

Gewichtsprognose von CFK-Rümpfen für zukünftige Passagierflugzeuge

T. Keilig ^{*)}, A. Schmidt ^{**)}

^{*)} Institut für Flugzeugbau (IFB), Bereich Flugzeugentwurf, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart

^{**)} EADS Airbus Deutschland GmbH
Kreetslag 10, 21129 Hamburg

1. Übersicht

Im Rahmen des Luftfahrtforschungs-Programms II werden für Airbus innerhalb des Leitkonzepts „CFK-Rumpf“ die Grundlagen eines multifunktional ausgelegten Flugzeugrumpfs erarbeitet [1]. Im Wettbewerb mit der US-amerikanischen Flugzeugindustrie gilt es, die Herstellungskosten bis zum Jahr 2015 um 40% im Vergleich zur heutigen Metallrumpfbauweise zu reduzieren.

Gleichzeitig soll dieser CFK-Rumpf als multifunktional ausgelegte Leichtbau-Sicherheitszelle bei einer Gewichtsersparnis von 30% neben der Tragfunktion auch die Aspekte der passiven Passagiersicherheit (Crashfall, Brandszenario, FST) verbessern.

In optimierter Faserverbundbauweise lässt sich der Druckrumpf zukünftiger Verkehrsflugzeuge von der Größe eines Airbus A 320 um 5 bis 8 Tonnen leichter bauen. Ein Flugzeug würde dadurch im Laufe seines Lebens 24 Millionen Liter weniger Kerosin verbrauchen. Auch die Unterhaltskosten lassen sich wegen des wesentlich geringeren Wartungsaufwands durch das verbesserte Ermüdungsverhalten bei erhöhter Lebensdauer senken.

Das bei Airbus in Hamburg entwickelte und im Vorentwurf zukünftiger Flugzeugprojekte eingesetzte, multidisziplinäre Massevorhersageprogramm FAME-F (Fast and Advanced Mass Estimation of Fuselage) für konventionelle Metallrumpfe berücksichtigt alle durch den Innendruck, die Aerodynamik, den Flügel bzw. das Leitwerk hervorgerufenen Normal-, Schubkräfte und Momente in der Rumpfröhre sowie die aus der Massenverteilung (Eigen-gewicht, Nutzlast, Systeme, Treibstoff) her rührenden Trägheitslasten [2]. Dieses Massevorhersageprogramm FAME-F wird nun schrittweise zur Bewertung der verschiedenen CFK-Rumpfbauweisen auf Faserverbundwerkstoffe erweitert.

Das entwickelte Tool kann zur Bewertung verschiedenster Rumpfbauweisen (Spant/Stringer-Bauweise in CFK, Sandwichrumpf, Doppelschalen-Rumpf) hinsichtlich Massen oder identifizierter technischer Vor- und Nachteile verwendet werden, um so eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer geeigneten Rumpfbauweise zu schaffen.

Wie genau ein solches Tool sein muss, macht folgende Betrachtung deutlich: Ein Fehler in der Rumpfgewichtsprognose von 2% entspricht beim A380 ca. 1,5 Tonnen oder 20 Passagieren, wobei der Rumpfgewichtsanteil bezogen auf das Strukturgesamtwert von 267 Tonnen etwa 30% beträgt.

2. Das Gewichtsprognose-Programm FAME

Bei der Neuentwicklung von Verkehrsflugzeugen ist eine zuverlässige Vorhersage des Gesamtgewichts zu einem möglichst frühen Zeitpunkt von zentraler Bedeutung. Das Strukturgewicht muss schon im Vorentwurf möglichst schnell und gleichzeitig auch möglichst genau abgeschätzt werden.

Zu Beginn einer Neuentwicklung stehen dafür aber nur wenige Daten zur Verfügung. Oft muss eine einfache Dreiseitenansicht genügen, welche die Konfiguration und die wichtigsten Abmessungen enthält. Darüber hinaus müssen Missionsziele, die angestrebte Anzahl der Passagiere, Frachtvolumen und -masse bekannt sein. Je mehr Daten im Vorfeld zur Verfügung stehen, desto genauer wird die Gewichtsprognose ausfallen und um so geringer sind später die Abweichungen von den angestrebten Spezifikationen. Die Qualität der Prognosen im Vorentwurf übt einen großen Einfluss auf den späteren Erfolg eines neuen Modells aus.

