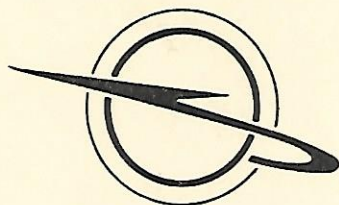


FORSCHUNGSZENTRUM DER LUFTFAHRTINDUSTRIE

Lehrschriften für die Berufsausbildung und Qualifizierung



Dipl.-Ing. Gerhart Hoffmann

AUFBAU DES TRAGFLÜGELS

Aufbau des Flugzeugs, Band 1

DEUTSCHE LUFTHANSA
Betriebsberufsschule
Inv.-Verz.-Nr. 1300.26

Deutsche Lufthansa
Betriebsberufsschule
Berlin-Schönefeld

Als Manuskript gedruckt

Mit der Herausgabe beauftragt:
ZENTRALSTELLE FÜR LITERATUR UND LEHRMITTEL
Dresden 1960

Gutachter: Obering. Franz Strobel
Bearbeiter: Dipl.-Gwl. Hellmut Günther

Bestell-Nr. 7208

Als Manuskript gedruckt
1960

Nachdruck, Reproduktion und Nachbildung – auch auszugsweise –
nur mit Genehmigung des Verfassers und
der Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel
im Forschungszentrum der Luftfahrtindustrie
Dresden N 2 – Postschließfach 40

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Entwicklung des Flugzeugaufbaus	1
1.1 Entwicklung in der Vergangenheit	2
1.2 Heutiger Entwicklungsstand	6
1.3 Ausblick auf die zu erwartende Weiterentwicklung	8
2 Baugruppen des Flugzeugs	10
3 Einteilung der Flugzeuge nach äußeren Merkmalen	11
3.1 Anordnung der Tragflügel	11
3.2 Anordnung der Triebwerke	12
3.3 Anordnung und Form des Rumpfes	13
4 Aufbau des Tragflügels	14
4.1 Tragflügelformen	14
4.2 Aerodynamische Betrachtung	16
4.3 Beanspruchungen des Tragflügels	18
4.4 Konstruktive Gestaltung	21
4.41 Bauweisen	21
4.411 Fachwerkbauweise	21
4.412 Holmbauweise	22
4.413 Schalenbauweise	23
4.42 Konstruktionselemente	27
4.421 Profile	27
4.422 Träger	28
4.423 Rippen und Querverbände	28
4.424 Blechversteifungen	29
4.425 Beplankung	30
4.43 Verbindungsverfahren	32
4.431 Oberflächen- und Dichtnietung	32
4.432 Metallkleben	34
4.433 Schweißen	35
4.44 Ein- und Anbauten	36
4.4401 Triebwerkeinbauten	36
4.4402 Triebwerkanlage	37
4.4403 Enteisungsanlage	38
4.4404 Hydraulikanlage	40
4.4405 Einziehfahrwerke	40
4.4406 Lagerung für Querruder und Landeklappen	40
4.4407 Steuergestänge	42
4.4408 Elektrische Anlage	42
4.4409 Feuerlöschanlage	42
4.4410 Grenzschriftzaun und Staurohr	43
4.4411 Deckel und Klappen	43
Literaturverzeichnis	45
Bildnachweis	45
Sachwörterverzeichnis	46
Aufbau des Flugzeugs, Inhaltsübersicht	48
Lehrschriftenverzeichnis	49

1 Entwicklung des Flugzeugaufbaus

Das Flugzeug hat während seines erst etwa 50jährigen Bestehens eine Entwicklung durchgemacht, deren außerordentliche Schnelligkeit bereits aus dem Vergleich einiger für bestimmte Zeitpunkte typischer Flugzeugmuster hervorgeht (Bild 1.1).

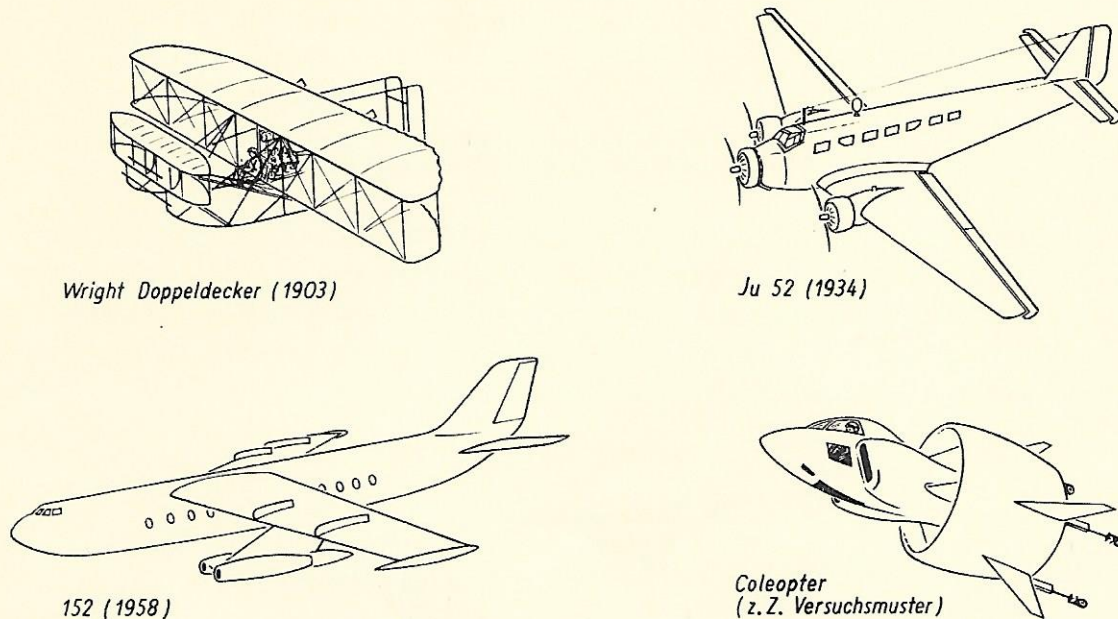


Bild 1.1 Verschiedene für bestimmte Zeitabschnitte typische Flugzeugmuster

Die Grundform eines Flugzeugs, bestehend aus Rumpf, Tragflügeln und Leitwerk, ist bis heute im großen und ganzen beibehalten worden. Ob sich neue Formen, wie die des bereits als Versuchsmuster fliegenden Coleopters, allgemein durchsetzen werden, kann heute noch nicht gesagt werden.

Geändert haben sich seit Beginn der Entwicklungszeit des Flugzeugs die äußere Gestalt, der konstruktive Aufbau im einzelnen sowie die verwendeten Werkstoffe. Die Triebfeder hierfür waren und sind auch heute noch die ständig wachsenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Flugzeugs. Das steigende Interesse am Luftverkehr und der Einsatz des Flugzeugs auch für immer zahlreichere andere Verwendungszwecke stellte die Konstrukteure immer wieder vor neue Aufgaben. Die Grundtendenz der Leistungssteigerung kann mit den Worten "schneller, weiter und höher" zusammengefaßt werden. Hinzu kommt, soweit es sich um den Luftverkehr handelt, daß eine immer größere Anzahl von Fluggästen sehr sicher und möglichst komfortabel ans Ziel ge-

bracht werden soll. Bild 1.2 enthält einen Vergleich der Leistungen von einigen für ihre Zeit typischen Flugzeugmustern.

		Wright Doppeldecker	Ju 52	152 II
Geschwindigkeit	km/h	55	250	800
Reichweite	km	0,25	1 250	2 500
Flughöhe	m	3	2 400	10 000
Fluggewicht	kg	325	12 500	51 000
Passagierzahl		-	17	58

Bild 1.2 Leistungsvergleich einiger Flugzeuge verschiedener Entwicklungsstufen

Bild 1.3 zeigt die Entwicklung der Reisegeschwindigkeiten, Reichweiten und Reiseflughöhen von Verkehrsflugzeugen. Die Übersicht und das Diagramm lassen ahnen, welcher gewaltige Arbeitsaufwand von zahlreichen Wissenschaftlern, Technikern und Facharbeitern notwendig war, um in relativ kurzer Zeit derartige große Leistungssteigerungen zu erzielen.

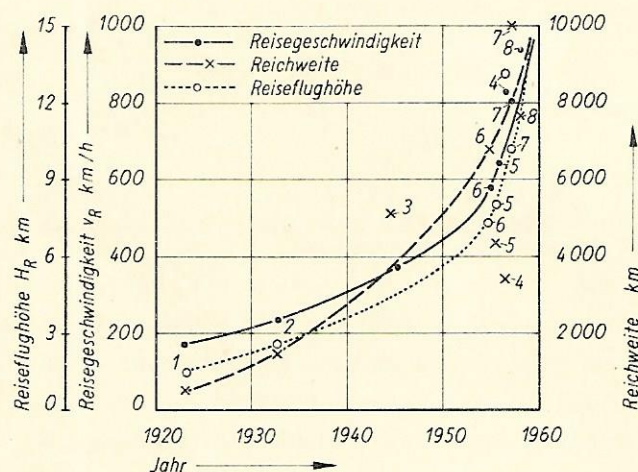


Bild 1.3 Entwicklung der Reisegeschwindigkeit, Reiseflughöhe und Reichweite im Luftverkehr

1 F 13 3 DC 4 5 IL 18 7 Tu 114
2 Ju 52 4 Tu 104 6 Super Const. 8 Boeing 707

1.1 Entwicklung in der Vergangenheit

Das erste 1895 von Lilienthal gebaute Eindecker-Gleitflugzeug zeigte deutlich die Ergebnisse eingehenden Studiums des Vogelflugs und Vogelflügels. Als Werkstoffe wurden Bambusrohr für das Gerüst und Leinwand für dessen Bespannung verwendet. Auch das erste Motorflugzeug der Brüder Wright (1903) besaß ein leichtes, mit Drähten verspanntes Traggerüst (Doppeldecker) aus Bambus- und Holzstreben, das mit Stoff bespannt war (Bild 1.4, Seite 3). Zur Erhaltung der Stabilität hatte diese Maschine schon dieselben Einrichtungen, nämlich Höhenleitwerk, Seitenleitwerk und Quersteuerung, wie sie heute noch die

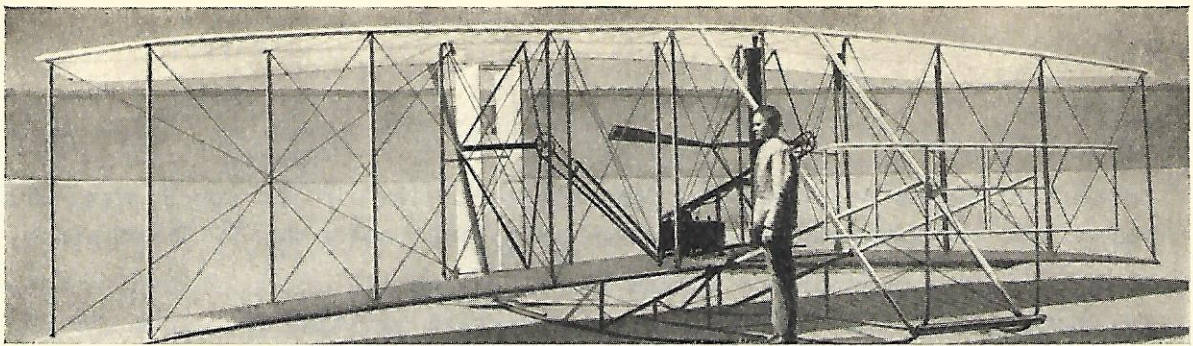


Bild 1.4 Flugzeug der Brüder Wright (1903)

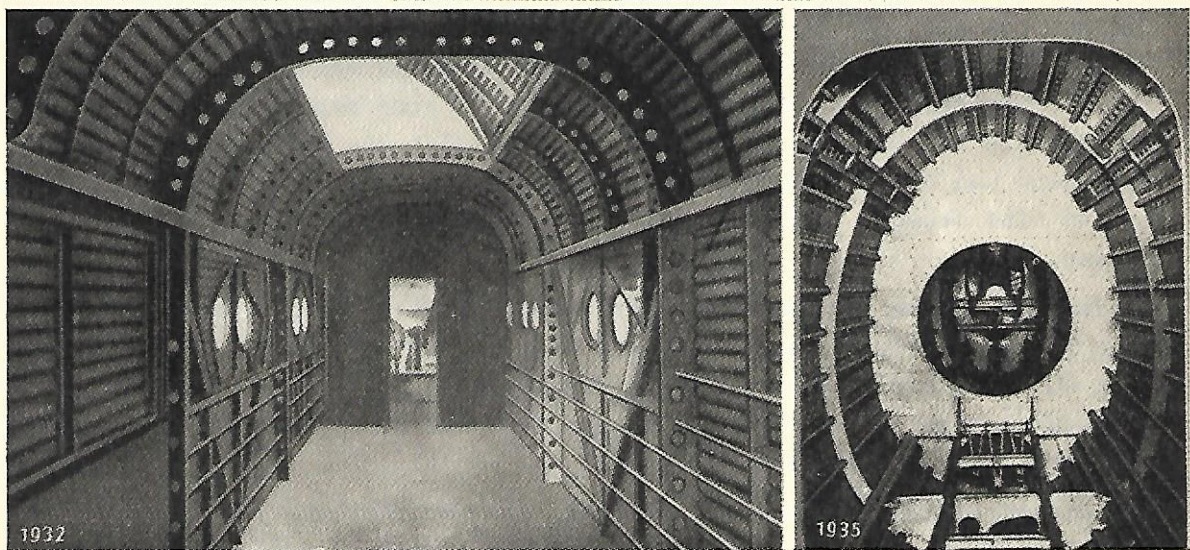
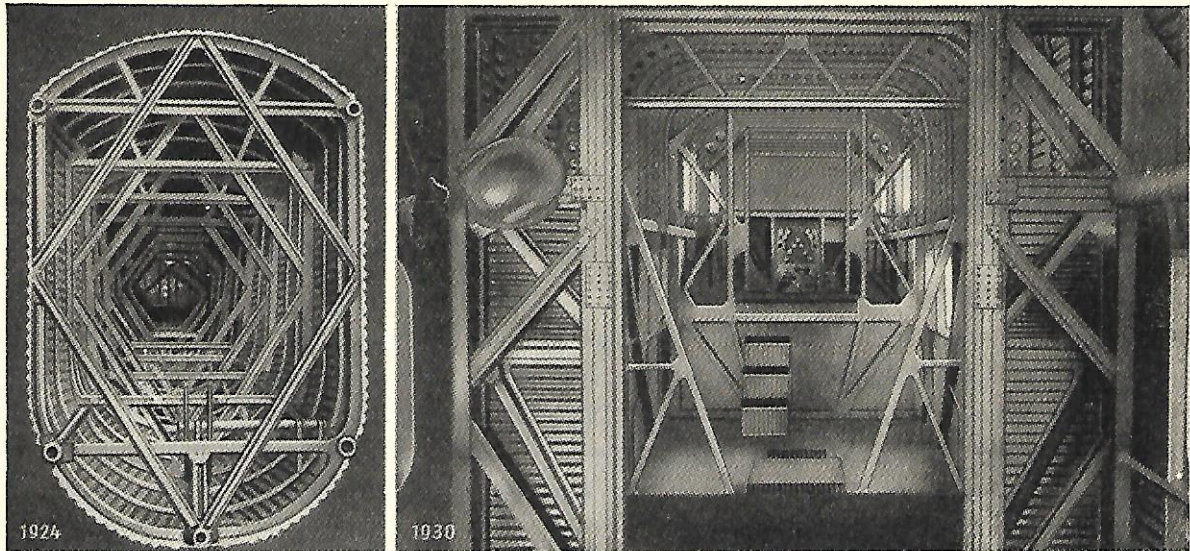


Bild 1.7 Entwicklung des Rumpfaufbaus von 1924 bis 1935

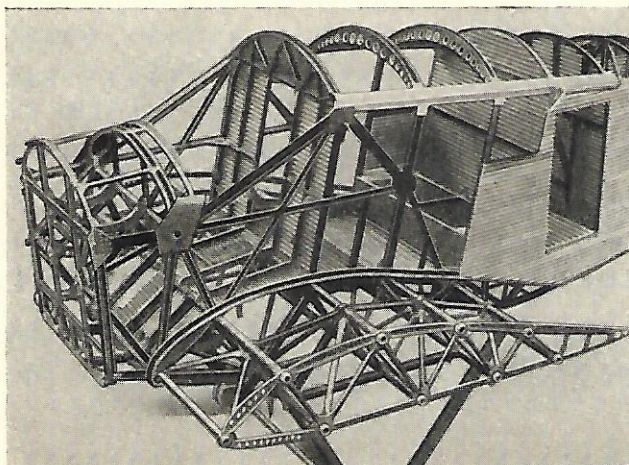


Bild 1.5 Rumpfaufbau der Junkers F 13 in Spantenbauweise

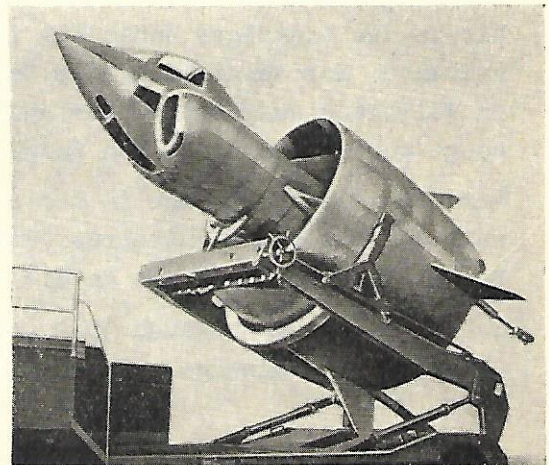


Bild 1.10 Versuchsmuster eines Ringflügelflugzeugs (Coleopter)

modernsten Flugzeuge aufweisen. Zum Antrieb diente ein von den Brüdern Wright eigens für ihr Flugzeug entwickelter Vierzylindermotor von 12 PS Leistung.

In der weiteren Entwicklung wurden die Flugzeuge mit einem deutlich ausgeprägten Rumpf gebaut. Die Rumpfkonstruktion bestand zunächst aus einem offenen Gittergerüst, das später teilweise, und zwar im Bereich des Motors und des Führersitzes mit Blech, Sperrholz und Stoff verkleidet war. Die Querschnittsform stellte meist ein Rechteck mit scharfen Ecken dar, da die Erkenntnisse für eine ausgefeilte aerodynamische Durchbildung noch fehlten. Die Tragflügel und das Leitwerk bestanden aus einem Gerüst von Fachwerkrippen und Holmen, das mit Stoff verkleidet war. Der Stoff wurde mit einem Lack dicht und widerstandsfähig gemacht. Tragflügel und Leitwerk waren mit zahlreichen Stahldrähten verspannt. Auch das Fahrwerk, meist eine Konstruktion mit durchgehender Achse und Dreieckstreben, war z. T. mit Drähten verspannt und durch Gummiseile abgefedert.

Am meisten verbreitet war der Typ des Doppeldeckers. Seine Vorteile sind die günstigen Auftriebswerte und die infolge der geringeren Spannweite große Wendigkeit. Der höhere Widerstand des Doppeldeckers spielte bei den kleinen Fluggeschwindigkeiten keine Rolle. Teilweise wurden Eindecker in der Art des Hoch- oder Schulterdeckers, wie z. B. die Rumplertaube, gebaut. Als Sonderausführung entstanden auch Dreidecker.

