

SIND DIE FLÜGEL VON RAFFAELS AMOR IN SEINER FRESKE “DIE DREI GRAZIEN“ HOCHGESCHWINDIGKEITSTAUGLICH?

Hans-Ulrich Meier
TU Clausthal
Institut für Technische Mechanik
Adolph-Roemer-Str. 2a 38678 Clausthal-Zellerfeld

Übersicht

In dem Zeitraum von 1935-1945 wurde in Deutschland einer der wichtigsten Meilensteine in der Flugzeugentwicklung - der Pfeilflügel - erfunden und zu einem technischen Produkt entwickelt. Bei der Optimierung der Grundrissformen von Pfeilflügeln wurde auch der sogenannte M-Flügel untersucht. Diese Flügelkonfiguration hat eine auffallende Ähnlichkeit mit derjenigen von vielen Vögeln beim Schnellflug und mit den Flügeln von Gestalten der antiken und christlichen Mythologie. An Hand von Versuchsergebnissen aus den Jahren 1942-1945 soll versucht werden, die im Titel gestellte Frage zu beantworten.

1. Die Mytologie des Fliegens und der Vogelflug

Für die alten Griechen war das Fliegen ihrer Götter eine natürliche, zweckmäßige Gabe, da sie vom Olymp kamen. So hatte der Gott Hermes einen gefiederten Kopfputz und Sandalen, war aber damit für den Flug denkbar schlecht ausgerüstet. Der berühmten Sage nach, gelang es Daedalus, dem Baumeister und Erfinder des Labyrinths auf der Insel Kreta, mit seinem Sohn Ikarus von der Insel nach Neapel zu fliehen. Hierzu hatten sie sich aus Wachs und Federn Flügel gebaut. In seiner jugendlichen Begeisterung über das Erlebnis des Fliegens kam er zu nahe an die Sonne, wobei das Wachs seiner Federbefestigung schmolz und er bei einem tödlichen Sturz im Meer verendete. Es den Vögeln gleich zu tun, misslang bekanntlich auch dem Schneider von Ulm, der 1811 mit seinem selbstgebauten Schwingflügel aber mehr Glück hatte und nach seinem Sturz in die Donau von Fischern gerettet werden konnte. *Otto Lilienthal* (1848-1896) erkannte als erster die Grenzen der Physiologie in Bezug auf die Fähigkeit des Menschen zu fliegen. Seine Untersuchungen der Aerodynamik mit starren Gleitern, zusammenfassend dargestellt in seinem Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“, stellen bis heute bedeutende Beiträge zur Grundlagenforschung der Luftfahrt dar. So ist es nur verständlich, dass in der Vorstellung der Künstler im Altertum und in der Mythologie des Christentums die Grundlage des Fliegens von

vermenschlichten Gestalten der Vogelflug diente. Oft kam dabei eine Flügelform von besonders schnell fliegenden Land- und Meeresseglern zur Anwendung.

Der in Abb. 1 gezeigte Grundriss eines Geiers macht deutlich, dass dieser besonders gute Gleiter als typischer Landvogel mit $b^2/F \sim 7$ eine wesentlich kleinere Streckung hat, als Seevögel wie der Eissturmvogel ($b^2/F \sim 12$) und der Albatros ($b^2/F \sim 20$). Die Seevögel müssen naturgemäß in der Lage sein, große Strecken im Segelflug zu überbrücken und nutzen deshalb den geringeren induzierten Widerstand bei großer Flügelstreckung. Übrigens eine Erkenntnis, die auch von den Segelfliegern von Anfang an genutzt wurde.

Für bestimmte Flugsituationen können viele Vögel ihre Flügel in eine „doppelte Pfeilung“ verändern. Hierbei ist der Innenflügel „vorwärts gepfeilt“, während der Außenflügel eine Rückwärts Pfeilung hat. Als Beispiel hierzu werden in Abb. 2 zwei typische Flügelstellungen des Kolkrahen von *W. Nachtigall* gezeigt. Interessant ist dabei, dass der Kolkrahe seine Flugstabilität möglichst konstant hält, indem er den Abstand s_F zwischen dem

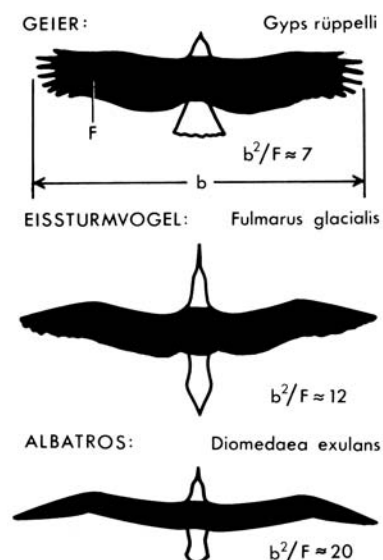


Abb.1 Grundrisse von Land – und Seevögel.
(F=Grundrissfläche des Flügles) *W. Nachtigall*¹

„gedachten“ Zentrum der Hubkräfte $H_{F,li}$ und $H_{F,re}$ und dem Schwerpunkt S möglichst klein hält. Der Kippmomentenausgleich erfolgt mit der Hubkraft H_S im gedachten Zentrum der relativ kleinen Schwanzfläche. So gelingt es dem Kolkraben, z.B. Gebiete mit kräftigen Fallwinden mit stark gepfeilten Flügeln in hoher Geschwindigkeit ohne großen Höhenverlust zu durchfliegen.

