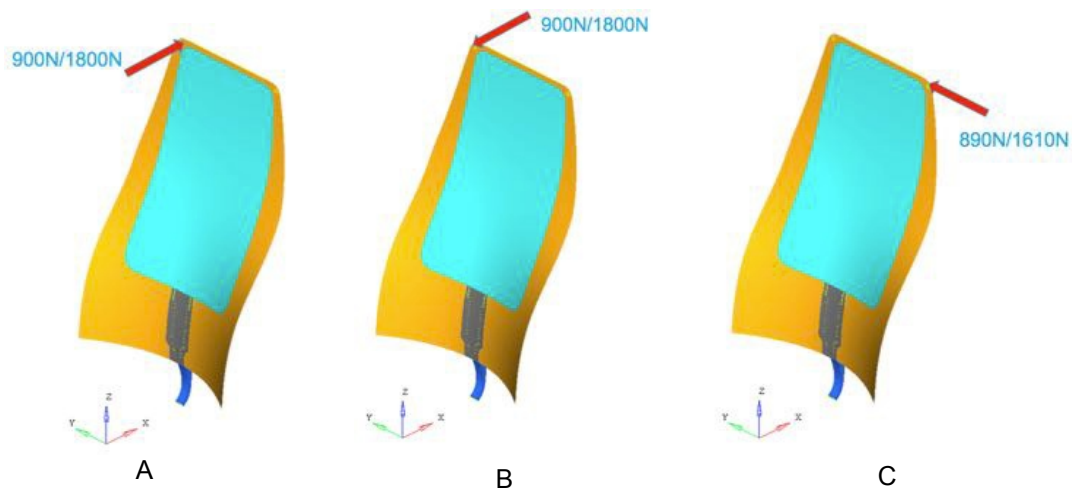


Abbildung 87: Lastfälle - Rückenlehne: A) nach hinten - Limit Load / Ultimate Load, B) nach vorne - Limit Load / Ultimate Load und C) zur Seite - Limit Load / Ultimate Load

Für das Ziel der Composite-Optimierung wurde Gewichtsreduktion gewählt und als Nebenbedingungen wurden maximale Verschiebungen in den einzelnen Lastfällen definiert: max. 50mm nach vorne und nach hinten und max. 25mm zur Seite

8.1.1 CFK-Lagen 0° , 45° , -45° , 90°

Für die erste Optimierung wurde der NonDesign-Space mit vier Lagen in den vier Hauptrichtungen ($0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$) belegt und der Design-Space ebenfalls mit vier CFK-Lagen in den vier Hauptrichtungen aber auch mit einer Schaumstofflage als Sandwichelement. Nach den drei Optimierungsphasen waren folgende Ergebnisse zu sehen:

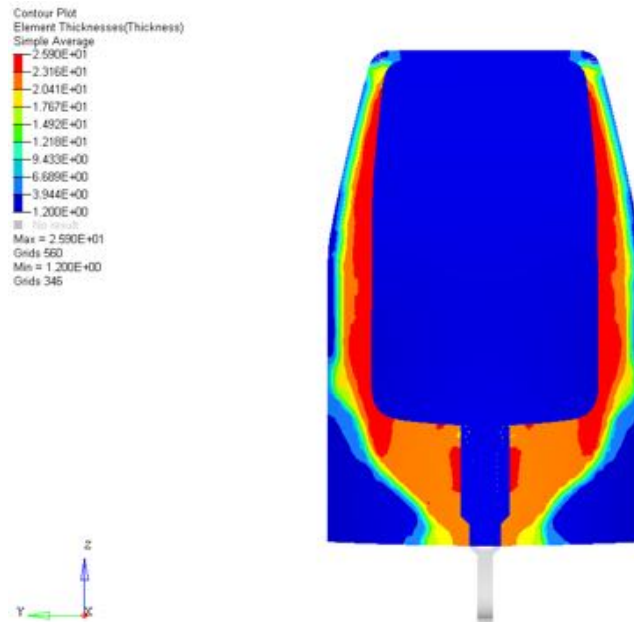


Abbildung 88: Ergebnis der Rückenlehne - Composite-Optimierung - 0°, 45°, -45°, 90°

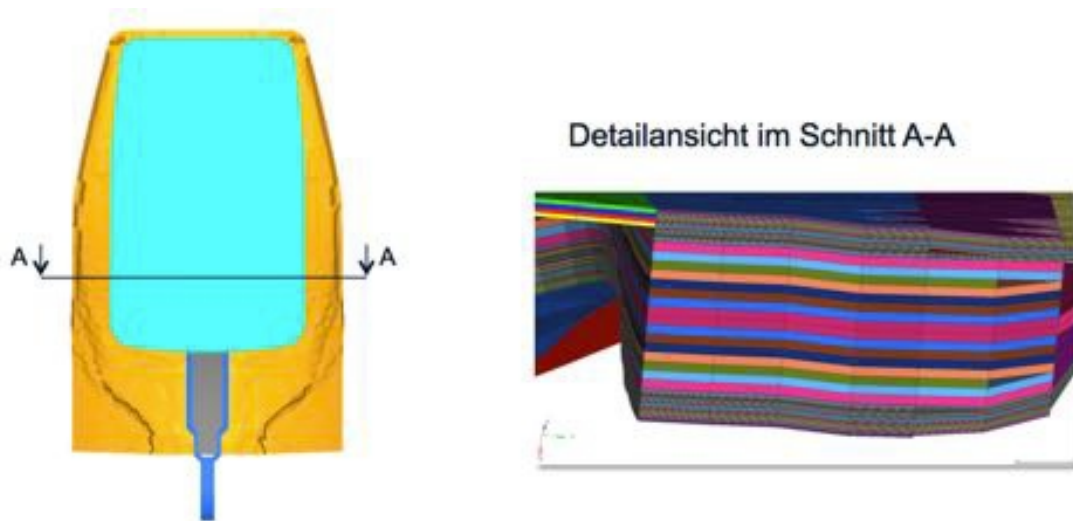


Abbildung 89: Schnitt- und Detailansicht der CFK-Lagen

In den obigen Abbildungen kann man die Dicke der verschiedenen Bereiche in der Rückenlehne ablesen. Der NonDesign-Space bleibt mit einer konstanten Dicke von 0,8mm und im Design-Space entsteht eine Art Rahmenstruktur um den NonDesign-Space. In der zweiten Abbildung kann man eine Detailansicht des Schnitts A-A sehen. In der Detailansicht sind CFK-Lagen unterschiedlicher Faserrichtung (oben und unten - dünnere Lagen) und Schaumstofflagen (in der Mitte - dickere Lagen) zu erkennen. Die sich ergebende Rückenlehne wiegt 2kg.

8.1.2 CFK-Lagen 0°, 30°, -30°, 45°, -45°, 60°, -60°, 90°

Um den Einfluss der Faserrichtungen und die Composite-Optimierung besser zu verstehen, wurden in einem zweiten Modell mehrere CFK-Lagen definiert. Anstatt nur vier Faserrichtungen zu definieren wurden CFK-Lagen in den Richtungen 0°, 30°, -30°, 45°, -45°, 60°, -60° und 90° definiert.

Mit mehreren Lagen zur Verfügung kann das Optimierungsprogramm bessere Ergebnisse liefern. Allerdings dauert die Berechnung deutlich länger und verlangt einen leistungsfähigen Rechner.

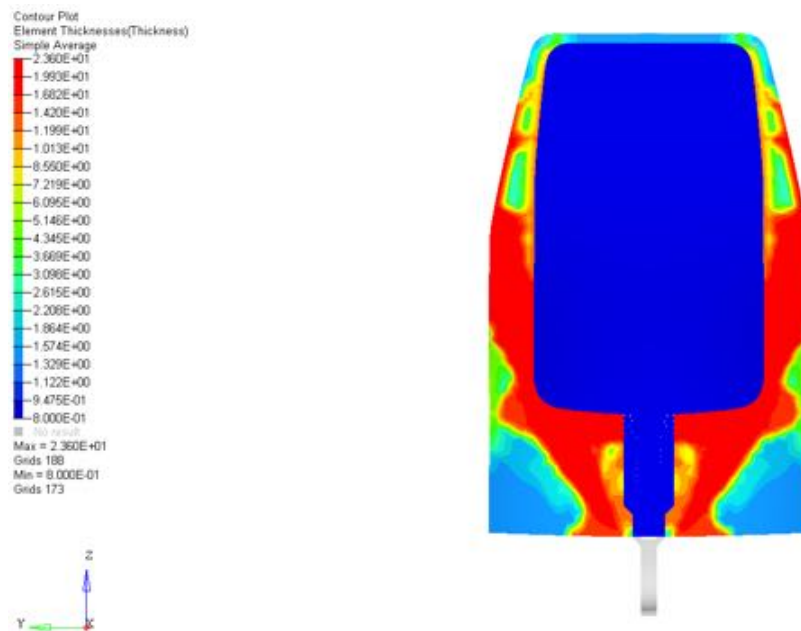


Abbildung 90: Ergebnis der Rückenlehne - Composite-Optimierung - 0°, 30°, -30°, 45°, -45°, 60°, -60°, 90°

Die optimierte Elementdicke ist in der Abbildung oben dargestellt. Die Rahmenstruktur bleibt ähnlich wie im vorherigen Modell. Allerdings sind die Dicke und die Lagenformen ein wenig unterschiedlich.

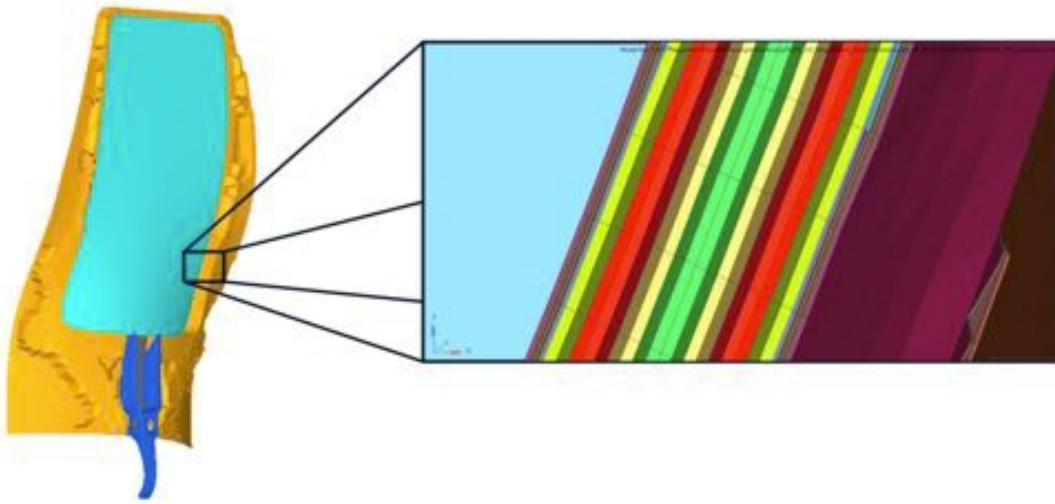


Abbildung 91: Detailansicht der CFK-Lagen

Die Rahmenstruktur besteht ebenfalls aus CFK-Lagen und Schaumstofflagen im Inneren (Abbildung 91). Das Gewicht der Rückenlehne im optimierten Zustand beträgt 1,5kg. Durch die mehreren CFK-Lagen und Faserrichtungen konnte eine bessere Gewichtsreduktion erzielt werden: 1,5kg im Vergleich zu 2kg.

Obwohl es länger und aufwendiger ist, zahlt sich die Definition und Belegung mehreren Lagen und Faserrichtung im Sinne der Gewichtsreduktion aus. Es wurde ebenfalls ein Modell mit CFK-Lagen in 0° , 15° , -15° , 30° , -30° , 45° , -45° , 60° , -60° , 75° , -75° und 90° durchgerechnet. Es wurde aber keine deutlich bessere Gewichtsreduktion erzielt und die Rechenzeit hat exponential zugenommen. Daher wurde das Arbeiten mit so vielen CFK-Lagen in späteren Optimierungen vermieden.

8.1.3 Endgültige Rückenlehne Mit Rahmenstruktur

Da man in den vorherigen Optimierungen der Rückenlehne immer eine Rahmenstruktur in den Ergebnissen erkennen konnte, wurde ein weiteres Modell für die Rückenlehne konstruiert, welches schon von Anfang an eine Rahmenstruktur besitzt. Der Rahmen wurde ebenfalls mit CFK-Lagen belegt aber es wurden keine Schaumstofflagen definiert. Die CFK-Lagen im Design-Space sind in den Richtungen 0° , 30° , -30° , 60° , -60° und 90° definiert und im NonDesign-Space in den Richtungen 0° , 45° , -45° und 90° .

