

# Praxis-Seminar Luftfahrt

Vortrag vom 11.03.99

Referent:

**Dipl.-Ing. U. Graeber**

**DaimlerChrysler Aerospace Airbus, Hamburg**

Thema:

**Die Rolle der Flugmechanik im interdisziplinären Entwurfsprozeß  
von Großflugzeugen**

## Zusammenfassung des Vortrags

### Einleitung

- Die Flugmechanik beschreibt die Bewegung der Flugzeuge im dreidimensionalen Raum mit 6 Bewegungsgleichungen und 3 Koordinatentransformationen. Diese Gleichungen sind ohne Vereinfachungen analytisch nicht lösbar.
- Vereinfachung: Trennen der Bewegungsgleichungen:
  - Längsbewegung: Auftrieb, Widerstand, Nickmoment
  - Seitenbewegung: Rollmoment, Giermoment, Seitenkraft.
- Aufgabe der Flugmechanik ist die Interpretation, Vereinfachung und Lösung der Bewegungsgleichungen im Hinblick auf Problemstellungen wie:
  - Steuerbarkeit
  - Stabilität
  - Flugleistungen
  - ...

## Der Datenaustausch der Flugmechanik mit kooperierenden Fachdisziplinen

"Die Flugmechanik ist nicht der Nabel der Welt", wenn man aber einmal die Flugmechanik als Sichtweise wählt, dann gibt es folgende umgebende Fachdisziplinen:

- Aerodynamik, Aeroelastik, Projekt, Struktur, Flugleistungen, Zulassung, Systeme, Triebwerk, Lastannahmen, Gewichte.
- Datentransfer: Flugmechanik → Lastannahmen:  
Begrenzungsfunktion der *Rudder Travel Limitation Unit*  
(Seitenruderausschlagbegrenzung)
- Datentransfer: Flugmechanik → Struktur:  
Für  $V_{MU}$  - Versuch (minimum unstick speed) werden geliefert:
  - Kräfte beim *tail skid*
  - Berührungspunkt des Rumpfes mit der Startbahn (ändert sich während des Startlaufs)
- Datentransfer: Triebwerk → Flugmechanik:  
Bruttoschub = f ( H, M, *rating*, N, EPR )  
*rating*:  
flight idle, 40%, 60%, 80%, max. cruise, max. climb, max. continuous, max. take-off.
- Datentransfer: Systeme → Flugmechanik:  
Fahrwerksdaten: Federkennlinien, Dämpfungsbeiwerte  
Flugsteuerungsdaten: Übertragungsfunktion der Aktuatoren an den Steuerflächen.
- Datentransfer: Flugmechanik → Systeme:  
Ruderscharniermomente.
- Datentransfer: Zulassung (Fehleranalyse) → Flugmechanik:  
vorläufige Fehleranalyse in Form einer Auflistung von Fehlerfällen.
- Datentransfer: Flugmechanik → Zulassung (Fehleranalyse):  
Bewertung der Fehlerfälle nach ACJ No. 1. to JAR 25.1309 (siehe **Bild 1**).
- Datentransfer: Flugmechanik → Flugleistungen:  
 $V_{MU}$         minimum unstick speed,  
*minimum control speeds* (mit dem kritischen Triebwerk ausgefallen):  
 $V_{MCG}$         minimum control speed on the ground,  
 $V_{MCA}$         minimum control speed, take-off climb  
 $V_{MCL}$         minimum control speed, approach and landing.

EFFECT ON AIRCRAFT AND OCCUPANTS	Normal	Nuisance	Operating limitations; emergency procedures	Significant reduction in safety margins; difficult for crew to cope with adverse conditions; passenger injuries	Large reduction in safety margins; crew extended because of workload or environmental conditions; serious injury or death of small number of occupants	Multiple deaths, usually with loss of aircraft								
F.A.R. PROBABILITY (REF ONLY)		PROBABLE		IMPROBABLE	IMPROBABLE	EXTREMELY IMPROBABLE								
JAR-25 PROBABILITY	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	FREQUENT	10 <sup>-3</sup>	REASONABLY PROBABLE	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	EXTREMELY IMPROBABLE	EXTREMELY IMPROBABLE
CATEGORY OF EFFECT				MINOR						MAJOR		HAZARDOUS		CATAS-TROPHE

FIGURE 1 — RELATIONSHIP BETWEEN PROBABILITY AND SEVERITY OF EFFECTS

Bild 1: ACJ No. 1. zu JAR 25.1309 [JAR 25]

## Bauvorschriften mit zentraler Bedeutung für die Flugmechanik

Bauvorschriften sind: *Joint Aviation Requirements* (JAR) detailliert in *Advisory Material Joint* (AMJ) und *Advisory Circular Joint* (ACJ). Bauvorschriften mit zentraler Bedeutung für die Flugmechanik enthält **Tabelle 1**.

