

# LUFTFAHRTFORSCHUNG IN DEUTSCHLAND VON LILIENTHAL BIS HEUTE

H. Prem, ehem. MBB/DASA, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Persönlichkeiten der deutschen Luftfahrtforschung stehen in der historischen Beschreibung meist im Hintergrund. Dominierend sind die Unternehmer. Dieser Beitrag geht von ausgewählten Eckdaten deutscher Fluggeschichte aus, die mit Lilienthal beginnt. Er vereinigte in sich den Forscher, Testpiloten und Unternehmer, der den Gebrüdern Wright seine Gleiter verkaufte. Luftfahrtforschung war schon immer international!

Aufgrund der politischen Verwicklungen hat Deutschland sowohl nach dem Ersten wie auch nach dem Zweiten Weltkrieg Brüche in der Luft- und Raumfahrttechnik erlebt, die erst jetzt mit der Harmonisierung der europäischen Industrie- und Forschungslandschaft überwunden werden konnten. Der nicht einfache Weg dorthin und die Leistungen dieser Forscherpersönlichkeiten werden in dem Beitrag beschrieben.

## Einleitung

Auf dem DGLR Kongress 2004 wurden unter dem gleichen Thema vor allen Dingen die Forscherpersönlichkeiten herausgestellt. 45 Lebensläufe sind in dem mit Ernst Heinrich Hirschel und Gero Madelung herausgegebenen Buch „Luftfahrtforschung in Deutschland“ im Bernard & Graefe Verlag enthalten. Wenn Sie nur diese Kurzbiographien lesen, erhalten Sie einen Gesamtüberblick über den problematischen Weg, den dieser Technikforschungsbereich durch zwei Weltkriege hindurch zurücklegen musste.

Um Lilienthal, Prandtl, Junkers, Tank, Banseмир, Busemann, Kawalki, Frenzel, Franz, Wagner, Küssner, Focke und viele andere mehr [1], [2] kommt man bei diesem Gesamtüberblick nicht herum. Dieser ist im Beitrag 2004 der Dresdner DGLR-Tagung gegeben [3]. Heute möchte ich daran anknüpfen, aber den Schwerpunkt auf den Neuanfang nach 1945 legen (Bild 1).

## Eckdaten

Bei dem Zeitstrahl, der ausgewählte Eckdaten deutscher Fluggeschichte zusammenfasst (Bild 2), fällt die Masse der Erstflüge ab Mitte der 80-er Jahre auf. Es war die Zeit, in der die Ergebnisse in die Anwendung überführt wurden, die

diejenigen erzielt haben, die den Wiederaufbau und die internationale Einbindung der Luft- und Raumfahrtindustrie nach dem Zweiten Weltkrieg erfolgreich betrieben haben. Ich bin immer noch dankbar für die Möglichkeit, in dieser Phase mitgestaltet zu haben.

Ein Schlüsselerlebnis war dabei für mich der Patentstreit mit den USA über den superkritischen Flügel der A310. In dem Zeitstrahl ist zu erkennen, dass Kawalki bereits 1940 Schnellflugprofile vorschlug, die dann auch vermessen wurden. Es war leider so, dass die Befragung deutscher Experten 1945, zusammengefasst in den Combined Intelligence Objectives Subcommittee (CIOS)/Field Information Agency Technical (FIAT)-Berichten, zu US-Patenten geführt hatte, die uns noch Mitte der 80-er Jahre vorgehalten wurden. Aufgrund der Zusammenarbeit in Deutschland zwischen Forschung, Industrie und Deutschem Museum konnten diese Patentstreitigkeiten um den superkritischen Flügel der A310 beigelegt werden. Deutsche Forschungsergebnisse aus den 40-er Jahren haben damals den Airbus gerettet.

Einen weiteren Schwerpunkt möchte ich auf die Auswahl von Ereignissen und Daten aus dem Umfeld der Deutschen Luftfahrtforschung legen. Die ausführlichere Zusammenfassung findet sich im Klappentext des Bandes 30 „Luft-

fahrtforschung in Deutschland“.

Zwischen 1889 und 1896 hatte der Forscher, Entwickler, Testpilot und Unternehmer Otto Lilienthal (Bild 3) intensiven Kontakt mit den Wright Brothers. Sie kauften seine Gleitapparate und experimentierten damit. Lilienthal wollte zunächst den Gleitflug verstanden haben, bevor er in so einen Gleiter einen Motor einbauen würde. Versuche und Überlegungen dazu sind in Stöln in der Rhinower Heide dokumentiert. Aber leider kam ihm sein tragischer Absturz zuvor. Die Wrights setzten dann das um, wovon alle träumten, den gesteuerten Motorflug.

Dass 1907 dann die Gründung einer Modellversuchsanstalt der Motorluftschiff-Studiengesellschaft in Göttingen erfolgte, zeigt nur das Misstrauen gegen die Lilienthalsche Idee, mit Flugzeugen schwerer als Luft zu operieren. Lilienthal hatte aber in seinem Buch [4] „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ bereits 1889 unter dem Kapitel „Der Ballon als Hindernis“ mit klarem Blick beschrieben, warum es nur in Richtung des Flugzeuges schwerer als Luft gehen könne. Er war auch derjenige, der nach Fehlversuchen erkannte, Auftrieb und Antrieb sauber voneinander trennen zu müssen. Auch wenn er noch nicht die Bedeutung des induzierten Widerstandes für den Auftrieb erkannt hatte, war doch seine entscheidende Erkenntnis, den Auftrieb über gekrümmte Platten zu erzeugen.

Lilienthals Beobachtungen über den Storchenflug sind phänomenal für einen 14-Jährigen, wenn er feststellt, dass die Störche auch wenn sie Witterung von ihm und seinem Bruder Gustav beim Anschleichen aufgenommen haben, erst auf sie zufliegen und dann erst abdrehen. Das ist der Start gegen den Wind! Wir werden am Ende des Vortrages sehen, was passiert, wenn solche grundsätzlichen physikalischen Phänomene nicht beachtet werden (Bild 4).

1909 beginnt dann Prandtl in Göttingen seine Vorlesungen über Aerodynamik. Hier werden die Grundlagen gelegt, um den Vogelflug in Gänze zu verstehen. Aber selbst Lilienthal hatte sich bereits Gedanken gemacht über die Bedeutung der Aufspreizung der Randfedern beim Storch. Erst heute gehen wir im Flugzeugbau daran, mit Winglets die Randwirbel zu beeinflussen und damit den induzierten Widerstand

zu reduzieren.

Prandtl hat acht Jahre Überzeugungsarbeit leisten müssen bis aus der Modellversuchsanstalt für Motorluftschiffe eine für Aerodynamik wurde, seine berühmte Aerodynamische Versuchsanstalt (AVA). Albert Betz [5], einer seiner engsten Mitarbeiter, hat 1926 Windprofile über dem Festland untersucht und festgestellt, erst ab 130 m Höhe etwa Windverhältnisse wie über dem Meer zu erreichen. Wenn heute bei Windkraftanlagen Nabenhöhen von 148 m Höhe im Binnenland realisiert werden, dann finden 90 Jahre alte AVA-Ergebnisse ihre Anwendung.

Wesentliche Beiträge zur internationalen Luftfahrtforschung sind in Bild 5 zusammengefasst. Aus Gesprächen mit Ludwig Bölkow weiß ich, dass es in den 30-er Jahren üblich war, sich um die wissenschaftlichen Erkenntnisse, nicht aber um die politischen Verwicklungen zu kümmern. Mit der Machtübernahme Hitlers 1933 (Bild 6) und der einseitigen Aufkündigung der Beschränkungen der deutschen Luftfahrt aus dem Versailler Vertrag wurde der politische Einfluß auf die Luftfahrtforschung verstärkt. Junkers träumte vom völkerverständigenden internationalen Luftverkehr und wurde enteignet, da er nicht ins politische Konzept der Aufrüstung passte. Er hatte gezeigt, dass der Metallflugzeugbau und der dicke Flügel zu wesentlichen Verbesserungen führte (Bild 7). Die JU 52 wird zu einem der meistgebauten Flugzeuge (Bild 8). Die Focke Wulf FW200 (Bild 9) macht am 11. August 1938 den Non-Stop Flug Berlin-New York und am nächsten Tag zurück. Der Vergleich der Konfigurationen viermotoriger Langstreckenflugzeuge zeigt die Fortschritte, die in dieser Achsenzeit des Flugzeugbaues gemacht wurden (Bild 10).

