

Flugzeug-Gestaltung und Rohstoffaufkommen

Von Günther Bock

Auszug aus dem in der 6. Wissenschaftssitzung der Ordentlichen Mitglieder
am 6. August 1913 gehaltenen Vortrag

I. Einführung

Für die Gestaltung eines jeden industriellen Erzeugnisses — mag es militärischen oder zivilen Zwecken dienen — sind zwei Gesichtspunkte bestimmend. Einmal soll das Gerät auf seinem Verwendungsgebiet eine hohe Leistung aufweisen, zum anderen soll es mit geringem Aufwand herstellbar, sein Preis also niedrig sein. Für den Kriegsflyerbau gelten sinngemäß die gleichen Gesichtspunkte. Denn die technische Überlegenheit des eigenen Fluggeräts ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erfolg im Luftkrieg. Dies gilt besonders für den Fall, daß eine zahlenmäßige Überlegenheit der Luftwaffe nicht vorhanden ist. Daneben muß aber auch der Aufwand zur Herstellung der Flugzeuge niedrig sein, um mit den vorhandenen Baustoffen und Arbeitskräften möglichst große Flugzeugmengen bauen zu können.

Zur Erreichung einer hohen Leistung ist bei der Flugzeugzelle neben guter aerodynamischer Formgebung ein geringes Baugewicht anzustreben. Da hiernit eine große Zuladungsmöglichkeit, also hohe Bombenlast oder Reichweite verbunden ist. Für die Beurteilung des Aufwands zur Herstellung der Flugzeugzellen sind sowohl die Arbeiten, die im Flugzeugwerk selbst geleistet werden, in Betracht zu ziehen als auch all die Aufwendungen, die auf dem Wege vom Rohstoff bis zur Ablieferung der Halbzeuge an die Flugzeugwerke entstehen. Arbeitsaufwand und Baugewicht der Flugzeugzelle hängen stark von den verwendeten Werkstoffen ab. Diese Zusammenhänge sollen im folgenden näher untersucht werden.

Bei den Ermittlungen, die zur Beurteilung der hier aufgeworfenen Fragen notwendig waren und die ich z. T. im Rahmen meiner Tätigkeit im Industrieamt des Reichspatentschalls durchgeführt habe, wurde ich von zahlreichen Herren des Reichsluftfahrtministeriums, der Industrie und der Forschung unterstützt, denen ich hier meinen besonderen Dank aussprechen möchte.

II. Erzeugung der Werkstoffe

Die heute im Flugzeugbau vorherrschenden Werkstoffe sind die Leichtmetalle Aluminium und Magnesium mit ihren Legierungen sowie Stahl und in letzter Zeit in zunehmendem Maße Holz, Kunst- und Preßstoffe spielen vorläufig für tragende Bauteile nur eine untergeordnete Rolle.

Um einen Maßstab für den Arbeitsaufwand zu erhalten, der bei der Erzeugung der Werkstoffe entsteht, soll einmal die Energie betrachtet werden, die zur Herstellung der Halbzeuge erforderlich ist, und zum anderen der Preis der Halbzeuge herangezogen werden.

Die meisten Werkstoffe erfordern zu ihrer Herstellung Wärmeenergie oder elektrische Energie. Zur Bildung eines einheitlichen Maßstabes wird im folgenden die Wärmeenergie in elektrische Energie umgerechnet. Dabei wird bei den Leichtmetallen, die meist in unmittelbarer Nachbarschaft von Großkraftwerken erzeugt werden, 1 kWh gleich 3300 WE, bei Stahl infolge des schlechteren Wirkungsgrades der meisten Hüttenkraftwerke 1 kWh gleich 5000 WE gesetzt.

a) Aluminiumlegierungen

Die wichtigsten Stufen bei der Erzeugung des Aluminiums und seiner Legierungen sind in Abbildung 1 dargestellt, wobei gleichzeitig die in den einzelnen Stufen benötigten Energiemengen angegeben sind. Die Werte sind auf 1 kg Halbzeug bezogen. Als Ausgangsstoff für die Aluminiumlegierungen wird fast ausschließlich Bauxit benutzt, das in Mitteleuropa vorläufig in ausreichendem Maße zur Verfügung steht. Der Hauptverbrauch an Energie tritt mit 20 bis 21 kWh in der Elektrolyse auf, bei der aus der Tonerde das Aluminium ausgeschieden wird. Das Erhitzen der legierten Masse erfordert nur wenig Energie. Der Aufwand für die Herstellung der Halbzeuge dagegen ist erheblich und hängt stark von der Halbzeugart ab.

b) Magnesiumlegierungen

Als Ausgangsstoff für die Magnesiumherstellung dient zunächst Dolomit. Der Erzeugungsgang des Magnesiums (Abbildung 2) hat in grundsätzlicher Hinsicht manche Ähnlichkeit mit dem des Aluminiums, insbesondere tritt auch dort der Hauptenergieverbrauch bei der Elektrolyse auf, bei der das Magnesium aus Magnesiumchlorid gewonnen wird. Infolge der schlechteren Walzbarkeit der Magnesiumlegierung ist bei ihnen der Aufwand zur Erzeugung der Halbzeuge z. T. erheblich höher als bei den Aluminiumlegierungen.

