

# Gegenüberstellung der Ergebnisse von Berechnung und Versuch für einen A380 Flaptrack unter statischer Belastung

T. Haberle, M. Pauly  
EADS OTN MT 233  
Statik/Festigkeit-Airbus-Flap Tracks

## Übersicht

Für die Zulassung von Luftfahrtstrukturen muß über den Vergleich zwischen Rechenergebnissen und Versuch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das wirkliche Bau teil gezeigt werden. Beim Einsatz der Finite-Element-Methode (FEM) erfolgt dieser Vergleich an Referenzpunkten. Anhand eines Flap-Tracks im A380-Projektes soll dieser Prozeß exemplarisch aufgezeigt werden.

In diesem Beitrag werden die wesentlichen Einflussgrößen für mögliche Abweichungen zwischen FEM und Versuch identifiziert und anhand der gewählten Struktur das praktische Vorgehen erläutert. Fehlerquellen werden benannt und einfache Kontrollmöglichkeiten aufgezeigt. Hinweise zu den möglichen Grenzen bei Messung wie FEM schließen das Thema ab.

## 1. Einleitung

Im Rahmen des allgemeinen Zulassungsprozesses ist unter anderem der Nachweis zu führen, dass für die statische Festigkeit die Struktur den maximal angreifenden Lasten bei ausreichenden Reserve standhält. In einem Komponenten- oder Gesamtstrukturversuch werden aber nur einzelne Lastfälle getestet. Um alle relevanten Lastfälle sowie Umgebungsbedingungen nachweisen zu können, werden rechnerische Modelle benutzt. Dieser rechnerische Nachweis basiert für die Gesamtstruktur in der Regel auf einem FE-Modell. Der Vergleich von FE-Rechnung und Versuch stellt daher eine wesentliche Komponente in der Nachweisführung und damit

der Zertifizierung von Luftfahrtstrukturen dar.

Für die Zulassung ist dabei zu zeigen, dass das verwendete FE-Modell mit ausreichender Genauigkeit die Verhältnisse der realen Struktur wieder gibt.



Bild 1:  
Übersicht  
der Flap-Tracks

Da für den A380 erstmals bei den Flaptracks eine neue Bauweise bzw. neue Materialien eingesetzt wurden (siehe Bild 3), konnten die Ergebnisse und Erfahrungen mit dem bestehenden Konzept nur bedingt übertragen werden

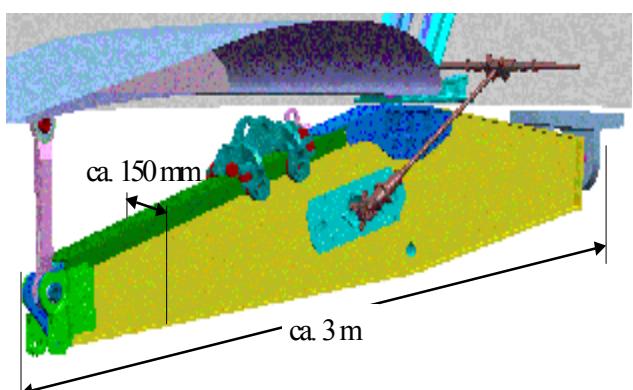


Bild 2: Integration des Tracks am Flügel bzw. Klappe / Dimensionen von Track6

Für den Qualifikationsprozess wurden daher an den Flaptracks umfangreiche Full-Scale-Struktur-Tests durchgeführt.

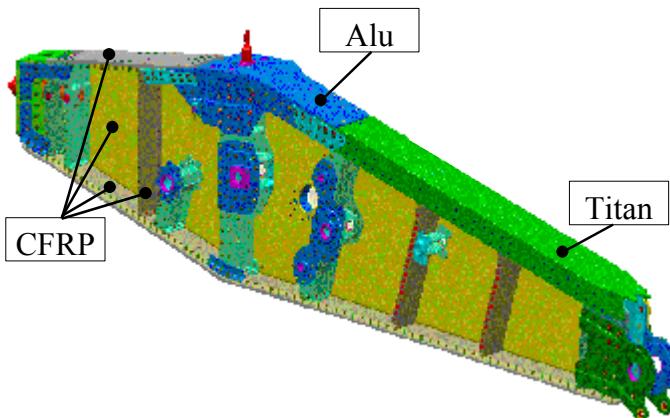


Bild 3: Typischer Aufbau und verwendete Materialien

Die Tests dienten zum einen dazu direkt die Tragfähigkeit für kritische Belastungen nachzuweisen viel wesentlicher aber zum anderen die Übertragbarkeit zwischen FEM und realer Struktur zu zeigen.

