

Kunststoffe und ihre Verwendung im Flugzeugbau

Von Dr.-Ing. W. KUCH, Berlin-Adlershof, und Dipl.-Ing. K. RIECHERS, Berlin-Tegel.

Kunstharz-Preßstoffe aus härtbaren Phenol-Formaldehydharzen werden im Flugzeugbau in steigendem Umfang verwendet. Durch systematische Untersuchungen ist es gelungen, ihre Festigkeit zu erhöhen, so daß man dazu übergeht, auch tragende Flugzeugteile aus Preßstoffen zu fertigen. Nach einem kurzen Überblick über die Rohstoffe und Herstellungsverfahren werden die Festigkeit und die elastischen Eigenschaften der Preßstoffe bei kurzzeitiger und langzeitiger Belastung sowie bei Schwingungsbeanspruchung mitgeteilt. Anschließend werden die für die Verglasung von Flugzeugen dienenden in der Wärme bildsamen Kunststoffe behandelt und ihre physikalischen und mechanischen Eigenschaften auf Grund neuerer Untersuchungen angegeben. Den Abschluß bildet eine Zusammenstellung des sehr umfangreichen Schrifttums.

I. Allgemeines

II. Härtbare Kunstharz-Preßstoffe auf Phenol-Formaldehyd- bzw. Harnstoff-Formaldehydbasis

1. Rohstoffe und Herstellungsverfahren
2. Festigkeitseigenschaften der Preßstoffe (Kurzzeitversuche)
3. Verhalten der Preßstoffe bei langzeitiger Belastung
4. Festigkeit der Preßstoffe bei Schwingungsbeanspruchung
5. Anwendungsgebiete

III. Durchsichtige Kunststoffe für die Verglasung von Flugzeugen

1. Werkstoffe, Herstellungsverfahren und Verarbeitung
2. Prüfung der Gläser
3. Eigenschaften der durchsichtigen Kunststoffe

Zusammenfassung

Schrifttum

9699

521

Kunststoffe und ihre Verwendung im Flugzeugbau

I. Allgemeines

Im Flugzeugbau finden Kunstharz-Preßstoffe, die aus hartbaren Kunstharzen auf Phenol-Formaldehydbasis hergestellt werden, nicht nur für Zubehörteile, sondern neuerdings auch für höher beanspruchte Teile in steigendem Umfang Verwendung. Phenol-Formaldehyd- und Karbamidharze haben außerdem im Holzflugzeugbau als Bindemittel Bedeutung erlangt. Durchsichtige und in der Wärme bildsame Kunststoffe dienen zur Verklebung von Flugzeugen.

II. Härtbare Kunstharz-Preßstoffe auf Phenol-Formaldehyd- bzw. Harnstoff-Formaldehydbasis

1. Rohstoffe und Herstellungsverfahren

Die Ausgangsstoffe für die heute bekannten härtbaren Kunstharze sind nach Abb. 1 Kalk, Kohle und Luft [1]. Aus Acetylen (C_2H_2) wird Benzol (C_6H_6) und hieraus durch Anlagerung einer Hydroxylgruppe an Stelle eines Wasserstoffatoms Phenol (C_6H_5OH) gewonnen. An Stelle des Phenols wird auch das dem Phenol verwandte Destillationsprodukt des Steinkohlenteers, das Kresol, verwendet. Aus der Einwirkung des Phenols und des Formaldehyds aufeinander und unter Zugabe bestimmter Kondensations- oder Kontaktmittel entsteht das Phenolharz. Das Härten der Phenolharze geschieht unter Wärmeeinwirkung, wobei aus dem Ausgangszustand des Bakelits, dem A- oder Resolzustand, das Harz in den B- oder Resitolzustand übergeht. Das Endergebnis des Härtungsvorganges ist das Phenol-Formaldehydharz im C- oder Resitolzustand. Während das Harz im Resolzustand in vielen Lösungsmitteln, z. B. Spiritus und Aceton, sich leicht lösen läßt, ist das Harz im Resitolzustand nur noch in der Hitze formbar. Im Resitolzustand ist das Harz mit gewöhnlichen Mitteln unlöslich und unschmelzbar. Wird das Phenolharz im A-Zustand mit Lösungsmitteln versetzt, so können Lacke, Tränkungs- und Bindemittel in flüssiger Form hergestellt werden. Das Karbamidharz entsteht durch die Einwirkung von Formaldehyd auf Harnstoff bei Anwesenheit von Kontaktmitteln. Auch die Karbamidharze gehen durch Wärmeeinwirkung in einen festen und schwer löslichen Endzustand über.

Die reinen Harze sind wegen ihrer geringen Zugfestigkeit und hohen Sprödigkeit keine praktisch brauchbaren Werkstoffe und werden zur Verbesserung ihrer mechanischen Eigenschaften mit Füllstoffen verarbeitet [2]. Zahlentafel 1 gibt eine Übersicht über die heute gebräuchlichsten Füllmittel und eine Zusammenstellung der für den verschiedenen Preßstoffaufbau festgelegten Typenklassen [3]. Man unterscheidet hiernach, je nach dem, ob es sich um regellose Füllstoffe oder durch-

Zahlentafel 1
Typisierung der Kunstharz-Preßstoffe

| Typ | Zusammensetzung |
|---------|-----------------------------------------------------------------------|
| 11 | Phenolharz mit körnigem, anorganischem Füllstoff (z. B. Gesteinsmehl) |
| 12 | Phenolharz mit faserigem, anorganischem Füllstoff (z. B. Asbestfaser) |
| M | Phenolharz mit anorganischen Gespinnsten (z. B. Asbestschaur) |
| S und O | Phenolharz mit Holzmehl als Füllstoff |
| T1 | Phenolharz mit kurzer Textilfaser als Füllstoff |
| T2 | Phenolharz mit geschnitzeltem Textilgewebe |
| T3 | Phenolharz mit Textilgewebebahnen |
| Z1 | Phenolharz mit kurzfaserigem Zellstoff (Flocken) |
| Z2 | Phenolharz mit Zellstoffschnitzeln (z. B. Papierschnitzel) |
| Z3 | Phenolharz mit geschichtetem Zellstoff (z. B. Papierbahnen) |
| K | Harnstoffharz mit organischem Füllstoff |

laufende Verstärkungen handelt. Preßmassen und geschichtete Preßstoffe. Unter die Gruppe der Preßmassen rechnen die Typengattungen 11, 12, S, O, T1, T2, Z1 und Z2, die infolge der Körnigkeit bzw. Kurzfasigkeit ihrer Füllstoffe gutes Fließvermögen besitzen und daher vor allem zur Herstellung fertiger Preßteile in den verschiedensten Formen geeignet sind. Bei den geschichteten Preßstoffen kommt zu den Typen Z3 und T3, bei denen mit Kunstharz getränkte Zellstoff- und Gewebebahnen unter Druck und Wärme ausgehärtet werden, noch das Kunstharz-Preßholz, bei dem als Harzträger Furniere, in der Regel aus Buche, verwendet werden [4]. Die geschichteten Kunstharz-Preßstoffe wurden bisher fast ausschließlich zu Halbfabrikaten wie Platten, Rohre und Stangen verpreßt. Die Entwicklungsarbeiten der letzten Zeit haben indes gezeigt, daß auch die Schichtstoffe bei geeigneter Formgebung zur Herstellung von Formpreßteilen herangezogen werden können.

2. Festigkeitseigenschaften der Preßstoffe (Kurzzeitversuche)

Eine erste Beurteilung der mechanischen Eigenschaften der Preßstoffe erfolgt im allgemeinen in Kurzzeitversuchen nach Prüfverfahren, wie sie in DIN 7701 und der WEI-Typisierung der gummifreien, nichtkeramischen Isolierpreßstoffe angegeben sind [3]. Die auf diese Weise an handelsüblichen Preßmassen und Schichtstoffen bei 20° gefundenen Werte sind in Zahlentafel 2 und 3 im Vergleich zu anderen Flugzeugbaustoffen zusammengestellt [5]. Die Preßmischungen haben hiernach verhältnismäßig niedrige Festigkeit und finden daher in der Regel nur zur Anfertigung von Zubehörteilen, wie Hebelknöpfen, Schellen, Kappen, Instrumentengehäusen, Kabelführungen u. ä. Verwendung. Immerhin haben Phenolharze mit Gewebeschnitzel schon die Hälfte der Zugfestigkeit von Kiefernholz. Die Schichtstoffe erreichen dagegen die Gütezahlen anderer Flugzeugbaustoffe und kommen daher auch für die Ausbildung höher beanspruchter Teile in Frage. Ein wesentlicher Nachteil sind allerdings auch bei den Schichtstoffen der verhältnismäßig niedrige E-Modul und ihr geringes Ar-

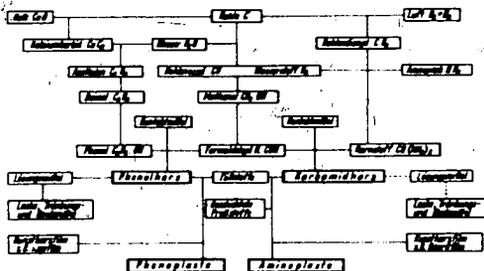


Abb. 1 Synthese der Phenol- und Harnstoffharze

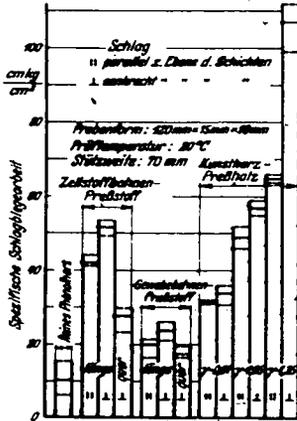


Abb. 2 Spezifische Schlagbiegearbeit von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen

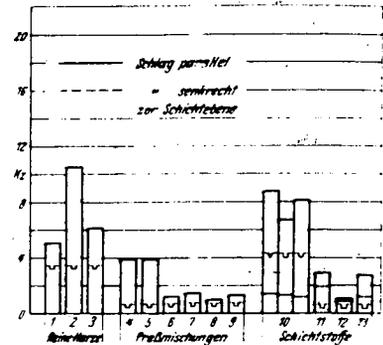


Abb. 3 Kerbzähigkeit von härbaren Kunstharz-Preßstoffen (Schlagbiegeversuch). Probenform nach DIN 7701 Kerbformen:

Rund-Kerb: 2 mm breit; 3,3 mm tief; $r = 1,0$ mm.