Der Antrieb erfolgte in erster Linie durch wassergekühlte Reihen- und luftgekühlte Sternmotoren, deren Leistung gegen Ende des ersten Weltkriegs etwa 200 PS erreichte. Der Umlaufmotor war hierbei eine besondere Konstruktion, bei der die Kurbelwelle stillstand, während sich das Motorgehäuse mit den Zylindern und der Luftschraube um diese drehten. Durch das umlaufende Gehäuse sollte eine bessere Kühlung des thermisch hoch belasteten Motors erreicht werden.

In den Jahren des ersten Weltkriegs baute man bereits Flugzeuge mit für damalige Zeiten riesigen Abmessungen und Leistungen, und zwar mit Spannweiten von über 40 m und bis zu acht Motoren. Sie wurden als Land- und auch als Wasserflugzeuge gebaut. Aber auch sie wurden fast ausschließlich als stark verspannte Doppeldecker ausgeführt.

Ein wichtiger Schritt in der Geschichte des Flugzeugbaus ist die 1919 fertiggestellte Konstruktion der Junkers F 13 als erstes freitragendes Ganzmetall-Verkehrsflugzeug. Die in Bild 1.5 (Seite 3) gezeigte Spantenbauweise dieses Flugzeugs mit dem durchlaufenden, räumlichen Rohrfachwerk der Tragflügel blieb bis in die dreißiger Jahre für viele Flugzeugkonstruktionen dieses Werkes bestimmend. Zur Versteifung der Beplankung wurde diese bei den Junkersflugzeugen in Wellblech ausgeführt. Für andere in Glatblechbauweise hergestellte Flugzeuge wurden für denselben Zweck längslaufende Profile oder Sicken verwandt.

Parallel dazu baute man in der sogenannten Gemischtbauweise, d.h. einer Fachwerkbauweise aus Stahlrohren, die mit Stoff oder Holz beplankt war. In dieser Bauweise werden noch bis in die jüngste Zeit manche Schulflugzeuge ausgeführt.

In den Zeitraum zwischen 1929 und 1934 fallen die Konstruktion und der Bau einiger Großflugzeuge, die in ihren Abmessungen durchaus mit heutigen Ver-

kehrsflugzeugen verglichen werden können. Zwar erlangten diese Flugzeuge noch keine wesentliche verkehrstechnische Bedeutung, was vor allem an dem zu dieser Zeit noch nicht so großen Luftverkehrsbedürfnis lag, sie legten aber Zeugnis ab von dem Mut ihrer Konstrukteure und der bereits hohen Leistungsfähigkeit des damaligen Flugzeugbaus.

Das bekannteste dieser Großflugzeuge dürfte das Flugboot Dornier Do X sein. Es flog in den Jahren von 1929 bis 1931 und zeichnete sich durch eine sehr geräumige und luxuriöse Einrichtung aus. 1930 wurde die Junkers G 38 in Dienst gestellt. Bei diesem Flugzeug ist eine Tendenz zum Nurflügelflugzeug zu erkennen, indem in den Tragflügeln, die an der Wurzel eine Profildicke von 2,10 m besaßen, außer den im Flug wartbaren Motoren auch Passagierräume untergebracht waren. Der größte dieser Riesen im damaligen Flugzeugbau war die bei uns in Deutschland nicht so bekannt gewordene ANT 20 "Maxim Gorki". Sie flog ab 1934 und diente vor allem zur Popularisierung des Luftfahrtgedankens in der Sowjetunion. Bild 1.6 enthält einige Daten dieser drei Großflugzeuge.

		Do X	G 38	ANT 20
Spannweite	m	48	44	63
Länge	m	40,5	23,2	32,5
Höhe	m	9,0	7,2	11,3
Flügelfläche	m ²	430	300	486
Abfluggewicht (max)	kg	56 000	24 000	52 000
Anzahl der Passagiere		70	38	43
Reisegeschwindigkeit	km/h	220	210	220
Reichweite	km	4 000		2 000
Triebwerke	PS	12 x 700	4 x 750	8 x 750

Bild 1.6 Abmessungen und Leistungsdaten der Großflugzeuge Do X, G 38 und ANT 20

Ein wichtiges Ereignis in der Entwicklung des Flugzeugbaus war die Einführung des einziehbaren Fahrwerks. Diese Konstruktion war das Ergebnis der richtigen Überlegung, daß das feste Fahrwerk während des Flugs nur einen zusätzlichen Widerstand erzeugt. 1934 wurde in Amerika mit der Lockheed "Orion" das erste Verkehrsflugzeug mit Einziehfahrwerk dem Luftverkehr übergeben. Der Geschwindigkeitsgewinn war mit 15 bis 20 km/h beachtlich, und die Maschine wurde dadurch wirtschaftlicher. Diese Tatsache wirkte auch auf die europäischen Luftverkehrsgesellschaften alarmierend, und es wurde sofort mit der Konstruktion von Schnellverkehrsflugzeugen mit Einziehfahrwerken und Reisegeschwindigkeiten von über 300 km/h begonnen.

Eine für ihre Zeit sehr fortschrittliche Konstruktion war die deutsche He 70, bekannt unter dem Namen Heinkel "Blitz". Das Besondere an diesem einmotorigen Ganzmetallflugzeug für vier Fluggäste war eine ausgezeichnete aerodynamische Formgebung. Das einziehbare Fahrwerk wurde nach außen in die Tragflügel eingefahren. Diese Merkmale erlaubten bei einer Motorleistung von nur 750 PS eine Höchstgeschwindigkeit von etwa 380 km/h.

Infolge der zunehmenden Reisegeschwindigkeiten begannen sich in den dreißiger Jahren neue konstruktive Gestaltungsprinzipien durchzusetzen. Um unnötig grobe Widerstände zu vermeiden und damit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, spiel-

te die aerodynamische Formgebung des Flugzeugs eine immer größere Rolle. Der Windkanal wurde zu einem unentbehrlichen Arbeitsmittel für die Flugzeuggestaltung. Die bekannten deutschen viermotorigen Großverkehrsflugzeuge Ju 90 für 40 Fluggäste und FW 200 "Condor" für 26 Fluggäste wiesen in diesem Sinne durchaus moderne Formen auf und können als Vorläufer des nach dem zweiten Weltkrieg beginnenden umfangreichen Langstrecken-Luftverkehrs mit viermotorigen Flugzeugen angesehen werden. Immerhin hatte die FW 200 bereits 1938 einen beachtenswerten Rekordflug von Berlin nach New York und zurück durchgeführt.

Zur Verbesserung der Oberflächengüte wurde fast überall die Glattdachbauweise eingeführt. Auch die bei Junkers traditionelle Wellblechbeplankung mußte den neuen Erfordernissen weichen.

Um die Flugleistungen steigern zu können, begann man im gesamten Flugzeugaufbau neue Wege zu beschreiten. Die Fachwerkkonstruktion wurde allmählich verlassen und dafür die Schalenbauweise eingeführt. Ihre Besonderheit liegt darin, daß die durch Spanten und Stringer versteifte Außenhaut Kräfte aufnimmt und mit zum Festigkeitsverband gehört. Diese Bauweise stellt eine ideale Leichtbauform dar, bei der größtmögliche Festigkeit mit geringstem Gewichtsaufwand erzielt wird. Gerade das sind aber Forderungen, die der fortgeschrittene Flugzeugbau erhebt. Bild 1.7 (Seite 3) zeigt die Entwicklung des Rumpfaufbaus von der Fachwerkbauweise des Jahres 1924 bis zur Schalenkonstruktion im Jahre 1935.

Eine neue Phase in der Entwicklung des Flugzeugbaus wurde mit der Einführung der Strahltriebwerke als Flugzeugantrieb eingeleitet. Im Verlaufe sich ständig steigernder Fluggeschwindigkeiten hatte der Kolbenmotor mit Luftschraube bei etwa 800 km/h die Grenze seiner Wirtschaftlichkeit erreicht. Man war daher gezwungen, andere, leistungsfähigere Antriebsmittel zu suchen. Am 27. 8. 1939 wurde der erste Flug mit der strahlgetriebenen deutschen He 178 durchgeführt. Mit einer Strahltriebwerke HS 2 von nur 450 kp Schub konnte bereits eine Geschwindigkeit von 700 km/h erreicht werden. Bis 1945 wurde diese von der mit zwei Strahltriebwerken ausgerüsteten Me 262 auf etwa 860 km/h in 12 km Höhe gesteigert.

Etwa gleichzeitig arbeitete man an der Entwicklung leistungsfähiger Raketenmotoren als Flugzeugantrieb. Bereits 1944 überschritt ein deutsches raketengetriebenes Flugzeug erstmalig die 1000 km/h-Grenze und erreichte eine Höhe von 12 km in der damals erstaunlich kurzen Zeit von etwa 3 Minuten.

Es ist verständlich, daß bei derartig gesteigerten Geschwindigkeiten und allen sich daraus ergebenden Beanspruchungen des Flugzeugs auch die Anforderungen an die äußere Gestaltung und an den konstruktiven Aufbau der Zelle steigen. Alle damit im Zusammenhang stehenden Probleme gewinnen heute mit der Einführung von strahlgetriebenen Flugzeugen im planmäßigen Luftverkehr in größerem Umfang an Bedeutung.

1.2 Heutiger Entwicklungsstand

Der Zivilflugzeugbau steht heute zu einem großen Teil im Zeichen der Entwicklung, des Baus und der Indienststellung strahlgetriebener Verkehrsflugzeuge. Die z. Z. eingesetzten Strahltriebwerke weisen Schubkräfte zwischen 3000 und 10000 kp auf, wodurch Reisegeschwindigkeiten von 800 bis 950 km/h

erreicht werden. Außerdem werden eine Reihe Verkehrsflugzeuge, bei denen die Schnelligkeit nicht ganz so im Vordergrund steht, bei denen aber auf große Wirtschaftlichkeit Wert gelegt wird, mit Propellerturbinen ausgerüstet. Die Spanne ihrer Leistungen reicht heute von 1500 PS bis 12000 PS. Üblicherweise ergeben sich hieraus Reisegeschwindigkeiten zwischen 450 und 800 km/h.

Der Einbau der Strahltriebwerke bedingt eine bestimmte Gestaltung der Zelle, die sich von derjenigen für Kolbentriebwerkflugzeuge sehr häufig unterscheidet. Bei Flugzeugen mit *e i n e m* Strahltriebwerk wird dieses im allgemeinen in den Rumpf eingebaut. Die Luftzuführung erfolgt durch eine Öffnung in der Rumpfspitze (Mig 15) oder durch Einlauföffnungen entweder in den Flächenwurzeln oder an den Rumpfseitenwänden. Der Abgasstrahl wird in jedem Falle aus dem Rumpfe herausgeführt.

Verkehrsflugzeuge besitzen mehrere Strahltriebwerke. Diese werden entweder direkt in die Tragflügel eingebaut (Tu 104, Tu 110, "Comet") oder an Stielen unterhalb derselben aufgehängt ("152", Boeing 707). Interessant ist auch die Anordnung der Triebwerke seitlich am Rumpfheck ("Caravelle"). Sie bietet den Vorteil eines ungestörten und damit auch aerodynamisch günstigen Aufbaus der Tragflügel sowie eines optimal geringen Geräuschpegels in der Kabine.

Die hohen Fluggeschwindigkeiten strahlgetriebener Flugzeuge stellen große Anforderungen an die aerodynamische Gestaltung der Zelle. Abgesehen von neuen Bauformen, wie z. B. der Verwendung von gepfeilten Tragflügeln, spielen die Konturgenauigkeit und die Güte der Oberfläche eine erhebliche Rolle. Die genaue Einhaltung der vorgesehenen Außenkontur macht die Anwendung der Schalenbauweise unumgänglich notwendig. Die zur Befestigung der Hautbleche angewandte Senknietung wird kleinste Unebenheiten und dadurch hervorgerufene zusätzliche Widerstände trotzdem niemals ganz vermeiden können. Daher werden teilweise bereits sogenannte Integralschalen gebaut, bei denen Beplankung und Verstärkungen aus einem Stück bestehen. Eine Einsparung an Nietköpfen an der Außenseite kann auch durch Anwendung des Metallklebens erreicht werden. Von Vorteil ist hierbei auch der im Vergleich zu Nietverbindungen stetige Kraftfluß. Vielfach werden bereits Kunststoffe für nichttragende Teile der Beplankung verwendet, soweit keine zu hohen Fluggeschwindigkeiten vorliegen (Bild 1.8). Eine glatte und witterungsbeständige Oberfläche sowie gleichzeitig ein geringes Gewicht machen sie für viele Zwecke des Flugzeugbaus geeignet.

Ein großes Problem für Konstruktion und Fertigung bilden die für den Schnellflug erforderlichen dünnen Profile. Beträgt bei Luftschraubenverkehrsflugzeugen die Profildicke über die ganze Spannweite noch etwa 15 bis 20 Prozent der Flügeltiefe, so besitzt z. B. die "152" eine Dicke von 12,5 Prozent, während sie bei strahlgetriebenen, mit Überschallgeschwindigkeit fliegenden Jagdflugzeugen bis auf 3 Prozent absinkt. Für diese niedrigen

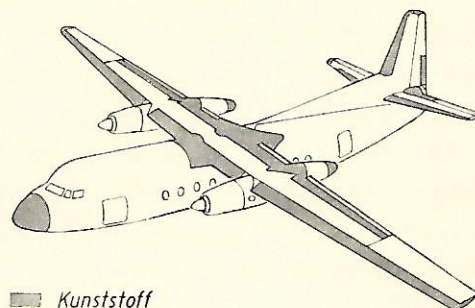


Bild 1.8 Verwendung von Kunststoff bei der Flugzeugbeplankung

Bauhöhen ist die Verwendung von Integralschalen, die als Tragflügelober- und -unterschale miteinander verbunden werden, sehr günstig. Manche Tragflügel werden bereits in dieser Weise ausgeführt.

Die dünnen Tragflügel werden durch die Beanspruchungen im Fluge stark durchgebogen. Bei der "152" kann diese Durchbiegung der Flügelenden bis zu 70 cm betragen. Diese wechselweise auftretende Biegebeanspruchung stellt hohe Anforderungen an die Dauerfestigkeit des ganzen Bauteils.

Um bei Hochgeschwindigkeitsflugzeugen die äußere Kontur sehr genau einhalten zu können, werden bereits in einigen Fällen Verbundplattenbauteile (Sandwichbauteile), insbesondere in Wabenbauweise, angewandt, die bei relativ geringem Gewicht eine hohe Steifigkeit besitzen. Das Metallkleben als Verbindungsverfahren spielt dabei eine große Rolle.

Für Flugzeuge hoher Geschwindigkeiten, die aus wirtschaftlichen Gründen in Höhen bis zu 13000 m fliegen, ist der Einbau von Druckkabinen notwendig. Um physiologische Störungen bei den Fluggästen und der Besatzung zu vermeiden, muß in der Kabine ein Druck gehalten werden, der demjenigen in 2000 bis 3000 m Höhe entspricht. Der Bau druckdichter Kabinen stellt hohe Anforderungen an Konstruktion und Fertigung. Die "Comet"-Unfälle des Jahres 1954 haben gezeigt, daß insbesondere die Dauerfestigkeit und die Materialermüdungserscheinungen einer exakten Nachprüfung bedürfen. Es ist daher heute üblich, die sich im Flugbetrieb durch Auf- und Abstieg ergebenden wechselnden Belastungen in einem Wassertank nachzuahmen, um die vorgesehene Lebensdauer der Druckkabine zu prüfen.

Schließlich muß noch darauf hingewiesen werden, daß die Notwendigkeit der Unterbringung außerordentlich großer Kraftstoffmengen und umfangreicher Ausrüstungen manche Probleme auch für den Zellenbauer stellt.

1.3 Ausblick auf die zu erwartende Weiterentwicklung

Für die Zukunft läßt sich voraussehen, daß als Bauweisen die Integral- und Verbundplattenbauweisen weiter entwickelt und verfeinert werden. Die Metallklebetechnik wird durch Verbesserung der Kleber, vor allem durch Verbesserung ihrer Herstellungsverfahren sowie ihrer Temperatur- und Alterungsbeständigkeit, eine erhöhte Bedeutung gewinnen. Dazu wird eine noch ausgedehntere Anwendung von Plastwerkstoffen kommen, als sie heute schon für bestimmte Teile moderner Flugzeuge besteht, wie z.B. für Radarhauben, Tragflügelteile und Verkleidungen. Durch Aufstellung großer Schmiedepressen von 75 000 bis 100 000 Mp (Megapond, bisher als Tonne bezeichnet) Preßkraft wird es möglich werden, größere Bauelemente aus dem Vollen zu schmieden, um dadurch höchste Festigkeit bei geringstem Gewicht und vor allem ein günstigeres Materialverhalten bei Dauerbeanspruchungen zu erhalten. Auch das chemische Abtragen wird durch Ausreifung des technologischen Verfahrens verbessert werden. Es kann damit zu einer umwälzenden Bedeutung für die spanabhebende Bearbeitung gelangen.

Größte Aufmerksamkeit wird man den Werkstoffen hinsichtlich ihres Verhaltens bei Überschallgeschwindigkeit und der damit verbundenen Aufheizung durch Staudruck und Reibungswärme schenken müssen. Bei Geschwindigkeiten von etwa 2000 km/h wächst die Temperatur an der Beplankung bereits auf 100 bis 130 °C

an, wobei die heute üblichen Aluminium-Legierungen schon einen erheblichen Festigkeitsabfall zeigen (Bild 1.9a). Bei 3000 km/h steigt die Temperatur bereits auf 400°C. Für Flugzeuge mit derartigen Geschwindigkeiten kommen nur Sinterwerkstoffe, Titanlegierungen oder warmfeste Stahllegierungen in Frage. Der aus Aluminium-Pulver hergestellte ASW (Aluminium-Sinter-Werkstoff) besitzt eine Bruchfestigkeit von 36 kp/mm². Titan weist als Leichtmetall eine Dichte von 4,5 kg/dm³ auf und erreicht je nach Legierung eine Bruchfestigkeit von 35 bis 130 kp/mm². Beide Werkstoffe sind in der Lage, Temperaturen von 450°C entsprechend einer Geschwindigkeit von etwa 3600 km/h ohne nennenswerten Festigkeitsabfall zu ertragen. Auch warmfeste Hochleistungsstähle, z. B. für die Konstruktion geschweißter Verbundplattenbauteile, werden Verwendung finden.