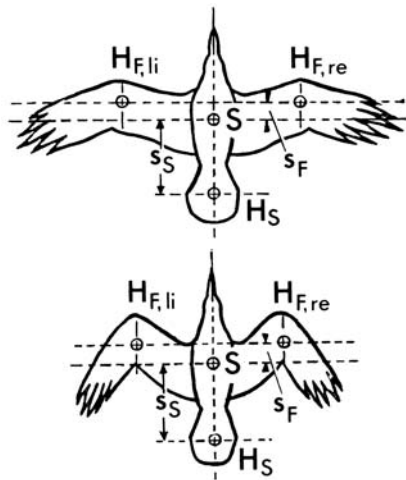


Abb. 2: Auswirkungen der veränderten Pfeilung beim Kolkraben auf die Flugstabilität, W.Nachtigall¹

Die relativ kleinen Pfeilwinkel der Flügel im Gleit- und Reiseflug werden im Sturzflug, z.B. um Beute zu jagen, wesentlich größer, um den Widerstand zu verringern und damit „pfeilschnell“ zu werden. Beim Seevogel erleichtert die Widerstandsminimierung natürlich zusätzlich das Eintauchen ins Wasser.

Die kleinere Streckung des Geiers, eines typischen „Landseglers“ gegenüber den Meeresseglern, wird durch sogenannte „Handfittiche“ kompensiert, Abb.3. Diese helfen, den Widerstand der Randwirbel zu minimieren. Eine Maßnahme zur Widerstandsreduzierung, die heute bei Verkehrsflugzeugen durch „Winglets“ angewendet wird, wenn auch konstruktiv nicht so vollendet und dem jeweiligen Flugzustand angepasst wie bei den Vögeln.

Warum ausgerechnet beim Malen von Engeln und Gestalten aus der griechischen Mythologie - wie z.B. Amor in dem Bild „Die drei Grazien“ von Raffael - diese Flügel mit „doppelter Pfeilung“ gewählt wurden, hatte sicherlich nichts mit aerodynamischen Überlegungen zu tun, Abb.4. Diese berühmte Freske von Raffael im Haus Farnesina in Rom hat aber vielleicht erstmals Wissenschaftler dazu angeregt, über diese Flügelform nachzudenken, nachdem



Abb. 3: „Handfittiche beim Rosapelikan zur Reduzierung des induzierten Widerstandes, G. Rüppell²

Adolf Busemann³ anlässlich des 5. VOLTA-Kongresses sein Konzept des Pfeilflügels 1935 vorgestellt hatte. Es soll nachstehend festgestellt werden, ob uns die Untersuchungen von Pfeilflügelkonfigurationen in Deutschland bis 1945 eine Antwort auf die Frage geben können:

„ Sind die Flügel von Amor hochgeschwindigkeitstauglich?“



Abb. 4 : „Amor und die drei Grazien“ von Raffael. Freske in der Villa Farnesina, dem Veranstaltungsort des 5. Volta-Kongresses, 1935.

2. Realisierung des Pfeilflügelkonzeptes und Flügeloptimierung^{4,5}

Die nachfolgenden Betrachtungen sind ausführlich in der Dokumentation von *HU. Meier⁶ et al.* zusammengestellt worden und werden hier nur auszugsweise wiedergegeben. Der Vortrag von *Adolf Busemann³* beim Volta-Kongress in Rom, 1935, und die unmittelbar danach erfolgte Veröffentlichung seines Beitrages durch die Deutsche Akademie für Luftfahrtforschung, führte beim Reichsluftfahrtministerium (RLM) zu einer bis dahin weltweit einmaligen Forschungs- und Entwicklungsaktivität mit dem Ziel, Hochgeschwindigkeitsflugzeuge zu entwickeln. Im Rahmen dieser Aktivitäten standen der Forschung und Entwicklung nahezu unbeschränkte Sachmittel zur Verfügung. Auf dieser Grundlage konnten völlig neue, zum Teil auch in der Praxis nicht anwendbare Ideen von Forschern verfolgt und auch experimentell untersucht werden.