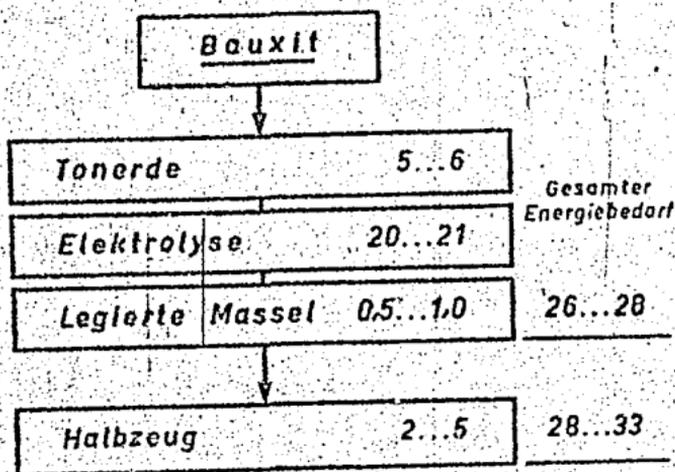


Abb. 1
Energiebedarf bei der Aluminiumherzeugung in kWh für 1 kg Halbzeug

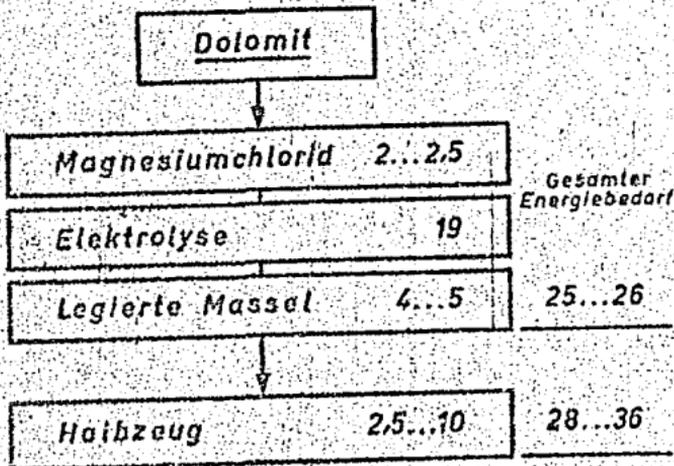


Abb. 2
Energiebedarf bei der Magnesiumherzeugung in kWh für 1 kg Halbzeug

c) Stahl

Der Energiebedarf für die Erzeugung der Stahlhalbzeuge ist in Abbildung 3 näher angegeben. Der linke Ast der Darstellung gilt für unlegierte oder sehr niedrig legierte Stähle, die im Siemens-Martin-Ofen erschmolzen werden können, der rechte Ast für höher legierte Stähle, die aus dem Elektroofen kommen müssen. Bei der Rechnung wurde angenommen, daß das Eisen in die Schmelzöfen zu 30% als Roheisen und zu 70% als

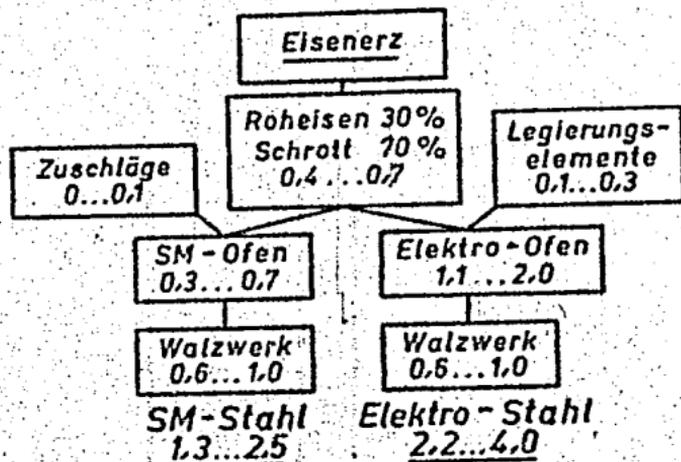


Abb. 3

Energiebedarf bei der Magnesiterzeugung in Kwh für 1 kg Halbzeug

Schrott eingesetzt wird. Der Energieverbrauch für die Siemens-Martin-Stähle liegt hiernach bei 1,3 bis 2,5 kWh, für Elektrosthle bei 2,2 bis 4,0 kWh je kg Halbzeuggewicht. Er beträgt also nur einen Bruchteil des Energiebedarfs der Leichtmetalle. Dies trifft besonders für den Siemens-Martin-Stahl zu; er hat weiterhin den Vorteil, daß bei ihm die Wärmeenergie unmittelbar, d. h. ohne Umformung in elektrische Energie, nutzbar gemacht werden kann. Beide Gründe machen den Einsatz von Siemens-Martin-Stählen an Stelle von Elektrosthlen besonders erstrebenswert.

d) Holz

Wegen der andersartigen Entstehung des Holzes und der Holzhalbzeuge ist die Energie, die hierbei verbraucht wird, kein sinnvoller Maßstab für den Erzeugungsaufwand dieser Halbzeugart; es wird daher hierauf nicht eingegangen.

e) Kunststoff

Der Energiebedarf der Kunst- und Preßstoffe hängt stark von ihrer Zusammensetzung ab; vielfach fallen auch wesentliche Bestandteile als Nebenprodukte bei der Erzeugung anderer Stoffe, z. B. bei der Benzinsynthese, an. Eine einwandfreie Ermittlung des Energiebedarfs der Kunststoffe ist daher sehr schwierig und liegt noch nicht vor. Es kann jedoch schon jetzt gesagt werden, daß die phenolhaltigen Preßstoffe, wie z. B. Dynal, die vorerst wohl hauptsächlich für den Flugzeugbau in Betracht kommen werden, in ihrem Energiebedarf nicht wesentlich über dem Stahl liegen werden.

f) Vergleich des Erzeugungsaufwandes

Vergleichen wir den Energieaufwand der hier betrachteten Werkstoffe, so verhält sich am günstigsten der SM-Stahl, ihm folgt der Elektrostahl und dann in weitem Abstände die Aluminium- und Magnesiumlegierungen.

