

**Formfindung im Leichtbau**, Sommersemester 2006

**Verkehrsflugzeugbau**

## **Formfindung im Leichtbau, Sommersemester 2006**

BTU Cottbus

Lehrstuhl, Tragwerkslehre und Tragkonstruktionen

Lehrstuhlinhaberin, Prof. M.Sc. Karen Eisenloffel

Wissenschaftliche Mitarbeiter, Dipl.-Ing. Eva Krapf, Dipl.-Ing. Sönke Kruse

Referatsausarbeitung, Tomasz Bachlinski

### **Verkehrsflugzeugbau**

#### **Inhaltsangabe**

1. Einleitung
  - 1.1 Technische Entwicklung
2. Flugzeugform
  - 2.2 Auftrieb
3. Leichtbauweise der Flugzeugzelle
  - 3.1 Tragflügel
  - 3.2 Flugzeugrumpf
  - 3.3 Leitwerke
4. Differential- und Integralbauweise
5. Aussicht
6. Quellenangabe

## **Formfindung im Leichtbau, Sommersemester 2006**

BTU Cottbus

Lehrstuhl, Tragwerkslehre und Tragkonstruktionen

Lehrstuhlinhaberin, Prof. M.Sc. Karen Eisenloffel

Wissenschaftliche Mitarbeiter, Dipl.-Ing. Eva Krapf, Dipl.-Ing. Sönke Kruse

Referatsausarbeitung, Tomasz Bachlinski

## **Verkehrsflugzeugbau**

### **Einleitung**

Die Entwicklungsgeschichte des Flugzeuges beginnt mit den erfolgreichen Flugversuchen Otto Lillenthals. Seit der Jahrhundertwende entstehen zahlreiche bedeutende Firmen, die selbstständig Flugzeugmodellreihen für unterschiedliche Anwendungsgebiete entwickeln. Ein Markt für großkabinige Verkehrsflugzeuge entsteht nach dem 2. Weltkrieg und wird bis in die `80er Jahre hinein durch die amerikanischen Firmen McDonell- Douglas, Lockheed und Boeing dominiert. Mit der Gründung des europäischen Gemeinschaftsunternehmens Airbus Industries im Jahre 1970 und dem Bau der Maschine A300 B2 im Jahre 1972 sowie den nachfolgenden Modellen kann sich ein außeramerikanisches Unternehmen auf dem Weltmarkt etablieren. Gegenwärtig sind Airbus und Boeing die bedeutendsten Unternehmen bei der Produktion großkabiniger Verkehrsflugzeuge.

### **Technische Entwicklung**

Einen zukunftssträchtigen Fortschritt schafft Boeing im Jahre 1947 mit der Anwendung des Strahlenantriebes und Pfeilung der Flügel an dem großvolumigen Transporter B-47. Auf diesem Flugzeugtyp aufbauend entwirft das Unternehmen sein erstes großkabiniges Verkehrsflugzeug die Boeing 707 aus dem Jahr 1958. An der Boeing 707 sind insgesamt 4 Strahltriebwerke, jeweils zwei an beiden Tragflügeln, befestigt. Gegenüber dem Antrieb mit Kolbenantrieben kann die Fluggeschwindigkeit durch den Strahlenantrieb verdoppelt werden. Die Pfeilung der Flügel verringert den Luftwiderstand bei hoher Geschwindigkeit. Die Firmen McDonell- Douglas und Lockheed statten ihre Modellreihen mit dreistrahligen Antrieb aus. Beim Bau der ersten Airbus- Maschine A300 B2 im Jahre 1972 kann von erreichtem Fortschritt in der Antriebstechnik und der Aerodynamik profitiert werden. General Electric liefert Triebwerke mit größerer Schubleistung und geringerem Ausfallrisiko, so dass nur noch zwei Triebwerke an den Airbus installiert werden. Fortschrittlich ist zudem die Modulbauweise des Airbusses, die einen Aufbau der einzelnen Sektionen auf die Unternehmen der Airbus- Partner in verschiedenen Ländern zu verteilen erlaubt.