Nachdem *H. Ludwieg⁷* (Dez. 1939) die experimentelle Bestätigung der Widerstandsreduzierung durch Pfeilung des Flügels im Hochgeschwindigkeitsbereich geliefert hatte, standen Untersuchungen hierzu natürlich im Mittelpunkt des Interesses. Der Nachteil der Pfeilung nach hinten war das Abfließen der Wandgrenzschichten nach außen zur Flügelspitze hin, wie aus Strömungssichtbarmachungen mit Hilfe von Fädchenaufnahmen in den Abb. 5a, 5b deutlich wird.

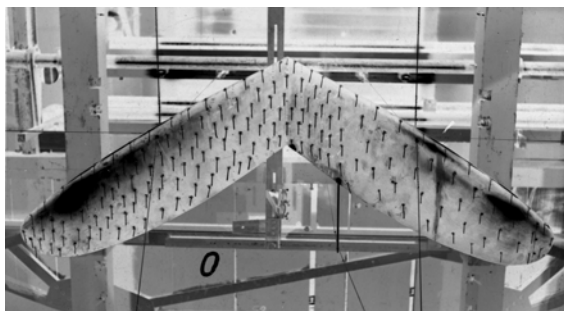


Abb. 5a: Fädchenaufnahmen an einem „Ellipsenflügel“, $\alpha = 0^\circ$. (DLR Archiv Göttingen)

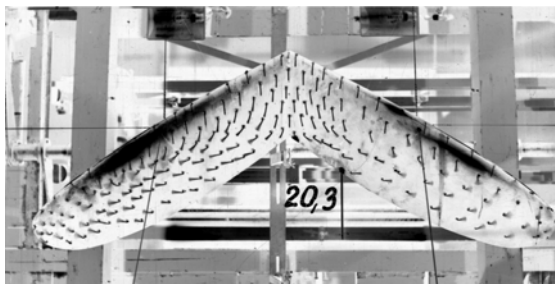


Abb. 5b: Fädchenaufnahmen an einem „Ellipsenflügel“, $\alpha = 20,3^\circ$. (DLR Archiv Göttingen)

Die Folge davon war eine vorzeitige Strömungsablösung in der äußeren Flügelhälfte. Hieraus resultierten eine mit dem Anstellwinkel zunehmende Schwanzlastigkeit (positives Nickmoment) und Rollinstabilität beim Überziehen, ein niedriger Höchstauftrieb, eine geringere Höchstauftriebssteigerung durch Landehilfen und eine Verschlechterung der Querruderwirkung. (Es wurde eine Flügelkonfiguration ausgewählt, die von *J. Weissinger⁸* entworfen worden war und für die besonders deutliche Strömungssichtbarmachungen vorliegen. Dabei verfolgte *J. Weissinger* die Idee, einen Flügel zu entwerfen, der durch eine andere Tiefenverteilung als zum Beispiel beim Trapezflügel, eine möglichst konstante Auftriebsverteilung in Spannweitenrichtung erzeugte. Eine reine Grundlagenuntersuchung, deren experimentelle Überprüfung durch *H. Lemme⁹* (1943/1944 !) zu besseren Bedingungen für das Anliegen der Strömung längs der Spannweite führte.)

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde eine Flügelgrundrissform untersucht, die eine Kombination eines nach vorwärts und rückwärts gepfeilten Flügels, des sogenannten M-Flügels, war. Es ist eine Flügelform, die bei vielen Vögeln und auch bei Raffaels Darstellung „Amor“ beobachtet werden kann. Für unsere Fragestellung bezüglich der Flugeigenschaften von „Amor“ ist es natürlich interessant, grundlegende Eigenschaften dieser Flügelkonfiguration zu betrachten

Beim M-Flügel wanderte die Flügelgrenzschicht im Bereich der Vorwärtspfeilung nach innen, vgl. hierzu auch Abb. 6a,b. Diese Grenzschicht löste zuerst im Innenbereich des Flügels ab, was ebenfalls eine Schwanzlastigkeit bei großen Anstellwinkeln bewirkte. Die Strömung an den Flügelenden war jedoch bis zum Erreichen des Anstellwinkels, bei dem der Höchstauftrieb erreicht wurde, anliegend. Dadurch blieb z. B. die Querruderwirksamkeit und damit die Rollstabilität erhalten. Der Beiwert des gemessenen Schieberollmomentes wurde mit zunehmendem Auftriebsbeiwert für diese Flügelkonfiguration im Vergleich zu den nach vorn gepfeilten und ungepfeilten Flügeln kleiner. Zum besseren Verständnis sollen deshalb weitere qualitative Ergebnisse von Windkanalmessungen an rückwärts gepfeilten und M-Flügeln im Vergleich zum ungepfeilten Trapezflügel herangezogen werden.

