Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 121/122 (1943)
Heft: 2

Artikel: Flugtechnische Beispiele für den Leichtbau
Autor: Amstutz, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-53023

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

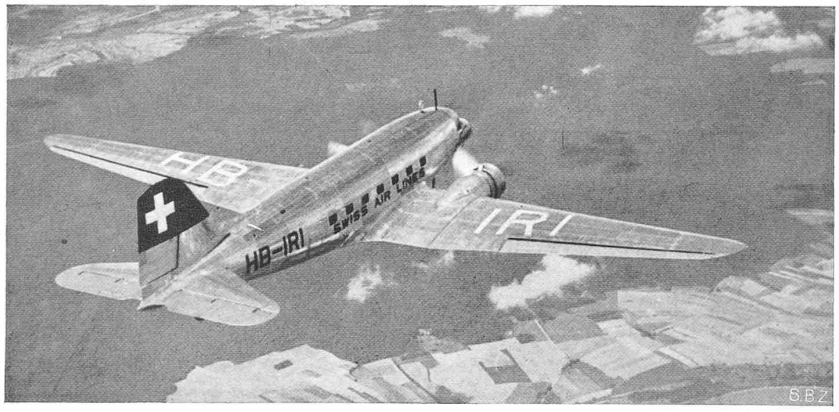


Abb. 1. Verkehrsflugzeug Douglas DC-3 der Swissair, versteifte Schalenkonstruktion

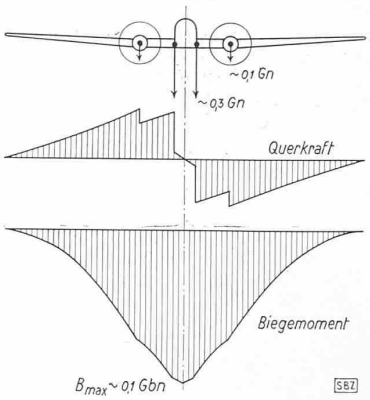


Abb. 2. Verteilung der Querkräfte und Biegemomente im normalen Flug beim Abfangen für ein zweimotoriges Flugzeug (ungefähr 20 % des Gewichtes bezw. der Massenkräfte werden am Flügel direkt auf die Luftkräfte abgestützt)

für die eine oder andere Form eindeutig entschieden werden können. Im Gegensatz zu weitgespannten Hallen steht die Entwicklung im Stahlskelettbau, im Bau von Wolkenkratzern oder Gebäuden sehr grosser Höhe. Hier ist die wirtschaftliche Ueberlegenheit einer konsequenten Funktionstrennung in tragende und raumabschliessende Bauteile eindeutig erwiesen: das Stahl-Skelett überträgt wegen seiner hohen Festigkeit die Belastungen mit minimalem Raumbedarf auf den Baugrund, während Leichtbauteile hoher Isolierfähigkeit, aber geringerer Festigkeit, wie Bimsbetonplatten, Gipsdielen, Hohlbausteine u. a. den Raumabschluss besorgen.

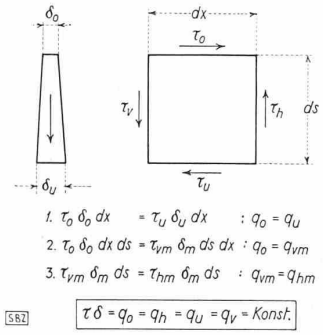


Abb. 4. An der Stirnfläche eines Elementes aus einem dünnwandigen, auf Verdrehung beanspruchten Hohlzylinder ist der Schubfluss konstant

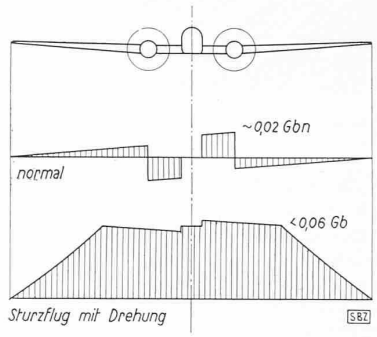


Abb. 3. Verteilung der Verdrehmomente am Flügel im normal. Flug und beim Sturzflug mit unbeschleunigter Drehung um die Längsaxe

Flugtechnische Beispiele für den Leichtbau

Von Prof. E. AMSTUTZ, Masch.-Ing., E. T. H., Zürich

Auf den meisten Gebieten der Technik sucht der Konstrukteur leicht zu bauen. Denn geringes Gewicht ist im allgemeinen gleichbedeutend mit kleinem Baustoffaufwand und daher mit kleinem Preis. Leicht bauen heisst meistens auch wirtschaftlich bauen.

Im Flugzeugbau ist der Konstrukteur aus anderen Gründen gezwungen an Gewicht zu sparen. Jedes eingesparte Gramm kommt der beim Flugzeug immer sehr beschränkten Nutzlast zu Gute oder verbessert die Flugleistungen, womit sich auch die Flugsicherheit erhöht. Der scharfe Zwang, an Gewicht zu sparen, führt im Flugzeugbau zu einem teuren Leichtbau. Diese extremen Methoden können trotzdem vielleicht Anregungen geben für den «gemässigten Leichtbau», dessen Ziel im wirtschaftlich rationellen Gestalten liegt.

Im allgemeinen führt der Leichtbau zu einer Auflösung der Konstruktionselemente. Die Telegraphenstange einerseits und der Freileitungsgittermast anderseits sind anschauliche Extreme der Entwicklung vom schweren, aber einfachen, zum leichten, aber kompliziert gegliederten Bauwerk. Der Flugzeugbau hat diese Methode hauptsächlich zu Beginn seiner Entwicklung ebenfalls angewandt. Heute findet sie aber wenig mehr Verwendung, denn sie entspricht in ihrem Wesen nicht der eigentlichen Konstruktionsaufgabe des Flugzeugbauers.

Die konstruktive Aufgabe im Flugzeugbau

Für den Flugzeugkonstrukteur handelt es sich im allgemeinen darum, eine nach aerodynamischen Gesichtspunkten vorgeschriebene äussere Form des Flugzeuges mit glatter, geschlossener Oberfläche zu einem genügend festen und steifen Gebilde zu gestalten. Wählt man zur Lösung dieser Aufgabe die aufgelöste Gitterbauweise, so muss durch eine nicht oder kaum mittragende Verkleidung — meist aus Stoff, an gewissen Stellen auch aus dünnem Blech oder Sperrholz — die geforderte Oberflächenform noch hergestellt werden. Das Gewicht dieser Verkleidung und ihrer Stützorgane erhöht das Gewicht der aufgelösten Gitterkonstruktionen. Zudem macht sich bei den hohen Fluggeschwindigkeiten die ungenügende Oberflächenglätte und die Unmöglichkeit, mit Stoffhäuten doppelt gekrümmte Oberflächen ohne Kantenbildung auszubilden, nachteilig bemerkbar. Um im Flugzeugbau zu einem rationellen Leichtbau zu kommen, muss man versuchen, die zur Oberflächenabdeckung notwendigen Flächen selbst als tragende Elemente auszubilden. Man kommt so zu einer Schalenbauweise, die aus einer dünnen Haut besteht — meistens sind es Leichtmetallbleche von 0,5 bis höchstens 2 mm Wandstärke — die durch kreuzweise verlaufende, auf der Innenseite festgenietete Verstärkungen aus ebenfalls dünnwandigen gezogenen oder abgekanteten Profilen versteift ist. Diese Bauweise, die heute vorwiegend Anwendung findet, vermochte sich allerdings auch erst allgemein durchzusetzen, nachdem einmal Flugzeuge ein- und desselben Musters in grösserer Zahl hergestellt werden konnten. Für Einzelexemplare ist sie zu teuer. Bevor auf die Wirkungsweise dieser versteiften Schalen eingetreten wird, sollen Form, Aufbau und Beanspruchung der wichtigsten Flugzeugteile kurz erläutert werden.