Als weiteren Vergleichsmaßstab wollen wir den Preis der Halbzeuge in Betracht ziehen (Abbildung 4). Der Preis ist bei gleichem Werkstoff mitunter außerordentlich stark von der Halbzeugart abhängig. In dem hier dargestellten Vergleich wurden daher Halbzeugarten mit besonders großem Herstellungsaufwand, wie z. B. Rohre mit sehr kleiner Wandstärke, nicht eingeschlossen.

Auf Grund des Preises ergibt sich für die Metalle eine ähnliche Staffelung, wie wir sie eben bei Betrachtung des Energieaufwandes festgestellt haben.

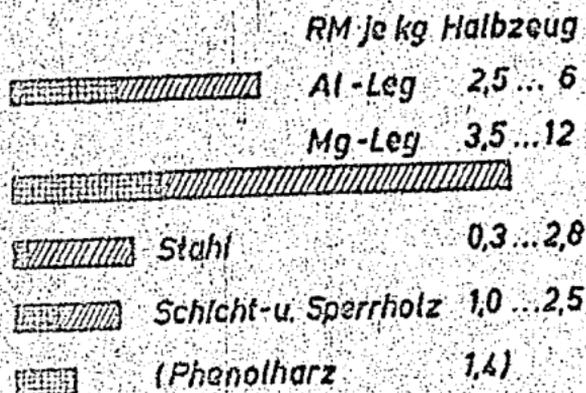
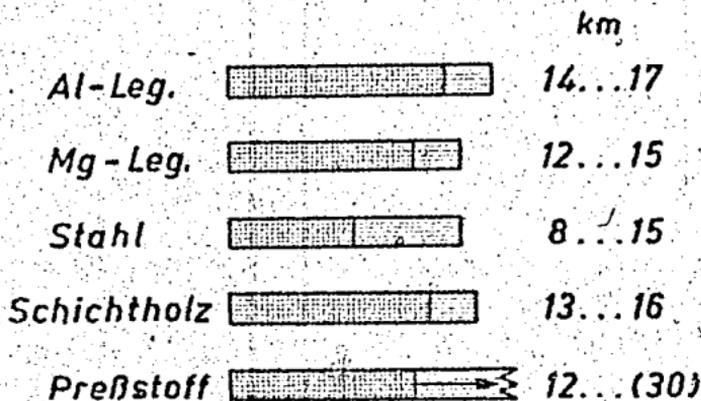


Abb. 4
Preise der Flugzeugwerkstoffe RM je kg Halbzeug

III. Die Festigkeitseigenschaften der Flugzeugbaustoffe

Der einfachste Bewertungsmaßstab für die Festigkeit der Werkstoffe ist das Verhältnis der Zugfestigkeit zum spezifischen Gewicht, das meist als Reißlänge bezeichnet wird. Dabei werden nur die Mindestfestigkeiten betrachtet, die mit Sicherheit in den Halbzeugen zu erreichen sind und die den Festigkeitsrechnungen der Flugzeugwerke zugrunde gelegt werden. Die so errechneten Reißlängen sind in Abbildung 5 für die verschiedenen Werkstoffe aufgetragen. Am günstigsten liegen die Al-Legierungen mit Reißlängen bis zu 17 km. Die Mg-Legierungen, wie z. B. Elektron AZM, ferner die hochwertigen Stähle mit einer Zugfestigkeit von 120 kg/mm²



$$\text{Reißlänge } R = \sigma_{zB} / \gamma \text{ (km)}$$

Abb. 5

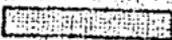
Reißlängen der Flugzeugwerkstoffe

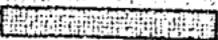
sowie Buchenschichtholz erreichen Reißlängen von etwa 15 bis 16 km. Die Preßstoffe besitzen heute Reißlängen von etwa 12 km; neuerdings sind jedoch Preßstoffe mit Glasgewebeeinlagen in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt versuchsmäßig hergestellt worden, die Reißlängen bis 30 km ergeben haben. Ihr industrieller Einsatz wird z. Z. von der Dynamit AG. vorbereitet.

