

FASERVERBUNDGERECHTE BAUWEISEN UND STRUKTURKONZEPTE FÜR FLUGZEUGTÜRUMGEBUNGSSTRUKTUREN

T. Ströhlein, B. Kolesnikov, S. Niemann, A. Lang und Ch. Hühne
DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Zusammenfassung

Die neue Generation von Flugzeugrumpfen großer Passagierflugzeuge aus Faserverbundwerkstoffen basiert ebenfalls wie die Metallrumpfe auf der Semimonocoque-Bauweise. Die Anisotropie der Faserverstärkungen bewirkt jedoch stark unterschiedliche Eigenschaften für die Zug-, Druck- und die Scherbeanspruchung des Faserverbundes in Abhängigkeit von Faserorientierungen bzw. vom Laminataufbau. Die Rumpfhäute der Umgebungsstrukturen unterliegen gleichzeitig hohen Zug-, Druck- und Scherbeanspruchungen. Zusätzlich werden in der Montage lokale Biegebeanspruchungen bzw. hohe interlaminare Scherbeanspruchungen in den stufigen Stringer- und Spantgurten infolge der nicht idealen Toleranzen in Häuten mit lokalen Aufdickungen hervorgerufen. Das beeinträchtigt die Ausnutzung der Faserverbundwerkstoffe, da die interlaminare Scherfestigkeit von Faserverbundwerkstoffen mit einer polymeren Matrix, z. B. CFK-Werkstoffen, vergleichsweise gering ist. Im Endeffekt werden durch diese nicht angepasste Bauweise die Vorteile des teureren Materials kaum genutzt, bzw. die Gewichts- und Kostenreduktion die in den Ausschnittsfreien Sektionen durchaus erzielt werden können, aufgezehrt. Die Entwicklung neuer CFK-Bauweisen von Türausschnitt-Systemen hat daher eine sehr große Bedeutung.

1. EINLEITUNG

Die Semimonocoque-Bauweise ist bei großen Passagierflugzeugen die am häufigsten eingesetzte Bauweise (Basismodelle A-320, Boeing 737 und ihre Ableitungen) [1, 2]. Diese Bauweise wurde in den 1960er Jahren im Bereich der Flugzeugrumpfe für die zu dieser Zeit im Flugzeugbau üblichen Leichtbau-Metall-Werkstoffe (Aluminiumlegierungen), optimiert. Für die Generation von Flugzeugrumpfen des 21. Jahrhunderts werden als Basismaterial Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe eingesetzt. Die verwendeten Bauweisen wurden dabei nahezu unverändert übernommen (Boeing 787 Dreamliner und A350 XWB) [3, 4]. Die erforderliche Anpassung der Bauweise an die neuen Werkstoffe ist dabei nur begrenzt im Bereich der Standardsektionen (Omega-Stringer, Spant-Geometrie) erfolgt.

Eine besondere Herausforderung der Konstruktion des Flugzeugrumpfes stellt die komplexe und hoch belastete Türumgebungsstruktur dar. Sie wird statisch und dynamisch durch Querkräfte, Torsions- und Biegemomente, sowie durch den Differenzdruck zwischen Kabine und der Atmosphäre belastet [1]. Dadurch, dass die Türen nicht (Querkraft) mittragend ausgeführt werden, rufen diese Beanspruchungsarten in der Haut sowie in den Profilen der Türumgebungsstruktur starke lokale Spannungsüberhöhung hervor. Insbesondere in den Eckbereichen des Türausschnitts wird die Haut durch jede der oben genannten Belastungen stark beansprucht [1, 6, 8, 9]. Hautaufdickungen mittels Doppler sind die üblichen Lösungen, bewirken aber zusätzliche lokale Exzentrizitäten und somit lokale Biegebeanspruchungen.

Ziel dieser Arbeit ist es, neue faserverbund- und fertigungsgerechte Bauweisenkonzepte für Türumgebungs-

strukturen in Flugzeugrumpfen mit Semimonocoque-Bauweise vorzustellen und eine Effizienzabschätzung im Vergleich zur konventionellen Bauweise zu geben.

2. ENTWICKLUNG NEUER KONZEPTE

Der Türausschnitt in Passagierflugzeugrumpfen weist eine nahezu rechteckige Kontur auf und wird von einer Türumgebungsstruktur in Semimonocoque-Bauweise eingerahmt [5, 7] (s. Bild 1).