Die Flügel (Abb. 1) sind schmale, meist trapezförmige Flächen mit einem Seitenverhältnis (von Tiefe zu Breite) von 1 : 6 bis 1 : 10 (bei Segelflugzeugen bis 1 : 20). Ihr Querschnitt, das sog. Flügelprofil ist fischförmig mit leicht gewölbter Mittellinie, vorn gerundet, hinten in eine Kante auslaufend. Die grösste Dicke in ungefähr $^1/_3$ der Tiefe beträgt in der Flügelmitte 10 bis 18 %, aussen 5 bis 12 % der Tiefe. Dieser nach aerodynamischen Gesichtspunkten geformte Flügel erzeugt den Auftrieb, der sich in Spannweitenrichtung ungefähr der Flügelfläche entsprechend verteilt, über die Flügeltiefe im normalen Flug im Mittel in ungefähr $^1/_3$ der Tiefe angreift und nahezu senkrecht zur Flügelsehne gerichtet ist. Im Sturzflug, d. h. bei verschwindendem Auftrieb, bleibt ausser dem Widerstand in Sehnenrichtung immer noch ein kopflastiges Luftkraftmoment bestehen. Erhebliche Rückwärtsverschiebungen des Luftkraftangriffpunktes mit daraus entstehenden Verdrehmomenten stellen sich auch bei Querruderausschlägen ein.

Diese Luftkräfte stehen im Gleichgewicht mit Massenkräften, im normalen unbeschleunigten Geradeausflug z. B. mit dem Gewicht. Das Gewicht des Flügels selber und seiner Einbauten und die diesen Gewichten entsprechenden Massenkräfte stützen sich ziemlich direkt auf die Luftkräfte. Alle übrigen Gewichte, die im allgemeinen im Rumpf, d. h. in Flügelmitte, bei grösseren Flugzeugen zudem noch in Motorgondeln oder sonstwie über den Flügel verteilt sind, wirken als Einzelkräfte am Flügel (Abb. 2). Aus diesen Belastungen folgen Biegemomente, die von den Flügelspitzen gegen die Flügelmitte zu erheblich ansteigen, und Verdrehmomente um eine noch zu definierende Axe, die ebenfalls nach der Flügelmitte hin grösser werden (Abb. 2 und 3).

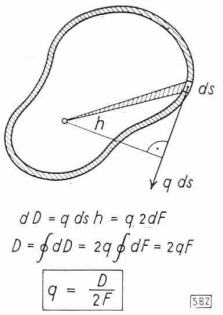


Abb. 5. Ermittlung des Schubflusses für den auf Verdrehung beanspruchten dünnwandigen Hohlzylinder nach Bredt

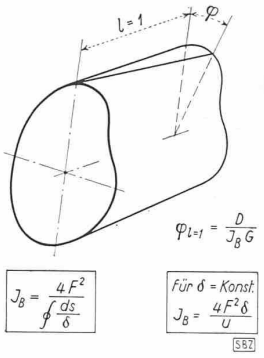


Abb. 6. Massgebende Trägheitsmomente für die Verdrehsteifigkeit von dünnwandigen Hohlzylindern

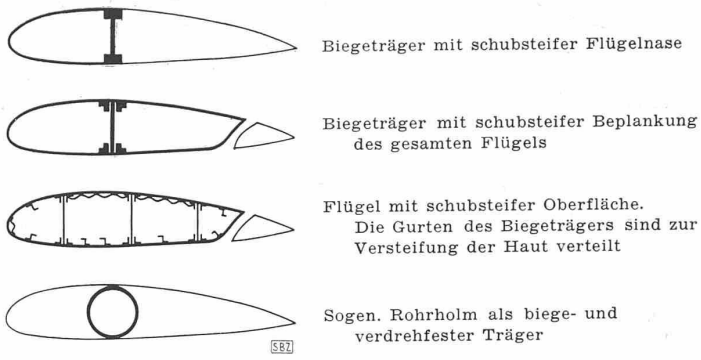


Abb. 7. Ausführungsformen der Hohlzylinder beim Flugzeugflügel

Bei beschleunigten Flugzuständen, besonders beim Hochreissen aus grossen Geschwindigkeiten entstehen Beanspruchungen, die ein Mehrfaches, und zwar das 2,5 bis 8fache derjenigen des unbeschleunigten Geradeausfluges erreichen. Die Verteilung der Kräfte und Momente bleibt aber im wesentlichen die gleiche, abgesehen von komplizierteren Lastfällen, z. B. mit Drehungen um die Längsaxe usw. Gegenüber diesen Beanspruchungen, die im Flugbetrieb noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftreten, muss eine Sicherheit gegen bleibende Verformungen und gegen Bruch vorhanden sein. Diese Sicherheiten sind verhältnismässig klein und betragen 1,25 bzw. 1,8 bis 2,0. Ein Flügel vermag somit das 4,5 bis 15fache des Fluggewichtes zu tragen, bis er zum Bruch kommt, entsprechend mittleren Flächenbelastungen von 300 bis 3000 kg/m², wobei örtlich aber im Betrieb auch Drücke von der Grössenordnung von 2500 bis 4000 kg/m² auftreten können. Analog werden die Rümpfe auf Verdrehung und Biegung beansprucht durch die zum Gesamtgleichgewicht notwendigen Luft- und Massenkräfte, ferner auch durch die Stösse bei Start und Landung.

Es handelt sich somit schlussendlich für den Konstrukteur darum, ein dünnwandiges Hohlgebilde mit vorgeschriebener Form der Oberfläche biege- und verdrehfest zu bauen, wobei auch Forderungen bezüglich ausreichender Steifigkeit zu erfüllen sind. Die Flügel dürfen allerdings ziemlich biegeweich sein, dagegen müssen sie sehr verdrehsteif sein, denn die Luftkräfte ändern sich sehr erheblich mit dem Winkel, unter dem die Flügel angeströmt werden. Es ist deshalb notwendig, dass der Flügel auch unter Last die gewünschte Form beibehält und sich im normalen Flug über die Halbspannweite nicht mehr als etwa $^1/_2{}^0$ bis, für extrem ungünstige Lastfälle, maximal $3\,^1/_2{}^0$ verdreht. Zudem dürfen auch die Frequenzen der Verdreh-Eigenschwingungszahlen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten.