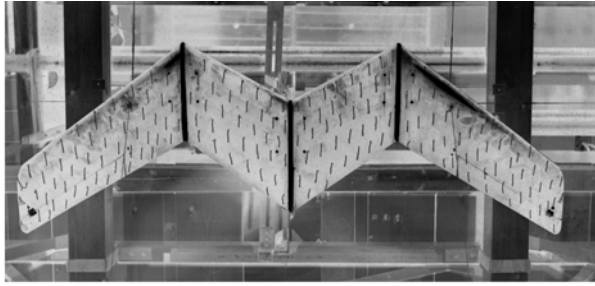


Abb. 6a: Strömungssichtbarmachung an einem M-Flügel, Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$.
(DLR Archiv Göttingen)

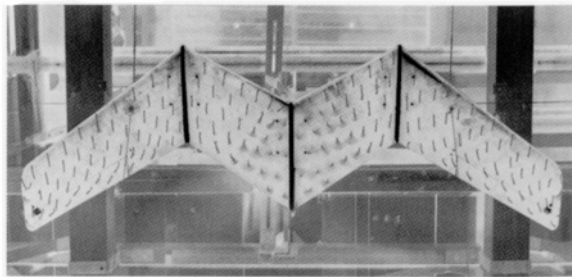


Abb. 6b: Strömungssichtbarmachung an einem M-Flügel, Anstellwinkel $\alpha = 20^\circ$.
(DLR Archiv Göttingen)

2.1 Konfigurationsstudien von Pfeilflügeln im Niedergeschwindigkeitsbereich

In den großen Niedergeschwindigkeitswindkanälen der AVA-Göttingen, DVL-Berlin und LFA-Braunschweig wurden umfangreiche Untersuchungen über die Einflüsse der *Reynoldsschen* Zahlen an Pfeilflügeln mit verschiedenen Grundrissformen durchgeführt. In der DVL konzentrierte man sich zunächst auf Vergleichsmessungen von Trapezflügeln ohne und mit Pfeilung ($\varphi=0^\circ$ und 35°), vgl. Abb. 7. Das Verhalten dieses 35° rückwärts gepfeilten Flügels im Vergleich zum entsprechenden geraden Flügel erfolgte im 5m x 7m-Windkanal der DVL an Modellen mit 4m Spannweite bei *Reynoldsschen* Zahlen von $R=2,45 \cdot 10^6$. Der Widerstandsverlauf, (vgl. Abb. 8) bei kleinen Auftriebsbeiwerten zeigte, dass infolge der Dickenrücklage von 40% ein Laminareffekt auftrat.

Das Widerstandsminimum $C_{W,P \min}$ war beim Pfeilflügel noch etwas kleiner als das des geraden Flügels. R. Seiferth äußerte hierzu die Vermutung, dass die Übergeschwindigkeiten infolge der Pfeilform etwas verkleinert wurden. Bei den Widerstandsbeiwerten $C_{W,P}$ ist zu

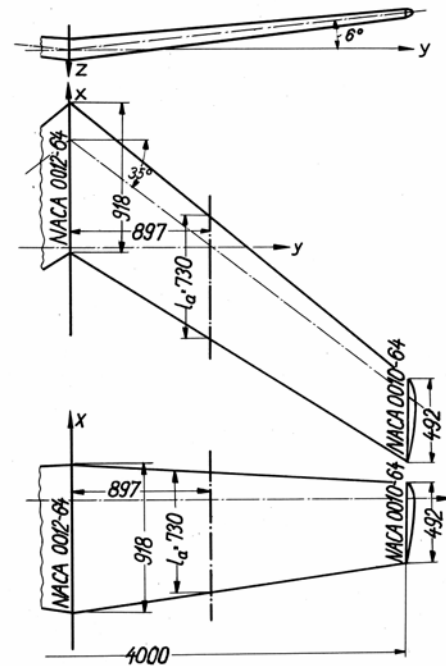


Abb. 7: Trapezflügel ($\varphi = 0^\circ$ und 35° , $\Lambda = 5,75$, Trapezverhältnis 0,535). Modell für den 5m x 7m Unterschallkanal der DVL, Berlin-Adlershof, 1942. (siehe R. Seiferth)