Erst damit wird es möglich für Lastbedingungen die nur bei dem FEM gerechnet und nicht getestet wurden die Qualifikation auf Basis des FE-Modells durchzuführen.

## 2. Grundmodell

Um verformungs- und thermalinduzierte Lasten zu vermeiden wurde eine statisch bestimmte Lagerung des Flap-Tracks am Flügel gewählt. Wie aus Bild 4 zu erkennen ist, kann so der Track vereinfacht als Kragträger betrachtet werden. Für die spätere Interpretation der Ergebnisse (siehe Kapitel 5) ist diese Vereinfachung sehr hilfreich.

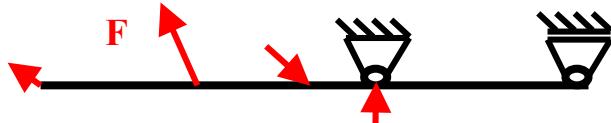


Bild 4: statisch bestimmtes Grundmodell

Zudem ist hier schon die Sensitivität der richtig modellierten Lagerung auf die Verformungsergebnisse am „freien“ Trackende zu erkennen.

Grundsätzlich ist die Bedeutung eines möglichst einfachen, analytisch leicht be-

rechenbaren Modells sehr groß, da hiermit erst die Möglichkeit gegeben ist, einfache Kontrollen gegenüber den FE-Ergebnissen durchzuführen.

## 3. FE-Modellierung

Das FE-Modell wurde im wesentlichen mit Hilfe von Vierknoten Schalenelementen aufgebaut. Es wurden nur 1-D und 2-D Elemente verwendet. Wie in Bild 5 zu sehen ist, wurde eine relativ feine Vernetzung gewählt. Dies war notwendig um das Modell auch für eine Beuleigenwertanalyse nutzen zu können. Die typischen Elementgrößen waren ca. 25x25 mm. Für den Track 6 ergab diese Modellierung eine Schalenelementanzahl von ca. 22.500. Als Solver wurde Nastran eingesetzt. Die Faserverbundschalen wurden durch PCOMP- und MAT8- Karten gebildet.

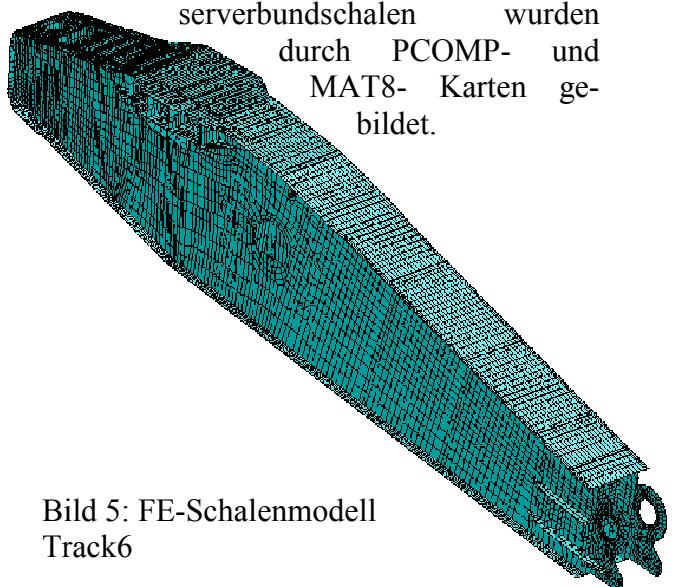


Bild 5: FE-Schalenmodell Track6

## 4. Test

Der Test des Flap-Track 6 Einzelversuchs wurde in Dresden in den Versuchshallen der IMA durchgeführt. Soweit möglich wurden die original-Aufhängepunkte und Anschlussbauteile gewählt. Um die Lasten einzuleiten wurden an 10 Punkten Hydraulikzylinger angebracht. Insgesamt wurden während dem Versuch die Signale von 3 Messbrücken, 17 Wegkanäle und 120 Dehnkanäle aufgezeichnet.