Von den Problemen, die sich dem Konstrukteur bei der Lösung dieser Aufgabe stellen, sollen nur zwei charakteristische Fälle herausgegriffen und an einfachen Beispielen erläutert werden. Dabei soll in erster Linie versucht werden, anschaulich zu bleiben. Die beiden Beispiele betreffen

1. Den Begriff des *Schubflusses* und seine Anwendung und
2. Das Kräftespiel in den Schalen *nach dem Ausbeulen* einzelner Hautelemente.

Der Schubfluss und seine Anwendung

Für dünnwandige Hohlzylinder ist die Ermittlung der Schubspannungen aus Verdrehung elementar, weil die Richtung der Schubspannungen überall durch die Tangentenrichtung an die Mittellinie der Zylinderwandung gegeben ist. Da zudem aus Gleichgewichtsgründen (Abb. 4) der sog. Schubfluss, d. h. das Produkt aus Schubspannung und Wandstärke längs des ganzen Zylinderumfangs konstant sein muss, folgt sowohl die Schubspannung, bzw. der Schubfluss als auch das für die Verdrehsteifigkeit massgebende Trägheitsmoment aus ganz einfachen Beziehungen in Funktion der Querschnittsabmessungen (Abb. 5 und 6). Sie sind hauptsächlich von der vom Zylinderumfang umschlossenen Querschnittsfläche abhängig.

Um einen verdrehsteifen Flügel oder Rumpf zu erhalten, gilt es nach diesen Beziehungen einen möglichst grossen Teil der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche durch den dünnwandigen Blechzylinder zu umschliessen, wobei immerhin zu beachten ist, dass das Verhältnis zwischen Fläche und Umfang auch mitspielt und infolgedessen allzusehr von der Kreisform abweichende Zusatzflächen nur wenig und jedenfalls unwirtschaftlichen Gewinn an Steifigkeit bringen (Abb. 7).

Damit ist bereits der wichtigste Gesichtspunkt dargelegt, nach dem die auf Verdrehung beanspruchten Flugzeugteile bemessen werden. Die Möglichkeit, ein Drehmoment in der beschriebenen Art und Weise nur durch Schubspannungen zu übertragen, ist indessen bei nicht kreisförmigen oder ähnliche Symmetrieeigenschaften aufweisenden Querschnitten an die Möglichkeit gebunden, dass sich der Querschnitt verwölben kann. Denn die Verformung eines quadratischen Elementes durch reinen Schub kann in Richtung der einen, oder der zugeordneten, oder beider Schubspannungsrichtungen zugleich erfolgen (Abb. 8 oben). Vergleicht man die geometrische Verformung, die einer reinen Drehung unter Wahrung der Querschnittsform entspricht, mit der durch den Schubfluss entstehenden Gesamtverformung, so ergibt sich auch diese Querschnittsverwölbung auf elementarem Wege (Abb. 8). Sie wird dann von praktischer Bedeutung, wenn sie sich aus irgendwelchen Gründen nicht frei ausbilden kann, also dann, wenn sich das Drehmoment oder die Querschnittsform sprungweise ändern. Für das Drehmoment ist dies z. B. an Einleitungsstellen, insbesondere in der Flügelmitte der Fall (Abb. 9).

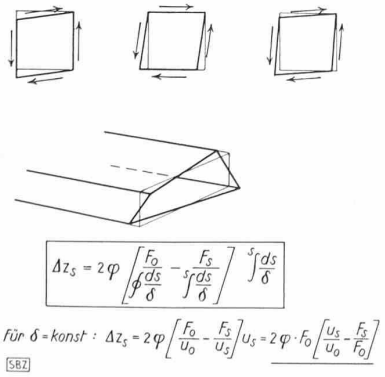


Abb. 8. Ausbildung der Querschnittsverwölbung beim dünnwandigen, auf Verdrehung beanspruchten Hohlzylinder

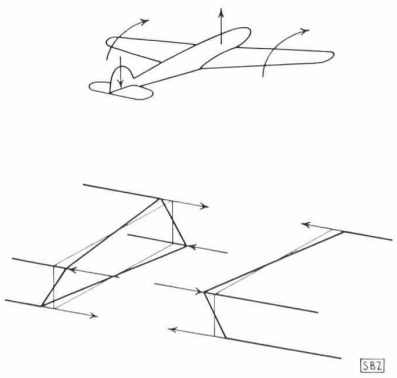


Abb. 9. Längsspannungen in Flügelmitte bei gleichsinniger Verdrehung beider Flügel zum Ausschalten d. Querschnittsverwölbung

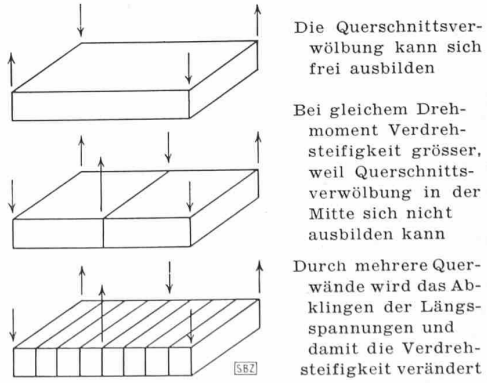


Abb. 10. Die Verdrehsteifigkeit eines rechteckigen Hohlzylinders ist abhängig von der Art der Belastung

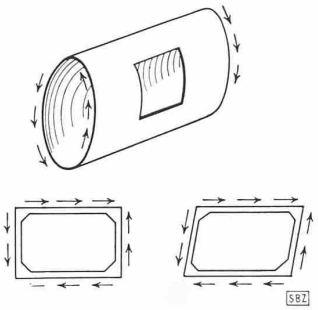


Abb. 11. Ueberbrückung von Ausschnitten beim auf Verdrehung beanspruchten dünnwandigen Hohlzylinder durch eckensteife Rahmen

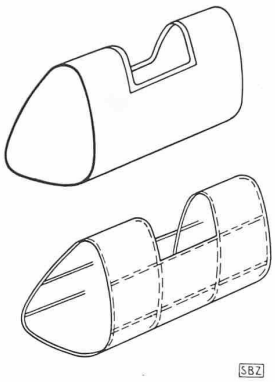


Abb. 12. Ueberbrücken von Ausschnitten in stark gewölbten Teilen von Zylinderschalen durch Rahmen oder durch Kräfteumleitung mittels Längs- und Querversteifungen

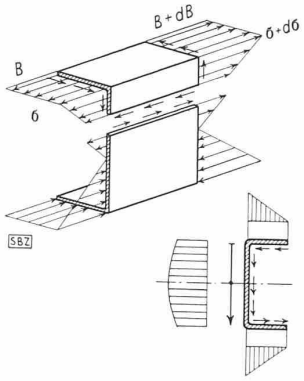


Abb. 13. Verteilung der Schubspannungen am U-Profil bei Querkraftbiegung und ihre Resultierende

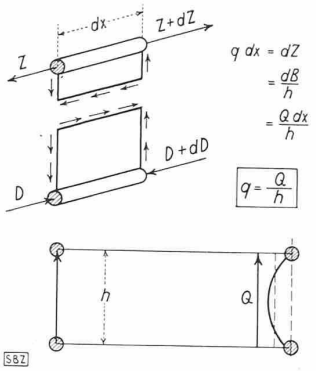


Abb. 14. Der Schubfluss bei Querkraftbiegung im dünnwandigen geraden oder krummen Steg eines Biegeträgers mit starken Gurten und seine Resultierende

Die dort bei gleichsinniger Flügelverdrehung aus Symmetriegründen erforderliche Ausschaltung der Querschnittverwölbung erfordert Längsspannungen von zyklisch wechselndem Vorzeichen und der gesamtresultierenden Null, die über die Flügelspannweite abklingen. Wie noch zu zeigen sein wird, verändert sich damit der Schubfluss über den Zylinderumfang und damit auch die Verdrehsteifigkeit. Ein flachrechteckiger Hohlzylinder kann bei behinderter Querschnittsverwölbung um 10 bis 30% oder um noch mehr verdrehsteifer sein als bei freier Verwölbung. Bemerkenswert ist, dass somit die Verdrehsteifigkeit eines solchen Hohlzylinders von der Art der Verdrehbelastung abhängig ist (Abb. 10).

