

# FFS – ELASTISCHE VERSTEIFUNGEN AM BEISPIEL EINER RUMPFKLAPPE

D. Fricke,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts FFS wird eine Bauweise für flexible Rumpfkappenstrukturen an einem Luftfahrzeugrumpf entwickelt. Das als Nurflügler ausgelegte Flugzeug nimmt die Tragflächenschwingungen über Dehnungen im Rumpf auf. Dabei sollen die Spalte zwischen Rumpfstruktur und den Klappen minimal bleiben. Die Klappenstrukturen müssen sich im geschlossenen Zustand mit dem Rumpf dehnen, aber gleichzeitig beim Öffnen biegesteif bleiben. Im ersten Arbeitsschritt wurden verschiedenste vereinfachte parametrisierte versteifte Geometrien aufgebaut und in einer numerischen Parameterstudie auf ihre Dehnbarkeit in der Ebene bei gleichzeitiger guter Biegesteifigkeit überprüft. Mittels dimensionslosen Lasten und homogenen Materialeigenschaften wurden die Modelle verglichen und in Richtung der o.g. Ziele optimiert. Für die optimierten Varianten wurde überprüft, wo die Schwachpunkte liegen und wie sich diese effizient beseitigen lassen. Eine der dahingehend optimierte Struktur besteht aus einer GFK-Grundplatte, auf die CFK-Stringer mit Hilfe eines Silikonkautschuks aufgeklebt werden. Der Kautschuk entkoppelt die Plattendehnung von den Stringern, überträgt jedoch die Biegelasten und lässt somit eine flexible Versteifung zu. Zudem wurde die Anordnung der Stringer modifiziert, um bei gleichbleibender Steifigkeit auf Kreuzungspunkte verzichten zu können. Zur Qualifizierung wurde ein Probenprogramm entworfen und getestet. Anschließend wurden die Simulationen mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen erweitert. Dabei wurde die Fertigung auf Schwachpunkte überprüft und optimiert.

## 1. EINLEITUNG

Für dieses Teilprojekt des Vorhabens Fortschrittliche Flugzeugstrukturen (FFS) sollen dehnbare, biegesteife und leichte Klappenstrukturen für Luftfahrzeuge entwickelt werden. Bisherige Klappen, wie sie beispielsweise für das Fahrwerk oder bei Militärflugzeugen für den Waffenschacht verwendet werden, befinden sich in der steifen Rumpfstruktur und erfahren somit nur geringe Dehnungen. Die Referenzstruktur von FFS ist eine Nurflügler-Konfiguration, bei welcher der Rumpf durch Dehnung die Schwingungen der Tragflächen aufnimmt. Bei traditionellen Klappen würden dadurch die Spalte zwischen Klappe und Rumpf vergrößert werden, was die aerodynamischen und bei Militäranwendungen die Tarneigenschaften verschlechtert.

Zur Lösung dieser Problematik existieren drei verschiedene Ansätze. Einerseits kann die Rumpfstruktur durch zusätzliche Versteifungen um die Öffnung so modifiziert werden, dass die Dehnungen in diesem Bereich reduziert werden. Beim zweiten Ansatz wird ein Übergangsbereich zwischen Klappen und Rumpf konstruiert, in dem die beiden Strukturen übereinander gleiten können, ohne dass dabei relevante Spalte entstehen. Das dritte Konzept, das in diesem Projekt genauer untersucht wurde, besteht aus dehnbaren Klappen, die im geschlossenen Zustand die Dehnungen des Rumpfes kompensieren können. Die geöffneten Klappen müssen dennoch biegesteif genug sein, um der Belastung durch Strömung und Flugmanöver standzuhalten. Um diese Randbedingungen zu erfüllen, wurden verschiedene Bauweisen und Werkstoffe numerisch und experimentell untersucht und miteinander verglichen.

## 2. KONZEPTE UND OPTIMIERUNGEN

Die ebenen Klappen sollen drei Bedingungen erfüllen: sie sollen in der Ebene leicht dehnbare, biegesteife und leicht sein. Um die grundlegende Anforderung der Dehnbarkeit zu erfüllen, dient eine ebene, dünne Platte aus einem dehnbaren Material als Basis für alle Modelle. Diese Platte wird mit verschiedenen Bauweisen und Werkstoffen versteift, um die Dehnbarkeit möglichst wenig zu beeinflussen und das Gewicht zu reduzieren.

Zur Untersuchung der Varianten wird eine Reihe von Optimierungssimulationen aufgesetzt. Diese Simulationen variieren für eine gegebene Bauweisenvariante verschiedene geometrische und Werkstoff-Parameter. Die automatisch erstellten Geometrien werden in zwei getrennten numerischen Rechnungen mit einer Dehn- und einer Biegelast belastet. Bei den Ergebnissen wird geprüft, ob die maximalen Spannungen innerhalb eines vorgegebenen Sicherheitsbereichs liegen. Alle Varianten, für die dies zutrifft, werden über einen Optimierungsalgorithmus verglichen. Ziel der Optimierung ist, die Kandidaten mit der maximalen sicheren Dehnungslast, minimalen Biegung und minimalem Gewicht zu finden.

### 2.1. Versteifungsvarianten

Um die Anzahl der nötigen Rechnungen zu minimieren, werden die Simulationen in zwei Gruppen aufgeteilt. Bei den Strukturmodellen wird die Geometrie mit mehreren Parametern variiert. Die exakte Parameterart variiert je nach verwendetem Grundmodell. Als Werkstoff dient für alle Geometrien eine generische Aluminiumlegierung. Bei den Werkstoffmodellen werden die verwendeten Werkstoff-

fe variiert, während die Geometrie eine Sandwichstruktur mit minimal variablen Parametern ist.

Die Strukturmodelle teilen sich wiederum in mehrere Grundmodelle auf, bei denen diverse Parameter variiert werden. Die verwendeten Grundmodelle und ihre Parameter sind folgend aufgelistet.

Als Rippen werden parallele Platten, die über ein sich kreuzendes Muster aus Versteifungsstegen miteinander verbunden sind, bezeichnet. Dabei sind der Abstand der parallelen Rippen voneinander, die Rippen- und Deckplattendicke, der Winkel der Rippen zueinander und ihre Höhe Parameter, die bei der Optimierung variiert werden.