U-Kerb: 2 mm breit; 3,3 mm tief

Spitz-Kerb: 90°; 3,3 mm tief

Kz = Arbeitsaufnahme am Vollstab: Arbeitsaufnahme am gekerbten Stab

Prüftemperatur: 20°

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1 Reines Phenolharz (Preßharz) | 8 Preßmischung Typ 7 |
| 2 " " (Glaspharz) | 9 " " " " " " |
| 3 " " " " " " | 10 Zellstoffbahnen-Preßstoff |
| 4 Preßmischung Typ 8 | 11 Gewebefahnen-Preßstoff |
| 5 " " " " " " | 12 Kunstharz-Preßholz |
| 6 " " " " " " | 13 Vulkanpulver |
| 7 " " " " " " | |

beitsaufnahmevermögen, vor allem bei Schlagbeanspruchung. Das Ergebnis von Schlagbiegeversuchen ist in Abb. 2 und 3 wiedergegeben [5]. Bei den Schichtstoffen liefert Schlag senkrecht zu den Lagen höhere Werte als Schlag parallel zu den Lagen. Beim Schlag parallel zu den Schichten hat Kunstharz-Preßholz geringe, Zellstoffbahnen-Preßstoff dagegen hohe Kerbempfindlichkeit. Beim Schlag senkrecht zu den Schichten wird die Kerbwirkung durch das vom Kerbgrund ausgehende Auf-

Zahlentafel 2
Statische Festigkeit der Preßmassen
Kurzzeitversuche

| Füllstoff | Holzmehl | Gewebschnitzel | Pappeschnitzel | Asbestfasern | Mit groben und feinen Zellstofflocken | Preßharz | Kiefernholz |
|----------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------|--------------|-------------|
| Typ | S | T 2 | Z 2 | M | Z 1 | — | — |
| spezif. Gewicht γ , g/cm ³ | 1,3 bis 1,5 | 1,2 bis 1,4 | 1,35 | 1,47 bis 2,18 | — | 1,27 | 0,5 |
| Zugfestigkeit σ_{zB} , kg/cm ² | 250 bis 450 | 250 bis 500 | — | 200 bis 350 | 350 | 600 | 1000 |
| Druckfestigkeit σ_{dB} , kg/cm ² | 1800 bis 2900 | 1500 bis 2200 | — | 1100 bis 2000 | 1625 bis 2125 | 2900 | 500 |
| Biegefestigkeit σ_{bB} , kg/cm ² | 600 bis 1000 | 450 bis 1400 | 1020 bis 1818 | 400 bis 1480 | 575 | 451 bis 1270 | 800 |
| spezif. Schlagbiegearbeit cm kg/cm ² | 5 bis 10 | 11 bis 14 | 10 bis 16 | 4 bis 33 | — | — | 50 bis 100 |
| E-Modul kg/cm ² | 40000 bis 100000 | 40000 bis 100000 | 102000 bis 106000 | 70000 bis 212000 | 75000 | 62000 | 110000 |
| Verdrehfestigkeit kg/cm ² | 680 bis 780 | — | — | — | — | 835 | — |
| Schubmodul kg/cm ² | 23000 bis 33000 | — | — | — | — | — | — |
| $\sigma_{zB} : \gamma$ | 8,5 | 4,2 | — | 2,4 | — | 4,7 | 20,0 |
| $\sigma_{dB} : \gamma$ | 19,6 | 18,8 | — | 18,6 | — | 22,0 | 10,0 |
| $\sigma_{bB} : \gamma$ | 7,7 | 11,7 | 9,8 | 4,8 | — | 8,2 | 16,0 |
| E : γ | 770 | 880 | 784 | 1090 | — | 480 | 2200 |

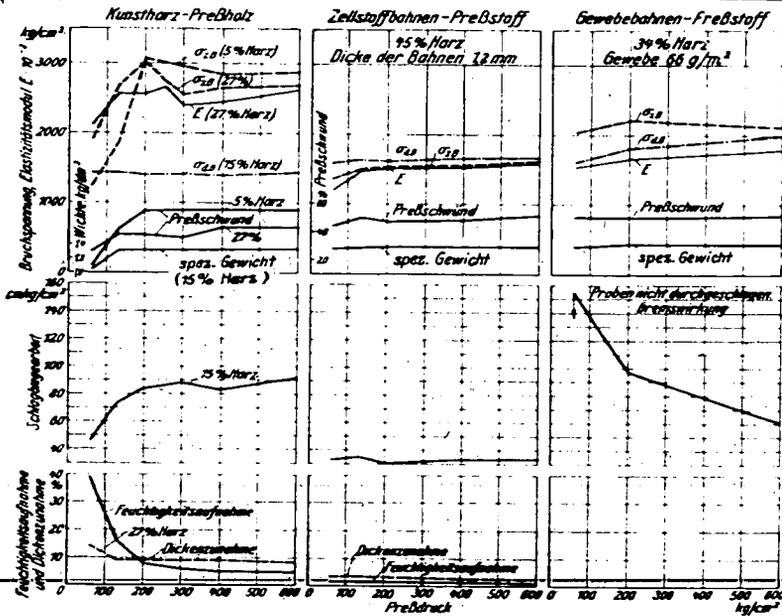


Abb. 4 Eigenschaften phenolharzhaltiger Schichtstoffe, abhängig vom Preßdruck
 σ_{zB} Zugfestigkeit σ_{dB} Druckfestigkeit E Elastizitätsmodul

Belastungsgeschwindigkeit: Zug: 800 kg/cm²/min
 Druck: 500 kg/cm²/min
 Biegung: nach DIN 7701

plätzen der Proben praktisch aufgehoben. Bei der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften muß berücksichtigt werden, daß die Prefstoffe erst am Anfang ihrer Entwicklung stehen und noch wesentliche Verbesserungen zu erwarten sind. So ist nach Zahlentafel 4 durch Einlagerung von geeigneten Rohfasern eine Möglichkeit gegeben, wesentliche Festigkeitssteigerungen zu erzielen [6]. Prefstoffe mit Fasereinlagen wie Agave, Sisal und Aloe erreichen die Gütezahlen hochwertigster Metalle. Der E-Modul dieser Werkstoffe beträgt das 4fache der Werte von handelsüblichem Material.

Um bei den geschichteten Prefstoffen den für die mechanischen Eigenschaften günstigsten Gefügebau zu ermitteln, wurden in der DVL eingehende Versuche über den Einfluß von Preßdruck und Harzgehalt auf die Festigkeit der Prefstoffe durchgeführt [7].

Abb. 4 zeigt den Einfluß des Preßdruckes auf die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit, die spezifische Schlagbiegearbeit und die Feuchtigkeitsaufnahme der verschiedenen Prefstoffe. Bei dem Kunstharz-Prefholz steigen die Zugfestigkeit und der E-Modul mit zunehmendem Preßdruck zunächst sehr stark an, und zwar bis zu einem Druck von etwa 200 kg/cm², bei dem die größtmögliche Verdichtung erreicht ist. Eine weitere Steigerung des Preßdruckes führt, vor allem bei hohem Harzgehalt, wegen örtlicher hydrostatischer Überdrücke des nicht gleichmäßig verteilten Harzes offensichtlich zu einer Zerstörung des Fasergefüges und damit zu einem Abfall der Festigkeit. Die Druckfestigkeit zeigt oberhalb eines Preßdruckes von 60 kg/cm² keine Abhängigkeit vom Preßdruck. Die Schlagbiegearbeit steigt mit zunehmendem spezifischem Gewicht des Prefstoffes an. Die Unter-

Zahlentafel 3
 Statistische Festigkeit der geschichteten Prefstoffe
 Kurzzeitversuche

| Werkstoff | Spezifisches Gewicht γ g/cm ³ | Festigkeit kg/cm ² | | | Spezif. Schlagbiegearbeit cmg/cm ² | E-Modul kg/cm ² | Verdrehmodul kg/cm ² | Schubmodul kg/cm ² | σ_{zB} T | σ_{dB} T | σ_{bB} T | E T |
|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | | Zug σ_{zB} | Druck σ_{dB} | Biegung σ_{bB} | | | | | | | | |
| Zellstoffbahnen-Prefstoff | 1,37 bis 1,40 | 1007 bis 2058 | 1700 bis 2090 | 1585 bis 3000 | 54 | 83 000 bis 149 000 | 820 | 25 000 | 15,0 | 14,0 | 20,0 | 1060 |
| Gewebebahnen-Prefstoff | 1,30 bis 1,40 | 384 bis 1170 | 1830 bis 2210 | 678 bis 1910 | 14 bis 57 | 58 000 bis 186 000 | 425 | 22 000 | 8,0 | 16,0 | 13,0 | 978 |
| Kunstharz-Prefholz | 1,03 bis 1,85 | 1520 bis 3590 | 1230 bis 2160 | 1760 bis 3540 | 75 bis 100 | 200 000 bis 311 000 | — | — | 27,0 | 16,0 | 26,0 | 2300 |
| Kiefernholz | 0,5 | 1000 | 500 | 800 | — | 110 000 | — | — | 20,0 | 10,0 | 16,0 | 2200 |
| Duralumin | 2,8 | 4470 | 18 700 | 9840 | — | 726 000 | — | — | 16,0 | 49,0 | 33,0 | 2600 |
| Stahl | 7,85 | 12 000 | 10 500 | — | — | 2 100 000 | — | — | 15,0 | 13,4 | — | 2680 |

Zahlentafel 4
Kunstharze mit Rohfasereinlagen

| Verwendete Faserstoffe | Agave | | Sisal | Aloe |
|----------------------------------------------|---------|---------------|-------------------|--------|
| | Garn | Garn aufgedr. | gestreckte Fasern | |
| Zugfestigkeit kg/cm ² | 1260 | 2100 | 2300 | 2260 |
| Druckfestigkeit kg/cm ² | 1320 | 1320 | 1380 | 1250 |
| Biegefestigkeit kg/cm ² | 2590 | 3240 | 3060 | 2960 |
| E-Modul kg/cm ² | 265 000 | 248 000 | 313000 | 221000 |
| Spez. Schlagbiegearbeit cmkg/cm ² | — | 240 | — | 533 |
| Spez. Gewicht g/cm ³ | 1,2 | 1,30 | 1,37 | 1,36 |
| σ_{zB} | 10,5 | 15,4 | 23,4 | 16,6 |
| σ_{dB} | 11,0 | 9,9 | 9,9 | 9,2 |
| σ_{bB} | 21,6 | 23,8 | 22,3 | 21,9 |

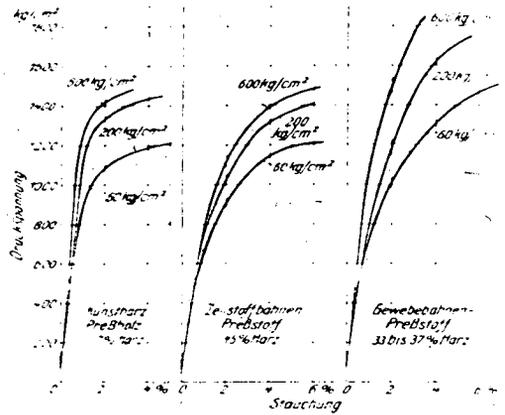


Abb. 5 Spannungs-Stauchungs-Linien phenolharzhaltiger Schichtstoffe bei verschiedenen Preßdrücken
Belastungsgeschwindigkeit: 400 kg/cm²/min

Kunstharz-Preßholz Zellstoffbahnen-Preßstoff Gewebebahnen-Preßstoff
Dicke der Bahnen 0,6 mm Dicke der Bahnen 0,6 mm Gewebe 66 g/m²

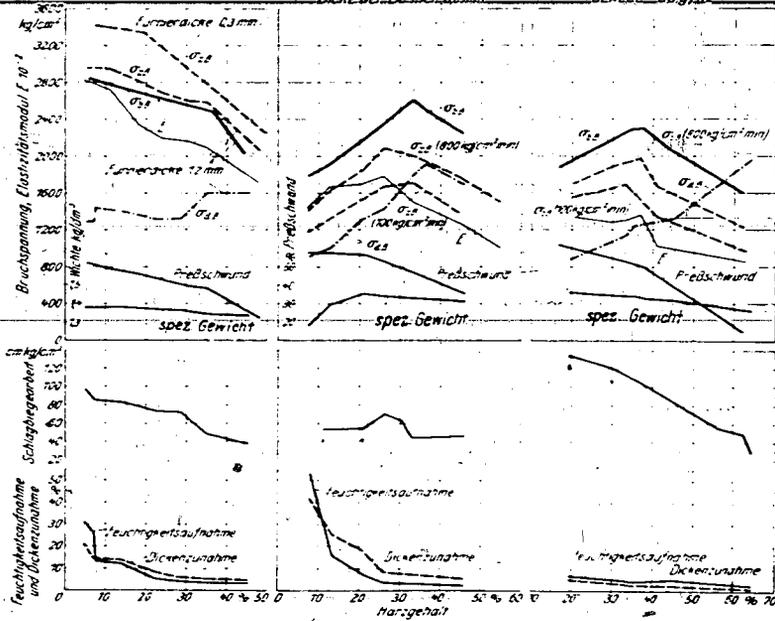


Abb. 6 Eigenschaften phenolharzhaltiger Schichtstoffe, abhängig vom Harzgehalt

Der Harzgehalt ist bezogen auf das Preßstoffgewicht
 σ_{zB} Zugfestigkeit σ_{dB} Druckfestigkeit
 σ_{bB} Biegefestigkeit E Elastizitätsmodul
 Druck: 500 kg/cm²/min
 Belastungsgeschwindigkeit Zug: 400 kg/cm²/min
 Biegung: nach DIN 7701

suchung der hygroskopischen Eigenschaften ergab eine starke Verminderung der Feuchtigkeitsaufnahme und des Quellens mit zunehmender Verdichtung. Durch hohe Preßdrucke wird die Hygroskopizität des Werkstoffes bestimmende innere Oberfläche durch dichteres Aneinanderdrängen der Zellwände verringert. Durch Drucksteigerung über 200 kg/cm² hinaus kann die Feuchtigkeitsbeständigkeit des Kunstharz-Preßholzes nicht mehr wesentlich erhöht werden. Bei dem Zellstoffbahnen- und Gewebebahnen-Preßstoff ist der Einfluß des Preßdruckes geringer. Bereits Drücke von 60 kg/cm² ergeben ein verhältnismäßig dichtes und festes Gefüge. Möglichst hohe Drücke sind aber ratsam, da die Plastizität der Preßstoffe mit steigendem Preßdruck herabgesetzt wird, ohne daß die Festigkeit abfällt (Abb. 5).