Weitere Störungen des konstanten Schubflusses treten in den dünnwandigen Röhren auf, wenn Oeffnungen herausgeschnitten werden, indem dann das fehlende Hautstück seine Schubfunktion nicht übernehmen kann. Der naheliegende Ersatz ist ein steifer Rahmen längs des Randes der Oeffnung, der dieselbe Gesamtverformung aufweisen soll, wie das Element, das er ersetzt (Abb. 11). Um darüber hinaus auch keine örtlichen Zerrungen zu erzeugen, sollte der Rahmen auch im einzelnen der einfachen Schubverformung folgen, was indessen praktisch kaum erreichbar ist, sodass stets mit örtlichen Spannungshäufungen zu rechnen ist.

Für grössere Ausschnitte, hauptsächlich auch bei Ausschnitten in stark gewölbten Partien der Schalen (Abb. 12), werden diese Aussteifungsrahmen zu schwer und es empfiehlt sich, wenigstens für die flugtechnischen Schalenformen, eine andere Form der Aussteifung, die im wesentlichen eine Kräfteumordnung darstellt. In den durch Ausschnitte zu einem offenen Querschnitt gewordenen Schalenabschnitten (Abb. 12) kann, sofern auf den Rahmen verzichtet wird, bei reiner Verdrehung kein konstanter Schubfluss mehr bestehen. An den offenen Rändern muss der Schubfluss verschwinden und im übrigen die Verteilung sich so einstellen, dass als Resultierende das äussere Drehmoment entsteht. Variable Schubflüsse sind nur in Verbindung mit ebenfalls veränderlichen Längsspannungen möglich, wie sie etwa bei Querkraftbiegung vorkommen. In Abb. 13 wird daran erinnert, wie sich z. B. für ein ⊏-Profil die Verteilung der Schubspannungen und damit des Schubflusses aus den Gleichgewichtsbedingungen für die Biegespannungen ermitteln lässt. Die Resultierende des Schubflusses im Steg hat nach Grösse und Richtung mit der Querkraft übereinzustimmen und ihre Lage muss, um mit dem Moment der Flanschschubflüsse verträglich zu sein, in der gezeichneten exzentrischen Lage durch den Schubmittelpunkt[1]) gehen. Auf Grund dieser Zusammenhänge gelingt es in der Regel, eine passende Schubflussverteilung und die zugehörigen Längsspannungen zu ermitteln.

Zur Vereinfachung soll im Folgenden angenommen werden, dass sich die Längsspannungen auf einige wenige Gurtstäbe konzentrieren und die dazwischen liegenden Hautfelder nur auf Schub beansprucht sind. Die Schubflüsse können sich dann bei den Gurtstäben sprungweise ändern, indem sich die Schubflussunterschiede an diesen Stäben als Längsspannungen absetzen. Aehnlich finden wir beim Biegeträger mit starken Gurten und dünnem Stegblech (Abb. 14) bei Querkraftbiegung einen konstanten Schubfluss im Steg, der gewissermassen die Querkraft in eine Zunahme der Zug- bzw. Druckkräfte in den Gurten umsetzt. Ist der Steg nicht eben, sondern gewölbt, so verlagert sich die Schubflussresultierende (was aus Abb. 5 verständlich wird) wie beim ⊏-Profil nach aussen.

Versehen wir nun die Schale nach Abb. 15 längs der Berandung des Ausschnittes und an zwei weiteren Stellen parallel dazu mit Längsgurten, dann kann der Schubfluss in den drei Feldern zwischen diesen vier Gurten ohne Schwierigkeit so eingerichtet werden, dass er ein resultierendes Moment liefert (Abb. 15). Um die Abstützung der Gurtlängskräfte überblicken zu können, löst man nach Abb. 16 den Schalenabschnitt in seine Elemente auf und betrachtet das Gleichgewicht jedes einzelnen Teiles. Die Gurtstäbe müssen offenbar durch die benachbarten geschlossenen Schalenabschnitte gestützt und zwar abwechslungsweise gedrückt und gezogen werden. Diese Längskräfte sind somit von gleichem Charakter wie die Längsspannungen, die bei behinderter Querschnittsverwölbung auftreten (Abb. 9) und klingen auch in ähnlicher Weise ab. Davon kann man sich nach Abb. 18 wiederum ein Bild machen, wenn man voraussetzt, dass das Abklingen zwischen zwei Querwänden, die als Spantringe angedeutet sind, vor sich gehen soll. Durch Auflösen des Schalenabschnittes in seine Elemente und Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen für jeden Einzelteil kann man die beteiligten Schubflüsse ermitteln, und man stellt ein lineares Abfallen der Längskräfte in den vier Gurten fest. Die Schubflüsse, die unter sich im Gleichgewicht sind, setzen sich an den Querwänden ab und beanspruchen sie dabei, hauptsächlich wenn sie als Spantringe ausgebildet sind, oft sehr erheblich auf Biegung. Die unmittelbar am Ausschnittrand angeordnete Querwand wird ausserdem noch durch die Umformung der Schubverteilung des gestörten Schalenabschnittes in Anspruch genommen.

Statt durch einen Rahmen ist somit der Ausschnitt auch durch mindestens vier Querwände und vier Längsgurte zu überbrücken, was deswegen in der Regel zweckmässiger ist, weil diese Elemente als Versteifungen der Schale ohnehin notwendig sind und dann vielfach mit geringen Verstärkungen auszukommen ist. Meistens sind an solchen Ueberbrückungen von Oeff-

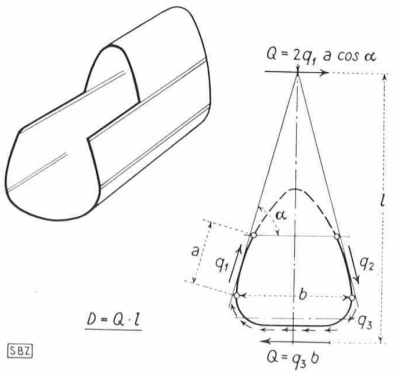


Abb. 15. Uebertragung des Drehmomentes im ausgeschnittenen Teil der Schale

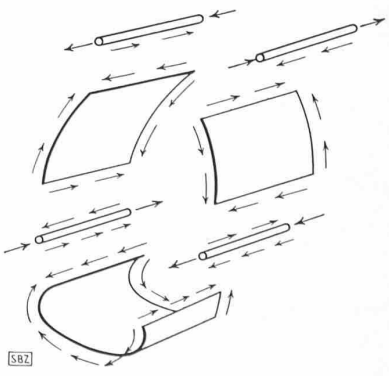


Abb. 16. Gleichgewicht an Schalenelementen u. Längsversteifungen im Ausschnittgebiet

[1]) Vgl. *R. Maillart* in Bd. 77, S. 195*; Bd. 78, S. 18 (1921); ferner in Bd. 83, S. 109* u. ff. (1924). Red.