Die Pfeilflügelentwicklung in Deutschland bis 1945 wurde bereits von H-U. Meier erläutert. Sie manifestiert sich auch in der Entwicklung der in die UdSSR expeditierten Junkersmannschaft, die dann zwischen 1950 und 1954 in die DDR zurückkehrte und in Dresden die „152“ baute (Bild 11).

Für die militärische Entwicklung sind natürlich die Strahltriebwerke mit Axialverdichter die Schlüsselemente. Das Jumo 004 Triebwerk ist mit 6000 gebauten Exemplaren bis heute das

meistgebaute Strahltriebwerk (Bild 12).

Von 1936 bis 1944 wurden in Deutschland Entwicklungen vorangetrieben, die den Flugzeugen bis heute ihre markante Konfiguration gegeben haben. 1941 lief dabei bereits ein Bypass Triebwerk bei Daimler-Benz mit einem Nebenstromverhältnis von 2,42. Heute bewegen wir uns in Richtung 10 und darüber. Selbst die Materialengpässe führten in den 40-er Jahren dazu, Kompressorzapfluft zur Kühlung von Turbinenschaufeln zu verwenden (Bild 13).

Küssner trieb innerhalb der AVA das Verständnis für das Flatternproblem von Flugzeugen voran insbesondere bei Annäherung an die Schallgeschwindigkeit. Zuse lieferte mit seinen Rechnern entscheidende Beiträge, um die komplexen Matrizenrechnungen etwas schneller als von Hand zu erledigen. Die Modellvorstellungen sind in Küssners Skizze vom schwingenden Streckenprofil mit Ruderdrehung exemplarisch dargestellt (Bild 14).

Im Juni 1936 flog der Focke-Wulf Hubschrauber FW61 mit zwei gegenläufigen Rotoren an Auslegern (Bild 15).

Und am 8. Mai 1945 war wieder einmal alles vorbei zumindest in den westlichen Bundesländern, während die Junkersmannschaften in Dessau bis Oktober 1946 in der SBZ weiter entwickelten bis die Westmächte Protest einlegten. Die Junkersmannschaft wurde am 26. Oktober 1946 in die Sowjetunion expediert. Das Bild „From Ju 287 to 152“ bezeugt, dass die Sowjets für ihren Strahlbomber selbst die Junkersbezeichnung EF 150 übernahmen.

### **Internationale Produktorientierung zur Harmonisierung der Industrie**

Interessant sind dann wieder die Ergebnisse und Daten aus dem Umfeld der deutschen Luftfahrtforschung ab 1950 (Bild 16). Während in der DDR nach Rückkehr der Luftfahrtforscher versucht wurde, sofort eine nationale Luftfahrtindustrie aufzubauen, ging dieser Prozess in der BRD langsamer, da die internationale Einbindung Zeit kostete. Ein wesentlicher Schritt war die von Theodor von Karman betriebene Einbindung deutscher Forscher in die Advisory Group for Aeronautical Research and Development (AGARD) im Rahmen der NATO. Ein weiterer

Schritt war der Beginn der westeuropäischen industriellen Zusammenarbeit mit dem Transall Projekt (C-160). Es folgen die Projekte Airbus und Tornado. Voraussetzung dafür war aber die 1969 erfolgte industrielle Integration im Rahmen der Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH. 1989 bildete sich aus MBB und Dornier die Deutsche Aerospace AG, die dann in Daimler-Benz Aerospace umfirmierte (DASA).

Im Jahr 2000 fusionierten auf europäischer Ebene die deutsche DASA, die französische Aero-spaciale-Matra und der spanische Konzern Construcciones Aeronauticas zur European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) (Bild 17).

### **Segelflugzeuge als Technologievorreiter**

Wie nach dem Ersten Weltkrieg war auch nach dem Zweiten Weltkrieg die Segelflugzeugsparte ein Technologietreiber insbesondere auf dem Werkstoffsektor. 1957 wurde das erste glasfaserverstärkte Segelflugzeug Phönix gebaut (Bild 19). Die Akaflieg Gruppen spielten dabei die wesentliche Rolle. Der Film über das Flattern der SB 9, der in Braunschweig entstand (Bild 20 und Film), möge den Schritt zur serienreifen Anwendung von CFK-Werkstoffen dokumentieren. Airbus ging dann ganz konsequent den Weg die Leitwerke in CFK zu bauen (Bild 22) und Boeing weitete mit der B787 diese Bauweise auf das komplette Flugzeug aus. Der Serieneinsatz wird zeigen, ob die CFK-Bauweise über Flügel und Leitwerk hinaus im robusten Airlinebetrieb sinnvoll ist.

Die technischen Erstleistungen (Bild 22) im Airbusprogramm waren Voraussetzung, um einen ausgewogenen Weltmarktanteil gegenüber Boeing zu gewinnen. Dieser Erfolg wurde im harten Wettbewerb erzielt. Beginnend mit der FW 200 über die Transall bis zu den Airbusprogrammen war es immer Ziel, Flugzeuge mit großen Flügelstreckungen ( $\Lambda > 9$ ) zu bauen (Bild 23). Diese Philosophie musste leider bei der A380 aufgrund von Flughafen-Beschränkungen verlassen werden. Von daher ist Raum für Langstreckenflugzeuge unterhalb der A380 mit Flügelstreckungen von  $\Lambda > 10$ .

## **Internationale Großversuchsanlagen zur Harmonisierung der Forschung**

Auf der Seite der Forschungsanstalten erfolgte 1969 die Integration von DVL, DFL und AVA zur Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR). Der Deutsch-Niederländische Windkanal (DNW) war dann ab 1980 das treibende Projekt, um die europäische Integration der Forschungsanstalten zu beschleunigen. Es gab keine Alternative zu diesem Vorgehen und so nahm dann 1994 der Europäische Transsonische Windkanal (ETW) in Köln seinen Probebetrieb auf (Bild 24). Ein weiterer Schritt war die Zusammenlegung der wissenschaftlichen Zeitschriften „La Recherche Aerospatiale“ und ZFW „Zeitschrift für Flugwissenschaften“ (Bild 25). ONERA, DLR, CIRA, FOI, INTA, NLR sind mit der Abstimmung ihrer Forschungspläne weiter vorangekommen. Handlungsbedarf besteht durchaus noch.

Die Beispiele „Buckling of Composite Panels: A Criterion for Optimum Stiffner Design“ (Bild 26) oder auch die Herausgabe der „Notes on Numerical Fluid Mechanics“ im Springer Verlag (Bild 27) mögen Beweis dafür sein, dass hier Forschungs-Kooperationen entstanden sind im konkurrenzfähigen Maßstab zu US-Forschungseinrichtungen. „Fluid/structure static coupling simulation with ELSA“ möge ein weiteres Beispiel sein für den Fortschritt der numerischen Werkzeuge auf dem Gebiet der Kopplung von Aerodynamik und Strukturmechanik. Die Biege-/Torsionsdeformation des A340 Flügels zeigt die Fortschritte (siehe [6]), die in den Entwurfswerkzeugen erzielt werden konnten (Bild 28).

### **Warum Vorhersagen möglich sind**

„Das beim Fischfang in der Adria beobachtete Phänomen der zeitweiligen Zunahme der Häufigkeit von Fischarten, die räuberisch leben, im Vergleich zur Häufigkeit der Beutetiere brachte den Mathematiker Vito Volterra auf die Idee, das Problem mathematisch zu erfassen“ [7].

„Da die großen Fische die kleinen fressen – und ihr Überleben von den kleinen abhängt –, sollte man eine Wechselbeziehung in der Populationsgröße durchaus erwarten.“ Es ist eine Analogie

zu unserem Wirtschaftsleben.

„Die Anzahl der Raubfische steigt zunächst an, bis schließlich die Beutefische immer weniger werden. Zu diesem Zeitpunkt beginnen die großen Fische Hunger zu leiden und ihre abnehmende Zahl gibt wiederum den Überlebenden der kleinen Arten die Chance, sich zu vermehren.“

Diese Zustände kann man mathematisch mit den S-Kurven beschreiben. Und wenn es gelingt, die Beschreibung so zu wählen, dass sie vorwärts und rückwärts integrier- und differenzierbar ist, dann sind auch technische Prozesse damit beschreibbar.