Der Einfluß des Harzgehalts auf die Eigenschaften der Preßstoffe ist sehr groß und je nach Art des verwendeten Harzträgers verschieden (Abb. 6). Bei dem Kunstharz-Preßholz fallen die Zug- und Biegefestigkeit und der E-Modul mit steigendem Harzgehalt ab. Mit großer werdendem Harzanteil werden die Hohlräume mit Harz ausgefüllt und auf diese Weise die Verdichtbarkeit und damit die Festigkeit des Holzes herabgesetzt. Höchstwerte für die Druckfestigkeit werden bei hohem Harzgehalt (> 35%) erzielt. Das spezifische Gewicht ändert sich nicht merklich mit dem Harzgehalt. Die Zunahme durch höheren Harzgehalt wird durch die Abnahme der Verdichtbarkeit ausgeglichen. Hoher Harzgehalt setzt das Arbeitsaufnahmevermögen bei Schlagbeanspruchung herab. Der wesentliche Vorteil des harzreichen Kunstharz-Preßholzes besteht in seiner guten Feuchtigkeitsbeständigkeit. Bei Zellstoffbahnen-Preßstoff steigen die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit mit zunehmendem Harzgehalt trotz abnehmender Verdichtbarkeit zunächst sehr stark an. Das Harz übt auf die Zellulosefasern einen stark verfestigenden Einfluß aus. Nach Erreichen der Fasersättigung führt eine weitere Steigerung des Harzgehaltes zu einem Abfall der Festigkeit der gepreßten Proben. Die Höchstwerte der Festigkeit werden bei einem Harzgehalt von 26 bis 33% erreicht. Die einzelnen Kurven zeigen ziemlich ausgeprägte Spitzen, die in den einzelnen Belastungsfällen gegeneinander verschoben sind. Die untere Grenze der angeführten Harzgehalte ergibt gute Zugfestigkeit, die obere gute Druckfestigkeit. Eine eng abgegrenzte Angabe und genaue Einhaltung des günstigsten-Harzgehaltes ist schwierig. Bei niedrigem Harzgehalt ist Zellstoffbahnen-Preßstoff gegen Feuchtigkeit empfindlicher als Kunstharz-Preßholz. Durch Erhöhung des Harzgehaltes über 26% kann seine Feuchtigkeitsbeständigkeit nur noch unwesentlich gesteigert werden. Gewebebahnen-Preßstoff verhält sich bei Zug und Biegung ähnlich wie Zellstoffbahnen-Preßstoff. Als günstigster Harzgehalt lassen sich einheitlich 33 bis 38% angeben. Die Druckfestigkeit wird nur durch den Harzgehalt bestimmt und steigt mit dessen Erhöhung gleichmäßig an. Die Feuchtigkeitsbeständigkeit des Gewebebahnen-Preßstoffes ist auch bei geringem Harzgehalt sehr gut. Vergleichende Untersuchungen der Festigkeit der Harzträger und der fertigen Preßstoffe ergaben, daß Rohpapiere mit geringer Festigkeit zu einer guten Festigkeit des Preßstoffes führen können, wenn sie genügende Saugfähigkeit besitzen. In ähnlicher Weise wurden bei den Versuchen mit Geweben mit dem Harzträger niedrigster Festigkeit die höchste Festigkeit des Preßstoffes erzielt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Saugfähigkeit des Gewebes und der Preßstofffestigkeit ist aber nicht vorhanden. Ausschlaggebend scheint die Menge des durch Kapillarkräfte in das Innere der Garne eindringenden Harzes zu sein, das bei Zugspannungen ein Aufdrillen der Garne verhindert. Gewebe können gut saugfähig sein und infolge einer rein äußerlichen Aufnahme des Harzes doch eine geringe Preßstofffestigkeit ergeben. Abb. 7 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Linien der Preß-

stoffe mit verschiedenem Harzgehalt für eine Belastungsgeschwindigkeit von 100 kg/cm²/min.

Eindeutige elastische Grenzzustände, wie z. B. die Streckgrenze von Stahl, sind bei den Preßstoffen nicht vorhanden. Der Übergang zur plastischen Verformung ist allmählich. Lediglich bei Gewebebahnen-Preßstoff ist wegen der Redfähigkeit des beim Erkalten und Schwinden des Preßstückes gewellten Gewebes bei Überschreiten einer bestimmten Spannung eine stärkere Zunahme der Dehnung festzustellen. Die hohe Dehnung der Zellstoff- und Gewebebahnen-Preßstoffe bedingt eine Begrenzung der höchstzulässigen Beanspruchungen auf Grund der im Höchstfall tragbaren Verformungen. Hierbei ergibt sich für die günstigsten Preßbedingungen teilweise ein verändertes Bild. Aus Abb. 8 und 9, in denen die Spannung bei einer als zulässig angesehenen Verformung von 1% in Abhängigkeit vom Harzgehalt aufgetragen ist, kann entnommen werden, daß beispielsweise die hohe Druckfestigkeit eines harzreichen Gewebebahnen-Preßstoffes praktisch nicht ausgenutzt werden kann, und daß sich der Werkstoff in allen Fällen bei einem Harzgehalt von etwa 33% am günstigsten verhält. Ebenso können bei dem Kunstharz-Preßholz mit niedrigem Harzgehalt (z. B. 6%) infolge seiner geringen Dehnung erheblich höhere Druckspannungen zugelassen werden als bei einem solchen mit beispielsweise 45% Harzgehalt, trotz höherer Bruchfestigkeit des letzteren. Für die Verbesserung der mechanisch beanspruchten Preßstoffe ist weniger eine Steigerung der Bruchfestigkeit als eine Erhöhung des E-Moduls von Bedeutung.

Die starke Verformungsfähigkeit des Gewebebahnen-Preßstoffes hängt mit dem durch den natürlichen Gewebenaufbau und durch das Schwinden des Preßstoffes bedingten ungespannten Zustand der Garne zusammen. Um bereits bei niedrigen Spannungen eine Lastaufnahme des Harzträgers zu erzielen, wurden Preßteile mit vorgereckten und bei der Aushärtung gespannten Bahnen hergestellt und auf Formänderungsvermögen und Festigkeit untersucht. Aus den Versuchsergebnissen, siehe Zahlentafel 5, ergeben sich folgende wichtige Gesichtspunkte: Durch die Spannung der Gewebe bei der Aushärtung können die Festigkeit und der E-Modul wesentlich verbessert werden. Die Höhe der Spannung scheint in dem praktisch durchführbaren Bereich von untergeordneter Bedeutung zu sein. Vorrecken der einzelnen Gewebebahnen vor der Schichtung bis zu 75%

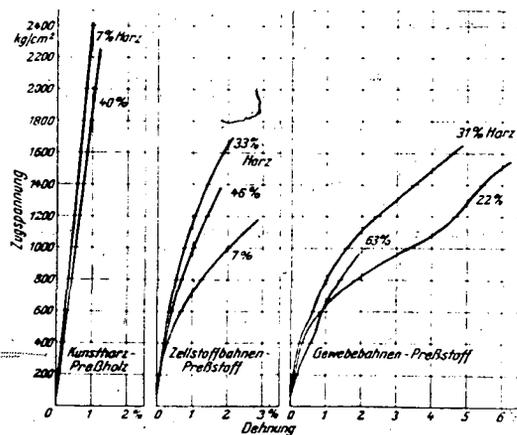


Abb. 7 Spannungs-Dehnungs-Linien phenolharzhaltiger Schichtstoffe bei verschiedenem Harzgehalt

Zahlentafel 5
Eigenschaften von Gewebefahren-Preßstoff bei Aushärtung unter Spannung
Harzgehalt 34%. Belastungsgeschwindigkeit 100 kg/cm²/min

| Ver- such Nr. | Zustand der Gewebefahren | Preß- druck kg/cm ² | Spezifisches Gewicht g/cm ³ | Zugfestigkeit σ_{zB} kg/cm ² | Elastizitäts- modul E kg/cm ² | Proportional- itätsgrenze kg/cm ² | Spannung bei 1% Verformung kg/cm ² | Verformung beim Bruch % |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | normal geschichtet | 200 | 1,44 | 1700 | 180 000 | 250 | 775 | 5,8 |
| 2 | beim Aushärten mit 40 kg/m belastet | 200 | 1,44 | 2390 | 160 000 | 510 | 1150 | 3,3 |
| 3 | beim Aushärten mit 80 kg/m belastet | 200 | 1,44 | 2220 | 167 000 | 780 | 1200 | 3,2 |
| 4 | getränkte Bahnen bis 6% Dehnung vorgereckt und bei 40 kg/m Belastung ausgehärtet | 200 | 1,44 | 2340 | 187 000 | 900 | 1450 | 2,2 |
| 5 | getränkte Bahnen bis 6% Dehnung vorgereckt und bei 80 kg/m Belastung ausgehärtet | 600 | 1,44 | 2400 | — | 900 | 1400 | 2,2 |
| 6 | getränkte Bahnen nur bis 6% Dehnung vorgereckt | 600 | 1,44 | 1710 | 197 000 | 1100 | 1520 | 1,3 |

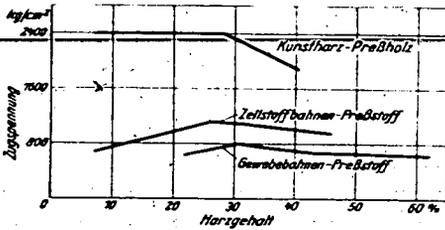


Abb. 8 Zugspannung bei einer höchstzulässigen Gesamtverformung von 1% für phenolharzhaltige Schichtstoffe

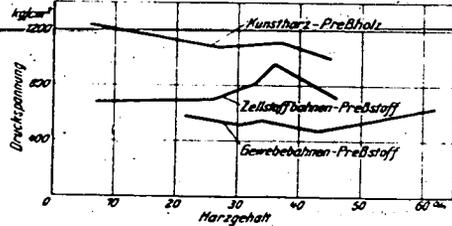


Abb. 9 Druckspannung bei einer höchstzulässigen Gesamtverformung von 1% für phenolharzhaltige Schichtstoffe

der Bruchdehnung führt zu einer weiteren Steigerung der Steifigkeit. Die Aushärtung unter Spannung ist praktisch nur bei einfachen Preßteilen möglich. Für die Herstellung von Formpreßteilen aus Gewebefahren ist aber wichtig, daß auch bei normaler Aushärtung, nur durch Vorrecken der Gewebe vor dem Pressen, eine Verbesserung des E-Moduls erzielt werden kann.