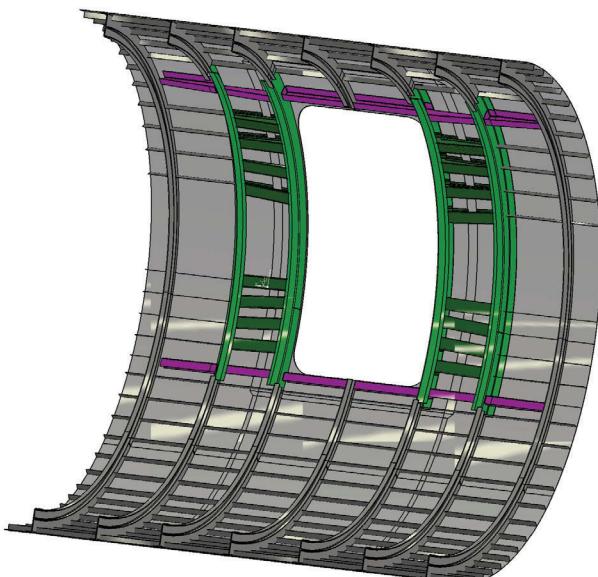


BILD 1. Klassische Türumgebungsstruktur

Da Faserverbundkunststoffe im Vergleich zu metallischen

Werkstoffen je nach Laminataufbau entweder geringere Scher-Steifigkeiten oder geringer Zug- Druckfestigkeiten [10, 11] besitzen, vergrößern sich die erforderlichen Hauptaufdickungen bei gleicher zulässiger Deformation. Damit geht ohne die Anpassung der Bauweise im Bereich der Türumgebungsstruktur ein Großteil des vorhandenen Gewichtseinsparungspotenzials verloren. Ziel muss daher die Reduktion von Gewicht und Fertigungskosten der Türumgebungsstruktur durch neue Bauweisenkonzepte unter Einhaltung der maximal zulässigen Diagonalverformungen sein. Als Diagonalverformung ist die Längung der Verbindung zweier diagonal liegender Eckpunkte definiert. Sie darf das Limit bei maximaler Belastung nicht überschreiten, da sonst die Lastübertragungselemente (Doorstops) abgleiten würden und somit die Tür nicht mehr fixiert wäre.

Eine Reduktion der Fertigungskosten ist beispielsweise durch die Reduktion der Komplexität der Hauttopologie und damit der Anzahl der Rampen der Versteifungsprofile möglich. Der Aufwand zum Einstellen der Fügetoleranz und damit die Montagekosten sinken.

Im Rahmen dieses Artikels werden drei Bauweisen vorgestellt und mittels einer Potenzialanalyse bewertet. Kriterien sind die Reduktion der Schubspannungen in den Türecksichten sowie die Reduktion der Diagonalverformungen im Vergleich zur CFK-Referenzstruktur in Semimonocoque-Bauweise [12].

2.1. Lokales Fachwerk

Prinzip: Verschmelzung von Semimonocoque- und Fachwerk-Bauweise. Durch diese Hybridbauweise besteht die Möglichkeit, die für CFK-Bauteile ungünstige Schub-Beanspruchung in faserverbundgerechte Zug-Druck-Beanspruchung zu transformieren und die Hautbeanspruchung des Träger-Spant-Systems, die Haut-Aufdickungen und dessen Fertigungsaufwand zu reduzieren [13].

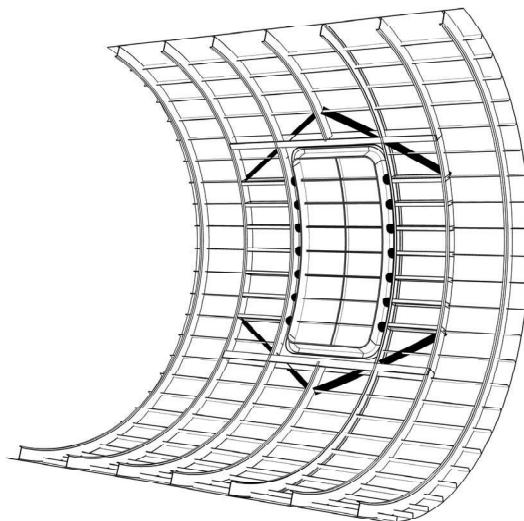


BILD 2. Panel der Türumgebungsstruktur einer Rumpftonne mit Fachwerkstäben an Eckbereichen des Ausschnitts

2.2. Tür-Türrahmen-Kopplung

Prinzip: Kopplung von Tür und Türumgebungsstruktur mittels Fachwerkstrukturen. Neben Innendruck kann die Tür somit zusätzlich Querkräfte übertragen.

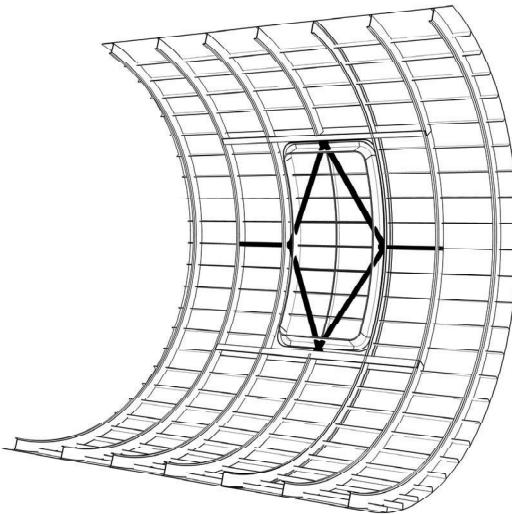


BILD 3. Panel der Türumgebungsstruktur mit Gitterstruktur in der Tür

Durch die lokal in die Tür integrierte Gitterstruktur aus CFK-Stäben und ihre Ankopplung an die Umgebungsstruktur besteht die Möglichkeit, die Diagonal-Verformung des Ausschnittes zu kompensieren, die Beanspruchung des Träger-Spant-Systems zu entlasten und die Hauptaufdickungen zu reduzieren [13]

2.3. CFK-Metall-Hybridlaminat

Prinzip: Reduktion von Hauptaufdickungen in den Eckbereichen durch lokale Hybridisierung des Strukturwerkstoffes. Durch die lokale Substitution von CFK-Lagen durch Titan- oder Stahlfolien mit höherer Schubsteifigkeit werden die Hauptaufdickungen stark reduziert [14, 15]. Die Komplexität der Innenhauttopologie, die Sekundärbiegeeffekte sowie der hohe Fertigungsaufwand für komplexe Spant- und Stringer geometrien werden deutlich reduziert.