Zu Bild 1.9a ist ergänzend noch folgendes festzuhalten: Offensichtlich sind die Stahllegierungen rein festigkeitsmäßig über den ganzen Temperaturbereich hinweg den anderen genannten Legierungen überlegen. Da jedoch im Flugzeugbau das Gewicht des verwendeten Werkstoffs eine ebenso große Rolle wie seine Festigkeit spielt, müssen für die endgültige Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten eines Werkstoffs beide Faktoren berücksichtigt werden. Ein entsprechender GüteWert entsteht durch das Verhältnis der Festigkeit zur Dichte eines Werkstoffs, das in Bild 1.9b dargestellt ist. Das Diagramm zeigt deutlich

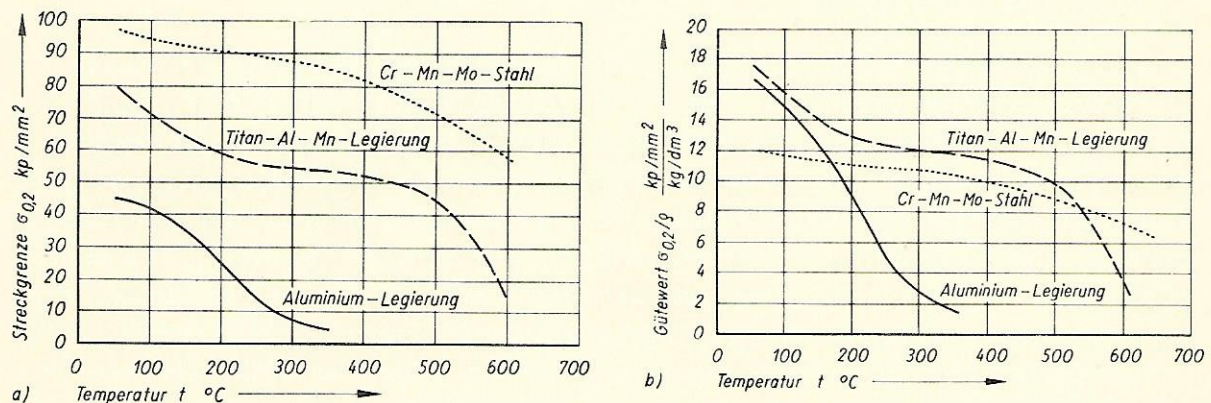


Bild 1.9 Festigkeitsverhalten wichtiger Luftfahrtwerkstoffe bei Temperaturänderungen

- a) ohne Berücksichtigung des Gewichtsaufwands
- b) unter Berücksichtigung des Gewichtsaufwands

den mit steigender Temperatur erfolgenden festigkeitsmäßigen Übergang von den Aluminium- über die Titan- bis zu den warmfesten Stahllegierungen. Die Titanlegierungen sind denen des Aluminiums zwar schon bei niedrigen Temperaturen überlegen, jedoch ist dieser Unterschied so gering, daß die letzteren bis etwa 150°C aus Gründen der Beschaffbarkeit und der Kosten vorzuziehen sind.

In der Weiterentwicklung des Flugzeugs ist auch der Bau von Senkrechtstartflugzeugen zu erwarten. Ihr großer Vorteil besteht darin, daß die großräumigen und teuren Flugplatzanlagen, die durch die hohen Start- und Landegeschwindigkeiten bedingt sind, fortfallen können. Es gibt bereits einige erfolgreich geflogene Versuchsmuster mit verschiedenen Antriebsanordnungen: Der sogenannte "Rotodyne" mit einem Rotor für Start und Landung sowie zwei Propellerturbi-

nen für den Horizontalflug ist eine Kombination aus Hubschrauber und Starrflügelflugzeug. Eine andere Lösung sieht Schwenkflügel vor, wobei die Tragflügel mit den Triebwerken bei Start und Landung ungefähr 90° um die Flugzeugquerachse gedreht werden. Eine weitere Konstruktion verwendet senkrecht nach unten gerichtete Abgasstrahlen von Gasturbinen. Schließlich ist noch der sogenannte Coleopter zu nennen, ein Ringflügelflugzeug, bei dem sich der Rumpf mit dem Antrieb und den Kabinen für Fluggäste und Besatzung innerhalb des ringförmigen Flügels befindet (Bild 1.10, Seite 3). Start und Landung erfolgen senkrecht auf kleinen Fahrwerksbeinen, während für den Horizontalflug der Coleopter um 90° gedreht wird. Die Sitze sind deswegen halbkardanisch aufgehängt.

Abschließend kann als Perspektive gesagt werden, daß auf Grund des heutigen technischen Entwicklungsstands des Flugzeugbaus für das Jahr 1965 Verkehrsflugzeuge mit Geschwindigkeiten bis 1600 km/h in 18000 m Höhe und für 1980 Verkehrsflugzeuge mit Geschwindigkeiten bis 2400 km/h in Höhen von 25000 bis 30000 m zu erwarten sind. Forschungsflugzeuge werden Geschwindigkeiten von mehr als Mach 5 erreichen. Bis dahin sind aber noch manche Probleme in bezug auf die Flugzeuggestaltung, den konstruktiven Aufbau im einzelnen, die verwendeten Werkstoffe und die Fertigungsverfahren zu lösen.

2 Baugruppen des Flugzeugs

Am Flugzeug unterscheidet man drei Hauptgruppen, und zwar die Zelle, das Triebwerk und die Ausrüstung. Im Rahmen dieser Abhandlung wird die Zelle in ihrem Aufbau betrachtet. Sie wird in Tragwerk, Rumpf, Leitwerk, Steuerung und Fahrwerk unterteilt. Zum Tragwerk gehören außer den Tragflügeln die Querruder und Landeklappen. Der Rumpf besteht aus dem Rumpfvorderteil, der den Führerraum und u. U. auch das Triebwerk enthält, dem Rumpfmittelteil, der die Fluggäste und die Fracht aufnimmt, und dem Rumpffende, an dem das Leitwerk befestigt ist. Das Leitwerk setzt sich aus dem horizontal liegenden Höhenleitwerk und dem vertikal stehenden Seitenleitwerk zusammen. Jedes Leitwerk besteht aus dem feststehenden Teil, der Flosse, und dem beweglichen Teil, dem Ruder. Zur Steuerung gehören die Steuergestänge und die Bedienelemente. Das Fahrwerk schließlich besteht bei Landflugzeugen aus dem Hauptfahrwerk, dem Bug- oder Heckrad und eventuellen Stützrädern (Bilder 2.1 und 2.2).

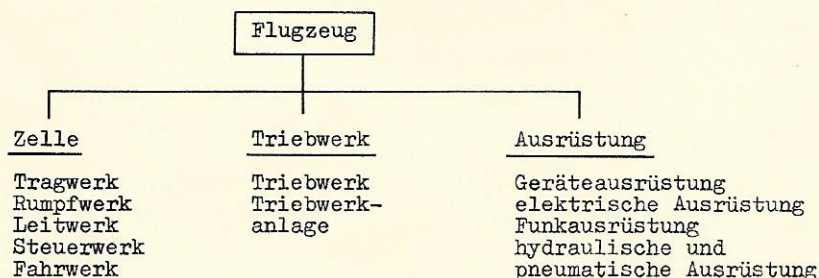


Bild 2.1 Baugruppen eines Motorflugzeugs

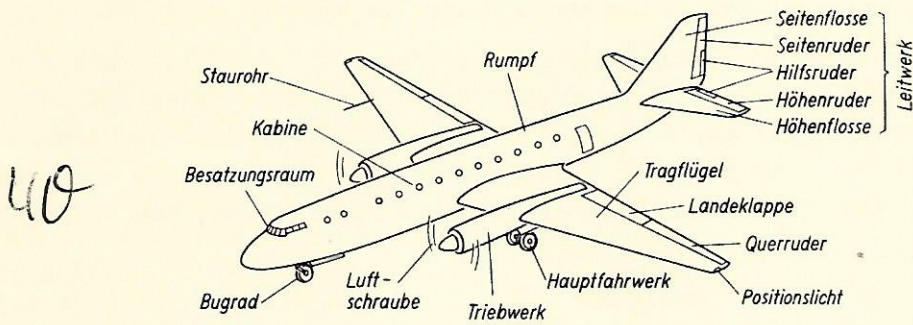


Bild 2.2 Die wichtigsten Bauteile eines Flugzeugs

3 Einteilung der Flugzeuge nach äußeren Merkmalen

Die Flugzeuge können nach verschiedenen äußeren Merkmalen klassifiziert werden, die durch einen bestimmten Verwendungszweck bedingt sind.

3.1 Anordnung der Tragflügel

Für die Anordnung der Tragflügel ist ihre Lage in bezug auf den Rumpf maßgeblich.

Bei einem **H o c h d e c k e r** ist der durchgehende Tragflügel auf einem Strebenbock, dem sogenannten "Baldachin", über dem Rumpf befestigt (Bild 3.1a). Diese Bauweise wendet man heute im allgemeinen nicht mehr an, da die Wirbelbildung der Luft zwischen Rumpf und Tragflügel einen zu großen, bei anderen Konstruktionen vermeidbaren Widerstand hervorruft.

Wachsen die Tragflügel aus der oberen Rumpfkante seitlich heraus, so spricht man von einem **S c h u l t e r d e c k e r** (Bild 3.1b). Diese Tragflügelanordnung wird heute noch bei Verkehrsflugzeugen angewandt, z. B. "152", An 8, An 10, Fokker F 27. Die Gründe hierfür sind die gute Sicht aus den Kabinenfenstern und die Möglichkeit, dem Rumpf einen geringen Bodenabstand zu geben. Das Beladen des Flugzeugs wird dadurch wesentlich erleichtert. Außerdem eignet sich diese Bauweise gut zum Aufhängen der Strahltriebwerke an Stielen unter den Tragflügeln, z. B. "152".

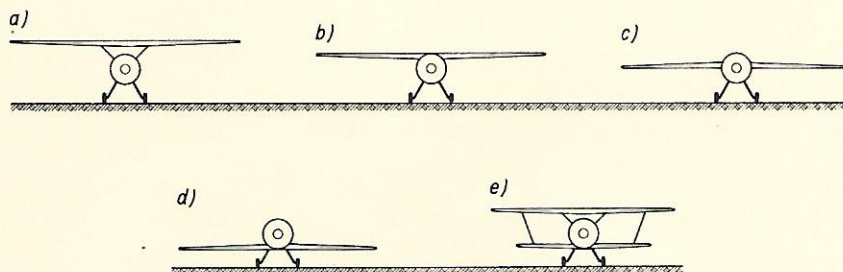


Bild 3.1 Tragflügelanordnungen

Sind die Tragflügel in der Mitte des Rumpfes befestigt, so bezeichnet man diese Anordnung als **M i t t e l d e c k e r** (Bild 3.1c). Heute wird

diese Bauweise im wesentlichen bei Jagdflugzeugen verwendet, z. B. Mig 15.

Die wohl am meisten bevorzugte Bauweise ist die des **Tiefdeckers** bei dem der Rumpf auf den Tragflügeln aufsitzt und auf ihnen befestigt ist (Bild 3.1d). Zum ersten Mal wurde diese Anordnung 1915 von Prof. Junkers angewandt. Sie bietet dem Rumpf Schutz bei Notlandungen. Außerdem ist eine gute Zugänglichkeit zu den in den Tragflügeln eingebauten Triebwerken, den Brennstoffbehältern usw. gewährleistet, z.B. IL 14.

Einen Sonderfall stellt der **Doppeldecker** dar, der sich in seiner Tragflügelanordnung aus einem Tief- und einem Hochdecker zusammensetzt (Bild 3.1e). Diese Bauweise wurde früher vor allem für Jagd- und Sportflugzeuge gewählt, da die geringe Spannweite eine Konzentration der Flugzeugmasse nahe dem Schwerpunkt gewährleistet, so daß für den Kurvenflug kleinste Radien möglich sind. Wegen des großen Widerstands wird diese Anordnung heute nicht mehr verwendet. Frühere Doppeldecker-Flugzeuge waren die Heinkel He 51, He 72, Gotha Go 145, Focke-Wulf FW 44 "Stieglitz", Bücker Bü 130 "Jungmeister" usw.

3.2 Anordnung der Triebwerke

Ein weiteres gutes Unterscheidungsmerkmal von Flugzeugen ist die Anordnung der Triebwerke.

Kolbentriebwerke

Bei einer einmotorigen Maschine befindet sich der Motor entweder in der Rumpfspitze oder, wenn es sich um eine Rumpfgondel handelt, im Rumpfende, wobei er dann eine Druckschraube antreibt (Bilder 3.2a und 3.2b).

Bei der zweimotorigen Ausführung sind die Motoren links und rechts in den Tragflügeln befestigt, z. B. IL 14 (Bild 3.2c). Früher wurde auch eine Tandemanordnung über den Flügeln verwendet, z. B. Do 18 (Bild 3.2d).

Bei dreimotorigen Flugzeugen befindet sich der mittlere Motor in der Rumpfspitze, die Seitenmotoren sind in den Flügeln angeordnet. Typischster Vertreter dieser Bauweise ist die bekannte Ju 52 (Bild 3.2e).

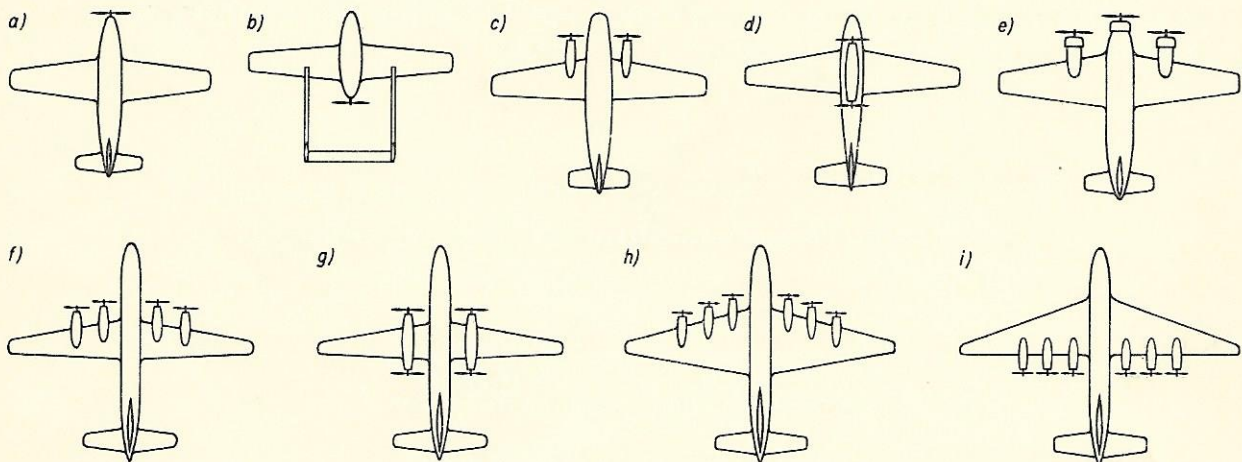


Bild 3.2 Triebwerkanordnungen bei Kolbentriebwerken

Bei der Verwendung von vier Motoren sitzen je zwei rechts und links vom Rumpf in den Tragflügeln oder befinden sich in Tandembauweise auf den Tragflügeln,

gegebenenfalls auch seitlich am Rumpf. Für die erstere Bauart sind die Ju 90 und FW 200, für die letztere die Do 26 als Beispiele zu nennen (Bilder 3.2f und 3.2g).

Bei sechsmotorigen Flugzeugen sind die Motoren zu je drei in einem Tragflügel entweder mit Zugschrauben vor dem Flügel oder mit Druckschrauben an der Flügelhinterkante angeordnet, z. B. Ju 390, Convair B 36 (Bilder 3.2h und 3.2i).

Strahltriebwerke

Flugzeuge, die mit einer Strahltriebmaschine ausgerüstet sind, tragen das Triebwerk im Rumpf eingebaut, z. B. Mig 15 (Bild 3.3a).

Besitzt eine Maschine zwei Triebwerke, so sind diese entweder seitlich in den Flügeln am Rumpf, an Stielen seitlich unter den Flügeln oder aber auch beiderseits am Rumpfe angeordnet, z. B. Tu 104, Douglas B 66, "Caravelle" (Bilder 3.3b bis d).

Bei vier Turbinen hängen die Triebwerke an Stielen zu je zwei unter den Tragflügeln, und zwar einzeln oder zu einer Doppelgondel zusammengefaßt, oder sie sind in die Flügel eingebaut, z. B. Boeing 707, "152", Tu 110 (Bilder 3.3e bis g).

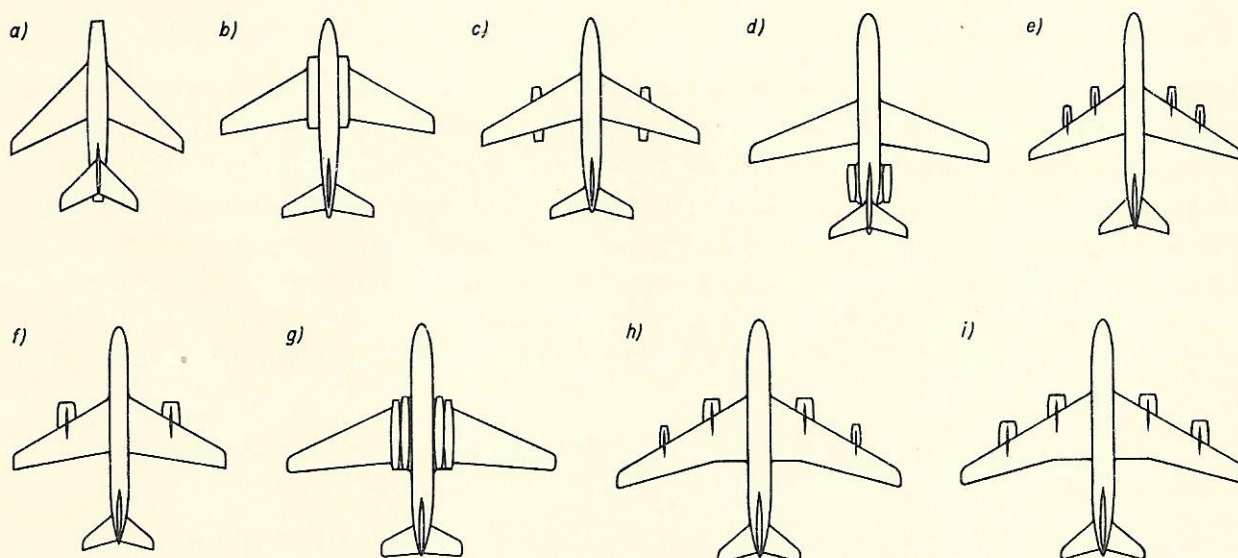


Bild 3.3 Triebwerkanordnungen bei Strahltriebwerken

Bei der Ausführung mit sechs Triebwerken besitzt die Boeing B 47 je zwei Doppelgondeln und je eine Einzelgondel an Stielen unter den Flügeln (Bild 3.3h).

Die Anordnung von acht Triebwerken erfolgt in je zwei Doppelgondeln an Stielen unter jedem Tragflügel, z.B. Boeing B 52 (Bild 3.3i).

3.3 Anordnung und Form des Rumpfes

Eine andere Möglichkeit, Flugzeuge nach äußeren Merkmalen zu unterscheiden, besteht in der Beurteilung der Rumpfanordnung bzw. Rumpfform.

Für Land- und Schwimmerflugzeuge wird fast durchweg die bekannte übliche Rumpfform verwendet (Bild 3.4a).

Die Ausbildung als Rumpfgondel, bei der an ihrem Ende entweder eine Druckschraube oder Schubdüsen angeordnet sind, bedingt Leitwerksträger, z. B. FW 189, de Havilland DH 110 (Bild 3.4b).

Ist der Rumpf als Bootskörper gestaltet und besitzt darüber hinaus noch ein Fahrwerk, so spricht man von einem Amphibium (Bild 3.4c).

Als Flugboot entspricht der Rumpf einem Schiffskörper, zum mindesten in seinem Unterwasserteil. Er besitzt daher eine Kielung und zum besseren Abheben aus dem Wasser eine oder zwei Stufen, z. B. Do X, BV 222 (Bild 3.4d).

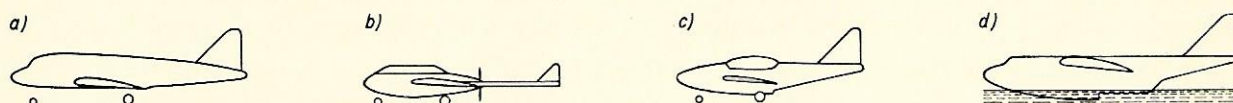


Bild 3.4 Rumpfbauarten

4 Aufbau des Tragflügels

4.1 Tragflügelformen

Untersucht man die geometrisch möglichen Umrißformen von Tragflügeln, so erkennt man eine Vielzahl von Konturen, die jeweils besondere aerodynamische Forderungen erfüllen. Die aerodynamisch, d.h. strömungsmäßig günstigste Umrißform im Unterschallbereich ist die *E l l i p s e* (Bild 4.1a). Da diese Tragflügelform aber fertigungstechnisch große Schwierigkeiten bereitet und einen erheblichen Fertigungsaufwand erfordert, wendet man diese Bauart nur selten und nur in wirtschaftlich vertretbaren Konstruktionen an. Bekannte Beispiele hierfür sind die früheren deutschen Heinkel-Verkehrsflugzeuge He 70 und He 111.