Abb. 10 und 11 zeigen den Einfluß des Harzgehaltes auf die Schubfestigkeit der Preßstoffe [8]. Es wurden Scher- und Verdrehversuche durchgeführt. Die Scherversuche (Abb. 10), bei denen die Schubflächen senkrecht zu den Schichten lagen und die Kraft in der Hauptfaserrichtung parallel zu den Schichten wirkte, ergaben, daß Kunstharz-Preßholz Höchstwerte für die Festigkeit bei einem Harzgehalt von etwa 28% aufweist. Ober- und unterhalb dieser Grenze liegt die Schubfestigkeit niedriger. Bei dem Zellstoffbahnen-Preßstoff kann die Schubfestigkeit offensichtlich noch erhöht werden, wenn der Harzgehalt über den für Zug, Druck und Biegung günstigsten Wert (35%) gesteigert wird. Bei dem Gewebefahren-Preßstoff ist die Schubfestigkeit in dem Bereich von 25 bis 50% vom Harzgehalt unabhängig. Das unterschiedliche Verhalten des Zellstoff- und Gewebefahren-Preßstoffes hängt damit zusammen, daß das poröse Gewebe auch bei geringer Imprägnierung ein zusammenhängendes Harzskelett ermöglicht, während bei Zellstoffbahnen mit niedrigem Harzgehalt das Bindemittel ungleichmäßig verteilt ist. Die Schubfestigkeit des Gewebefahren-Preßstoffes beträgt etwa das 2,8fache derjenigen des Kunstharz-Preßholzes längs zur

Faser. Zellstoff- und Gewebefahren-Preßstoff zeigen keine wesentlichen Unterschiede. Das Ergebnis der Verdrehversuche (Abb. 11) zeigt, daß sich der Harzgehalt auf die Eigenschaften der Preßstoffe je nach der Beanspruchungsart verschieden auswirken kann. Während die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit ober- und unterhalb eines bestimmten Harzgehaltes abfällt, steigt die Verdrehfestigkeit bei den sämtlichen Preßstoffen mit zunehmendem Harzgehalt ständig an (Abb. 11 a). Besonders stark ausgeprägt ist dieser Anstieg bei dem Zellstoffbahnen-Preßstoff. Werden die Formänderungen in Abhängigkeit von der Belastung beobachtet (Abb. 12), so zeigen die Preßstoffe ein unterschiedliches Verhalten. Während der Verdrehwinkel bei dem Kunstharz-Preßholz und Gewebefahren-Preßstoff mit steigendem Harzgehalt zunimmt, werden bei dem Zellstoffbahnen-Preßstoff die Verformungen mit zunehmendem Harzanteil geringer. Das hohe Formänderungsvermögen des harzreichen Gewebefahren-Preßstoffes kann damit erklärt werden, daß die Gewebe infolge des Schwindens der Preßmasse während der Abkühlung nach der Verpressung in einen ungespannten Zustand übergeführt werden, der eine Teilnahme an der Lastaufnahme ausschließt. Bei dem Zellstoffbahnen-Preßstoff ist eine genügende Versteifung der Bahnen nur bei hohem Harzgehalt möglich. In entsprechender Weise nimmt der Schubmodul mit steigendem Harzgehalt bei dem Zellstoffbahnen-Preßstoff zu und bei dem Gewebefahren-Preßstoff ab (Abb. 11 c). Aus den Versuchen ergibt sich, daß für die Ausbildung vorwiegend auf Schub bean-

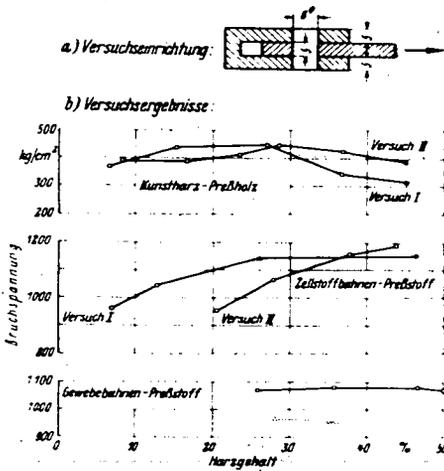


Abb. 10 Einfluss von Harzgehalt auf die Schubfestigkeit von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen
Krafteinwirkung parallel zu den Schichten
Schubflächen senkrecht zu den Schichten

spruderter Teile neben harzreichem Zellstoffbahnen-Preßstoff vor allem auch harzärmer Gewebebahnen-Preßstoff geeignet ist. Der Schubmodul von Kunstharz-Preßholz ist niedrig und vom Harzgehalt unabhängig. Da bei Torsion Schubspannungen in den Fugen der Schichten auftreten, liefern diese Versuche niedrigere Festigkeitswerte als die Scherversuche, bei denen die Schubspannungen nur in Ebenen senkrecht zu den Schichten vorkamen. Die Ermittlungen an den Proben mit quadratischem und kreisförmigem Querschnitt ergaben nahezu übereinstimmende Werte.

Abb. 13 läßt erkennen, daß auch bei den Preßmischungen Höchstwerte für die Festigkeit an einen bestimmten Harzanteil gebunden sind [9].

Die Arbeiten über den Einfluß der Preßbedingungen auf die Eigenschaften der Preßstoffe haben zur Entwicklung von Werkstoffen geführt, die die bisher im Schrifttum über die mechanische Festigkeit bekannt gewordenen Werte erheblich übertreffen (Zahlentafel 6).

In Abb. 14 und 15 sind Gefügebilder der geschichteten Preßstoffe bei verschiedenem Harzgehalt, aufgenommen an Anschliffen senkrecht zur Richtung der Schichten, wiedergegeben. Es zeigt sich, daß derartige Aufnahmen brauchbare Unterlagen für die Beurteilung der Zusammensetzung und der mechanischen Eigenschaften der Preßstoffe liefern [7], [10].

Abb. 16 und 17 zeigen für die verschiedenen Preßstoffe den Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit und die Arbeitsaufnahme bei dynamischer Beanspruchung. Die Festigkeit fällt mit zunehmender Temperatur ab. Der Unterschied ist bei Kunstharz-Preßholz und Zellstoffbahnen-Preßstoff größer als bei Gewebebahnen-Preßstoff und Preßmischungen. Die Schlagarbeit sinkt bei tiefen Temperaturen ungefähr auf den halben Wert der normalen Schlagarbeit herab [5], [6].

3. Verhalten der Preßstoffe bei langzeitiger Belastung

Werden Kunststoffe so hoch beansprucht, daß man mit ihnen etwa gewichtsgleich wie mit metallischen Werkstoffen baut, so können bei den vergleichbaren, im Flugzeugbau zulässigen Spannungen je nach Art der Beanspruchung und je nach Form des Bauteiles bemerkenswert hohe Verformungen auftreten. Die Verformungen werden hoch sowohl wegen des den Kunststoffen eigenen niedrigen Elastizitätsmoduls als auch wegen des bei langdauernden Belastungen schon bei niedrigen Spannungen einsetzenden Kriechens. Der Zeiteinfluß auf die Verformung — auf den elastischen und

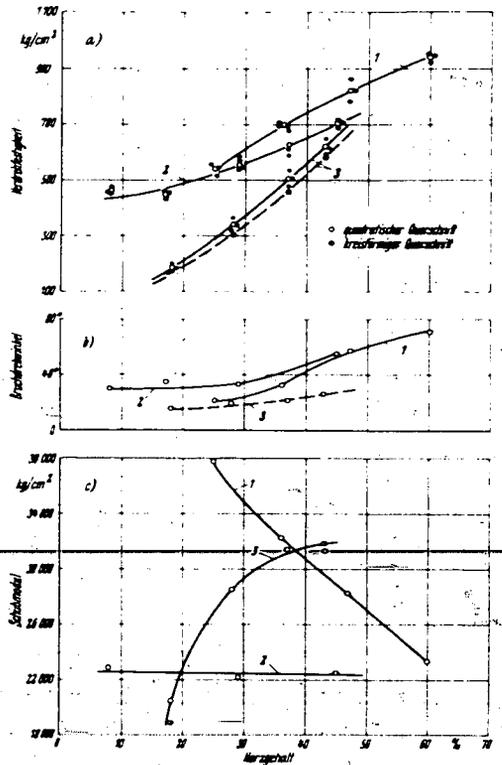


Abb. 11 Verdrehfestigkeit und Schubmodul von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen bei verschiedenem Harzgehalt

Versuchsdauer: 3 min
Kurve 1: Gewebebahnen-Preßstoff
Kurve 2: Kunstharz-Preßholz
Kurve 3: Zellstoffbahnen-Preßstoff

Zahlentafel 6
Mittlere Festigkeitswerte der untersuchten, mechanisch hochwertigen Preßstoffe

| | Kunstharz-Preßholz | Zellstoffbahnen-Preßstoff | Gewebebahnen-Preßstoff |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|
| Spezifisches Gewicht γ g/cm ³ | 1,87 | 1,44 | 1,42 |
| Zugfestigkeit σ_{zB} . kg/cm ² | 8 770 | 2 080 | 2 400 |
| Druckfestigkeit σ_{dB} kg/cm ² | 2 480 | 2 840 | 2 000 |
| Biegefestigkeit σ_{bB} kg/cm ² | 8 900 | 2 860 | 2 860 |
| Elastizitätsmodul E kg/cm ² | 308 000 | 178 000 | 197 000 |
| Gütezahl σ_{zB}/γ | 27,5 | 14,4 | 16,9 |
| Gütezahl σ_{dB}/γ | 18,1 | 16,2 | 14,1 |
| Gütezahl σ_{bB}/γ | 28,4 | 19,8 | 20,2 |
| Schlagbiegearbeit σ_n cm kg/cm ² | 96 | 68 | 100 |

Werkstoffen eigenen niedrigen Elastizitätsmoduls als auch wegen des bei langdauernden Belastungen schon bei niedrigen Spannungen einsetzenden Kriechens. Der Zeiteinfluß auf die Verformung — auf den elastischen und

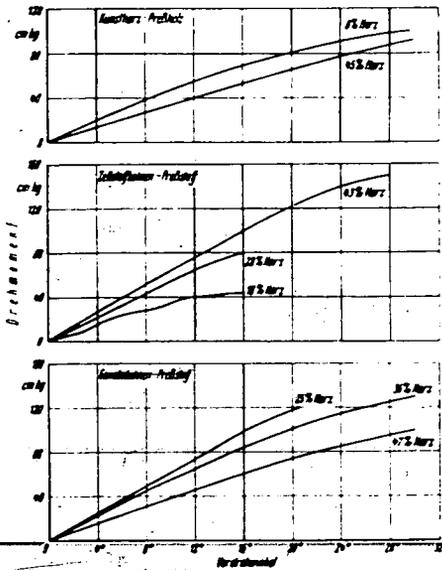


Abb. 12 Formänderungen von geschichteten Kunstharz-Präfstoffen mit verschiedenem Harzgehalt bei Verdrehbeanspruchung
Belastungsgeschwindigkeit: 250 kg/cm²/min

plastischen Anteil — ist auch bei den für tragende Bauteile bei dem derzeitigen Entwicklungsstande allein in Frage kommenden geschichteten Kunstharzpräfstoffen bereits bei Raumtemperatur von einem Ausmaß, wie man es für die metallischen Werkstoffe des Zellenbaus erst bei gehobenen und hohen Temperaturen, die jedoch unter normalen Betriebsbedingungen nicht vorkommen, kennt.

In der DVL wurden Versuche über das Kriechverhalten der geschichteten Präfstoffe bei Raumtemperatur (20°) durchgeführt [11].

In Abb. 18 sind die Standzeiten von Zellstoff- und Gewebesharn-Präfstoffen bei verschiedenen hohen Spannungen wiedergegeben. Die Bruchspannungen fallen zunächst stark, dann allmählich mit zunehmender Belastungsdauer ab. Aus Zahlentafel 7 geht hervor, daß die Standfestigkeit für 30 Tage bei den einzelnen Werkstoffen je nach Harzgehalt und Prüfdruck 50 bis 77% der Zugfestigkeit beträgt. Die Standfestigkeit zeigt die gleiche Abhängigkeit vom Prüfdruck und Harzgehalt wie bei den Kurzzeitversuchen.