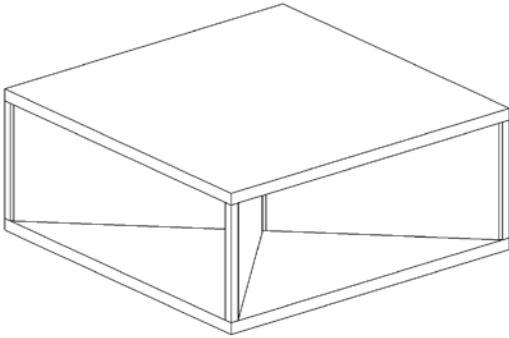


BILD 1. Schematische Darstellung eines Rippenabschnitts

T-Stringer bilden ein sich kreuzendes Muster auf einer einzelnen Grundplatte. Variiert wird zusätzlich zu den Parametern der Rippen auch die Breite des Stringergurts.

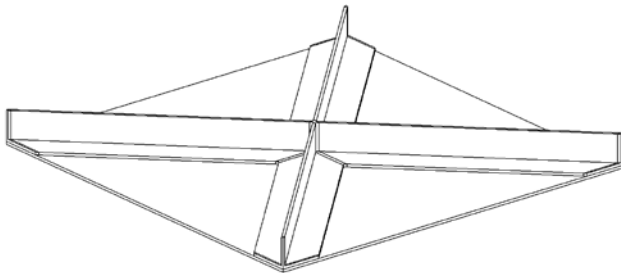


BILD 2. Schematische Darstellung eines T-Stringermodells

Das I-Stringer-Modell unterscheidet sich vom T-Stringer-Modell durch den zweiten Gurt.

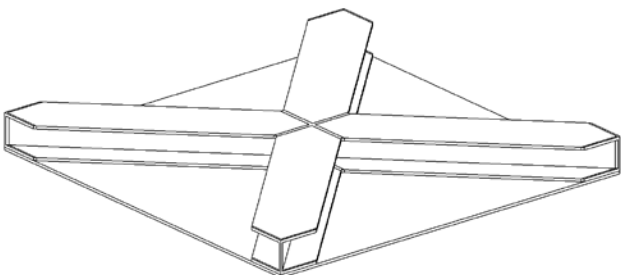


BILD 3. Schematische Darstellung eines I-Stringermodells

Bei dem Omega-Stringer-Modell wird auf sich kreuzende Stringer gesetzt. Allerdings sorgt die Form der Omega-Stringer für eine andere Parametereinteilung. Neben dem Stringerwinkel und der Decklagen- und Stringerdicke

werden die Gesamtbreite sowie die Breite des oberen Segments des Stringers und der Omega-Winkel variiert.

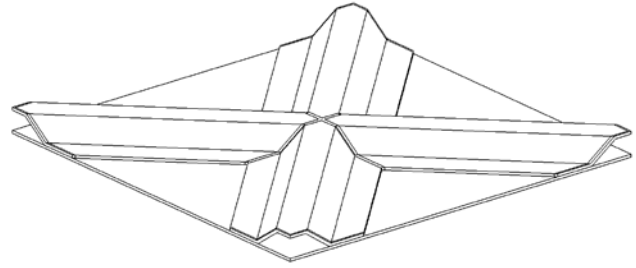


BILD 4. Schematische Darstellung eines Omega-Stringermodells

Den Abschluss und gleichzeitig den Übergang zu den Werkstoffmodellen bildet eine klassische Sandwich-Konstruktion. Im Gegensatz zu den übrigen Modellen wird für den Kern ein Extra-Werkstoff verwendet. Es wird ein PVC-Schaum mit einer Dichte von  $80\text{kg/m}^3$  angenommen.

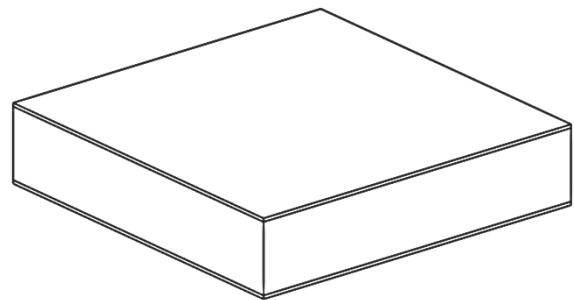


BILD 5. Schematische Darstellung eines Sandwich-Modells

Für die Werkstoffmodelle wird eine einzelne Sandwich-Geometrie verwendet. Die Geometrie bleibt bis auf die Decklagen- und Kerndicken unangetastet. Als Werkstoffe werden dabei GFK, CFK, Aluminium, Titan und Faser-Metall-Lamine für die Decklagen, sowie diverse Schäume und Waben für den Kern simuliert. Bei faserverstärkten Decklagen wird zusätzlich der Lagenaufbau in Grenzen variiert.

## 2.2. Optimierungssimulationen

Die Optimierungssimulationen selbst bestehen aus einer zweiteiligen Analyse in ANSYS. In der Analyse werden iterativ die Eingabeparameter erstellt, in Geometrien umgewandelt, berechnet und die Ausgabeparameter abgespeichert. Über einen voreingestellten Optimierungsalgorithmus werden anschließend neue Eingabeparameter erstellt. Ein Beispiel des Workflows in ANSYS Workbench ist in BILD 6 zu sehen.

### 2.2.1. Aufbau der Simulationen

Die einzelnen Bestandteile der Simulation greifen auf das Parameterset als zentralen Bestandteil zu. Als erster Schritt werden vom Optimierungsalgorithmus die gewünschten Geometrieparameter abgelegt. Diese Parameter werden initial mittels Design-of-Experiments-Methoden im gewünschten Bereich erzeugt. Bei späteren Iterationen wählt der Optimierungsalgorithmus auf Basis der bisherigen Ergebnisse die neuen Parameter aus.