Für die Gewichtsprognose im Vorentwurf ist bei Airbus in Hamburg das Software-Tool FAME (Fast and Advanced Mass Estimation) entwickelt worden, welches in erster Linie aus den beiden Teilen FAME-F für den Rumpf [2] und FAME-W für den Flügel [3, 4] besteht.

Es gibt unterschiedliche Vorgehensweisen auf der Suche nach der optimalen Konfiguration und der Vorhersage von Massen und Massenverteilungen. FAME beruht teils auf statistischen, teils auf analytischen Ansätzen. Die statistische Auswertung durch Vergleich bestehender Flugzeugkonstruktionen mit ihren verschiedenen Varianten und Konfigurationen ist eine sehr verlässliche Methode. Die so gemachten Aussagen beschränken sich aber auf konventionelle Bauweisen, da für neue Bauweisen und Materialien keine „Erfahrungswerte“ verfügbar sind.

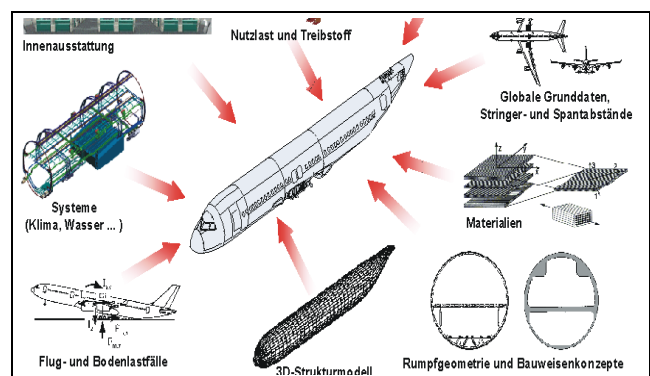


BILD 1: Einflussgrößen auf die Gewichtsprognose, welche von FAME-F berücksichtigt werden.

Die Eingabe der Daten wie z.B. Rumpflänge, -querschnitt, Flügel- und Leitwerkposition, Position von Fahrwerk und Türen erfolgt über ein ASCII-File. Fehlende Daten werden mit Standardwerten belegt. Im ersten Schritt wird daraus ein dreidimensionales Strukturmodell erstellt. Somit eröffnet sich die Möglichkeit einer differentiellen Betrachtung der Flügel- und Rumpfelemente.

In den verschiedenen Modulen des Programms werden alle Strukturelemente iterativ dimensioniert. Hierbei werden die aerodynamischen Lasten, die Lasten aus dem Innendruck und durch die Fracht, die Systemgewichte oder das Gewicht des Treibstoffs ebenso berücksichtigt wie die Spezifikationen gemäß JAR bzw. FAR (BILD 1).

Das BILD 2 zeigt den vereinfachten Programmablaufplan von FAME-F. Für die Dimensionierung der einzelnen Strukturelemente über die erforderlichen Materialdicken werden die erweiterten Theorien versteifter Platten und gewölbter Schalen angewendet. Die Dimensionierung bezüglich der Stabilität (globales und lokales Beulen) aller beteiligten Komponenten erfolgt in einem separaten Modul.

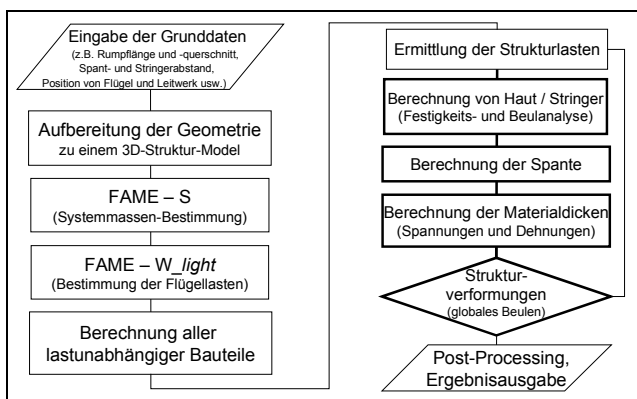


BILD 2: Programmablaufplan von FAME-F.

Neue Konzepte wie z.B. ein CFK-Rumpf können nur durch analytische Ansätze erschlossen werden. Diese erfordern geeignete Berechnungsmodelle für Festigkeit und Steifigkeit. Die am IFB erbrachten Arbeitspakete für die Erweiterung von FAME auf CFK-Rümpfe sind in BILD 2 auf der rechten Seite fett umrahmt.

2.1. Abgrenzung von FAME gegenüber FEM

Als Alternative für die Berechnung der Strukturfestigkeit und die Gewichtsermittlung im Vorentwurf wäre auch eine FEM-Applikation denkbar. Die Anwendung von FEM setzt allerdings ein detailliertes Strukturmodell des gesamten Flugzeugs und Kenntnisse über Elementeigenschaften und deren Randbedingungen voraus. Der Einsatz von FEM ist wegen des erforderlichen Zeitaufwands für Modellerstellungen, wegen der Fülle an einfließenden Parametern und wegen des Rechenaufwands der im Vorentwurf notwendigen Anzahl von Iterationen zu aufwendig und langwierig, und daher für den Vorentwurf nicht geeignet.

Wegen der analytischen Lösungswege sind mit FAME, im Gegensatz zu FEM, sehr schnelle und gleichzeitig präzise Aussagen über die Auswirkung von Designänderungen auf Strukturgewichte möglich. So können Fehler und Fehlentwicklungen bei der Beurteilung neuer Konzepte zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Flugzeugvorentwurfs aufgezeigt werden.

Das von FAME generierte Strukturmodell ist kein FEM-Modell. Die Elementierung entspricht bei FAME einem Hautfeld, welches jeweils durch Spante und Stringer begrenzt wird. Details wie Fenster, Türen oder Frachttore bleiben bei der Dimensionierung unberücksichtigt, ihr Mehrgewicht wird bei der Gewichtsprgnose aber mit statistischen Methoden angerechnet.

2.2. Ergebnisbeispiele von FAME-F

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen neben der reinen Gewichtsprgnose weitere exemplarische Ergebnisse von FAME-F. BILD 3 zeigt die veränderte Hautdickenverteilungen, wie sie beispielsweise durch die Rumpfstreckung innerhalb einer Flugzeugfamilie hervorgerufen werden, und BILD 4 eine Übersicht über die kritischen Lastfälle für die einzelnen Hautfelder.

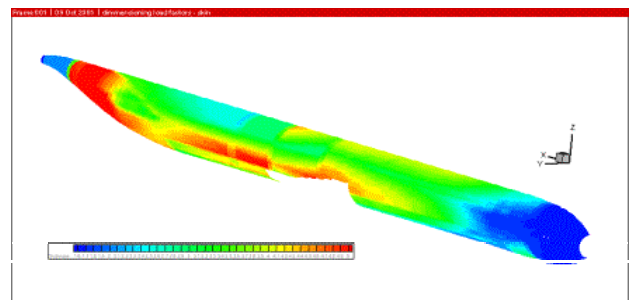
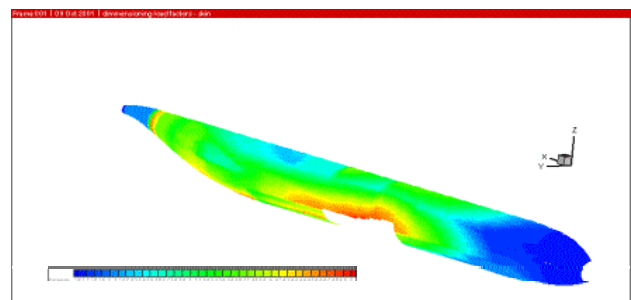


BILD 3: Veränderung der Hautdickenverteilung bei einer Rumpfstreckung.

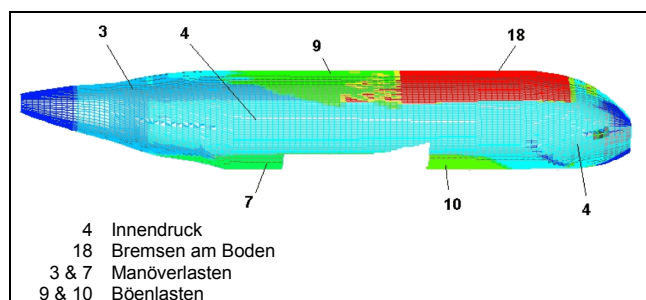


BILD 4: Die dimensionierenden Lastfälle für die Hautdicke bei einem Megaliner-Rumpf.