Abb. 19 zeigt den Verlauf der Dehnungen bei Spannungen, die der Standfestigkeit bezogen auf eine Versuchsdauer von 30 Tagen entsprechen. Sämtliche Werkstoffe wiesen bei dieser Belastung Gesamtdehnungen von 1,2 bis 2,5% auf, die das bei technischen Bauwerken zulässige Maß weit überschreiten. Allein schon die bleibenden Dehnungen sind bei allen Werkstoffen nach 180stündiger Belastung größer als 0,2%. Aus dem Verlauf der Zeit-Dehnungs-Linien geht hervor, daß die Dehnungsgeschwindigkeit dauernd abnimmt, ohne jedoch den Wert 0 zu erreichen.

Eine Beurteilung der Dauerstandfestigkeit erfolgte nach den von Gentner dargestellten Zusammenhängen [12]. Danach führen nicht zum Bruch Zeit-Dehnungslinien, die im einfachlogarithmischen Koordinatensystem hohl zur Zeitachse sind (Hyperbeln), die geradlinig verlaufen (logarithmische Kurven) und die zu-

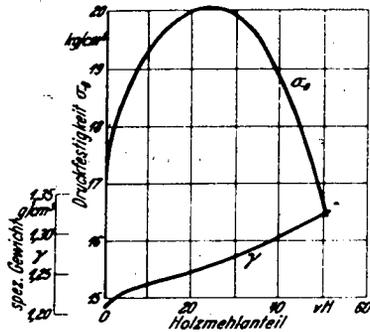


Abb. 13 Eigenschaften von Typ S bei verschiedenem hohem Holzmehlanteil

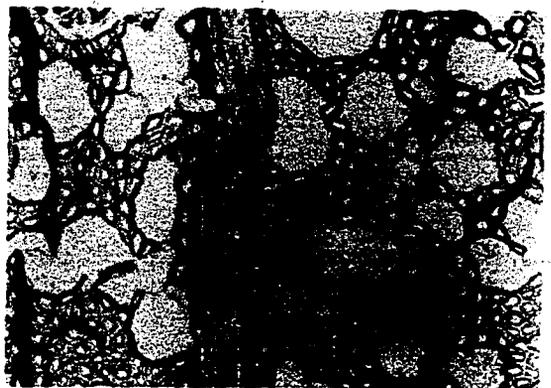


Abb. 14 Gefügeaufnahmen von Kunstharz-Präfstoff
Vergr. 200fach
a 7% Harz, mechanisch hochwertig
b 44% Harz

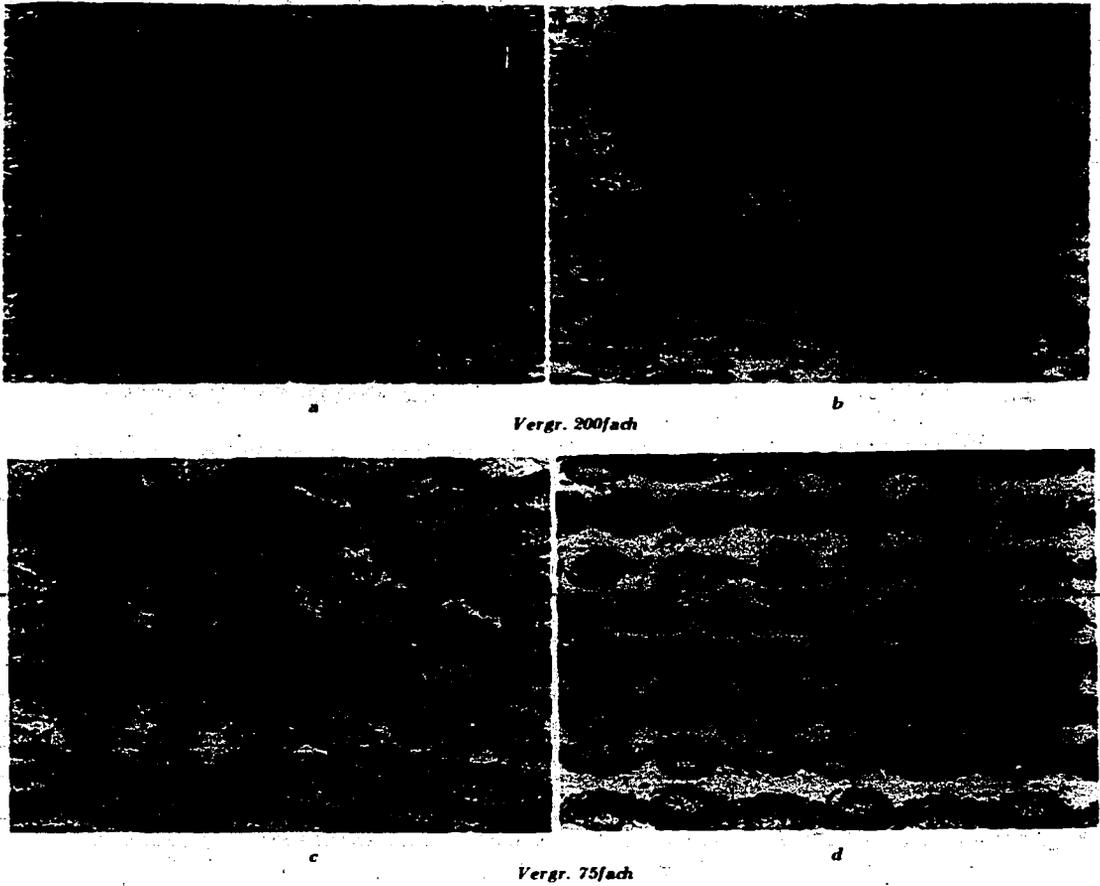


Abb. 15 Gefügeaufnahmen von Zellstoffbahnen- und Gewebebahnen-Preßstoff

- a 33% Harz, mechanisch hochwertig
- b 46% Harz
- c 33% Harz, mechanisch hochwertig
- d 64% Harz

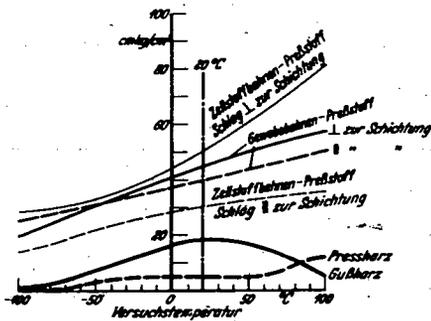


Abb. 17 Spezifische Schlagbiegearbeit von Kunstharz-Preßstoffen bei verschiedenen Temperaturen

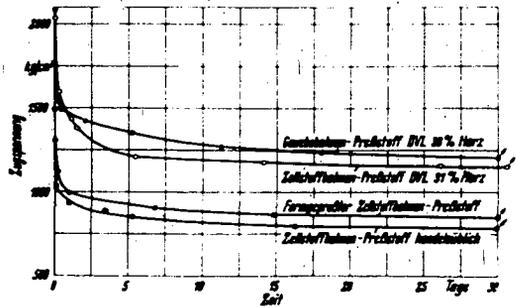


Abb. 18 Standfestigkeit von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen

Zahlentafel 7

Standfestigkeit geschichteter Kunstharz-Preßstoffe, bezogen auf eine Versuchsdauer von 30 Tagen

| Werkstoff | Harzgehalt % | Preßdruck kg/cm ² | Zugfestigkeit kg/cm ² | Standfestigkeit kg/cm ² | Standfestigkeit 10% der Zugfestigkeit |
|-----------------------------------------|--------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Zellstoffbahnen-Preßstoff DVL | 9 | 200 | 1420 | 725 | 51,0 |
| „ | 31 | 200 | 2033 | 1155 | 56,5 |
| „ | 44 | 200 | 1990 | 1050 | 53,0 |
| „ handelsüblich | 31 | 200 | 2175 | 1145 | 52,5 |
| „ | 31 | 60 | 1953 | 944 | 48,0 |
| „ | 31 | 600 | 2180 | 1220 | 56,5 |
| „ | 48 | 200 | 980 | 590 | 68,5 |
| „ | — | — | 1310 | 790 | 60,0 |
| Formgepreßter Zellstoffbahnen-Preßstoff | — | — | 1498 | 850 | 57,0 |
| Gewebebahnen-Preßstoff DVL | 22 | 200 | 1840 | 1170 | 63,5 |
| „ | 38 | 200 | 2085 | 1210 | 58,0 |
| „ | 51 | 200 | 1470 | 1120 | 76,5 |

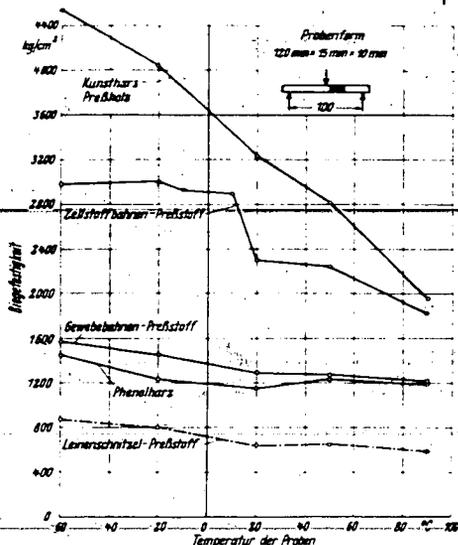


Abb. 16 Biegefestigkeit von Kunstharz-Preßstoffen bei verschiedenen Temperaturen

nächst hohl zur Dehnachse sind, sich aber im weiteren Verlauf asymptotisch Geraden annähern. Dagegen besteht bei Schaulinien, die hohl zur Dehnachse verlaufen (Parabeln) in endlicher Zeit Bruchgefahr. Es wurden daher die Zeit-Dehnungs-Kurven bei verschiedenen Spannungen in Langzeitversuchen ermittelt und im einfach logarithmischen Maßstab aufgezeichnet (Abb. 20). Hierbei ergaben sich Schaulinien mit parabolischem und logarithmischem Verlauf. Die Dauerstandfestigkeit entspricht dann der Spannung, die gerade noch eine gradlinige Abhängigkeit der Dehnung von der Zeit ergeben. Die auf diese Weise gefundenen Werte sind in Zahlentafel 8 zusammengestellt. Danach beträgt die Dauerstandfestigkeit von Zellstoffbahnen-Preßstoff 28 bis 30% der bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 800 kg/cm²/min erreichten Zugfestigkeit.

Zeit-Dehnungs-Kurven bei Spannungen, die der Dauerstandfestigkeit entsprechen, ergeben in der 100. Belastungsstunde eine Dehngeschwindigkeit von rund 5 · 10⁻⁴%/h. Da nach dieser Zeit die Dehnungen genügend stark abgeklungen sind, kann bei den Preßstoffen als Dauerstandfestigkeit die Spannung gelten, die in der 100. bis 110. Belastungsstunde eine Dehngeschwindigkeit von 5 · 10⁻⁴%/h zur Folge hat. Gleich-

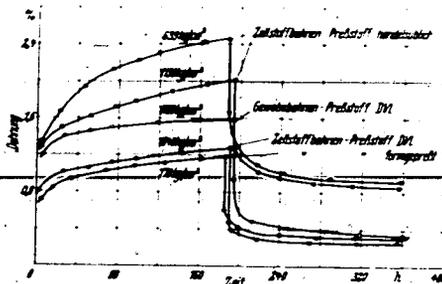


Abb. 19 Zeit-Dehnungs-Kurven von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen bei Belastungen, die der Standfestigkeit bezogen auf eine Versuchsdauer von 30 Tagen entsprechen

zeitig ist zu fordern, daß die bleibende Dehnung nach 110stündiger Belastung und darauf folgender 24stündiger Entlastung unter 0,2% liegt. Nach diesem Verfahren kann die Dauerstandfestigkeit in verhältnismäßig kurzer Zeit an 3 bis 4 Proben ermittelt werden.

Bei den Versuchen konnte beobachtet werden, daß nicht nur die Temperatur, sondern auch die Luftfeuchtigkeit den Fließvorgang bei den Preßstoffen beeinflusst. Zunehmende Feuchtigkeit erhöht die Formänderungen, bei abnehmender Feuchtigkeit tritt dagegen durch Schrumpferscheinungen eine Verkürzung der Proben ein. Offensichtlich sind die Preßstoffe im gespannten und gedehnten Zustand gegenüber Feuchtigkeit besonders empfindlich.

