

Untersuchungen über die Verwendungsmöglichkeit von Kunststoffen beim Bau von Tragflächen für Segelflugzeuge

Von Ing. A. PUCK, Akademische Fliegergruppe Darmstadt e. V.

Vortrag am 7. Kongreß der OSTIV, Leszno (Polen), Juni 1958

Es wird zusammenfassend über die Entwicklung einer neuen Bauweise für Segelflugtragflächen berichtet, in der glasfaserverstärktes Äthoxylharz als hochbeanspruchter tragender Werkstoff Verwendung findet.

Um der Beulgefahr zu begegnen, wurden neuartige Wabenleichtstoffe zur Abstützung der dünnen Schalenhäute eingesetzt. Im Rahmen der Versuchsarbeiten wurden Spannungs-Stauchungs-Schaubilder mehrerer Stützstoffarten, jeweils für einige verschiedene Raumgewichte, aufgenommen. Neben der Ermittlung von Festigkeits- und elastischen Eigenschaften glasfaserverstärkter Äthoxylharze wurden Tragflügelausschnitte mit Originalabmessungen einem Belastungsprogramm unterworfen. Die zweijährige Entwicklungsarbeit wurde im Rahmen eines der Akademischen Fliegergruppe Darmstadt vom Bundesverkehrsministerium erteilten Forschungsauftrages (Nr. 12/56) durchgeführt und als Studien- bzw. Diplomarbeit von den Lehrstühlen für Werkstoffkunde und für Luftfahrttechnik an der Technischen Hochschule Darmstadt betreut.

Bereits beim Bau der ersten Nachkriegs-Eigenkonstruktion, der D-34, der Akademischen Fliegergruppe Darmstadt wurde Kunststoff, und zwar in Form eines leichten Polystyrolschaumes, zur Abstützung einer dünnen Sperrholzbeplankung des Tragflügels angewandt. Daß sich darüber hinaus auch bald ein reges Interesse der Segelflugzeugkonstrukteure an den glasfaserverstärkten Kunststoffen zeigte, ist vor allem durch die Entwicklung der Laminarprofile zu erklären, die in den letzten Jahren in steigendem Maße zur Anwendung gelangen.

Diese Profile weisen erstaunlich geringe Widerstandsbeiwerte auf, aber nur dann, wenn die theoretisch bestimmte Profilkontur in sehr guter Annäherung am Tragflügel verwirklicht wird.

Noch wichtiger ist wahrscheinlich die Forderung nach Einhaltung gewisser von der Reynoldszahl abhängiger Grenzen für die zulässige Welligkeit einer Flügeloberfläche. Die bei Verwendung von Laminarprofilen erhobenen Forderungen sind in der Tat durch die herkömmliche Holzbauweise kaum zu erfüllen, jedenfalls bisher nicht ohne erheblichen Gewichtsauwand. Man kann allerdings auch eine Holztragfläche durch mehrmaliges Spachteln, Lackieren und Schleifen sehr glatt bekommen, doch nur für begrenzte Dauer, denn bei schwankender Temperatur und Luftfeuchtigkeit verwirft sich selbst mehrfach verleimtes Sperrholz. Auch der Polystyrolschaumkern des D-34-Tragflügels konnte ein leichtes «Arbeiten» der Sperrholzbeplankung nicht verhindern. Ferner schrumpfen die Holzleime beim Aushärten mehr oder weniger, wodurch die aufgeleimte Holzbeplankung an Rippen und Holmkanten eingezogen wird. Für die Erzielung erstklassiger Oberflächen erscheint also die Anwendung von Kunstharzen sehr sinnvoll, die erwiesenermaßen sehr formbeständig und wetterfest sind.

Diese Tatsachen waren bereits bekannt, als die erste D-34-Tragfläche entworfen wurde. Auch eine geeignete Arbeits-

technik zum Aufbringen dünner Schichten eines glasfaserverstärkten Kunststoffes, z. B. auf einen Flügelkern aus leichtem Schaumstoff, war in Vorversuchen so weit entwickelt worden, daß an eine Beplankung der D-34-Tragfläche mit Kunststoff gedacht werden konnte. Dennoch mußte darauf verzichtet werden, ganz einfach aus Gründen der Gewichtsbeschränkung. Um gleiche Widerstandsfähigkeit einer Flügelbeplankung gegen Beschädigungen bei Montage und Transport zu erzielen, müssen die Wandstärken bei Ausführung in Sperrholz oder Kunststoff etwa gleich sein, denn die Elastizitätsmoduli für Hölzer und glasfaserverstärkte Kunststoffe sind etwa gleich groß. Das spezifische Gewicht glasfaserverstärkter Kunststoffe liegt, abhängig vom Glasgehalt, etwa zwischen 1,5 und 2,0 g/cm³, dasjenige von Sperrholz etwa bei 0,9 g/cm³. Deshalb wird eine Kunststoffbeplankung etwa doppelt so schwer sein wie eine Sperrholzbeplankung gleicher Wandstärke. Aus dieser Betrachtung wird der Wunsch verständlich, wenn man schon Kunststoffe zur Erzielung guter Oberflächen verwendet, diese dann nicht als reines Beplankungsmaterial einzusetzen, sondern diesen verglichen mit Holz schweren Werkstoff zur Aufnahme der mechanischen Beanspruchung mit heranzuziehen. Die Möglichkeit hierzu scheint auf den ersten Blick beim Vergleich spezifischer Festigkeiten glasfaserverstärkter Kunststoffe mit denen gebräuchlicher Holzwerkstoffe in sehr guter Weise gegeben zu sein.