Diese Parameter werden von dem externen CAD-Programm Siemens NX eingelesen und das vorgegebene Grundmodell mit den neuen Parametern variiert. Das

Grundmodell besteht hierbei aus einem Viertel der in den Bildern 1-5 gezeigten Geometrien. Die wegfällenden Teile der Geometrie werden durch Rand- und Symmetrieebedingungen ersetzt. Dies ist in BILD 7 beispielhaft gezeigt

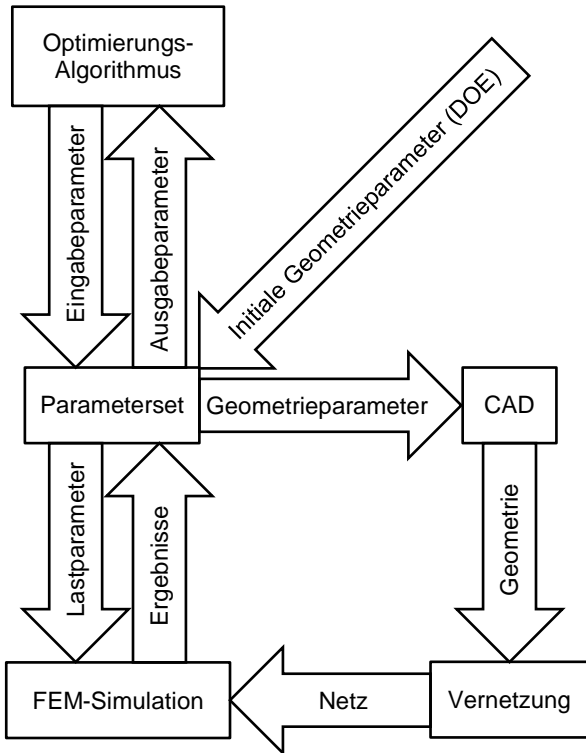


BILD 6. Beispielhafter Workflow einer Simulation

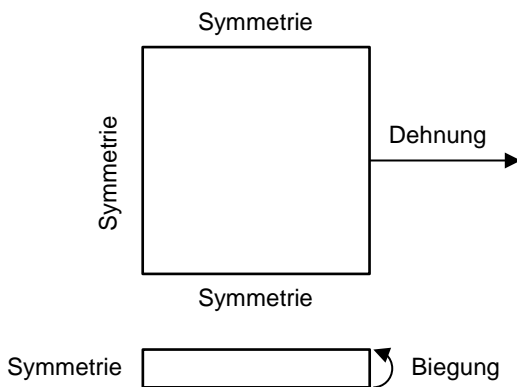


BILD 7. Symmetrie- und Randbedingungen: oben: Dehnungslastfall; unten: Biegungslastfall

Die neue Geometrie wird an ANSYS zurückgegeben und automatisch vernetzt. Dabei wird darauf geachtet, Bereiche mit voraussichtlich hohen Spannungsgradienten feiner zu vernetzen als homogenere Bereiche. Die vernetzte Geometrie wird anschließend an zwei getrennte numerische Analysen weitergegeben, die die beiden Lastfälle Dehnung und Biegung betrachten. Bei beiden Lastfällen werden die äußeren Abmessungen des Geometrieausschnitts gemessen und die Last entsprechend skaliert, so dass bei unterschiedlich großen Geometrien die Vergleichbarkeit gewährleistet bleibt. Gemessen werden bei beiden Simulationen die auf die Bauteilgeometrie normierte Masse, die aufgetragene Last und die Spannung bzw. der Sicherheitsfaktor. Diese Parameter werden wiederum im Parameterset gespeichert.

Die Ausgabeparameter werden vom Optimierungsalgorithmus eingelesen und auf die eingestellten Ziele überprüft und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen. Je nach gewähltem Optimierungsalgorithmus werden direkt neue Eingabeparameter erzeugt oder zunächst eine Response Surface mit verschiedenen Interpolationen zwischen den Ergebnissen erzeugt. Auf Basis der Response Surface können dann ebenfalls vom Algorithmus neue Eingabeparameter erstellt werden. Für die finale Simulation wurde jedoch eine direkte Optimierung mit einem adaptiven Multi-Objective-Algorithmus verwendet. Dieser zeigte eine gute Genauigkeit bei schneller Konvergenz. Wenn sich in den letzten Iterationen keine großen Veränderungen mehr gezeigt haben, beendet der Algorithmus die Optimierung und bestimmt aus den bisherigen Ergebnissen die optimalen Kandidaten für die gesteckten Ziele.

### 2.2.2. Optimierungsergebnisse

Für jedes der oben beschriebenen Grundmodelle wurden Optimierungsrechnungen durchgeführt, so dass jeweils optimale Kandidaten für jedes Modell erstellt wurden. Diese Kandidaten können untereinander verglichen werden.

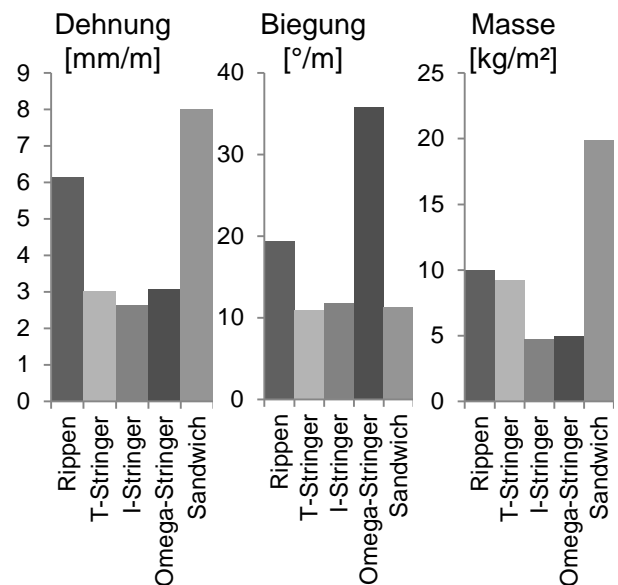


BILD 8. Vergleich der Simulationsergebnisse

Wenn die Reaktion auf die Lastfälle betrachtet wird, schneiden die Sandwich-Varianten am besten ab. Sandwich-Konstruktionen sind sehr biegesteif und dehnbar in der Ebene. Allerdings ist die Konstruktion im Vergleich mit den anderen Geometrien mit Abstand am schwersten. Andere Werkstoffe – wie bei den Werkstoffmodellen untersucht – ändern daran wenig

Die nächste Variante in der Auswahl sind die Rippen. Diese sind in der Ebene sehr dehnbar. Die Biegesteifigkeit ist allerdings im direkten Vergleich niedriger. Diese Variante wird nicht weiter untersucht.

In der Auswahl verbleiben die drei Stringer-Variationen. Die Biegesteifigkeit der Omegastringer ist deutlich niedriger als die der anderen Stringer-Varianten. Dies liegt an den Kreuzungspunkten. Omega Geometrien sind bei einem angewinkelten Übergang zu Nachbarstringern schlecht geeignet. Daher sind die beiden letzten Kandida-

ten die T- und die I-Stringer. Letztere bieten dabei einen deutlichen Gewichtsvorteil bei sonst sehr ähnlichen Ergebnissen. Allerdings ist die Fertigung aufwendiger, so dass für die folgenden Betrachtungen die T-Stringer verwendet werden.