4. Festigkeit der Preßstoffe bei Schwingungsbeanspruchung

Zahlentafel 9 zeigt die Festigkeit der regellosen Preßmassen bei Zugsprungs-, Biege- und Verdrehwechselbeanspruchung für eine Temperatur von 20° [13], [14]. Die Versuche erstreckten sich über Lastwechselzahlen bis zu 50 · 10⁶. Indes konnten selbst nach 100 Millionen Lastwechsel noch Brüche beobachtet werden. Nahezu stimmen aber die bei 20 · 10⁶ Lastwechsel gefundenen Bruchspannungen mit der Dauerfestigkeit überein. Durch eine starke innere Kerbwirkung und infolge ihres groben Gefüges halten die regellos verpreßten Typen M, Z 1 und T 2 weniger als reines Preßharz. Im Gegensatz zu Dauerbiegeversuchen ist bei Dauerverdrehversuchen die Festigkeit von der Schwingungsfrequenz abhängig. Sie nimmt mit zunehmender Wechselzahl ab.

Um den Einfluß des Harzgehaltes auf die Wechselfestigkeit der geschichteten Preßstoffe zu bestimmen,

Zahlentafel 8
Dauerstandfestigkeit von Zellstoffbahnen-Preßstoffen

| Werkstoff | Zugfestigkeit kg/cm ² | nach Gentner kg/cm ² | Dauerstandfestigkeit unter Zugbelastung einer Dreh- geschwindigkeit von 6,10 ⁻⁴ °/s in der 100. Belastungsstunde | | in % der Zugfestigkeit |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| | | | kg/cm ² | kg/cm ² | |
| Zellstoffbahnen-Preßstoff DVL | 2088 | 720 | 715 | | 30,1 |
| handelsüblich | 2175 | 602 | 600 | | 27,6 |
| | 1810 | 296 | 290 | | 22,2 |

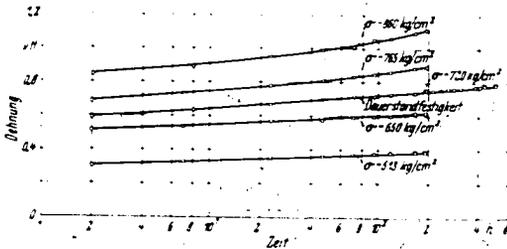


Abb. 20 Zeit-Dehnungs-Kurven von Zellstoffbahnen-Preßstoff DVL

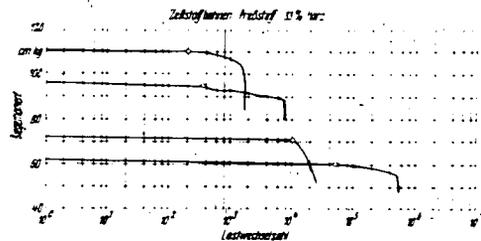


Abb. 21 Biegewechselfersuche mit geschichteten Kunstharz-Preßstoffen. Lastabfall der Proben während des Versuches

Zahlentafel 9
Wechselfestigkeit der Preßmassen aus Phenol-Formaldehydharz

| | Lastwechselzahl | Preßharz | M | S | T 2 | Z 2 |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|----------|------|---------------|-------------|-------------|
| Zugsprungsfestigkeit kg/cm ² | 20 · 10 ⁶ | — | — | 140 ± 140 | — | — |
| Biegewechselfestigkeit ¹⁾ kg/cm ² | 0,01 · 10 ⁶ | 835 | — | 450 bis 530 | 410 bis 510 | 485 bis 515 |
| | 20 · 10 ⁶ | 820 | 200 | 255 bis 300 | 200 bis 290 | 140 bis 190 |
| Verdrehwechselfestigkeit ²⁾ kg/cm ² | 50 · 10 ⁶ | — | — | 175 bis 320 | — | — |
| Zugsprungsfestigkeit Zugfestigkeit | 20 · 10 ⁶ | — | — | 0,67 | — | — |
| Biegewechselfestigkeit Biegefestigkeit | 20 · 10 ⁶ | 0,81 | 0,88 | 0,34 bis 0,43 | 0,45 | 0,28 |
| Verdrehwechselfestigkeit Verdrehfestigkeit | 50 · 10 ⁶ | — | — | 0,26 bis 0,42 | — | — |

¹⁾ Planbiegeversuche

²⁾ Schwingzahl 25 und 50 Hz

würden in der DVL Planbiegeversuche bei 20° an selbst verpreßten Werkstoffen durchgeführt [8].

Der Aufbau der Preßstoffe aus einzelnen Lagen hat bei Biegewechselfersuchen mit gleichbleibendem Biegewinkel und Kräfteinwirkung senkrecht zu den Schichten zur Folge, daß sich der Bruchverlauf über längere Zeit erstreckt. Der Bruch der Proben beginnt durch Anrisse in den äußeren Fasern. Danach laufen die Proben mit niedriger Last weiter, bis der Bruch durch eine Lagegedrungen ist und die Proben in der betreffenden Fuge mehr oder weniger stark aufspalten. Entweder setzt sich dieses Spiel, vor allem bei hohen Spannungsaus-schlägen, bis zum endgültigen Bruch fort oder es bleibt weitere Gefügezerstörung aus. Für die Aufstellung der Wöhlerkurven wurden daher die der ersten Rißbildung entsprechenden Lastwechselzahlen zugrunde gelegt. Ihre einwandfreie Ermittlung war durch Beobachtung des Verlaufes des Biegemomentes während der einzelnen Versuche möglich (Abb. 21). Abgesehen von einem geringen Abfall der Last bei hohen Spannungen infolge von Kriecherscheinungen bleibt das Biegemoment zu-

nächst nahezu konstant. Bei einer bestimmten Lastwechselzahl ist dann ein deutlicher Abfall der Last festzustellen, der den Beginn der Gefügezerstörung kennzeichnet.

In Abb. 22 ist, bezogen auf eine Lastwechselzahl von 20 · 10⁶, die Biegewechselfestigkeit in Abhängigkeit vom Harzgehalt aufgezeichnet. Kunstharz-Preßholz hat bei einem Harzgehalt von 12 und 36% gleich hohe Schwingungsfestigkeit, während die statische Festigkeit mit zunehmendem Harzgehalt abfällt. Bei dem Zellstoff- und Gewebefäden-Preßstoff hr. der Werkstoff mit der höchsten statischen Festigkeit auch die höchste Schwingungsfestigkeit. Allerdings ist der Einfluß des Harzgehaltes auf die Wechselfestigkeit erheblich geringer. Bei Wechselbeanspruchung wirkt der Verfestigung der Zellstoffbahnen durch das Bindemittel die zerreibende Kraft des Harzes entgegen. Die verhältnismäßig niedrige Wechselfestigkeit des harzarmen Gewebefäden-Preßstoffes kann mit der starken gegenseitigen Reibung der in gestrafftem Zustand dicht nebeneinander liegenden Gewebefäden erklärt werden.

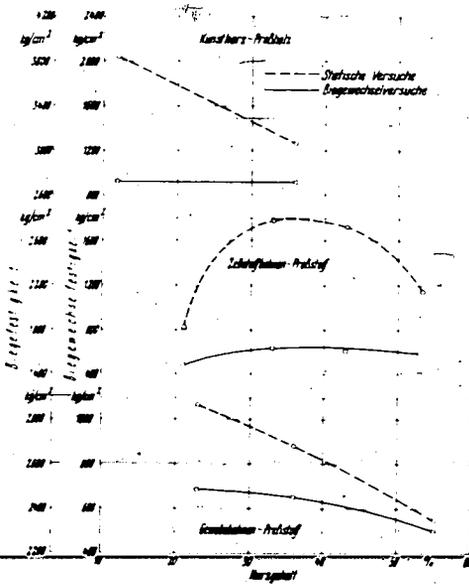


Abb. 22 Einfluss von Harzgehalt auf die Biegemechanische Festigkeit von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen Lastwechselzahl: $20 \cdot 10^6$

Die Wöhlerkurven der Preßstoffe mit den günstigsten Eigenschaften sind in Abb. 23 aufgezeichnet. Auch hier ist aus dem Verlauf des Abfalles der Bruchwechselspannungen mit zunehmender Lastwechselzahl zu schließen, daß selbst oberhalb einer Lastwechselzahl von $20 \cdot 10^6$ noch mit Brüchen gerechnet werden muß, auf der anderen Seite aber die Dauerfestigkeit nicht mehr erheblich unter den bei dieser Lastwechselzahl gefundenen Wechselspannungen liegt. Bezogen auf eine Lastwechselzahl von $20 \cdot 10^6$ beträgt die Biegezugfestigkeit bei dem Kunstharz-Preßholz (12% Harz) 920 kg/cm^2 , bei dem Zellstoffbahnen-Preßstoff (33% Harz) 633 kg/cm^2 und bei dem Gewebbahnen-Preßstoff (36% Harz) 652 kg/cm^2 , das sind 23 bis 24% der Biegezugfestigkeit.

Abb. 24 zeigt das Ergebnis von Zugschwellversuchen an Zellstoffbahnen-Preßstoffen in einem 5-t-Zug-Druck-Pulsler. Im Gegensatz zu den Biegeversuchen ist bei den Zugschwellversuchen die Spannung über den Querschnitt gleichmäßig verteilt. Außerdem bleibt die eingestellte Last bei dem Pulsler, unbeeinflusst durch dynamische Kriechvorgänge und Querschnittsänderungen durch Risse, die gleiche. Es tritt daher in verhältnismäßig kurzer Zeit nach der ersten Rißbildung vollständiger Trennungsbruch ein, so daß für die Aufstellung der Wöhlerkurven eindeutige Bruchlastwechselzahlen angegeben werden können. Der Bereich der Lastwechselzahlen erstreckt sich von $10 \cdot 10^6$ bis $20 \cdot 10^6$. Die Zugschwellfestigkeit für eine Lastwechselzahl von $20 \cdot 10^6$, die nach dem Verlauf der Kurve praktisch als Zugschwelldauerfestigkeit angesehen werden kann, beträgt im günstigsten Fall $358 \pm 358 \text{ kg/cm}^2$, das sind 35% der Zugfestigkeit.

Die Wechselschwellfestigkeit der mit den Rohstoffen der DVL hergestellten Preßstoffe übertrifft die Werte der bisher untersuchten Werkstoffe um 71 bis 167% (Zahlentafeln 10 und 11). Im Hinblick auf die Rohstoffbeschaffung ist in Zahlentafel 10 noch bemerkenswert, daß Gewebbahnen-Preßstoffe aus Zellwolle bei niedriger

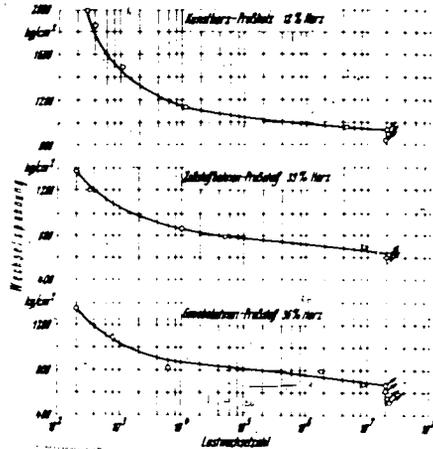


Abb. 23 Wöhlerkurven von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen bei Planbiegung

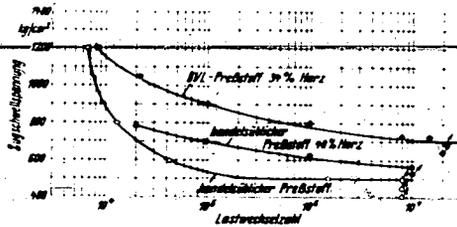


Abb. 24 Wöhlerkurven von Zellstoffbahnen-Preßstoffen bei Zugschwellbeanspruchung Allgemeine Eigenschaften des DVL-Preßstoffes: $\gamma = 1,42 \text{ g/cm}^3$; $\sigma_{ZH} = 2070 \text{ kg/cm}^2$; $\sigma_{DH} = 2290 \text{ kg/cm}^2$; $\sigma_{BH} = 2555 \text{ kg/cm}^2$

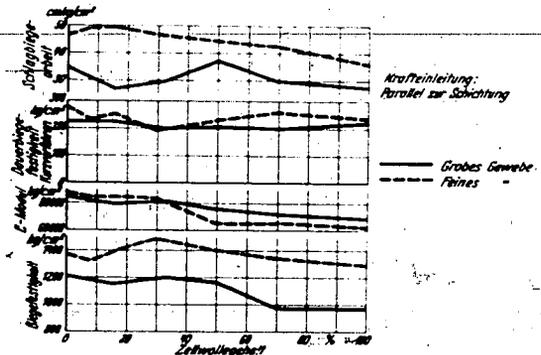


Abb. 25 Eigenschaften von Gewebbahnen-Preßstoff mit verschiedenem Zellwollegehalt

statischer Festigkeit verhältnismäßig hohe Schwingfestigkeit besitzen.