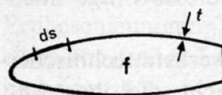
In Tabelle 1 sind einige Werte für diesen Vergleich zusammengestellt:

Tabelle 1

	spez. Gew. γ (g/cm ³)	Zugfestigk. σ_z (kp/cm ²)	σ_z / γ (10 ⁶ cm)	Druckfestgk. σ_d (kp/cm ²)	σ_d / γ (10 ⁶ cm)
Sperrholz	0,9	700	0,78	480	0,53
Kiefernholz	0,55	1100	2,00	550	1,00
glasfaserverst. Äthoxylharz	1,7	4500	2,65	2600	1,53

Die Festigkeiten der Hölzer gelten für Prüfung in Faserichtung, die des Kunststoffes für Prüfung in Richtung der Kettfäden. Die letzteren sind keine Höchstwerte, sondern solche, die wir heute mit Sicherheit erreichen können.

Bei Zugrundelegung dieser Festigkeitswerte müßte in weiten Bereichen des Außenflügels allein die zur Erzielung einer genügend grifffesten und widerstandsfähigen Oberfläche erforderliche Kunststoffhaut in der Lage sein, die auftretende Biege- und Torsionsbeanspruchung aufzunehmen. Man kommt also zwangsläufig, zumindest für diese Bereiche, zur Schalenbauweise.



f = umschlossene Fläche
 ds = Wegelement
 t = Wandstärke

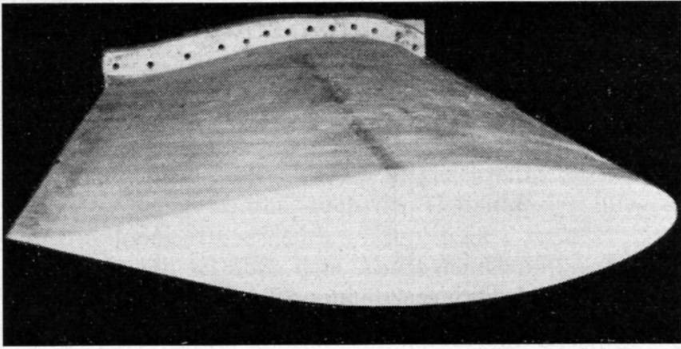


Abb. 1

Die Torsionssteifigkeit eines dünnwandigen, geschlossenen Hohlprofiles ist proportional der Größe

$$4f^2 \left/ \varphi \frac{ds}{t} \right.$$

Um die umschlossene Fläche f möglichst groß zu erhalten, ist das tragende Material möglichst weit in die Oberfläche zu verlegen.

Der Ausdruck

$$\varphi \frac{ds}{t}$$

nimmt einen Kleinstwert an, wenn die Wandstärke über den ganzen Umfang konstant gehalten wird. (Vorausgesetzt ist bei dieser Betrachtung für verschiedene Wandstärkenverteilungen gleiches Gesamtgewicht, das proportional $\varphi t ds$ ist, und überall gleicher Gleitmodul.)

Wenn man ferner noch bedenkt, daß eine Schale aus wenigen Lagen Glasgewebe bedeutend einfacher aufgebaut werden kann als z.B. ein Holm, dessen Gurte aus sehr vielen Glasgewebelagen geschichtet werden müßte, wird man sich bei der Verwendung von glasfaserverstärkten Kunststoffen als tragenden Werkstoff für die Schalenbauweise entscheiden.

Bevor Konstruktionsbeispiele beschrieben werden, noch einige kurze Ausführungen zum Zweikomponenten-Werkstoff selbst:

Forderungen, die ein Verstärkungswerkstoff erfüllen muß, sind vor allem hohe Festigkeit und hoher Elastizitätsmodul. Der Elastizitätsmodul des Verstärkungsmaterials muß erheblich höher sein als der des Harzes, damit bei gleicher Dehnung für beide Stoffe der Verstärkungswerkstoff auch wirklich den größten Teil der Beanspruchung übernimmt. Textile Glasfasern – so nennt man Glasfäden mit einem Durchmesser kleiner als etwa $13/1000$ mm – übertreffen im Hinblick auf die genannten Forderungen alle anderen Verstärkungsstoffe. Der E -Modul textiler Glasfasern liegt in der Nähe von $600\,000$ kp/cm²; die Zugfestigkeit nimmt im allgemeinen mit abnehmender Elementarfadendicke zu; als Anhaltswert für übliche Glassorten und Elementarfadendurchmesser mag eine Zugfestigkeit von etwa $15\,000$ kp/cm² genannt sein.

Die üblichen härtenden Kunstharze, die als Bindemittel für Glasgewebe dienen, haben im Mittel eine Zugfestigkeit von 700 kp/cm² und eine etwas höhere Druckfestigkeit; der E -Modul liegt etwa zwischen $30\,000$ und $40\,000$ kp/cm².

Die Glasgewebehersteller bieten einige hundert Gewebesorten an; Kunstharze stehen einige Dutzend zur Auswahl. Es ist also nicht leicht, aus der Fülle der möglichen Glas-Harz-Kombinationen die geeignetsten herauszufinden, zumal auch die Ansichten von Spezialisten in dieser Frage noch ziemlich stark voneinander abweichen.