Alle anderen Tragflügelumrisse zeigen Kompromisse zwischen dieser aerodynamischen Idealform und geringstmöglichem Fertigungsaufwand.

Die *R e c h t e c k f o r m* ist konstruktiv und fertigungsmäßig die einfachste und billigste, besonders dann, wenn die Profildicke, also die Dicke des Flügels, gleichbleibend ist, da die Rippen, die die Querschnittsform ergeben, sämtlich gleich ausgeführt werden können. Lediglich der Randbogen am Flügelende wird leicht angerundet, um bessere Strömungsverhältnisse zu erhalten. Der Rechteckflügel, allerdings mit sehr dünnem Profil, hat sich im Überschallbereich als sehr günstig erwiesen (Bild 4.1b).

Eine Annäherung an den elliptischen Flügel ergibt der *T r a p e z u m - r i ß*, bei dem die Flügeltiefe, d.h. die Breite des Flügels in der Draufsicht, von der Flügelwurzel am Rumpf nach dem Flügelende zu allmählich abnimmt. Diese Form kann langgestreckt und schmal sein, wie sie von Segelflugzeugen her bekannt ist, wobei sich auch recht günstige Widerstandsverhältnisse ergeben (Bild 4.1c). Die kurze und breite Trapezform ist heute häufig bei Überschallflugzeugen üblich, z. B. Lockheed F 104 (Bild 4.1d).

Man kann die Annäherung an die Ellipse noch besser dadurch erreichen, daß die Umrißform des Flügels aus einem Rechteck und einem Trapez zusammengesetzt wird (Bild 4.1e). Fertigungstechnisch ist diese Bauform ebenfalls vorteilhaft, und es wird wirkungsgradmäßig eine günstige Kompromißlösung zur reinen Ellipse erzielt (Bild 4.1e).

Eine Abart der vorstehend beschriebenen Ausführung ergibt sich, wenn das Flügelmittelstück, z. B. zwischen zwei Motoren, mit der Vorderkante vor die anschließenden Außenflügel gezogen wird, z. B. English Electric "Canberra" (Bild 4.1f).

Eine nicht ganz reine Ellipsenform hat man dadurch erzielt, daß die Flügelvorderkante in einer elliptischen Kurve nach hinten gekrümmt ist, z. B. Dornier Do K, Do 13 (Bild 4.1g).

Für höhere Geschwindigkeiten hat sich der gepfeilte Flügel als vorteilhaft in bezug auf die Widerstands- und Strömungsverhältnisse erwiesen. So kennt man den sogenannten Dreieckflügel, bei dem die Vorderkante nach rückwärts gepfeilt ist. Es sind auch Dreieckflügel gebaut worden, bei denen die Vorderkante gerade verläuft und die Hinterkante zu einem Dreieck nach vorn geführt ist. Jedoch zählt man diese Ausführung wohl besser zu den Trapezflügeln, z. B. Ju 160, Handley Page "Hampden" (Bilder 4.1h und 4.1i).

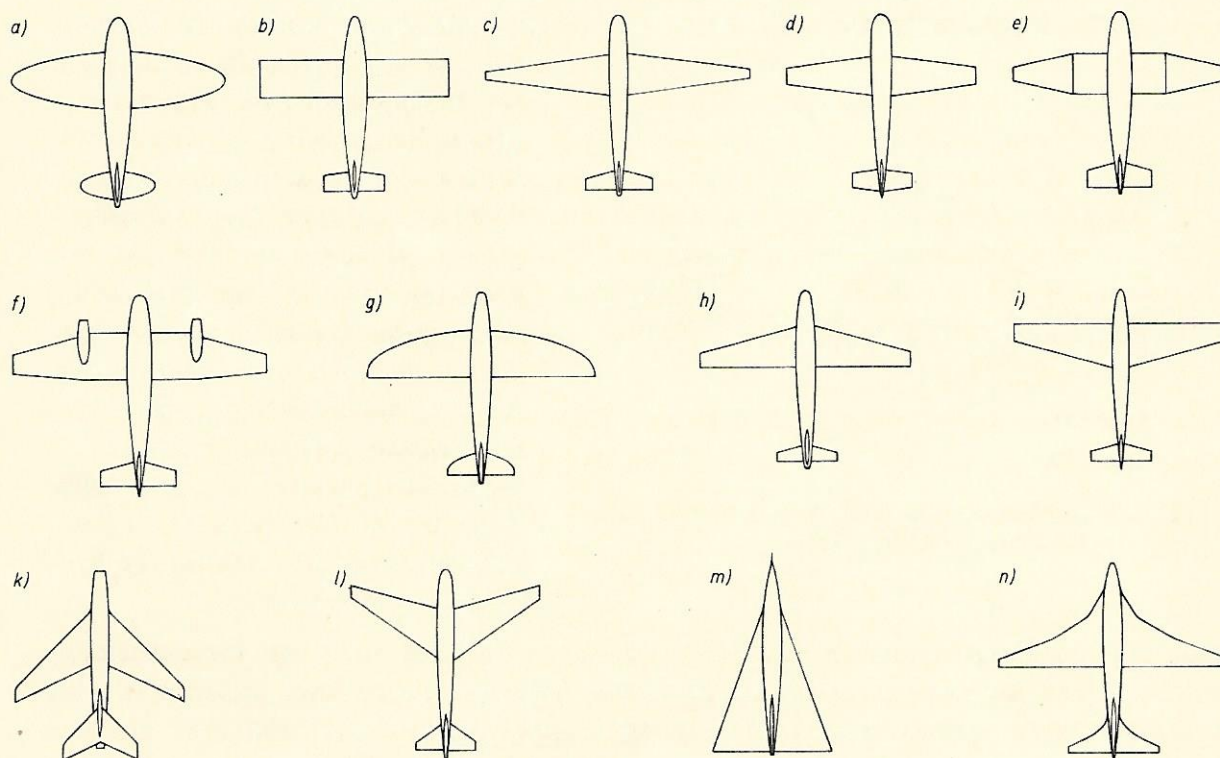


Bild 4.1 Tragflügelumrißformen

Der reine Pfeilflügel ist besonders nahe der Schallgeschwindigkeit von Vorteil, da nur mit ihm diese hohe Geschwindigkeit bei erträglicher Widerstandserhöhung erreicht werden kann. Man baut Pfeilflügel mit einer Pfeilung von 20° bis 60° , z. B. "152", Tu 104 (Bild 4.1k). Einen Sonderfall

stellt die negative Pfeilung dar, bei der die Flügelenden nach vorn geführt werden. Diese Ausführung ist jedoch bisher nur einmal bei der Ju 287, und zwar aus Stabilitätsgründen gebaut worden (Bild 4.1l).

Die Weiterentwicklung des Pfeilflügels führt zum reinen Dreieckflügel eines schwanzlosen Flugzeugs, auch *Deltaflügel* genannt. Er wird besonders bei Überschallflugzeugen hoher Leistung angewandt, z. B. Fairey Delta 2, Convair F 102, Convair B 58 (Bild 4.1m).

Eine Abwandlung des Pfeilflügels bildet der sogenannte *Sichelflügel*, dessen Vorderkante sich aus Teilen verschiedener Pfeilwinkel zusammensetzt, und zwar dergestalt, daß der Pfeilwinkel nach dem Flügelende zu immer flacher wird, z. B. Handley Page "Victor", Vickers "Valiant" (Bild 4.1n).

Außer den beschriebenen Grundformen der Tragflügelumrisse gibt es noch eine ganze Anzahl von Abwandlungen, auf die jedoch hier nicht eingegangen werden soll.

4.2 Aerodynamische Betrachtung

Die Tragflügel stellen den Teil des Flugzeugs dar, der ihm ermöglicht, sich in die Luft zu erheben und sich auch dort zu halten.

Betrachtet man den Querschnitt eines Tragflügels, so erkennt man die hierfür typische Profilform (Bild 4.2). Wird der Flügel von einem Luftstrom angeblasen,

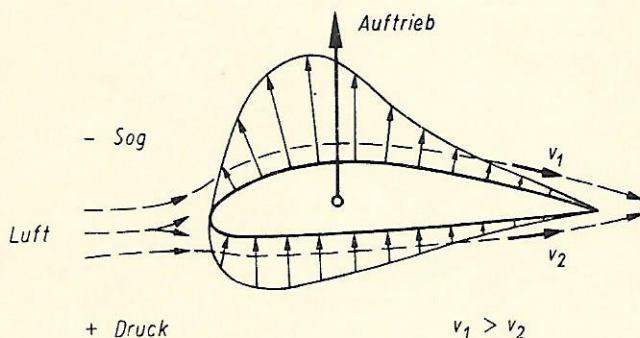


Bild 4.2 Luftströmung und Druckverteilung am Tragflügelprofil

so spaltet sich dieser an der Flügelnase auf. Ein Teil strömt über die Oberseite, der andere über die Unterseite des Profils, um sich dann am Ende wieder zu vereinen. Infolge der größeren Wölbung der Oberseite haben aber die dort vorbeiströmenden Luftteilchen einen längeren Weg zurückzulegen und müssen sich daher zwangsläufig auch schneller bewegen als die Luftteilchen an der Unterseite, um gleichzeitig mit diesen am Profilende einzutreffen.

Nach den Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre besteht aber ein Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem statischen bzw. Ruhedruck eines Mediums. Beide Größen verändern sich im entgegengesetzten Verhältnis zueinander, d.h., mit steigender Geschwindigkeit nimmt der statische Druck ab und umgekehrt (Genauerer siehe in Physikbüchern unter "Mechanik strömender Flüssigkeiten und Gase"). Für die Umströmung des Profils bedeutet das an der Oberfläche eine Druckverminderung gegenüber der Unterseite, so daß als Resultierende aller Einzeldrücke und unter Berücksichtigung der Flügelgrundfläche eine aufwärts gerichtete Kraft entsteht, nämlich der Auftrieb (Bild 4.2). Dieser Auftrieb hebt die Tragflügel und damit das ganze Flugzeug vom Boden ab und hält es in der Luft.

Die Voraussetzung für die Auftriebsentstehung ist, wie gezeigt wurde, die Umströmung des Profils. Die hierzu notwendige Relativgeschwindigkeit der Tragflügel gegenüber der Luft wird im allgemeinen durch einen motorischen Antrieb hervorgerufen. Dieser beschleunigt das Flugzeug beim Start, bis der zum Abheben notwendige Auftrieb erreicht wird, und sorgt dann auch in der Luft für den erforderlichen Vortrieb. Segelflugzeuge können daher nicht aus eigener Kraft starten, während der Vortrieb im Flug durch eine schräg nach vorn gerichtete Komponente der Schwerkraft erzeugt wird.

Jedes Profil stellt eine exakt rechnerisch ermittelte geometrische Figur dar. Die wichtigsten Größen zur Kennzeichnung eines Profils sind einmal die Profiltiefe l , die größte Dicke d , der Nasenradius r und die Wölbungshöhe f (Bild 4.3). Alle diese Größen werden in Prozent der Profiltiefe l ausgedrückt, um die jeweilige Umrechnung zu erleichtern. So spricht man z. B. von einem Profil mit der Dicke 10,5 Prozent und meint damit, daß die größte Profildicke 10,5 Prozent der Tiefe l beträgt. Bei einer Profiltiefe von 1000 mm sind das 105 mm Dicke.

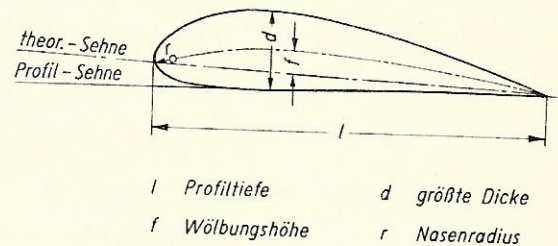


Bild 4.3 Bezeichnungen am Profil

Ein Profil kann symmetrisch (Wölbungshöhe ist gleich Null) oder unsymmetrisch sein. Bei einem symmetrischen Profil sind die beiden Hälften ober- und unterhalb der Mittellinie spiegelbildlich gleich, während bei einem unsymmetrischen die Oberseite stärker gewölbt ist als die Unterseite (Bild 4.4).

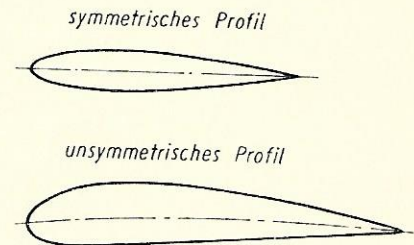


Bild 4.4 Profilformen (symmetrisch und unsymmetrisch)

Zur aerodynamischen Beurteilung eines Profils verwendet man das Polardiagramm. Es enthält eine Kennlinie, aus der man die im Windkanal festgestellten Auftriebsbeiwerte c_a und Widerstandsbeiwerte c_w für bestimmte Anstellwinkel des Profils ablesen kann und woraus sich die Größen des Auftriebs und des Widerstands ergeben (Bild 4.5). In Luftfahrtforschungszentren sind eine große Anzahl von Profilen untersucht, die für die aerodynamische Charakteristik wichtigen Werte ermittelt und die Ergebnisse in Profilkatalogen zusammengefaßt worden. Für jedes Flugzeug wird das für den geplanten Verwendungszweck und die gestellten Bedingungen im Hinblick auf das Leistungsvermögen günstigste Profil ausgewählt. So hat man zwischen zwei Extremen der Profilform, nämlich dem dicken, stark gewölbten Profil mit großem Auftrieb bei

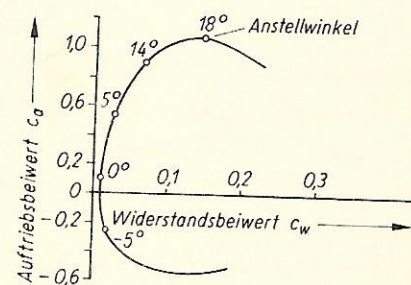


Bild 4.5 Polardiagramm

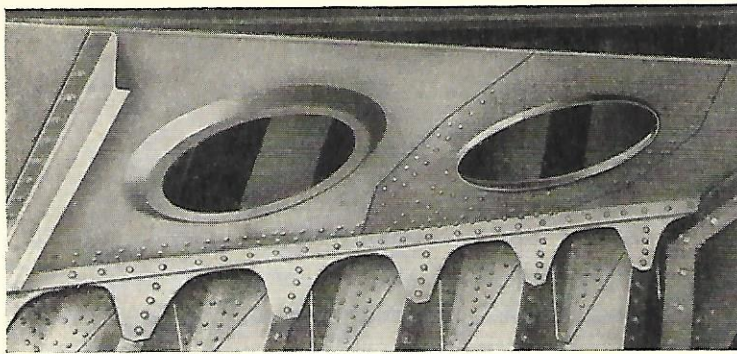


Bild 4.37 Lochbördel im Querverband eines Tragflügels

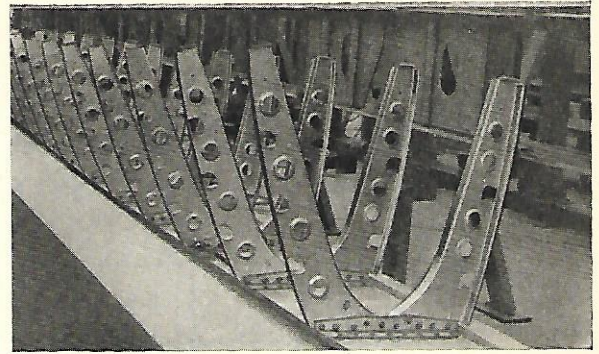


Bild 4.38 Durch Lochbördel versteifte Nasenkasten-Rippen



Bild 4.41

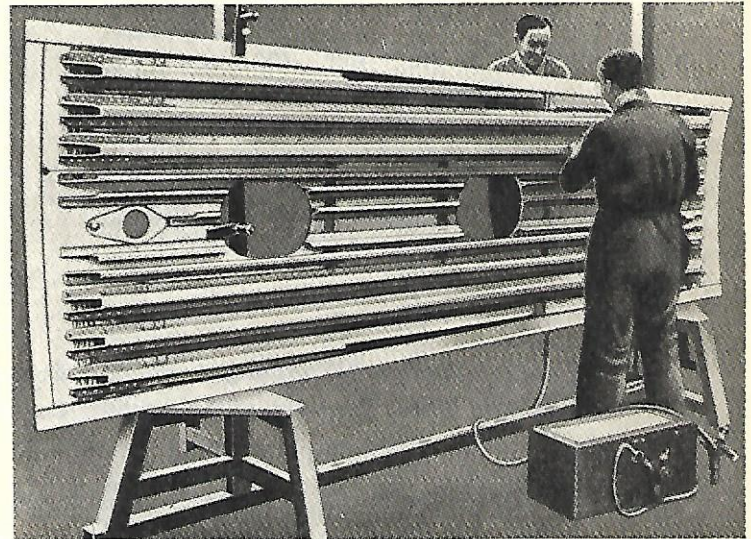


Bild 4.47

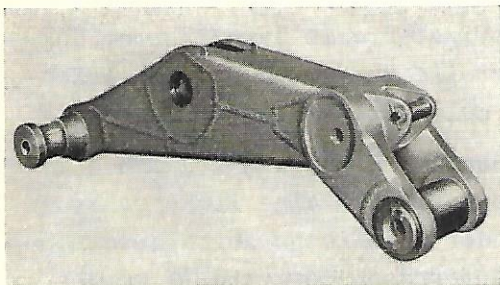


Bild 4.41 Faltenbildung in der Beplankung

Bild 4.47 Geklebte Tragflügelschale

Bild 4.48 Geschweißtes Fahrwerksbauteil

Bild 4.48

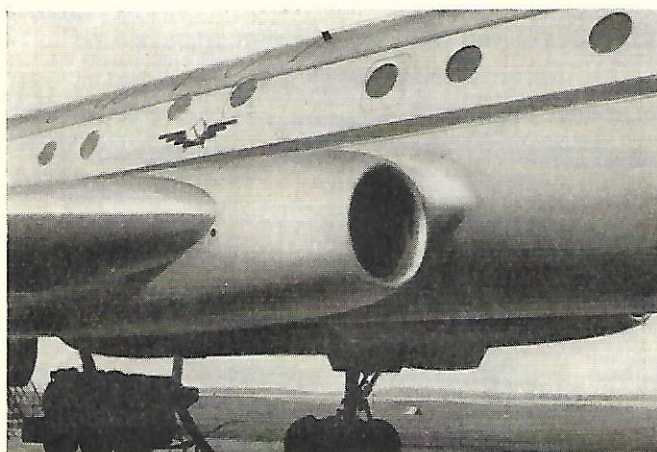


Bild 4.52 Triebwerkeinbau in den Tragflügel der Tu 104

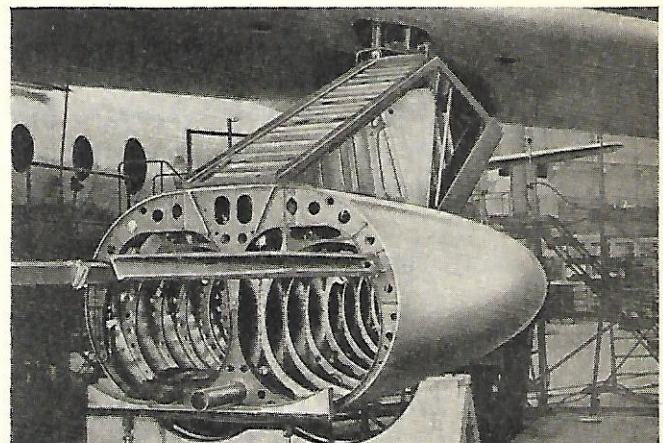


Bild 4.54 Triebwerks-Zwillingsgondel am Stiel unterhalb des Tragflügels

geringer Geschwindigkeit und dem extrem dünnen, beinahe symmetrischen Profil, das einen entsprechenden Auftrieb nur bei hoher, bei Schall- oder Überschallgeschwindigkeit ergibt, eine große Anzahl verschiedener Zwischenprofile zur Verfügung.