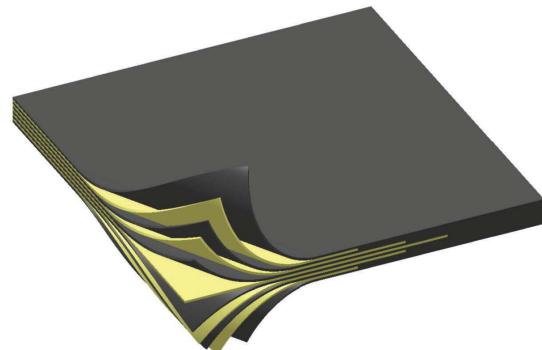


BILD 4. CFK-Metall Schubversteifung (Prinzipskizze)

3. BEWERTUNGSMETHODIK

Für die Bewertung und Optimierung der Bauweisenkonzepte wird ein Finite Elemente Modell der Türumgebungsstruktur erstellt. Das Potenzial der unterschiedlichen Bauweisenvarianten wird durch Vergleichsparameter, die mit diesem vereinfachten Modell ermittelt werden, abgeschätzt.

Die geometrischen Abmessungen des simulierten Rumpfabschnittes ($D = 4$ m, Typ I Tür) basieren auf der Rumpfstruktur des EU-Projekts MAAXIMUS [16].

Das Belastungsschema ist für die untersuchte Rumpftonne mit zwei symmetrischen Türausschnitten in BILD 5 dargestellt. Der Innendruck sowie die Querkraft Q_z werden berücksichtigt.

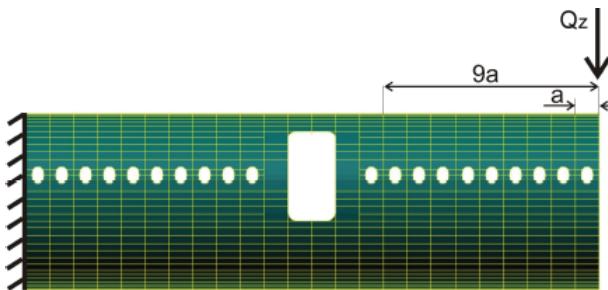


BILD 5. Belastungsschema für die Rumpftonne

Es werden Berechnungen für die folgenden CFK-Lamine der Rumpfstruktur durchgeführt: für die Haut 10/80/10¹, für die Stringer 70/30/0, für die Spante: Gurte 70/30/10 bzw. Stege 10/80/10.

Zur Auswertung der Berechnungen werden vier Eckknoten und die Diagonalen des Türausschnitts betrachtet (s. BILD 6).

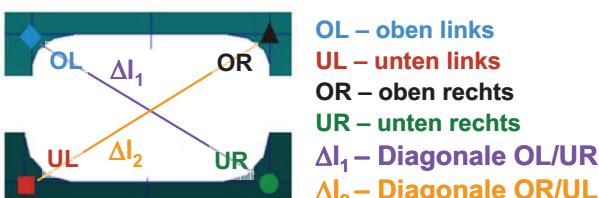


BILD 6. Definition der Eckknoten und Diagonalen

Der Vergleich zwischen der Referenzstruktur und den drei untersuchten Konzepten wurde mit folgenden Auswertungskriterien durchgeführt:

$$(1) \quad k = \frac{R}{m} \quad - \text{spezifischer Reservefaktor}$$

$$(2) \quad g = \frac{L}{m} \quad - \text{spezifische normierte Länge}$$

Hierbei sind:

$$(3) \quad R = \frac{\tau_b}{\tau} \quad - \text{Reservefaktor}$$

$$(4) \quad L = \frac{\Delta l_{ref}}{\Delta l} \quad - \text{normierte Länge}$$

(5) τ - Schubspannung in der Paneelhaut

(6) τ_b - Schubfestigkeit der Paneelhaut

(7) Δl_{ref} - Diagonalverformung am Türausschnitt

(8) Δl - Diagonalverformung am Türausschnitt der Referenzrumpftonne

(9) m - Masse des Paneels

Der Vergleichsparameter k (1) ist als spezifischer Reservefaktor definiert: Können die Schubspannungen (5 und 6) um einen großen Wert reduziert werden, wird sich der Reservefaktor R (3) erhöhen. Daraus resultiert ein größerer Vergleichsparameter k . Je kleiner das Strukturgewicht (9) wird, desto größer wird der Parameter k . Daraus folgt, je größer der spezifische Reservefaktor k für einen Knoten ist, desto effektiver ist eine mögliche zusätzliche Masse bezogen auf die Reduzierung der Schubspannung.

Der Vergleichsparameter g (2) ist als spezifische normierte Länge definiert: Können die Verformungen um einen großen Wert reduziert werden, ist die normierte Verformung L (4) und der Parameter g groß. Je kleiner das Strukturgewicht m (9) wird, desto größer wird g . Daraus folgt: Je größer der Parameter g für einen Knoten ist, desto effektiver ist eine mögliche zusätzliche Masse bezogen auf die Reduzierung der Verformung.

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

4.1. Lokales-Fachwerk

Bei diesem Konzept wird die klassische Semi-Monocoque Bauweise durch nicht orthogonal angeordnete Zug-Druckstäbe ergänzt. Die Schubspannung in den Ecken des Ausschnitts wird hierdurch reduziert. Die Stringer, Spanten und Streben wirken als lokales Fachwerk.