Für uns kommen wegen beschränkter werkstattechnischer Möglichkeiten nur solche Harze in Betracht, die ohne An-

wendung von Druck und erhöhter Temperatur härten. Wir haben uns für Äthoxylin- oder Epoxyharze entschieden, obwohl diese zwei- bis dreimal so teuer sind wie die in großem Umfang verwendeten ungesättigten Polyesterharze. Da die Harzkosten nur einen kleinen Teil der Gesamtkosten eines Segelflugzeuges ausmachen würden, spielt der höhere Preis der Äthoxylinharze keine entscheidende Rolle. Gegenüber Polyesterharzen weisen die Äthoxylinharze folgende wesentlichen Vorteile auf:

Bessere Haftung auf den meisten Werkstoffen, z.B. auch auf Glas. Die gute Haftfähigkeit ist auch wichtig für eine gute Bindung zwischen den tragenden Häuten und den Stützkernen.

Geringe Schrumpfung beim Aushärten (rund 1 % bei Äthoxylinharzen gegenüber 4 ÷ 7 % bei Polyesterharzen), daher weniger Eigenspannungen im Werkstück. Ein stark schwindendes Harz schrumpft beim Härtingsprozeß vom Glasfaden weg, so daß um die einzelnen Glasfäden feinste Hohlröhren entstehen, in die Feuchtigkeit eindringen kann. Wasser ist aber einer der größten Feinde der Glasfaser. Unter Naßfestigkeit wird die verbleibende Festigkeit nach einer längeren Einlagerung von Schichtstoffen im Wasser verstanden; diese ist im allgemeinen bei Verwendung von Polyesterharzen geringer als bei Anwendung von Äthoxylinharzen. Die Festigkeit bei wechselnder Beanspruchung ist offenbar ebenfalls stark von den Verhältnissen in der Grenzfläche zwischen Harz und Glas abhängig. Die Wechselfestigkeit von Äthoxylinharz-Schichtstoffen ist im allgemeinen höher als die von Polyesterlaminaten.

Die mechanischen Eigenschaften der Äthoxylinharze sind relativ gut, auch die Beständigkeit in der Wärme.

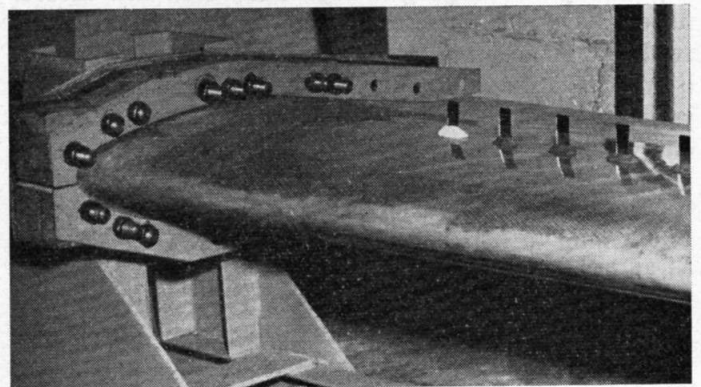


Abb. 2

Abb. 3



Mindestens ebenso wichtig wie die Harzauswahl ist die Wahl einer geeigneten Glasverstärkung. Für die Anwendung in hochbeanspruchten Bauteilen scheinen nur Glasgewebe aus im Düsenziehverfahren hergestellten endlosen Fäden alkalifreien Glases geeignet zu sein. Werden Schichtstoffe im Handauflegeverfahren hergestellt, was bei großflächigen Teilen meist der Fall ist, dann ist darauf zu achten, daß die Gewebe keine zu starke Verzwirnung und keine zu enge