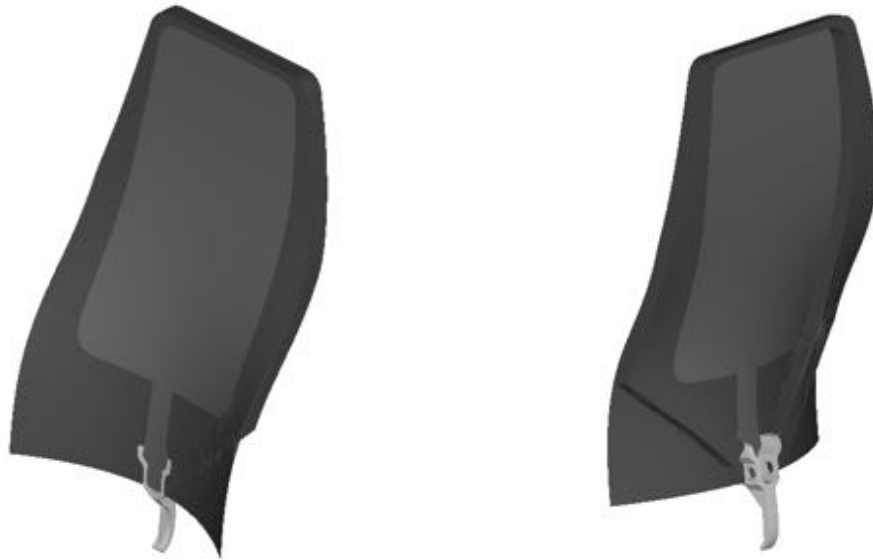


Abbildung 92: Endgültiges Modell der Rückenlehne mit Rahmenstruktur

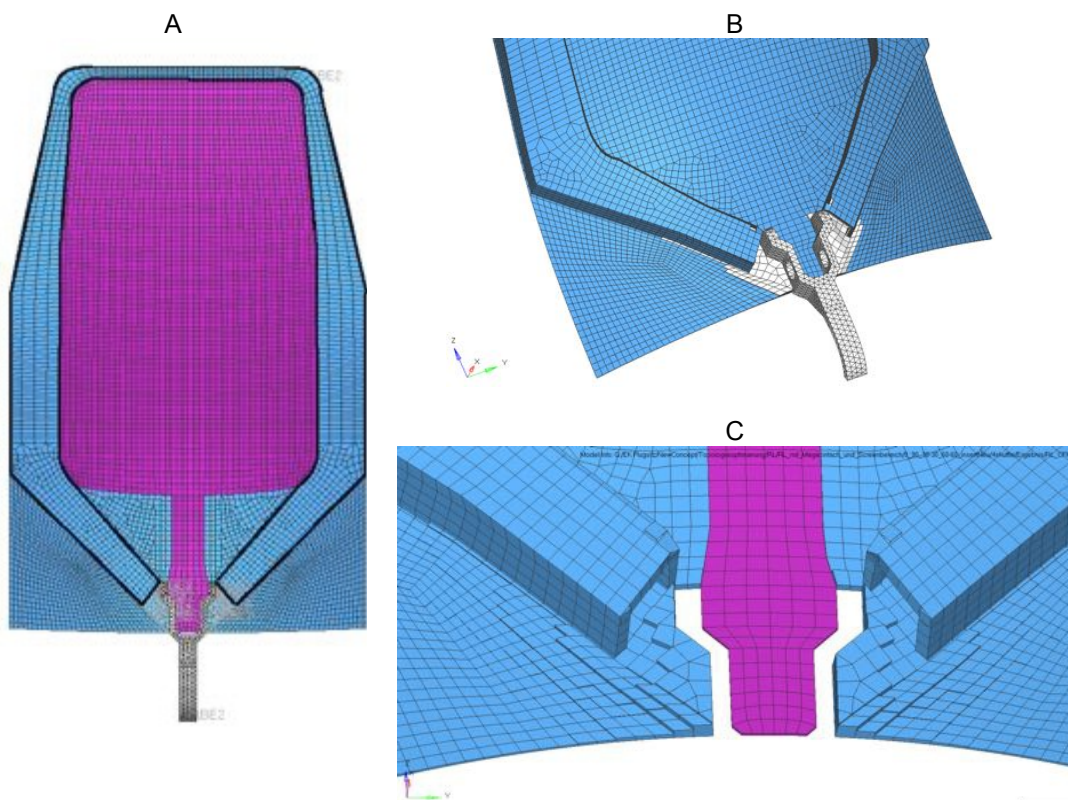


Abbildung 93: A) Design-Space (blau) und NonDesign-Space (lila), B) Insert und C) Rahmen im Insert-Bereich

Die Design- und NonDesign-Spaces, als auch die Lastfälle und Randbedingungen, blieben gleich wie in den Modellen zuvor. Der Rahmen ist im Designraum und hat überall eine Höhe von 30mm. Das Insert wurde wie in Abbildung 93 (B) modelliert.

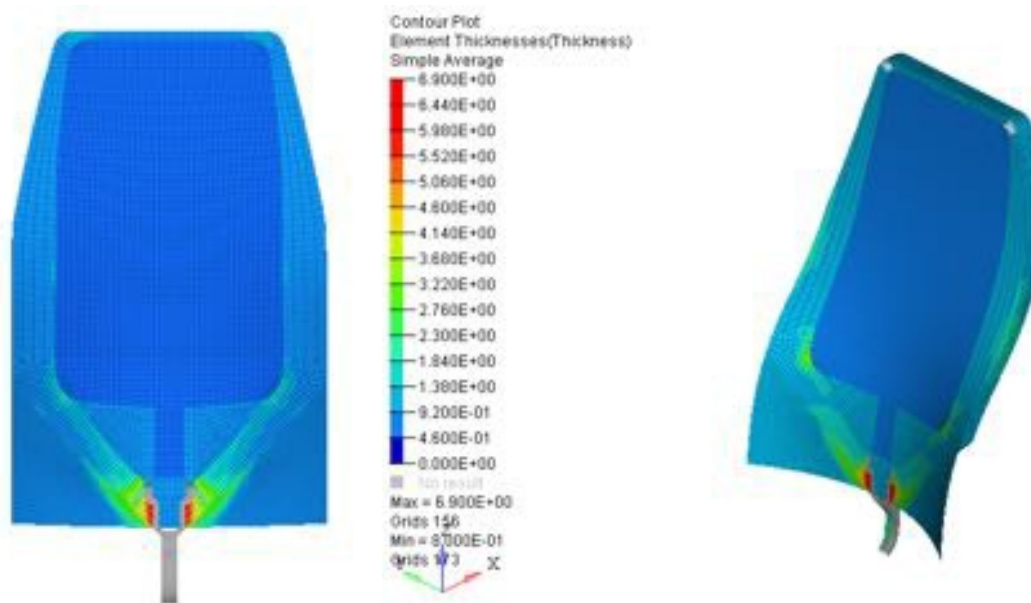


Abbildung 94: Optimierte Rückenlehne mit Rahmen - Elementdicke

In Abbildung 94 sind die optimierten Elementdicken nach den drei Optimierungsphasen zu sehen. Da die Rahmenstruktur vom Anfang an mitmodelliert wurde, ist die Rückenlehne sehr biegesteif und benötigt nicht so viele CFK-Lagen wie in den vorherigen Modellen. Das Laminat in der Rahmenstruktur besitzt eine Dicke von stets unter 3,5mm (Abbildung 95). Die maximale Dicke des Laminats beträgt 6,9mm und diese befindet sich, wie zu erwarten, im Krafteinleitungsbereich (Insert-Bereich).

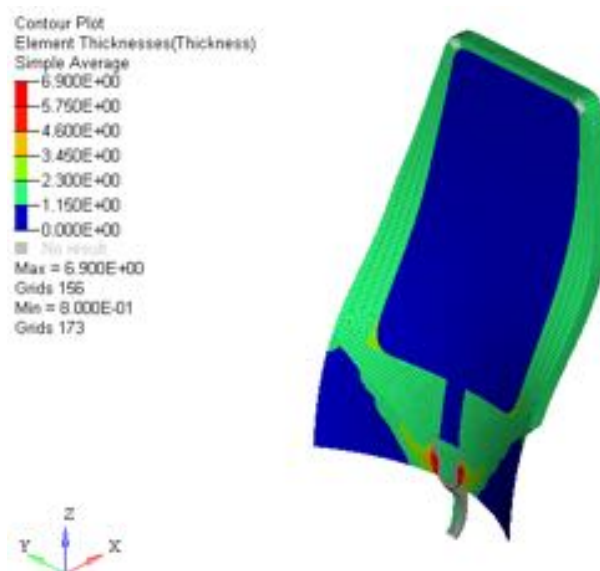


Abbildung 95: Laminatdicke der Rückenlehne - andere Skala

In der nächsten Abbildung ist das Laminat im Rahmen (Detailansicht X) und im NonDesign-Space (Detailansicht Y) dargestellt.

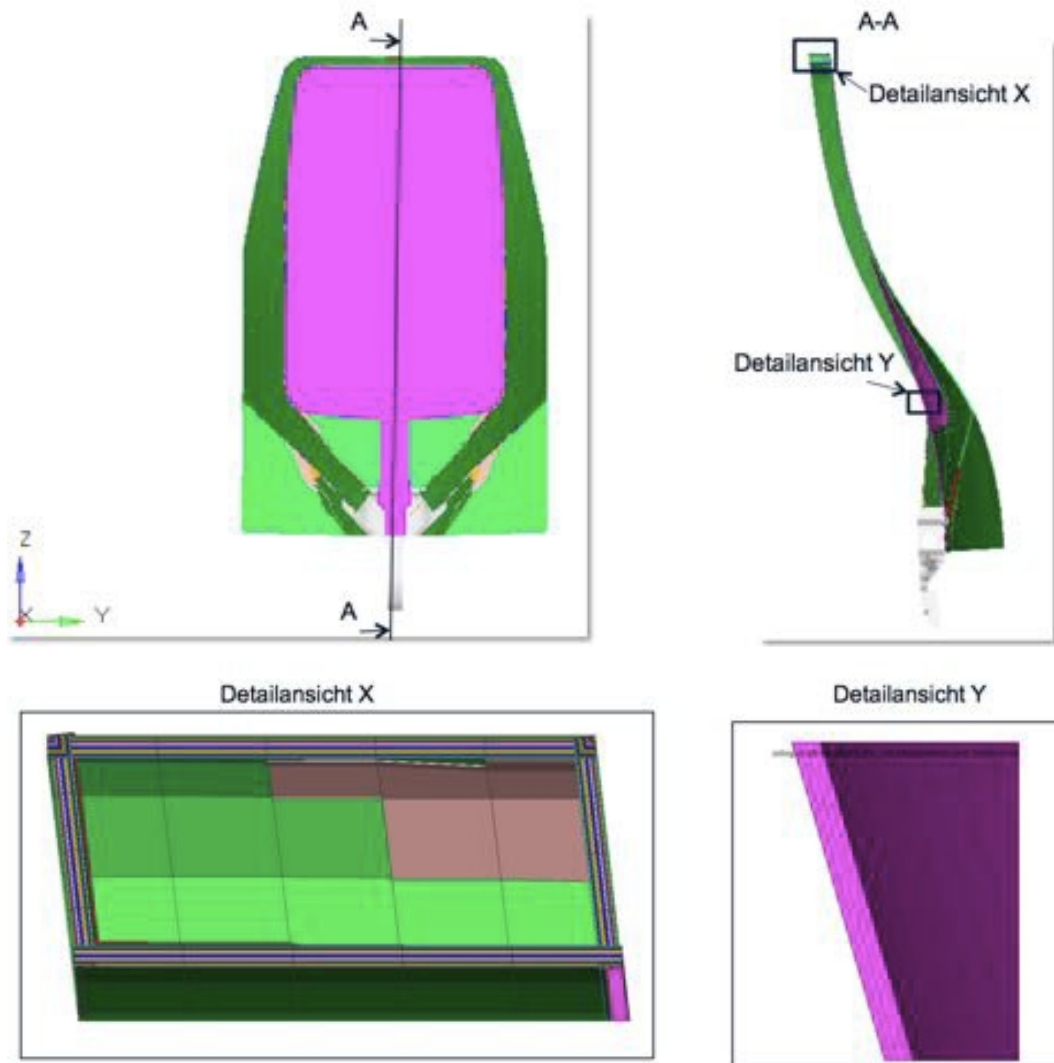


Abbildung 96: Schnitt- und Detailansicht des Laminats im Rahmen und NonDesign-Space

Das Gewicht der optimierten Rückenlehne aus CFK mit Rahmenstruktur beträgt **1,04 kg**. Wenn dieses Konzept also wirklich umgesetzt werden soll, sollte die Rückenlehne in dieser Form konstruiert werden.

8.2 Sitzschale

Der Sitzboden besteht aus CFK und ist in einer Art Schale konstruiert worden. Das Bauteil ist mit beiden Tragrohren verbunden und verläuft auf der ganzen Breite bis zur Höhe der Rückenlehnenlagerung. Es wurde mit CFK-Lagen und einer Schaumstofflage belegt und diese wurden dann optimiert.

Im Bereich der Rückenlehnenlagerung wurde ein NonDesign-Space vorgesehen. Dieser NonDesign-Space soll nach der Optimierung Platz für die Rückstellung der Rückenlehne lassen. Um die Kräfte der Rückenlehne und Tisch anbringen zu können, wurden weitere Rigid-Elemente definiert.

Die Lagerkräfte, die auf der Rückenlehnen- und Tischlagerung angreifen, wurden entsprechend den Lastfällen des Rückenlehnenmodells und Tischarmmodells übernommen:

- Rückenlehne nach hinten mit 900N
- Rückenlehne nach vorne mit 900N
- Rückenlehne zur Seite mit 890N
- Tisch nach unten mit 800N
- Tisch nach Hinten mit 330N

Auf der Sitzfläche wurde ebenfalls eine verteilte Last angebracht. In einem Lastfall entspricht diese Last der Sitzkraft einer 80kg schweren Person und in einem weiteren Lastfall wurde eine Crash-Situation entsprechend des dynamischen Tests vorgesehen. In der Crash-Situation wirken 80kg mit 14g auf der Sitzfläche.

Ziel der Optimierung war das Gewicht der Sitzschale zu reduzieren. Da eine kleine Verschiebung der Lagerung in der Sitzschale eine viel größere Verschiebung der obersten Kante der Rückenlehne bedeuten würde, wurde eine maximale Verschiebung der Lagerung von 5mm als Nebenbedingung der Optimierung definiert.

8.2.1 Erste Optimierung

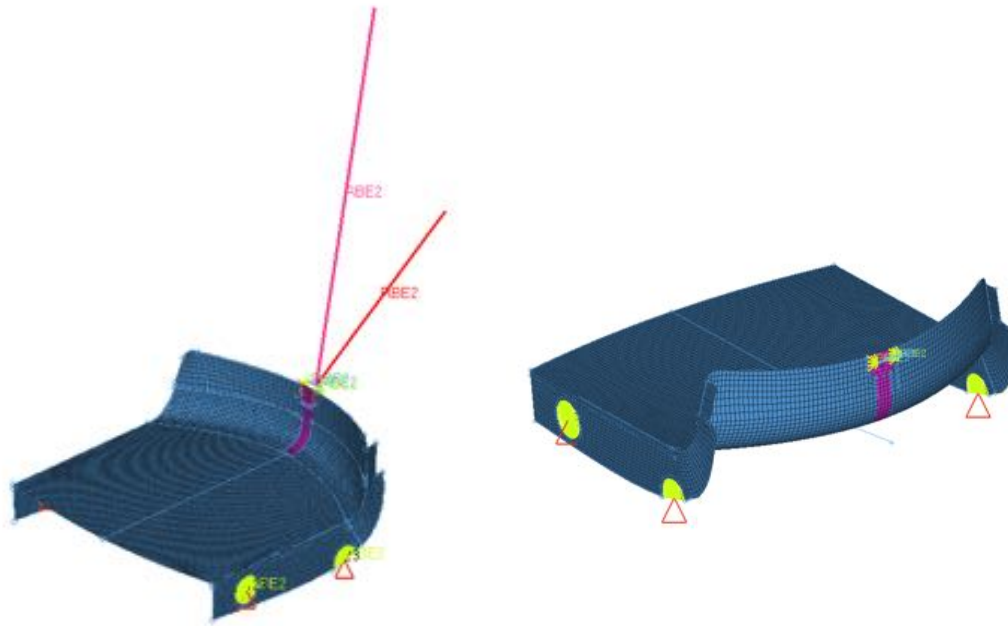


Abbildung 97: Modell der Sitzschale - erster Optimierungsversuch

Die Dicke des Laminats in der Sitzschale ist in der nächsten Abbildung zu sehen. Allerdings konnte die Nebenbedingung während der Optimierung nicht eingehalten werden. Das heißt es wurde keine Konvergenz bei der Optimierung erreicht. Die Lagerung in der resultierenden Sitzschale verschiebt sich also in einigen Lastfällen mehr als 5mm.