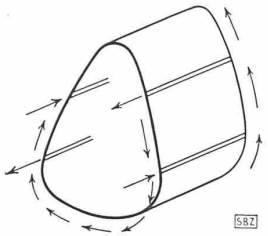


Abb. 17. Schubflüsse und Längskräfte, die im Uebergangsgebiet vor und nach dem Ausschnitt umzuformen sind

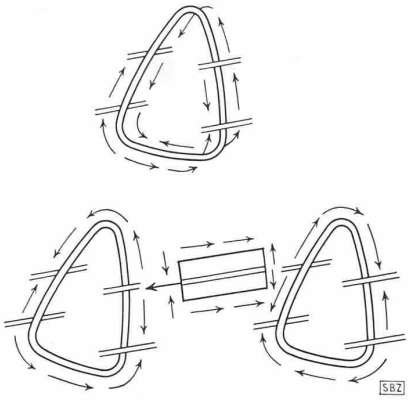


Abb. 18 (rechts). Absetzen der Schubflüsse an der Querwand am Rande des Ausschnittes (oben) und Absetzen der Längskräfte in den Gurten über die Schalenhaut auf zwei Querwände in der Uebergangszone (unten)

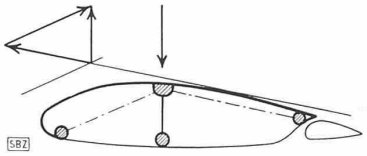


Abb. 19. Uebertragung eines Drehmomentes in einem Schalenflügel mit grossen Ausschnitten. Das Drehmoment verteilt sich auf drei Biegeträger, die alle drei einen Gurt gemeinsam haben und zum Teil krumme Stege aufweisen

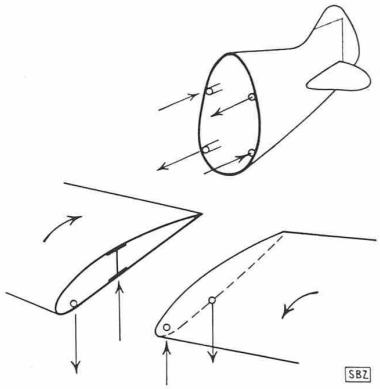


Abb. 20 (rechts). Durchleiten von Flügeldrehmomenten durch einen Rumpf. Der Schubfluss der Drehmomente wird durch Querwände in Kräftepaare umgeformt und in die (nicht gezeichneten) Rumpfseitenwände als Kräftepaare eingeleitet. Von diesen werden sie in die geschlossene Schale des Rumpfhinterteils übertragen, wo sie sich nach dem Mechanismus der Abb. 17 und 18 ins Gleichgewicht setzen können.

nungen wesentlich mehr Längs- und Querversteifungen beteiligt, als hier zur einfachen Darstellung des Mechanismus vorausgesetzt wurde. Dadurch kompliziert sich nicht nur die Schubflussverteilung, sondern vor allem das Abklingen der Längskräfte, was immerhin durch drei- oder höchstens fünfgliedrige Gleichungssysteme in der Regel befriedigend erfasst werden kann. Selbst reichlich kühne Ausschnitte in Flügeln können auf diese Weise überbrückt werden (Abb. 19), wobei allerdings sorgfältig zu prüfen bleibt, ob die Verdrehsteifigkeit auch ausreicht. Auf Grund ähnlicher Ueberlegungen kann auch die Ueberleitung von Biegemomenten und Querkräften über Ausschnitte behandelt werden, sowie auch die Einleitung und Verteilung konzentrierter Einzelkräfte oder von Kraftgruppen.

Wie hier die kraftumleitende Funktion von Schubflüssen im Grossen angedeutet wurde, lässt sie sich auch in den Einzelheiten verfolgen (Abb. 21) und kann eine klare Vorstellung vom Kräftefluss vermitteln und damit zu zweckmässigeren und leichteren Konstruktionselementen führen.

Die Beanspruchung im ausgebeulten Zustand

Wenn nun eine Flugzeug-Schalenkonstruktion auf Grund der dargestellten Ueberlegungen ausdimensioniert und als reine Glattblechschale aufgebaut würde, würde sie schon bei sehr kleinen Beanspruchungen irgendwo ausbeulen und als Folge davon zusammenbrechen. Als unversteifte Blechschale kann mit annehmbarem Gewichtsaufwand kein genügend tragfähiges Gebilde aufgebaut werden. Einzig in Holz sind solche Konstruktionen möglich, besonders aus Sperrholz, wobei neuerdings auch Stützorgane in Form von leichten Balsaholzzwischenlagen verwendet werden. In Metall ist es notwendig, die Schale durch eine Art Gerüst auszusteifen, und auch das ist nur in Leichtmetall wirtschaftlich, während das hohe spezifische Gewicht von Stahl trotz dem dreimal so grossen E-Modul auch durch diesen Ausweg keine tragbare Lösung erlaubt.

Diese versteiften Schalenkonstruktionen sind im allgemeinen so aufgebaut, dass in Richtung der auftretenden Längskräfte sog. Längsversteifungen, bestehend aus abgekanteten oder gezogenen Blechprofilen, mit der Schalenhaut vernietet sind (Abb. 22, S. 19). Ihr gegenseitiger Abstand liegt in der Grössenordnung von 5 bis 25 cm je nach Beanspruchung und Hautstärke. In Abständen von 20 bis 50 cm findet man Querversteifungen in Form von Spantringen aus Blechprofilen oder von Querwänden (im Flügel Rippen genannt), die im allgemeinen nur mit den Innenkanten der Längsversteifungen vernietet und mit der Haut nur dort direkt verbunden sind, wo diese Querversteifungen neben ihrer formhaltenden Funktion auch als kraftverteilende Elemente in Erscheinung treten und entsprechende Schubflüsse von der Haut abzunehmen haben.

Belastet man eine solche versteifte Schale, so verformt sie sich bei kleinen Lasten durchaus proportional der Belastung. Meistens stellt man aber schon bald ein verstärktes Anwachsen der Verformung fest und beobachtet gleichzeitig, wie da und dort die dünne Blechhaut zwischen den Längsversteifungen ausbeult (Abb. 23 und 24). Je mehr und je tiefere Beulen sich zeigen, umso rascher wächst die Verformung oder mit andern Worten, umso weniger steif, umso weicher wird die Schale. Entlastet man, so gehen die Verformungen im allgemeinen vollständig zurück und auch die Beulen verschwinden wieder. Erst kurz vor dem Zusammenbruch werden einzelne Beulen derart stark, dass sie bei Entlastung nicht mehr verschwinden.