Für die Dimensionierung vieler Teile des Flugzeugs, wie z. B. der Holmstege oder der Beplankung, sind Knickbeanspruchungen maßgebend. Als besonders typische Knickbeanspruchung soll hier das Ausbeulen ebener Platten behandelt werden, wie es sowohl bei Druck- als auch bei Schubbeanspruchungen auftritt. Wie in Abbildung 6 oben angegehen, ist die Beullast P bei gegebenen Feldgrößen und Randbedingungen dem Elasti-

Beullast P prop. $E \cdot s^3$; $s =$ Wandstärke
 Gewicht bei gleicher Beullast G prop. $\gamma/E^{1/3}$

$$E^{1/3}/\gamma \left(\frac{\text{m}^{2/3}}{\text{kg}^{1/3}} \right)$$

Al-Leg.  0,7

Mg-Leg.  0,9

Stahl  0,35

Sperrholz  1,3...1,4

Abb. 6

Beulfestigkeit ebener Platten aus verschiedenen Werkstoffen

zitätsmodul E und der dritten Potenz der Wandstärke s proportional. Will man daher auf gleiche Beullast konstruieren, so ist das aufzuwendende Gewicht der Größe $\gamma/E^{1/3}$ verhältig. Der reziproke Wert hiervon ist ein ähnliches Maß für die Beulfestigkeit der Werkstoffe wie die Reißlänge; er ist hier dargestellt. Die Baustoffe mit geringem spezifischem Gewicht, wie Sperrholz und Magnesiumlegierungen, verhalten sich hier nach gegenüber Beulbeanspruchungen besonders günstig. Sie werden daher heute bevorzugt für Verkleidungen und andere nichttragende Teile verwendet. Das Stahlblech schneidet dagegen bei diesem Vergleich sehr schlecht ab, da es infolge seiner geringen Wandstärke, die aus Gewichtsgründen gewählt werden muß, sehr zum Ausbeulen neigt. Beim Einsatz von Stahlblech für die Beplankung oder für Verkleidungen muß daher das Stahlblech durch zahlreiche Versteifungsprofile oder durch Stützstoffe, wie sie in Form der Kunststoffschäume sich heute in Entwicklung befinden, abgestützt werden.

Beut der Steg eines Holmes oder die Beplankung eines Flügels durch Schußbelastung aus, so ergibt sich zwar eine starke Faltung, die Belastungsfähigkeit der Konstruktion ist aber nicht erschöpft. In der Beplankung entstehen nämlich Zugspannungen, die ungefähr in Faltenrichtung verlaufen und die eine ähnliche Kraftaufnahme bewirken wie die Zugdiagonalen in einem Fachwerkträger. Aus Bruchversuchen, die bei zahlreichen Flugzeugfirmen durchgeführt wurden, haben sich als

Bruchschubspannungen für derartige Zugdiagonalfelder die in Abbildung 7 genannten Werte ergeben, die wiederum zu einem Vergleich der Werkstoffe untereinander durch das spezifische Gewicht dividiert sind. Für die Beplankung mit ihren geringen Wandstärken liegen die Werte niedriger als für die Holmstege, die infolge ihrer größeren Dicke erst bei höheren Lasten ausbeulen und daher auch im Zugdiagonalfeld eine größere Tragfähigkeit besitzen. Sowohl bei der Beplankung als auch

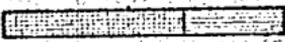
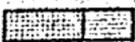
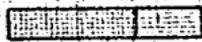
<u>Beplankung</u>		τ/γ (km)
Al-Leg.		3.5...5.5
Sperrholz		1.5...2.5
<u>Holmstege</u>		
Al Leg.		5.5...6.5
Sperrholz		2.5...3.8

Abb. 7

Bruchschubspannungen für Zugdiagonalfelder

bei den Holmstegen erweist sich das Leichtmetall dem Holz bei weitem überlegen. Für eine Bewertung der Stahlbleche in dieser Richtung liegen vorläufig noch nicht genügend Versuche vor, da die Herstellung dünner, hochwertiger Stahlbleche mit guter Planheit, wie sie diese Bauteile erfordern, erst in letzter Zeit gelungen ist.

IV. Die Verarbeitbarkeit der Werkstoffe

Neben den reinen Festigkeitseigenschaften spielt für das Gewicht der Konstruktion auch die Verarbeitbarkeit der Werkstoffe eine große Rolle; denn sie beeinflusst die Möglichkeit, die aus Festigkeitsgründen günstigsten Formen zu wählen.

Die wichtigsten Arten der Verarbeitung in der Flugzeugindustrie sind die spanlose Verformung, die spanablebende Bearbeitung und die Verbindung der einzelnen Bauelemente untereinander durch Niete, Schweißen oder Leimen. Die Arbeitsstunden, die für diese Arbeiten bei den Flugzeugwerken und ihren Unterlieferanten aufgewendet werden

lassen, stellen etwa zwei Drittel des Gesamtarbeitsaufwandes für die Herstellung einer Flugzeugzelle dar. Der Rest der Arbeitsstunden entfällt auf Zusammenbau der Teile, Vorbereitung und Einbau der Ausrüstung sowie auf Abnahme und Einfliegen; er ist von der gewählten Bauweise und dem Werkstoff ganz oder annähernd unabhängig.