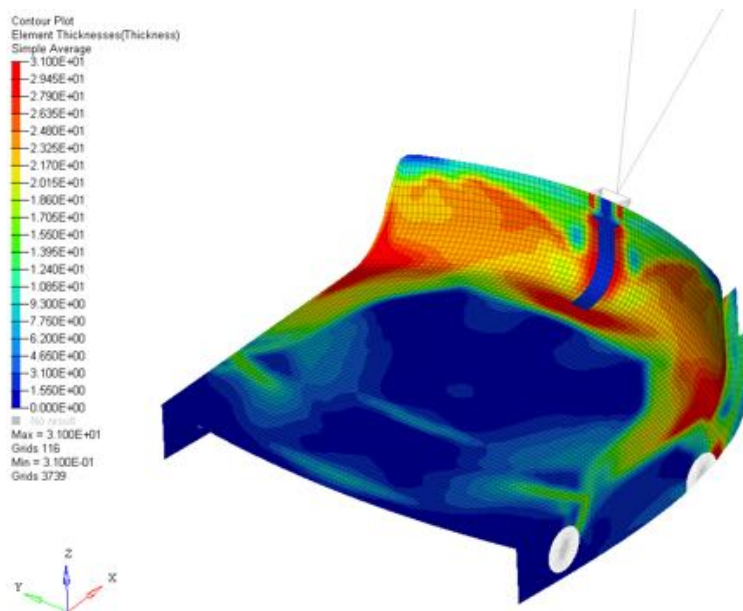


Abbildung 98: Elementdicke - Sitzschale ohne Verstärkungen

8.2.2 Mit Verstärkungen

Um die Nebenbedingung der maximalen Verschiebung einhalten zu können wurde das vorherige Modell modifiziert. Es wurden zwei weitere Verstärkungen unter der Sitzschale angebracht. Die Sitzschale ist also nicht mehr nur links und rechts an den Tragrohren verbunden sondern auch in der Mitte. Die zwei rippenartigen Verstärkungen verlaufen von der vordersten Kante des Sitzes bis zur Rückenlehnenlagerung und machen die Konstruktion besonders biegesteif.

In der nächsten Abbildung kann man das Modell mit den Verstärkungen unterhalb des Sitzes erkennen. Weiters ist auch die Laminatdicke vor der Optimierung dargestellt. Die CFK-Lagen haben vor der Optimierung eine Dicke von 2mm und die Schaumstofflage von 5mm (insgesamt 17mm). Die Faserrichtungen wurden in 0° , 30° , -30° , 60° , -60° und 90° festgelegt. Das gesamte Modell wiegt 10kg vor der Optimierung. Die Lastfälle, Kräfte, Randbedingungen, Zielfunktion und Nebenbedingungen wurden gleich wie im vorherigen Modell definiert.

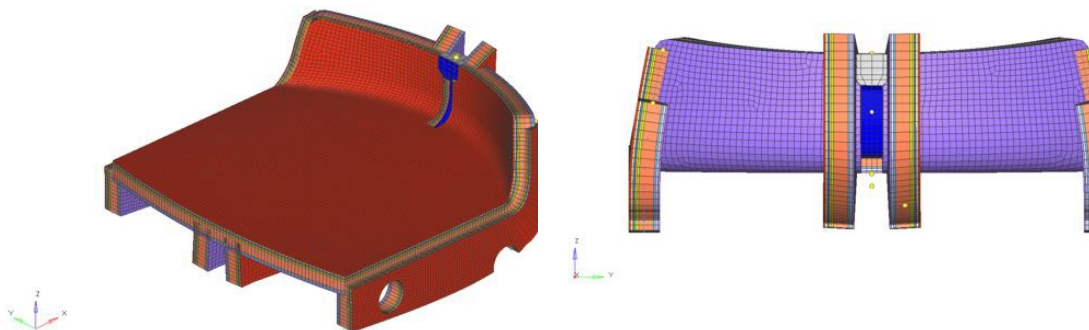


Abbildung 99: Anfangsmodell der Sitzschale mit Verstärkungen

Nach der Optimierung ergaben sich folgende Elementdicken. Die maximale erlaubte Verschiebung von 5mm der Rückenlehnenlagerung wurde eingehalten und das Gewicht wurde von 10kg (Anfangsgewicht) auf 610g optimiert. Durch die Verstärkungen wurde das Modell steifer und durch die extra Abstützungen an den Tragrohren wird die gesamte Struktur stabiler.

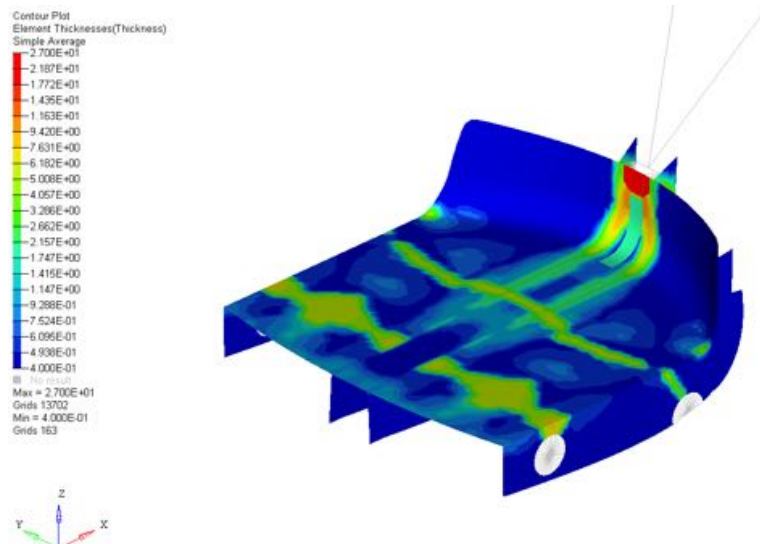


Abbildung 100: Ergebnis - Sitzschale: Isometrische Ansicht von oben

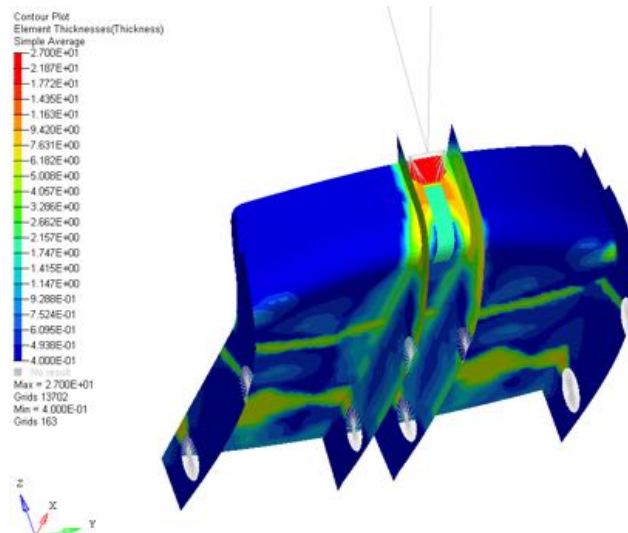


Abbildung 101: Ergebnis - Sitzschale: Isometrische Ansicht von unten

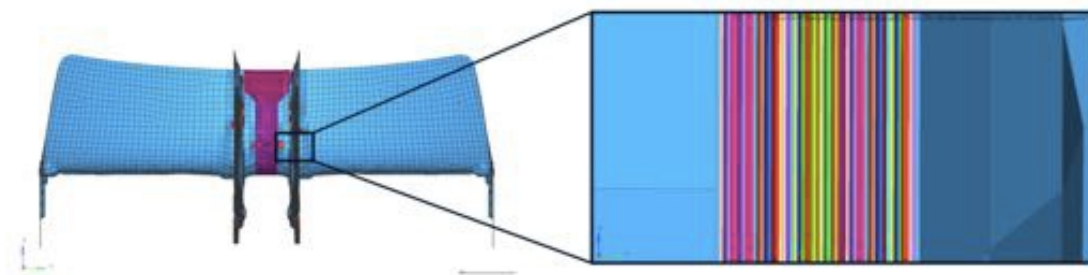


Abbildung 102: Detailansicht des Laminats im Bereich der Verstärkungsrippen - Ansicht von hinten

8.3 Armlehnenträger

Der Armlehnenträger greift an das hintere Tragrohr an und verläuft nach oben bis zur Armlehne. Die Gurtbefestigung befindet sich ebenfalls auf dem Armlehnenträger. Als Material des Bauteils wurde die Aluminiumlegierung Al-Li 2090 mit den Eigenschaften laut Tabelle 4 festgelegt. Die Lastfälle und Kräfte wurden vom ZIM-Lastenheft [12] übernommen:

- Armlehne nach unten: Limit Load = 1335N
Ultimate Load = 2012N
- Armlehne zur Seite: Limit Load = 890N
Ultimate Load = 1340N
- Kraft an Gurt: 80 kg mit 16 g nach vorne = 12560N

Das Ziel der Topologieoptimierung war eine Gewichtsreduktion und als Nebenbedingungen wurden maximale Verschiebungen und eine maximale Spannung definiert. Die Armlehne durfte sich nicht mehr als 6,4mm nach unten (bei Belastung von LL 1335N) verschieben und nicht mehr als 25,4mm im zur Seite (bei Belastung von LL 890N). Weiters durfte eine maximale Spannung von 485 N/mm^2 (Streckgrenze von Al-Li 2090) in den Lastfällen mit den Ultimate Loads und Gurtkraft nicht überschritten werden.



Abbildung 103: Modell des Armlehnenträgers für die Topologieoptimierung

Als Ergebnis erhielt man folgenden topologieoptimierten Armlehnenträger.

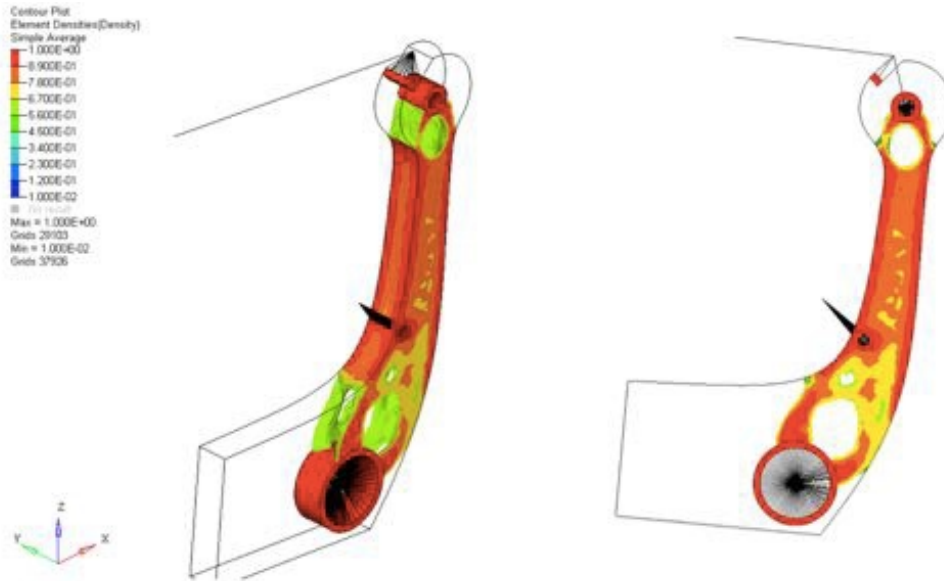


Abbildung 104: Ergebnis der Topologieoptimierung - Armlehnenträger

Das optimierte Bauteil wiegt 330g und erfüllt alle Nebenbedingungen der Optimierung. Die Struktur ist allerdings eine Hohlstruktur, wie in nächster Abbildung zu sehen ist. Da das Bauteil eventuell durch Fräsen gefertigt werden würde, ist eine Hohlstruktur nicht möglich. Man müsste also die Wände der Hohlstruktur zur Mitte verschieben und das Bauteil als I-Träger konstruieren.

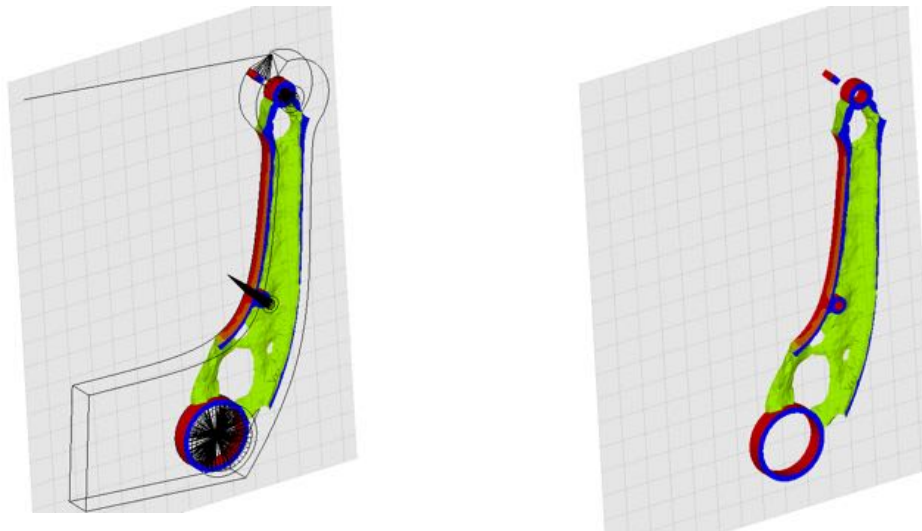


Abbildung 105: Schnittebene des Armlehnenträgers - Hohlstruktur

Der Träger ist am hinteren Tragrohr mit der Sitzstruktur verbunden. Da das Tragrohr rund ist, muss der Rotationsfreiheitsgrad um das Rohr gesperrt werden. Dies kann entweder durch eine Art Bolzenverbindung, wie in nächster Abbildung dargestellt,

oder durch ein Ersetzen des runden Tragrohrs mit einem rechteckigen Tragrohr erzielt werden.