Ein für den Flugzeugbauer noch besonders bemerkenswertes Profil ist das sogenannte *L a m i n a r p r o f i l*. Seine Dickenrücklage, d.h. die Lage der größten Dicke des Profils von der Flügelnase aus gesehen, ist sehr weit nach hinten verschoben. Diese Form hat außer gewissen aerodynamischen Vorteilen vor allem den, daß sich die Bauhöhe des Tragflügels nach der Hinterkante zu vergrößert. In bezug auf die Fertigung und die Zugängigkeit bringt das große Erleichterungen (Bild 4.6).



Bild 4.6 Laminarprofil

Die Bedeutung des Tragflügelprofils für den Flugvorgang, seine exakte Berechnung und Auswahl fordert aber zugleich größte Sorgfalt und Genauigkeit bei der Herstellung.

4.3 Beanspruchungen des Tragflügels

Um einen Tragflügel dimensionieren zu können, müssen zunächst die auf einen Flügel wirkenden Kräfte festgelegt werden. Dafür bestehen in allen Ländern besondere Bauvorschriften. Man unterscheidet für die Beanspruchung eines Tragflügels folgende Belastungsfälle (gekürzt):

1. Belastung durch Luftkräfte:
Sturzflug,
Abfangen,
Böenangriff;
2. Belastung durch Bodenkräfte:
Landen,
Rollen und Schleppen;
3. Belastung durch Hand-, Fuß-, Maschinen- und andere Kräfte:
Kräfte an Steuerungsteilen,
Hissen und Aufbocken,
Schneelasten.

Bei einem Tragflügel müssen sich für einen bestimmten Beanspruchungszustand alle wirkenden Kräfte im Gleichgewicht befinden. Diese Kräfte entsprechen einer maximal erlaubten Belastung im jeweiligen Flugzustand. Von dieser "sicheren Belastung" bis zum Bruch des Flügels schreiben die Bauvorschriften noch einen Abstand vor, der durch die Sicherheitszahl j ausgedrückt wird. Der Abstand bewegt sich zwischen $j = 1,5$ bis $j = 2$. Das heißt z. B. für $j = 1,8$, daß erst bei 1,8facher sicherer Last die Festigkeit der Konstruktion bis zur Bruchgrenze ausgenutzt sein darf. Für lebenswichtige Anschlüsse, z. B. Rumpf-Tragflügelverbindungen, Ruderlagerungen usw., werden weitere Sicherheitszuschläge von 20 bis 30 Prozent eingesetzt.

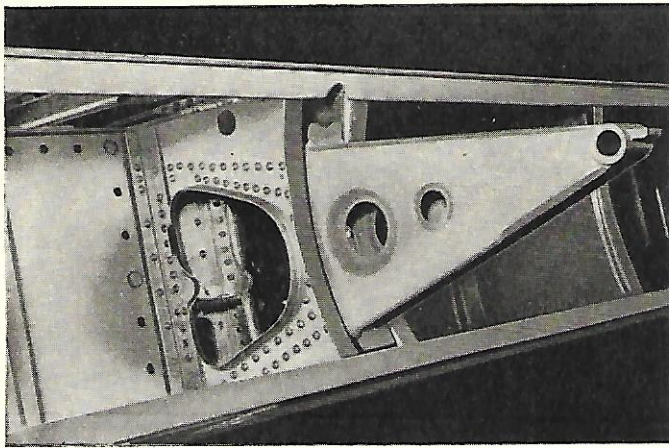


Bild 4.61 Lagerrippe für Querruder

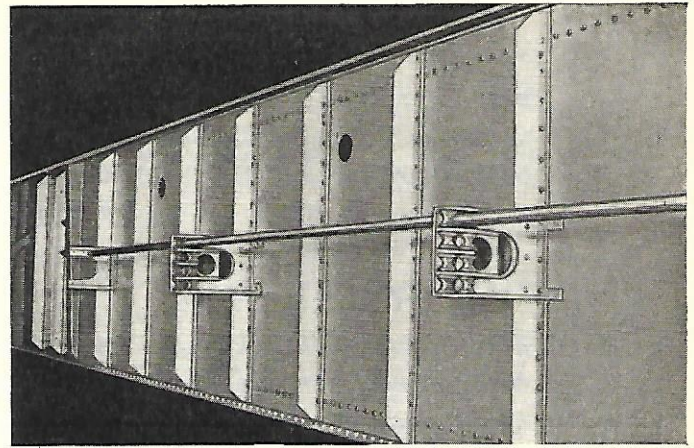


Bild 4.64 Steuergestänge am Tragflügelträger

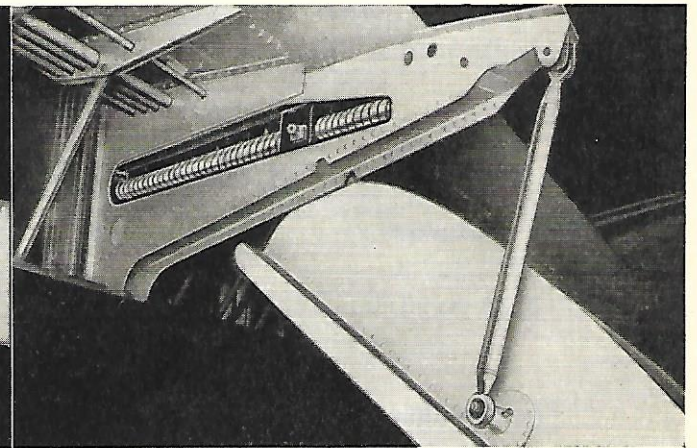
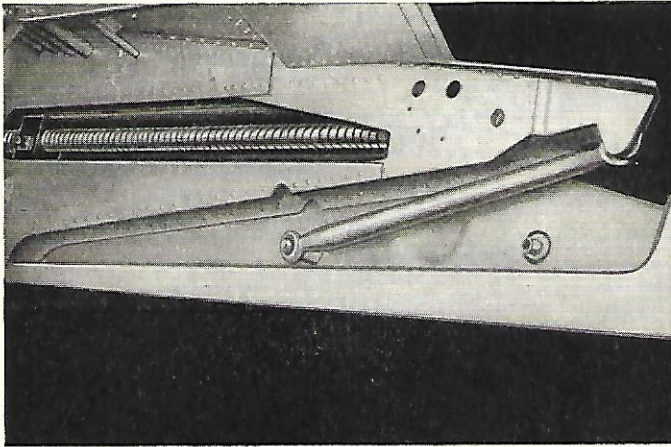
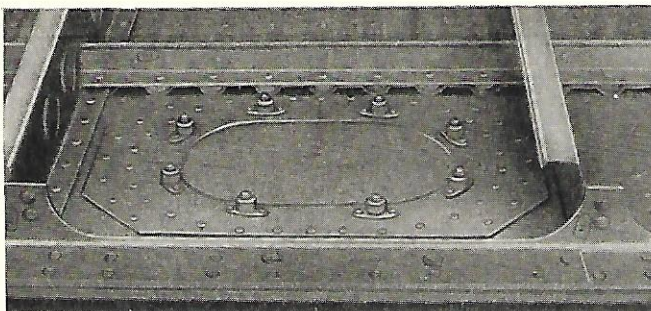


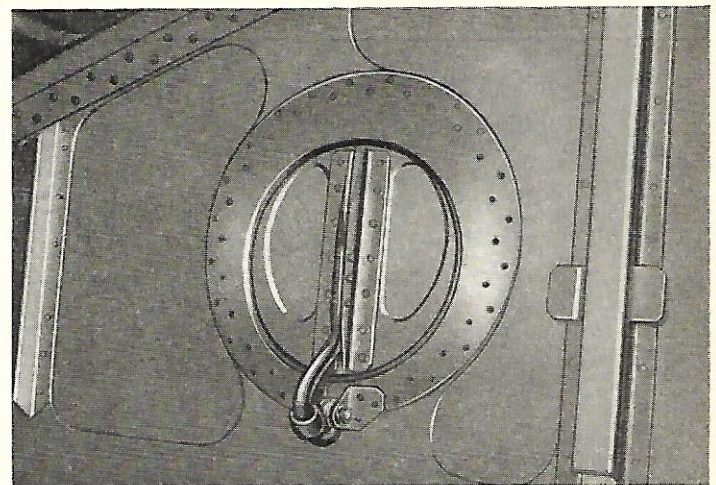
Bild 4.63 Landeklappen-Lagerung

a) eingefahren b) ausgefahren



△ Bild 4.71 Verschraubter Deckel im Tragflügelnasenkasten

▷ Bild 4.72 Handlochdeckel



Der Tragflügel wird vor allem durch den Auftrieb und den Widerstand belastet (Bild 4.7). Unter bzw. innerhalb des Flügels angebrachte Lasten wie Triebwerk, Fahrwerk, Kraftstoffbehälter mit Inhalt sowie das Eigengewicht des Flü-

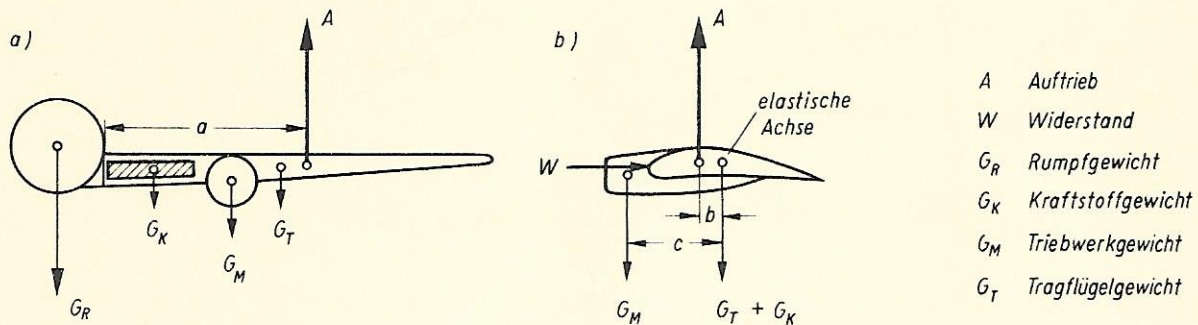


Bild 4.7 Kräfte am Tragflügel

gels wirken dem Auftrieb entgegen. Im Flug entlasten sie somit den Flügel. Die Kräftedifferenz $A - (G_M + G_K + G_T)$ muß vom Tragflügel in den Rumpf übergeleitet werden, da dessen Gewicht G_R die wesentlichste Gegenkraft für den Auftrieb bildet. Im Endergebnis müssen sich alle am Flugzeug wirkenden Luft- und Massenkräfte das Gleichgewicht halten.

Aus den Belastungsfällen ergeben sich für den Tragflügel als Hauptbeanspruchungen Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente. Am stärksten wird der Tragflügel durch das Biegemoment $M_b = A \cdot a$ beansprucht. Dadurch entstehen auf der Flügelober- und -unterseite Druck- bzw. Zugspannungen. Eine weitere Biegung, und zwar in der horizontalen Ebene, erfährt der Flügel noch durch den Widerstand W . Eine Torsionsbeanspruchung ergibt sich nach Bild 4.7b vor allem dadurch, daß der Auftrieb A vor der elastischen Achse des Tragflügels angreift und somit ein Drehmoment $M_d = A \cdot b$ hervorruft. Ebenso wird der Flügel bei Querruderausschlag um die elastische Achse verdreht.

Alle genannten Kräfte und Momente müssen am Flügelanschluß in den Rumpf eingeleitet werden.

Bei einem Zweiholmer nehmen die Holmanschlüsse Querkraft, Torsion und Biegung auf (Bild 4.8a). Bei einem Schalenflügel wird die Querkraft über Anschlüsse am Vorder- und Hintersteg durch Paßschrauben auf den Rumpfanschluß übertragen. Die durch die Torsion erzeugten Schubkräfte werden von einer Anzahl Schubbuchsen in der Ober- und Unterschale aufgenommen. Die sich aus der Biegung ergebenden Längskräfte werden über Dehnschrauben auf den Rumpf übertragen, wobei eine derartige Schraube z. B. bei der "152" (M 30 x 1,5) bis zu 27 Mp sichere Last oder 48 Mp Bruchlast übertragen muß.

Um eine Vorstellung von der Größe der insgesamt an einem Tragflügel wirkenden Kräfte zu erhalten, sei angegeben, daß jeder Schalenanschluß der "152" etwa 300 Mp sichere Last aufnehmen muß. Allein die starke Beanspruchung infolge Biegung wird dadurch deutlich, daß sich die Flügelenden im Flug bis zu 70 cm durchbiegen können.

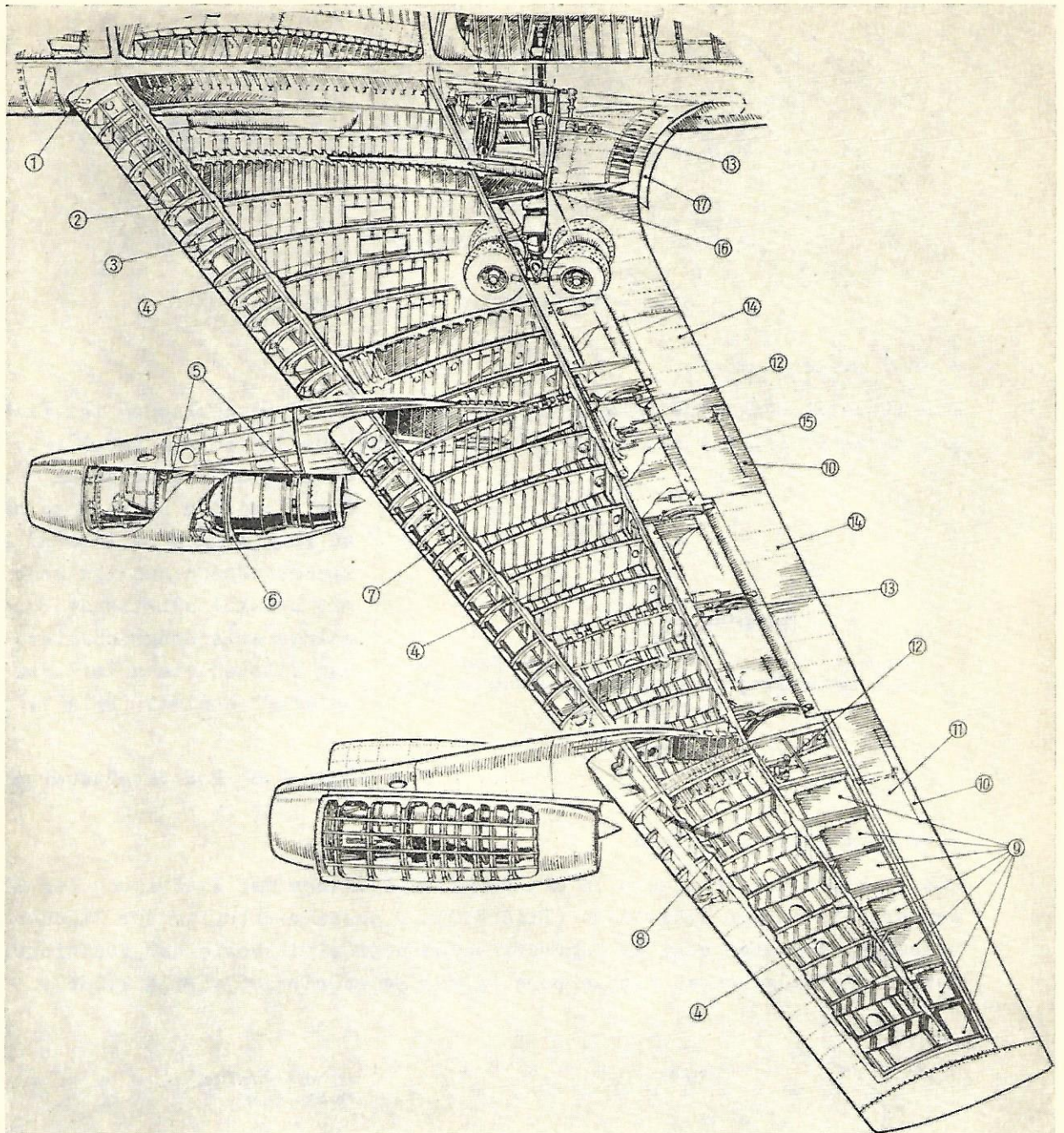
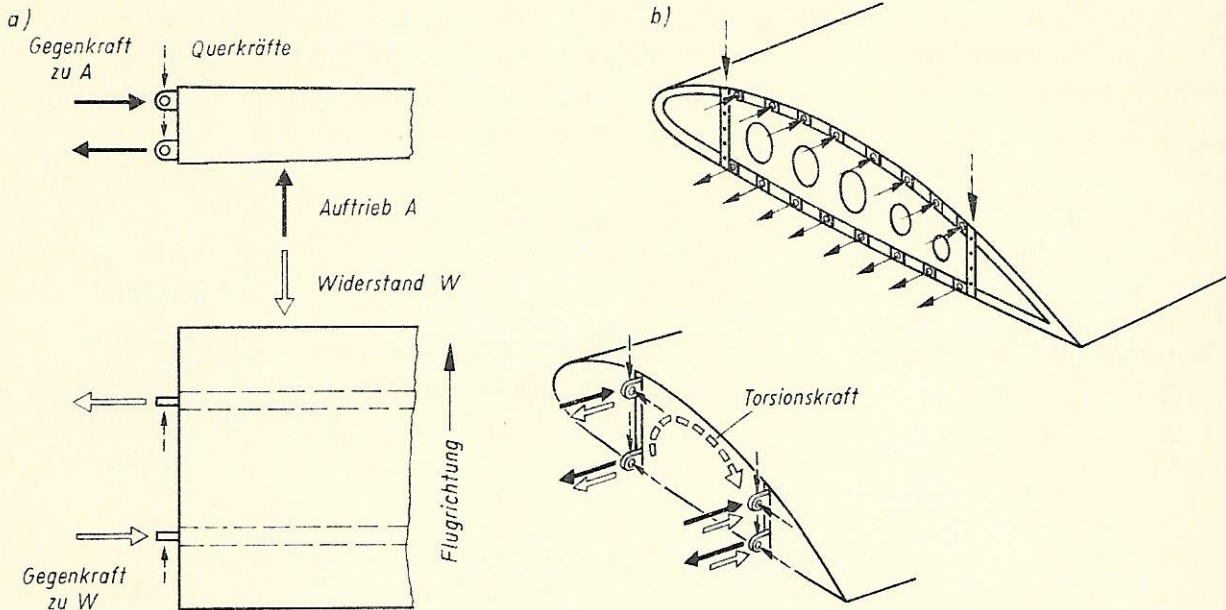


Bild 4.73 Gesamtaufbau des Tragflügels eines modernen Strahltriebwerks-Verkehrsflugzeugs
Schalenflügel mit Integral-Kraftstoffbehältern

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1 Trennstelle Rumpf - Tragflügel | 10 Hilfsrudder |
| 2 Träger | 11 Querruder für Langsamflug |
| 3 Querverband | 12 Quer- und Hilfsrudderantrieb |
| 4 Integral-Kraftstoffbehälter | 13 Klappenantrieb |
| 5 Triebwerksaufhängung | 14 Doppelspaltklappe |
| 6 Brandschott | 15 Querruder für Schnellflug |
| 7 Heißluftenteisung | 16 Grenzschichtzaun |
| 8 Versteifungsprofile der Beplankung | 17 Spreizklappe |
| 9 Querruder-Massenausgleich | |



~~Bild 4.8~~ Kräfte am Tragflügelanschluss

- a) Holmflügel
b) Schalenflügel

Ein wesentliches Moment für eine schnelle Beurteilung von Tragflügelbeanspruchungen stellt die sogenannte Flächenbelastung dar, die das Verhältnis des Fluggewichts zur Flügelfläche angibt. Bild 4.9 zeigt die Flächenbelastungen einiger Flugzeugtypen.