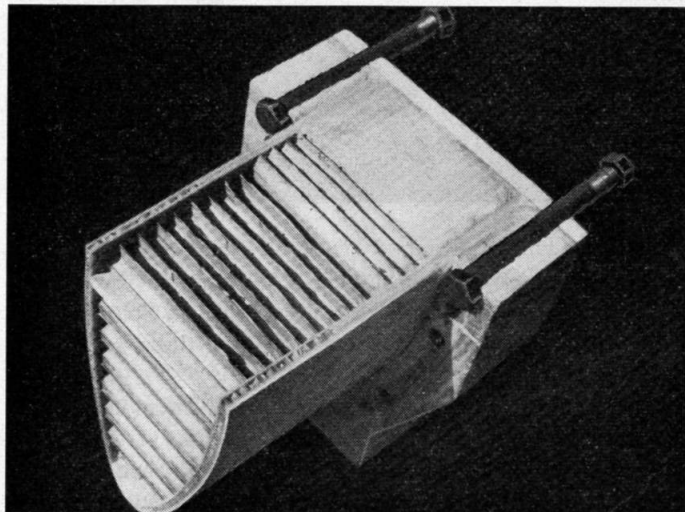


Abb. 4

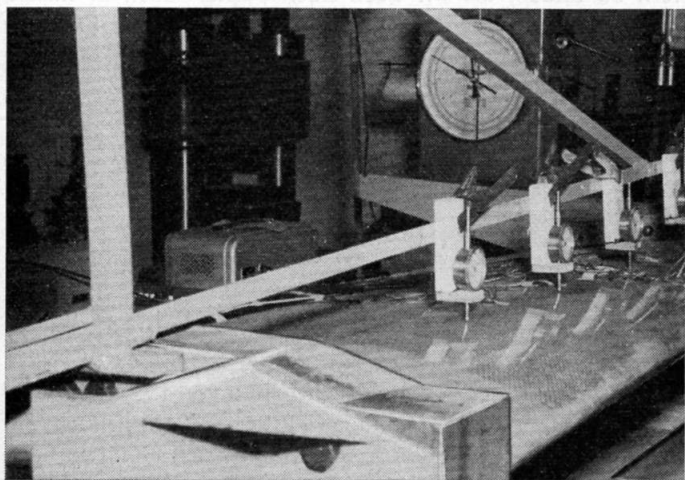


Abb. 5

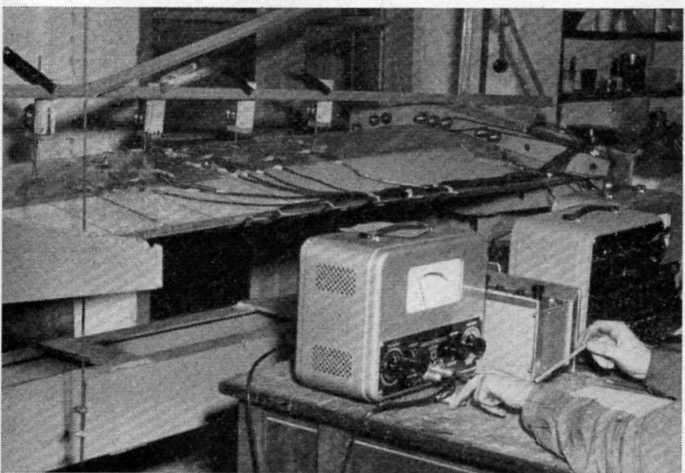


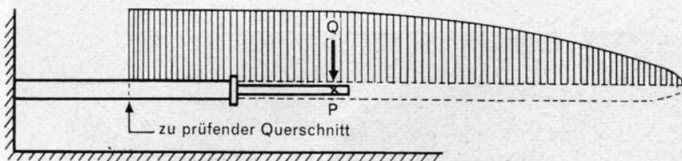
Abb. 6

Verwebung aufweisen dürfen; sonst ist eine gute Durchtränkung des Gewebes mit Harz nicht möglich. Fachseiden- und Rovinggewebe lassen sich gut durchtränken. Verschiedene neuere Gewebearten werden in einer vor kurzem begonnenen Arbeit bei uns untersucht.

Für das erste Tragflächenversuchsstück wurde ein denkbar einfacher Aufbau gewählt (Abb. 1): Auf einen auf Profilform bearbeiteten Kern aus Polystyrolschaum wurde das Laminat aufgebracht. Dabei wurde zur Erzielung des erforderlichen Widerstandsmomentes gegen Biegung bei möglichst geringem Gewicht die Zahl der Glasgewebelagen so abgestuft, daß die größte Wandstärke im Bereich der größten Profilhöhe, die kleinste im Bereich der Hinterkante entstand. Es war nur ein Querkraftsteg vorgesehen, der ebenfalls aus Laminat aufgebaut wurde.

Das Versuchsstück wurde zunächst einer stufenweisen Torsionsbelastung unterworfen. Die sehr kleinen Verdrehwinkel wurden dabei recht genau gemessen, indem ein durch Bogenlampe erzeugtes Lichtbündel über Spiegel am Versuchsstück (Abb. 2 und 3) auf eine 10 m vom Versuchsstück entfernte Meßtafel gelenkt wurde.

Die maßgebende Beanspruchung für einen Tragflügel ist aber nicht das Torsionsmoment, sondern die Beanspruchung durch Querkraftbiegung. In allen weiteren auf den Torsionsversuch folgenden Versuchen wird deshalb eine Anordnung gewählt, wie sie aus der Skizze ersichtlich ist.



Das einseitig fest eingespannte Versuchsstück wird an einem Punkt P mit einer kontinuierlich veränderlichen Querkraft Q belastet. Der Punkt P entspricht dabei dem Angriffspunkt der Resultante aller Luftkräfte, die vom zu prüfenden Querschnitt bis zur Flügelspitze wirken. Durch diese Anordnung ist gewährleistet, daß Biegemoment und Querkraft während des Versuches immer in dem gleichen Verhältnis zueinander stehen, wie es bei dem betreffenden Lastfall an der wirklichen Tragfläche im Fluge vorliegt.

Die Widerstandsmomente werden über die Versuchsstücklänge so verteilt, daß die größte Spannung immer im zu prüfenden Querschnitt auftritt.

Besondere Sorgfalt wird auf die Einspannung der tragenden Schale verwandt, wie der in Abbildung 4 gezeigte Schnitt erkennen läßt, um einen Einspannungsbruch möglichst sicher auszuschließen.

Biegelinien werden durch Meßuhrablesungen aufgenommen (Abb. 5). Die Verteilung der Dehnung über die Länge des Versuchsstückes und über einen Querschnitt wird mit Dehnungsmeßstreifen und Hochfrequenzmeßbrücken gemessen (Abb. 6).

Das Versuchsprogramm haben wir wie folgt festgelegt:

Torsionsversuch, dann Belastung durch Querkraftbiegung, und zwar etwa 5 Minuten mit sicherer Last ± 4 g (4fache Erdbeschleunigung), daran anschließend 10 Stunden mit einer konstanten Last $\pm 2,5$ g, abschließend nochmals 5 Minuten mit 4 g.

Erst dann folgt der eigentliche Bruchversuch, bei dem angestrebt wird, den ganzen Versuch in einer Minute zu beenden. Die Registrierung der Meßwerte geschieht dabei meist mittels Robot oder Filmkamera. Um die Trägheit und sonstige Fehler des Pendelmanometers auszuschalten, wird auch die belastende Kraft elektrisch gemessen, und zwar über die Dehnung eines Flachstahlstabes, auf den der Versuchsträger aufgelagert ist (Abb. 7).