Zunächst werden unterschiedliche Konzepte bzw. Thesen entwickelt und mit einem vereinfachten ebenen Paneelmodell simuliert. Als Stäbe werden UD CFK-Stäbe gewählt.

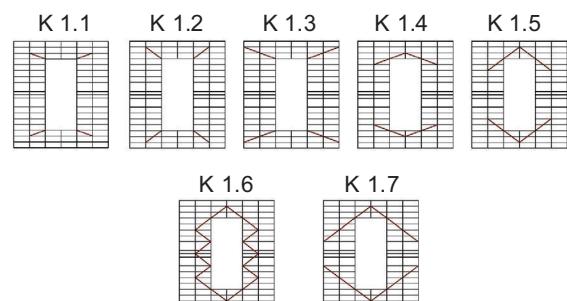


BILD 7. Prinzipskizzen der Fachwerkstreben

¹ Anteil in [%] (0° / $+/-45^\circ$ / 90°);

0°: Flugzeuglängsrichtung;

90° Umfangsrichtung

Voruntersuchungen an einem vereinfachten ebenen Modell zeigen, dass bei den gewählten Annahmen Variante K1.7 das höchste Potenzial hat.

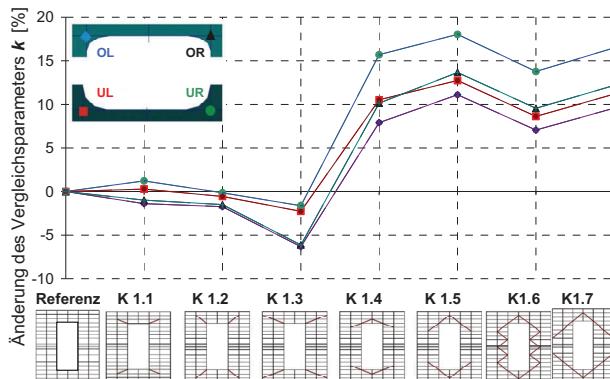


BILD 8. Vergleichsparameter k für K1-1 bis K1-7

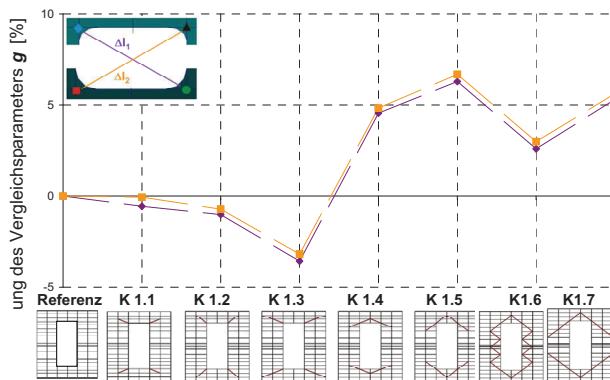


BILD 9. Vergleichsparameter g für K1-1 bis K1-7

Im nächsten Schritt wird die Anordnung dieses Konzeptes auf das gekrümmte Paneel übertragen (BILD 2) und die Querschnittsfläche der Fachwerkstäbe als ein Optimierungsparameter festgelegt.

Im BILD 10 ist der Vergleichsparameter k (1) über die verschiedenen Querschnittsflächen von CFK-UD-Stäben aufgetragen. Jede Funktionskurve repräsentiert einen Knotenpunkt jeweils einer Ecke bei unterschiedlicher Querschnittsfläche. Die Referenzstruktur ohne Stangen entspricht der Querschnittsfläche $A = 0 \text{ mm}^2$.

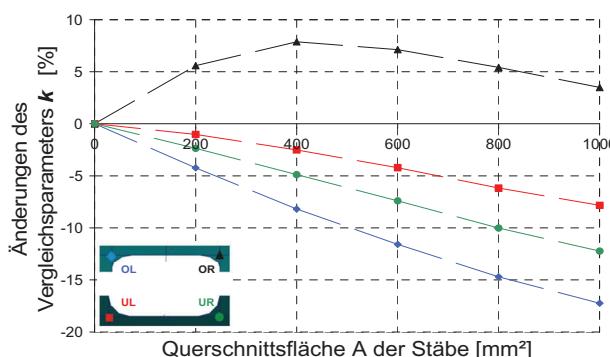


BILD 10. Änderung des Vergleichsparameters k an der Rumpftonne [%] über A

Anhand der Ergebnisse für die Knoten OL, UL, und UR ist zu erkennen, dass die verschiedenen Varianten im Gegensatz zur Referenzstruktur eine Verschlechterung mit sich bringen. Das bedeutet, dass die zusätzliche Masse bezogen auf die Schubspannungsreduzierung an diesem Knoten nicht effektiv ist. Am Knoten OR ist jedoch eine Verbesserung gegenüber der Referenzstruktur zu erkennen. Ein Optimum ergibt sich im Bereich zwischen $A = 200 \text{ mm}^2$ und $A = 600 \text{ mm}^2$. Der Vergleichsparameter k erreicht hier das Maximum. An Knoten OR ergibt sich eine prozentuale Erhöhung des Vergleichsparameters k um 8%.

In BILD 11 ist der Vergleichsparameter g (2) über die verschiedenen Querschnittsflächen von CFK-UD-Stäben aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Vergleichsparameter g für die Diagonale L1 (oben-links nach unten-rechts) mit zunehmender Querschnittsfläche kleiner wird. Die zusätzliche Masse ist gegenüber der Reduzierung der Diagonalverformung nicht effektiv.