### 2.2.3. Verbesserung des Designs

Bei genauerer Betrachtung des ausgewählten T-Stringer-Kandidaten zeigen sich einige Spannungskonzentrationen in der Geometrie. Diese treten vor allem im Dehnungslastfall auf. Bei Biegung zeigen sich ebenfalls Ansätze. Da die Optimierung über die Spannung bzw. den Sicherheitsfaktor erfolgte, verringern derartige Spitzen die maximale Belastbarkeit erheblich. Die Spannungsspitzen zeigen sich an den Kreuzungspunkten der Stringer und an der Anbindung zur Grundplatte. Diese beiden Strukturen bieten Optimierungspotenzial. Im Folgenden werden zwei Konzepte vorgestellt, die die Spannungsspitzen verringern können: die überlappende Stringeranordnung und die flexible Kautschukanbindung.

#### 2.2.3.1. Überlappende Stringeranordnung

An den Kreuzungspunkten der Stringer entstehen bei der Dehnung und bei der Biegung Spannungsüberhöhungen. Im Dehnungslastfall entstehen die Spannungen durch die scherengitterartigen Bewegungen der Stringer gegeneinander. Die Kreuzungspunkte wirken wie Gelenke. Im Biegelastfall sind die Spannungen das Ergebnis der Übertragung der Last, die durch die Biegung im Stringer erzeugt wird, über einen Winkel auf die benachbarten Stringer.

Um die Spannungsspitzen zu beseitigen, bietet es sich an, auf Stringerkreuzungen zu verzichten. Stattdessen kann eine sich überlappende Stringeranordnung für eine hohe Biegesteifigkeit bei niedrigeren Spannungen verwendet werden. In BILD 9 ist das Prinzip schematisch verdeutlicht.

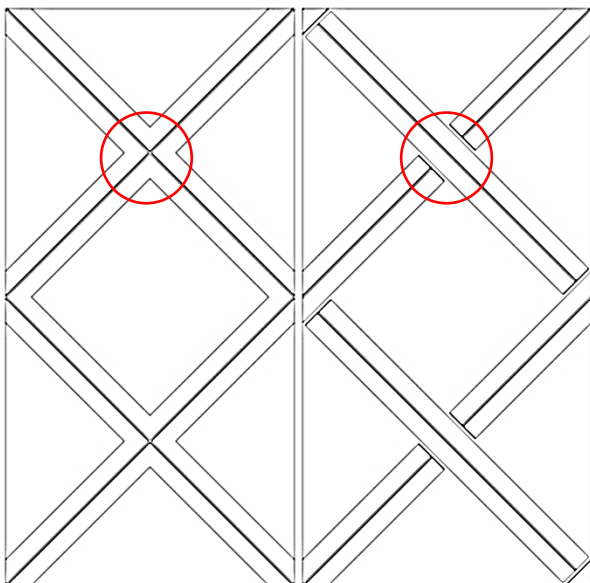


BILD 9. Links: sich kreuzende Stringeranordnung; rechts: sich überlappende Stringeranordnung.

Vergleichssimulationen mit beiden Varianten zeigen bei gleicher Biegebelastung eine vergleichbar große Durchbiegung. Die überlappende Variante ist dabei deutlich niedrigeren Spannungen ausgesetzt.

#### 2.2.3.2. Kautschukanbindung

Die zweite Spannungskonzentration zeigt sich vor allem bei der Dehnungslast im Bereich der Anbindung der Stringer an die Grundplatte. Bei der Längsdehnung der Struktur werden die Stringer in eine scherengitterartige Bewegung gezwungen, die von der Grundplatte behindert wird. Die dabei entstehenden Spannungen reduzieren die maximale Last, die von der Struktur aufgenommen werden kann. Eine feste Anbindung der Stringer an die Grundplatte ist im Biegelastfall erforderlich, um die Versteifungsfunktion zu erfüllen.

Die Anbindung der Stringer muss im Dehnungslastfall die Grundplatte und Stringer voneinander entkoppeln und im Biegelastfall die Kraftübertragung sicherstellen. Das hierfür entwickelte Konzept sieht die Anbindung mittels einer dünnen Silikonkautschukschicht vor. Wird die Grundplatte gedehnt, können sich die Stringer scherengitterartig bewegen, ohne dabei die Grundplatte zu belasten. Bei Biegung ist die Kautschukschicht aber dünn genug, um die Kraft zwischen beiden Komponenten zu übertragen und die Grundplatte mit den Stringern zu versteifen.

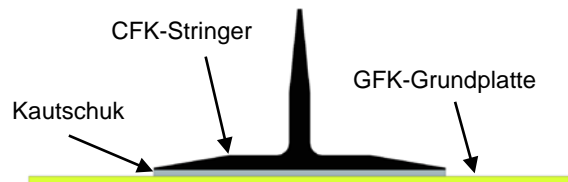


BILD 10. Stringeranbindung mit Kautschuk

Um die Entkopplung der Stringer numerisch nachbilden zu können, wurde ein Materialmodell für den Kautschuk erstellt. Hierbei handelt es sich um ein sehr elastisches Material mit einer experimentell bestimmten Reißdehnung von etwa 300%, das von einem hyperelastischen Materialmodell abgebildet werden kann. ANSYS bietet hierbei mehrere Näherungsmodelle, die auf Basis von experimentellen Daten ein Curve Fitting durchführen und die Kennwerte annähern und extrahieren.

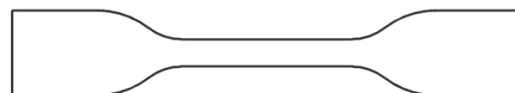


BILD 11. Uniaxiale Kautschuk-Zugprobe

Für ein vollständiges Curve Fitting sind Versuchsdaten aus uniaxialen und biaxialen Zugversuchen sowie aus Planscherversuchen erforderlich. Uniaxiale Zugversuche sind dabei trivial, da lediglich eine reine Kautschukprobe in Form geschnitten und in einer Zugprüfmaschine mit optischem Messsystem getestet werden muss.

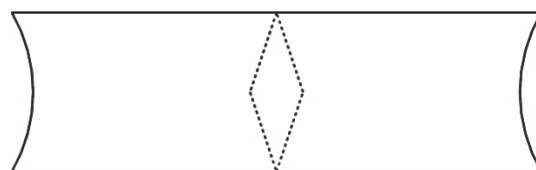


BILD 12. Planscherprobe mit Messbereich; oben: unverformt; unten: verformt

Die Planscherproben hingegen benötigen spezialisierte Einspannvorrichtungen und sind daher komplexer in der Versuchsdurchführung. Sie bestehen aus einer Kautschukprobe, die mindestens zehnmal so breit wie lang ist. Die Probe wird über die gesamte Breite in Richtung der Länge gezogen. Gemessen wird in der Mitte der Probe die um 45° gedrehte Dehnung mittels optischer Messung, da dort ein reiner Schubzustand herrscht.

Für die biaxialen Zugversuche sind keine speziellen Geometrien vorgeschrieben. Möglich sind daher quadratische Proben, die in zwei Richtungen belastet werden und runde Proben mit einer Belastung in alle Richtungen. Die entsprechenden Prüfmaschinen sind allerdings kostspielig und nur in einem begrenzten Rahmen einsetzbar. Eine günstigere Alternative ist ein Scherengitterrahmen mit einer quadratischen Probe, der in eine einachsige Prüfmaschine eingesetzt werden kann. Gemessen wird in jedem Fall optisch die Verzerrung in der Mitte der Probe.

Für die Planscherproben besteht die Möglichkeit, sie durch Single-Lap-Shear-Versuche zu ersetzen. Der Spannungszustand ist dabei nicht direkt vergleichbar.

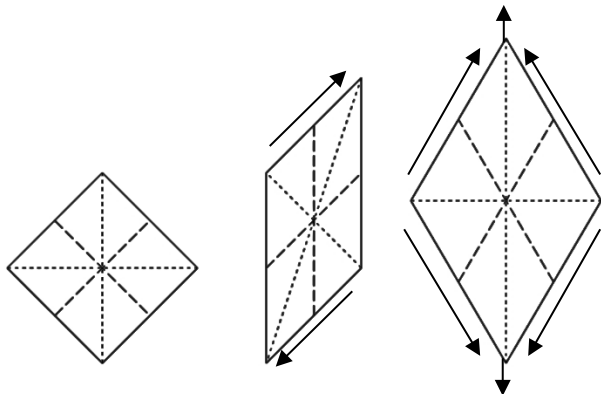


BILD 13. Verzerrung einer quadratischen Fläche vom selben Grundzustand; links: unverformt; Mitte: Single-Lap-Shear; rechts: Planar Shear

Die Planscherproben zeigen in ihrer Mitte durch das um 45° gedrehte Koordinatensystem einen reinen Schubzustand, die Single-Lap-Shear-Proben hingegen besaßen Normalspannungsanteile. Der Schubzustand ist nicht vergleichbar. ANSYS benötigt für das Curve Fitting des hyperelastischen Materialmodells jedoch die Normalspannung in Lastrichtung vom Planscherversuch. Diese ist identisch mit der ersten Hauptspannung. Vergleichssimulationen zeigen, dass der Hauptspannungszustand in beiden Scherprobenvarianten bis zu einer Dehnung von etwa 100% vergleichbar ist. Solange sich die Verformungen innerhalb dieses Bereichs bewegen, kann somit ein Materialmodell basierend auf Single-Lap-Shear-Versuchen verwendet werden. Die zu erwartende Dehnung der Stringeranbindung ist deutlich kleiner. Somit sind aufwendige Planscherversuche nicht erforderlich.

Biaxiale Zugversuche hingegen lassen sich schwieriger substituieren. Bereits erwähnt wurde eine Variante, in der die Probe in einen Scherengitterrahmen eingespannt wird, der wiederum in eine einachsige Zugprüfmaschine integriert wird. Zumindest bei kleinen Verformungen können Vergleichssimulationen zufolge so gewonnene Messwerte verwendet werden.

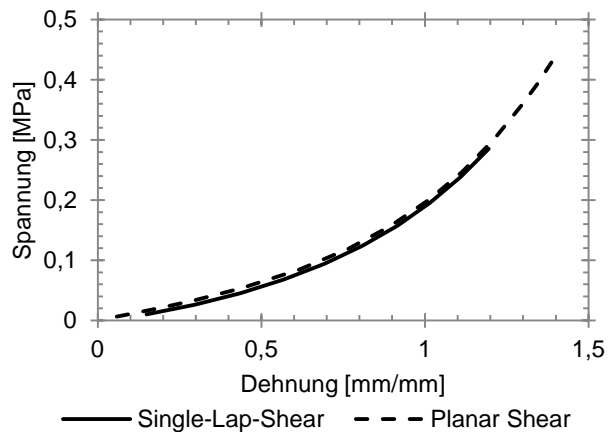


BILD 14. Vergleich der Hauptspannung einer Single-Lap-Shear-Probe und einer Planscherprobe

ANSYS verwendet ein Curve-Fitting-Verfahren, um aus den Versuchsdaten die Materialwerte zu ermitteln. Im vorliegenden Fall wird das Mooney-Rivlin-Verfahren mit drei Parametern verwendet. Es zeigte unter den verfügbaren Modellen die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Versuchsdaten. Dabei ist kein vollständiger Versuchsdatensatz nötig. Da sich die Stringeranbindungen nur um kleine Beträge verformen, ist ein Materialmodell mit zwei Input-Versuchen ausreichend für die Rechnungen. Dies ist in BILD 15 zu sehen.

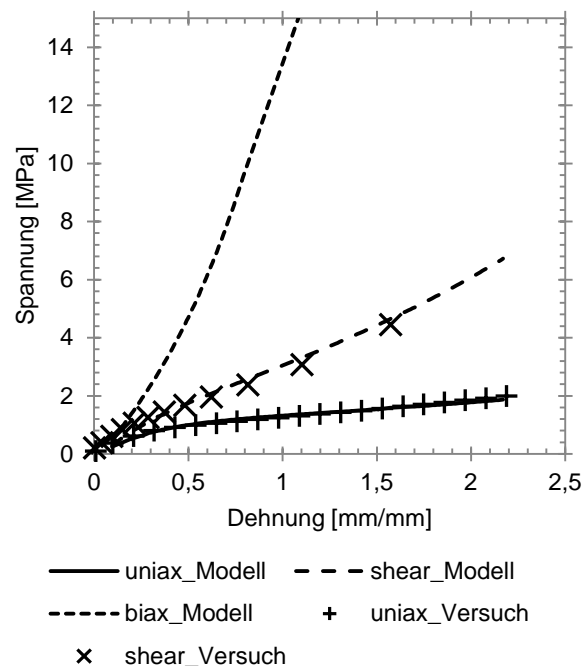


BILD 15. Curve Fitting der vorhandenen Versuchsdaten des Kautschuks

Für das FE-Materialmodell von EPDM wurden einachsige Zugversuche und Single-Lap-Shear-Versuche durchgeführt. Parallel durchgeführte Vergleichssimulationen mit Literaturwerten und den Versuchsergebnissen bestätigten die Gültigkeit des Modells. In BILD 15 sind die eingegebenen Messwerte und das darauf basierende Modell zu sehen

### 3. VERSUCHE UND AUSWERTUNG

Um die Kautschukanbindung der Stringer an die Grundplatte zu untersuchen, wurde eine Reihe von experimentellen Versuchen durchgeführt. Für den weiteren Verlauf muss die Entkopplung der Stringer durch den Kautschuk und die Festigkeit der Anbindung an die Grundplatte nachgewiesen werden.