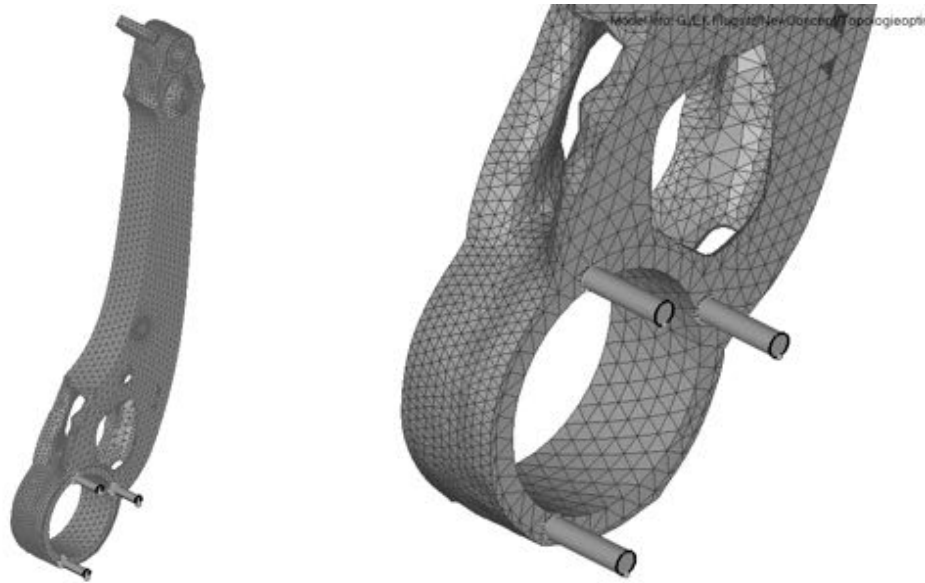


Abbildung 106: Bolzenverbindung des Armlehenträgers

8.4 Tischarm

Für den Tischarm wurde ebenfalls Al-Li 2090 als Material gewählt. Es wurden Rigid-Elemente zur Darstellung des Tisches erstellt und die Lastfälle wurden vom ZIM-Lastenheft [12] übernommen:

- In der Mitte des Tisches nach unten: Limit Load = 550N
Ultimate Load = 800N
- In der Mitte des Tisches nach hinten: Limit Load = 220N
Ultimate Load = 330N

Als Ziel der Topologieoptimierung wurde ebenfalls eine Gewichtsreduktion festgelegt. Als Nebenbedingung wurde eine maximale Verschiebung von 65mm für die Lastfälle mit Limit Loads und eine maximale Spannung von 485 N/mm^2 für die Lastfälle mit Ultimate Loads festgelegt.

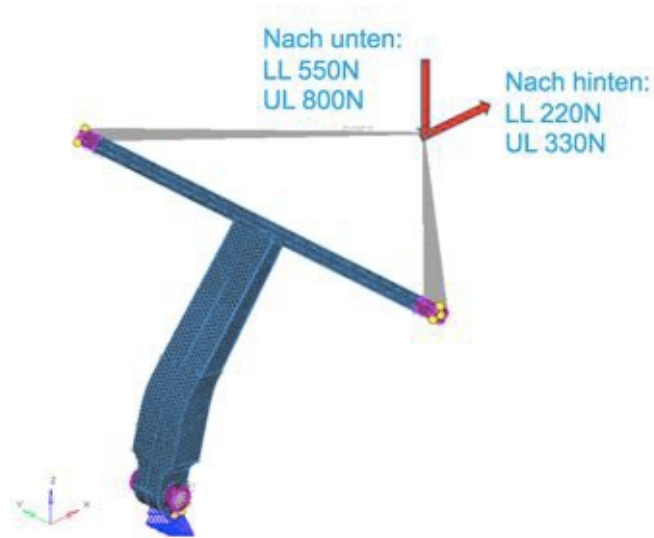


Abbildung 107: Modell für die Topologieoptimierung des Tischarms

Als Ergebnis der Topologieoptimierung erhielt man folgenden optimierten Tischarm. Das Gewicht des Tischarmes beträgt 357g.

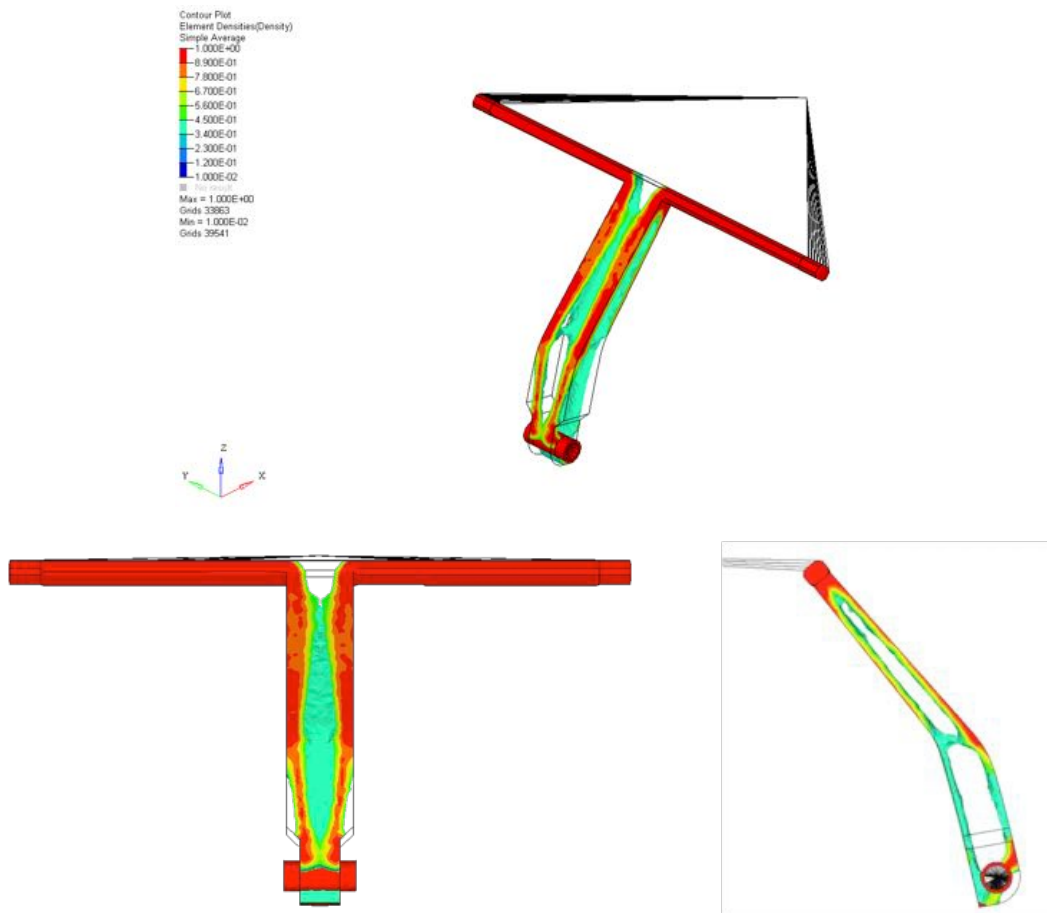


Abbildung 108: Ergebnis der Topologieoptimierung - Tischarm

8.5 Sitzfuß

Für die Topologieoptimierung der Sitzfüße wurde in erster Linie ein Stabmodell einer dreier Sitzreihe aufgebaut. Da eine Sitzreihe mit drei Sitzen nur zwei Sitzfüße besitzt und diese verschiedene Positionen annehmen können (siehe Abbildung 21), wurde untersucht welche der beiden Füße schwerer belastet wird.

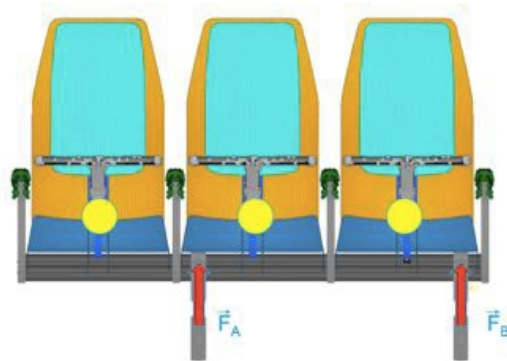


Abbildung 109: Kräfte an den Sitzfüßen

Es wurden drei Lastfälle festgelegt:

- Crash-Situation mit 14 g nach unten
- Crash-Situation mit 16 g nach vorne
- Rückenlehne wird mit 1800N nach hinten gedrückt

Die entsprechenden Kräfte wurden an den drei Sitzen angebracht und die Lagerkräfte der beiden Sitzfüße wurden analysiert. Nach Festlegung des kritischen Sitzfußes wurde die Topologieoptimierung durchgeführt. Für das Material wurde dieselbe Aluminiumlegierung der anderen Bauteile gewählt (Al-Li 2090). Für die Zielfunktion wurde eine Gewichtsreduktion gewählt und als Nebenbedingung wurde eine maximale Spannung von 485 N/mm^2 definiert.

8.5.1 Einteilig

Für die erste Topologieoptimierung wurde folgendes Modell aufgebaut:

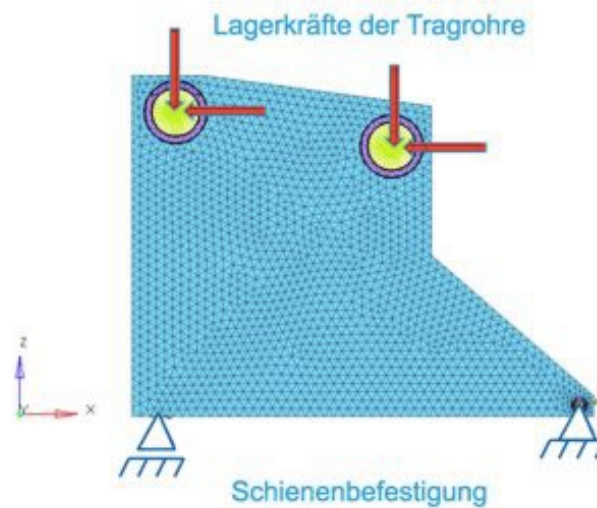


Abbildung 110: Modell für die Topologieoptimierung der Sitzfüße (einteilig)

Das hintere Lager sperrt alle drei translatorischen Freiheitsgrade und das vordere kann sich in x-Richtung bewegen. Die Lagerkräfte des kritischen Sitzfußes wurden an den Stellen der Tragrohre angebracht und es wurden Design-Spaces (blau) und NonDesign-Spaces (lila) definiert.

Folgende Struktur ergab sich nach der Topologieoptimierung. Das Bauteil wiegt 1,022 kg und besteht aus nur einem Teil.

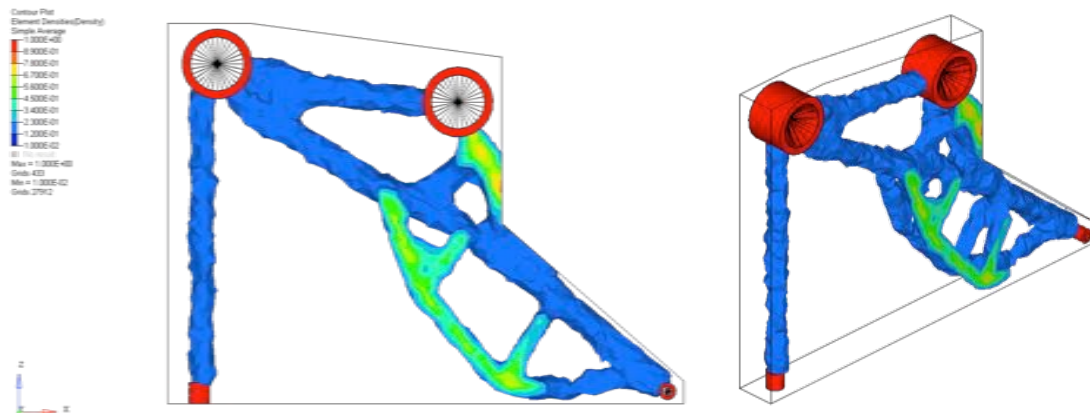


Abbildung 111: Ergebnis der Topologieoptimierung - Sitzfuß (einteilig)

8.5.2 Geteilt

Um den Sitzfuß mit einer Diagonalstrebe zu betrachten wurde das vorherige Modell genommen und in einem vorderen Sitzfuß und einem hinteren Sitzfuß geteilt. Beide Sitzfüße sind durch eine Diagonalstrebe verbunden. Da der Sitz beide Tragrohre verbindet und der ganzen Sitzfußstruktur Stabilität leistet, wurde der Sitz auch dargestellt. Die Diagonalstrebe und Sitzdarstellung wurden mit Rigid-Elementen modelliert.

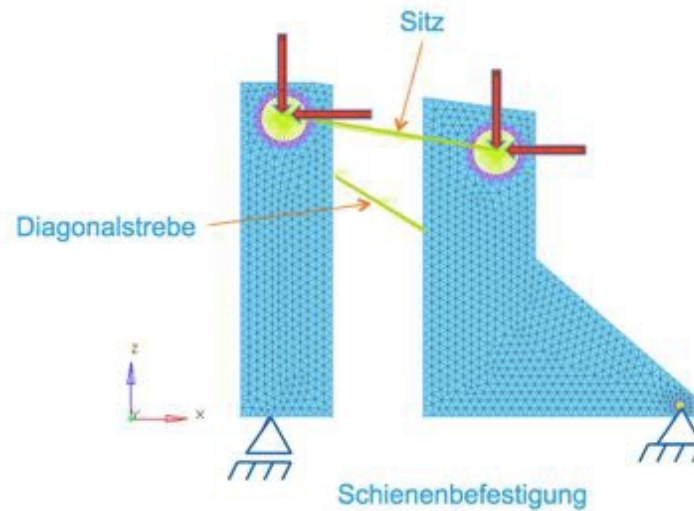


Abbildung 112: Modell für die Topologieoptimierung der Sitzfüße (geteilt mit Diagonalstrebe)

Man erhielt folgendes Ergebnis nach der Topologieoptimierung. Die zwei Bauteile plus eine Diagonalstrebe (61,4 g) wiegen insgesamt 807,4 g und stellen somit eine deutlich bessere Lösung als der ungeteilte Sitzfuß (1,022 kg) dar.