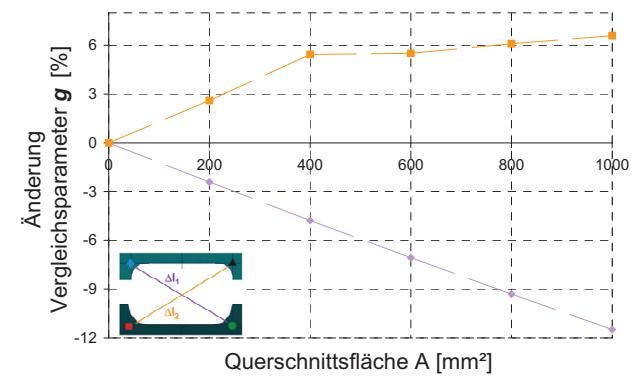


BILD 11. Fachwerk - Änderung des Vergleichsparameters g an der Rumpftonne [%] über A

Der Parameter g der zweiten Diagonale L2 zeigt eine Verbesserung im Vergleich zur Referenzstruktur. Ein Optimum ergibt sich wieder für den Querschnittsbereich zwischen $A = 200 \text{ mm}^2$ und $A = 600 \text{ mm}^2$. Die Verbesserung des Parameters g liegt hier bei ca. 5,4%.

Das untersuchte Fachwerksystem in der Türumgebungsstruktur ergibt nicht auf Anhieb in jedem untersuchten Eckknotenbereich eine Verbesserung. Für eine finale Aussage zum Potenzial müssten jedoch die Annahmen und Konzepte wesentlich verfeinert bzw. weiter optimiert werden. Bei den realistischen asymmetrischen Belastungen in den Türrahmen wäre z.B. eine nicht symmetrische Versteifung voraussichtlich effektiver.

Diese Untersuchungen werden im Rahmen des BMWi geförderten LuFo Projektes TOP-Design fortgesetzt.

4.2. Tür-/Türrahmen Kopplung

Bei diesem Konzept werden die Querkräfte nicht mehr allein durch die Haut und Hinterbaustruktur um den Ausschnitt herum geführt, sondern der Ausschnitt wird strukturmechanisch durch Koppeln der Tür mit der Hinterbaustruktur geschlossen. Hierzu wird die querkraftweiche Standard Doorstop-Türkopplung durch kraftschlüssige,

lösbare Koppelemente ersetzt. Die relativ schubweiche Tür wird durch ein integriertes Fachwerk verstellt.

Das Ziel dieses Konzeptes ist, die Schubbelastung im Bereich der Rumpfhaut weiter zu reduzieren, wodurch die Hautaufdickungen wie bereits in Konzept 2 erläutert, reduziert werden können. Die an dem Konzept durchgeführte Analyse soll eine Aussage zum Potenzial von „Mittragenden Türen“ geben. Ein sehr hohes Potenzial ist die Voraussetzung für die weitere wissenschaftliche Bearbeitung des Konzeptes, welches im Vergleich zu Konzept 1 (lokales Fachwerk) voraussichtlich mehr Anstrengungen hinsichtlich des Nachweises der *Airworthiness* bedarf.

Wie für Konzept 1 beschrieben, wurden die Voruntersuchungen an einem ebenen Paneel mit verschiedenen Varianten von CFK-UD-Stäben durchgeführt (BILD 12)

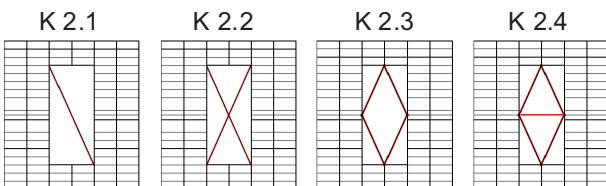


BILD 12. Prinzipskizzen für lokale Fachwerke in mittragenden Türen

In BILD 13 ist der Vergleichsparameter k (1) über die in BILD 12 definierten Varianten der Anordnung von CFK-UD-Stäben aufgetragen. Hier ist Variante 0 die Referenzstruktur ohne Streben bzw. ohne Ankopplung der Tür.

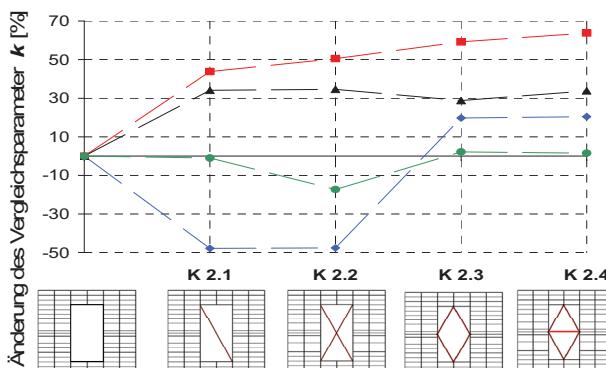


BILD 13. Vergleichsparameter k für die mittragende Tür der Rumpftonne in [%]

Die Varianten K 2.3 und K 2.4 weisen für k in allen Knoten einen höheren Wert als die Referenzstruktur auf. Im direkten Vergleich der Varianten ist Variante K 2.4 die Effektivste. Der Parameter k erreicht in der Rumpftonne für Variante K 2.3 und K 2.4 teilweise einen um 60% höheren Wert. Diese hohen Werte zeigen ein großes Potenzial zum Einsparen von Strukturgewicht mit dem Konzept der mittragenden Tür auf.

In BILD 14 ist der Vergleichsparameter g (2) über die verschiedenen Varianten der Anordnung von CFK-UD-Stäben aufgetragen.