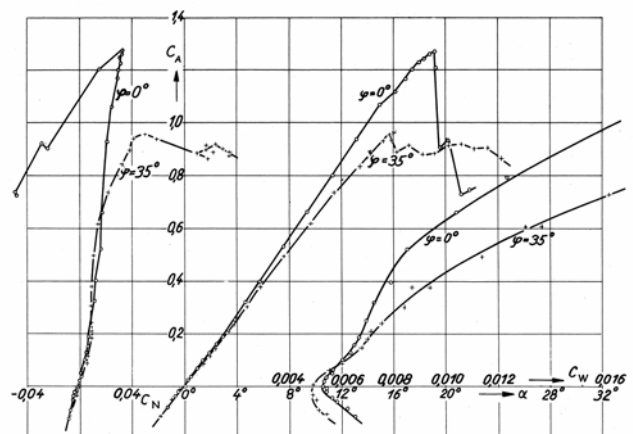


Abb. 8: Beiwerte C_A , C_W , C_m von zwei Trapezflügeln mit $\varphi=0^\circ$ und 35° , $\Lambda = 5,75$, Trapezverhältnis 0,535. Messungen im 5m x 7m Unterschallkanal der DVL, *Reynoldssche* Zahl $R=2,45 \times 10^6$, 1942. (siehe R. Seiferth⁴)

beachten, dass der induzierte Widerstand wie damals üblich nach *Prandtl-Glauert* abgezogen wurde. Der Höchstauftrieb des Pfeilflügels war mit

$(C_{A,max})_{\varphi=35^\circ} = 0,96$ erheblich kleiner als der des geraden Trapezflügels $((C_{A,max})_{\varphi=0^\circ} = 1,27)$.

Das Abreißen der Strömung erfolgte beim Pfeilflügel aber langsamer (vgl. Abb. 8) und erstreckte sich über einen Anstellwinkelbereich von $\Delta\alpha \approx 7,5^\circ$. Hinter dem Auftriebsmaximum erfolgte nur ein geringer Abfall der C_A -Werte, während beim geraden Flügel innerhalb einer Anstellwinkeländerung von $\Delta\alpha \approx 2^\circ$, die Auftriebsbeiwerte $C_A = 1,27$ bis auf $C_A = 0,73$ sanken. Der Nickmomentenverlauf war bis zum Auftriebsbeiwert $C_A = 0,7$ für beide Flügelformen nahezu identisch. Danach zeigte sich das für den Pfeilflügel typische Verhalten bei der Längsstabilität. Bei größeren Anstellwinkeln wurde der Pfeilflügel stärker schwanzlastig, da die äußeren Profile infolge der Grenzschichtwanderung einen kleineren Auftrieb hatten. Kurz vor und jenseits des Auftriebsmaximums nahm die Schwanzlastigkeit nochmals stark zu, da die Strömung am Außenflügel vorzeitig abbriss. Am Innenflügel wurde die Strömung quasi durch die Abreißgebiete gestützt und lag länger an. Beim geraden Flügel verschwanden die hohen Unterdruckspitzen an der Flügel Nase nahezu gleichzeitig längs der gesamten Spannweite und es stellte sich ein kopflastiges Nickmoment ein. Der Pfeilflügel wurde also beim Überschreiten des Maximalauftriebes noch stärker instabil um seine Querachse, während der gerade Flügel in diesem Strömungsbereich stabil wurde.

2.2 Untersuchungen zur Längsstabilität.

Um das Problem der Längsstabilität systematisch zu erkennen, wurden weitere Möglichkeiten der Formgebung studiert, die den Verlauf des Nickmomentes C_N beeinflussen sollten. Hierzu wurden Messungen von *H. Lemme*⁹ an einem Pfeilflügel, einem abgestumpften Pfeilflügel und einem M-Flügel durchgeführt. Dieser sogenannte M-Flügel - oder auch Doppelpfeilflügel genannt - ist in seiner Grundrißform vielen Vogelflügeln sehr ähnlich, wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt wurde. Da die Künstler wie *Raffaell* bei den Flügeln von Amor oder *Matteo Civitali* beim Engel Adorante (vgl., Abb. 9) diese typische Grundrißform übernommen haben, können wir zumindest die Stabilitätsuntersuchungen vom M-Flügel zur ersten Bewertung verwenden.

Nach Abb. 10 ergab der M-Flügel (c) bereits vor dem massiven Abreißen der Strömung und auch noch danach kopflastige Momente, im Gegensatz zum normalen Pfeilflügel (a). Der abgestumpfte Pfeilflügel änderte sein Nickmoment bis zum Strömungsabriss fast gar nicht. Außerdem lieferte diese Flügelkonfiguration den maximalen Höchstauftrieb mit dem größten Auftriebsanstieg. Die Lage der Momentenbezugsachse wurde aus der Messung nach $dC_N/dC_A = 0$ für den Bereich ohne Strömungsablösung bestimmt. Nahm man den 1/4-Punkt auf dem Flügelschnitt am Ort des

Schwerpunktes der Halbfäche zum Vergleich, so



Abb. 9: Der Engel „Adorante“ von dem Künstler Matteo Civitali (15. Jahrhundert)
Lucca, St Martino, Capella del Sacramento