1. Spanlose Verformung

Die spanlose Verformung von Blechteilen in Druck- oder Ziehpressen nimmt heute in den Flugzeugwerken einen außerordentlichen Raum ein. Im Karosseriebau sind diese Verfahren seit langem bekannt. Die Leichtmetalllegierungen lassen sich hierbei infolge ihrer niedrigen spezifischen Festigkeit in geglühtem oder frisch vergütetem Zustande sehr leicht und gut verformen. Als Werkstoff für Gesenke genügen vielfach Hartholz oder Magnesiumlegierungen. Bei Stahlteilen wird, wenn irgend möglich, Tiefziehblech wegen seiner guten Verformungsfähigkeit benutzt, das jedoch nur Bruchfestigkeiten bis 50 kg/mm^2 besitzt und infolgedessen bei Gewichtsgleichheit den Leichtmetallblechen festigkeitsmäßig erheblich unterlegen ist. Für stärker beanspruchte Teile müssen daher Stahlbleche höherer Festigkeit verwendet werden. Diese neigen infolge ihrer geringeren Dehnbarkeit bei der Verformung zum Einreißen und federn nach dem Herausnehmen aus den Gesenken stark zurück. Als Baustoff für die Gesenke wird heute bei den Stahlblechen aller Festigkeiten ausschließlich Grauguß oder Stahl benutzt. Der hiermit verbundene hohe Material- und Arbeitsaufwand hat zur Folge, daß Änderungen in der Großserie, die aus taktischen oder technischen Gründen notwendig werden, bei Stahlteilen zu ihrer Durchführung viel mehr Zeit erfordern als bei Leichtmetallteilen. Auch das Nachrichten von Stahlblechteilen, z. B. beim Anpassen verschiedener Teile aneinander, ist wegen des starken Rückfederns des Stahles sehr schwierig. Verkleidungen aus Stahlblech und ihre benachbarten Teile müssen daher sehr formgenau hergestellt werden, wodurch sich ein Mehraufwand an Lehren ergibt.

In der spanlosen Verformung von Holz sind in letzter Zeit ganz erhebliche Fortschritte erzielt worden. Zum großen Teil ist dies auf die Arbeiten der Firma Behr, Wendlingen, zurückzuführen. Das Holz wird hierbei in Form von Buchenurnieren mit Zwischenlagen von Tegofilm in Pressen eingelegt und dann unter gleichzeitiger Erwärmung verpreßt.

2. Spanabhebende Bearbeitung

Den Umfang der spanabhebenden Bearbeitung möglichst zu verringern, ist heute das Bestreben eines jeden Fertigungsingenieurs. Denn die spanabhebende Bearbeitung bringt notwendigerweise einen Materialver-

lust mit sich, da die Späne auch bei sorgfältiger Rückführung des Schrottes zu den Herstellerwerken nur mit erheblichen Verlusten eingeschmolzen werden können. Eine große Verspannung bedingt daher eine Mehrerzeugung von Werkstoffen in den Halbzeugwerken. Trotzdem wird im Flugzeugbau heute noch vielfach von dem angelieferten Halbzeug die Hälfte und mehr verspannt, bis das Fertigteil entsteht. Durch weitgehendes Vorschmieden, Vorpressen oder ähnliche Fertigungsverfahren, die eine geringe Materialzugabe gestatten, wird dieser Uebelstand bekämpft.

Um einen Maßstab zu gewinnen, welchen Aufwand die Bearbeitung der verschiedenen Werkstoffe in den mechanischen Werkstätten erfordert, wurde die Verspannungsarbeit errechnet, die für die Erzeugung von 1 kg Spangewicht aufzuwenden ist (Abbildung 8). Die Werkstoffe ordnen sich hierbei entsprechend ihren Bruchfestigkeiten ein. Die geringste Verspannungsarbeit besitzen die Magnesiumlegierungen; ihnen folgen die Aluminiumlegierungen; während bei den Stählen je nach ihrer Zerreißfestigkeit die Verspannungsarbeit sehr verschieden ist und den doppelten Wert der Aluminiumlegierungen erreicht.

Der Unterschied zwischen der Verspannbarkeit der Leichtmetalle und der Stähle ist jedoch wesentlich größer, als diese Abbildung andeutet. Dies zeigt schon eine Betrachtung der Schnittgeschwindigkeiten, mit denen die Werkstoffe zweckmäßig bearbeitet werden (Abbildung 9). Während die Verspannungsarbeiten je kg Spangewicht, wie wir in Abbildung 8 gesehen haben, sich zwischen den Magnesiumlegierungen und den hoch-

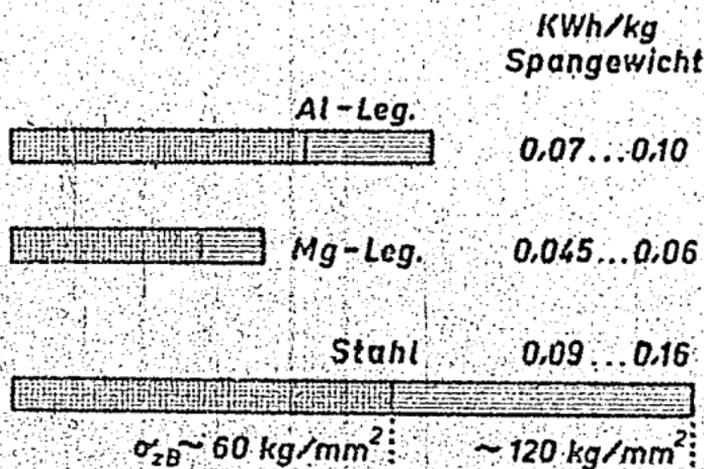


Abb. 8
Verspannungsarbeit der Flugzeugwerkstoffe

wertigen Stählen nur im Verhältnis 1:3 verändern, unterscheiden sich die Schnittgeschwindigkeiten um das Verhältnis 1:50. Die geringen Schnittgeschwindigkeiten beim Stahl haben zur Folge, daß entweder die Bearbeitungszeiten für Stahlteile wesentlich länger sind als für Leichtmetalle oder daß erheblich schwerere Werkzeugmaschinen eingesetzt werden müssen. Wollte man die gleiche Arbeitszeit bei den verschiedenen Werkstoffen erzwingen, so würde sich auf Grund der hier genannten Schnittgeschwindigkeiten und der vorhin gezeigten Verspannungsarbeiten Schnittkräfte für eine Verspannung von 1 kg Werkstoff/min. ergeben, wie sie in der rechten Spalte der Abbildung 9 angegeben sind. Diese Werte