#### 3.1. Entkopplung der Stringer

Sinn der Kautschukanbindung ist, die Stringer von der Plattendehnung zu entkoppeln und so Spannungsspitzen an der Anbindung zu vermeiden. Bei einer Dehnung der Grundplatte sollte nur eine minimale Dehnung der Stringer feststellbar sein. Um dies nachzuweisen, wurde der erste Probensatz konzipiert. Er besteht aus einer Flachzugprobe aus GFK, auf die mit Kautschuk ein CFK-Doppler aufgeklebt wurde. In BILD 16 ist die Probe exemplarisch dargestellt.

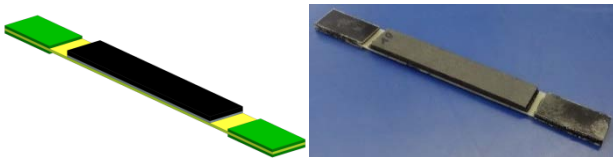


BILD 16. Doppler-Zugprobe aus GFK, Kautschuk und CFK; links: CAD; rechts: gefertigte Probe

Die Proben wurden in Einzelteilen gefertigt und zusammengefügt. Dabei wurden zunächst die Grundplatte und der Doppler separat aufgebaut, wobei während der Infiltration bereits eine dünne Kautschukschicht auf das aushärtende Bauteil vulkanisiert wurde. Nach dem Aushärten und abkühlen wurden die beiden Bauteile mit einer weiteren Kautschukschicht zusammengeklebt, die sich mit den bereits vulkanisierten Schichten auf den Bauteilen verband.

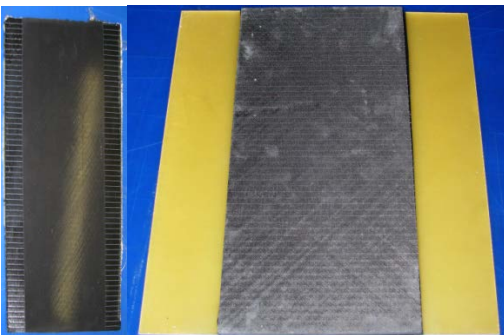


BILD 17. Links: Doppler mit aufvulkanisiertem Kautschuk; rechts: Grundplatte mit aufgelegtem Doppler

Für die Versuche wurden sowohl auf der GFK- als auch auf der CFK Dehnungsmessstreifen aufgeklebt, um die Entkopplung der Dehnung direkt messen zu können. Außerdem wurde optisch die Dehnung der Grundplatte, des Dopplers und auch des Kautschuks aufgenommen. Die Proben wurden bis zur Zerstörung des GFK getestet.

Die optische Dehnungsmessung und die in BILD 19 gezeigten Messwerte der DMS der beiden Komponenten zeigen deutlich, dass der Kautschuk die Grundplatte vom Stringer entkoppeln kann. Die Längsdehnung einer versteiften Klappe ist somit nur von der Dehnbarkeit des Grundplattenmaterials abhängig – in diesem Fall GFK.

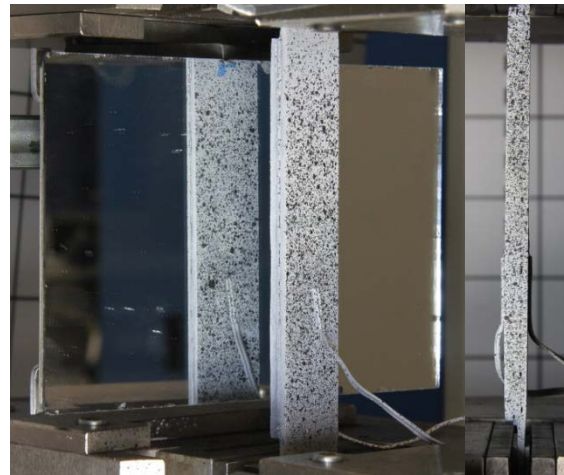


BILD 18. Links: Eingespannte Doppler-Probe mit DMS und Spiegel für die Rückseite; rechts: seitlich eingespannte Doppler-Probe zur Beobachtung der Kautschukverformung

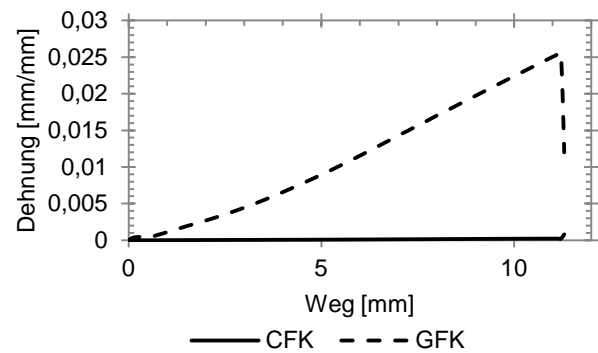


BILD 19. Messwerte der beiden DMS einer Doppler-Probe

#### 3.2. Anbindung der Stringer

Bei einer Anbindung der Stringer an die Grundplatte mittels Kautschuk muss sichergestellt sein, dass über die Anbindung die bei Durchbiegung entstehende Kraft an die Stringer weitergeleitet werden kann. Die Elastizität darf die Versteifung nicht in ihrer Funktion beeinträchtigen, während die Festigkeit der Anbindung hoch genug für die zu übertragenen Kräfte sein muss.

Um die Kraftübertragung und die Festigkeit zu testen, wurden die Stringerproben entworfen. Dabei wurde ein CFK-Stringer mit Kautschuk auf eine ebenso breite GFK-Platte geklebt. Die Probe wurde an den beiden hervorstehenden Enden der Grundplatte eingespannt und am Stringersteg nach oben gezogen. Die Messung der Dehnung erfolgte aufgrund der komplexen Geometrie rein optisch.