### **Flugzeugform**

Die Formfindung eines großkabinigen Verkehrsflugzeuges erfordert die gleichzeitige Berücksichtigung der Aerodynamik, der Antriebstechnik und dem Flugzeugzellenbau. Diese drei Disziplinen bedingen einander und sind

bei jedem Flugzeugtyp entsprechend aufeinander abgestimmt. Die typische Form eines Verkehrsflugzeuges ist bestimmt durch den strömungsgünstigen Übergang vom Bug zur großvolumigen Rumpfröhre und dem sich verjüngenden Heck. Das Heck wird am hinteren Teil des Rumpfes knickartig hochgeführt, um den Bodenkontakt des sich aufrichtenden Flugzeuges in der Startphase zu vermeiden. Der Schub, die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges geht von Triebwerken aus, die bevorzugt unterhalb der Tragflügel, nahe dem Wurzelbereich an Pylonen aufgehängt werden. An den beiden Tragflügeln wird Auftrieb erzeugt, der das Gleiten des Flugzeuges in der Luft ermöglicht. Die Klappenvorrichtung an der Profilnase- und Hinterkante dienen der Regulierung des Auftriebs, sowie der Stabilisierung und Steuerung des Flugzeuges. Das Höhen- und Seitenleitwerk und deren Ruder dienen allein der Stabilisierung und Steuerung des Flugzeuges.

### **Auftrieb**

Die Gleitfähigkeit eines Flugzeuges in der Luft beschreibt die Gleitzahl. Der Airbus A330 verfügt über die Gleitzahl 21 und gleitet dementsprechend von 1000 m Höhe ohne Einsatz der Triebwerke 21 km weit.

Der Auftrieb entsteht durch die Druckdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite des Tragflügels. Zur Erzeugung des Auftriebs ist eine Strömung vorausgesetzt, die bei der Fahraufnahme des Flugzeuges entsteht. In der Luftströmung werden Luftteilchen um das Flügelprofil abgelenkt. Gemäß der Kontinuitätsgleichung verlassen die zum gleichen Zeitpunkt oberhalb und unterhalb des Flügels umgelenkte Luftteilchen auch im gleichen Augenblick die Flügel- Hinterkante. Luftteilchen, die den Flügel an der Oberseite umströmen, haben aufgrund der Wölbung einen längeren Weg bis zur Hinterkante zurückzulegen, als Luftteilchen die den Flügel an der flachen Unterseite umströmen und erfahren demzufolge eine größere Beschleunigung. Gemäß dem Energieerhaltungsgesetz nimmt der Druck mit wachsender Geschwindigkeit ab. Demnach resultiert der Auftrieb aus den unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten ober- und unterhalb des Flügels. Der Auftrieb ist durch die Geschwindigkeitszunahme und die Vergrößerung des induzierten Anstellwinkels ( $\alpha$ ) zu erhöhen. Der induzierte Anstellwinkel ( $\alpha$ ) ist ablesbar aus der Stellung der Skelettlinie der Profilwölbung zur Strömungsrichtung und kann vergrößert werden durch Veränderung der Klappenstellung am Flügel und/oder Aufrichtung des Flugzeuges (Startphase, Steigflug). Der Auftrieb wird bei Einstellung des Winkels bis  $13^\circ$  verstärkt. Die weitere Vergrößerung des Winkels führt zur Verringerung des Auftriebs und Entstehung zunehmender Luftverwirbelungen. Ab ca.  $15^\circ$  reißt die Strömung ab.

### **Leichtbauweise der Flugzeugzelle**

Die Leichtbauweise einer Flugzeugzelle ist eine wichtige Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb eines Verkehrsflugzeuges. Das erzielte Gewichtersparnis erlaubt die Verschiebung der Gewichtsanteile zugunsten einer erhöhten Aufnahme von Passagieren und Fracht. Das Gesamtgewicht eines Flugzeuges resultiert aus:

- Struktur der Flugzeugzelle
- Antriebsanlage (Triebwerke)
- Technische Ausrüstung
- Besatzung und Dienstlast
- Nutzlast (Passagiere, Fracht)
- Kraftstoff

Die Leichtbauweise der Verkehrsflugzeuge verwendet bei der Herstellung der Flugzeugzelle leichte Baumaterialien mit hohen Festigkeitseigenschaften. Die Struktur der Flugzeugzelle ist zusammengefügt aus profilierten Bauelementen, deren Materialstärke und Ausformung der Belastung angepasst ist. Der herkömmliche Werkstoff der Leichtbauweise im Verkehrsflugzeugbau sind bei 80 bis 90 %`en Anteil Aluminiumlegierungen (Duraluminium, Aluminium- Lithium). In besonders stark beanspruchten Bereichen der Struktur werden Stahllegierungen (~5%) und Titanlegierungen (~5%) verwendet. Der Anteil faserverstärkter Kunststoffe (~5%) nimmt mit der Entwicklung und Erprobung neuer Fügungsmethoden stetig zu. Die Konstruktion der Flugzeugzelle ist mit einem mindestens 3,75 fachen Sicherheitszuschlag dimensioniert.