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit m/Min	Schnittkraft ^a kg
Al-Leg.	150...250	100...150
Mg-Leg.	400...500	30...40
Stahl		
$\sigma_{zB} \sim 60 \text{ kg/mm}^2$	15...25	1000...1500
$\sigma_{zB} \sim 120 \text{ kg/mm}^2$	10...15	2000...3000

^a Schnittkraft bei einer Verspannung von 1 kg Werkstoff je Minute

Abb. 9

Schnittgeschwindigkeiten und Schnittkräfte der Flugzeugwerkstoffe

steigen von den Magnesiumlegierungen bis zu den hochwertigen Stählen auf den 100fachen Wert. Die Werkzeugmaschinen zur Bearbeitung der hochwertigen Stähle müßten also entsprechend diesem Verhältnis schwerer sein. Es ist ohne weiteres einzusehen, daß diese Bedingung nicht erfüllt werden kann. Man benötigt daher für die wirtschaftliche Bearbeitung der hochwertigen Stähle sowohl schwerere Werkzeugmaschinen als auch größere Arbeitszeiten. Diese Gesichtspunkte sind für Umstellungen von Leichtmetall auf Stahl, wie sie heute vielfach vorgenommen werden müssen, von großer Wichtigkeit; sie zwingen den Stahlflugzeugbau zur weitgehenden Benutzung der spanlosen Verformung.

3. Verbindungsverfahren

Bei den Leichtmetalllegierungen werden heute fast alle tragenden Verbindungen durch Nietten hergestellt. Die Zahl der Niete in einem Flugzeug ist daher sehr groß und beträgt z. B. für ein Flugzeug von der Größe der He 111 oder der Ju 88 etwa 200 000. Trotz weitgehender Verwendung automatischer Nietmaschinen ist der Anteil der Nietung an dem gesamten Arbeitsaufwand der Flugzeuge beträchtlich. Eine Verringerung der Arbeitszeit kann ihr Ersatz durch die Punktschweißung bringen. Die Punktschweißung wird jedoch bei Leichtmetall noch nicht so sicher beherrscht, daß sie auch für tragende Teile in großem Umfange einsetzbar ist. Stahlbleche lassen sich jedoch durch Punktschweißung gut miteinander verbinden; bei Übergang von Leichtmetall auf Stahl ist daher eine Verringerung der Arbeitsstunden, die für die Verbindung der Bauteile untereinander anfallen, zu erwarten.

Besonders zeigt sich die Überlegenheit der Schweißung, wenn es gilt, Bauteile großer Wandstärken miteinander zu verbinden. Hier hat die elektrische Allbrennstumpfschweißung in den letzten Jahren neue Möglichkeiten erschlossen. So werden bei den Stahlholmten heute vielfach die Anschlußbeschläge unmittelbar an die Holmgurte angeschweißt.

Ebenso wie die Schweißung stellt das Verleimen, wie es beim Holzflugzeugbau üblich ist, eine unnützbare Überleitung der Spannungen von dem einen Bauteil in den anderen dar. Gegenüber dem Schweißen hat das Verleimen den Vorteil, daß große Flächen gleichzeitig miteinander verbunden und daher wenig Arbeitsstunden benötigt werden. Nachteilig ist jedoch, daß die miteinander verleimten Bauteile längere Zeit unter Preßdruck in Vorrichtung stehen müssen, bis die Verleimung durch Abbinden eine genügende Festigkeit erhalten hat. Leimverbindungen erfordern daher eine große Zahl von Vorrichtungen. Ihre Verringerung ist durch Anwendung der Warmverleimung möglich, da durch erhöhte Temperatur das Abbinden des Leimes erheblich beschleunigt wird.

V. Vergleich ausgeführter Bauteile

Die Mitte v. J. beginnende Verknappung auf dem Leichtmetallgebiet hat es notwendig gemacht, zahlreiche Bauteile von Leichtmetall auf Stahl oder Holz umzustellen. Dies ergibt gute Vergleichsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Bauweisen.

Eine Reihe von Bauteilen, die von Leichtmetall auf Stahl umgestellt wurden, ist in Abbildung 10 aufgeführt. Gleichzeitig sind das Fertigungsgewicht, die Werkstoffkosten und die Gesamtkosten der Stahlausführung in Hundertteilen der Leichtmetallausführung angegeben. Die Fertig

**Aufwand der Stahlausführung
in Hundertteilen der Leichtmetall - Ausführung**

Bauteil	Fertig- gewicht	Werkstoff- kosten	Gesamt- kosten
Motorträger Ju 88	105	50	50
Triebwerk- Verkleidung Me 110	106	25	25
Knickstrebe Ju 90	75	11	57
Höhenflossanhalm He 177	100	72	100
Beschlag Hs 129	68	16	19
Hebel He 177	64	10	44