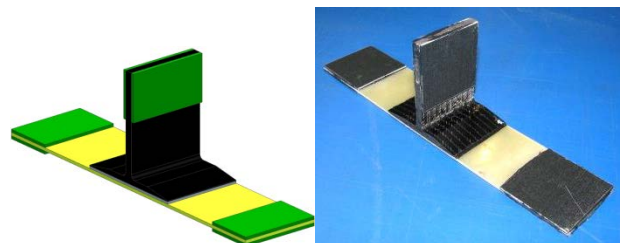


BILD 20. Stringerprobe aus GFK, Kautschuk und CFK; links: CAD; rechts: gefertigte Probe

Die Fertigung erfolgte wie bei den Doppler-Zugproben. Die Grundplatte und die Stringer wurden zusammen mit einer dünnen Kautschukschicht infiltriert und ausgehärtet. Anschließend wurden beide Teile mit einer weiteren Kautschukschicht gefügt. Für die Stringer wurde dabei ein Werkzeug zur Infiltration konzipiert, das eine möglichst gute Verteilung des Harzes und Maßtreue des Bauteils sicherstellen sollte. Das in BILD 21 dargestellte Werkzeug wurde auf einer ebenen Platte in Vakuumfolie verpackt und mit Anschlüssen versehen. Die grünen Bereiche stellen dabei dünne, aus einlagigem CF-PEEK hergestellte Druckbleche dar, die die Oberflächenqualität des Stringers sicherstellen.

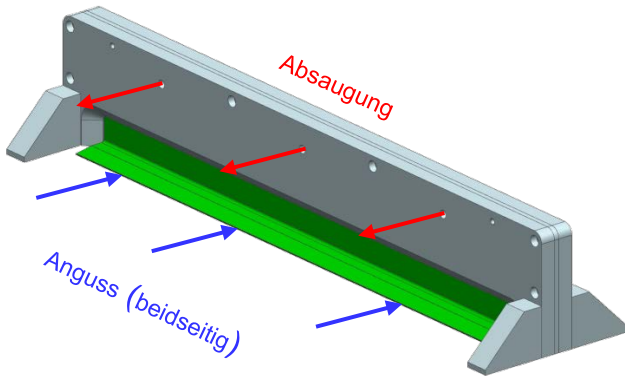


BILD 21. Werkzeug für die Infiltration der Stringer

Der Anguss erfolgte beidseitig unten am Gurt, die Absaugung über Öffnungen im Werkzeug oberhalb der Preform. Das Werkzeug war modular aufgebaut. Dadurch konnten eventuelle Änderungen an Details der Bauteilgeometrie einfacher implementiert werden.

In BILD 22 wird der Fertigungsablauf dargestellt. Die Preform wurde zunächst mit einem thermoplastischen Binder in Form fixiert. Sobald sie in das Werkzeug integriert und auf der Kautschukschicht positioniert wurde, konnte das Werkzeug geschlossen und die Vakuumfolien befestigt werden.

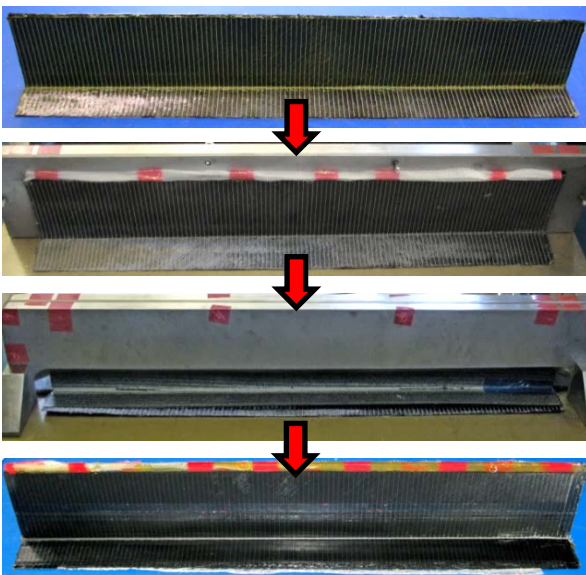


BILD 22. Stringerfertigung: von oben nach unten: Preform alleine; Preform in Werkzeug integriert; geschlossenes Werkzeug mit Druckblechen aus CF-PEEK; entformter Stringer

Bei dem gewählten Lagenaufbau für den Stringer stellte sich nach dem Entformen eine Durchbiegung nach oben ein. Für 50mm lange Stringer war die Durchbiegung im Rahmen der Toleranz. In Hinblick auf den Anwendungsfall mit längeren Stringern kann der Lagenaufbau beispielsweise mit Fertigungs- und Aushärtensimulationen auf eine möglichst hohe Formtreue optimiert werden.

Für den Versuch wurde von vorne auf das Profil wieder ein zufälliges Punktmuster für die optische Dehnungsmessung aufgebracht. Die Grundplatte wurde an den Seiten so eingespannt, dass sie eingeschränkt verrutschen konnte. Dadurch sollten mögliche Spannungsüberhöhungen verringert und die Belastung des Kautschuks die Hauptaufmerksamkeit geschenkt werden können. In BILD 23 ist der Versuchsaufbau dargestellt.



BILD 23. Versuchsaufbau für die Stringerproben

Im Versuch zeigte sich, dass die Proben bereits deutlich früher versagten als in den Simulationen vorhergesagt. Dabei schälte sich der Stringer von außen zur Mitte von der Grundplatte ab. Weder Grundplatte noch Stringer wurden beschädigt.



BILD 24. Versagende Stringerprobe

Die bisherigen Versuche hatten eine deutlich höhere Festigkeit der Anbindung vorhergesagt. In BILD 25 ist zu sehen, dass das Versagen etwa im grünen Bereich bei einer Kautschukdehnung von ungefähr 10-15% auftritt, während vergangene Zugversuche eine Bruchdehnung von etwa 300% ergaben. Vergleichssimulationen (BILD 26) zeigen erst bei einer Reduktion der Anbindungsfestigkeit auf ein Sechstel der Kautschukfestigkeit ein ähnliches Bild.