3. Strukturkonzepte

Neuartige Konzepte für den strukturellen Aufbau zukünftiger Passagierflugzeugrumpfe wurden auf der letztjährigen DGLR-Jahrestagung in Hamburg ausführlich vorgestellt [5, 6].

3.1 Gondelkonzept

Beim Gondelkonzept bildet nur der Passagierraum die Primärstruktur, der darunter liegende Frachtraum jedoch eine unbedruckte Sekundärstruktur. Hier können zu einem sehr hohen Maß Integralbauweisen zum Einsatz kommen.

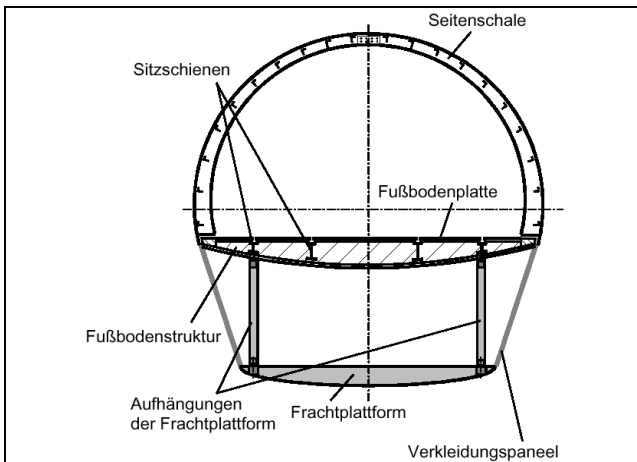


BILD 5: Schematischer Querschnitt eines CFK-Rumpfs im Gondelkonzept [5].

3.2 Lampassenkonzept

Beim Lampassenkonzept ist der Rumpf modular aufgebaut, wobei die ununterbrochenen Längsträger Lampassen genannt werden. Sie haben neben der Längsverstärkung des Rumpfes ferner die Aufgabe, die einzelnen Paneele miteinander zu verbinden.

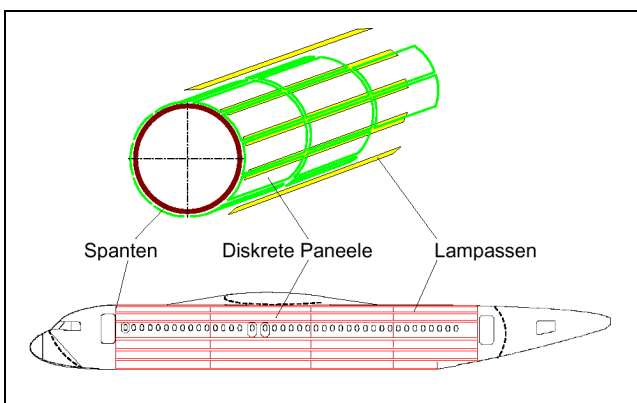


BILD 6: Modulare Differentialbauweise des Lampassenkonzepts [5].

3.3. „Barrel to Barrel“-Konzept

Bei diesem Strukturkonzept werden die getrennt gefertigten Schalen ineinander gefahren und dann durch den Kernwerkstoff zu einer doppelschaligen Rumpftonne verbunden. So entstehen integrale Rumpfsektionen mit einer mittragenden Fußbodenstruktur oder mittragenden Hatrack-Kästen. Der Rumpfquerschnitt im „Barrel to Barrel“-Konzept ist also mehrzellig.