Abb. 10
Von Leichtmetall auf Stahl umgestellte Bauteile

gewichte, die in der ersten Spalte genannt sind, liegen bei den Stahlteilen z. T. etwas höher als bei den Leichtmetallteilen. In einigen Fällen würden durch die Umstellung auf Stahl auch erhebliche Gewichtseinsparungen erreicht. In diesen Fällen war offensichtlich das Leichtmetall fehl am Platze und nur aus Gewohnheit als Konstruktionswerkstoff eingesetzt worden. Die Kosten für den Werkstoff, die in der zweiten Spalte angegeben sind, werden bei den Stahlteilen infolge des niedrigen Preises des Stahles zum großen Teil sehr erheblich kleiner. Dieser niedrige Materialpreis wirkt sich auch bei den Gesamtkosten aus.

Auch die Umstellung von Leichtmetall auf Holz hat sich besonders bei nichttragenden Teilen vielfach als vorteilhaft erwiesen. Eine Gegenüberstellung von 25 Teilen, die bei der Me 109 von Leichtmetall auf Holzformteile umgestellt wurden, ergab eine mittlere Einsparung von 20% an Gewicht und von 60% an Gesamtkosten.

Die Überlegenheit der Stahl- und Holz Ausführung über die Leichtmetallausführung, die sich eben vielfach gezeigt hat, darf jedoch nicht als allgemein gültig angesehen werden. Denn bei der Umstellung von Leichtmetall auf Stahl oder Holz wurden solche Teile bevorzugt in Angriff genommen, bei denen die Umstellung besonders aussichtsreich war.

Etwas anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn man große tragende Bauteile miteinander vergleicht. In Abbildung 11 sind das Gewicht und der Arbeitsstundenaufwand für einige Flügel dargestellt, die

Mehraufwand gegenüber Leichtmetall in Hundertteilen der Leichtmetall-Ausführung

Muster	Bauweise	Gewicht	Arbeitsstunden
Ju 252/352	Holz einschl. Holm	+20...30	-20
Ar 232/432	Holz "	+25	-25...30
Si 204	Holz "	+20	±0
Me 109	Holz mit Stahlholm	±0	-40
FW 190	Stahl einschl. Beplankung	+10...15	?

Abb. 11
Vergleich verschiedener Flügelbauweisen

ursprünglich in Leichtmetall gebaut wurden und die heute in Holz- oder Stahlkonstruktion vorliegen oder in Arbeit sind. Die Änderungen des Gewichts und der Arbeitsstunden wurden in Hundertteilen der Leichtmetallausführung angegeben. Die Flügel der drei ersten Flugzeugmuster, bei denen Beplankung und Holme aus Holz bestehen, besitzen ein Mehrgewicht von 20 bis 30 % gegenüber der Leichtmetallausführung. Der Arbeitsstundenbedarf für den Flügel der Ju 352 wird nach den bisherigen Vorkalkulationen etwa 20 % niedriger sein als für den Metallflügel der Ju 252; ungefähr das gleiche gilt für die Ar 232 bzw. 432, bei der Si 204 tritt dagegen eine Ersparnis an Arbeitsstunden gegenüber dem in der Fertigung sehr einfachen Metallflügel voraussichtlich nicht auf. An vierter Stelle ist der Flügel der Me 109 aufgeführt, der einen Stahlholm mit Holzplattierung sowie Beplankung und Rippen aus Holz aufweist. Die günstigen Gewichte des Stahlholms bewirken, daß dieser Holzflügel wahrscheinlich mit dem Leichtmetallflügel gewichtsgleich wird; der Arbeitsstundenaufwand wird dabei um etwa 40 % niedriger liegen. Für die Fw 190, die in der letzten Reihe angegeben ist, befindet sich z. Z. ein Flügel in Konstruktion, bei dem Holm und Beplankung aus Stahl bestehen. Nach den bisherigen Berechnungen wird das Gewicht dieses Flügels um 10 bis 15 % höher sein als der Leichtmetallflügel; der Arbeitsstundenaufwand liegt noch nicht fest, da noch geklärt werden muß, inwieweit Punktschweißung für die Verbindung der Beplankungsbleche untereinander und mit den Profilen eingesetzt werden kann.

Die Bewertung der Festigkeitseigenschaften der Baustoffe und ihrer Verarbeitungsfähigkeit, die wir vorher durchgeführt haben, stimmt in allen wesentlichen Punkten mit den in dieser Tabelle gezeigten Ergebnissen überein. Die hier genannten Werte können daher auch für künftige Konstruktionen einen Anhalt bilden. Vielleicht ist zu hoffen, daß sowohl die Gewichte als auch die Arbeitsstunden für die Holz- und Stahlkonstruktionen noch etwas gesenkt werden können; denn diese Bauweisen sind heute noch nicht in dem Maße durchentwickelt wie die bisher allgemein gebräuchliche Leichtmetallbauweise.