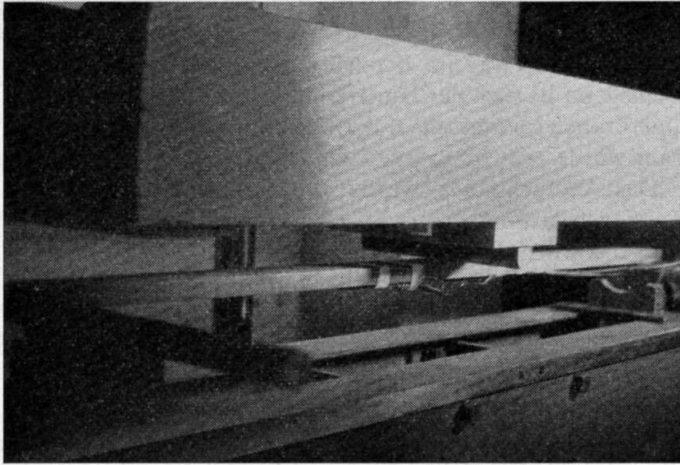


Abb. 7

Abbildung 8 ist während der Dauerbelastung des ersten Versuchsstückes aufgenommen.

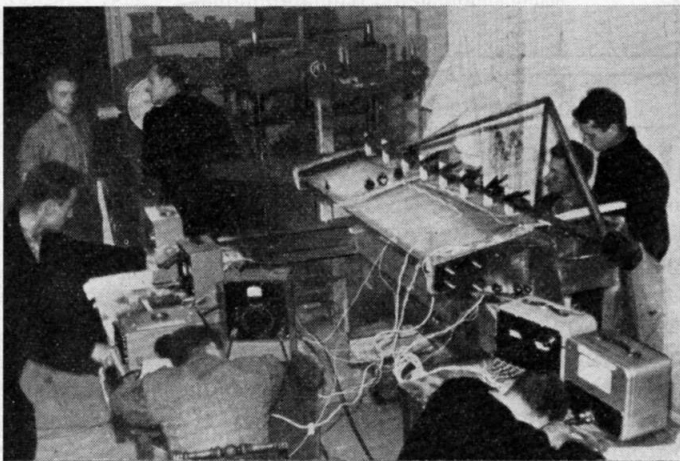


Abb. 8

Bei Biegebeanspruchung eines Tragflügels treten in den Schalenhäuten auf der Unterseite des Profiles fast reine Zugspannungen, auf der Oberseite fast reine Druckspannungen auf. Unter Druckspannungen können dünnwandige Bauelemente knicken oder beulen. Beim ersten Versuchsstück führte das Kriechen des Kunststoffes bereits nach dreistündiger Dauerbelastung örtlich zur Bildung von Beulen, die sich langsam vergrößerten. Im späteren Bruchversuch war die Tragkraft bereits bei 3,8 g infolge plötzlichen Beulbruchs erschöpft. Abbildung 9 zeigt das typische Bruchaussehen.

Der erste Entwurf wies im wesentlichen folgende Fehler auf:

Der Stützkern war zu weich.

Das Glasgewebe war nicht beanspruchungsgerecht ausgewählt und eingelegt. Es verliefen ebensoviele Glasfäden in Spannweitenrichtung wie senkrecht dazu. Man sollte aber

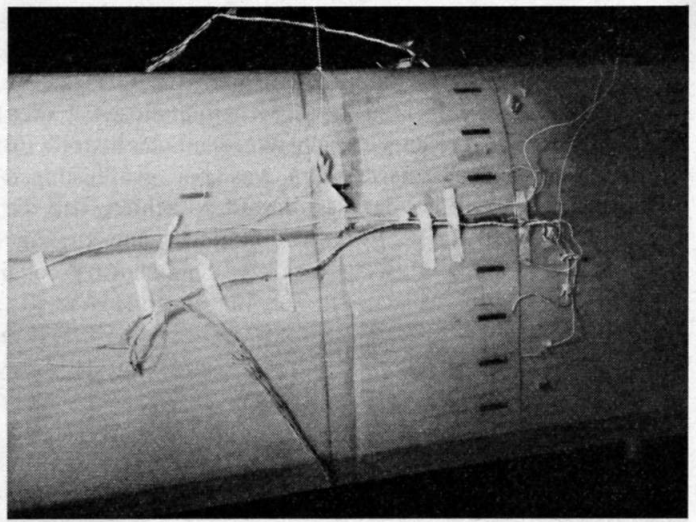


Abb. 9

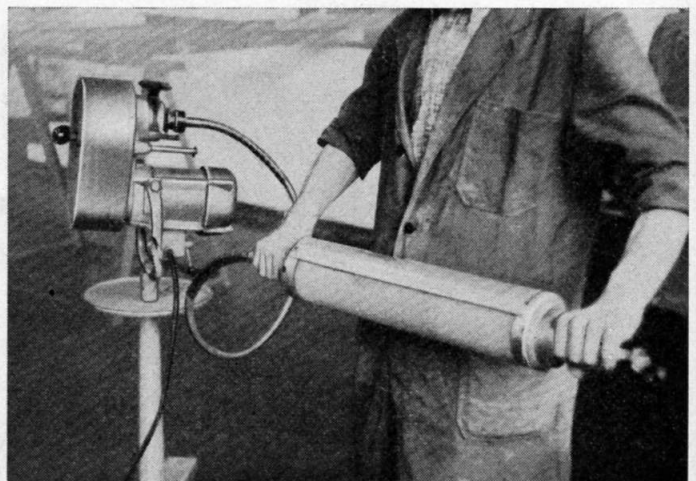
danach trachten, möglichst viele Glasfäden in die Hauptbeanspruchungsrichtungen zu bringen, d.h. in Spannweitenrichtung für Biegung und unter 45° gegen diese geneigt für Torsion.