Es ist nun ein Charakteristikum des Flugzeugbaues, dass man diese Beulen im Betrieb zulässt, zum mindesten bei den grössern im Flugbetrieb auftretenden Beanspruchungen. Im unbeschleunigten Flug und bei kleinen Beanspruchungen sind sie nur deshalb nicht erwünscht, weil sie die aerodynamische Güte durch die Verminderung der Oberflächenglätte herabsetzen. Es ist deshalb auch notwendig, den Spannungszustand in diesen ausgebeulten Schalen zu kennen. Was zunächst die Längsspannungen, die praktisch hauptsächlich aus Biegemomenten entstehen, anbelangt, ist vorwegzunehmen, dass Beulen nur in den auf Druck beanspruchten Zonen auftreten. Während sich die Längsversteifungen und die unmittelbar damit verbundenen Hautpartien nur durch die Stauchung des Materials mit entsprechend ansteigender Gegenkraft verkürzen können, knicken oberhalb einem kritischen Wert die Blechfelder zwischen den Längsversteifungen aus und können sich dann durch Auswölben weiter verkürzen ohne wesentliches Ansteigen einer Gegenkraft. Je grösser die Verformung, umso mehr Blechfelder werden ausknicken, umso breiter wird das einzelne Feld ausbeulen und umso mehr werden sich die Druckkräfte auf die Längsverstei-

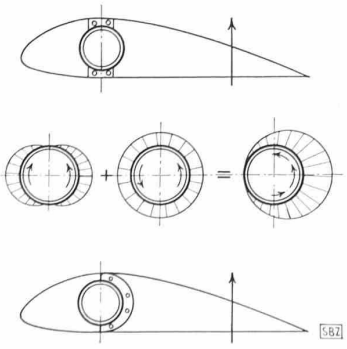


Abb. 21. Befestigung einer Rippe auf dem Holmrohr eines Ruders

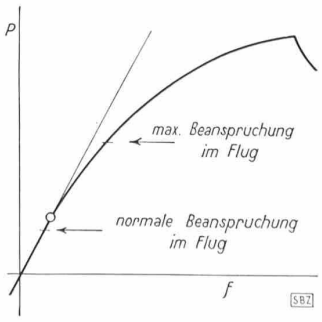


Abb. 23. Last-Verformungskurve einer versteiften Leichtmetallschale

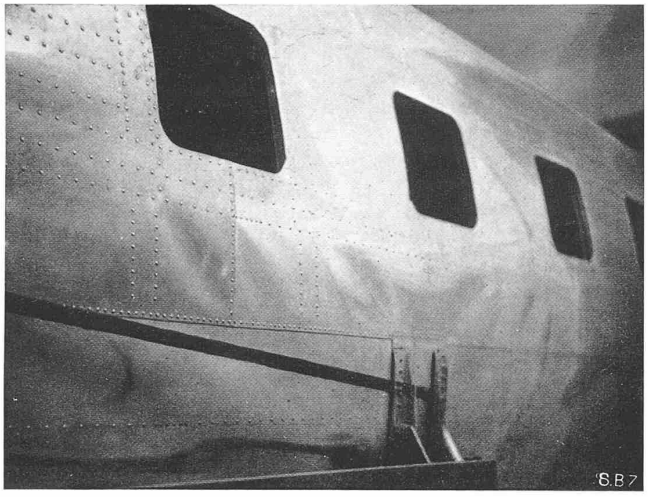


Abb. 24. Auftreten von elastischen Beulen in den hoch beanspruchten Teilen der Schalenhaut

fungen konzentrieren. Statt der vollen Feldbreite wirkt von der Haut gewissermassen nur noch eine schmale sogenannte «mittragende Breite» (Abb. 25 und 26; Für die praktische Berechnung wird die Spannungsverteilung in der Haut charakterisiert durch die sog. «mittragende Breite», definiert durch

$$^{b}\int \sigma\, \delta\, ds = \sigma_l\, \delta\, b_m$$

wobei σ_l die Druckspannung im Versteifungsprofil bedeutet.)

Wie die Haut unter Längskräften ausknickt, so knickt sie ähnlich auch unter Schubflüssen aus. Denn unter 45° zu den Schubspannungen sind bei reinem Schub als Hauptspannungen Zug- bzw. senkrecht dazu Druckspannungen vorhanden und zwar von gleicher Grösse wie die Schubspannungen (Abb. 27). Unter der Druckspannung wird ein dünnes Hautblech trotz der quer dazu verlaufenden Zugspannung ausknicken. Um dieses Ausknicken hinauszuschieben, versteift man in den besonders stark auf Schub beanspruchten Teilen der Schale, z. B. bei Ausschnitten (Abb. 28), die Blechfelder durch eng gesetzte Längsversteifungen. Für die ausgeknickten Blechfelder stellt sich wieder die Frage, wie ihre Funktionen übernommen werden. Als Beispiel kann ein Biegeträger mit ausgebeultem, sehr dünnem Stegblech (Abb. 27) die Querkraft noch tragen, sofern die Gurten und in kurzen Abständen angeordnete Pfosten die ausgefallene Druck-Komponente übernehmen, indem sie die im Blech verbleibende Zugspannung abstützen, wobei diese Zugspannung den Betrag der doppelten Schubspannung erreicht und die Schubsteifigkeit bis auf die Hälfte des Wertes für den schubsteifen Steg absinkt. Stellt man sich vor, dass nach dem Ausknicken die Funktionen der Schubfelder zum grössten Teil durch solche Zugdiagonalen übernommen werden und beachtet man die besonderen Erscheinungen, die sich aus dem Ebenziehen gewölbter Hautfelder und deren Abwinkelung über den Versteifungen ergeben, so kann man auf diese Weise wenigstens eine gewisse Vorstellung vom Spannungszustand der Haut und der Längs- und Querversteifungen gewinnen.

Durch schrittweise Näherungen können so die gefährdetsten Schalenelemente abgeschätzt werden, von denen dann Ausschnitte als sogenannte «Teilschalen» (Abb. 29) dem Versuch unterworfen werden, der einerseits die Genauigkeit der Näherungsrechnung

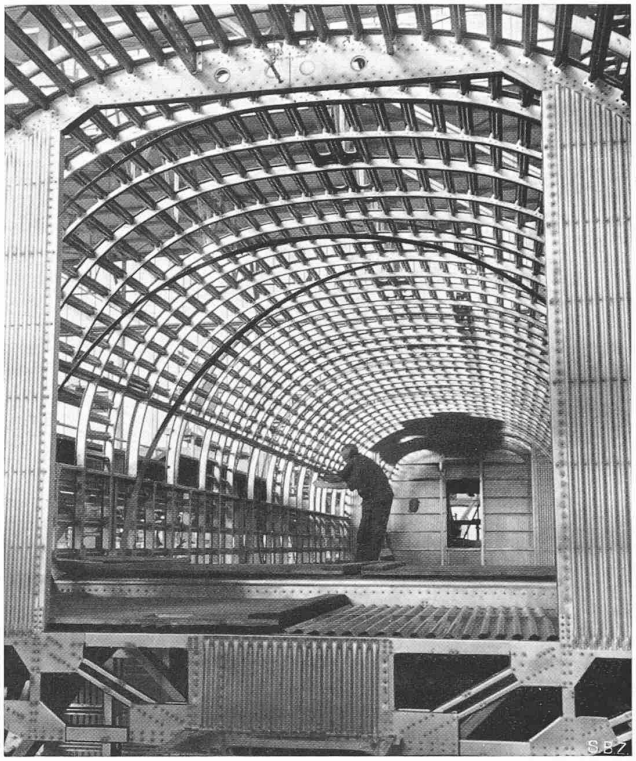


Abb. 30. Versteifungsgerippe der Rumpfschalen eines 25 t Verkehrsflugzeuges Junkers Ju-90