Um Setzeffekte oder mögliche Nichtlinearitäten zu identifizieren wurde Messungen vor und nach der Nennlast in Stufen bei Teillast durchgeführt.



Bild 6: Versuchsaufbau bei der IMA in Dresden

## 5. Vergleich FEM / Test

Für einen Vergleich zwischen FEM und Test wurden 4 repräsentative Lastfälle, 14 Dehnmeßstellen und 5 Wegmessungen ausgewählt. In Bild 7 ist die Lage diese Referenzpunkte zu erkennen. Vor Aufbringen der Lasten wurden alle Signale kalibriert.

Für den Vergleich wurden die Ergebnisse aus der FE-Rechnung an den Referenzpunkten ausgewertet. Ausgewertet wurden je nach Lage Einzelergebnisse oder der Mittelwert mehrere Elemente. Die im Test aufgebrachten Lasten wurden in speziell angepaßten FE-Lastfällen ausgewertet.

### 5.1 Basisvergleich

Aufgrund der scheinbar einfachen Struktur mit klar definierten Lastwegen und dem sehr guten Detailierungsgrad des FE-Modells wurden keine Schwierigkeiten bei dem Vergleich zwischen FE und Test erwartet. Daher wurde ein direkter Vergleich zwischen Verformungs- und Deh-

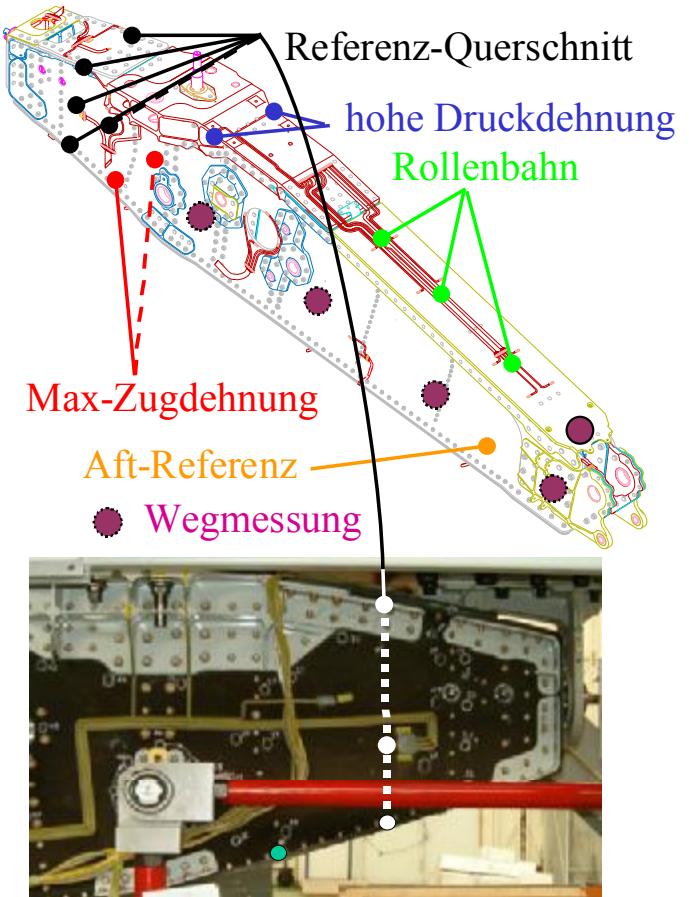


Bild 7: Ausgewählte Vergleichs-Positionen

nungsvorhersage und Messung für die relevanten 4 Lastfälle durchgeführt. Wie in Bild 8 zu erkennen ist ergeben sich aber erhebliche Unterschiede bei Verschiebungen wie auch Dehnungen so dass eine sehr schlechte Übereinstimmung festgestellt werden muss.