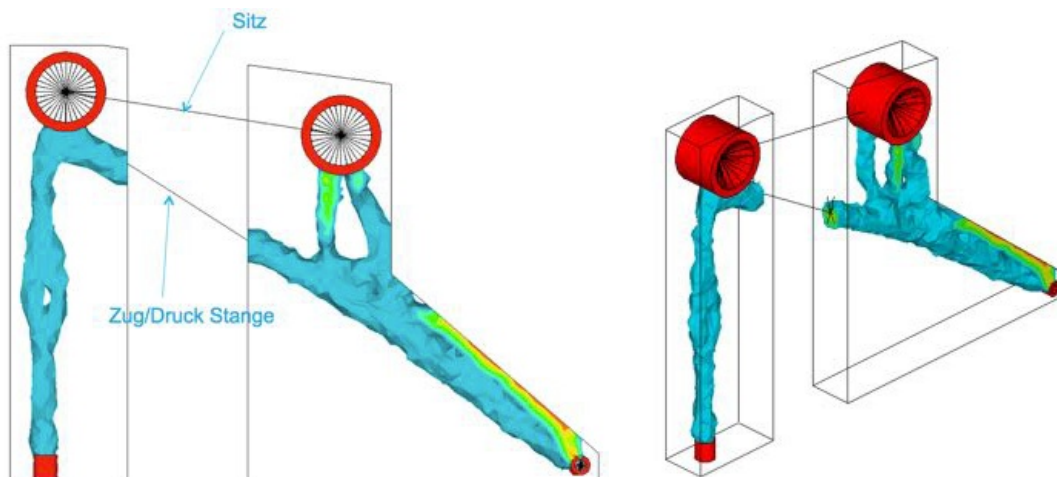


Abbildung 113: Ergebnis der Topologieoptimierung - Sitzfuß (geteilt)

9 Finite-Elemente-Analyse der optimierten CFK-Rückenlehne

In der Regel sind Ergebnisse einer Topologieoptimierung sehr aussagekräftig und werden deswegen, sehr oft in der Konzeptentwicklung verwendet. Natürlich ist ein weiteres Feintuning der Ergebnisse bei den Bauteilen in einer nachfolgenden Engineering-Phase noch notwendig. In dieser Feintuning-Phase werden aus den Topologieoptimierungsergebnissen CAD-Modelle abgeleitet. Die CAD-Modelle der Bauteile sollen fertigungstechnische Aspekte berücksichtigen und stellen eine detaillierte Konstruktion der Bauteile dar. Mit diesen detaillierten CAD-Modellen können dann Finite-Elemente-Analysen FEA durchgeführt werden und untersucht werden, ob die topologieoptimierten Bauteile alle Anforderungen erfüllen.

Die Ableitung von CAD-Modellen aller berechneten und optimierten Bauteile ist wegen des hohen Zeitaufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. Trotzdem möge man feststellen, ob die Optimierungsergebnisse aussagekräftig sind. Da die Composite-Optimierung ein ungewöhnlicheres Verfahren im Vergleich zu einer Topologieoptimierung ist, wurde beschlossen die Ergebnisse einer CFK-Optimierung zu analysieren. Für die FEA wurde ebenfalls das Programm HyperWorks verwendet.

9.1 Modell und Lastfälle

Für die FEA wurde das Ergebniss-Modell der CFK-Rückenlehne nach den drei Optimierungsphasen verwendet. Die CFK-Lagen sind also bereits formoptimiert, dickenoptimiert und reihenfolgenoptimiert worden.

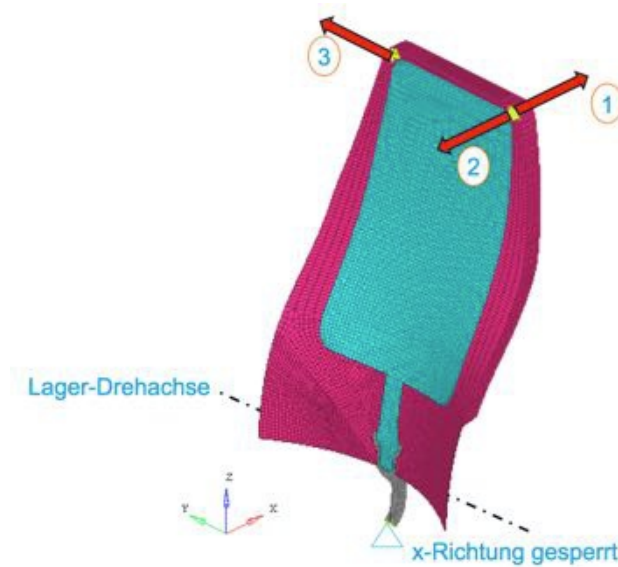


Abbildung 114: Modell, Kräfte und SPC der CFK-Rückenlehne für die FEA

Genau wie im Kapitel 8.1 wurde die Rückenlehne drehbar gelagert und der unterste Punkt der Rückstellung in x-Richtung gesperrt.

Es wurden 6 Lastfälle definiert:

1. **Lastfall:** Limit Load **900N** nach hinten (Richtung 1 in Abbildung 114)
2. **Lastfall:** Ultimate Load **1800N** nach hinten (Richtung 1 in Abbildung 114)
3. **Lastfall:** Limit Load **900N** nach vorne (Richtung 2 in Abbildung 114)
4. **Lastfall:** Ultimate Load **1800N** nach vorne (Richtung 2 in Abbildung 114)
5. **Lastfall:** Limit Load **890N** zur Seite (Richtung 3 in Abbildung 114)
6. **Lastfall:** Ultimate Load **1610N** zur Seite (Richtung 3 in Abbildung 114)

In den Lastfällen 1, 3 und 5 wurden die maximalen Verschiebungen betrachtet und in den Lastfällen 2, 4 und 6 wurde ein Versagen des Laminats untersucht. Die maximal erlaubten Verschiebungen in der Composite-Optimierung waren 50mm für die Lastfälle 1 und 3 und 25mm für den Lastfall 5. Diese sollten bei der FEA auch eingehalten werden um die CFK-Rückenlehne positiv bewerten zu können.

Für ein Versagen einer CFK-Konstruktion gibt es verschiedene Kriterien und Theorien. Im Programm HyperWorks stehen die Versagenskriterien nach Tsai-Wu, Hoffman, Tsai Hill und Maximum Stress zur Verfügung.

Die Maximum-Stress-Theorie betrachtet jede einzelne Spannungskomponente und vergleicht diese mit deren maximal zulässigen Werten. Wird einer dieser Werte überschritten, tritt ein Versagen auf. Es werden also die Spannungskomponenten in den Material-Achsen separat betrachtet und es wird keine Wechselwirkung zwischen den Spannungskomponenten berücksichtigt. Die Tsai-Wu, Hoffman und Tsai Hill

Theorien berücksichtigen hingegen eine Wechselwirkung der Spannungskomponenten, wobei die Hoffman und Tsai Hill Theorien eine Vereinfachung der Tsai-Wu Theorie sind. [13],[14]

Für die FEA der Rückenlehne wurde das Versagenskriterium nach Tsai-Wu gewählt und eine maximale interlaminare Scherspannung von 100 N/mm^2 definiert. Das Tsai-Wu Kriterium untersucht den Spannungszustand im 6-dimensionalen Spannungsraum und vergleicht diesen mit dem maximal erlaubten Spannungszustand. Als Ergebnis erhält man den Composite-Failure-Index von den einzelnen Elementen im Bauteil. Ist dieser Index kleiner als 1, so tritt kein Versagen auf. Besitzt ein Element einen Composite-Failure-Index größer gleich 1, dann bedeutet es, dass an dieser Stelle ein Versagen auftreten würde. Im Programm Hyperworks kann weiters, wenn erwünscht, zwischen Bruchversagen und Delaminationsversagen unterschieden werden.

9.2 Ergebnis

9.2.1 Verschiebung

Folgende Verschiebungen waren zu beobachten:

- **Lastfall 1:** 900N nach hinten

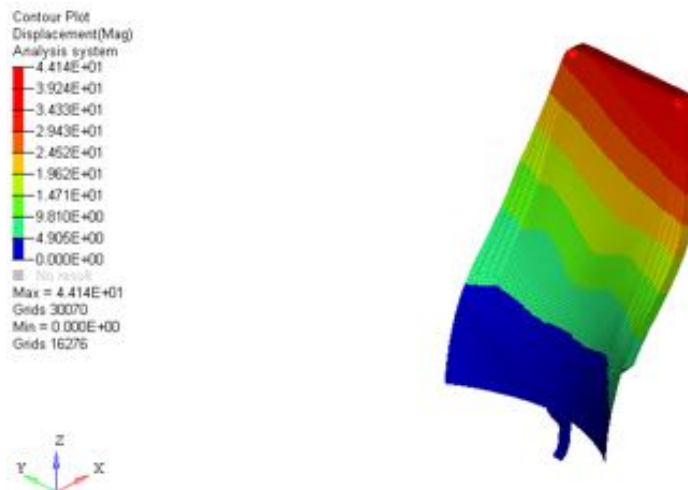


Abbildung 115: Ergebnis FEA - Verschiebung im Lastfall 1

- **Lastfall 3:** 900N nach vorne

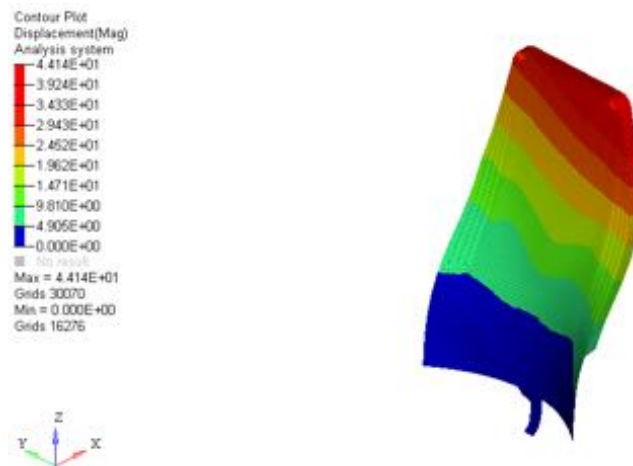


Abbildung 116: Ergebnis FEA - Verschiebung im Lastfall 3

- **Lastfall 5:** 890N zur Seite

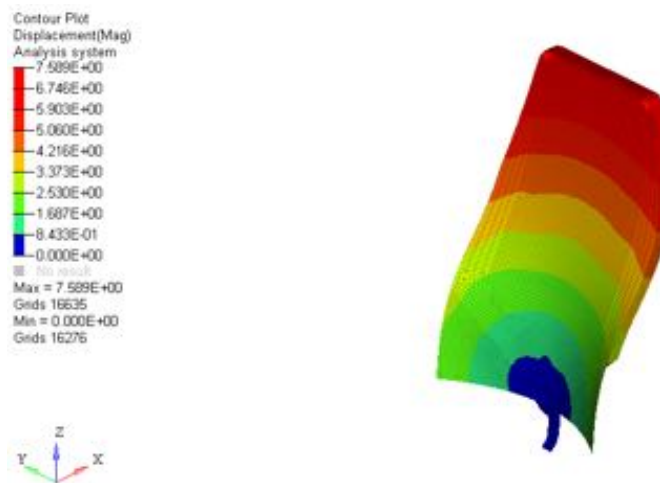


Abbildung 117: Ergebnis FEA - Verschiebung im Lastfall 5

Wie man erkennt, beträgt die maximale Verschiebung in den Lastfällen 1 und 3 44mm und ist somit unter der erlaubten Grenze (50mm). Im Lastfall 5 beträgt die maximale Verschiebung 7,6mm und ist ebenfalls unter der erlaubten Grenze (25mm). Die Rückenlehne erfüllt also die Anforderungen für die Lastfälle 1, 3 und 5.

9.2.2 Composite Failure

- **Lastfall 2:** 1800N nach hinten

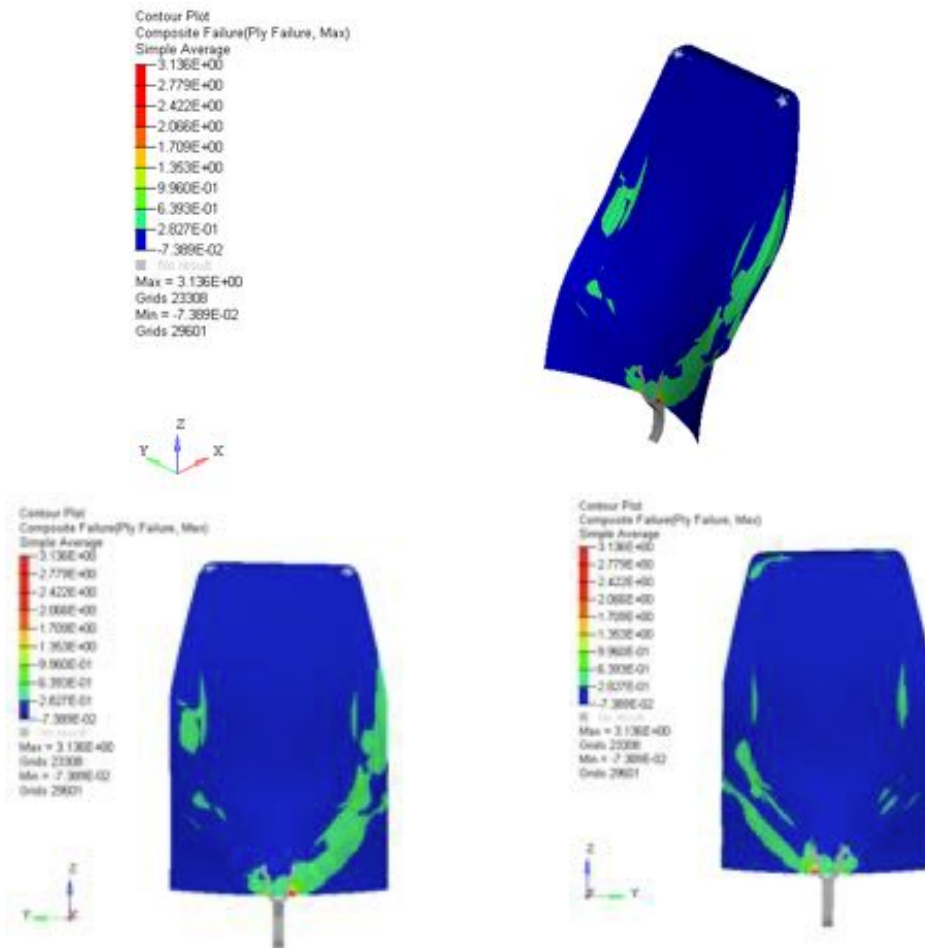


Abbildung 118: Ergebnis FEA - Composite Failure im Lastfall 2

Im Lastfall 2 tritt ein Versagen des Laminats auf, im Bereich wo das Insert mit dem Laminat verbunden wird. Ansonsten bleibt die Struktur der Rückenlehne versagensfrei.