überprüfen lässt und anderseits meist genügenden Aufschluss gibt über die zu erwartende Bruchfestigkeit der Gesamtschale, weil deren Tragfähigkeit im allgemeinen erschöpft ist, sobald einzelne Längs- oder Querversteifungen versagen. Dieses Versagen kann durch örtliches Ausbeulen, durch Biegeknicken des durch die verbeulte Haut zusätzlich be- oder entlasteten Stabes oder schliesslich durch das dem Kippen verwandte Drillknicken eintreten. Eine zuverlässige Vorausberechnung ist meist aussichtslos und auch die Durchführung der Teilschalenversuche ist nicht leicht, wenn die gegenseitige Beeinflussung und die Einspannung der beteiligten Elemente richtig zur Darstellung kommen soll. Es wird fast immer notwendig sein, durch Versuche am fertigen Flugzeugteil zu überprüfen, ob die Voraussetzungen der Rechnung und der Teilversuche richtig waren. Wenn möglich wird man solche Versuche bis zum Bruch treiben. Für grosse Serien ist es tragbar, dafür eine Zelle zu opfern[2]).

Diese Methoden werden für die Zukunft nicht immer genügen können, vor allem nicht für sehr grosse Flugzeuge. Für die Flugzeuge von 50, 100 und 200 t Fluggewicht kommen Bruch-Versuche nicht mehr in Frage und auch die sicheren Lasten werden am ganzen Flugzeug nur unter grossen Schwierigkeiten oder überhaupt nicht anders als im Flug aufgebracht werden können. Zudem wird das geschilderte halbempirische Näherungs-Verfahren versagen, weil bei sehr grossen Flugzeugen wieder,

[2]) Eine übersichtliche Zusammenfassung der in diesem Aufsatz behandelten Probleme mit einem ausführlichen Literaturverzeichnis findet sich z. B. bei *Schapitz*: «Berechnung versteifter Schalen im Metallflugzeugbau». VDI-Zeitschrift, Bd. 86, Nr. 33/34 vom 22. August 1942.

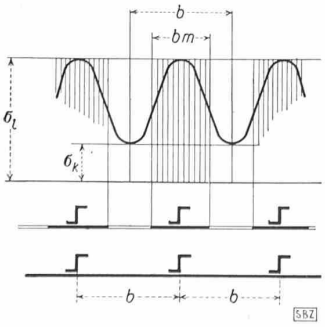


Abb. 25. Spannungsverteilung im auf Druck über die Beulgrenze beanspruchten Schalenabschnitt

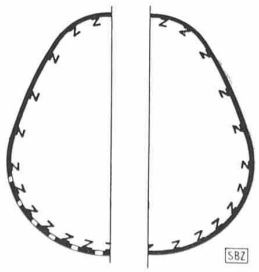
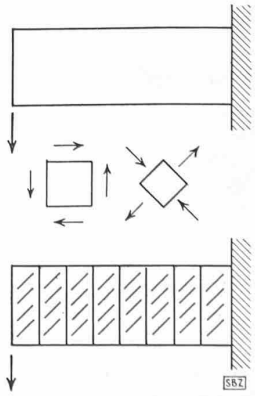


Abb. 26. «Tragender Querschnitt» eines auf Biegung beanspruchten Flugzeugrumpfes, rechts vor dem Ausbeulen, links nach dem Ausbeulen der Blechfelder in der Druckzone

Abb. 27 (rechts).
Das dünne Stegblech eines durch Querkraft auf Biegung beanspruchten Trägers ist auf Schub beansprucht. Der reinen Schubbeanspruchung entsprechen die in der Mitte rechts gezeichneten Hauptspannungen.

Knickt das dünne Stegblech unter Wirkung der Druck-Hauptspannung aus, so bleibt die Tragfähigkeit erhalten, wenn die Gurten durch enggestellte Pfosten so abgestützt werden, dass sich eine geneigte Zugspannung im Stegblech ausbilden kann



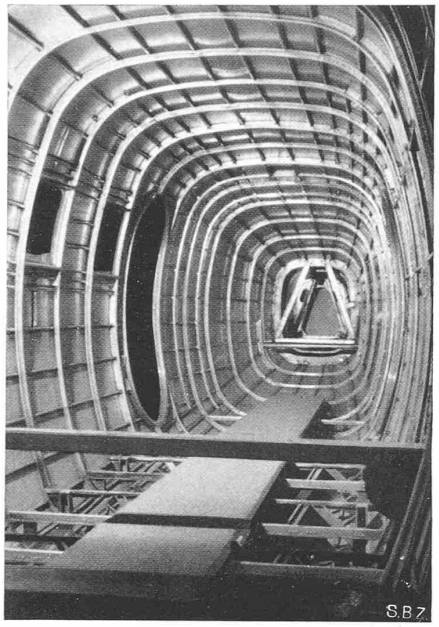


Abb. 22. Anordnung der Längs- und Quersteifungen im Leichtmetall-Schalenrumpf eines zehnplätzigen Verkehrsflugzeuges von rd. 4 t Fluggewicht

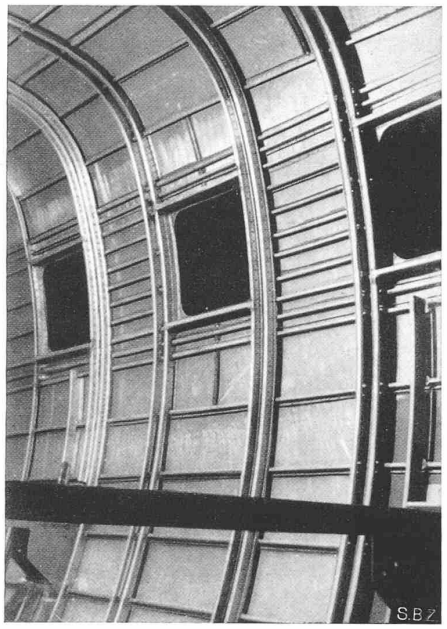


Abb. 28. Versteifungen in einem Schalenrumpf zum Ueberbrücken von Oeffnungen. Die Schubsteifigkeit der durch grosse Schubflüsse beanspruchten Hautfelder wird durch enggesetzte Längsversteifungen erhöht.