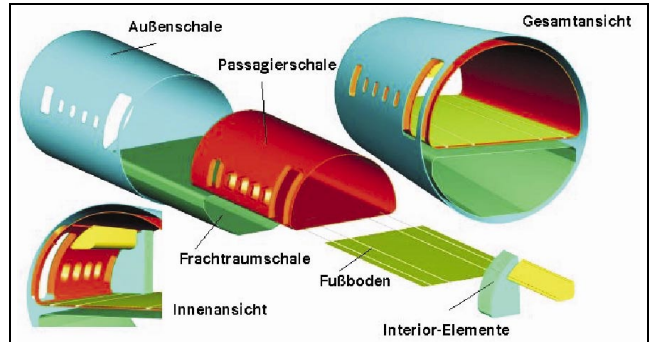


BILD 7: Das doppelschalige „Barrel to Barrel“-Konzept [6].

4. Bauweisenkonzepte

4.1. Monolithische Schalenbauweisen

Hierunter wird ein typischer Haut/Stringer/Spantaufbau verstanden. Zur Vermeidung einer Kreuzung der Versteifungselemente Spante und Stringer könnten die Stringer allerdings außerhalb der Haut, die Spante innerhalb verlaufen. Dieses Konzept wird als SoFi-Bauweise bezeichnet: *stringer outside, frames inside*. Der Raum zwischen den Stringern kann dann mit einem nichttragenden, aber isolierenden und Impact-absorbierenden Material ausgefüllt werden. Auch die äußere Deckschicht zur aerodynamischen Formgebung trägt nur geringfügig mit. Durch diesen Aufbau und die damit verbundene Multifunktionalität wird innerhalb des Leitkonzepts CFK-Rumpf das SoFi-Konzept zu den Doppelschalen-Bauweisen gezählt, bei der Berechnung in FAME-F aber wie ein Monolith behandelt.

4.2. Doppelschaler

Hierunter werden alle Bauweisen eingruppiert, die durch zwei tragende Häute eine hohe Steifigkeit erreichen. Auf Spante zur Beulasteifung kann nicht verzichtet werden, ihr Anzahl lässt sich aber drastisch reduzieren. Das Material für eine zukünftige Rumpfstruktur muss aus qualifizierten Kohlestofffasern herzustellen sein. Das Kernmaterial muss dabei aus geschlossenporigem Schaum oder aus drainagefähigen Strukturen bestehen, darf also nicht gekammert sein wie bei Honeycombs. Durch die Multifunktionalität wird gebauten Kernstrukturen das größte Potential zur Gewichtsreduzierung zugeschrieben. In BILD 8 sind drei mögliche Kandidaten für einen Doppelschalentrumpf zu sehen [7]. Oben wird die Versteifung in z-Richtung durch von oben nach unten wechselnde Fäden schon während des Webvorgangs hergestellt, in der Mitte verbinden pultrudierte CFK-Pins die beiden Decklagen, indem sie in diese hineinstecken. Der untere Kandidat gehört zu den gebauten Kernstrukturen. Hierbei kann der gefaltete Kern sogar aus CFK hergestellt werden und Tragfunktionen übernehmen. Zudem sind die entstehenden Hohlräume drainagefähig und isolieren den Passagierraum.

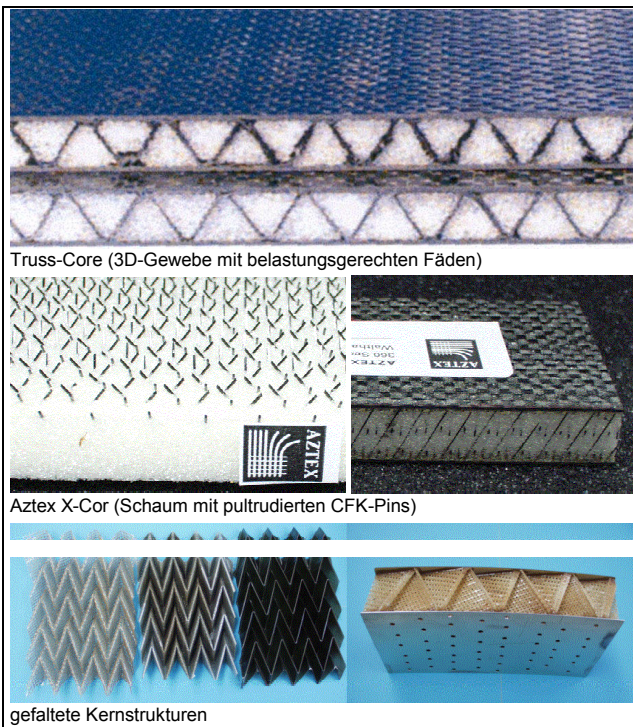


BILD 8: Neue Kernwerkstoffe für den Doppelschaler [7].