Flugzeug	Jahr	V km/h	Flächenbelastung kg/m ²
Ju 52	1934	230	95
Super-Constellation	1954	520	412
IL 18	1957	650	410
Tu 104 A	1957	850	430
Boeing 707	1958	940	495

Bild 4.9 Flächenbelastung einiger Flugzeugtypen
(von 1934 bis 1958)

Daraus ergibt sich, daß ein Flugzeug mit einer höheren Flächenbelastung einen im Verhältnis zum Gesamtgewicht kleineren Tragflügel besitzen wird. Um aber trotzdem einen ausreichenden Auftrieb zu erhalten, ist eine größere Fluggeschwindigkeit erforderlich. Somit bedingt eine steigende Flächenbelastung auch eine wachsende Fluggeschwindigkeit.

Weiterhin kann festgestellt werden, daß sich kleinere Tragflügel erzielen lassen, wenn man höhere Flächenbelastungen in Kauf nimmt. Umgekehrt betrachtet, kommt man auch zu der Schlußfolgerung, daß hohe Fluggeschwindigkeiten kleine Tragflügelabmessungen erlauben. Die Überschalljäger und Hochgeschwindigkeits-Versuchsflugzeuge sind ein Beweis dafür.

4.413 Schalenbauweise

Bei dieser Konstruktion wird als besonderes Merkmal die bisher nur formgebende Beplankung weitestgehend zur Aufnahme der Kräfte mit herangezogen. Dies gilt im wesentlichen jedoch nur für Metallflugzeuge. Die bisher verhältnismäßig dünnen Hautbleche müssen natürlicherweise dicker und auch versteift werden. Derartige Bauteile aus Hautblechen und Versteifungen können die Beanspruchungen aus der Biegung und Torsion des Tragflügels aufnehmen und werden als Schalen bezeichnet.

Ein Tragflügel in Schalenbauweise setzt sich aus der Oberschale, der Unterschale, den sogenannten Querverbänden, die die Profilform ergeben, dem Nasenkasten und dem Endkasten zusammen (Bilder 4.13 und 4.14 sowie Bild 4.15, Seite 25). Diese Bauweise zeichnet sich vor allem durch große Steifigkeit und Festigkeit

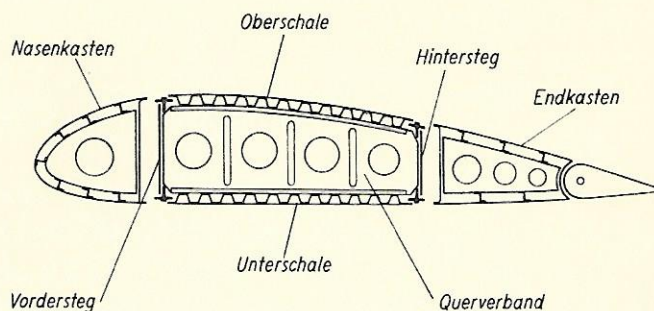


Bild 4.13 Querschnitt eines Schalenflügels

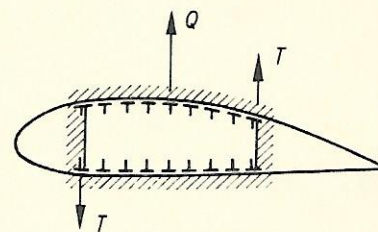
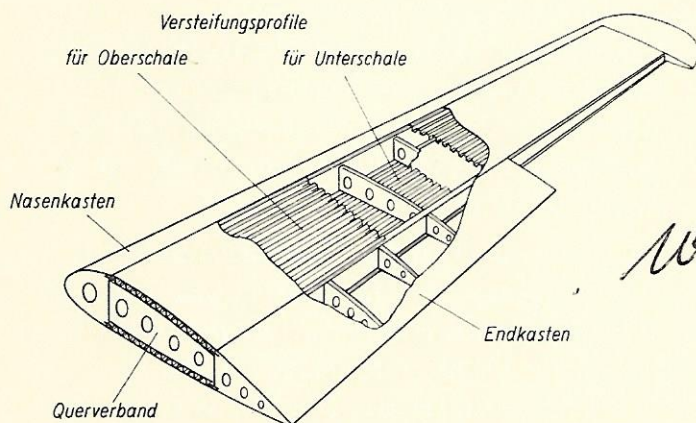


Bild 4.16 Torsionsröhre eines Schalenflügels
T Torsionskraft
Q Querkraft

Bild 4.14 Tragflügel in Schalenbauweise

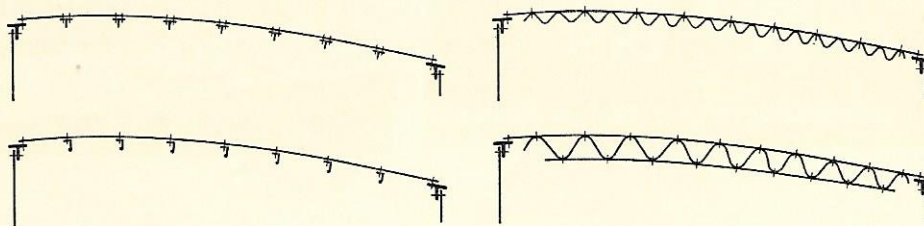
bei hohen Beanspruchungen aus. Die beiden Stege bilden mit der Ober- und Unterschale eine geschlossene Röhre, die neben den Biege- und Querkraften auch die Torsionskräfte aufnimmt (Bild 4.16 und Bild 4.17, Seite 25).

Weitere große Vorteile der Schalenbauweise, die sich insbesondere durch den Fortfall vieler Einzelteile ergeben, sind gutes aerodynamisches Verhalten, geringes Gewicht und einfache Fertigung.

A u f g e l ö s t e S c h a l e n b a u w e i s e

Die Schale besteht aus dem glatten Hautblech, das durch aufgenietete Profile versteift ist. Sie ist demnach in mehrere Einzelteile aufgelöst, die miteinander verbunden werden müssen. Bild 4.18 und Bild 4.19 (Seite 25) zeigen verschiedene Ausführungsformen von Tragflügelschalen in aufgelöster Bauweise.

Nachteilig ist, daß sehr viele Niete erforderlich sind. Darunter leidet die Oberflächengüte. Auch bereitet die häufig gewünschte dichte Ausführung für



~~Bild 4.18~~ Ausführungsformen von Tragflügelschalen in aufgelöster Bauweise

die Unterbringung des Kraftstoffs in den Tragflügeln ohne besondere Behälter Schwierigkeiten. Einen Ausweg konnte das Metallkleben bringen, indem die Versteifungsprofile nicht mehr aufgenietet sondern aufgeklebt werden. Dieses Verfahren steht aber erst am Anfang seiner Entwicklung.

I n t e g r a l b a u w e i s e

Bei noch gesteigerten Geschwindigkeiten ergeben sich auch höhere Beanspruchungen des Flugzeugs. Hierbei können aber die aufgelösten Schalen den aerodynamischen Bedingungen hinsichtlich der Oberflächengüte und Konturgenauigkeit nicht mehr genügen. In konsequenter Weiterentwicklung gelangte man daher zur Integralbauweise.

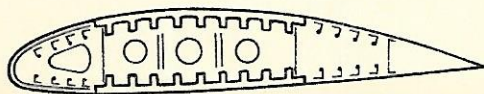
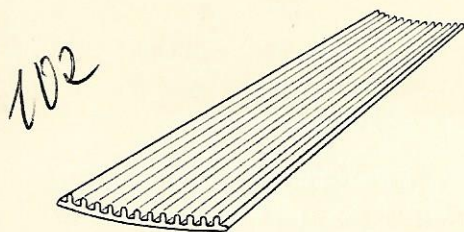
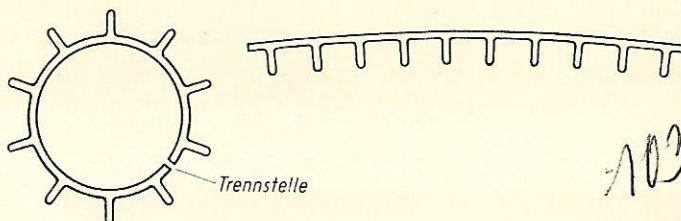


Bild 4.20 Querschnitt eines Integralflügels

Auch sie stellt eine Schalenbauweise dar, jedoch werden bei ihr die in der aufgelösten Schalenkonstruktion aufgenieteten Profile zusammen mit der Beplankung aus einem Stück gefertigt (Bild 4.20). Aus großen, dicken Platten werden die längsversteifenden Profilstege aus dem Vollen heraus gearbeitet, wobei die Hautdicke stehenbleibt (Bild 4.21).



~~Bild 4.21~~ Integralschale



~~Bild 4.22~~ Herstellung einer Integralschale aus einem Strangpreßprofil

Bei einer spanlosen Formung wird ein Rohr gepreßt, das außen über seine ganze Länge die entsprechenden Stege besitzt. Dieser Rohrkörper wird dann aufgeschnitten und in die gewünschte Schalenform gebogen (Bild 4.22). Es können auch ganze Teilschalen gepreßt und dann zusammengesetzt werden.

grenzt (der Bitterfelder Katalog umfaßt gegen 3000 Stück). Zum Unterschied zu den runden Biegekanten der Blechprofile können die Preßprofile scharfe Kanten besitzen, die oft eine günstigere Konstruktion zulassen, wie z. B. eine bessere Ausnutzung des Nietabstands. Preßprofile werden im Tragflügel besonders für die Versteifungsprofile der Schalen und für die Gurte der Träger oder Holme verwendet.

Durch Zusammensetzen verschiedener Profile erhält man Bauelemente, wie Träger, Rippen oder Querverbände.

4.422 Träger

Je nach konstruktiver Forderung lassen sich die verschiedensten Trägerformen zusammensetzen. Zwei U-Profile und zwei Stegbleche ergeben z. B. einen sogenannten Hohlkastenträger (Bild 4.28a). Sehr häufig werden I-Träger verwendet, da sie den günstigsten Querschnitt für Biegeträger ergeben. Sie werden durch Verbinden von Blechprofilen oder zweier T-Profile mit einem Stegblech hergestellt, wobei das Stegblech meistens durch aufgenietete Profile gegen Ausknicken versteift wird (Bilder 4.28b und 4.28c).

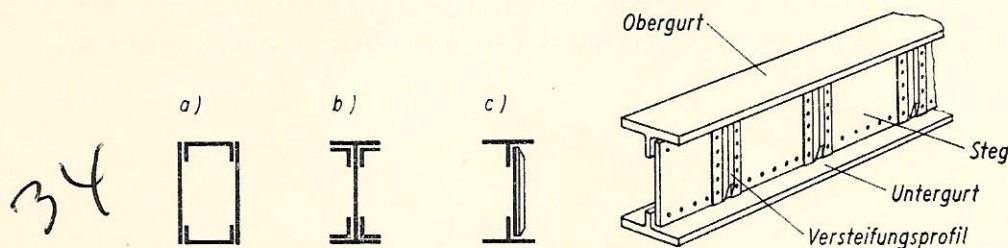


Bild 4.28 Trägerquerschnitte

4.423 Rippen und Querverbände

Die Rippen und Querverbände sind zu einem großen Teil aus Profilen hergestellt. Ihr etwas unterschiedlicher Aufbau ergibt sich aus ihren verschiedenen Funktionen.

Bei der Fachwerkbauweise bilden die Rippen mit den Trägern (Holmen) und Diagonalauskreuzungen (Stahldrähte) einen verdrehungssteifen Fachwerkkörper, der alle Kräfte aufnimmt. Außerdem geben sie der Außenhaut die notwendige aerodynamische Form.

Die Holmbauweise zeigt einen ähnlichen Aufbau, jedoch nimmt die Haut bereits einen Teil der Kräfte auf, und zwar den Torsionsschub. Diese Kräfte werden über die Rippen auf die Holme übertragen.

Bei der Schalenbauweise sind nur noch Querverbände erforderlich, die die Oberschale gegenüber der Unterschale abstützen und somit zur Einhaltung der Profilform dienen.

Die Bilder 4.29 bis 4.32 (Bilder 4.31 und 4.32 auf Seite 25) zeigen Bauformen von Rippen und Querverbänden sowie deren Verbindungsmöglichkeiten mit den Trägern.

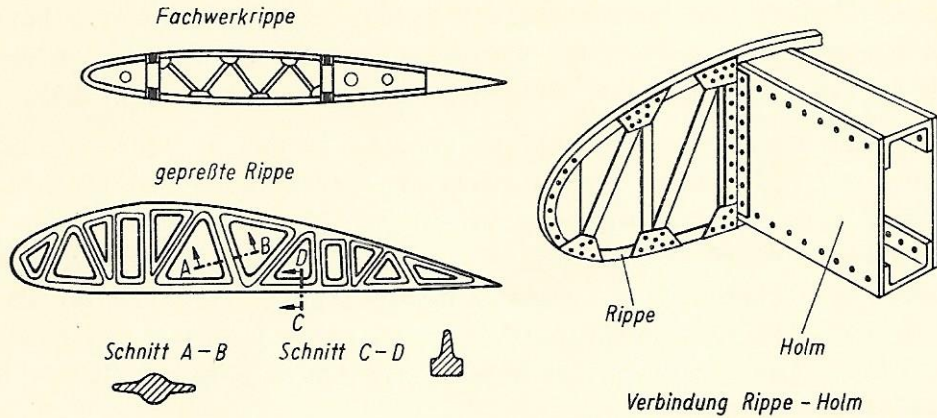


Bild 4.29 Rippen

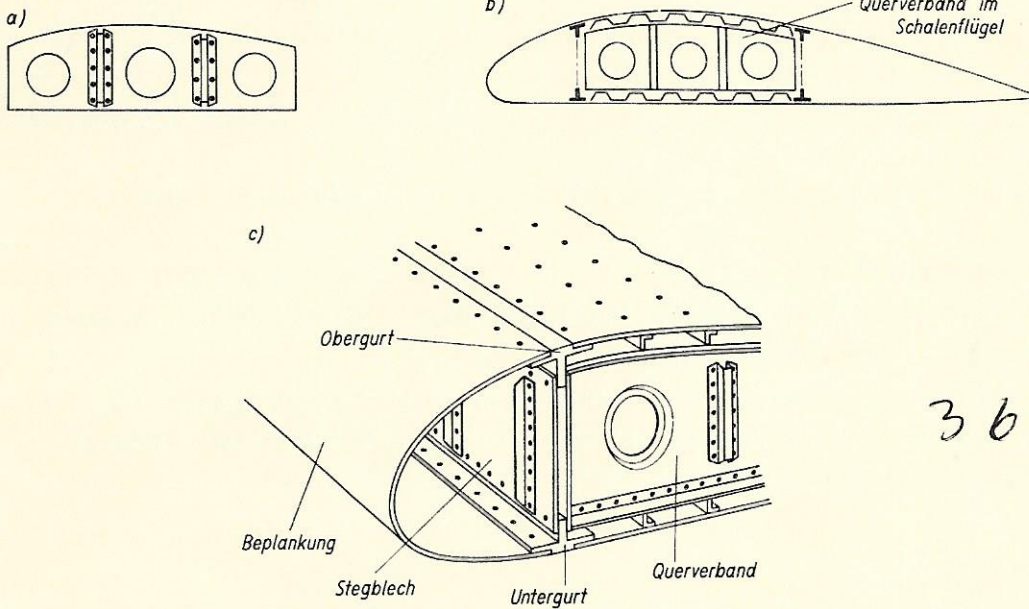
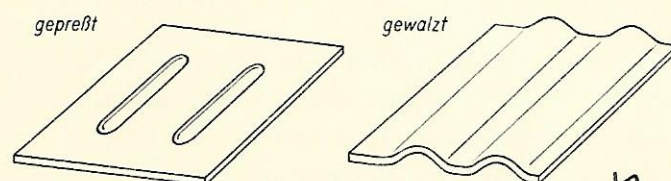


Bild 4.30 Querverbände

4.424 Blechversteifungen

Blechfelder werden häufig durch aufgenietete oder aufgeklebte Profile versteift. Das trifft vor allem für die Bepunktung zu, die eine nach außen glatte Oberfläche erfordert. Blechfelder, die im Inneren des Tragflügels liegen, z. B. Stegbleche, Querverbände u.ä., werden vielfach durch eingepreßte Sicken, Blindbördel und Lochbördel sowie Abkantungen in sich versteift.

Hautfelder, die Schubkräfte aufzunehmen haben, werden zur Versteifung mit S i c k e n versehen, d. h. eingewalzten oder mit Pressen eingedrückten,



rillenartigen Vertiefungen, deren Tiefe und Breite genormt sind. Während beim Pressen immer nur eine bestimmte Sickengröße

Bild 4.33 Sicken

in bezug auf Länge, Tiefe und Breite erzielt werden kann, lassen sich beim Walzen endlose Blechbahnen versteifen. Die verschiedenen Größen werden durch auswechselbare Rollensätze erreicht (Bild 4.33 und Bild 4.34, Seite 25).

Eine andere Art, Blechfelder zu versteifen, besteht in dem Einpressen von **B l i n d b ö r d e l n**. Dabei werden runde Vertiefungen in das Blechfeld gedrückt und damit eine Versteifung erzielt (Bild 4.35). Aus diesem Versteifungsverfahren wurde schließlich der **L o c h b ö r d e l** entwickelt, wobei aus dem Boden des Blindbördels noch ein kreisförmiges Loch herausgestanzt wird. Dadurch ergibt sich gleichzeitig eine Gewichtsverminderung des Bauteils. Der Bördelrand allein bewirkt dann die Versteifung (Bild 4.36 und Bilder 4.37 und 4.38, Seite 31).

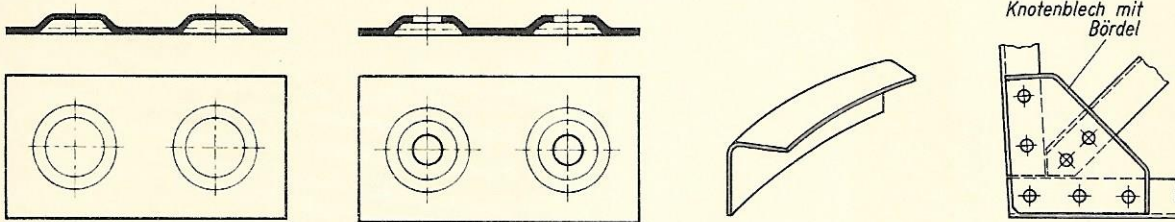


Bild 4.35 Blindbördel Bild 4.36 Lochbördel

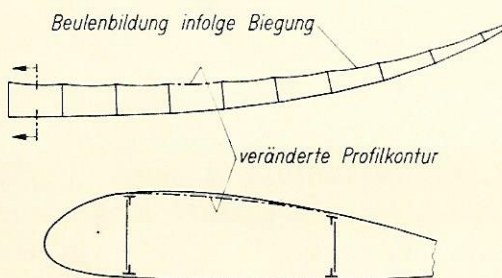
Bild 4.39 Bördel

Blechkanten werden durch **A b k a n t e n** oder **U m b ö r d e l n** versteift. Das Blech wird rechtwinklig abgebogen oder über ein Formholz umgeschlagen, wie z. B. bei Knotenblechen (Bild 4.39).