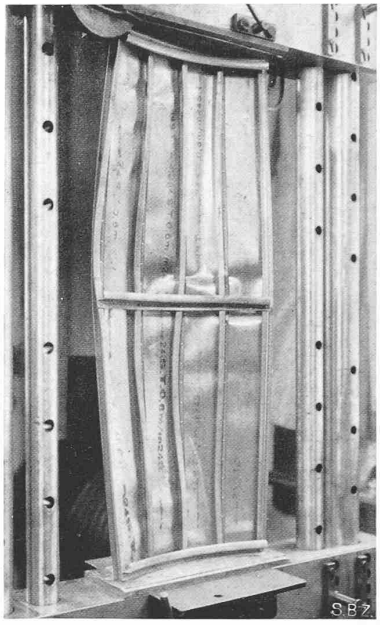


Abb. 29. Ein Ausschnitt aus einem Flugzeugrumpf wird als sog. «Teilschale» dem Druckversuch unterworfen. Die Längsversteifungen haben durch Drillknicken versagt

wie Abb. 30 im Vergleich zu Abb. 22 bereits für bestehende Flugzeuge andeutet, die Abstände und Abmessungen der Versteifungen klein werden im Verhältnis zu den Abmessungen des Schalenquerschnittes. Für die Tragfähigkeit der versteiften Schale ist dann nicht mehr das Versagen einzelner Längs- oder Quer-Versteifungen massgebend, sondern — ähnlich wie bei der unversteiften Schale — die Stabilität eines grösseren Schalengebietes. Für die Vorausberechnung dieser Stabilitätskriterien liegen gegenwärtig noch keine zuverlässigen Verfahren vor und auch der heute meistens ausreichenden Aufschluss erteilende Teilschalen-Versuch (Abb. 29) wird für die Beurteilung der Trag-Fähigkeit nicht mehr genügen. Die Lösung dieser Fragen gehört aber zu den dringenden Aufgaben der Flugzeugstatik.

*

[Im Anschluss an die vorstehenden Originalberichte der Professoren F. Stüssi und E. Amstutz geben wir nunmehr unserem Berichterstatter über den sehr aktuellen Leichtbaukurs des S. I. A. das Wort. Red.]

Allgemeiner Leichtbau und Leichtmetalle

Kurs des S. I. A. am 6. und 7. Nov. 1942 in der E. T. H., Zürich

Berichterstattung von Ing. Dr. TH. WYSS, EMPA, Zürich

Die Bestrebungen, das Konstruktionsmaterial bis zum Aeussersten auszunützen, kommen insbesondere in jenen Ländern in ausgeprägter Weise zum Ausdruck, die, wie die Schweiz, Mangel an Rohstoffen aufweisen. In der heutigen Kriegszeit mit der vermehrten Beschränkung der Rohstoffbasis drängt sich dieses Bestreben in geradezu gebieterischer Weise auf. Der S. I. A. versuchte daher durch diesen Kurs in richtiger Erkenntnis der Wichtigkeit dieser Frage durch eine Reihe von Vorträgen den heutigen Stand und die zukünftigen Ziele einem weiteren Kreise vorzuführen. Die Fülle des Stoffes soll nachfolgend nur in allgemeinen Gesichtspunkten erfasst werden, was umso eher möglich ist, als die einzelnen Vorträge gedruckt herausgegeben werden sollen.

1. Wesen, Ziel und Problem des Leichtbaues

Prof. Dr. A. THUM, Techn. Hochschule Darmstadt

Der Leichtbau ist die natürlichste Bauweise. Er trat aber nicht durchweg von Anfang an in den Vordergrund, denn es gab eine Zeit, in der nur massive und schwere Konstruktionen als das einzig Richtige angesehen wurden und eine leichtere Bauweise eine Qualitätsverminderung bedeutete. Erst allmählich kam er zur Geltung, insbesondere da, wo er entscheidend ist, d. h. im Flugzeug- und Fahrzeugbau. Von da breitete er sich dann über den Schiffbau, Brücken- und Maschinenbau aus. In der Schweiz setzten diese Bestrebungen angesichts der Materialfrage und des Konkurrenzkampfes schon sehr früh ein; so wurden bei BBC, wo der Vortragende seinerzeit tätig war, schon vor 35 Jahren Motoren gebaut, die einen höheren Leistungsgrad und trotzdem ein um 35 % geringeres Gewicht aufwiesen als die der Konkurrenz.

Leichtbau ist in erster Linie eine Sparmassnahme, wenn man von jenen Fällen absieht, wo, wie im Flugzeugbau, das Gewicht um jeden Preis vermindert werden soll. Hierbei muss versucht werden, trotz des Mehraufwandes an Arbeit eine Verbilligung herbeizuführen. Die Konstruktionen sollen nicht nur besser, sondern auch billiger, also *wirtschaftlicher* sein. Der Ingenieur hat daher die Gelegenheit, sein wissenschaftliches und praktisches Können voll zu entfalten.

Der einfachste Weg zur Erzielung von leichten Konstruktionen ist der Austausch der Werkstoffe. Dies kann einerseits geschehen durch die Verwendung von Leichtstoffen, wie Leichtmetallegierungen und Kunststoffe. Sie kommen in erster Linie im Flugzeugbau in Betracht, wo die Kostenvermehrung in Kauf genommen werden muss. Im Fahrzeugbau kommen sie in Betracht, weil dadurch die Betriebskosten wesentlich gesenkt werden können. Aber auch im Hochbau dürfte die Verwendung der Leichtmetalle möglich werden, wenn dadurch kein Mehrpreis entsteht. Anderseits kann dies geschehen durch die Wahl von Stählen höherer Festigkeit als es bisher üblich war, wofür die Verwendung von St 52 ein treffendes Beispiel im Brückenbau ist. Auch im Maschinenbau ist man in festigkeitstechnischer Hinsicht zu immer höherwertigen Stählen übergegangen, wobei hervorgehoben werden muss, dass trotz schwierigerer Verarbeitung wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können. Wesentlich zur Verminderung des Gewichtes trägt auch bei die Einführung von Schweisskonstruktionen aus schweissbarem Material. Im Bau von landwirtschaftlichen Maschinen konnte eine weitere Preissenkung der Gestehungskosten durch den Einbau von gepressten, statt geschweissten Teilen herbeigeführt werden.

Der Austausch der Werkstoffe kann jedoch nicht allein den Ausschlag geben, denn zur rationellen Ausnützung des Materials muss noch die *Lehre der Gestaltfestigkeit* kommen. Dies trifft nicht nur für den Leichtbau zu, sondern für jeden beliebigen Werkstoff. Die Konstruktion muss so gebaut werden, dass durchweg eine möglichst gleichmässige Beanspruchung angestrebt wird und Spannungsspitzen vermieden werden. Richtiges Durchkonstruieren und richtige Formgebung sind hierzu die Hauptbedingungen und durch stetes Ueben hat der Konstrukteur die Möglichkeit, sich in dieser Hinsicht ein besonderes Gefühl anzueignen.

Die Spannungsverteilung in einem Querschnitt wird durch die vom Vortragenden eingeführte *Formzahl* zum Ausdruck gebracht. Es benötigt dies die Kenntnis der Spannungsverteilung in den massgebenden Querschnitten aus Zug, Druck, Biegung und Verdrehung, was überall da durch Feindehnungsmessungen oder durch die Spannungsoptik geschehen muss, wo die genaue theoretische Erfassung versagt. Die Möglichkeit besteht, den