Das Ergebnis näherer Untersuchungen über die Möglichkeit eines Austausches der Baumwolle durch Zellwolle bei den Gewebbahnen-Preßstoffen ist in Abb. 25 wiedergegeben [15], [16]. Es zeigt sich, daß Preßstoffe nur aus Zellwolle, brauchbar sind. Die Ermittlung der

Zahlentafel 10
Biegewechselfestigkeit geschichteter Kunstharz-Preßstoffe
Zusammenfassung sämtlicher bisherigen Ergebnisse.

| Werkstoff | Harzträger | Harzgehalt % | Biegefestigkeit σ_{dB} kg/cm ² | Biegewechselfestigkeit σ_{wb} kg/cm ² | Lastwechselfestigkeit σ_{wb} kg/cm ² | σ_{wb} σ_{dB} | Quelle | |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------|------|
| Kunstharz-Preßholz | Buchenfurniere | 12 | 2880 | 760 | 10 · 10 ⁴ | 0,28 | [6] | |
| | | 36 | 3840 | 920 | 20 · 10 ⁴ | 0,24 | [8] | |
| | | | 3070 | 922 | 20 · 10 ⁴ | 0,20 | [8] | |
| Zellstoffbahnen-Preßstoff | 1,2 mm Natron- Zellstoffbahnen | — | 1150 | 360 | 20 · 10 ⁴ | 0,31 | [14] | |
| | | — | 1325 | 360 | | 0,27 | [14] | |
| | | — | 1500 | 380 | | 0,25 | [14] | |
| | | 21 | 1820 | 484 | | 0,27 | [8] | |
| | | 38 | 2780 | 633 | | 0,28 | [8] | |
| | | 48 | 2780 | 618 | | 0,23 | [8] | |
| | 58 | 2160 | 600 | 0,28 | | | | |
| Gewebehahnen-Preßstoff | | | 1275 | 240 | 20 · 10 ⁴ | 0,24 | [14] | |
| | | Baumwollgewebe | — | 1068 | 257 | 10 · 10 ⁴ | 0,24 | [15] |
| | | Mischgewebe 9/28 | — | 1110 | 310 | | 0,28 | |
| | | " 84/16 | — | 1081 | 270 | | 0,26 | |
| | | " 44,56 | — | 880 | 270 | | 0,28 | |
| | | Zellwollgewebe | — | 695 | 220 | 0,22 | | |
| | | Baumwollgewebe | — | 1017 | 204 | 10 · 10 ⁴ | 0,20 | [8] |
| | | Mischgewebe 84/16 | — | 989 | 280 | | 0,25 | |
| | | Zellwollgewebe | — | 806 | 270 | | 0,24 | |
| | | Baumwollgewebe | 28 | 2860 | 686 | 20 · 10 ⁴ | 0,24 | [8] |
| | 36 | 2680 | 652 | 0,24 | | | | |
| | 55 | 2350 | 600 | 0,21 | | | | |

Zahlentafel 11
Zugversuchsfestigkeit
geschichteter Kunstharz-Preßstoffe

| Werkstoff | Harzgehalt % | Zugversuchsfestigkeit σ_{Uz} kg/cm ² | Lastwechselfestigkeit σ_{Uz} kg/cm ² | σ_{Uz} σ_{dB} | Quelle |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------|
| Zellstoffbahnen-Preßstoff | 37 bis 38 | 245 + 245 | 20 · 10 ⁴ | 0,64 | [14] |
| | 40 | 263 + 263 | 20 · 10 ⁴ | 0,58 | [14] |
| Zellstoffbahnen-Preßstoff | 40 | 278 + 278 | 20 · 10 ⁴ | 0,51 | [14] |
| | 34 | 358 + 358 | 20 · 10 ⁴ | 0,85 | [8] |

Dauerfestigkeit erfolgte bei diesen Versuchen in einem Kurzverfahren, bei dem der Beginn der Zerrüttung der Werkstoffe dadurch gefunden wurde, daß in statischen Biegeversuchen der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Spannung an Proben gemessen wurde, die einer Dauerbiegung von jeweils 50 000 Lastwechseln ausgesetzt waren. Der Dauerfestigkeit entspricht dann diejenige Spannung, bis zu der der Elastizitätsmodul keine wesentliche Veränderung aufweist (Abb. 26).

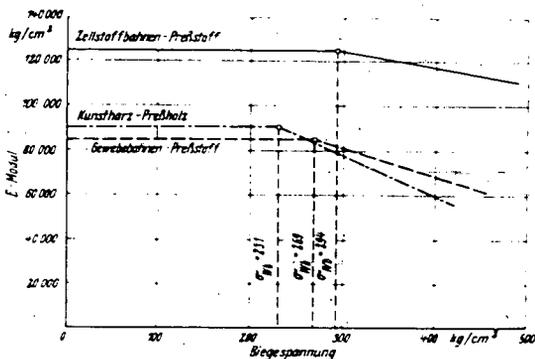
Schließlich sind noch Versuche [14] von Interesse, bei denen in Zellstoffbahnen-Preßstoffe eingelegte Stahldrähte bei gewisser Anordnung und Verankerung gegenüber unbewehrten Proben eine Erhöhung der Dauer-

Zahlentafel 13
Festigkeit von Zellstoffbahnen-Preßstoff aus einer formgepreßten Luftschraubennabe
Spezifisches Gewicht: 1,38 g/cm³

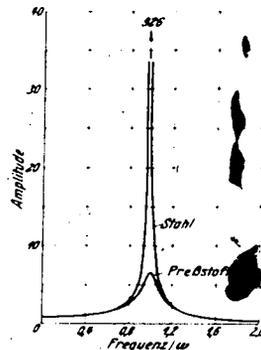
| | Tiefstwert | Höchstwert | Mittelwert |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|--------------------|
| Zugfestigkeit parallel zur Schichtrichtung kg/cm ² | 472 | 814 | 645 |
| Druckfestigkeit parallel zur Schichtrichtung kg/cm ² | 1480 | 1660 | 1600 ²² |
| Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtrichtung kg/cm ² | 2620 | 2780 | 2670 |
| Biegefestigkeit parallel zur Schichtrichtung kg/cm ² | 912 | 1660 | 1335 |
| E-Modul (Biegung) kg/cm ² | — | — | 118 000 |
| Spezifische Schlagbiegearbeit parallel zur Schichtrichtung cm kg/cm ² | 11,6 | 20,0 | 16,9 |
| Spezifische Schlagbiegearbeit senkrecht zur Schichtrichtung cm kg/cm ² | 18,6 | 21,5 | 19,7 |

Zahlentafel 12
Festigkeit von Zellstoffbahnen-Preßstoff mit Stahldrähtbewehrung

| Werkstoff | Spezifisches Gewicht γ g/cm ³ | Biegefestigkeit σ_{dB} kg/cm ² | Dauerbiegefestigkeit σ_{wb} kg/cm ² | E-Modul E kg/cm ² | σ_{dB} γ | σ_{wb} γ | E γ |
|-----------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| Kiefernholz | 0,5 | 850 | 250 | 120 000 | 17,0 | 5,0 | 2400 |
| Duralumin | 2,8 | 9 000 | 1 800 | 720 000 | 32,0 | 4,7 | 2 600 |
| Unbewehrter Preßstoff | 1,4 | 1 825 | 360 | 105 000 | 9,5 | 2,6 | 750 |
| Bewehrter Preßstoff | 1,5 | 2 500 | 1 040 | 220 000 | 16,7 | 7,0 | 1 470 |



Links:
Abb. 26 Biegemodul-
festigkeit von Kunst-
harz-Preßstoffen
(Kurzerfahren)



Rechts:
Abb. 27 Dämpfung
von Preßstoff und
Stahl

biegefestigkeit bis zu 190% bei einer Zunahme des spezifischen Gewichtes von 7% erbrachten (Zahlentafel 12).

Für viele Zwecke vorteilhaft ist die hohe Dämpfungsfähigkeit der Preßstoffe. Nach Abb. 27 ist das Verhältnis der Dämpfung von Stahl zu Kunststoff wie 1 : 140. Diese Eigenschaft kann dazu führen, daß bei Flugzeugbauteilen die unerwünschten und oft gefährlichen Resonanzschwingungen unterdrückt werden.

Schichtholz sowie zur Kaltverleimung der Flugzeugteil-Anwendung. Nähere Angaben hierüber sowie Versuchsergebnisse über die Verleimbarkeit der Preßstoffe sind in dem Beitrag IC 7 enthalten.

III. Durchsichtige Kunststoffe für die Verglasung von Flugzeugen

1. Werkstoffe, Herstellungsverfahren und Verarbeitung

Für die Verglasung von Flugzeugen dienen Hartgläser, Mehrschichtengläser und Einschichtengläser aus durchsichtigen Kunststoffen. Bei der Herstellung von Hartglas [20] wird eine Spiegelglasscheibe vorsichtig erwärmt und in bewegter Luft schroff abgekühlt. Durch diese Wärmebehandlung entstehen in der Scheibe innere Spannungen, die die Biegefestigkeit und das Federungsvermögen erhöhen. Wird durch mechanische Verletzung oder durch Stoß die latente Spannung der Scheibe ausgelöst, so zerfällt sie schlagartig in kleinere, nicht sehr scharfkantige Bruchstücke, die keine wesentlichen Verletzungen hervorrufen können. Aus dem gleichen Grunde kann aber auch Hartglas nicht nachträglich mit einem Diamanten zugeschnitten werden, sondern muß in den fertigen Abmessungen vom Herstellerwerk bezogen werden. Bei den Mehrschichtengläsern [21], [22], [23] werden zwei in der Regel etwa 2 mm dicke Tafelglasscheiben durch eine transparente Zwischenschicht aus hochelastischen Kunststoffen miteinander verbunden. Bei Zertrümmerung des Glases bleiben die Splitter auf der zähen Mittelschicht haften. Durch die Zwischenschicht hat das Glas außerdem eine so hohe Elastizität, daß sich die Scheibe beim Anprall eines Körpers elastisch auswölbt. Als Zwischenschichten dienen Kunststoffe aus Nitrocellulose, Acetylcellulose und Acrylsäureester [24]. Mehrschichtenglas kann in der gleichen Weise wie Spiegelglas bearbeitet werden. Es können