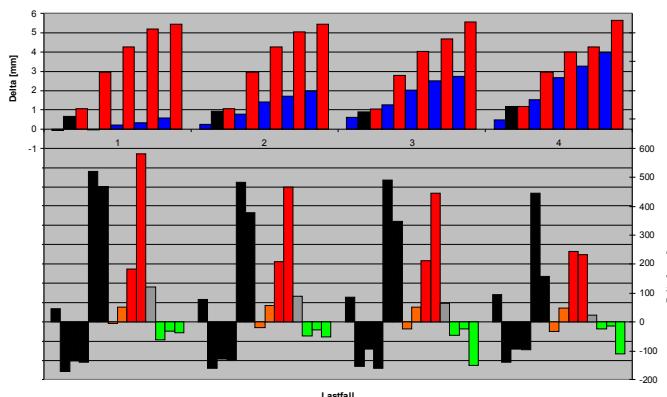


Bild 8: Direkter Vergleich

Im oberen Teil von Bild 8 ist die Differenz der Verschiebungen dargestellt. Die Abweichungen sind hier meist größer 30%. Insbesondere fällt die vertikale Verschiebungsdifferenz auf (rote Balken) da die Verschiebung nach der FEM deutlich zu groß berechnet wird. Im unteren Teil von Bild 8 sind die Dehnungsdifferenzen zu sehen. Gerade die Dehnungen im Referenzquerschnitt (schwarz) und im Bereich maximaler Zugdehnung (rot) sind in der Regel nach der FE-Rechnung um bis zu 500  $\mu\text{m/m}$  zu groß.

Diese unerwartet große Abweichungen können nicht durch die normalen Unterschiede zwischen rechnerischer Modellierung und Versuch erklärt werden, so dass grundsätzliche Unterschiede bestehen müssen.

## 5.2 Analyse der Unterschiede

Wie in Bild 9 dargestellt ist müssen zur Identifikation der Ursachen für die Unterschiede die einzelnen Bereiche unterscheiden werden.

Zum einen müssen die Fehlermöglichkeiten von Messung und Rechnung für sich untersucht werden. Diese Kontrollen werden in der Regel während der Test- bzw.

Modellerstellung durchgeführt und sind somit im Rahmen einer Qualifizierung klar umsetzbar.

Zum anderen müssen mögliche – immer bestehende – Unterschiede gefunden werden und ihre Sensitivität untersucht werden.

Bei genauerer Analyse werden insbesondere die Unterschiede zwischen dem numerisch / mathematischen FE-Modell und der Messung am Bauteil aber deutlich.

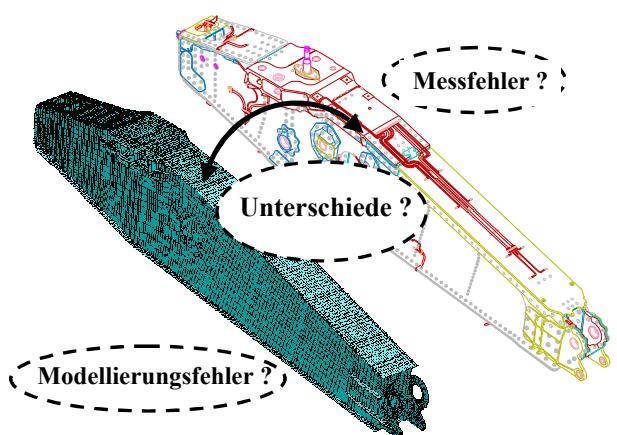


Bild 9: Identifikation der Unterschiede

Der scheinbar triviale Vergleich zwischen Berechnungs- und Versuchsergebnissen erweist sich so in der Realität schon bei den Verformungen als schwierig, da man zwischen Modellbildung und realem Test zwangsläufig teilweise sehr unterschiedliche Systeme – insbesondere was die Lagerbedingung betrifft – vergleicht.

Auf der Seite der Numerik werden Vereinfachungen in Form von Verformungsansatz, Materialgesetz und idealen Randbedingungen gemacht. Dabei werden bei dem FE-Modell für die Zertifizierung nach Möglichkeit die Vereinfachungen so gewählt, dass ein eher konservatives Modell (bezüglich der Spannungen und Dehnungen) entsteht.