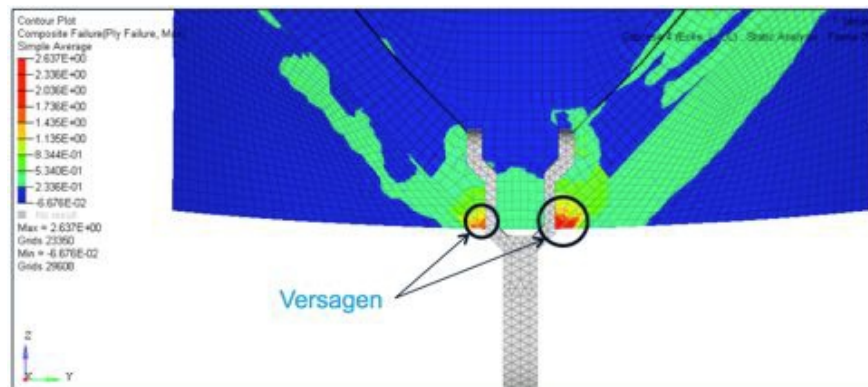


Abbildung 119: Composite Failure: Kritische Stelle - Lastfall 2

- **Lastfall 4: 1800N nach vorne**

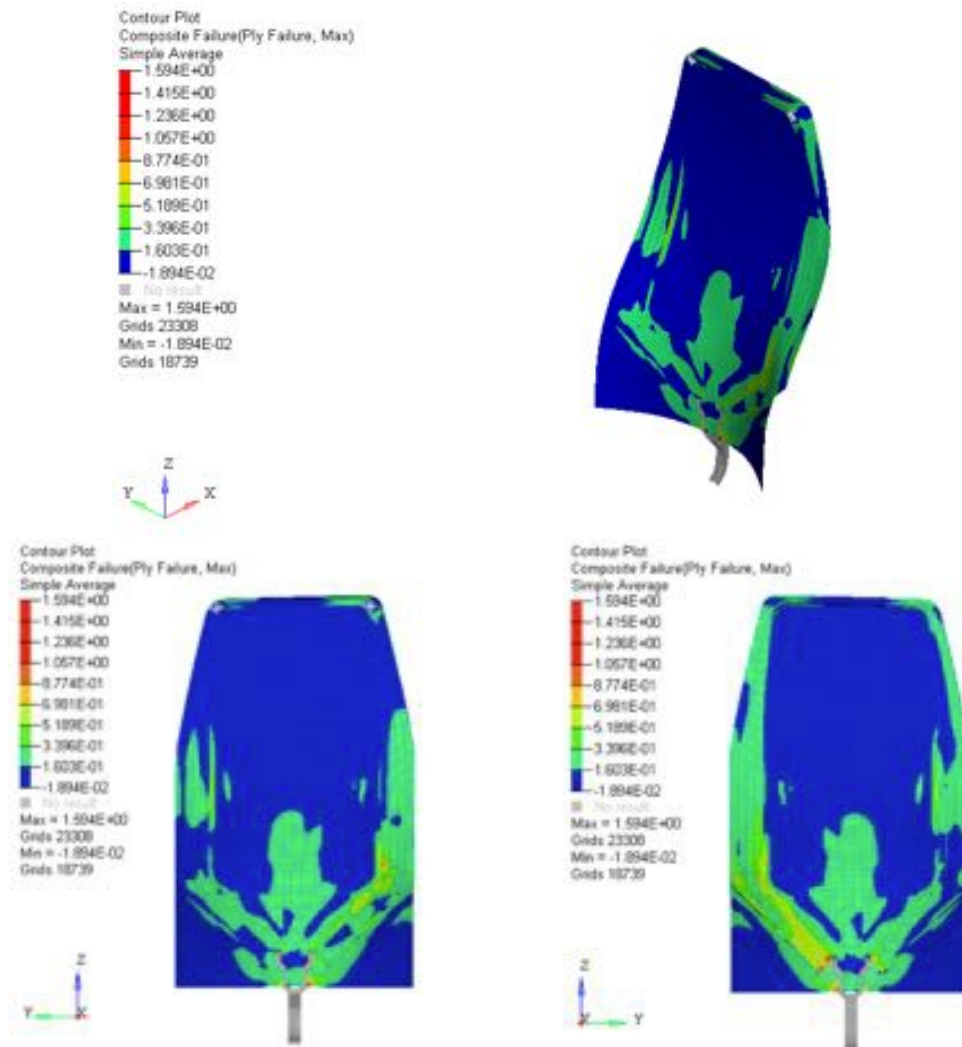


Abbildung 120: Ergebnis FEA - Composite Failure im Lastfall 4

Im Lastfall 4 tritt ebenfalls ein Versagen des Laminats an einigen Stellen auf, wo das Insert mit dem Laminat verbunden ist. Weiters erkennt man, dass es größere Bereiche mit hohen Composite-Failure-Indizes in der Gesamtstruktur im Vergleich zum Lastfall 2 gibt. Die Indizes bleiben in diesen Bereiche aber unterhalb der Grenze (<1) und somit ist die kritische Stelle im Lastfall 4 dieselbe wie im Lastfall 2.

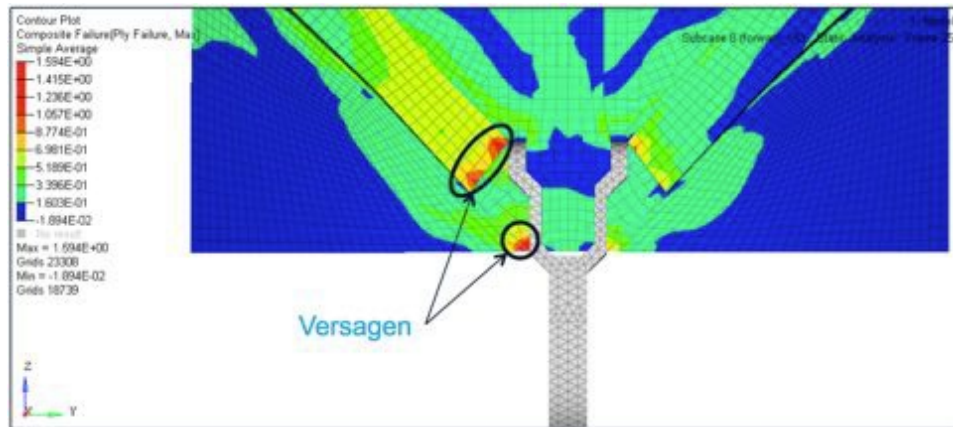


Abbildung 121: Composite Failure: Kritische Stelle - Lastfall 4

- **Lastfall 6: 1610N zur Seite**

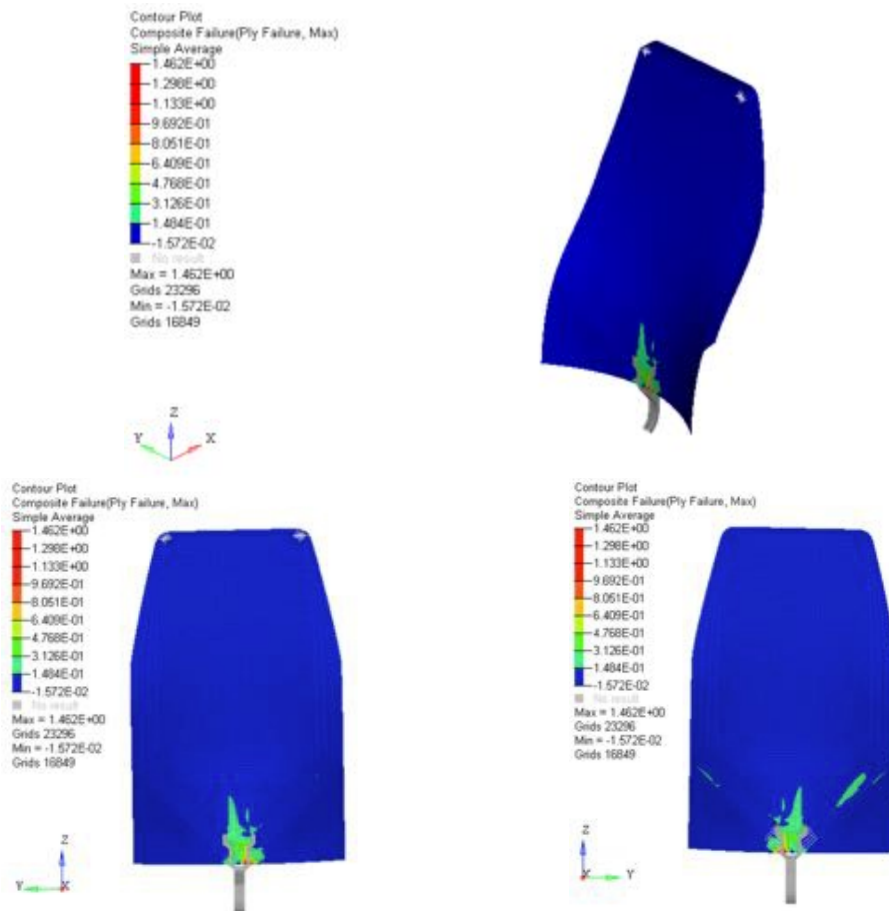


Abbildung 122: Ergebnis FEA - Composite Failure im Lastfall 6

Im Lastfall 6 besitzt fast die gesamte Rückenlehne einen niedrigen Composite-Failure-Index. Allerdings kommt es an derselben Stelle wie in den Lastfällen 2 und 4 zu einem Versagen.

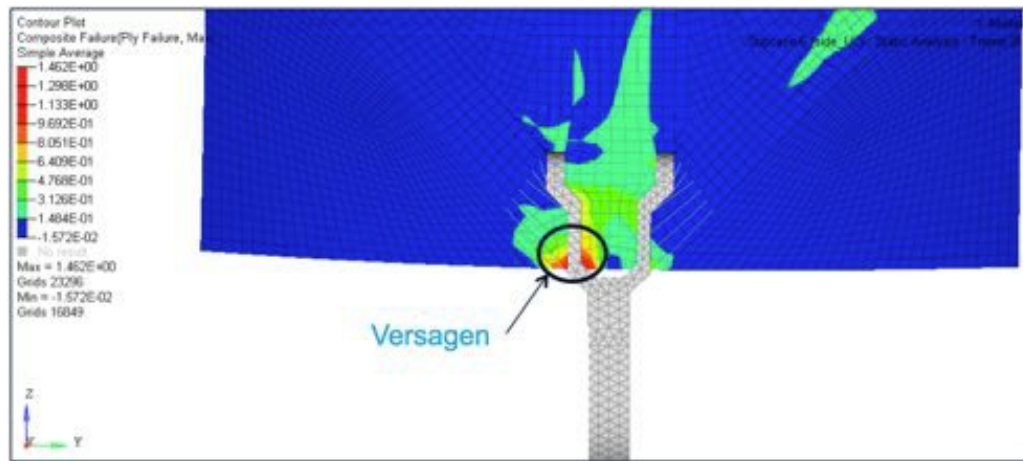


Abbildung 123: Composite Failure: Kritische Stelle - Lastfall 6

9.3 Aussage

In den Lastfällen mit Limit Loads (1,3,5) wurden die maximalen Verschiebungsgrenzen eingehalten. In den Lastfällen mit Ultimate Loads (2,4,6) trat aber um den Bereich des Inserts bei einigen Stellen ein Versagen auf. So würde man ohne Weiteres zu berücksichtigen feststellen, dass die Composite-optimierte Rückenlehne die Anforderungen des Lastenheftes nicht erfüllt.

Allerdings soll an dieser Stelle wieder betont werden, dass sich das Ganze um ein erstes Konzept eines Flugzeugsitzes handelt und das Feintuning beziehungsweise die detaillierte Konstruktion der einzelnen Komponenten noch fehlt. Somit könnte man sagen, dass das Grundkonzept der Rückenlehne in Ordnung ist aber das Insert und seine Verbindung noch modifiziert werden müssen.

Ein Insert dient bei einer CFK-Konstruktion zur Kraftein- oder Kraftausleitung. Man versucht immer die Kräfte auf möglichst große Flächen zu verteilen und Punktlasten zu vermeiden. Die Krafteinleitungsbereiche erfordern in Leichtbau-Konstruktionen besonderes Augenmerk. Die Gestaltung und Erprobung solcher Elemente nimmt häufig den größten Teil einer Konstruktionsaufgabe in Anspruch.[9]

Das Insert im Rückenlehnenmodell schaut folgendermaßen aus:

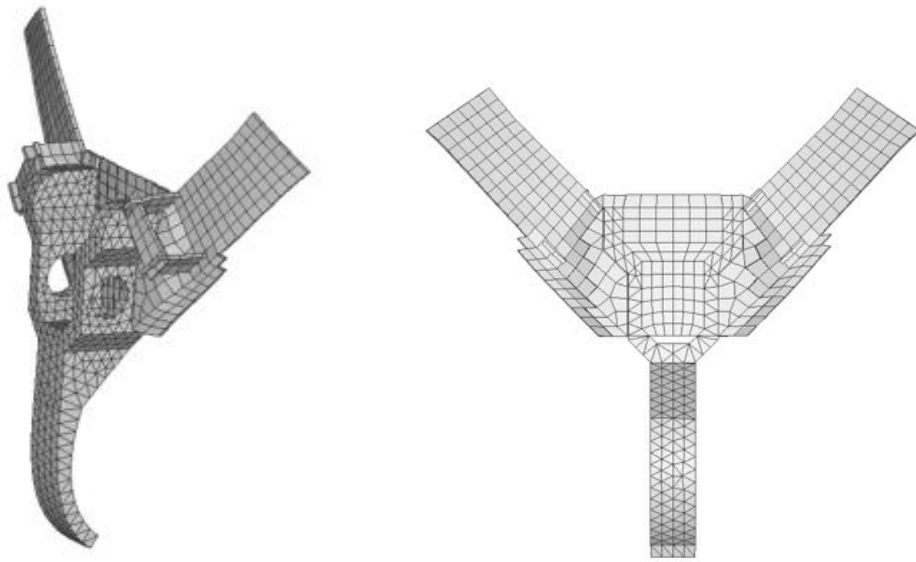


Abbildung 124: Insert der CFK-Rückenlehne - erste Konzeptidee

Es besteht aus einem Solid, der die Lagerung und Rückstellung verbindet, und aus einer Wandstruktur, die im Laminat der Rückenlehne eingebettet ist. In der nächsten Abbildung erkennt man wie diese Wandstruktur im Laminat aufliegt und wie diese mit der Rahmenstruktur verbunden ist.

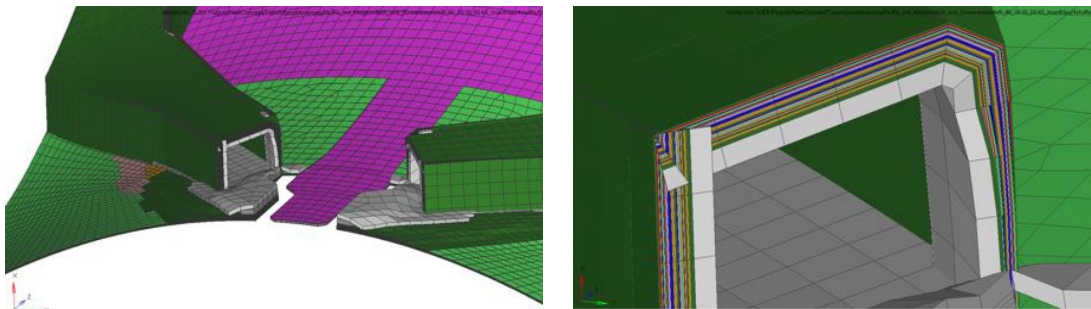


Abbildung 125: Insert im Laminat

Diese Wandstruktur ist suboptimal und benötigt eine weitere Entwicklung. Wie gesagt erfordert die Auslegung von Krafteinleitungsbereichen aber einen großen Zeitaufwand und viel Erfahrung in diesem Bereich. Aus diesem Grund wird dies den Konstrukteuren in der nachfolgenden Feintuning-Phase überlassen.