Lastvielfache  $2,5 * (f)$  Sicherheitsfaktor  $1,5 = 3,75$

Die hohe Lastvielfache wirkt der langsam fortschreitenden Materialermüdung entgegen, die durch Wechselbeanspruchungen (z.B. Böen, Scherwinde oder Manöverlasten) hervorgerufen wird. Materialermüdungen sind feine auf Anrieb nicht zu erkennende Anrisse des Materials, die ab einer bestimmten Anhäufung einen Ermüdungsbruch auslösen.

### **Tragflügel**

Der Aufbau des Tragflügels in Verkehrsflugzeugen erfolgt in Kastenbauweise. Bei dieser Konstruktionsart bildet ein auf die gesamte Flügellänge reichender Kasten die innere Tragstruktur. Innerhalb des Kastens sind in bestimmten Abständen Rippen bzw. Schubleche angeordnet, die den Kasten gegen einwirkende Schub- und Torsionskräfte aussteifen. Im Bereich der Triebwerksaufhängung werden die Rippen (Schubleche) verstärkt, um Kräfte aus dem Schub- und Einzellasten der Triebwerke aufzunehmen. Die Kastenwände werden durch in gleichmäßigen Abständen angeordnete Stege verstärkt. An den Schmalseiten des Kastens sind Teilrippen und Anschlüsse für die Klappenvorrichtung des Flügels angebracht. Zur Erhöhung der Biegefestigkeit kann ein Flügelkasten zweizellig ausgebildet werden. Der Flügelkasten großer Verkehrsflugzeuge dient als Tank zur Aufbewahrung des Tankstoffs. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit an allen Berührungsflächen der Niet- und Schraubverbindungen des Kastens eine Dichtmasse aufzutragen. Der Oberflächenabschluss, die Haut des Flügels ist aus mehreren Schalenteilen zusammengesetzt. Jede Flügelschale ist aus einem Aluminiumblock gefräst. Dabei wird die Oberseite des Flügels gewölbt, die Innenseite als ein Traggerüst strukturiert. Die Dicke der Flügelschalen betragen im Flügelaußenbereich wenige Millimeter, im Wurzelbereich dagegen bis zu einigen Zentimetern. Die Oberflächen sämtlicher Bauteile des Flügels werden durch Pressluft mit feinen Glasperlen beschossen. Diese

Behandlung führt zu einer Oberflächenverdichtung der Bauteile und ist mit der erzielten Wirkung des Eisenschmiedens vergleichbar.

Die Tragflügel werden in den Rumpf eingeführt und an den Flügelwurzeln innerhalb der „Center Box“ unterhalb des Kabinenbodens miteinander und der Rumpfkonstruktion befestigt. In diesem Verbindungsglied werden die gesamten auf die Flügel einwirkenden Kräfte in den Rumpf eingeleitet. Die tragende Struktur der „Center Box“ besteht aus Titan. Die beiden Flügel bilden einen durchlaufenden Träger, der am Rumpf punktgelagert ist. Die Tragflügel des stehenden Flugzeuges werden durch das Eigengewicht und die Tankfüllung nach unten gedrückt. Bei 40m Spannweite wird ein Durchhängen der Flügelspitzen bis zu 1m verursacht. An dem Tragflügel wirkender Auftrieb sowie Schubkräfte belasten diesen unsymmetrisch und verursachen zugleich Biegemomente, Schub- sowie Torsionskräfte.

### **Flugzeugrumpf**

Der Flugzeugrumpf ist entsprechend den Tragflügeln aus Einzelbauteilen zusammen gebaut. Innerhalb der Rumpfröhre geben Spanten als Umfangsverstärker die zumeist ovale Form des Rumpfquerschnitts vor. Die Spanten bilden zudem Auflager für das Passagier- und das Frachtdeck und den die Rumpfhaut verstärkenden Stringer. Die Rumpfhaut besteht aus Schalen, die aus mehreren Schichten zusammengeklebter Aluminiumblechen besteht. An diesem Bauteil sind Verklebungen gegenüber Nietverbindungen vorteilhafter, weil weniger aufwendig. Strukturteile, die einer besonders hohen Belastung ausgesetzt sind werden grundsätzlich vernietet. Im Abschlussbereich zum Heck hin ist ein Druckspant zur Sicherung des Kabineninnendrucks ausgebildet. Die Rumpfkonstruktion hält einen Kabineninnendruck von 3000bar stand. Das entspricht Druckverhältnissen in 13600m Höhe. Während des Steigfluges auf die reguläre Höhe wird innerhalb der Flugzeugkabine der in 2000m Höhe herrschende Druck beibehalten. Der Rumpf des ruhenden Flugzeuges ist als Durchlaufträger auf den Fahrwerken vorne am Bug und im Bereich der Tragflügel aufgelagert. Der hintere Rumpfteil krägt bis zum Heck aus. Am Rumpf des ruhenden Flugzeuges treten nur Biegemomente auf. Während des Fluges bilden die Tragflügel und das Höhenleitwerk Auflager. In diesem Fall krägt der Rumpf im vorderen Bereich zum Bug hin aus. Neben der Biegebelastung wirken auf den Rumpf Torsionskräfte, die durch die Stabilisierung und Steuerung des Flugzeuges entstehen. Zudem verursacht der Kabineninnendruck in der Rumpfhaut Längs- und Tangentialkräfte.