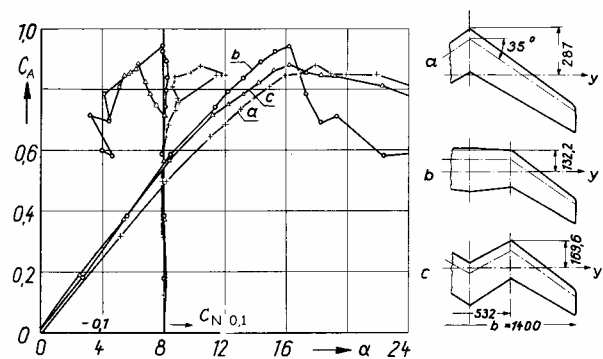


Abb. 10: Beiwerte C_A , C_m von drei Pfeilflügeln mit verschiedener Formgebung.
Messungen: *H. Lemme*⁹

lag die Bezugsachse beim Flügel (a) um 0,055 l, beim Flügel (b) um 0,047 l und beim Flügel (c) um 0,034 l weiter vorn. Dabei ist $l = S/b$ die Bezugsflügelfläche zur Halbspannweite. Die Interpretation des guten aerodynamischen Verhaltens des M-Flügels im Vergleich zum Pfeilflügel wurde bereits aus den Strömungssichtbarmachungen in Abb. 6a,b deutlich. Diese Untersuchung von verschiedenen Grundrißformen von Pfeilflügeln, durchgeführt bei relativ kleinen *Reynoldsschen* Zahlen, war wieder

einmal ein Beweis und Beispiel für die kreative Grundlagenforschung während des Zweiten Weltkrieges (1943/1944!), auch wenn ein M-Flügel schon aus konstruktiven Gründen nicht realisiert wurde. Neben den konstruktiven Nachteilen eignet sich der M-Flügel im Vergleich zum Pfeilflügel – wie nachfolgend gezeigt wird – nur bedingt für den Hochgeschwindigkeitsflug.

2.3 Vergleich des Pfeilflügels mit dem M-Flügel im Hochgeschwindigkeitsbereich an Hand der transsonischen Flächenregel.

Während für den Pfeilflügel umfangreiche Windkanalmessungen vorliegen, die eine detaillierte Beurteilung seiner Eigenschaften im Hochgeschwindigkeitsbereich zulassen, liegen uns keine entsprechenden Daten vom M-Flügel vor. Wir können aber an Hand der sogenannten transsonischen Flächenregel grundlegende Aussagen über den M-Flügel bei kompressibler Unterschallströmung machen. Auch wenn wir wissen, dass Vögel nur maximale Geschwindigkeiten im Bereich von 100 km/h erreichen, wollen wir noch eine grundsätzliche Aussage über die Flügel von *Raffaels* Amor und Engeln wie die von *Civitalis* und anderen Künstlern finden.

Hierzu greifen wir auf die transsonische Querschnittsflächenregel zurück, die von *Werner Heinzerling*¹⁰ ausführlich und allgemeinverständlich dargestellt wurde und auszugsweise wiedergegeben wird. Die Flächenregel ermöglicht durch eine besonders günstige, axiale Verteilung der Querschnittsflächen den Strömungswiderstand von Flugzeugen im Bereich der Schallgeschwindigkeit und im Überschall zu minimieren. Sie wurde entwickelt von *Otto Frenzl* (1901-1996), der von 1937 bis 1945 als Versuchsingenieur bei der Firma Junkers „Flugzeug- und Motorenwerke“ in Dessau tätig war. *Otto Frenzl* hat als erster aufgrund von Strömungsbeobachtungen und Messergebnissen an Flugzeug-Halbmodellen im 0,3m x 0,3m Hochgeschwindigkeitswindkanal gefunden, dass bei Annäherung an die Schallgeschwindigkeit die axiale Verteilung der Verdrängungsquerschnitte maßgebend für den Widerstand ist. Er interpretierte dieses strömungsphysikalische Phänomen damit, dass sich Druckstörungen beim Erreichen der Schallgeschwindigkeit vor allem quer zur Strömungsrichtung ausbreiten und damit für den Widerstand der Interferenzen zwischen den in der gleichen Querschnittsebene liegenden Verdrängungsquerschnitten maßgebend sind. Diese Erkenntnisse sind erstmals bei dem Junkers-Projekt eines Bombers mit mehreren Strahltriebwerken, der Ju 287, konsequent umgesetzt worden. 1944 wird das Patent Nr. 932 410 „Widerstandsarme Gestaltung von Hochgeschwindigkeitsflugzeugen,

auch von solchen mit außerhalb des Flugzeugumrisses liegenden Verdrängungskörpern“, vergeben, vgl. Abb. 11. Interessanterweise wurde dieses Patent 1955 aufgrund des Ersten Überleitungsgesetzes von 1949 im Gebiet der Bundesrepublik neu erteilt.