Das haben wir auf die Airbus- und Hubschrauberprogramme angewendet. Alle technischen Programme haben aus der Historie heraus bestimmbare typische Parameter um die S-Kurven zu beschreiben. Damit können Kostenprognosen und Manpowerplanung wesentlich genauer beschrieben werden.

Wenn die S-Kurve als Ausgangskurve den Kostenaufwand zeigt, um ein Produkt zu gestalten, dann zeigt die 1. Ableitung die Glockenkurve oder die zeitliche Verteilung der Kosten und damit den Manpowerberg. Die 2. Ableitung beschreibt die Veränderung des Manpowerberges, welche die Personalabteilungen interessieren muss [8].

Angewendet auf die A320/A340/A330/A321-Entwicklungen konnten wir daher den Einsatz unseres Personals so steuern, dass die dichte Folge der Erstflüge möglich wurde. Wichtig zu wissen war, dass vor dem Wendepunkt in der S-Kurve beim Personal auf die Bremse zu treten ist, um nicht über das Ziel hinauszuschießen. Das war vorher aber üblich! Die Wachstumskurven für Airbusprogramme zeigen diese Zusammenhänge (Bild 30).

Aber auch andere Zusammenhänge wie die Innovationsintervalle in der Verkehrstechnik der USA sind so darstellbar [7]. Sie zeigen eine Regelmäßigkeit, mit der sich Transportsysteme abgelöst haben, die frappierend ist. Mit einem Zeitintervall von ungefähr 55 Jahren haben neue Technologien im Transportwesen die alten abgelöst. Ich bin gespannt, ob sich der Wendepunkt im Flugverkehr mit 2002 bewahrheiten wird (Bild 31).

Die Überfüllung unserer Autobahnen mit Lastwagen schreit nach wie vor nach einem viel effektiveren, schnelleren und sichereren Gütertransportsystem. Vielleicht erhält die Magnetschwebetechnik doch noch eine Chance in Europa.

### Schlüsse aus der Historie

In München hat am 3.11.2011 eine B777 eine Landung hingelegt (Bild 32), die aufhorchen lässt. Es handelt sich um ein Flugzeug der 340 t Klasse mit 2 Triebwerken relativ nahe am Massezentrum. Aufgrund einer Beugung im Leitstrahl durch ein störendes anderes Flugzeug hat es mit dem linken Hauptfahrwerk zunächst die Landepiste erreicht, was auch bei Seitenwind eintritt. Es ist aufgrund der Massenkräfte nach links von der Landebahn abgekommen. Pilot und Co-Pilot gaben kräftigen Seitenruderschlag, um das Flugzeug möglichst auf der Landebahn zu halten, was aber nicht gelang (Bild 33). Wie beim schleudernden Auto wird übersteuert. Das Flugzeug driftet über die Landebahn nach rechts und bleibt im Gras rechts neben der Landebahn stecken. Nachzulesen u.a. in der Flight 7-13 February 2012 und im BFU Status Report [9] (Bild 33).

Wenn jetzt über noch größere Spannweiten zweimotoriger Langstreckenflieger nachgedacht wird (Bild 34), dann streifen wir sicherheitsrelevante Zustände im Flugverkehr. Denn die Trägheitsmomente solcher Flugzeugkonfigurationen um die Gier- und Rollachse sind um den Faktor 2,5 kleiner als bei viermotorigen Langstreckenfliegern. Die Gefahr, bei einseitigem Aufsetzen von der Landebahn abzukommen, ist beim 2-mot Langstreckenflieger um den Faktor 2,5 größer als beim 4-mot Flieger. Die Reaktionen der Piloten sind auch verständlich und führen zum Ausschalten des Autopiloten. Außerdem baut der 2-mot Flügel schwerer als der 4-mot Flügel, was leicht am Flügelwurzelbiegemoment nachvollziehbar ist (Bild 35). Aufgrund meiner Erfahrungen halte ich diese Produktstrategie für überdenkenswert, da ein marginal günstigerer Treibstoffverbrauch im Langstreckenflug nicht einem Sicherheitsrisiko bei der Landung geopfert werden sollte. Inhärente Richtungsstabilität bei Seitenwindlandungen ist ein nicht zu unter-

schätzender Sicherheitsfaktor. Dabei sind die Optimierungspotentiale des 4-mot CFK-Flügels größerer Spannweite und Pfeilung mit A320-neo Triebwerken unterhalb der A380-Spannweite noch gar nicht ausgereizt. Das würde zurückführen zu dem früher bereits realisierten Airbus-Familienkonzept bei den Triebwerken.

Auch der Albatros mit einer Flügelstreckung  $\Lambda > 20$  hat Schwierigkeiten bei der Landung. Lilienthal hat die Störche beobachtet bei Start und Landung. Wir müssen aufpassen, im Computerzeitalter die Bodenhaftung nicht zu verlieren.

### Literatur (Bild 36)

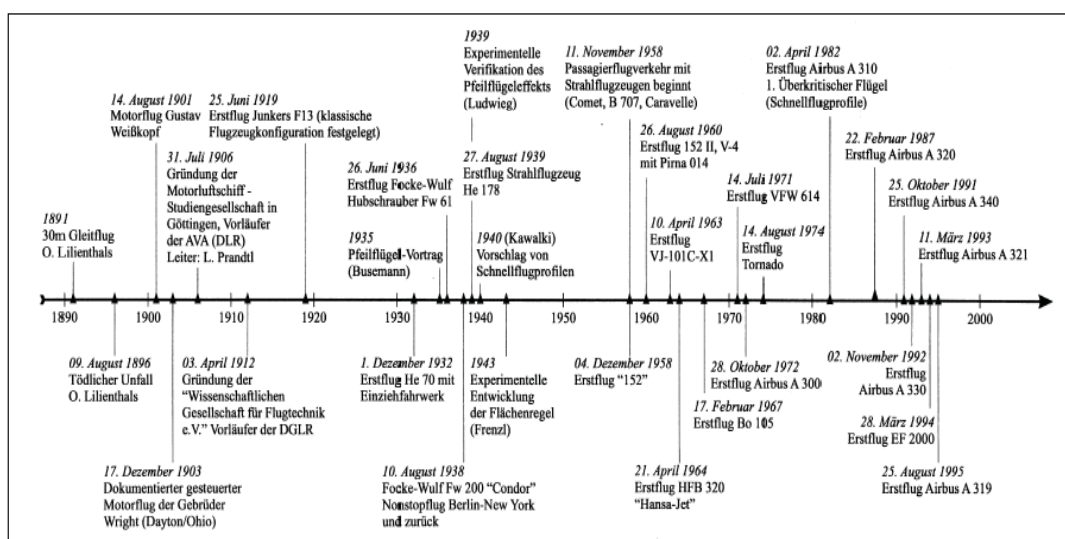
- [1] E. H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung, Luftfahrtforschung in Deutschland, Band 30, Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2001.
- [2] E. H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung, Aeronautical Research in Germany - from Lilienthal until Today, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [3] H. Prem, Luftfahrtforschung in Deutschland von Lilienthal bis heute, DGLR-JT-2004-075.
- [4] O. Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin, 1889.
- [5] A. Betz, Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1926.
- [6] E. H. Hirschel, E. Krause (Eds.), 40 Years of Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Volume 100, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [7] Th. Modis, Die Berechenbarkeit der Zukunft, Warum wir Vorhersagen machen können, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 1994.
- [8] H. Prem, Technologiemanagement als Strategieelement einer effizienten Unternehmensführung, Der Controllingberater, Haufe Verlag, Freiburg, Heft 2, 1992.
- [9] BFU Status Report, BFU EX010-11, 3 November 2011, German Federal Bureau of Aircraft Accident Investigation.

## Luftfahrtforschung in Deutschland von Lilienthal bis heute

- Einleitung
- Eckdaten
- Experimentelle Simulation beim Flugzeugentwurf
- Fusion der nationalen Journale zur „Aerospace Science and Technology“  
Beispiele: Beulen von CFK-Platten
- Segelflugzeuge als Vorreiter für neue Materialien
- „Notes on Numerical Fluid Mechanics“  
Beispiel: Aerostatic
- Internationale Produktorientierung zur Harmonisierung der Industrie
- Internationale Großversuchsanlagen zur Harmonisierung der Forschungsanstalten
- Warum Vorhersagen möglich sind
- Schlüsse aus der Historie

Bild 1

## Luftfahrtforschung in Deutschland von Lilienthal bis heute



Ausgewählte Eckdaten der deutschen Flugeschichte.

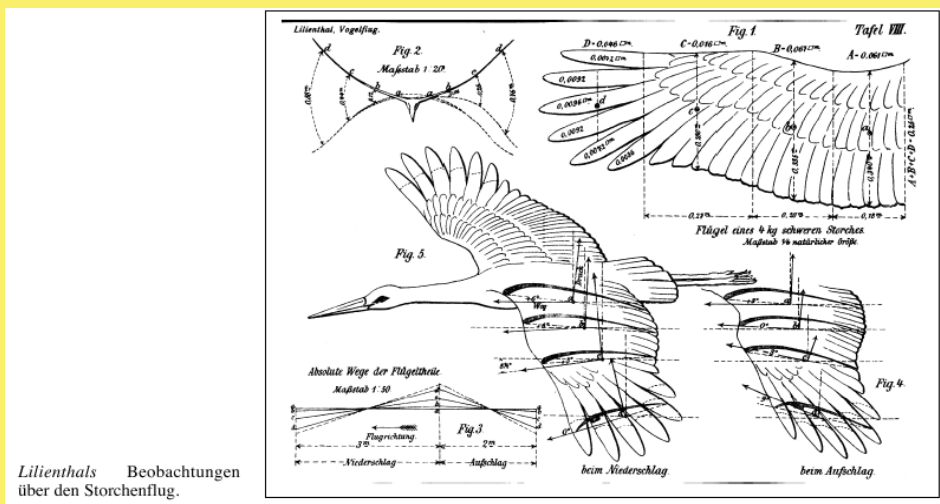
Bild 2

## Auswahl von Ereignissen und Daten aus dem Umfeld der deutschen Luftfahrtforschung

- 1889 erscheint O. Lilienthals Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“.
- 1896 O. Lilienthal verunglückt tödlich.
- 1903 erster Motorflug der Gebrüder Wright.
- 1907 Modellversuchsanstalt der Motorluftschiff-Studiengesellschaft in Göttingen.
- 1909 L.Prandtl beginnt Vorlesungen über Aerodynamik.
- 1912 Gründung der wissenschaftlichen Gesellschaft für Flugtechnik (WGF) und der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL).
- 1914 WGF wird zur WGL.
- 1915 Göttinger Motorluftschiff-Studiengesellschaft wird zur Modellversuchsanstalt für Aerodynamik später AVA.

Bild 3

### Lilienthals Originalskizze



Lilienthals Beobachtungen über den Storchflug.

Bild 4

## **Wesentliche Beiträge zur internationalen Luftfahrtforschung**

- Grenzschichttheorie (1904)
- Traglinientheorie des Flügels (1918)
- Wagner Web (1924)
- Grenzschicht-Stabilitätstheorie (1929)
- Pfeilflügel (1935)
- Axialkompressor für Strahl-Triebwerke (1936)
- Transsonische Flügelprofile (1940)
- Flächenregel (1943)
- Transsonischer Flügel A310 (1982)

Bild 5

## **Auswahl von Ereignissen und Daten aus dem Umfeld der deutschen Luftfahrtforschung (Fortsetzung)**

1933 Hitlers Machtübernahme. A. Baeumker beginnt Reform der deutschen Luftfahrtforschung.

1935 einseitige Aufhebung der Beschränkungen der deutschen Luftfahrt durch den Versailler Vertrag.

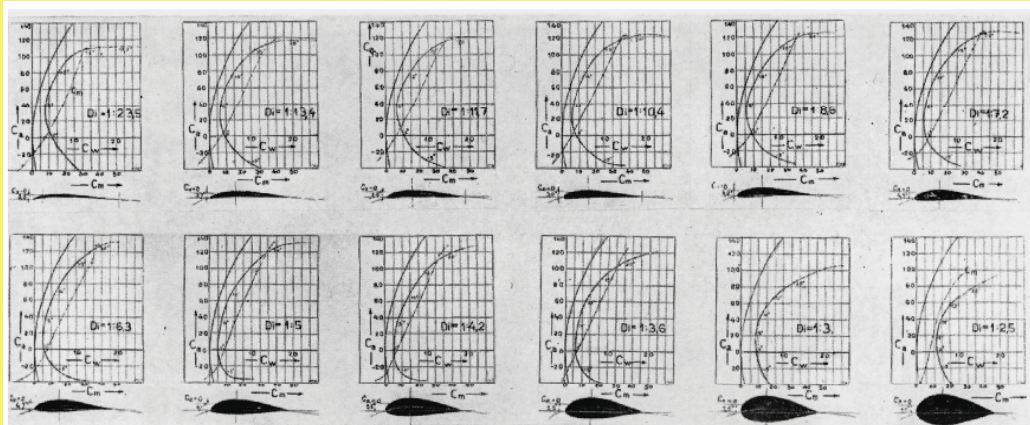
1936 Gründung der Deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt (DFL) in Braunschweig. Die WGL löst sich auf. Lilienthalgesellschaft für Lufo wird gegründet.

1945 Ende der Lufo in Deutschland. CIOS/FIAT-Bestandsaufnahme.

Bild 6



Junkers Profilmessungen 1918



Polardiagramme einer Meßreihe an Tragflügelmodellen gleicher Mittellinienwölbung, aber unterschiedlicher Dicke (1918). Das Bild, leider in schlechter Qualität, zeigt die große Spanne des Dicken-/Tiefenverhältnisses, das *Junkers* untersuchen ließ.

Bild 7

Das dreimotorige Junkers-Verkehrsflugzeug G 24 kam ab 1925 beim Junkers Luftverkehr auf zahlreichen europäischen Hauptstrecken zum Einsatz.



Höhepunkt der Junkers-Verkehrsflugzeug-Entwicklung war die Ju 52/3m, von der über 5.000 Stück gebaut wurden und von der heute noch einige Oldtimer fliegen (Erstflug 1932).



Beim Großflugzeug Junkers G 38, dessen erstes Exemplar 1929 fertiggestellt wurde, konnte *Hugo Junkers* einen Teil seiner Ideen aus dem »Nurflügelpatent« verwirklichen.



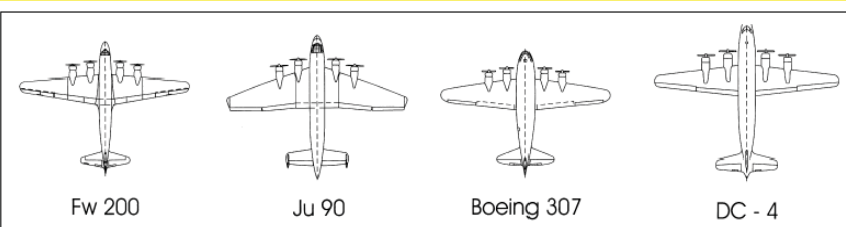
Bild 8

Condor nach der Landung in New York



Focke-Wulf Fw 200 »Condor«  
D-ACON am 11. August 1938  
in New York nach dem Flug  
Berlin-New York.

Bild 9

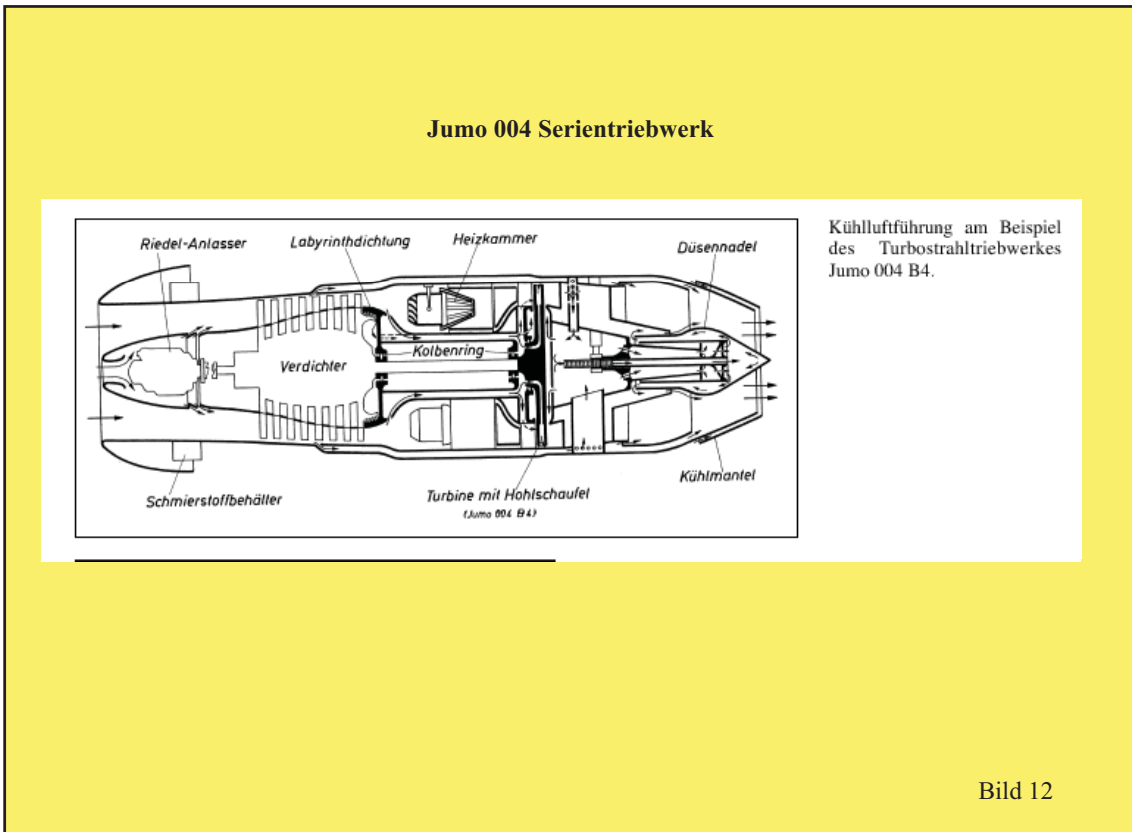
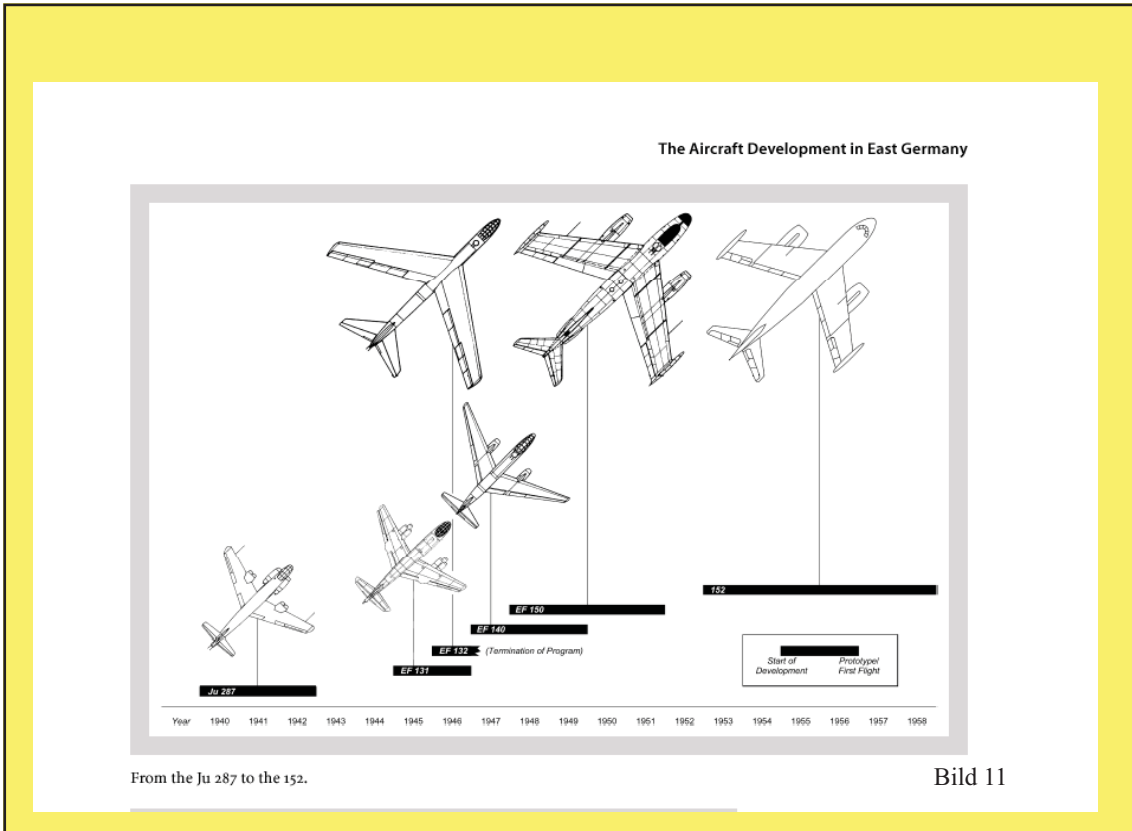


Vergleich der Konfigurationen viermotoriger Langstreckenflugzeuge.

Viermotorige Langstreckenflugzeuge

Hersteller Muster	Focke-Wulf Fw 200 »Condor«	Junkers Ju 90	Boeing 307 »Stratoliner«	Douglas DC-4
Max. Startmasse [kg]	14.600	21.600	19.050	33.110
Motoren [PS]	4 x 720	4 x 950	4 x 1.187	4 x 1.470
Leistungsbelastung [kg/PS]	5,07	7,35	4,01	5,63
Besatzung	3 + 1	3 + 1	5	5
Fluggäste	25 + 1	38 + 2	33-38	30
Spannweite [m]	32,84	35,00	32,70	35,80
Flügelfläche [m <sup>2</sup> ]	118,00	184,00	210,00	135,00
Flügelstreckung	9,14	6,67	5,09	9,49
Flächenbelastung [kg/m <sup>2</sup> ]	118,64	119,00	90,80	245,26
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	365	355	396	430
Reisegeschwindigkeit [km/h]	335	325	355	390
max. Einsatzreichweite [km]	1.450	1.500	3.824	5.300
Erstflug	27.07.1937	28.08.1937	31.12.1938	17.02.1942

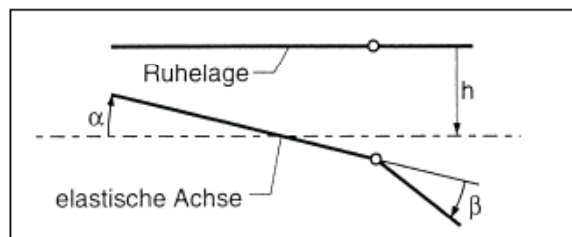
Bild 10



Zeitliche Reihenfolge der Entwicklungen von Turboluftstrahl-(TL)-Triebwerken mit Axialverdichter

Lfd.	Bezeichnung Entwicklungsleitung Firma/Ort	Entwurfs- jahr	Schub [kN] Stirnflächen- schub [kN/m <sup>2</sup> ] (kp/m <sup>2</sup> )	Bemerkungen
1.	• RTO • H. Wagner/M.A. Müller • Werkzeugmaschinen- fabrik Magdeburg (später Junkers)	1936		Triebwerk mit 14-stufigem Axialverdichter nach Vorschlägen von Herbert Wagner (TH-Berlin). 1939 Prüfstandserprobung, danach Abbruch der Entwicklung. M. A. Müller wechselt mit einigen Mitarbeitern zu Heinkel.
2.	• P 3304 • H. Weinreich • Chemnitz	1938	6.0	Triebwerk mit gegenläufigem Axialverdichter, 5 Stufen über Außentrommel, 4 Stufen über Innenwelle. Prüfstandserprobung 1942 Entwicklung eingestellt. Erfahrungen werden bei BMW genutzt.
3.	• BMW F 9225 • K. Löhner/Müller-Berner • München	1938	6.0	Triebwerkprojekt mit 7-stufigem Axialverdichter. Zusammenfassung aller Entwicklungsaktivitäten unter Oestrich in Berlin-Spandau.
4.	• BMW 003 (P 3302) • H. Oestrich • Bramo/BMW Berlin- Spandau	1939	7.8 21,8 (2140)	Serientriebwerk mit 7-stufigem Axialverdichter. Beschauflung basiert auf AVA-Profilaten. Herstellung von 450 Stück in Deutschland, zirka 1.200 Stück in UdSSR. Lizenz 1944 an Japan.
5.	• Jumo 004 • A. Franz • Junkers, Dessau	1939	9.0 19,9 (1954)	Serientriebwerk mit 8-stufigem Axialverdichter. Beschauflung basiert auf AVA-Profilaten. Einbau in die Me 262. Herstellung von zirka 6.000 Stück in Deutschland, zirka 800 Stück in UdSSR.
6.	• DR 007 • K. Leist • Daimler-Benz Stuttgart	1941	11,3 25,7 (2526)	Erstes Zweikreistriebwerk mit gegenläufigem Verdichter nach Vorschlägen der AVA bestehend aus zwei Trommeln. Außen 9, innen 8 Stufen. Gegenläufigkeit durch Planetengetriebe. Bypassverhältnis 2,42. Prüfstandserprobung 1943, danach Abbruch der Entwicklung.
7.	• He S 30 • M. A. Müller • Heinkel/Hirth, Stuttgart	1941	8,5 30,8 (3020)	Erstes rein axiales Heinkel-Triebwerk. Mit 5-stufigem Verdichter, Druckverhältnis 3. Prüfstandserprobung. Hoher technologischer Entwicklungsstand.
8.	• Jumo 012 • A. Franz • Junkers, Dessau	1944	30 33,4 (3275)	Projekt mit 11-stufigem Verdichter, Prüfstandserprobung in der UdSSR mit mehreren Dauerläufen. 8 Entwicklungstriebwerke.
9.	• BMW 018 • H. Oestrich • BMW Berlin-Spandau	1944	33 29,1 (2852)	Projekt mit 12-stufigem Verdichter, abgeleitet aus dem PTL 028 durch Weglassung des Luftschraubenantriebes. Prüfstandserprobung in UdSSR.

Bild 13



Küssners schwingendes Streckenprofil mit den Freiheitsgraden Schlag  $h$ , Drehung  $\alpha$  und Ruderdrehung  $\beta$ .

Bild 14



Der Focke-Wulf-Hubschrauber Fw 61 hob erstmals am 26. Juni 1936 vom Werkflugplatz in Bremen ab, schon beim vierten Flug blieb er 16 Minuten in der Luft.

Bild 15

## Auswahl von Ereignissen und Daten aus dem Umfeld der deutschen Luftfahrtforschung

- 1950 bis 1954 Rückkehr der Luftfahrtforscher und -ingenieure aus der UdSSR in die DDR.
- 1951 In der BRD Entstehung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) aus dem Deutschen Forschungsrat; DVL Forschungsgruppen nehmen Arbeit wieder auf; Segelflug wird zugelassen.
- 1952 Wiedergründung der WGL; Zeitschrift für Flugwissenschaften (ZfW); Aufbau der Luftfahrtindustrie in der DDR.
- 1953 DFL und AVA nehmen Arbeit wieder auf, da sie als e.V. gar nicht verboten waren; nur staatliche Einrichtungen waren verboten.
- 1955 BRD wird souverän; Wiederaufbau der Luftfahrtindustrie in der BRD, die der Advisory Group for Aeronautical Research and Development (AGARD) innerhalb der NATO beitrifft. Internationale Einbindung von Anbeginn an.
- 1958 Beginn der westeuropäischen industriellen Zusammenarbeit mit dem Transall-Projekt (C-160).

Bild 16

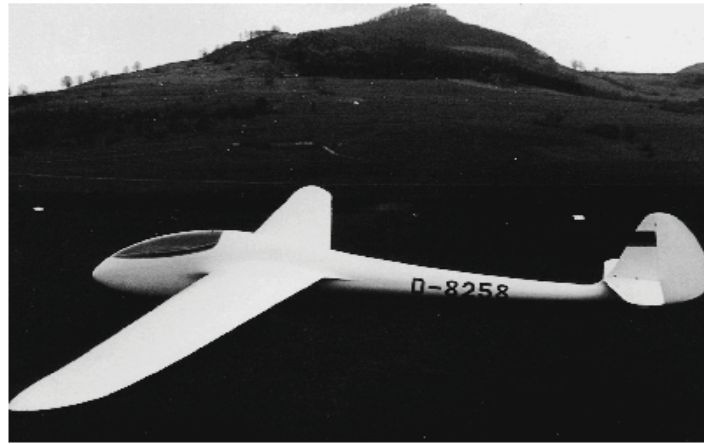
## **Auswahl von Ereignissen und Daten aus dem Umfeld der deutschen Luftfahrtforschung**

- 1967 wird die WGL zur Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR); neue Phase der Technologieförderung des militärischen Flugzeugbaus (Zukunftstechnologie Luftfahrt (ZTL)).
- 1969 vereinigt die Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) GmbH die großen Luftfahrtfirmen in der BRD und das Airbusprogramm A300 wird gestartet; DVL, DFL, AVA zur Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) zusammengelegt.
- 1980 der Deutsch-Niederländische-Windkanal (DNW) geht in Betrieb.
- 1984 Harmonisierung der Forschungspläne von DFVLR und MBB.
- 1987 European Cooperative Measures for Aeronautical Research and Technology (EUROMART).
- 1989 DFVLR wird zur DLR, die Deutsche Aerospace AG (DASA) entsteht.
- 1994 der Europäische Transsonische Windkanal beginnt Probebetrieb.
- 2000 aus der deutschen DASA, der französischen Aerospatiale-Matra und der spanischen Construcciones Aeronauticas wird die European Aeronautic Defence and Space Company (EADS).

Bild 17

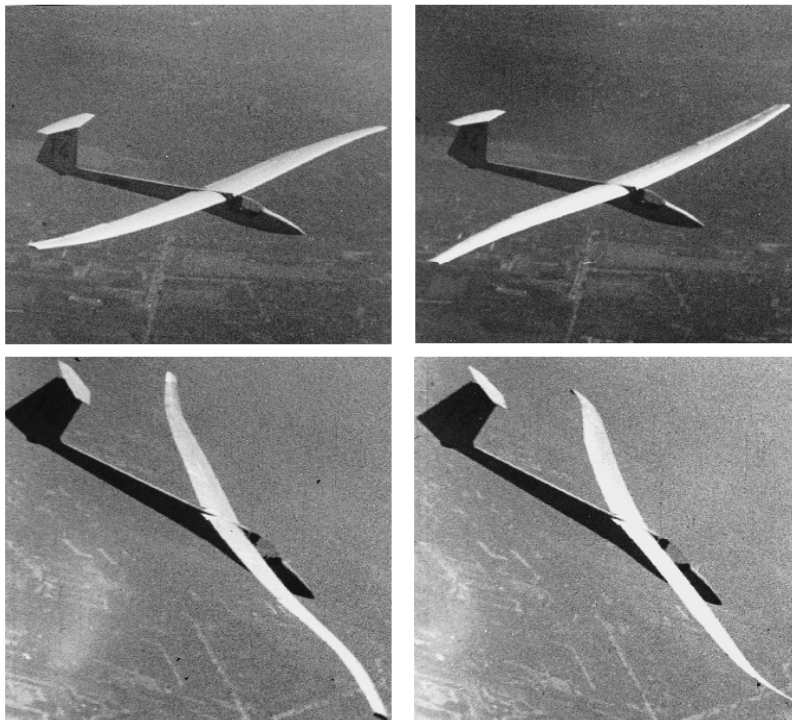
## **Segelflugzeuge als Vorreiter für neue Materialien**

Bild 18



Das erste Kunststoffsegelflugzeug »Phönix« (1957).

Bild 19



Flügelklappen bei der SB 9 (1970), Grund- und erste Oberschwingung.

Bild 20

## Internationale Produktorientierung zur Harmonisierung der Industrie

Bild 21





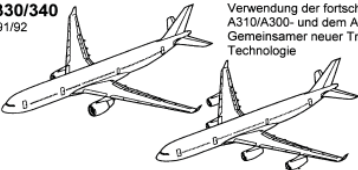
		Technische Erstleistungen im Airbus-Programm.
<b>A300</b> 1974		Erstmalig zweistrahlige Wide-Body-Konfiguration Energieversorgung und Hydrauliksystem dreifach redundant Vorstufe zu einer transonischen Flügelauslegung Automatische Schubsteuerung für alle Flugzustände Automatischer Schutz gegen Scherwinde
1977		Automatische Landung unter Kategorie-III-Bedingungen
1982		Digitaler Autopilot Erstmalig Zwei-Mann-Cockpit in großem Flugzeug
<b>A310</b> 1983		Fortschrittlicher Transonik-Flügel Bildschirmtechnik im Cockpit mit elektronischem zentralisiertem Flugzeugüberwachungssystem Verwendung von Kompositmaterialien in der Sekundärstruktur Ansteuerung der Sekundärsteuerflächen durch elektrische Signale
<b>A310-300</b> 1985		Fortschrittlicher Aluminiumlegierungen Verwendung von Kompositmaterialien in tragenden Strukturteilen Trimmtank für Schwerpunktkontrolle Karbonbremsen und Radialreifen
<b>A320</b> 1988		Sidesticks "Fly-By-Wire"-Steuerungssystem Digitaler Autopilot der zweiten Generation Breite Verwendung von Kompositmaterialien und fortschrittlichen Aluminiumlegierungen „Active Controls“
<b>A330/340</b> 1991/92		Verwendung der fortschrittlichen Technologien aus dem A310/A300- und dem A320-Programm Gemeinsamer neuer Tragflügel fortschrittlicher Technologie

Bild 22



### Flügelstreckung bei Airbus-Flugzeugen

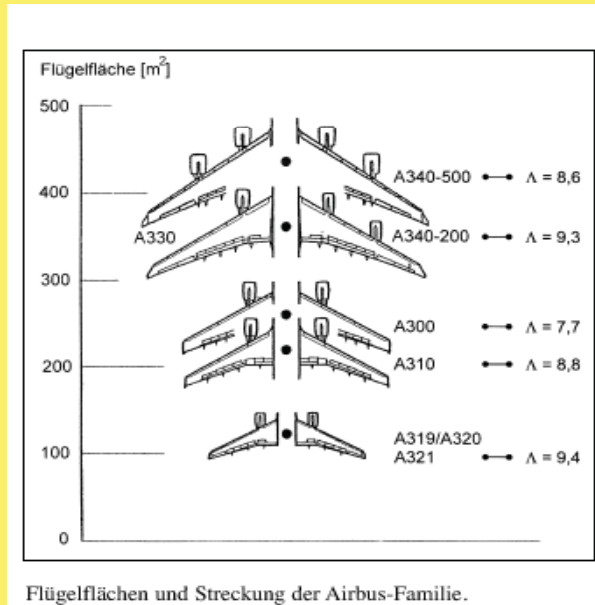


Bild 23

### Internationale Großversuchsanlagen zur Harmonisierung der Forschung

Deutsch Niederländischer Windkanal 1980

Europäischer Transsonischer Windkanal 1994  
zur Verbesserung der experimentellen  
Simulation beim Flugzeugentwurf

Bild 24

## Fusion der nationalen Journale

**Aerospace Science  
and Technology**

Formerly  
La Recherche  
Aérospatiale  
ZFW - Zeitschrift für  
Flugwissenschaften und  
Weltraumforschung

International journal  
published by  
**Elsevier, Paris**  
under the aegis of the EREA establishments:  
**ONERA/AAAF, DLR/DGLR, CIRA, FOI, INTA, NLR**

Bild 25

Aerospace Science and Technology 16 (2012) 10–18

Contents lists available at ScienceDirect

**Aerospace Science and Technology**

[www.elsevier.com/locate/aescte](http://www.elsevier.com/locate/aescte)

---

**Buckling of composite panels: A criterion for optimum stiffener design**

P. Weißgraeber<sup>a,\*</sup>, C. Mittelstedt<sup>b</sup>, W. Becker<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Strukturmechanik, Hochschulstraße 1, D-64289 Darmstadt, Germany  
<sup>b</sup> ELAN GmbH, Team Methods and Tools, Karnapp 25, D-21079 Hamburg, Germany

---

**ARTICLE INFO**

*Article history:*  
Received 4 February 2010  
Accepted 1 February 2011  
Available online 16 February 2011

*Keywords:*  
Stability  
Composite plates  
Minimum stiffness  
Design criterion  
Buckling

**ABSTRACT**

In this paper a linear, closed-form analysis of the buckling behavior of an orthotropic plate with elastic clamping and edge reinforcement under uniform compressive load is presented. This is a typical structural situation found in aerospace engineering for instance as stiffeners in wings or the fuselage. All governing equations are transformed in a dimensionless system using common characteristic quantities to gain good analytical access. The buckling behavior is analyzed and generic buckling diagrams are presented. The solutions show excellent agreement with results from literature and numerical analyses. The minimum bending stiffness of the edge reinforcement needed to withstand buckling is examined and a minimum stiffness criterion is presented. Furthermore an absolute minimum bending stiffness is found which is sufficient to enable the reinforcement to act as a near-rigid support for arbitrarily long plates. These criteria are of interest for optimized lightweight design of stringers and stiffeners.

© 2011 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Bild 26

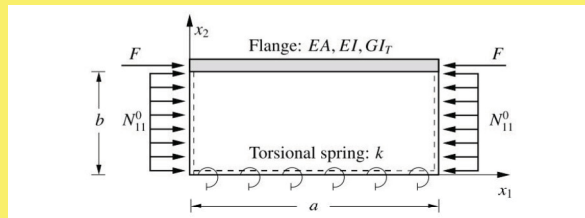


Fig. 2. Compressively loaded plate with elastic clamping and reinforced edge. Dashed lines represent a simple support.

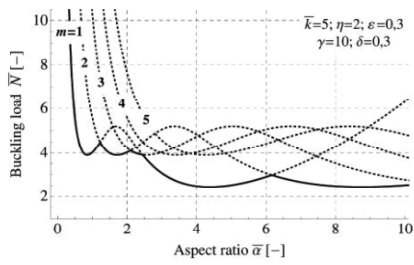


Fig. 3. Buckling curve of a reinforced plate with elastic clamping. The lowest buckling load of all buckling modes is the relevant one.

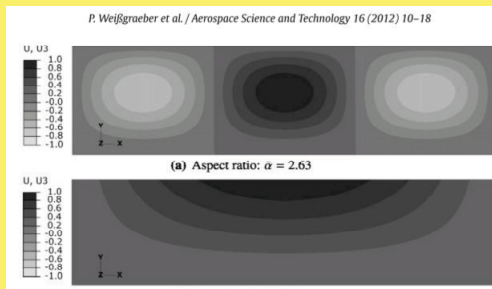
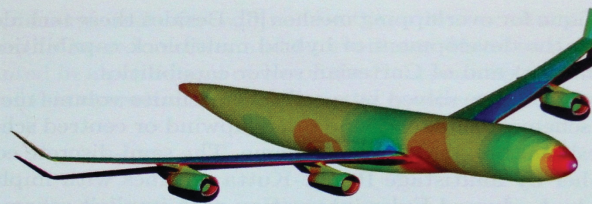


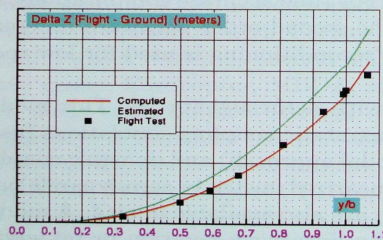
Fig. 4. Local and global buckling modes of a reinforced plate with elastic clamping.

Bild 27

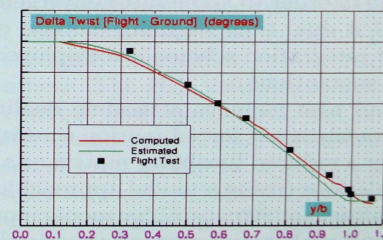
192 C.-C. Rossow, L. Cambier



a) Difference between computed flight shape and ground shape, and computed wall pressure field



Spanwise evolutions of bending deformation



Spanwise evolutions of twist deformation

b) Comparison between initial estimation, numerical simulation results and flight test data

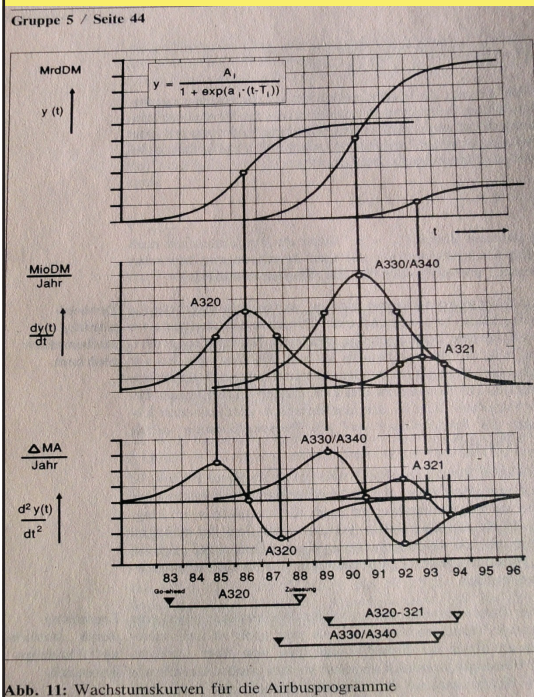
Fig. 1. Transport aircraft: Fluid/structure static coupling simulation with elsA.

Bild 28

## Warum Vorhersagen möglich sind

Bild 29

## Beispiel: Airbusprogramme

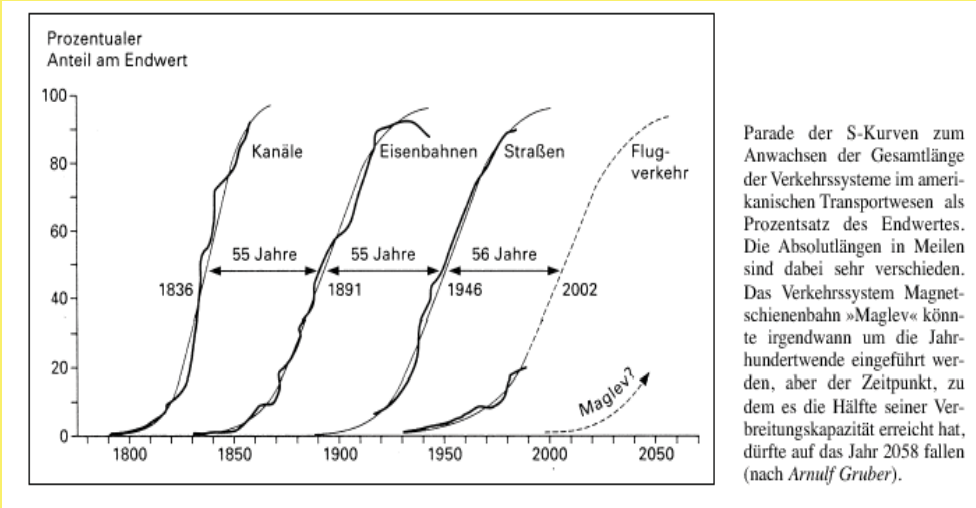


$$t_1 = T - a^{-1} * \ln(2 + \sqrt{3})$$

Bild 30

Abb. 11: Wachstumskurven für die Airbusprogramme

**Innovationsintervalle in der Verkehrstechnik der USA**



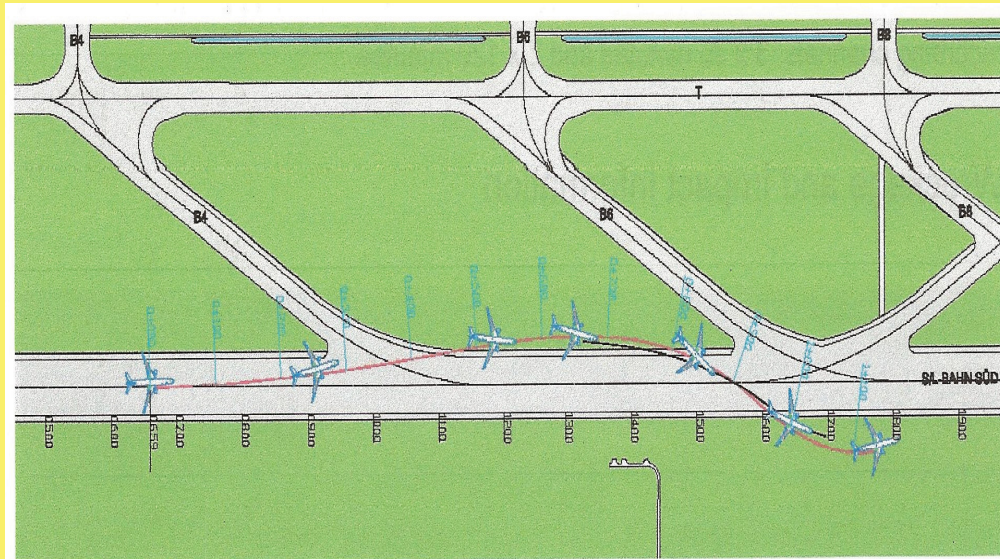
Parade der S-Kurven zum Anwachsen der Gesamtlänge der Verkehrssysteme im amerikanischen Transportwesen als Prozentsatz des Endwertes. Die Absolutlängen in Meilen sind dabei sehr verschieden. Das Verkehrssystem Magnetschienenbahn »Maglev« könnte irgendwann um die Jahrhundertwende eingeführt werden, aber der Zeitpunkt, zu dem es die Hälfte seiner Verbreitungskapazität erreicht hat, dürfte auf das Jahr 2058 fallen (nach Arnulf Gruber).

Bild 31



Location of the aircraft after coming to a standstill

Bild 32



Aircraft path

Graphic: Airport Munich

Bild 33

### 777X: THE LONGEST WINGSPAN BOEING HAS PRODUCED

#### COMPARATIVE WING SPANS

- 777-X = 71m
- 747-8 = 68.5m
- 777-200LR and -300ER = 64.8m
- 777-300 or -200ER = 61m
- 787-8/-9/-10X = 59m

#### PLANNED WIDEBODY PRODUCT LINE



Bild 34

## Schlüsse aus der Historie

- **Auch wenn das BFU den Unfall in München nur als „Schwere Störung ohne Verletzte“ eingestuft hat, eine Produktstrategie auf der Basis von 2-mot Langstreckenflugzeugen über 300 t ist sicherheitskritisch, weil:**
- der Unfall in München am 3.11.2011 die niedrige Richtungsstabilität von 2-mot Flugzeugen (340 t) bei Seitenwindlandungen gezeigt hat.
- die Trägheitsmomente um Gier- und Rollachse beim 2-mot Flügel um den Faktor 2,5 kleiner sind als bei 4-mot Langstreckenflugzeugen.
- der 2-mot Flügel ein um 1/3 höheres Wurzelbiegemoment als der 4-mot Flügel hat, der leichter und mit größerem  $\Lambda$  gebaut werden kann.
- die auslenkenden Kräfte bei Seitenwindlandungen mit einseitigem Aufsetzen auf dem Hauptfahrwerk beim 2-mot Flügel um 1/3 höher als beim 4-mot Flügel sind.
- Sicherheit bei 2-mot Langstreckenflugzeugen über 300 t nicht einem marginal günstigeren Treibstoffverbrauch geopfert werden sollte.

Bild 35

## Literatur

- [1] E. H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung, Luftfahrtforschung in Deutschland, Band 30, Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2001.
- [2] E. H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung, Aeronautical Research in Germany – from Lilienthal until Today, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [3] H. Prem, Luftfahrtforschung in Deutschland von Lilienthal bis heute, DGLR-JT-2004-075.
- [4] O. Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin, 1889.
- [5] A. Betz, Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1926.
- [6] E. H. Hirschel, E. Krause (Eds.), 40 Years of Numerical Fluid Mechanics and Aerodynamics in Retrospect, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Volume 100, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [7] Th. Modis, Die Berechenbarkeit der Zukunft, Warum wir Vorhersagen machen können, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 1994.
- [8] H. Prem, Technologiemanagement als Strategieelement einer effizienten Unternehmensführung, Der Controllingberater, Haufe Verlag, Freiburg, Heft 2, 1992.
- [9] BFU Status Report, BFU EX010-11, Serious Incident, 3 November 2011, German Federal Bureau of Aircraft Accident Investigation.

Bild 36