Nun begann zunächst die Suche nach einem geeigneten Stützstoff. Im Druckversuch wurden an verschiedenen Schaumstoffen und Balsaholz, jeweils an Proben verschiedener Raumgewichte, Spannungs-Dehnungs-Schaubilder aufgenommen. Wir hatten schon fast die Hoffnung aufgegeben, einen leichten, aber genügend steifen Stoff für den Flügelkern zu finden, als wir auch noch Papierwaben in unsere Versuchsreihe aufnehmen konnten. Das wichtigste Ergebnis der Stützstoffversuchsreihe kann zusammenfassend durch die Mittelwerte der Tabelle 2 dargestellt werden.

Tabelle 2	Prüfrichtung	E-Modul / spez. Gewicht (10 ⁶ cm)
Polystyrol- und Polyurethanschaum	beliebig	0,7
Balsaholz	⊥ Faser Faser	1,3 20
Papierwaben	Zellenachse	80

Papierwaben sind mit Raumgewichten von 10 ÷ 60 kp/m³ erhältlich. Bei einem Raumgewicht von 20 kp/m³ ist der E-Modul in Richtung der Zellenachse etwa 130mal so hoch wie der eines gleich schweren Polystyrolschaumes.

Abb. 10



Das Problem, Wabenblöcke auf genaue Profilform zu bearbeiten, wurde durch die Konstruktion einer Schleifwalze (Abb. 10) gelöst, die durch einen Schleifmotor über eine biegsame Welle angetrieben wird.

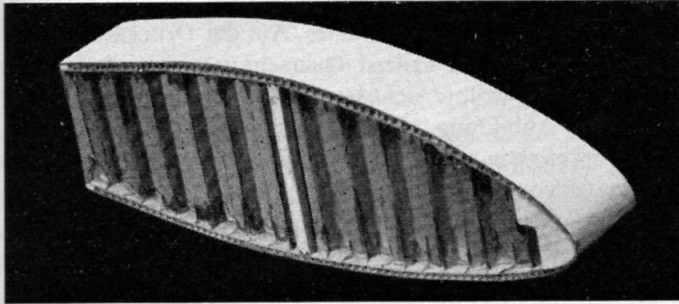


Abb. 11

Bei einem zweiten Entwurf für ein Tragflächenversuchsstück (Abb. 11) wurde auf Grund einer Optimalbetrachtung über Werkstoffausnutzung der tragende Verband auf den Bereich von 0 bis 60 % der Profiltiefe begrenzt; ein mittlerer und ein hinterer Querkraftsteg sind in Sperrholz, diagonal gefasert, ausgeführt. Um die Beulspannung mit Sicherheit über die Werkstofffestigkeit zu treiben, wurde nicht nur ein Flügelkern aus Waben mit Raumgewicht 20 kp/m³ verwendet, sondern die Schale selbst auch noch doppelwandig ausgeführt. Die Zwischenschicht zwischen Innen- und Außenhaut besteht aus kleinzelligen Papierwaben.

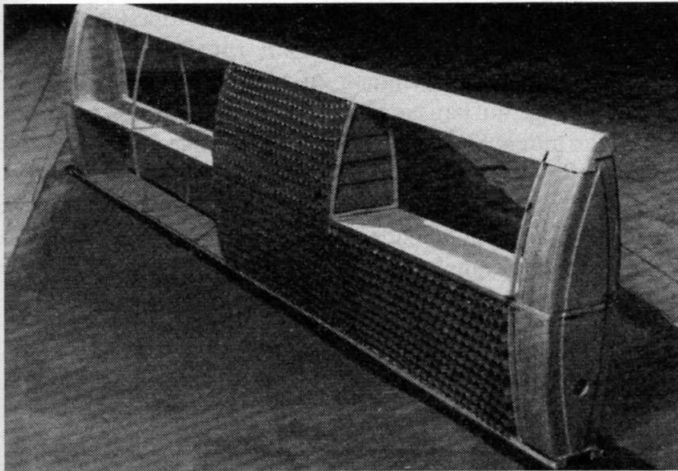


Abb. 12

Der Aufbau geht in folgender Weise vor sich:

Das Flügelgerippe besteht aus den beiden Sperrholzstegen, Sperrholzrippen im Abstand von einem halben Meter und einer Balsanasenleiste. Wabenblöcke werden im zusammengepressten Zustand grob auf Profilform zugeschnitten, auf Rippenabstand auseinandergezogen und dann gehärtet. Danach werden diese Blöcke in das Flügelgerüst eingeklebt (Abb. 12) und mit der Schleifwalze auf genaue Profilform geschliffen, wobei die Rippen als Führungsschablonen für die Schleifwalze dienen. Ein Wabenfeld zwischen zwei Rippen kann auf diese Weise in drei bis fünf Minuten sauber geschliffen werden.

Auf den so vorbereiteten Flügelkern wird eine gut mit Harz getränkte Glasgewebbahn aufgebracht. Nachdem diese gehärtet ist, kann die Innenhaut fertig laminiert werden.