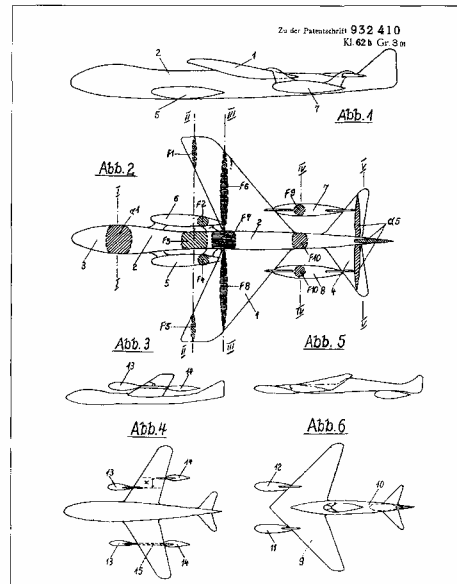


Abb. 11: Abbildungen zum Patent Nr. 932410 „Widerstandsarme Gestaltung von Hochgeschwindigkeitsflugzeugen“ vom 21. März 1944. (Erfinder: *H. Hertel, O. Frenzl, W. Hempel*) *Werner Heinzerling*¹⁰

In einer zusammenfassenden Darstellung des sogenannten Äquivalenzsatzes für schallnahe Strömungen hat *Friedrich Keune*¹¹ die Möglichkeiten für die Berechnung der günstigsten Formgebung von Flugzeugen beschrieben. Diese Ergebnisse basieren u.a. auf den Arbeiten von *Klaus Oswatitsch* und *F. Keune*¹², denen als erste der theoretische Nachweis der Flächenregel gelang. Die zweite Entdeckung der Flächenregel in den USA durch *Richard T. Whitcomb* und erste konkrete Anwendungen bei US Kampfflugzeugen und Flugkörpern ist von *W. Heinzerling*¹⁰ ausführlich beschrieben worden. In dem gleichen Beitrag hat er die transsonische Flächenregel zur Beurteilung der „aerodynamischen Güte“ verschiedener Grundrissformen von Pfeilflügeln im Vergleich zum Rechteckflügel angewendet. In der Abb. 12 wurden axiale Verdrängungsquerschnitte $Q(x)$ für den schiebenden Flügel, den Pfeilflügel und den M-Flügel mit dem entsprechenden Rechteckflügel verglichen. Als erste Vergleichsgrößen für die aerodynamische Güte wurden von *W. Heinzerling* – wie von *K. Oswatitsch* und *F. Keune* für nicht angestellte Flügel kleiner Spannweite vorgeschlagen – die

Querschnittsverteilungen der Flügel aufgetragen. Dabei wurde als axiale Querschnittsverteilung der

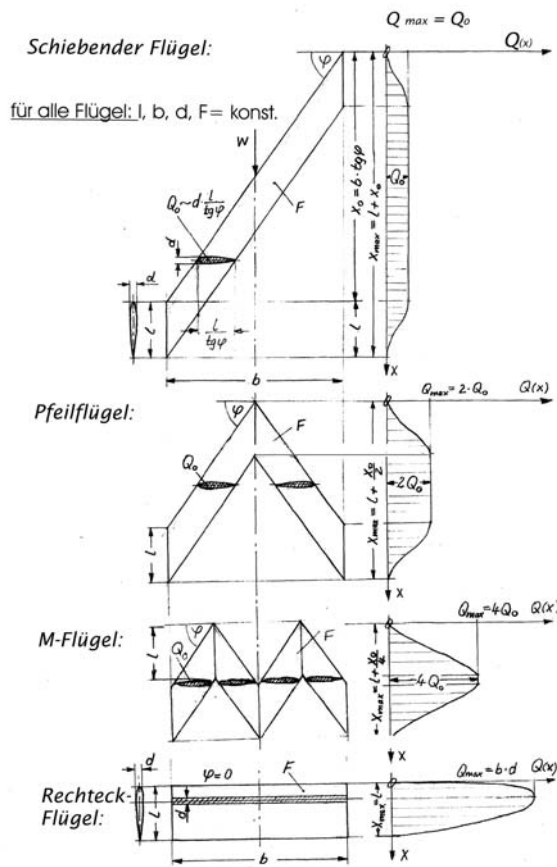


Abb. 12: Der geometrische Zusammenhang zwischen Flügelpfeilung und Flächenregel: Axialer Verlauf der Verdrängungsquerschnitte und Dickenverhältnisse äquivalenter Rotationskörper beim schiebenden Flügel, Pfeilflügel, M-Flügel und Rechteckflügel, Werner Heinzerling¹⁰