Alle vorstehend angeführten Fertigungsmethoden besitzen den großen Vorteil, daß zusätzliches Gewicht für aufgenietete Profile eingespart und dennoch die gewünschte Versteifung erreicht wird.

4.425 Beplankung

Als konturgebende Ummantelung des Tragflügels dient die Beplankung. Sie wird



bei allen modernen Flugzeugen in Glatblech ausgeführt. Die Einhaltung der vorausgerechneten aerodynamischen Form ist eine ihrer Aufgaben. Auch bei großen Beanspruchungen müssen die Profilkonturen unverändert bleiben. Alle Formabweichungen rufen im Luftstrom Störungen in der Druckverteilung am Flügel hervor, der Widerstand wächst, und die vorgesehenen Flugleistungen können nicht erreicht werden.

Bild 4.40 Beulenbildung in der Tragflügelbeplankung

Bei der Schalenbauweise wird die Beplankung zur Aufnahme und Weiterleitung der Schub-, Druck- und Zugkräfte mit herangezogen. Sie muß steif genug sein, d.h., sie muß die nötige Dicke haben, damit sie keine Falten und Beulen bildet (Bild 4.40 und Bild 4.41, Seite 31). Die Dimensionierung muß aber

auch so erfolgen, daß bei einer trotzdem auftretenden Faltenbildung diese nach der Entlastung wieder zurückgeht.

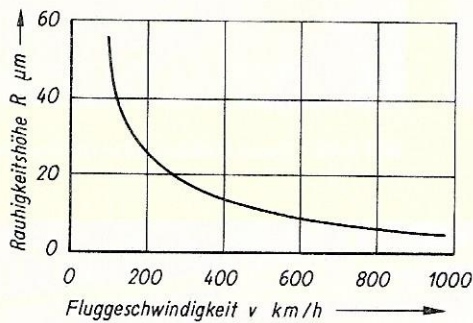


Bild 4.42 Zulässige Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit

Außer der Formgenauigkeit wird insbesondere bei schnellfliegenden Flugzeugen auch eine hervorragende Oberflächengüte der Beplankung verlangt. Die Außenhaut muß vollkommen glatt sein, und die mittlere Rauigkeit darf bei schnellen Maschinen den Wert von $10\mu\text{m}$, d.h. $1/100\text{ mm}$, nicht überschreiten (Bild 4.42).

Welchen Einfluß die Oberflächengüte auf die Leistungsfähigkeit eines Flugzeugs hat, zeigt die Tatsache, daß ein in 12 km Höhe mit 880 km/h fliegendes Flugzeug bei einer Oberflächenrauigkeit von $60\mu\text{m}$ etwa 8 Prozent seiner Geschwindigkeit, d.h. etwa 70 km/h, einbüßt.

Um den hohen Anforderungen an die Formgenauigkeit und Oberflächengüte der Beplankung immer besser entsprechen zu können, sind verschiedene neue Fertigungsverfahren eingeführt worden:

- Die **Hohl-schablonenbauweise** geht im Zusammenbau des Tragflügels von der Beplankung aus, deren Form durch entsprechende Vorrichtungen festgelegt wird. Der weitere Aufbau durch Versteifungen, Rippen, Holme usw. erfolgt von außen nach innen, so daß Bauungenauigkeiten im Inneren des Bauteils ausgeglichen werden können. Der heute noch vielfach übliche umgekehrte Weg kann ungünstigstenfalls dazu führen, daß sich die Bauabweichungen der einzelnen Füge-teile summieren und die Außenhautform in einer aerodynamisch nicht mehr zulässigen Weise verändern.
- Bei der bereits im Abschnitt 4.413 besprochenen **Integralbauweise** bilden Beplankung und Versteifungsprofile eine Einheit. Es ergeben sich daher keine Formungenauigkeiten der Oberfläche durch zusammengefügte Teile. Da die Integralteile durch Formfräsen hergestellt werden, ist auch eine hervorragende Oberflächengüte leichter erzielbar.
- Das **Metallkleben**, auf das im Abschnitt 4.432 noch genauer eingegangen werden wird, kann auch bei der Herstellung der Außenhautverbände Verwendung finden. Die hohen Anforderungen an Profilgenauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit lassen sich durch Kleben weit besser verwirklichen als beispielsweise durch Nieten. Dieses Verfahren befindet sich aber erst in der Entwicklung und wird bisher nur vereinzelt praktisch angewendet.

4.43 Verbindungsverfahren

4.431 Oberflächen- und Dichtnietung

Eines der hervorstechendsten Kennzeichen der Entwicklung moderner Flugzeuge ist die sich immer mehr steigende Geschwindigkeit. Diese hohen Geschwindig-

keiten führen zu sehr dünnen Tragflügeln und Leitwerken, die statisch und festigkeitsmäßig außerordentlich hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Andererseits werden die einzelnen Bauteile aus Gründen der Gewichtersparnis in bezug auf die Belastbarkeit weitestgehend ausgenutzt. Somit kann eine durch unsachgemäße und ungenaue Arbeit hervorgerufene Schwächung eines Teils zum Bruch desselben und damit häufig zum Absturz des ganzen Flugzeugs führen. Daher ist es selbstverständlich, daß bei der Flugzeugfertigung nur hochwertigste Arbeit geleistet werden darf.

Wenn man bedenkt, daß ein Verkehrsflugzeug in der Größenordnung der IL 14 etwa 300 000 bis 500 000 Niete enthält, so liegt klar auf der Hand, welche Sorgfalt gerade für die Nietarbeit aufzuwenden ist.

Besondere Bedeutung kommt einer sauberen und exakten Oberflächennietung zu, und zwar vor allem bei Hochgeschwindigkeitsflugzeugen. Es ist bekannt, daß der Oberflächenwiderstand an Flugzeugen bei hohen Geschwindigkeiten auf den Gesamtwiderstand einen großen Einfluß ausübt. Die Luftteilchen, die direkt an der Beplankungsoberfläche eines Flugzeugs entlang fließen, haben bei höheren Geschwindigkeiten das Bestreben, sozusagen an der Beplankung zu kleben. Um dieses Kleben zu vermeiden und ein einwandfreies Abfließen der Luftströmung zu gewährleisten, muß die Außenhaut vollkommen glatt und sauber (bei Überschallflugzeugen z. T. sogar poliert) sein. Werden bei der versenkten

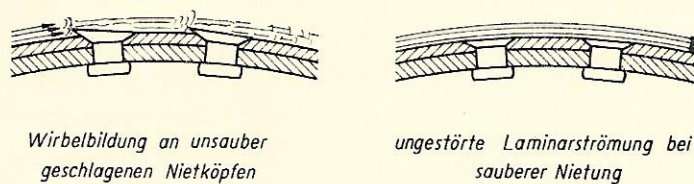


Bild 4.43 Oberflächennietung

Hautnietung die Niete nicht ganz sauber geschlagen, so verursachen sie für die Luft Widerstände, die die gleichmäßig strömende Luft stören und Wirbel bilden. Diese erhöhen den Gesamtwiderstand des Flugzeugs beträchtlich und führen u. U. zum Abreißen der Strömung. Aus diesem Grund ist eine qualitativ hochwertige Nietarbeit unerlässlich (Bild 4.43).

Eine besondere Nietungsart ist auch die Dichtnietung. Moderne Flugzeuge besitzen für den Flug in großen Höhen Druckkabinen. In diesen Kabinen muß auch in Höhen über 6000 m ein gleichbleibender Luftdruck, der etwa dem in 2500 m Höhe vorhandenen entspricht, herrschen. Um diesen Zustand zu erreichen, ist

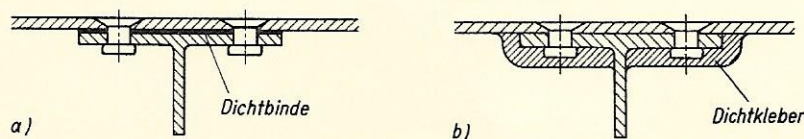


Bild 4.44 Dichtnietung

es notwendig, dicht zu nieten. Hierzu fügt man zwischen die durch Nietung zu verbindenden Bleche noch eine Dichtbinde, die die Nietstelle luftdicht ab-

schließt (Bild 4.44a). Wird diese Nietung nicht sehr gewissenhaft ausgeführt, so ist die Druckhaltung gefährdet und das Flugzeug kann nur in geringeren Höhen, also unwirtschaftlicher eingesetzt werden.

Eine neuere Bauweise für das Abdichten besteht darin, die Niet- und anderen Verbindungsstellen nach dem Zusammenbau mit einer dichtenden Klebmasse zu bestreichen (Bild 4.44b). Dieses Verfahren hat den großen Vorteil, daß die einzelnen Bauteile vor dem Abdichten ganz normal zusammengebaut werden können. Der Kleber ist nach dem Aushärten noch zähelastisch, so daß er für Dauerbeanspruchungen besonders geeignet ist.

4.432 Metallkleben

Im Anschluß an die Betrachtung der Nietungsarten ist es wichtig, auf das Metallkleben hinzuweisen, da diese Fertigungsmethode die im Zusammenhang mit dem Nieten auftretenden Probleme wesentlich vereinfachen kann.

Ein Vorteil der Metallklebetechnik besteht darin, daß die Kraftübertragung an der Klebestelle gleichmäßig erfolgt. Bei der Beanspruchung einer Nietung oder Verschraubung dagegen treten an den Lochrändern Spannungsspitzen auf, die in ungünstigen Fällen zu Rissen und damit zur Zerstörung der Verbindungsstelle führen können (Bild 4.45).

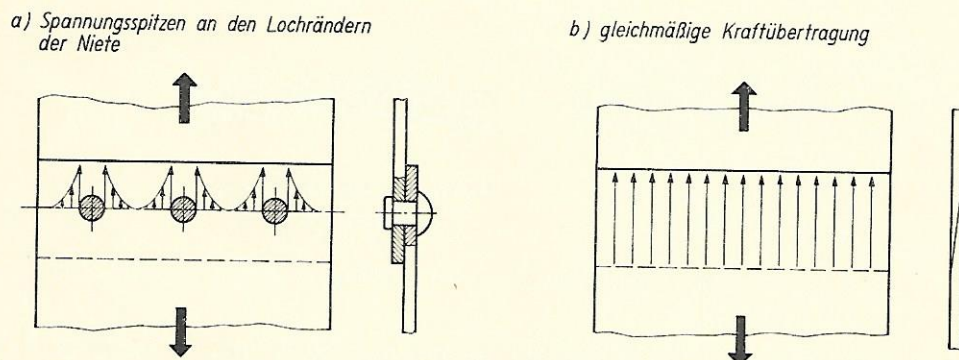


Bild 4.45 Kraftübertragung bei a) Niet- und b) Klebverbindungen

Die günstige Kraftübertragung an den Klebestellen ergibt dagegen außerordentlich gute Festigkeitseigenschaften metallgeklebter Teile, wie z. B. die nachfolgenden Ergebnisse von Zerreißversuchen mit Al-Cu-Mg-Proben zeigen:

	Ausgangsmaterial	geschweißt	genietet	geklebt
Bruchlast in kg	700	375	480	700

(nach P. Brenner)

Die gute Schubfestigkeit von Metallklebeverbindungen bietet die Möglichkeit, die Dicke einer Blechkonstruktion der örtlichen Belastung durch Aufeinander-

Schutzgaswirkung des Argons bei hochlegierten und hochwarmfesten Stählen gute Schweißverbindungen, wobei Zugfestigkeiten bis zu 100 kp/mm^2 erreicht werden können.

Bei Leichtmetall-Legierungen sind Schmelzschweißverbindungen nur dann anwendbar, wenn die Teile nicht im Festigkeitsverband liegen, da die hohe Erwärmung eine Entfestigung des Werkstoffs zur Folge hat. Außerdem können thermische Spannungen auftreten, die ein Verziehen der Teile bedingen.

4.44 Ein- und Anbauten

Bei der Betrachtung des Tragflügels sind außer dem konstruktiven und aerodynamischen Aufbau des tragenden Systems noch eine Anzahl von Ein- und Anbauten zu erwähnen, die zu dem Gesamtaufbau eines Tragflügels gehören.

4.4401 Triebwerkeinbauten

In vielen Fällen nehmen die Tragflügel die Triebwerke auf. Kolbentriebwerke werden im allgemeinen an einem Motorvorbaugerüst, das ein Fachwerkgerüst aus Rohrstreben oder Profilen darstellt oder als Schalenkonstruktion in die Tragflügelkonstruktion eingefügt ist, mit Kugelverschraubungen oder Gabelbolzen befestigt (Bilder 4.49 und 4.50).

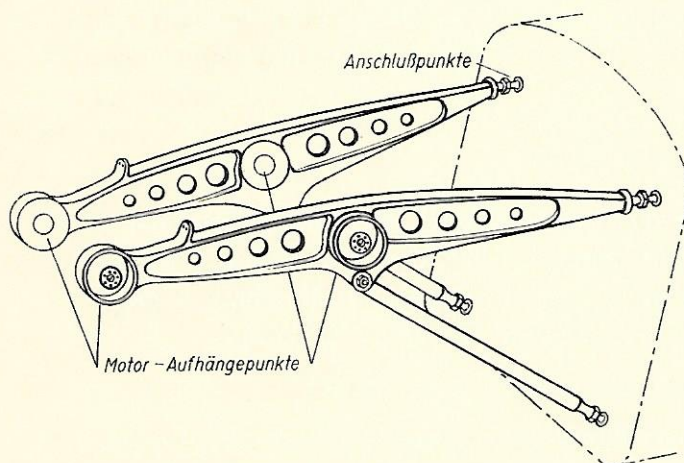


Bild 4.49 Triebwerkgerüst für Reihenmotor

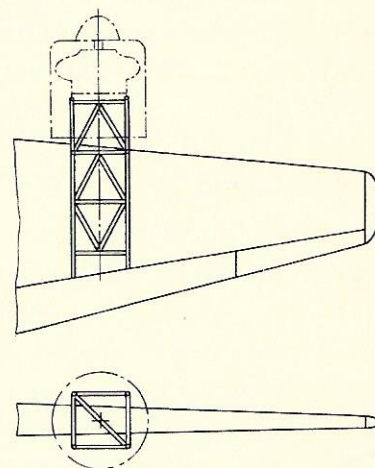


Bild 4.50 Triebwerkgerüst für Sternmotor

In besonderen Fällen hat man die Triebwerke in die Tragflügel direkt eingebaut, wo sie ebenfalls an einem Motorgerüst aufgehängt sind. Die Verbindung zu der vor dem Tragflügel befindlichen Luftschraube wird durch eine Fernwelle hergestellt (Junkers G 38, Lockheed "Electra").

Bei Flugzeugen mit mehr als einem Antriebsaggregat werden auch die Strahltriebwerke meistens in oder an den Tragflügeln untergebracht. Erfolgt der Einbau in die Flügel, so muß der hintere Träger als Brücke ausgebildet sein, in deren Öffnung das Triebwerk gelagert wird. Der vordere Träger, der sich vor oder in der Diffusorzone des Triebwerks befindet, kann normal durchlaufen, da er von der angesaugten Luft umströmt wird. Bei dieser Anordnung ist besonders auf eine gute Wärmeisolierung des Triebwerks gegenüber dem Flügel zu achten (Bild 4.51 und Bild 4.52, Seite 31).

Bei der p n e u m a t i s c h - m e c h a n i s c h e n E n t e i s u n g wird die Tragflügelnase mit einem zusammengedrückten Gummischlauch belegt, der bei Eisansatz durch Druckluft pulsierend aufgeblasen werden kann, wodurch das Eis abgesprengt wird (Bild 4.57e).

4.4404 Hydraulikanlage

Neben Kraftstoffleitungen befinden sich in den Tragflügeln auch Rohrleitungen der Hydraulikanlage. Sie dienen zur ölhydraulischen Betätigung des Einziehfahrwerks, der Verstellung der Kühlerklappen sowie zum Ein- und Ausfahren der Landeklappen und Luftbremsen. Bei größeren Maschinen werden auch die Ruder, Seiten-, Höhen- und Querruder, durch Rudermaschinen betätigt. Deren Antrieb erfolgt ebenfalls ölhydraulisch und erfordert entsprechende Zuleitungen.

4.4405 Einziehfahrwerke

Vielfach nehmen die Tragflügel das Fahrwerk auf, das entweder in die Triebwerksgondeln (Bild 4.58) oder in die Flügel eingezogen wird (Bild 4.59). Die

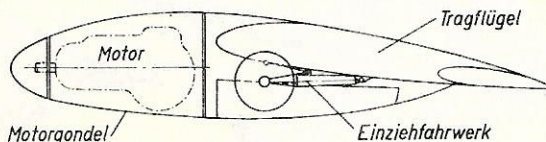


Bild 4.58 Einziehfahrwerk in der Motor-gondel

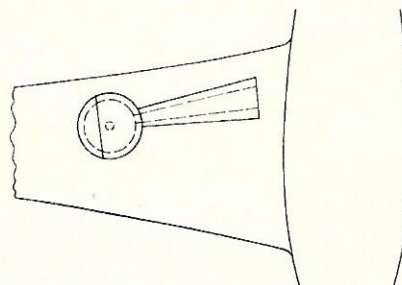


Bild 4.59 Einziehfahrwerk im Tragflügel

einfachste Lösung ist das Einfahren des Fahrwerks in den freien Raum der Triebwerksgondel hinter dem Triebwerk. Diese Methode wird vielfach angewandt. Ist

diese Konstruktion nicht möglich, legt sich das Fahrwerk in Aussparungen im Flügel, wo es durch dicht anliegende Klappen abgedeckt wird.

4.4406 Lagerung für Querruder und Landeklappen

Am hinteren Träger des Tragflügels befinden sich die Lagerrippen, die die Querruder aufnehmen. Die Lager selbst besitzen leichtgängige Kugellager zur

Verminderung der Reibung und damit zur Herabsetzung der Steuerkräfte am Bediengestänge (Bild 4.60 und Bild 4.61, Seite 39).

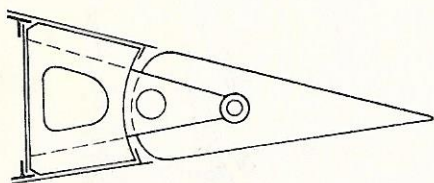


Bild 4.60 Lagerrippe für Querruder

Für einfache Landeklappen werden ähnlich geartete Lagerrippen verwendet. Ist die Maschine jedoch mit Fowlerklappen ausgerüstet, die eine bessere aerodynamische Wirkung haben und nach hinten ausgefahren werden müssen, so sind deren Lager als besondere Rippen ausgebildet, die den Antriebsmechanismus tragen (Bild 4.62 und Bild 4.63, Seite 39).