Auf diese werden Rippen von der Stärke der Sandwichmittelschicht aufgesetzt (Abb. 13). In die so entstandenen Felder werden Matten aus engem Wabenpapier eingeklebt, die sich der Krümmung der Profiloberfläche leicht anpassen lassen. Nach dem Schleifen dieser Waben wird wiederum eine Bindeschicht aufgebracht und die Außenhaut laminiert. Ein abschließender reichlicher Harzaufstrich wird mit einer dicken Zellulose-Azetat-Trennfolie abgedeckt und glattgestrichen. Auf diese Weise

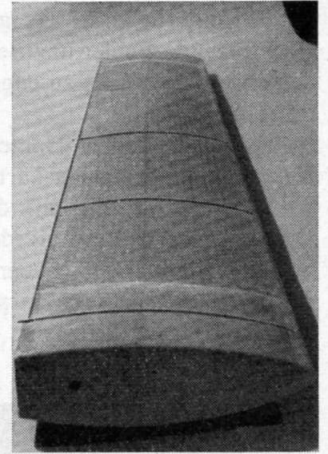


Abb. 13

lassen sich gute Oberflächen erzielen, die nur wenig Nachbearbeitung erfordern. Nach Fertigstellung des tragenden Körpers wird eine leichte Endverkleidung aus Schaum und dünnem Laminat angebracht (Abb. 14).

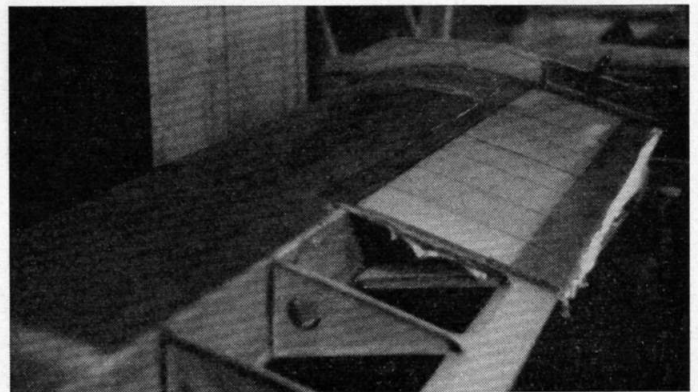
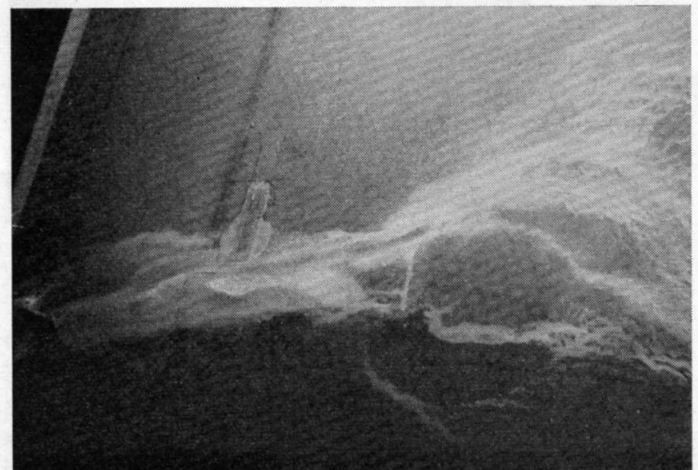


Abb. 14

Das Versuchsstück wurde dem eingangs erwähnten Versuchsprogramm unterworfen.

Bei Torsionsbelastung, erstmaliger Belastung mit Querkraft $\triangleq 4$ g und im 10-Stunden-Dauerversuch traten keine Schäden auf. Bei erneuter Belastung mit 4 g zeigte sich jedoch eine Trennungerscheinung in der Außenhaut der Druckseite, die sich im Bruchversuch schnell vergrößerte (Abb. 15).

Abb. 15



Als Grund für das Versagen des zweiten Versuchsstückes sind folgende Fehler anzusehen:

Verwendung eines zu engen Gewebes, das schlecht durchtränkbar war;

Anwendung eines Harzes mit zu geringer Eigendruckfestigkeit, zu kurze Aushärtungszeit.

Über das Verhalten dünnwandiger Lamine unter Druckbeanspruchung in der Schichtebene ist noch sehr wenig bekannt. Eine neuere Versuchsreihe, in der Wandstärke, Gewebeart und Harzart variiert werden, wird hoffentlich zur Klärung beitragen.