Flügel das jeweilige Dickenverhältnis des äquivalenten Rotationskörpers mit dem Durchmesser D und der fiktiven Flugzeuglänge L angegeben : $D/L = (2/\pi^{1/2}) Q_{\max}^{1/2}/L$. Zum Ergebnis führt W. Heinzerling¹⁰ aus:
 >>Der schiebende Flügel als reinste Form des gepfeilten Flügels wird von jeder Querschnittsebene nur einmal geschnitten und ergibt den flachsten und längsgestrecktesten axialen Querschnittsverlauf. Er zeigt auch ein entsprechend günstiges Widerstandsverhalten.<<
 Im Vergleich zum Rechteckflügel beträgt das Dickenverhältnis D/L für den schiebenden Flügel nur etwa 7% des vergleichbaren Rechteckflügels. Das maximale Querschnittsverhältnis des M-Flügels ist in dieser Auftragung doppelt so groß wie beim Pfeilflügel. Damit ist das Widerstandsverhalten des M-Flügels im transsonischen Geschwindigkeitsbereich gegenüber dem Pfeilflügel erheblich ungünstiger. Sicherlich ein Grund dafür, dass diese Flügelgrundrissform

von der Flugzeugindustrie auch nach 1945 von den Siegermächten nicht weiter entwickelt wurde

Damit ist aufgrund unserer Betrachtungen jedoch die Aussage berechtigt:

Die Flügel von Raffaels „Amor“ sind nicht hochgeschwindigkeitstauglich!

3. Zusammenfassung.

Das Ergebnis der Flugeigenschaften von Flügeln, wie sie von Künstlern bei der Wiedergabe von Gestalten der antiken Mythologie und im Christentum z. B. bei Engeln gefunden wurde, ist nicht überraschend! Schon immer hat der Mensch versucht, es den Vögeln gleich zu tun und zu fliegen. Bei der Evolution des Fliegens der Vögel bestand nie eine Notwendigkeit, den kompressiblen Unterschall zu beherrschen. Es ist deshalb auch nicht verwunderlich, dass der M-Flügel als eine der prinzipiellen Grundrisse beim Schnellflug von Vögeln zwar Vorteile bezüglich der Stabilität liefert, aber nicht für den kompressiblen Hochgeschwindigkeitsflug geeignet ist.

¹ W. Nachtigall, Warum die Vögel fliegen. Rasch & Röhring, 1985.

² G. Rüppell, Vogelflug, Kindler Verlag GmbH, München, 1975.

³ A. Busemann, Aerodynamischer Auftrieb bei Überschallgeschwindigkeit. Vortrag auf der 5. Volta-Tagung in Rom 1935. Luftfahrtforschung Bd. 12, Nr. 6, 1935, S. 210-220.

⁴ R. Seiferth, Aerodynamische Beiwerte des Tragflügels. Monographien über Fortschritte der deutschen Luftfahrtforschung (seit 1939). Hrsg. A. Betz AVA Göttingen, F2 Der räumliche Tragflügel, Teil F2 1, 1946, S. 1-69.

⁵ W. Krüger, Der Flügel mit Landehilfen. Monographien über Fortschritte der deutschen Luftfahrtforschung (seit 1939). Hrsg. A. Betz AVA Göttingen, F2 Der räumliche Tragflügel, Teil F2 1, 1946, S. 1-69.

⁶ H.-U. Meier, Hrsg., B. Ciesla, H. Förtsch, H. Galleithner, W. Heinzerling, B. Krag,

H. Schubert, Die Pfeilflügelentwicklung in Deutschland bis 1945. Die Geschichte einer Entdeckung bis zu ihrer ersten Anwendung. Bernard & Graefe Verlag Bonn, Bd. 33, Dez. 2005

⁷ H. Ludwieg, Pfeilflügel bei hohen Geschwindigkeiten. AVA, LGL-Bericht 127, 1940, S. 44-52.

⁸ J. Weissinger, Über die Auftriebsverteilung von Pfeilflügeln. DVL-Jf. 232/1, Deutsche Luftfahrtforschung, FB 1553, 1942, S. 1-46.

⁹ H. Lemme, Untersuchungen an einem Pfeilflügel, einem abgestumpften Pfeilflügel und einem M-Flügel. AVA-Bericht 43/W/24, und ZWB/FB 1739/1 und ZWB/FB 1739/2, 1943.

¹⁰ *W. Heinzerling*, Die transsonische Flächenregel, ein übergeordnetes aerodynamisches Entwurfskonzept. Siehe Literaturstelle 6, Kap. 2.2.4.

¹¹ *F. Keune*, Zusammenfassende Darstellung und Erweiterung des Äquivalenzsatzes für schallnahe Strömungen, Forschungsbericht Nr 316 des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, 1956.

¹² *K. Oswatitsch*, *F. Keune*, Ein Äquivalenzsatz für nicht angestellte Flügel kleiner Spannweite in schallnaher Strömung. *Z. f. Flugwiss.* 3 (1955), S. 29-46.