### **Leitwerke**

Die Leichtbaukonstruktion erfährt eine bedeutende Weiterentwicklung mit dem Einsatz faserverstärkter Kunststoffe beim Bau der Leitwerke für alle Airbus- Typen seit 1984. Faserverstärkte Kunststoffe sind bislang als Verbundstoffe zur Herstellung der Sekundärstrukturen (z.B. Spoiler, Fahrwerkstüren, Verkleidungsteile) angewandt worden.

Die Leitwerke werden in Modulbauweise hergestellt, in dem zuvor fertiggestellte Einzelbauelemente aus faserverstärkten Kunststoffen an einem Modulgitter zusammengefügt und in einem Autoklaven bei 120° C und 8bar zu einem Einheitlichen Bauteil verbunden werden. Am Seitenleitwerk des Airbus A320 wird die Anzahl von 2072 Einzelteilen auf 96 verringert. Die

Bauweise mit Verbundstoffen aus faserverstärkten Kunststoffen wird in kleineren Geschäfts- und Segelflugzeugen für den Gesamtbau der primären Tragstruktur einer Flugzeugzelle angewandt.

## **Differential- und Integralbauweise**

Die Struktur einer Flugzeugzelle wird in Differentialbauweise hergestellt, wobei bestimmte Bauelemente in Integralbauweise ausgeführt sein können. Die Fügungsmethode der Differentialbauweise beruht auf der Vernietung und Verschraubung sowie der Verklebung und Verschweißung von einzelnen Bauelementen. In der Integralbauweise entstehen dagegen kleine oder große Bauteile durch Fräsung oder Ätzung aus einem einheitlichen Materialvolumen. Der entscheidende Vorteil der Differentialbauweise ist die Möglichkeit der „failsafe“ Konstruktion. Bei dieser Konstruktionsart wird der auftretende Schaden nicht auf die benachbarten Bauelemente übertragen, sondern von diesen kompensiert. Die Schadstelle eines in Integralbauweise hergestelltem Bauteil breitet sich auf die gesamte Struktur unabhängig der Größe des Bauteils aus.

## **Aussicht**

Die Reduzierung des Gewichtes einer Flugzeugzelle ist eine der Maßnahmen, mit der ein konventionelles Verkehrsflugzeug wirtschaftlicher zu betreiben ist. Die Möglichkeit der Gewichtersparnis besteht in der Anwendung von Lastminderungssystemen, die ein Herabsenken des Sicherheitszuschlages erlauben würden sowie der erweiterten Anwendung faserverstärkter Kunststoffe.

Der hohe 3,75-fache Sicherheitszuschlag bei der Dimensionierung der Flugzeugzelle verdoppelt in etwa das Gewicht der tragenden Struktur. Lastminderungssysteme erkennen frühzeitig Turbulenzen, z.B. Böen oder Scherwinde und richten dementsprechend Steuerungs- und Stabilisierungsvorrichtungen, z.B. Flügelklappen, Ruder oder Spoiler aus, um die auf das Flugzeug einwirkende Kraft zu vermindern. Der Sicherheitszuschlag wird mit der Weiterentwicklung der Lastminderungssysteme abgesenkt werden können.

Um die faserverstärkten Kunststoffe in der primären Tragstruktur der Flugzeugzelle in größerem Umfang anwenden zu können, ist die Entwicklung und Erprobung neuer Konstruktions- und Fügungsmethoden notwendig.

## **Quellenangabe**

- Flugzeug Aerodynamik, Reinhard Kutter
- Die Technik des modernen Verkehrsflugzeuges, Klaus Hünecke
- Airbus international, Hellmut Penner/ Dietmar Plath