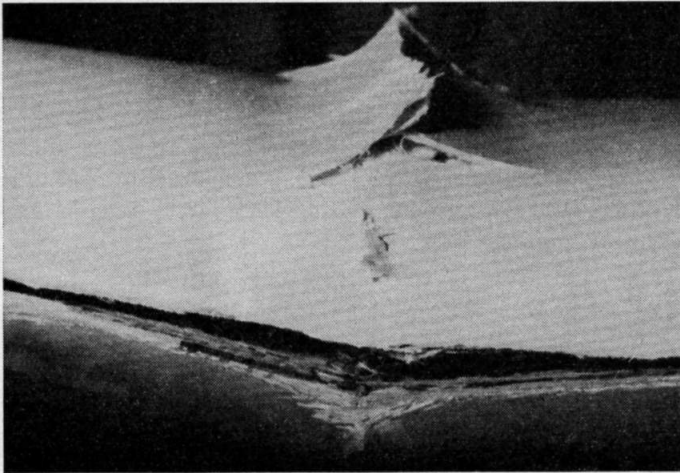
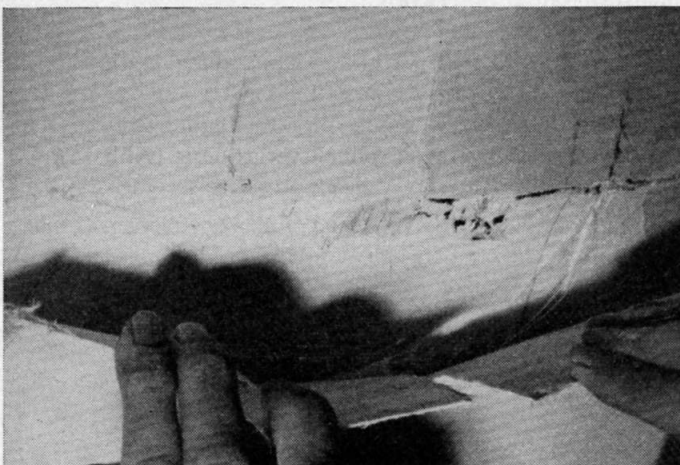


Abb. 16

Inzwischen ist die Druckseite des Versuchsstückes, die im Bruchversuch zerstört worden war, mit besser durchtränkbarem Gewebe und druckfesterem Harz neu aufgebaut worden. Höhere Druckfestigkeit des Harzes wurde durch Zusatz von Titandioxyd erreicht. Nachdem das Versuchsstück alle üblichen Belastungen ohne Schaden ertragen hatte, u.a. auch die zehnstündige Dauerbelastung $\hat{=}$ 2,5 g, wurde eine

Abb. 17



Bruchlast entsprechend 15,3 g erreicht. Dabei ist das Gewicht etwa gleich dem der Vergleichs-Holztragfläche der D-34, die für 10 g ausgelegt ist. Die Biegesteifigkeit beträgt etwa das 0,6fache, die Torsionssteifigkeit etwa das 1,4fache der entsprechenden Steifigkeit der Holztragfläche. Der Bruch erfolgte schlagartig, offensichtlich infolge Erschöpfung der Festigkeit des Laminates. Auf der Druckseite verlief der Bruch über den ganzen Querschnitt; zu beiden Seiten der Bruchlinie wölbte sich das Laminat der Außenhaut auf (Abb. 16). Abbildung 17 zeigt die geöffnete Aufwölbung, wobei erkennbar wird, daß sich die äußeren Schichten des Laminates von der inneren getrennt haben, die noch fest auf den Waben der Sandwichmittelschicht haften.

Das Kriechen des Kunststoffes unter Last bleibt in erträglichen Grenzen. Unmittelbar nach der Entlastung noch feststellbare Verformungen bilden sich in relativ kurzer Zeit wieder zurück.

Die —1-Wechselfestigkeit (Zug/Druck) des Laminates beträgt 550 bis 650 kp/cm² und ist, verglichen mit Festigkeiten bei zügiger Beanspruchung, niedrig, erscheint jedoch ausreichend. Proben, die 10 Millionen Lastwechsel bei 500 bis 600 kp/cm² ertragen haben, zeigen bei zügiger Belastung im Zerreißversuch noch die ursprüngliche Zugfestigkeit, die Proben ohne vorhergehende Wechselbelastung aufweisen.

In unseren Untersuchungen fehlen noch Betriebsfestigkeitsprüfungen über sehr lange Zeit; diese werden hoffentlich bald folgen.

Der Arbeitsaufwand für den Bau einer Tragfläche würde bei der beschriebenen Bauweise auf keinen Fall größer sein als der für eine Holztragfläche. Dies entspricht der von Anfang an festgelegten Zielsetzung. Die Herstellung der Schalen in Negativformen erscheint für die bei uns vorherrschende Einzelanfertigung zu aufwendig. Vorteilhaft ist bei dem Flügelaufbau von innen heraus auch die Möglichkeit einer guten Kontrolle aller Verklebungen während des Baues.

Nach diesen positiven Ergebnissen erscheint es möglich, in absehbarer Zeit, nachdem die Ergebnisse durch weitere systematische Versuche erhärtet sind, eine Tragfläche in der beschriebenen Art zu bauen.

Für die Förderung unserer Arbeiten danken wir herzlich den Herren Prof. Dr.-Ing. G. Bock, Dr.-Ing. G. Koehler und Dr.-Ing. E. Giencke, Lehrstuhl und Institut für Luftfahrttechnik, T.H. Darmstadt; Prof. Dr.-Ing. H. Wiegand, Dr.-Ing. C. M. Freiherr von Meysenbug und Dipl.-Ing. H. Wallhäußer, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, T.H. Darmstadt und Staatliche Materialprüfungsanstalt, Darmstadt; Prof. Dr. K. H. Hellwege, Dr. W. Knappe und Dipl.-Phys. V. Semjonow, Deutsches Kunststoffinstitut, Darmstadt.

Folgenden Firmen danken wir für Beratung und Überlassung von Versuchsmaterial: BASF, Badische Anilin- und Sodafabrik AG, Ludwigshafen; Bayer, Farbenfabriken AG, Leverkusen; Ciba AG, Wehr/Baden; Gevetex, Textilglas GmbH, Düsseldorf; Krommes GmbH, Wülfrath; MSO, Maschinen- und Schleifmittelwerke AG, Offenbach; Dr. Schleußner, Fotowerke GmbH, Frankfurt am Main, und D. Stempel AG, Frankfurt am Main.