Eine mögliche Änderung wird in einer Skizze in der nächsten Abbildung dargestellt. Die Idee ist den Solid bis zur Rahmenstruktur zu erweitern und in den Rahmen ein zu schieben und zu verkleben. Ähnlich wie die Inserts in der bestehenden Rückenlehne konstruiert und verbunden sind.

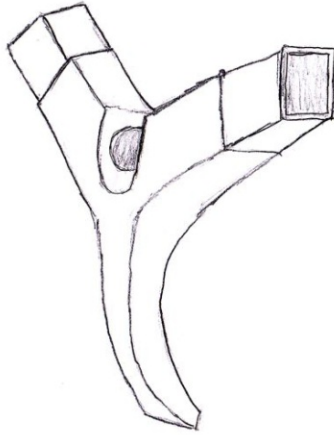


Abbildung 126: mögliches neue Konzept vom Insert

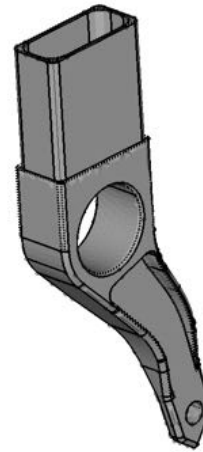


Abbildung 127: bestehendes Insert auf der Seite der Rückstellung

10 Schlussfolgerung

Mittels computerunterstützten Optimierungen ist es gut gelungen den bestehenden Sitz zu analysieren. Man erkannte die kritischen Stellen und stellte das Optimierungspotential der Bauteile fest. Da die bestehende Primärstruktur des Sitzes in ihrer Form bereits sehr weit optimiert war, wurde entschlossen ein neues Konzept für einen Fluggastsitz zu entwickeln.

Durch iteratives Arbeiten und enge Zusammenarbeit mit der Designabteilung wurden schrittweise Änderungen der Bauteile vorgenommen und neue Bauteile ausgelegt. Es wurden stets die Lastpfade jedes neuen durchdachten Bauteils untersucht, um von Anfang an die kritischen Stellen zu erkennen und eine Orientierung für weitere Änderungen zu gewinnen. Anhand von Optimierungsergebnissen konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden und diese wurden in der weiteren Konzeptentwicklung verwendet.

So wurde in einer Art Trial-and-Error-Prinzip mit Optimierungsschleifen das neue Konzept ausgereizt. Mithilfe von rechnerunterstützten Optimierungsverfahren konnten Konzeptideen gleich in ihrer optimalsten Form umgesetzt werden. Die neu entwickelte Primärstruktur des Flugzeugsitzes würde in einer dreifachen Sitzkonfiguration folgendermaßen aussehen:



Abbildung 128: Ansichten des neu entwickelten Flugzeugsitzes

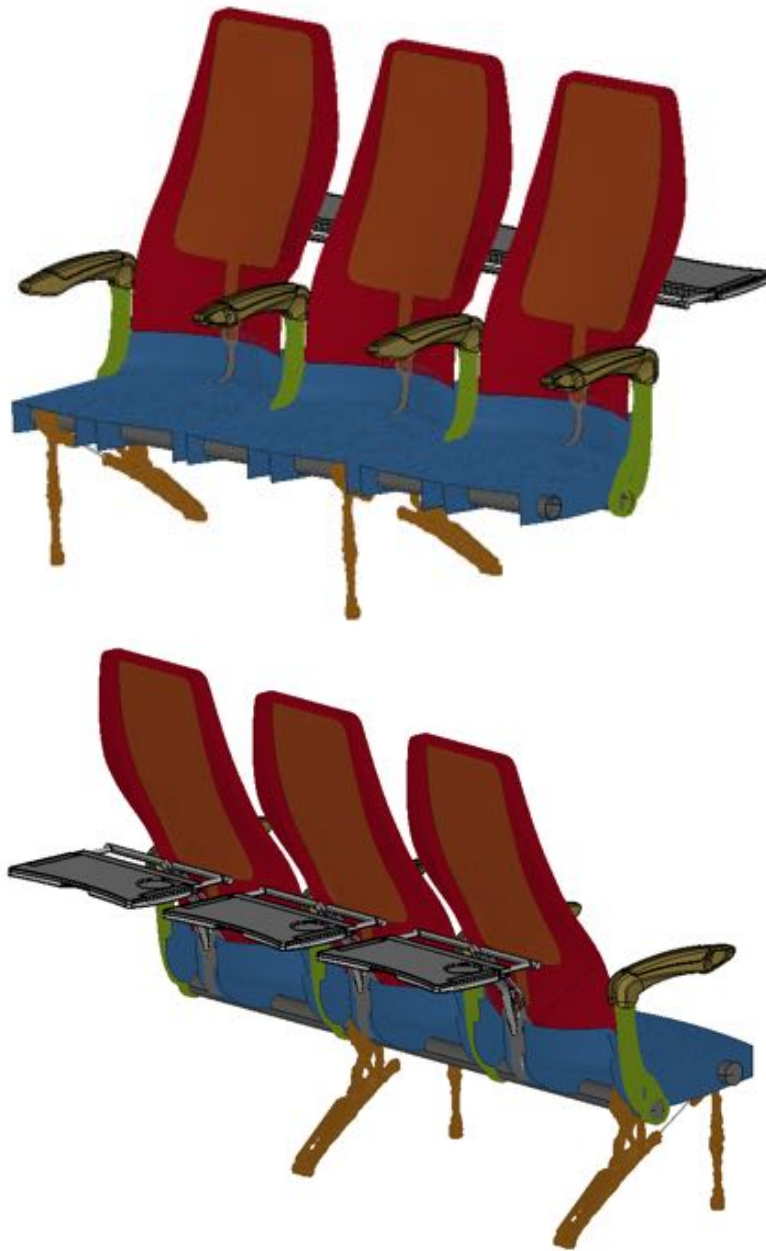


Abbildung 129: Isometrische Ansichten des neu entwickelten Flugzeugsitzes

Wenn man das neue Sitzkonzept mit dem bestehenden vergleicht (Abbildung 17), stellt man fest, dass vor allem die Rückenlehne und Sitzschale deutlich anders sind. Die Sitzschale im neuen Sitz läuft kontinuierlich und lückenlos in die Rückenlehne über. Die Idee hinter dieses Merkmal ist eventuell die Rückenlehne und Sitzschale so zu modellieren beziehungsweise konstruieren, so dass man auf die hintere Kunststoffabdeckung verzichten kann.

Wenn die CFK-Rückenlehne und Sitzschale die optischen Anforderungen der Kunststoff Covers erfüllen, kann die tragende Struktur bis an die Oberfläche gebracht werden und in ein tragendes Außenskeleton umgewandelt werden. Kunststoffabdeckungen tragen ca. 10% des Gesamtgewichts in einem Flugzeugsitz bei [15]. Durch Weglassen von diesen Covers würde man also eine Verbesserung des Gesamtgewichts von 10% erzielen.

10.1 Gewicht

Das Gewicht der tragenden Struktur einer dreifachen Sitzreihe lässt sich folgendermaßen zusammenstellen:

Anzahl der Bauteile	Bauteil	Bauteilgewicht	Gesamtgewicht
3	Rückenlehne	1,04 kg	3,12 kg
3	Sitzschale	0,610 kg	1,83 kg
3	Tischarm	0,357 kg	1,071 kg
4	Armlehnenenträger	0,330 kg	1,32 kg
2	Tragrohr	1,3 kg	2,6 kg
2	Sitzfuß	0,746 kg	1,492 kg
	Dreier Sitzreihe		11,433 kg

Tabelle 5: Bauteile und Gewicht des neuen Sitzkonzeptes

Die Primärstruktur des alten Sitzes besitzt folgende Bauteile:

Anzahl der Bauteile	Bauteil	Bauteilgewicht	Gesamtgewicht
3	Rückenlehne	1,2 kg	3,6 kg
3	Sitztrapez	N/A	N/A
3	2xTischarme	0,242 kg	0,726 kg
4	Sitzteiler	0,793 kg	3,692 kg
2	Tragrohr	1,3 kg	2,6 kg
2	Sitzfuß	0,809 kg	1,618 kg
	Dreier Sitzreihe		12,236 kg

Tabelle 6: Bauteile und Gewicht der bestehenden Primärstruktur

Im Gesamtgewicht wurde eine **Gewichtsoptimierung von 0,803 kg** erzielt. Dieser Vergleich des Gewichtes und somit die Gewichtsreduktion selbst ist aber mit Vorsicht zu genießen. In dem neuen Sitzkonzept handelt es sich nämlich um Bauteile, die sich in ihren ersten Entwicklungsphasen befinden. Mittels Optimierungsverfahren kann ein Näherungswert des Gewichts für jedes Bauteil berechnet werden. Dieser kann sich aber in den nachfolgenden Feintuning-Phasen und Engineeringphasen noch ändern.

10.2 Living Space

Es ist auch gut gelungen den Living Space, besonders im Kniebereich, zu optimieren. In den nachstehenden Abbildungen wird ein Vergleich der Position des alten Sitzteilers mit dem neuen Sitzkonzept dargestellt. In Abbildung 130 erkennt man den alten Sitzteiler (rot) und das neue Sitzkonzept (grau). Es wurde eine **Living Space Optimierung von bis zu 80mm** erzielt.

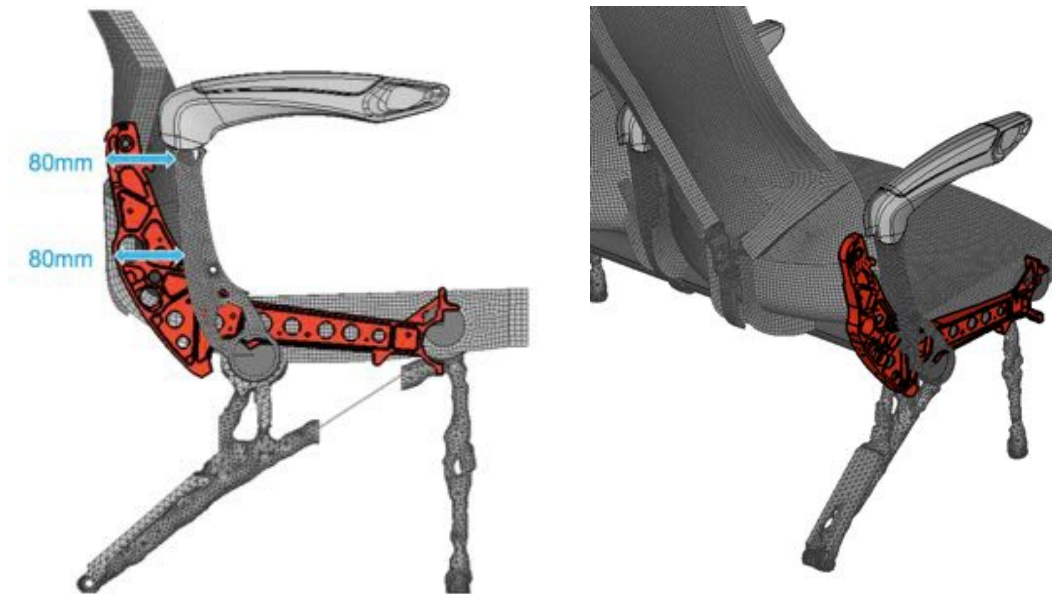


Abbildung 130: Living Space Optimierung - Vergleich mit dem alten Sitzteiler (rot)

Durch das Verschieben der tragenden Elemente zur Mitte des Sitzes konnte diese Verbesserung des Living Space im Kniebereich gemacht werden. In der Abbildung 130 kann man weiters erkennen, dass der hinterste Punkt des Sitzes im neuen Konzept auf derselben Höhe oder sogar wenige Millimeter weiter außen als der alte Sitzteiler steht. Allerdings steht dieser Punkt im mittleren Bereich des Sitzes und stört somit nicht den Kniebereich einer normal sitzenden Person (Abbildung 131).

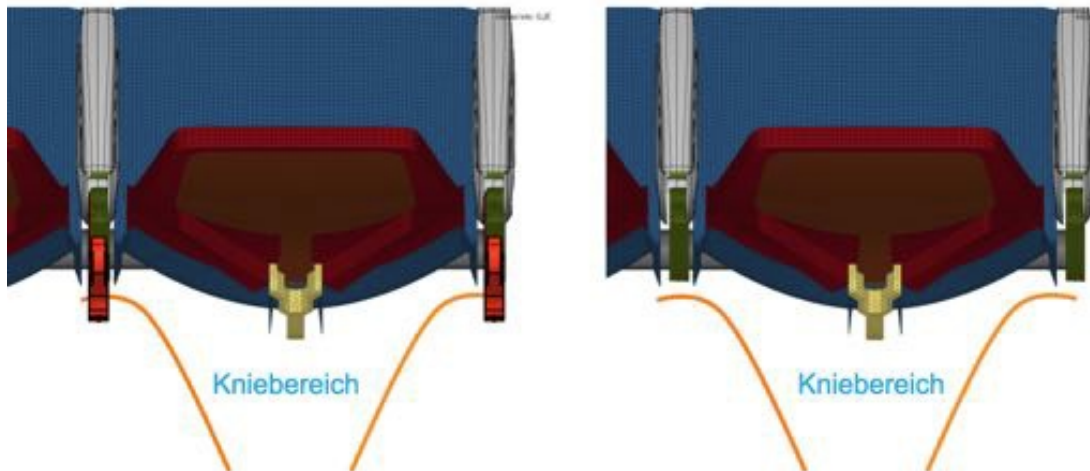


Abbildung 131: Living Space Optimierung im Kniebereich (Draufsicht): links mit den alten Sitzteilern und rechts im neuen Konzept

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Konzeptentwicklung des neuen Flugzeugsitzes gute Ergebnisse und Erkenntnisse geleistet hat. Obwohl das Ganze eine erste Konzeptfindung war, konnten bereits erste Modellvalidierungen mittels rechnerunterstützten Optimierungsverfahren durchgeführt werden.