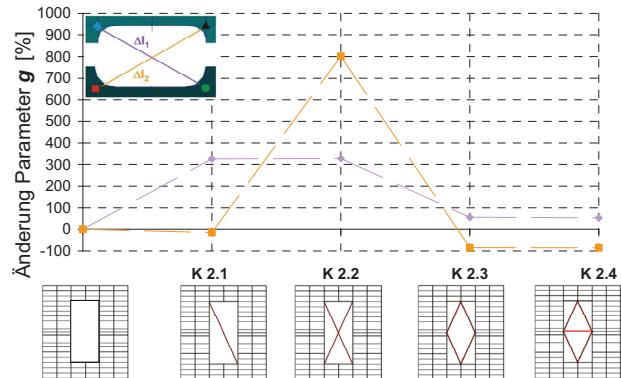


BILD 14. Vergleichsparameter g für die Unterkonzepte

Die Varianten K 2.1 und K 2.2 zeigen für die Diagonale $L1$ eine größere Verbesserung des Vergleichsparameters gegenüber den Varianten K 2.3 und K 2.4. Die Untersuchungen zur Verringerung der Diagonalverformung zeigen, dass die Variante K 2.2 die effektivste Variante ist. Durch die Versteifung in Variante K 2.2 verbessert sich der Parameter g um 300% bzw. 800%. Der hohe Relativwert für $\Delta L2$ entspreche in absoluten Werten jedoch nur einer geringen Verbesserung, relevanter ist die Verbesserung der kritischen Diagonalen $\Delta L1$. Mit dem Konzept der gekoppelten Tür kann somit eine wesentliche Verbesserung der Diagonalverformung erzielt werden.

Die Untersuchungen des Konzepts der gekoppelten Passagiertür weisen ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung des Strukturgewichts auf. Die Anbindung zwischen Fachwerkstäben und der Struktur ist bisher jedoch nur idealisiert untersucht worden. An die Lasteinleitungen zwischen Tür und Rahmen werden besonders hohe Anforderungen gestellt, da diese mit dem Öffnen der Tür mechanisch zu lösen sein müssen. Dieses zusätzliche Gewicht wurde bislang in der Bewertung der verschiedenen Konzepte nicht berücksichtigt. Die Gesamteffizienz würde bei einem realen Konzept hierdurch entsprechend vermindert werden.

4.3. CFK-Metall-Laminat

Das Ziel die Dicke der Haut zu reduzieren wird in diesem Konzept dadurch erreicht, dass die Verstärkung direkt in die Haut integriert wird. Die notwendige Erhöhung der Schubsteifigkeit wird durch Ersetzen von CFK-Einzellagen durch Metallfolien bei gleicher Dicke realisiert. Ähnlich wie für die oben betrachteten Konzepte werden für dieses Konzept die verschiedenen Varianten zunächst am ebenen Paneel entwickelt und berechnet (BILD 15).

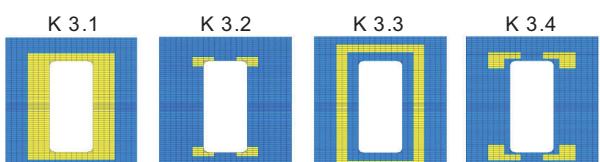


BILD 15. Prinzipskizzen der versteiften Metalllaminat-varianten

Das verwendete Metalllaminat besteht jeweils zu 50% aus einer Titanlegierung und CFK. Die bereits optimierte Haut

der Referenzstruktur weist eine Lagenverteilung von 10/80/10 auf. Das Metall ersetzt demzufolge 50% der $\pm 45^\circ$ Lagen. Es ergibt sich die Lagenverteilung des CFK Materials zu 20/60/20.

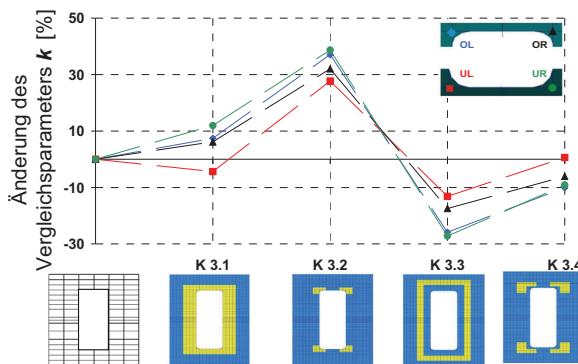


BILD 16. Metalllaminat - Änderung des Vergleichsparameters k an der Rumpftonne [%]

In BILD 16 ist der Vergleichsparameter k über die verschiedenen Varianten aufgetragen. Die Variante unter der Ordinate entspricht der Referenzstruktur ohne Metallschichten.

Die Analyse des Diagramms zeigt, dass die Variante K 3.2 für jeden Eckknoten des Ausschnittes eine deutliche Verbesserung des Leichtbauparameters k gegenüber der Referenzstruktur aufweist. Diese Verbesserung liegt zwischen 28% und 39%.

Die Analyse des Verlaufs des Parameters g (BILD 17) zeigt, dass die Varianten K 3.2 und K 3.4 einige Verbesserungen für die Diagonale $L1$ aufweisen. Die Verbesserung für Variante K 3.2 liegt bei 21% und für Variante K 3.4 bei 18%.