VI. Weitere Gesichtspunkte zur Bewertung der Werkstoffe

Im Vordergrund unserer Betrachtung standen bisher die Festigkeitseigenschaften der Baustoffe, die für den Gewichtsaufwand maßgebend sind, und der Arbeitsaufwand, der von der Erzeugung der Halbzeuge bis zu ihrem Zusammenbau zur Flugzeugzelle entsteht. Daneben gibt es jedoch eine Reihe weiterer Gesichtspunkte, die für die Beurteilung der Werkstoffe wichtig sind. Hierzu gehören z. B. die Witterungsbeständigkeit, die beim Holz und bei den Magnesiumlegierungen ungünstiger ist als bei den Aluminiumlegierungen und den Stählen, ferner die Widerstandsfähigkeit gegen plötzliche Belastungen, wie z. B. bei Bruchlandungen oder bei Bruchschuß, wobei das Holz wegen seiner geringeren Arbeitsaufnahme dem Metall unterlegen ist, die Reparaturfähigkeit, die Brennbarkeit und andere Fragen mehr, auf die bei der Kürze der Zeit nicht eingegangen werden kann. Auch zwischen der Wahl des Baustoffes und der aerodynamischen Güte besteht ein Zusammenhang, da man bei Holzflügeln durch geeignete Lacke eine Oberflächengüte erzielen kann, wie sie beim Metallflügel bisher nicht möglich war. Widerstandsverringerungen von 15 bis 20% erscheinen auf diese Weise durchaus erreichbar.

VII. Überblick

Die hier durchgeführten Betrachtungen sollen andeuten, welche grundsätzlichen Überlegungen anzustellen sind, um die Eignung der verschiedenen Werkstoffe für den Flugzeugbau beurteilen zu können. Bei der außerordentlichen Mannigfaltigkeit der zu berücksichtigenden Gesichtspunkte ist eine erschöpfende Darstellung im Rahmen eines Vortrages nicht möglich; auch wird das weitere Fortschreiten der Entwicklung manche neuen Möglichkeiten erschließen, die uns heute noch unbekannt sind.

Zusammenfassend ergibt sich nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse folgendes Bild:

Bei der Schaffung der deutschen Luftwaffe im Jahre 1933 stand der Gedanke im Vordergrund, Kriegsflugzeuge mit hohen Leistungen möglichst schnell zu entwickeln. Die Wahl fiel daher mit Recht auf die Leichtmetallbauweise, für die in Deutschland aus dem Verkehrsflugzeugbau umfangreiche Erfahrungen vorlagen und die geringe Konstruktionsgewichte und damit hohe Flugleistungen ermöglicht. Durch den Verlauf des Krieges ergab sich die Notwendigkeit, auch die Höhe der Kriegsflugzeugproduktion weiterhin stark zu steigern. Hierbei machte sich der große Gesamtaufwand an Arbeit und Energie, der bei der Leichtmetallbauweise vom Rohstoff bis zum fertigen Flugzeug auftritt, nachteilig bemerkbar. Es mußte daher ein Ausweg nach Bauweisen gesucht werden, die weniger aufwendig sind als die Leichtmetallbauweise.

Wenn auch infolge des Mangels an manchen Legierungselementen die Entwicklung der Flugzeugstähle sich in Deutschland nicht so ungehindert bewegen könnte wie im feindlichen Ausland, so stehen uns doch heute Stähle zur Verfügung, die gestatten, wesentliche Teile des Flugzeugs aus Stahl mit gleichem Gewicht wie aus Leichtmetall zu bauen. Wegen der geringen Dehnfestigkeit, zu der die Stahlblechkonstruktionen infolge ihrer relativ geringen Wanddicke neigen, wird man Stahl bevorzugt an den Stellen einsetzen, wo es gilt, große Kräfte zu übertragen. Hierfür kommen vor allem Holmgurte und Stützstreben der verschiedensten Art in Betracht. Für die Beplankung bietet die Anwendung von Stahlblech dann Aussicht auf Erfolg, wenn die Beplankung hoch beansprucht wird und daher große Blechstärken erforderlich sind; dies ist z. B. bei Jagdflugzeugen mit ihren hohen Bruchlastvielfachen und geringen Flügelstärken der Fall.

Bei der Verwendung von Holz für tragende Konstruktionen sind im allgemeinen größere Baugewichte als bei den Leichtmetallkonstruktionen zu erwarten. Für nichttragende Bauteile, die hauptsächlich auf Griffestigkeit zu entwerfen sind, ist dagegen der Einsatz von Holz wegen der großen Wandstärken, die gewichtsgleiche Konstruktionen ergeben, vorteilhaft. Ganz allgemein ist ferner der Arbeitsaufwand für Holzbauteile wegen der guten Verarbeitbarkeit und Verbindungsmöglichkeit des Holzes wesentlich niedriger als für Metallbauweisen.

Über die Einsatzmöglichkeiten der Kunst- und Preßstoffe Voraussagen zu machen, erscheint verfrüht, da sie sich z. Z. noch in einer stürmischen Entwicklung befinden und ihre Anwendungsgebiete außerordentlich verschiedenartig sein können.

Die Rohstoffverknappung, die dieser Krieg mit sich gebracht hat, hat uns gezwungen, von neuem zu überprüfen, welche Bauweisen für die einzelnen Teile des Flugzeugs die zweckmäßigsten sind und wie das notwendige gesunde Gleichgewicht zwischen Leistung des Fluggeräts und Zahl der einsatzbereiten Flugzeuge zu schaffen ist. Aus der hierzu notwendigen Zusammenarbeit von Werkstoffforschung, Flugzeuggestaltung und Reihenfertigung sind neue grundsätzliche Konstruktionsgedanken entstanden. Hierzu einen Beitrag zu liefern, war der Zweck dieses Vortrags.