Die Kräfte, Randbedingungen und Lastfälle wurden aus den Zertifizierungstests abgeleitet. Dies ersetzt in keinem Fall eine Zertifizierung des Flugzeugsitzes. Die Ergebnisse stellen aber eine gute Grundbasis für das weitere Entwickeln und Engineering der Bauteile dar. Durch das frühe Einbeziehen von Design und Optimierungen befinden sich die ersten Konzeptbauteile bereits in einem optimierten Zustand.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Peter Miehke: Der Fluggastsitz - vom Konzept zum Produkt, DGRL-Praxis-Seminar Luftfahrt, HAW Hamburg, Oktober 2005, <http://hamburg.dglr.de>
- [2] Prasannakumar Bhonge: A methodology for aircraft seat certification by dynamic finite element analysis, 2008.
- [3] Frank-H. Schoenenberg, C. Majunke: Der Fluggastsitz - Schnittstelle zwischen Passagier (kunde) und Flugzeug, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt in DGLR-Bericht, 123-132, Flugzeugkabine/ Kabinensysteme - die nächsten Schritte, 2001, ISBN: 3932182154
- [4] C. Olschinka, A. Schumacher, D. Riedel: Dynamic Simulation of Flight Passenger Seats, Passive Sicherheit II, 5. LS-DYNA Anwenderforum, 2006, <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum06/passive-safety>
- [5] N. Dhole, V. Yadav, G. Olivares: Certification by Analysis of a Typical Aircraft Seat, 12th International LS-DYNA Users Conference, 2012, <http://www.dynalook.com/international-conf-2012>
- [6] Advisory Circular 25.562-1B - Dynamic Evaluation of Seat Restraint Systems and Occupant Protection on Transport Airplanes / with Change 1, 2006, https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/22657
- [7] Altair, HyperWorks 14.0, <http://www.altairhyperworks.com/hw14/>
- [8] Altair University: Practical Aspects of Structural Optimization - a study guide, 2015
- [9] Helmut Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Verlag: Springer, ISBN: 9783540721895
- [10] Markus Kriesch, André Wehr: Composite Optimization with OptiStruct 11.0 on the example of a Formula-Student-Monocoque, 2016, <http://www.altairuniversity.com/learning-library/hyperworks-11-0-composite-optimization-tutorial-formula-student-monocoque/>

- [11] Altair: Optistruct Composites - Project Carbon Skateboard, 2007, http://www.altairuniversity.com/wp-content/uploads/2013/07/Skateboard_tutorial_Prakash_MGJuly1.pdf
- [12] ZIM Flugsitz GmbH: Component Test Plan - ECO 01, Doc.-No. 500801-TEP-008, 2012
- [13] Milan Jirasek, Zdenek P. Bazant: Inelastic Analysis of Structures, Verlag: John Wiley & Sons, 2002, ISBN: 9780471987161
- [14] M.H. Dato: Mechanics of Fibrous Composites, Verlag: Springer Science & Business Media, 2012, ISBN: 9789401136709
- [15] ZIM Flugsitz GmbH, Uwe Salzer: Lightweight aircraft seat, 2011

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sitzplan in einem Airbus A330-300 - Economy Class, Economy Plus Class und Business Class	2
Abbildung 2: Economy Sitz CL3710 von Recaro Aircraft Seating	3
Abbildung 3: Business-Class-Sitz CL4400 von Recaro Aircraft Seating	3
Abbildung 4: Living Space [1].....	4
Abbildung 5: Sitzabstände der verschiedenen Fluglinien	4
Abbildung 6: Bauteile - Sitzreihe [1].....	5
Abbildung 7: Bauteile - Tragende Struktur [1].....	5
Abbildung 8: Hierarchie der Vorschriften [1]	9
Abbildung 9: Koordinatensystem und Achsen des Flugzeugsitzes	10
Abbildung 10: Dynamischer Test1: 14g down (links) und Test2: 16g forward (rechts) [6]	11
Abbildung 11: Simulation der Verformung des Bodens bei einem einzelnen Sitz [6]	12
Abbildung 12: Simulation der Verformung des Bodens bei einer Sitzreihe [6]	12
Abbildung 13: (a) Unidirektionale Schicht, (b) Mehrschichtenverbund aus miteinander verklebten Einzelschichten bestehend [9].....	18
Abbildung 14: Phasen einer Composite-Optimierung	19
Abbildung 15: Size-Optimierung der einzelnen CFK-Lagen [11]	21
Abbildung 16: Schuffle - Stapelungsreihenfolgenoptimierung	22
Abbildung 17: Bestehender Fluggastsitz und Komponente	23
Abbildung 18: Bestehende Sitzstruktur - 3 Hauptansichten.....	23
Abbildung 19: Sitzteiler / Spreader.....	24
Abbildung 20: Sitzfußstruktur	25
Abbildung 21: Verstellbarkeit der Sitzfüße	26
Abbildung 22: Vereinfachung der Rückenlehne - gerade und gekrümmt	29
Abbildung 23: SPC und Kräfte - gerade Rückenlehne.....	30
Abbildung 24: SPC und Kräfte - gekrümmte Rückenlehne	31
Abbildung 25: Ergebnis Rückenlehne - gerade und einseitig belastet.....	31
Abbildung 26: Ergebnis Rückenlehne - gerade und beidseitig belastet.....	32
Abbildung 27: Ergebnis Rückenlehne - gekrümmt und beidseitig belastet	32
Abbildung 28: Ergebnis Rückenlehne - gerade, beidseitig belastet und mittige Rückstellung.....	33
Abbildung 29: Ergebnis Rückenlehne - gekrümmt, beidseitig belastet und mittige Rückstellung.....	33
Abbildung 30: Ergebnis Rückenlehne - gekrümmt, beidseitig belastet und beidseitige Rückstellung.....	34
Abbildung 31: Ergebnis Rückenlehne - Lagerung unterhalb des Sitzes	34

Abbildung 32: Lagerung unterhalb des Sitzes - Vergleich des Drehpunktes mit der Originalrückenlehne (rechts)	35
Abbildung 33: Ergebnis Rückenlehne - Schalenelemente - Lagerung unterhalb des Sitzes	35
Abbildung 34: Ergebnis Rückenlehne - Schalenelemente - bestehende Rückenlehne	36
Abbildung 35: Vereinfachung der Sitzteiler	36
Abbildung 36: SPC und Kräfte - Sitzteiler	38
Abbildung 37: Ergebnis Sitzteiler	39
Abbildung 38: Vergleich des Ergebnisses mit dem bestehenden Sitzteiler (a).....	39
Abbildung 39: Vergleich des Ergebnisses mit dem bestehenden Sitzteiler (b).....	40
Abbildung 40: neue Krafteinleitungspunkte.....	40
Abbildung 41: Ergebnis Sitzteiler - Tragrohre zur Mitte Verschoben	41
Abbildung 42: Ergebnis Sitzteiler - Tragrohre zur Mitte und nach unten verschoben	41
Abbildung 43: Ergebnis Sitzteiler - nur ein Tragrohr	41
Abbildung 44: Ergebnis Sitzteiler - Design-Space größer.....	42
Abbildung 45: Ergebnis Sitzteiler - Vergleich der Design-Spaces und Lastpfade	42
Abbildung 46: Vereinfachung der Sitzfüße, SPC und Kräfte.....	43
Abbildung 47: Sitzfuß - Verschiedene Lastfälle und isometrische Ansicht	44
Abbildung 48: Ergebnis Sitzfuß.....	44
Abbildung 49: Ergebnis Sitzfuß und Sitzteiler - Vergleich mit der bestehenden Sitzstruktur	45
Abbildung 50: Rückenlehne - CFK Modell	46
Abbildung 51: Beispiel für eine Sandwichkonstruktion mit einem Schaumstoffkern .	47
Abbildung 52: Rückenlehne - Composite-Optimierung: Element-Dicke.....	49
Abbildung 53: Rückenlehne - Composite-Optimierung: Struktur (links) und Innenlagen (rechts)	49
Abbildung 54: Rückenlehne - Composite-Optimierung ohne Schaumstofflage	50
Abbildung 55: Sitzanordnungskonzepte ,.....	52
Abbildung 56: Kompakte Sitzstruktur	53
Abbildung 57: Hochklappbarer Sitzboden	53
Abbildung 58: klein dimensionierte Rückenlehnenlagerung von Recaro	54
Abbildung 59: ZIM Flugsitz - ECO0 Unique	54
Abbildung 60: Non-reclining Rückenlehne - Monarch Airlines	54
Abbildung 61: Ultra Light Seats - Expliseat (links) und Zodiac Aerospace Hexcel (rechts).....	55
Abbildung 62: The Morph - Innenstruktur	55
Abbildung 63: The Morph - mögliche Breitenkonfigurationen ¹⁶	56
Abbildung 64: Armlehnenkonzept - Panasonic Quantum Seat	56
Abbildung 65: Nicht hochklappbare Armlehne	57
Abbildung 66: Geteilte Armlehnenkonzepte	57

Abbildung 67: Ergonomischer Sitz - Yanko Design	57
Abbildung 68: Sitzteiler und Rückenlehne im Kniebereich ,.....	58
Abbildung 69: Kniefreiheitsverbesserung durch größere Krümmung der Rückenlehne	58
Abbildung 70: Bürosessel	59
Abbildung 71: Drehpunkt der Rückenlehne bei einem Bürosessel	59
Abbildung 72: Sitzteiler zur Mitte verschoben	60
Abbildung 73: Rückenlehnentragarm.....	61
Abbildung 74: Sitzkonzept mit mittigen Tragarm und zwei Tragrohre.....	62
Abbildung 75: Mögliche Bauteile für Sitzkonzept.....	63
Abbildung 76: Rückenlehnentragarm mit Befestigung und Lagerung.....	63
Abbildung 77: Modell - Sitzteiler mit Tragarm verbunden	64
Abbildung 78: Ergebnis - Sitzteiler mit Tragarm verbunden.....	65
Abbildung 79: Erstes Modell - Sitzboden aus CFK	66
Abbildung 80: Ergebnis - Sitz aus CFK.....	67
Abbildung 81: Skizze - Sitzstruktur mit Sitzboden aus CFK.....	68
Abbildung 82: Konzept für Armlehne ohne Sitzteiler.....	68
Abbildung 83: Konzepte für die Armlehne mit einem CFK-Sitz.....	69
Abbildung 84: Neues Flugzeugsitzkonzept - isometrische Ansicht vorne.....	69
Abbildung 85: Neues Flugzeugsitzkonzept - isometrische Ansicht hinten.....	70
Abbildung 86: Rückenlehnenmodell - Composite-Optimierung: A) Bereiche und Komponente, B) Kräfte und Randbedingungen	71
Abbildung 87: Lastfälle - Rückenlehne: A) nach hinten - Limit Load / Ultimate Load, B) nach vorne - Limit Load / Ultimate Load und C) zur Seite - Limit Load / Ultimate Load	72
Abbildung 88: Ergebnis der Rückenlehne - Composite-Optimierung - 0°, 45°, -45°, 90°	73
Abbildung 89: Schnitt- und Detailansicht der CFK-Lagen.....	73
Abbildung 90: Ergebnis der Rückenlehne - Composite-Optimierung - 0°, 30°, -30°, 45°, -45°, 60°, -60°, 90°.....	74
Abbildung 91: Detailansicht der CFK-Lagen	75
Abbildung 92: Endgültiges Modell der Rückenlehne mit Rahmenstruktur	76
Abbildung 93: A) Design-Space (blau) und NonDesign-Space (lila), B) Insert und C) Rahmen im Insert-Bereich	76
Abbildung 94: Optimierte Rückenlehne mit Rahmen - Elementdicke	77
Abbildung 95: Laminatdicke der Rückenlehne - andere Skala	77
Abbildung 96: Schnitt- und Detailansicht des Laminats im Rahmen und NonDesign- Space	78
Abbildung 97: Modell der Sitzschale - erster Optimierungsversuch.....	80
Abbildung 98: Elementdicke - Sitzschale ohne Verstärkungen.....	80
Abbildung 99: Anfangsmodell der Sitzschale mit Verstärkungen.....	81

Abbildung 100: Ergebnis - Sitzschale: Isometrische Ansicht von oben	82
Abbildung 101: Ergebnis - Sitzschale: Isometrische Ansicht von unten	82
Abbildung 102: Detailansicht des Laminats im Bereich der Verstärkungsrippen - Ansicht von hinten.....	82
Abbildung 103: Modell des Armlehnenträgers für die Topologieoptimierung	83
Abbildung 104: Ergebnis der Topologieoptimierung - Armlehnenträger	84
Abbildung 105: Schnittebene des Armlehnenträgers - Hohlstruktur	84
Abbildung 106: Bolzenverbindung des Armlehnenträgers	85
Abbildung 107: Modell für die Topologieoptimierung des Tischarms.....	86
Abbildung 108: Ergebnis der Topologieoptimierung - Tischarm	86
Abbildung 109: Kräfte an den Sitzfüßen	87
Abbildung 110: Modell für die Topologieoptimierung der Sitzfüße (einteilig).....	88
Abbildung 111: Ergebnis der Topologieoptimierung - Sitzfuß (einteilig)	88
Abbildung 112: Modell für die Topologieoptimierung der Sitzfüße (geteilt mit Diagonalstrebe).....	89
Abbildung 113: Ergebnis der Topologieoptimierung - Sitzfuß (geteilt).....	89
Abbildung 114: Modell, Kräfte und SPC der CFK-Rückenlehne für die FEA.....	91
Abbildung 115: Ergebnis FEA - Verschiebung im Lastfall 1.....	92
Abbildung 116: Ergebnis FEA - Verschiebung im Lastfall 3.....	93
Abbildung 117: Ergebnis FEA - Verschiebung im Lastfall 5.....	93
Abbildung 118: Ergebnis FEA - Composite Failure im Lastfall 2	94
Abbildung 119: Composite Failure: Kritische Stelle - Lastfall 2.....	94
Abbildung 120: Ergebnis FEA - Composite Failure im Lastfall 4	95
Abbildung 121: Composite Failure: Kritische Stelle - Lastfall 4.....	96
Abbildung 122: Ergebnis FEA - Composite Failure im Lastfall 6	96
Abbildung 123: Composite Failure: Kritische Stelle - Lastfall 6.....	97
Abbildung 124: Insert der CFK-Rückenlehne - erste Konzeptidee	98
Abbildung 125: Insert im Laminat.....	98
Abbildung 126: mögliches neue Konzept vom Insert.....	99
Abbildung 127: bestehendes Insert auf der Seite der Rückstellung	99
Abbildung 128: Ansichten des neu entwickelten Flugzeugsitzes.....	100
Abbildung 129: Isometrische Ansichten des neu entwickelten Flugzeugsitzes	101
Abbildung 130: Living Space Optimierung - Vergleich mit dem alten Sitzteiler (rot)	103
Abbildung 131: Living Space Optimierung im Kniebereich (Draufsicht): links mit den alten Sitzteilern und rechts im neuen Konzept.....	104

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lastfälle - Sitzteiler	38
Tabelle 2: CFK - Materialeigenschaften	48
Tabelle 3: Rohacell - Schaumstoff Materialeigenschaften	48
Tabelle 4: Al-Li 2090 - Aluminiumlegierung Materialeigenschaften	48
Tabelle 5: Bauteile und Gewicht des neuen Sitzkonzeptes	102
Tabelle 6: Bauteile und Gewicht der bestehenden Primärstruktur	102