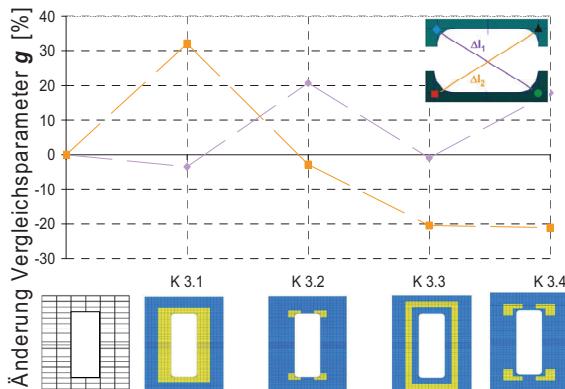


BILD 17. Metalllaminat- Änderung des Vergleichsparameters g an der Rumpftonne [%]

Die Verstärkung der Türumgebungsstruktur mithilfe von Metalllaminaten in der Haut kann entsprechend als sehr effektiv angesehen werden. Die Variante K 3.2 stellt sich in den Untersuchungen als die effektivste heraus. Dieses innovative Konzept weist ein hohes Potenzial zur Verringerung des Strukturgewichts auf und erlaubt weitere Kosteneinsparungen, beispielsweise durch den Einsatz von CFK-Stahl-Laminaten.

5. VERGLEICH DER KONZEPTE

Um eine Aussage über die höchste Effektivität der verschiedenen Konzepte machen zu können, sollen die jeweils besten ausgewählten Varianten miteinander verglichen werden. Im BILD 18 und BILD 19 sind die prozentualen Verbesserungen für den Vergleichsparameter k (1) und den Vergleichsparameter g (2) über die verschiedenen Varianten aufgetragen.

In BILD 18 ist zu sehen, dass die Varianten K 2.4 und K 3.2 bezogen auf den Schubspannungszustand am effektivsten sind. Die prozentuale Verbesserung des Parameters k der Variante K 2.4 liegt im Vergleich zu der Referenzstruktur zwischen 2% und 64%. Für Variante K 3.2 liegt diese Verbesserung zwischen 28% und 39%.

Das Maximum der Verbesserung wird für Variante K 2.4 erzielt. Allerdings liegt die geringste Verbesserung nur bei 2% im Bereich der Ecke UL. Mit dem Ziel die Haut zu entlasten, um diese zu reduzieren, weist die Variante K 3.2 bessere Durchschnittsparameter auf. Die Verbesserung liegt in jedem Knoten auf ähnlichem Niveau. Die Hautaufdickungen können gleichmäßig und ohne Ausnahme reduziert werden.

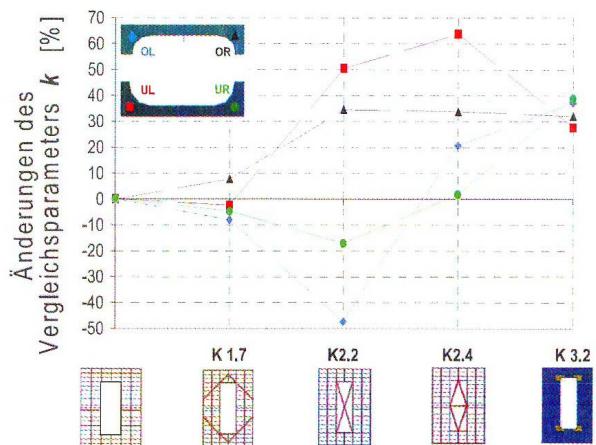


BILD 18. Konzeptvergleich – prozentuelle Änderung des Vergleichsparameters k

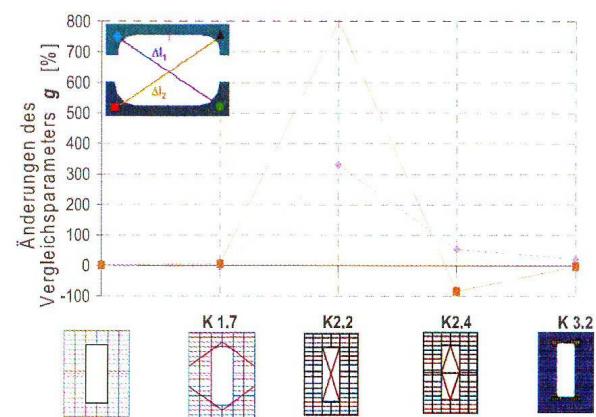


BILD 19. Konzeptvergleich - prozentuelle Änderung des Vergleichsparameters g

Der Parameter **g** erreicht für die Variante K 2.2 mit 330% für **ΔL1** und 800% für **ΔL2** maximale Werte (BILD 19). Die starke Verbesserung ist auf die direkte Versteifung durch die zwei Diagonalstäbe zurückzuführen. Variante K 2.4 und K 3.2 sind weniger effektiv und weisen in der Diagonalverformung **ΔL2** sogar eine Verschlechterung auf. Die Änderung bei Variante K 2.4 liegt zwischen 53% -85% und von K 3.2 zwischen 21% und -2%. Bezogen auf die Reduzierung der Diagonalverformung ist die Variante K 2.2 entsprechend am effektivsten.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Als Resultat der Untersuchungen können folgende Aussagen getroffen werden:

Ein lokales Fachwerk in die Umgebungsstruktur als Einzelmaßnahme zu integrieren, ist wenig effektiv. Der Grund hierfür ist, dass die Spannungen in der Haut nur gering reduziert werden können, jedoch großer Extraaufwand durch die Streben entsteht. Zudem können die Hautaufdickungen nur sehr gering reduziert werden.