Bei der Messung hingegen stehen Fragen der Umsetzbarkeit und des Aufwandes im Vordergrund, so dass zum Beispiel viele Versuche nur bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Dabei können zusätzliche Abweichungen durch Messgenauigkeiten wie Messfehler bei der Messtechnik,

falsche oder falsch aufgebrachte Dehn-Mess-Streifen (DMS) entstehen.

Nicht oder nicht richtig eingebrachte Reibkräfte führen zudem bei den Ergebnissen der FEM zu – zum Teil – erheblichen Unterschieden.

Um die Wirkung der einzelnen Kraftsysteme unabhängig beurteilen zu können wurden Einzelbelastungen durch die Kraftzylinder einzeln aufgebracht (Einzellastversuche). Dadurch konnte die Wirkungsweise (Last => lokale Dehnung und Verschiebung) deutlich besser verstanden werden.

Im Fall der schlechten Übereinstimmung der Verschiebungen wurde somit ein Unterschied der Randbedingungen am hinteren Lagerpunkt zwischen Test und Rechnung deutlich sichtbar.

Wie in Bild 10 zu erkennen hatte nach a) eine Vorspannkraft einen nicht zu vernachlässigenden Abstand zum Lagerpunkt zudem war nach b) die FE-Lagerung mit Sperrung nur jeweils eines Knotens deutlich zu weich.

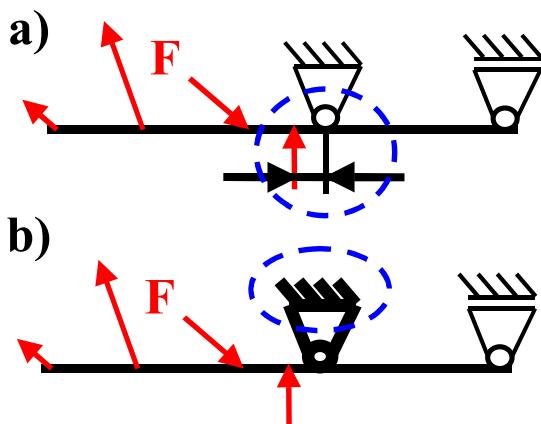


Bild 10: Anpassung im hinteren Lager

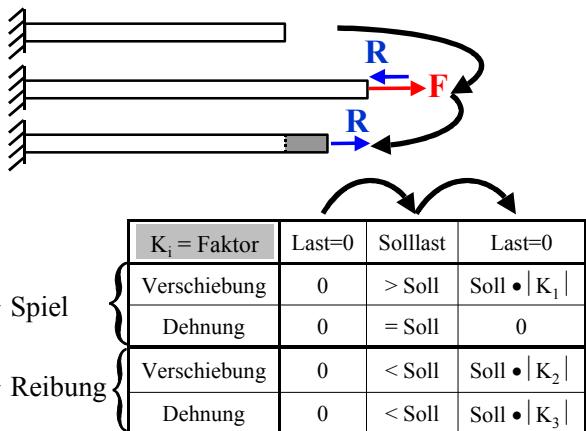
Beide Maßnahmen auf der FE-Seite führten zu einer deutlich besserer Übereinstimmung bei den Verschiebungen.

Die Unterschiede zwischen den Dehmessstreifen (DMS) blieben aber gerade im vorderen Bereich weiter unakzeptabel hoch so dass die Ursachen gefunden werden mußten.

### 5.3 Zusätzliche Effekte

Neben den beschriebenen Effekten aus veränderten Anschlusssteifigkeiten oder Lage der Kraftangriffspunkten sind Unterschiede grundsätzlich auch durch Nichtlinearitäten vorhanden. Neben den hier nicht wirksamen Materialnichtlinearitäten sind dies hauptsächlich Effekte aus Reibung und Lagerspiel.

Hinweise auf solche Effekte ergaben sich



durch die Auswertung der Messergebnisse. Zwischen lastfreiem Anfangs- und Endzustand ergab sich an einigen Messpunkten eine Rest-Verschiebung bzw. -Dehnung.