5. Modifikationen an FAME-F

Um eine Gewichtsbeurteilung der diskutierten Struktur- und Bauweisenkonzepte durchführen zu können, sind eine ganze Reihe von Modifikationen am Massevorhersageprogramm FAME-F erforderlich [8]. Der modulare Aufbau des Programms erlaubt die Anwendung neuer Routinen an beliebigen Rumpffpositionen bei den dort gegebenen Schnittlasten.

5.1. Orthotrope Rumpfschalen

Für die Dimensionierung des Rumpfes aus nicht isotropen Werkstoffen ist die Kenntnis der Spannungsverteilung in den einzelnen Strukturelementen im Rumpffquerschnitt erforderlich. Hierfür kommt die elementare Balkentheorie in Verbindung mit einer Schichtspannungsanalyse zur Anwendung [9]. Die Querschnitte bleiben eben, der Einfluss der Verwölbung wird vernachlässigt und es gelten die Annahmen von Navier sowie Bernoulli.

Weitere Modifikationen wurden bei folgenden Details notwendig:

- die Steifigkeiten werden über Dehnungskriterien beschrieben
- Stabilitätsversagen und Beulen [8, 10]
- „Klebspennungen“ zur Anbindung von Stringern und Spanten an die Haut

5.2. Nicht ovoide Rumpffquerschnitte

Um die vorgeschlagenen Strukturkonzepte bewerten zu können, müssen Details berücksichtigt werden, die bei runden oder nur wenig ovaloiden Rumpffquerschnitten zu vernachlässigen waren:

- an Ecken und Kanten durch den Innendruck hervorgerufene Biegezusatzspannungen.
- bei mehrzelligen Rumpffquerschnitten die Ermittlung der elastischen/geometrischen Größen wie z.B. elastischer Neutralpunkt und Schubmittelpunkt.

6. Literatur und Quellenangaben

- [1] W.-D. Dolzinski
Bauweisenkonzepte für Rumpffstrukturen in Faser-verbundbauweise, DGLR-Jahrestagung Leipzig 2000
- [2] A. Schmidt, M. Läßle, R. Kelm
Fuselage Weight Estimation for the new Generation of European Transport Aircraft. DGLR-Jahrestagung Bremen 1998
- [3] M. Dugas, R. Voit-Nitschmann, R. Kelm, M. Grabietz
Influence of Aeroelastic Tailoring in the Multidisciplinary Design of a New Aircraft. CEAS/AIAA/ICASE/NASA International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Williamsburg, Juni 1999
- [4] M. Grabietz
FAME-W. IMG Ingenieurbüro Michael Grabietz, Tauberbischofsheim, 1995
- [5] A.S. Herrmann und andere
Konzepte für CFK-Rumpfbauweisen zukünftiger Passagierflugzeuge. DGLR-Jahrestagung Hamburg 2001
- [6] C. Rückert
Der CFK-Rumpf – Anforderungen an Werkstoffe und Verfahren aus Innovativen Bauweisen. DGLR-Jahrestagung Hamburg 2001
- [7] R. Kehrle, J. Pfaff
Einsatzpotential räumlicher Faserverbundstrukturen im Flugzeugbau, 6. Nationales SAMPE-Symposium, Stuttgart, März 2000
- [8] N. Heltsch
Modifikation des Massevorhersageprogramms FAME-F für Faserverbundwerkstoffe und Verifikationsrechnungen an CFK-Rümpfen. Diplomarbeit am IFB, Juni 2001
- [9] U. Gaida
Schichtspannungsanalyse von orthotropen Rumpfschalen als Haut/Stringer/Spant-System. Interner Bericht der Abteilung EDCS. EADS Airbus GmbH, Hamburg, 2000
- [10] K. Hassannayabi
Untersuchung des Spannungszustandes von orthotropen Rumpfschalen bei kombinierter Last unter besonderer Berücksichtigung von Spantabstand und Stabilität. Diplomarbeit am IFB, Dezember 1998