**Tabelle 1:** Bauvorschriften mit zentraler Bedeutung für die Flugmechanik

JAR 25.103 <b>stall</b>	Dimensionierung Höhenleitwerk und Höhenruder im Niedergeschwindigkeitsbereich (Steuerbarkeit)
JAR 25.145 <b>speed recovery</b>	<i>push over</i> (schnelles drücken des Steuerhorns / Side Sticks um zu niedrige Fluggeschwindigkeit schnell zu korrigieren) dabei kann es zum <i>negative tail stall</i> kommen (Abreißen der Strömung am Höhenleitwerk)
JAR 25.161 <b>trim</b>	qualitative Aussage über Trimbarkeit im gesamten Flugbereich (Steuerbarkeit)
JAR 25.201 <b>stall demonstration</b>	Trim für Überziehnachweis (Steuerbarkeit)
JAR 25.255 <b>out of trim</b>	<i>runaway</i> der Höhenflosse für 3 Sekunden (Steuerbarkeit)
JAR 25.335 <b>dive</b>	Nachweis der Steuerbarkeit bei der <i>design diving speed</i> $V_D$ und der <i>design diving Mach number</i> $M_D$
JAR 25.171 <b>stability general</b>	Allgemeine qualitative Aussagen
JAR 25.173 <b>static longitudinal stability</b>	Steuerkräfte (11b / 6 kts Minimum). Die "natürlichen Flugzeuge" erfüllen JAR 25.173 oftmals nicht in allen Flugbereichen. Die Höhenflosse wird dann durch die Flugregelung (Mach-Trim, $V_C$ -Trim) so verstellt, daß Höhenruderausschläge resultieren, die die geforderten Steuerkräfte produzieren. Die Airbus Flugzeuge mit <i>Fly-By-Wire</i> (FBW) Flugsteuerung und "C*-Law" erfüllen JAR 25.173 nicht! Für diese Flugzeuge wurden " <i>Special Conditions</i> " mit den Zulassungsbehörden vereinbart. B777 erfüllt JAR 25.173, weil die B777 trotz FBW ein konventionelles Flugsteuerungssystem hat (Steuerhorn und "künstliches Gefühl").
JAR 25.175 <b>demonstration of static longitudinal stability</b>	Im Prinzip Nachweisführung wie JAR 25.171 im Detail, zum Teil recht allgemein, qualitative Interpretation durch den Cheftestpiloten
JAR 25.181 <b>dynamic stability</b>	Allgemeine Aussagen zur Dämpfung von Anstellwinkelschwingung ( <i>short period oscillation</i> ) und Taumelschwingung ( <i>dutch roll</i> )

## Airbus-Auslegungskriterien

- Die Flugmechanik macht zunächst eine Auslegung nach "Höhenruderausschlag pro g". Durch die Flugsteuerungsgesetze und die Federkennlinie im *side stick* der FBW-Flugzeuge werden daraus die geforderten "Steuerkräfte pro g".
- 10% *manoeuvre margin*.

## Fly-By-Wire (FBW)

Historischer Gang der Entwicklung zum FBW:

### 1.) Mechanische Signalübertragung und mechanische Kraftübertragung

Steuerhorn → Ruderfläche; "aerodynamische" Krafterzeugung am Steuerhorn, Reduzierung der Steuerkräfte durch Ruderhörner, Tabs, ...

### 2.) Mechanische Signalübertragung und hydraulische Krafterzeugung

Steuerhorn → evtl. mechanische "Mischmaschine" (Überlagerung von Signalen) → hydraulische Krafterzeuger (Aktuatoren) → Ruderfläche. Keine Krafterückwirkung zum Piloten, dadurch wird "künstliches Gefühl" erforderlich. "Künstliches Gefühl" Funktion von Machzahl, Staudruck und Schwerpunkt-lage. Anmerkung: der unangezeigte Ausfall des "künstlichen Gefühls" wird als "*catastrophic event*" eingestuft.

### 3.) Elektrische Signalübertragung (FBW) und hydraulische Krafterzeugung

*side stick* → Flugsteuerungscomputer → hydraulische Krafterzeuger (Aktuatoren) → Ruderfläche. *side stick* Kräfte bei konstanter Federkennlinie. Anpassung des Flugverhaltens durch die *control laws* in Form einer Vorgaberegung (dies ist der wesentliche Unterschied zwischen Airbus und Boeing FBW).

## Vorteile durch FBW:

- Gewichtsersparnis, z.B. A320 ca. 200 ... 300 kg pro Flugzeug.
- Flexible Mischung von Signalen.
- Erhebliche Verbesserung der Flugeigenschaften im Vergleich mit einer konventionellen Flugsteuerung.
- Wegfall von vielen mechanischen Komponenten wie z.B. das "künstliche Gefühl", Seile, Rollen, Seilspanner, "Mischmaschienen".

### **Nachteile durch FBW:**

- Neue Lastfälle mit zum Teil höheren Lasten.
- Für Schulung wäre eine mechanische Kopplung der beiden *side sticks* von Vorteil. Diese mechanische Kopplung wäre aber sehr aufwendig und teuer und wurde daher nicht vorgesehen. Stattdessen: elektrische Kopplung der *side sticks*: statt vorzeichenbehafteter Addition der Kräfte wird beim Airbus FBW gewählt: vorzeichenbehaftete Addition der Ausschläge. Falls ein Pilot einen Herzinfarkt bekommen sollte (Wahrscheinlichkeit: einmal alle 10 000 000 Flugstunden), so kann der betroffene *side stick* abgeschaltet werden. Das Flugzeug wird dann über den verbleibenden *side stick* durch den zweiten Piloten geflogen.

### **Bewertung von neuen Flugzeugkonfigurationen durch die Flugmechanik**

- Dreiflächenflugzeug mit Entenleitwerk vorn (*canard*):  
"canard ist flugmechanisch und systemtechnisch sehr ungünstig".
- Nurflügelflugzeug:
  - Probleme werden auftreten bei der Dämpfung der Taumelschwingung (*dutch roll*).
  - Passagiere sitzen seitlich weit verteilt und damit teilweise weit außen. Rollbeschleunigungen bewirken große Vertikalbeschleunigungen am Sitz der Passagiere. "Was macht der Kaffee in der Tasse?"

### **Literaturhinweis**

[JAR 25]                      JOINT AVIATION AUTHORITIES: *Joint Airworthiness Requirements, Part 25, Large Aeroplanes.* - Vertrieb: Civil Aviation Authority, Cheltenham, GB

Hamburg, 12.03.1999

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME