

Eine der bedeutendsten Entwicklungen in der Aerodynamik kam aus Dresden

Die führenden Aerodynamiker Europas trafen sich 1935 zum 5. Volta-Kongress in Rom, der unter dem Thema „Hochgeschwindigkeits-Aerodynamik“ stand. Um dieses Thema zeitlich einzuordnen, sei darauf hingewiesen, dass zwar im Jahre 1934 ein Weltrekord vom Wasserflugzeug Macchi M.C.72 mit einer Geschwindigkeit von 709,2 km/h erfliegen wurde. Der Linienluftverkehr und auch die serienmäßig gebauten Militärmaschinen waren von diesem Wert allerdings noch weit entfernt. Dennoch beschäftigten sich die Referenten in Rom mit speziellen Problemen kompressibler Strömungen, den technischen Herausforderungen zur Realisierung von Geschwindigkeitsrekorden und ebenso mit thermodynamischen Problemstellungen bei hohen Geschwindigkeiten. Aus Deutschland reisten Ludwig Prandtl, der sich bereits 1907 mit Überschallströmungen beschäftigte und der 34 jährige Adolf Busemann an. Busemann, zu damaliger Zeit an der TH in Dresden tätig, wurde von Prandtl animiert, einen Vortrag zu halten. Schließlich fasste er seine Erkenntnisse unter dem Titel

„Aerodynamischer Auftrieb bei Überschallgeschwindigkeit“

zusammen. Was er vortrug, wurde von den anwesenden Weisen der Aerodynamik nur teilweise reflektiert, die Tragweite seiner Forschungsergebnisse bis über die heutige Zeit hinaus wahrscheinlich von keinem im Geringsten erahnt. Selbst Theodor von Kármán bekennt, dass er den konstruktiven Vorschlag, der sich aus dem Busemannschen Vortrag ergibt, „nicht viel Beachtung geschenkt hat“. Kurz zusammengefasst kann man festhalten, dass Adolf Busemann mit seinem Vortrag die theoretische Basis für die Anwendung gepfeilter Tragflächen geschaffen hat. Wer war aber dieser Mann aus Dresden?

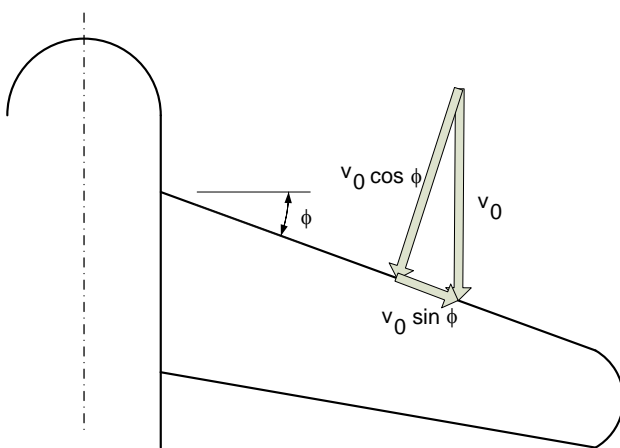
- Adolf Busemann wurde am 20. April 1901 in Lübeck geboren.
- Studium des Maschinenbaus an der TH Braunschweig
- 1924 Dissertation über Drehschwingungen von Stäben
- 1925 Kaiser Wilhelm Institut Göttingen (KWI) Arbeiten auf dem Gebiet Hochgeschwindigkeits-Aerodynamik, Mitarbeit beim Aufbau eines Überschallwindkanals
- 1930 Habilitation
- 1931 Dozent für Strömungslehre an der TH Dresden
- 1936 Leiter des Instituts für Gasdynamik an der deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt in Braunschweig Völkenrode
- 1946 Übersiedlung nach England zum Royal Aircraft Establishment
- 1947 Übersiedlung in die USA zum Langley Research Center



Abb. 1 Adolf Busemann [1]

- 1963 Professur an der University of Colorado in Boulder
- Adolf Busemann starb am 3. November 1986 in Boulder, Colorado

Somit war Busemann nur kurzzeitig in Dresden, dennoch stammt aus dieser Schaffenszeit seine wichtigste Veröffentlichung. Die Basis seiner Überlegungen bestand in der Erkenntnis, dass mit Zunahme der Fluggeschwindigkeit der Widerstand ebenfalls stark zunahm, der Auftrieb sich aber verringerte. Dazu kamen örtliche Drucksprünge, die die Steuerbarkeit des Flugzeuges drastisch verschlechterten. So kam es bei Annäherung an die kritische Machzahl, bei der lokal bereits Überschallgeschwindigkeit erreicht wurde, zu abruptem Verhalten, wie z. B. starke Roll-Gierbewegungen. Obwohl selbst die schnellsten Jagdflugzeuge im Horizontalflug nicht mit Schallgeschwindigkeit flogen, konnte dennoch im Sturzflug die kritische Machzahl erreicht werden. Es war also ein Phänomen, welches bei Annäherung an die Schallgeschwindigkeit zu erwarten war und folglich hinausgezögert werden musste. Um dies zu erreichen, schlug er vor, den Flügel mit einer Pfeilung zu versehen. Das führt dazu, dass die senkrecht auf den Flügel treffende Strömung eine geringere Geschwindigkeit hat als die Anströmgeschwindigkeit in Flugrichtung.



Flugmachzahl: $M_0 = \frac{v_0}{c}$
effektive Machzahl am Flügel:

$$M = \frac{v_0 \cdot \cos \varphi}{c}$$

$$M = M_0 \cdot \cos \varphi$$

Abb. 1 Grundprinzip für den Pfeilflügel

Gleichzeitig entsteht jedoch eine Strömung in Flügelrichtung. Mit zunehmendem Pfeilwinkel nimmt deren Strömungsgeschwindigkeit zu, die die Wirksamkeit der Querruder beeinflusst. Um diesen Effekt zu kompensieren, können Nasenklappen oder auch Grenzschichtzäune eingesetzt werden. Aus dem folgenden Diagramm ist zu erkennen, dass ein Pfeilwinkel von 30 Grad die senkrecht auftreffende Geschwindigkeit um 0,13 Mach reduziert, aber eine Längsströmung mit einer Geschwindigkeit von 149 m/s erzeugt.

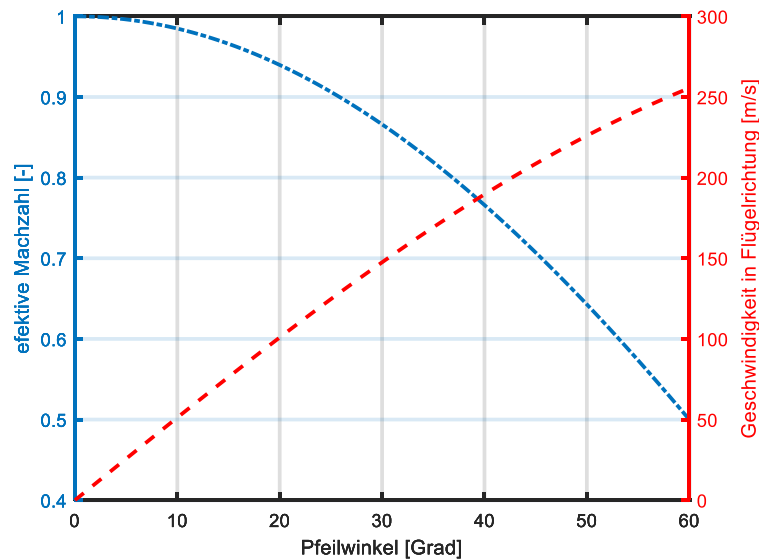


Abb. 3 Quantitativer Einfluss des Pfeilwinkels

Diese simple Überlegung, wissenschaftlich untersetzt, ist die Basis für jeden Tragflügel im transsonischen Bereich und auch darüber hinaus. Nun kann die Flügelgefeilung sowohl positiv als aber auch negativ sein. Betrachtet man die Längsströmung auf dem Flügel, wäre bei einer negativen Flügelgefeilung die Beeinflussung der Querruder wesentlich geringer und damit die Rudereffizienz größer. Das Auftriebsmaximum würde sich zur Flügelwurzel hin verschieben, was im überzogenen Zustand die Wirksamkeit der Querruder kaum beeinflusst, jedoch das Stall-Verhalten. Infolge der Auftriebskräfte kommt es zusätzlich zu einer Torsion des gesamten Flügels. Ist dieser nun negativ gefeilt, bewirkt diese Torsion einen zusätzlichen Anstellwinkel, der sich wiederum auf die statische Verformung und das Eigenschwingungsverhaltens des Flügels auswirkt.

Das Echo in Deutschland auf seinen Vortrag führte dazu, dass Busemann bereits 1936 den Ruf von Ludwig Prandtl folgte, Dresden wieder verließ und die Leitung des Instituts für Gasdynamik in Braunschweig übernahm. Dort konnte er seine Forschungen auf dem Gebiet der Gasdynamik fortsetzen und vor allem mit Windkanalmessungen untersetzen. Aber auch an anderer Stelle in Deutschland wurden diesbezügliche Messungen vorgenommen. Von historischer Bedeutung sind dabei die Untersuchungen in der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen. Die beiden Mitarbeiter Straßl und Ludwig nahmen an zwei unterschiedlichen Flügeln Polaren für die Geschwindigkeiten $M=0,7$ und $M=0,9$ auf. Es ist eindrucksvoll zu sehen, wie der gefeilt Flügel bei hoher Geschwindigkeit einen deutlich niedrigeren Widerstand bewirkt als ein Flügel mit gerader Vorderkante.

Vielleicht lag es an der örtlichen Trennung zwischen der Wirkungsstätte von Busemann in Braunschweig und der Institution in Göttingen, dass deren Direktor, Prof. Betz ein Patent auf den Pfeilflügel angemeldet hatte. Schließlich fand man eine einvernehmliche Lösung und äußerst umfangreichen Forschungen auf diesem Gebiet wurde in verschiedenen Instituten und der Industrie in ganz Deutschland in einer bemerkenswerten kollegialen Offenheit aufgenommen.

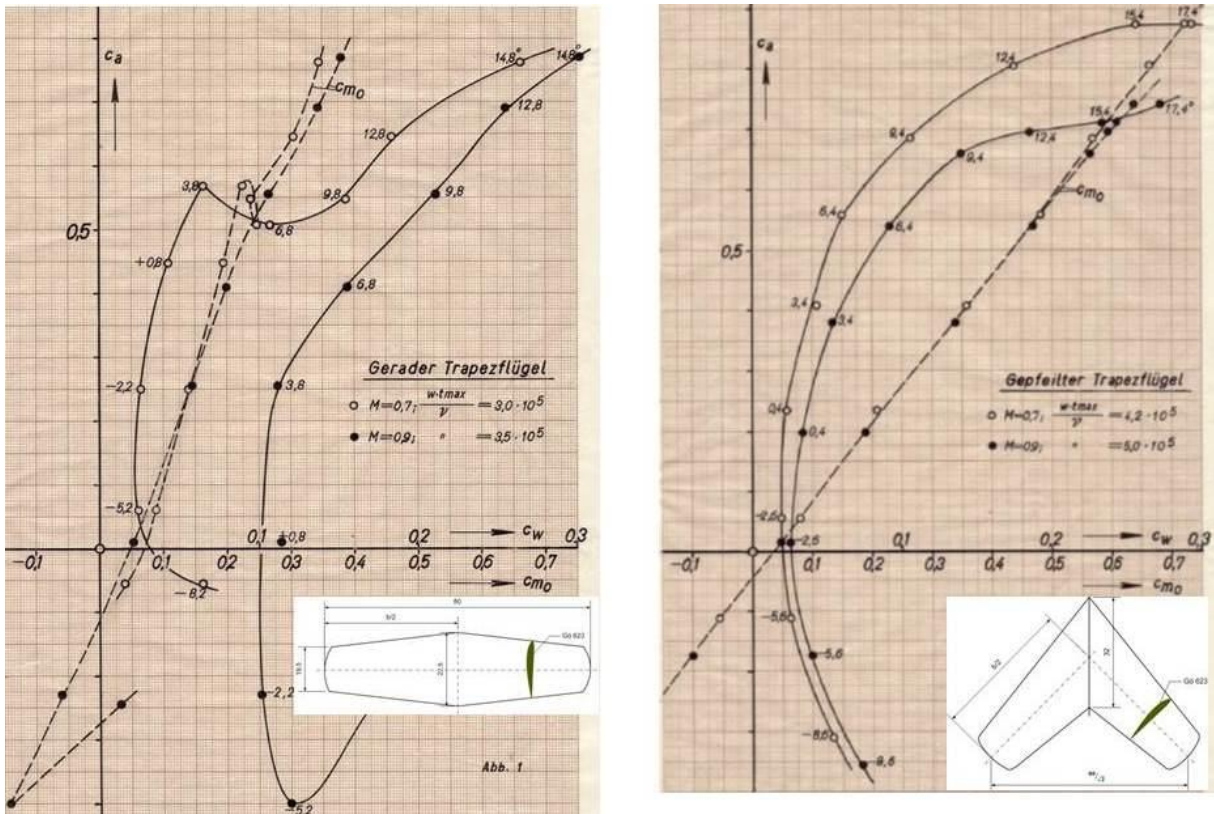


Abb. 4 Polaren für gepfeilten und ungepfeilten Flügel [5]

Es stellt sich nun die Frage, wieso angesichts des enormen Forschungspotentials in Deutschland und des Drängens der Regierung und des Militärs nach sehr schnellen, kriegsentscheidenden Flugzeugen kein Flugzeug mit einem Pfeilflügel in die Serienproduktion ging. Das ist auch umso unverständlicher, da es bei einigen Jagdflugzeugen zu „Fliegbarkeitsproblemen“ kam, Wenn sich deren Geschwindigkeit dem transsonischen Bereich näherte, so bei der Me 262, Me 109 und auch der Me 163. Vermutlich verhinderten Kooperationsprobleme zwischen Luftwaffe, Industrie und Forschung [3] eine schnellere Umsetzung der Erkenntnisse.

Schließlich baute man ab 1944 Prototypen von Hochleistungsflugzeugen, in denen man die neuesten Erkenntnisse der Pfeilflügelentwicklung berücksichtigen konnte. So entstand bei Messerschmidt die P 1101. Dieses Flugzeug besaß in der Grundkonfiguration einen Pfeilwinkel von 40° . In der Weiterentwicklung war eine variable Flügelpfeilung von 35° bis 45° vorgesehen und dazu noch eine Änderung der V-Stellung von 2° auf -3° . Dieses Projekt wurde von den Amerikanern übernommen und bei Bell als die Bell X-5 erprobt.

Ein weiteres, ebenfalls sehr herausragendes Projekt wurde bei Siebel in Halle bearbeitet. Als Forschungsflugzeug für den Hochgeschwindigkeitsbereich entstand die DFS 346 mit einer Flügelpfeilung von 45° . Das Flugzeug hatte ein T-Leitwerk und wurde von zwei Walter-Raketentriebwerken angetrieben. Der Pilot versah seine Arbeit liegend im Rumpfbügel. Es war vorgesehen, mit diesem Flugzeug in eine Höhe von 20 km eine Geschwindigkeit von Mach 2 zu erreichen. Allerdings waren bis zum Kriegsende weder Windkanalmessungen noch Testflüge unternommen worden. Die sowjetischen Truppen verfrachteten das halb fertige Flugzeug und sämtliche Unterlagen in die Sowjetunion. Getestet wurde es von dem Junkers-Piloten Ziegler. Bereits

im transsonischen Bereich stellten sich jedoch Steuerungsprobleme heraus, so dass der Pilot das Flugzeug verlassen musste und das Projekt eingestellt wurde.

Ein scheinbar außergewöhnliches Flugzeug wurde bei Junkers in Dessau entwickelt, der Strahlbomber Ju 287. Das war ein vierstrahliger Tiefdecker mit negativer Pfeilung von $-19,8^\circ$. Um einer Destabilisierung infolge negativer Pfeilung entgegenzuwirken, wurde das Seitenleitwerk relativ groß ausgelegt. Man experimentierte mit unterschiedlicher Anordnung der Triebwerke, wobei man die sogenannte Flächenregel des Junkers-Mitarbeiters Otto Frenzel erfolgreich anwenden konnte. Auch dieses Flugzeug wurde mit den Konstruktionsunterlagen in die Sowjetunion transportiert. Dort wurde es weiterentwickelt und endete in der EF 131, die immer noch den negativ gepfeilten Flügel hatte. In Fortsetzung dieses Projektes entwickelten die dort ansässigen „deutschen Spezialisten“ mehrere Bomber und schließlich 1953 die „152“ als reines Passagierflugzeug mit positivem Pfeilwinkel. Dass ausgerechnet dieses Flugzeug in Dresden weitergebaut wurde, erscheint fast schon als schicksalhafte Begegnung: Das erste deutsche Passagierflugzeug mit Turbinenantrieb wird in der Stadt gebaut, in der die Entwicklung der Pfeilflügel ihren Anfang nahm.

Eine sehr folgenreiche Begegnung spielte sich 1945 in der Forschungsanstalt für Luftfahrt in Braunschweig Völkenrode ab. Amerikanische Offiziere, unter ihnen der Entwicklungsingenieur Schairer von Boeing, ließen sich von Busemann und von Kármán den Pfeilflügeleffekt erklären. Schairer schreibt sofort einen Brief an Boeing, wo man gerade dabei ist, den ersten strahlgetriebenen Bomber, die B- 47 zu entwickeln. Zu dem Zeitpunkt noch mit einem ungepfeilten Flügel. Das Projekt wurde sofort gestoppt und das Flugzeug mit einem Pfeilflügel weiterentwickelt.

Das Ergebnis der Forschungsarbeiten von Adolf Busemann kann man heute auf jedem Verkehrsflugplatz der Welt besichtigen. Exzellentes Grundlagenwissen und die technischen Möglichkeiten, um die Theorien in der Praxis zu beweisen, waren die Voraussetzung für diese großartige Erfindung. Wenn die University of Colorado in ihren Annalen Adolf Busemann als „greatest star in its history“ bezeichnet, sollten wir daran erinnern, dass seine größte Erfindung hier in Dresden begann.

Quellen:

[1]	https://en.wikipedia.org/wiki/Adolf_Busemann (01.03.2019)
[2]	Busemann, A. Ergebnisse und Aufgaben der Aerodynamik Luftwissen, 1938 Bd. 5 Nr. 10 S. 353 – 356
[3]	Meier, H.-U. Die Pfeilflügelentwicklung in Deutschland bis 1945 Bernard & Gräfe Verlag 2006
[4]	Der Busemann Überschallkanal A-9 der LFA Entwicklung, Nutzung und Verbleib Vortrag anlässlich des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2006

[5]	Verringerung des Widerstandes von Tragflügeln bei hohen Geschwindigkeiten durch Pfeilform (vorläufiger Bericht) Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen e.V. 29.12.1939
[6]	ORAL HISTORIES: Adolf Busemann Interviewed by: Steven Bardwell Interview dates: Summer 1979