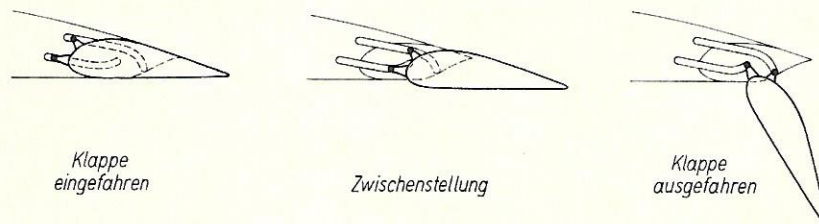
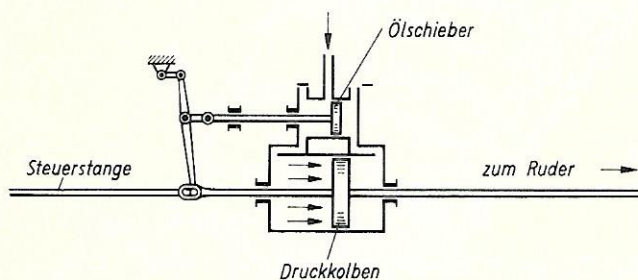


Bild 4.62 Lagerung für Fowlerklappe

4.4407 Steuergestänge

Das Steuergestänge zur Betätigung der Querruder und Landeklappen ist im Flügel gelagert (Bild 4.64, Seite 39). Es besteht aus Rohren und ist durch



Schwinghebel abgefangen, um die einzelnen Rohrstücke nicht zu lang werden zu lassen. Bei manchen Maschinen ist noch eine mit Drucköl arbeitende Boosteranlage zwischengeschaltet, die dem Piloten einen Teil der Ruderkraft abnimmt (Bild 4.65).

Bild 4.65 Booster-Steuerung

4.4408 Elektrische Anlage

Die elektrischen Leitungen in dem Tragflügel dienen der Betätigung der Scheinwerfer, die in der Flügelnase (Bild 4.66a), ausschwenkbar in der Flächenunterseite oder aber auch am Fahrwerk angebracht sind, sowie der Positionslichter an den Flügelenden (Steuerbord: grün, Backbord: rot) (Bild 4.66b).

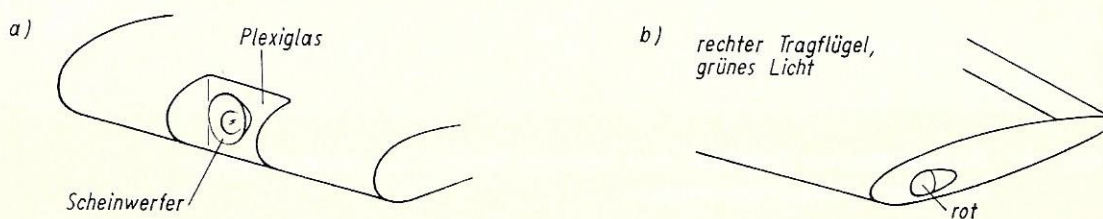


Bild 4.66 Scheinwerfer (a) und Positionslicht (b) im Tragflügel

Des weiteren liegen in den Tragflügeln elektrische Leitungen für die Thermostaten der Triebwerke und für Fernthermometer sowie für den Trimmruderantrieb und die Querruderverriegelungen. Schließlich führen elektrische Leitungen zu den Endschaltern, die z. B. die Landeklappenstellungen anzeigen.

4.4409 Feuerlöschanlage

Feuerlöscheinrichtungen sind an gefährdeten Stellen eingebaut, also an den Triebwerken und an den Kraftstoffbehältern. Die Füllung der Feuerlöschbehäl-

ter (Tetrachlorkohlenstoff, Kohlendioxyd, Chlorbrommethan u.a.m.) steht unter Druck. Leitungen, die an ihren Enden Düsen tragen, führen unmittelbar an die bedrohten Orte (Bild 4.67). Im Brandfall wird die Anlage manuell oder elektrisch automatisch ausgelöst.

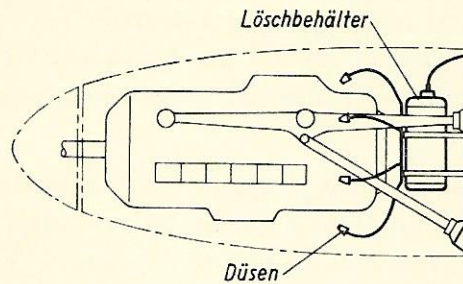


Bild 4.67 Feuerlöschanlage an einem Kolbenmotor

4.4410 Grenzschichtzaun und Staurohr

An äußeren Anbauten besitzen moderne Flugzeuge höherer Geschwindigkeitskategorie (über 0,8 Mach) auf jedem Tragflügel ein oder mehrere Grenzschichtzäune. Diese mit senkrechten Schneiden vergleichbaren Flächen werden bei Flugzeugen mit Pfeilflügeln angewandt, um bei höheren Geschwindigkeiten ein Abgleiten der Luftströmung nach außen zu verhindern (Bild 4.68).

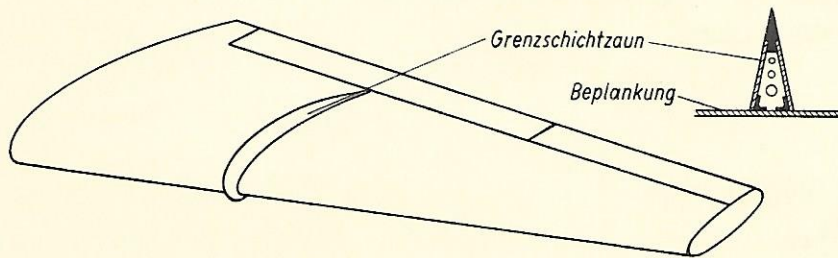


Bild 4.68 Grenzschichtzaun

Manchmal ist in der Nase eines Tragflügels auch das Staurohr mit seinen Leitungen eingebaut, durch das am Instrumentenbrett im Führerraum die Geschwindigkeit der Maschine angezeigt wird (Bild 4.69).

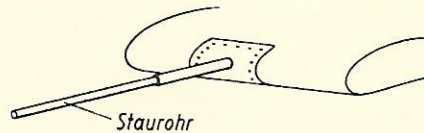


Bild 4.69 Staurohr

4.4411 Deckel und Klappen

In der Flügelbeplankung befinden sich eine Anzahl großer und kleiner Klappen, Deckel und Handlochdeckel, die die Zugängigkeit zu besonders zu wartenden Konstruktionselementen gewährleisten (Bild 4.70). Wegen dieser Unterbrechungen der Beplankung müssen die zu übertragenden Kräfte in manchen Fällen um die Öffnungen herumgeleitet werden, falls die Deckel nicht zur Kraftübertragung herangezogen werden können. Vielfach werden jedoch

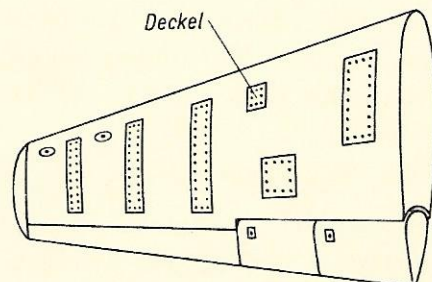


Bild 4.70 Tragflügelbeplankung mit Klappen und Deckeln

auch die Deckel und Klappen in den Kräftefluß einbezogen und müssen dann mit solchen Befestigungselementen befestigt werden, die zur Kraftübertragung geeignet sind. Es werden dafür heute im allgemeinen Paßschrauben eingesetzt, während es früher meistens Senkschrauben unter Verwendung von Schubwarzen waren.

Die Deckel und Klappen sind entweder durch Annietsmuttern und Senkschrauben verschraubt oder durch Steck- oder Federverschlüsse und Scharniere verschlossen (Bilder 4.71 und 4.72, Seite 39).

Abschließend wird in Bild 4.73 (Seite 41) der gesamte Aufbau des linken Tragflügels eines modernen Strahlturbinen-Verkehrsflugzeugs gezeigt. Der Flügel ist gepfeilt (35°) und in Schalenbauweise aufgebaut. Der Mittelkasten enthält drei Integral-Kraftstoffbehälter mit einem Fassungsvermögen von insgesamt etwa 20 000 Litern. Einschließlich einem 20 000 Liter fassenden zentralen Behälter im Rumpf ergibt das für das ganze Flugzeug einen Kraftstoffvorrat von etwa 60 000 Litern. Der Nasenkasten wird durch Heißluft enteist. Im Endkasten befinden sich die Lagerungen und Antriebsaggregate für die Querruder und Landeklappen.

Literaturverzeichnis

- [1] Schulshenko, M.U. und Mostowoj, A.S.: Lehrgang der Flugzeugkonstruktion [russ.] . Moskau: Staatlicher Verlag der Verteidigungsindustrie 1956.
- [2] Schapitz, E.: Festigkeitslehre für den Leichtbau. Düsseldorf: VDI-Verlag 1951.
- [3] Sönnichsen, Theo E.: Das Flugzeug. Berlin: Verlag Richard Carl Schmidt u. Co. 1940.
- [4] Otto, Gerhard: Entwurf und Berechnung von Flugzeugen. Berlin: C.J.E. Volckmann Nachf. E. Wette 1937.
- [5] Strobel, Franz: Neuzeitliche Konstruktionen und Bauweisen im Flugzeugbau. Dresden: VVB Flugzeugbau, Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel 1957.
- [6] Picht, Wolf-Dietrich: Moderne Flugzeugtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1960.
- [7] Meyer: Elementare Aerodynamik und Flugphysik. Leipzig: Fachbuchverlag 1955.

Bildnachweis

- | | |
|-----------------|---|
| 1.8, 1.9b | Herb: Neue Wege im Flugzeugbau. Umschau 58 (1958) 2. |
| 4.7, 4.18, 4.23 | Strobel: Neuzeitliche Konstruktionen und Bauweisen im Flugzeugbau. Dresden: VVB Flugzeugbau, Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel 1957. |
| 4.42 | Backhaus: Einführung in Probleme der aerodynamischen Flugzeuggestaltung. Dresden: VVB Flugzeugbau, Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel 1958. |
| 4.46, 4.47 | Schliekelmann: Metallklebverbindungen im Flugzeugbau. Luftfahrttechnik 3 (1957) 3. |

Sachwörterverzeichnis

- A**bkantung 30
Aerodynamik des Tragflügels 16
Amphibium 14
Anbauten an Tragflügel 36
aufgelöste Schalenbauweise 23
Auftriebsentstehung 16
- B**augruppen des Flugzeugs 10
Beanspruchungen des Tragflügels 18
Beplankung 30
Blechprofile 27
Blechversteifungen 29
 Abkantung 30
 Blindbördel 30
 Lochbördel 30
 Sicke 29
 Blindbördel 30
Booster-Steuerung 42
- C**hemisches Abtragen 8
Coleopter 1,10
- D**auerfestigkeit 8
Deckel 43
Deltaflügel 16
Dichtbinde 33
Dichtnietung 33
Druckkabine 8,33
- E**inbauten im Tragflügel 36
Einholmer 22
Einziehfahrwerk 40
elektrische Anlage 42
Endkasten 23
Enteisung 38
 elektrische - 38
 Heißluft- 38
 pneumatisch-mechanische - 40
Entwicklung des Flugzeugaufbaus 1
Ermüdungsfestigkeit 8
- F**achwerkbauweise 4,21
Fernwelle für Luftschraube 36
Feuerlöschanlage 42
Flächenbelastung 20
Flugzeugtypen
 "152" 7,11,13,15,19
 An 8 11
 An 10 11
 ANT 20 5
 Boeing B 47 13
 Boeing B 52 13
 Boeing 707 7,13
- Bü 130 12
BV 222 14
"Canberra" 15
"Caravelle" 7,13
Coleopter 1,10
"Comet" 7
Convair B 36 13
Convair B 58 16
Convair F 102 16
DH 110 14
Do 13 15
Do 18 12
Do 26 13
Do K 15
Do X 5,14
Douglas B 66 13
F 13 4
F 27 11,35
Fairey Delta 2 16
FW 44 12
FW 189 14
FW 200 6,13
G 38 5,36
Handley Page "Hampden" 15
Handley Page "Victor" 16
He 51 12
He 70 5,14
He 72 12
He 111 14
He 178 6
IL 14 12
Ju 52 12
Ju 90 6,13
Ju 160 15
Ju 287 16
Ju 390 13
Lockheed "Electra" 36
Lockheed F 104 14
Lockheed "Orion" 5
Me 262 6
Mig 15 7,12,13
"Rotodyne" 9
Tu 104 7,13,15
Tu 110 7,13
Fowlerklappe 42
- G**eschmiedete Bauteile 8
Grenzschichtzaun 43
- H**andlochdeckel 43
Hohlshablonenbauweise 32
Holmbauweise 22
Hydraulikanlage 40
- Integral-bauweise 7,24,32
 -Kraftstoffbehälter 26,41,44
 -schale, Herstellung 24
- K**lappen 43
Konstruktionselemente 27
Kraftstoffbehälter 37
Kräfte am Tragflügel 19
Kunststoffe für Beplankung 7,8
- L**agerung für
 Querruder 40
 Landeklappe 40
Laminarprofil 18
Landeklappenlagerung 40
Lilienthal 2
Lochbördel 30
- M**etallkleben 7,8,32,34
- N**asenkasten 23
Nietungsarten 32
- O**berflächen-güte 7,26,32
 -nietung 32
 -rauhigkeit 32
Oberschale 23
- P**feilflügel 15
Polardiagramm 17
Positionslichter 42
Preßprofil 27
Profil 27
 -dicke 7,17
 -form 16,17
 -tiefe 17
 Blech- 27
 Preß- 27
- Q**uerruderlagerung 40
Querverband 23,28
- R**ippe 28
Rumpf-form 13
 -gondel 14
- S**andwichbauweise 8,27
Schalenbauweise 6,23
 aufgelöste Schalenbauweise 23
 Integralbauweise 24,32
 Verbundplattenbauweise 27
Schichtenbauweise 35
Schnellablaß 38
Schweißen 35

Schweißverfahren		Tragflügelanordnung		Triebwerk-gerüst	36
Widerstandsschweißen	35	Doppeldecker	12	-gondel	37
Schmelzschweißen	35	Hochdecker	11		
Senkrechtstartflugzeug	9	Mitteldecker	11	Unterschale	23
Sichelflügel	16	Schulterdecker	11		
sichere Belastung	18	Tiefdecker	12	Verbindungsverfahren	32
Sicke	29	Tragflügelform	14	Verbundplattenbauweise	8,27
Staurrohr	43	Träger	28		
Steg	23	Triebwerk-anlage	37	Wabenbauweise	8,27
Steuergestänge	42	-anordnung		Wright	2
		Kolbentriebwerk	12		
Temperatureinfluß auf die		Strahltriebwerk	13	Zusatzbehälter	37
Werkstoff-Festigkeit	8,9	-einbau		Zweiholmer	22
Torsionsröhre eines Flügels	23				

Aufbau des Flugzeugs

Band 1: Aufbau des Tragflügels

- 1 Entwicklung des Flugzeugaufbaus
- 2 Baugruppen des Flugzeugs
- 3 Einteilung der Flugzeuge nach äußeren Merkmalen
- 4 Aufbau des Tragflügels
 - 4.1 Tragflügelformen
 - 4.2 Aerodynamische Betrachtung
 - 4.3 Beanspruchungen des Tragflügels
 - 4.4 Konstruktive Gestaltung
Bauweisen, Konstruktionselemente, Verbindungsverfahren,
Ein- und Anbauten

Band 2: Aufbau des Rumpfes, des Leitwerks und der Steuerung

- 1 Aufbau des Rumpfes
 - 1.1 Rumpfformen
 - 1.2 Aerodynamische Güte des Rumpfes
 - 1.3 Beanspruchungen des Rumpfes
 - 1.4 Konstruktive Gestaltung
Bauweisen, Konstruktionselemente, besondere Konstruktionsmerkmale,
Gestaltung der Druckkabine, Gestaltung des Flugbootrumpfes
- 2 Aufbau des Leitwerks
 - 2.1 Aufgaben des Leitwerks
 - 2.2 Leitwerksformen und -anordnungen
 - 2.3 Beanspruchungen des Leitwerks
 - 2.4 Konstruktive Gestaltung
Höhen- und Seitenflossen, Höhen-, Seiten- und Querruder
 - 2.5 Landehilfen
 - 2.6 Aerodynamische Bremsen
- 3 Aufbau der Steuerung
 - 3.1 Aufgaben und Beanspruchungen der Steuerung
 - 3.2 Wirkungsweise und Aufbau der verschiedenen Steuerungssysteme
Bedienelemente, mechanische Steuerung, Booster-Steuerung,
Maschinen-Steuerung, automatische Steuerung

Band 3: Aufbau des Fahrwerks und Innenausstattung des Flugzeugs

- 1 Aufbau des Fahrwerks
 - 1.1 Aufgaben des Fahrwerks
 - 1.2 Fahrwerksanordnungen
 - 1.3 Beanspruchungen des Fahrwerks
 - 1.4 Konstruktive Gestaltung
Heck-, Bug-, Tandemfahrwerk, Sonderfahrwerke für Landflugzeuge,
Einziehvorgang, Bauteile des Fahrwerks, Schwimmwerke
- 2 Innenausstattung des Flugzeugs
 - 2.1 Radarnase und Elektronikraum
 - 2.2 Besatzungsraum
 - 2.3 Fluggastkabine
 - 2.4 Nebenräume
 - 2.5 Frachtraum

Lehrschriftenverzeichnis

Lehrschriften für die Berufsausbildung und Qualifizierung
Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel

1. Bedeutung des Flugzeugs und Flugzeugbaus in unserer Zeit
Hehl, Peter, Dipl.-Ing. oec.
Wintruff, Hilmar, Dipl.-Ing. oec.
Bestell-Nr. 7201 DM 4,00
2. Einteilung und vergleichende Übersicht der Flugtriebwerke
Günther, Hellmut, Dipl.-Gwl.
Bestell-Nr. 7212 DM 3,00
3. Physikalische Grundlagen der Flugzeugantriebe
Berthold, Edwin, Dipl.-Ing.
Günther, Hellmut, Dipl.-Gwl.
Bestell-Nr. 7219 DM 1,60
4. Aluminium und seine Legierungen
Hückel, Klaus, Ing.
Kalmring, Rudolf, Ing.
Küster, Rudolf, Dipl.-Gwl.
z.Z. vergriffen, Neubearbeitung in Vorbereitung
5. Magnesium und seine Legierungen
Küster, Rudolf, Dipl.-Gwl.
z.Z. vergriffen, Neubearbeitung in Vorbereitung
6. Korrosion und Korrosionsschutz unter besonderer Berücksichtigung
des Flugzeugbaus
Römer, Alfred, Ing.
Bestell-Nr. 7213 DM 3,60
7. Elektrische Ausrüstung im Flugzeug
Kleiber, Günther, Dipl.-Ing.
Bestell-Nr. 7229 DM 5,15
8. Grundlagen der elektrischen Bordgeräte
Richter, Werner, Dipl.-Ing.
Bestell-Nr. 7227 DM 4,50
9. Stahl und Eisen unter besonderer Berücksichtigung des Flugzeugbaus
Hückel, Klaus, Ing.
Förster, Walter, Dipl.-Gwl.
Bestell-Nr. 7202 ca. DM 4,90

I n V o r b e r e i t u n g

Aufbau des Flugzeugs, Band 2 und 3
Fertigung der Blechformteile im Flugzeugbau
Grundlagen der Flugzeughydraulik
Prüfwesen im Flugzeugbau
Schweißen im Flugzeugbau
Wirkungsweise und Aufbau der Luftschraube

Bestellungen, möglichst Sammelbestellungen, nehmen für die Mitarbeiter der
Luftfahrtindustrie die Technischen Kabinette in den Werken oder andere dafür
bestimmte Abteilungen entgegen.

Alle anderen Interessenten geben ihre Bestellungen bei der Zentralstelle für
Literatur und Lehrmittel, Dresden N 2, Postfach 40, auf.