Der Ansatz, die Passagiertür als mittragend zu konstruieren, erzielt sehr hohe Reduzierungen der Schubspannungen und Diagonalverformungen. Das Konzept ist demnach effektiv und weist ein hohes Leichtbaupotential auf. Eine Detaillierung und Berücksichtigung der Koppelemente ist jedoch für eine finale Aussage unabdingbar.

Die bisher nicht untersuchte Kombination von einem lokalen Fachwerk in der Umgebungsstruktur (Konzept 1) mit einem Fachwerk in der Tür und mittragender Türkopplung (Konzept 2) sollte näher untersucht werden. Das Potenzial beider Einzelkonzepte kann voraussichtlich hierdurch weiter gesteigert werden.

Die Verwendung eines Hybridwerkstoffes in Form von CFK-Metall für die Haut ist sehr effektiv, auf Grund der Eigenschaft, dass ein Metalllaminat durch die Metallschichten bei gleicher Dicke schubsteifer ist als ein gleich dickes CFK-Laminat. Im direkten Vergleich der drei Konzepte zeigt sich, dass die lokale Verstärkung mit einem Metalllaminat die Schubspannungen in der Haut am effektivsten Reduzieren kann.

Weitere Untersuchungen von innovativen Türumgebungsstrukturen werden empfohlen. Die Kombination der Varianten aus dem Konzept der mittragenden Tür und der Verstärkung durch Metalllaminate lassen eine noch höhere Effektivität vermuten. Der Einsatz von CFK-Stahl-Laminat als Hybridwerkstoff sollte weiter untersucht werden, da die hohen Festigkeitswerte womöglich die nötige Steifigkeit bei sehr geringer Hautdicke erbringen.

Die Weiterentwicklung der Konzepte muss an einem detaillierteren Modell erfolgen. Da es sich hier um eine erste Effizienzabschätzung handelt, wurde das FE-Modell zur Vereinfachung stark idealisiert. Die Anbindungen z. B. zwischen den Fachwerkstäben und der Struktur wurden idealisiert: So sind die Stäbe nur an den Knotenpunkten der Spant-Stringer-Kopplung mit der Struktur verbunden. In der Realität könnten die Stäbe über ihre gesamte Länge mit der Haut verbunden werden und die Hautfelder somit zusätzlich aussteifen. Zudem erfolgt die Krafteinleitung in

der Realität nicht punktuell. Somit ist mit einer höheren Effektivität der Stäbe zu rechnen, die hier gezeigten Voruntersuchungen sind eher konservativ.

Die Vielfalt der möglichen Weiterentwicklungen der Konzepte, der Idealisierung und der Auswertung zeigt, dass das Leichtbaupotential noch weiter auszuschöpfen ist. Einmal mehr wird deutlich, dass sich die Entwicklung von Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen von den konventionellen Bauweisen lösen und sich auf innovative Ideen stützen sollte.

7. LITERATUR

- [1] M. C. Y. Niu: *Airframe Structural Design*. Hongkong, 1988
- [2] J. Roskam: *Airplane Design. Part III: Layout Design of Cockpit, Fuselage, Wing and Empennage. Cutaways and inboard Profiles*. Ottawa, 2nd ed. 1989
- [3] M. C. Y. Niu: *Composite Airframe Structures*. (6th edition) Hongkong, 1996
- [4] M. Gründer: Technologiewettstreit der Flugzeugbauer. Etappensieg für Boeing. (Flug Revue) Mai, 2006
- [5] G. F. D. Lingard et al: *Tür mit Zapfenverriegelung für einen Flugzeugnotausgang über einem Flügel*. Patentschrift DE 698 17 911 T2 2004.05.13
- [6] M. E. Heerschap: *Design of Cut-Outs in Shell Structures*. (PhD-Thesis) Delft University of Technology Delft, 1997
- [7] H. Erben, W. Buchs: *Türsystem, insbesondere für ein Passagierflugzeug*. Europäische Patentschrift EP 0 677 438 B1, 1998
- [8] R. E. Peterson: *Stress Concentration Factors*. New-York, 1974
- [9] G. N. Sawin: *Spannungserhöhung am Rande von Löchern*. Berlin, 1956
- [10] ESA PSS-03-203 *Structural materials handbook*. Vol. 1-Polymer Composites. Noordwijk, 1993.
- [11] CIBA-GEIGY: *Fibredux 6376, Information Sheet FTA 140e*. Ort unbekannt, 1984
- [12] A. Lang, B. Kolesnikov: *Spannungs- und Gewichts-optimierung von Türbereichen in CFK- Flugzeugrumpfen – Entwicklung neuer Bauweisen*. (Interner Bericht 131-2010/11, DLR) Braunschweig, 2010
- [13] B. Kolesnikov, T. Ströhlein, H. Assing, Ch. Hühne, A. Fink, S. Niemann: *Türrahmenanordnung und Tür, insbesondere für Luft- und Raumfahrzeuge*. (Patentanmeldung 10 2010 014 265.4) Braunschweig, 2010
- [14] B. Kolesnikov, H. Wilmes, A. S. Herrmann, A. Pabsch: *Verbundmaterial mit einem verstärkten Verbindungsreich*. Europäisches Patent Nr. 1082217, Europäische Patentschrift EP 1 082 217 B1. Braunschweig, 2002.
- [15] B. Kolesnikov, L. Herbeck, A. Fink: *CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints*. Composite Structures, 83, 368-380, 2008
- [16] M. Koneczny: *MAAXIMUS Loft Description*. (Präsentation + CAD-Model) Hamburg, 2008