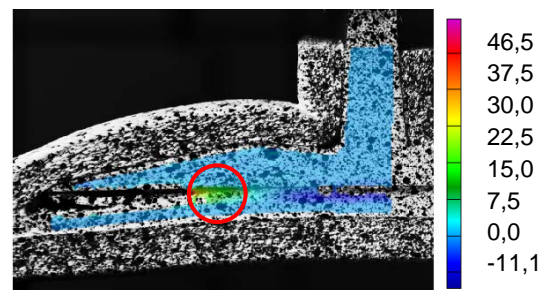


BILD 25. Optische Dehnungsmessung in Zugrichtung beispielhaft an einem Stringer. Der hohe Maximalwert liegt in einem bereits geschädigten Bereich

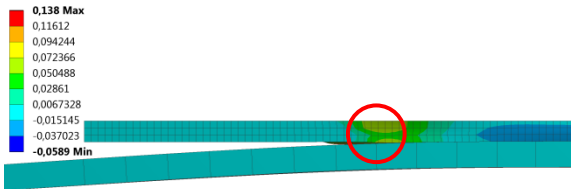


BILD 26. Dehnung des Kautschuks und der Grundplatte einer simulierten Stringerprobe; der Stringer selbst wurde durch Randbedingungen ersetzt

Bei einer Untersuchung der Bruchfläche fällt auf, dass der Kautschuk in sich und nicht am Übergang zum restlichen Bauteil versagt hat. Das Versagen erfolgte im Übergang zwischen einer vorausgehärteten Kautschukschicht und derjenigen, die zum Verkleben verwendet wurde. Auf der Bruchfläche in BILD 27 waren zahlreiche kleine Luft einschlüsse zu erkennen, die die tatsächlich nutzbare Fläche der Anbindung deutlich reduziert hatten.

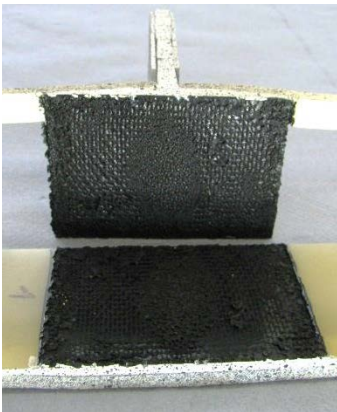


BILD 27. Bruchflächen einer Stringerprobe

Diese Fehlstellen entstanden beim Verkleben durch die natürliche Riffelung der Rohkautschukfolie und dadurch, dass Kautschuk auf Kautschuk luftdicht abschließen und ein Entweichen des Gases nicht gewährleistet werden konnte. Die schichtweise Fertigung der Anbindung war nicht praktikabel. Im Folgenden werden die Anbindung mit einer einzelnen Kautschukschicht sowie ihre Prüfung beschrieben.

### 3.3. Modifizierte Anbindung

In einer modifizierten Variante wurde eine einzelne, dickere Kautschukschicht verwendet. Diese wurde ähnlich einem Klebefilm zwischen den für eine Klebung vorbereiteten Flächen der Bauteile unter Druck vulkanisiert. Durch die unter anderem mit Abreißgewebe vorbehandelten Flächen konnte die Luft aus eventuellen Blasen während der Komprimierung entweichen.

Um die Festigkeit der geänderten Anbindung vor der Fertigung neuer Stringerproben testen zu können, wurden Single-Lap-Shear-Proben mit drei Kautschuklagen als Basis für die bisherige Anbindung gefertigt. Für die neue Anbindung wurden ebenfalls Single-Lap-Shear-Proben mit identischen Abmessungen hergestellt. Durch den Vergleich der beiden Varianten konnte die Güte der neuen Anbindung verifiziert werden.

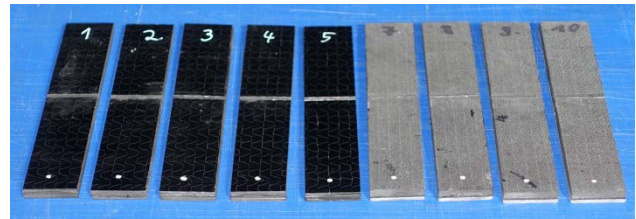


BILD 28. Single-Lap-Shear-Proben

Zusätzlich zur Kraft-Weg-Messung der Prüfmaschine wurde optisch die Dehnung des Kautschuks gemessen. Da eine kleine Überlapplänge von 5mm verwendet wurde, konnte die Dehnung der Platten vernachlässigt werden. Dies wurde durch die optische Dehnungsmessung bestätigt.

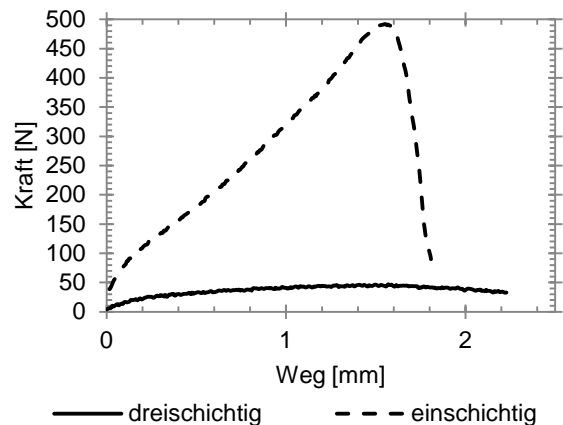


BILD 29. Messwerte von Single-Lap-Shear-Proben

Die erzielten Ergebnisse in BILD 29 zeigen, dass die Anbindung mit einer einzelnen Schicht Kautschuk deutlich fester ist als die mit drei Schichten. Die Versagensart ist ebenfalls eine andere. Beim dreischichtigen Kautschuk gleiten die einzelnen Schichten aneinander vorbei, während der einschichtige Kautschuk sich erst bei höherer Kraft innerhalb eines kurzen Zeitraums von den Grundplatten löst.

## 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel der Arbeiten war es, eine flexible Versteifung für Rumpflappen eines Nurfüglers zu finden. Zu diesem Zweck wurden mehrere Grundstrukturen definiert, die über numerische Simulationen auf maximale Dehnbarkeit und Biegesteifigkeit sowie minimales Gewicht hin optimiert wurden. Als optimales Design stellte sich eine T-Stringer-Konfiguration heraus. Um letzte Spannungsspitzen zu beseitigen, wurden die Kreuzungspunkte der Stringer durch eine überlappende Konfiguration ersetzt und die Anbindung der Stringer an die Grundplatte über einen elastischen Kautschuk realisiert. Über mehrere Versuchsreihen konnte die Eignung des Kautschuks als Anbindung für Versteifungselemente nachgewiesen werden.

Für die endgültige Qualifizierung sind weitere Versuche mit Stringerproben mit der einlagigen Kautschukanbindung geplant. Anschließend soll das Konzept im Demonstratorformat getestet werden.