Bild 11: Nichtlineare Effekte

In Bild 11 ist das gedachte Verhalten eines Zugstabes unter Testbedingungen dargestellt. Wesentliche Unterschiede zwischen Lagerspiel und Reibung sind zum einen das die Sollwerte (Wert ohne nichtlineare Effekte) bei Reibung immer unterschritten bei Spiel erreicht bzw. überschritten werden. Zum anderen ist die Dehnung nach aufbringen einer gedachten Last bei Lagerspiel die einzige Größe ist, die wieder zu Null wird.

Durch Übertragung der Effekte aus dem Zugstab auf die Trackstruktur konnte im vorliegenden Fall das Reibmoment an den Auflagerpunkten um die Hochachse als wesentliche Einflussgröße identifiziert werden. Nach Anpassung durch ein zusätzliches freies Moment in der FE-Rechnung reduzierten sich die Abweichungen deutlich. Die Abweichung der relevanten Grö-

ßen lag in den meisten Fällen damit in einem akzeptablen Niveau unter 10%.

Wie in Bild 12 zu sehen ist, stimmen die Verschiebungen sehr gut überein. Bei den Dehnungen sind die Unterschiede meist kleiner 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ .

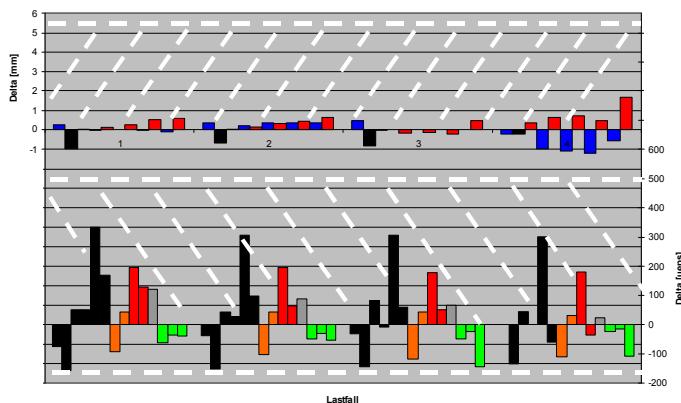


Bild 12: Angepasster Vergleich

Die ursprünglichen Abweichungsgrenzen sind weiß schraffiert dargestellt und zeigen die deutliche Reduktion der Unterschiede durch eine geeignete Anpassung.

## 6. Zusammenfassung

Wie das Beispiel an einem Flap-Track zeigt, ist der direkte Vergleich zwischen dem FE-Modell (Zertifizierungsmodelle) und dem Versuch meist nicht möglich. Der zusätzliche Arbeitsaufwand für diese Auswertung sollte nicht unterschätzt werden.

Um eine Anpassung (meist des FE-Modells) möglichst effektiv durchzuführen sind folgende Voraussetzungen zu schaffen:

- Erstellen eines vereinfachten Grundmodells zur analytischen Berechnung relevanter Größen
- Erstellen einer Versuchsmatrix auf Basis von Einzellastversuchen.  
Dadurch ist ein Verständnis für :
  - Last => Dehnung und Verschiebung für die Einzellasten sowie und eine
  - Identifikation der wesentlichen Einflussparameter möglich

Grundsätzliche Fehlerquellen bei Versuch wie Rechnung müssen durch geeignete Zertifizierungsmaßnahmen nach Möglichkeit ausgeschlossen werden. Der Vergleich bietet aber auch die Möglichkeit Fehlerquellen und Unterschiede erst zu entdecken.

Für die bestehenden Abweichungen muss ein Verständnis für die Ursachen geschaffen werden!

Aus dieser Basis ist in der Regel eine gute Übereinstimmung zwischen FEM / Versuch (ggf. unter Berücksichtigung zusätzlicher Effekte) gegeben.

Im Zulassungsprozess von Luftfahrtstrukturen ist gerade diese Übereinstimmung eine wichtige Voraussetzung, da so zum einen die Übertragbarkeit von Versuch und FEM zum anderen der Bezug zur wirklichen Struktur gezeigt werden kann.