5. Anwendungsbeispiele

Frühere Versuche [17] mit einem Preßstoffholm, bei dem U-Profile und Platten aus Schichtstoffen durch Leimung und Nietung untereinander verbunden wurden, ergaben im Vergleich zu einem gewichtsgleichen Holzholm die gleiche Bruchlast, aber um 40% höhere Durchbiegung. In einem anderen Ausführungsbeispiel wurde das Seitenleitwerk eines Flugzeuges aus Rohren, Winkelprofilen und Platten aus Preßstoff hergestellt. Auch hier war die Steifigkeit geringer als bei einer Ausführung in Leichtmetall. Luftschrauben aus Gewebebahnen-Preßstoff wurden in Amerika von de Havilland entwickelt [18], [19]. Zahlentafel 13 enthält die an einer als Formpreßstoff aus Zellstoffbahnen-Preßstoff hergestellten Verstellnabe erzielten Festigkeitswerte. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung geschichteter Preßstoffe für die Ausbildung von Formpreßstücken gibt Abb. 28, die eine mit Hohlprofilen und Stegen verstärkte Halbschale zeigt, die mit einem spiegelsgleichen Teil durch Schrauben zu einer Höhenflosse verbunden wird. In Abb. 29 und 30 ist für ein ähnlich großes Bauteil ein Kostenvergleich zwischen der Preßstoff- und Metallbauweise aufgestellt. Abb. 29 enthält die Material-, Lohn- und Vorrichtungskosten sowie die Unkostenbeiträge. Es zeigt sich, daß bei der Preßstoffbauweise eine bedeutende Ersparnis an Arbeitsstunden erzielt wird. Sie beträgt bei Stückzahlen über 500 340 Stunden für ein Teil. Die Kosten für die Vorrichtungen treten gegenüber der Metallbauweise sehr stark in den Vordergrund. In Abb. 30 sind die Gesamtkosten der Preßstoff- und Metallbauweise aufgezeichnet. Bereits bei Stückzahlen über 230 ist die Preßstoffbauweise der Metallbauweise überlegen. Die Kostenersparnis beträgt bei einer Stückzahl von 500 710 RM/Teil und bei einer Stückzahl von 1000 1065 RM/Teil. Den geringen Kosten und der Arbeitsersparnis bei der Preßstoffbauweise steht als Nachteil die lange Beschaffungszeit der Gesenke gegenüber. Außerdem haben Bauteile aus Preßstoff ein schlechtes Beschußverhalten, das ihre Verwendung für lebenswichtige Teile an Kriegsflyzeugen vorläufig noch ausschließt. Kunstharz-Preßholz dient im Flugzeugbau zur Ausbildung von Luftschraubenfüßen.

Mit Phenol-Formaldehydharz getränkte Zellstofffolien und Karbamidharze, die mit einem Kalt härter verarbeitet werden, finden schließlich im Holzflugzeugbau als Bindemittel zur Herstellung von Sperr- und

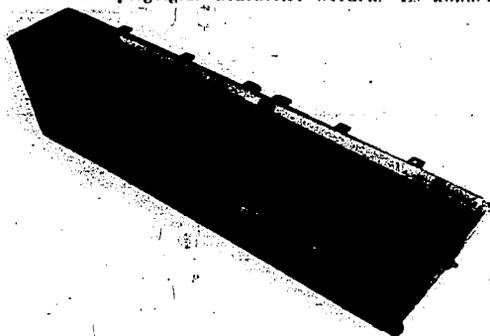


Abb. 28 Leitwerkschale aus Zellstoffbahnen-Preßstoff

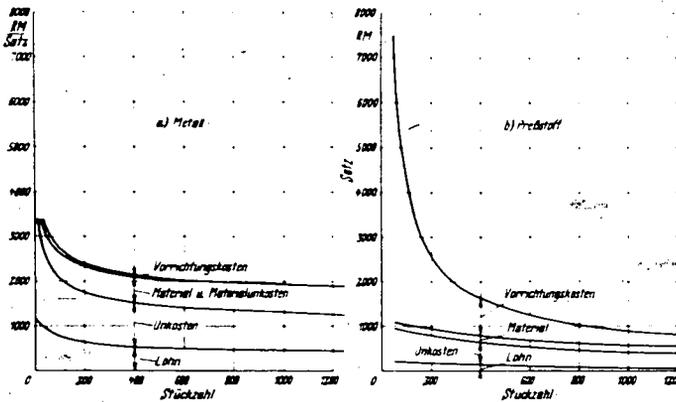
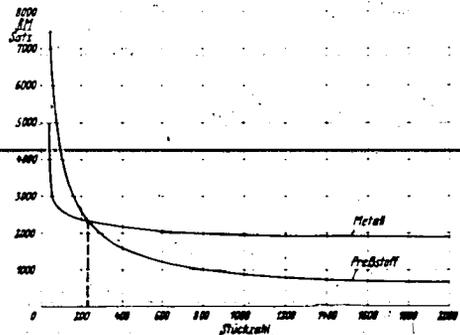


Abb. 29 und 30 Kostenvergleich zwischen der Preßstoff- und Metallbauweise für ein Leitwerk

gerade oder gekrümmte Schnitte ausgeführt werden. Beim Einbau der Scheiben ist darauf zu achten, daß die elastische Zwischenschicht nicht herausgedrückt wird. Ratsam ist der Einbau von U-förmigen Gummiprofilen zwischen Scheibe und Rahmen.

Die Kunstgläser [25], [26], [27], [28] werden aus Celluloid, Acetylcellulose sowie Polymerisationsprodukten und Mischpolymerisaten aus Methakrylsäureester und Polyvinylchlorid hergestellt [1]. Der Ausgangsstoff für Celluloid ist die Cellulose, die den Hauptbestandteil verschiedener pflanzlicher Fasern wie Baumwolle, Zellstoff und Holz bildet. Durch Nitrierung, d. h. Behandeln der Cellulose mit Salpetersäure entsteht die Nitrocellulose. Die Nitrocellulose ist im trockenen Zustand leicht entzündbar. Celluloid ist die feste Lösung der Nitrocellulose mit Kampfer, durch dessen Lösungsanteil die Explosionsneigung der Nitrocellulose beseitigt wird. Wegen der Neigung zum Vergilben, der geringen Oberflächenhärte und der Entzündbarkeit hat Celluloid im Flugzeugbau an Bedeutung verloren. Der Ausgangsstoff für die Acetylcellulose ist ebenfalls die Cellulose, die mit Essigsäureanhydrid, Essigsäure und Schwefelsäure als Katalysator behandelt wird. Die so gewonnene primäre Acetylcellulose wird als Celluloseacetat in Form weißer Flocken durch Wasser ausgefällt. Um die so gewonnene sekundäre Acetylcellulose in organischen Lösungsmitteln zu einer kolloidalen Masse lösen zu können, wird ein Teil des Essigsäuregehaltes durch schwache Säuren abgespalten. Hierbei fällt die Acetylcellulose in Flocken aus, die getrocknet werden und hierbei allmählich erhärten. Die flockige Acetylcellulose wird in einem warmen Alkohol-Benzolgemisch gelöst und in einer Knetmaschine unter Hinzufügung von Gelatinierungsmitteln (Triacetin) zu einer dickflüssig-teigigen Masse geknetet. Nach mehrfachem Sieben und Filtern wird die Masse zur Erhöhung der



Gleichmäßigkeit zwischen warmen Walzen längere Zeit durchgearbeitet und schließlich zu einige Millimeter dicken Fellen ausgewalzt. Aus diesen Fellen werden Blöcke geschichtet und unter Druck- und Hitzeinwirkung verschweißt. Von diesen Blöcken wiederum wird durch spanabhebende Bearbeitung das erforderliche Werkstück (Stäbe und Platten) abgeschliffen. Ein nachträgliches Pressen zum Geraderichten und zur Oberflächenbehandlung beendet den Arbeitsgang. Zur Herstellung der glasklaren Tafeln wird das Preßgut zwischen hochglanzpolierten Blechen gepreßt. Auf diese Weise wird der unter der Bezeichnung „Cellon“ bekannte Kunststoff hergestellt. Ein weiterer Werkstoff aus Acetylcellulose ist das „Reilit-Glas“. Die Acetylcellulose ist im Gegensatz zu Celluloid schwer entzündbar. Die Gläser aus Acetylcellulose zeigen bei größerer Dicke keine befriedigende Klarheit. Das „Plexiglas“ ist eine hochpolymere Verbindung aus Methakrylsäureester, die sich durch besonders gute Klarheit auszeichnet. Das unter der Bezeichnung „Astralon“ bekannte und durch eine blaugraue Tönung erkenntliche Kunstglas stellt ein Mischpolymerisat aus Polyvinylchlorid und Akrylsäureester dar. Die Ausgangsstoffe für diese rein synthetischen Gläser sind Kalk, Kohle und Wasser. Plexiglas und Astralon sind gegen die meisten Säuren und Laugen beständig. Kohlenwasserstoffe bewirken Zerstörungen, die sich z. B. bei der Einwirkung von Benzin in feinen Oberflächenrisen bemerkbar machen. Chlorierte Kohlenwasserstoffe bewirken Quellung. Die Kunstgläser haben gegenüber Silikatglas außer ihrem geringen Gewicht, das etwa die Hälfte beträgt, den Vorzug, daß sie in ihrer Eigenschaft als Thermoplaste durch Zufuhr von Wärme leicht in beliebige Formen gebracht werden können. Auf diese Weise kann die Verglasung

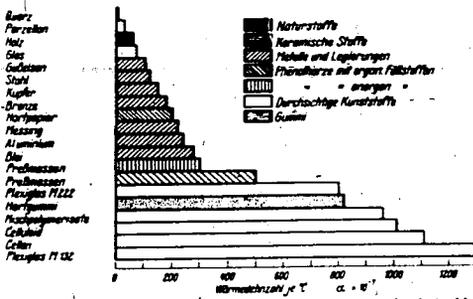


Abb. 31 Wärmedehnzahlen verschiedener Werkstoffe

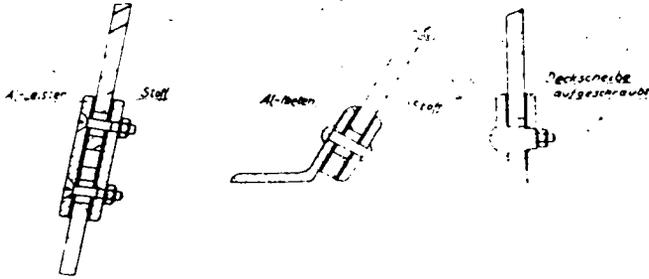


Abb. 32 Einbau von Kunstgläsern

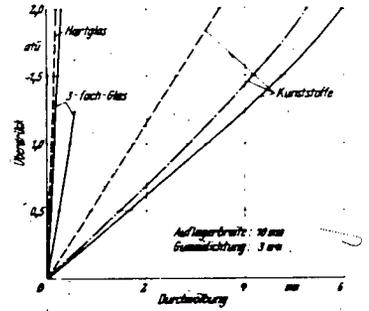


Abb. 34 Durchwölbung verschiedener Sicherheitsgläser bei einseitigem Überdruck — Rundscheiben mit einer lichten Weite von 150 mm \varnothing

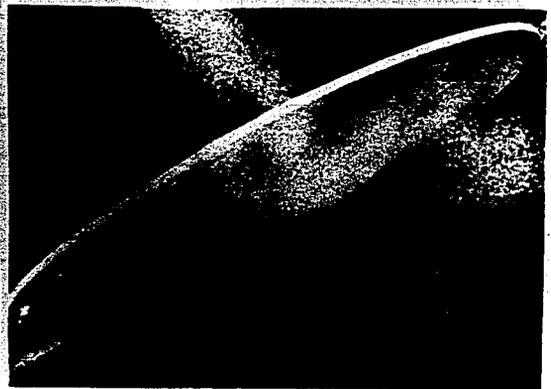
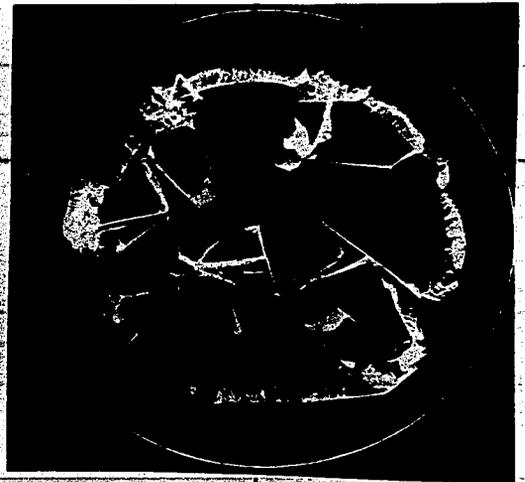
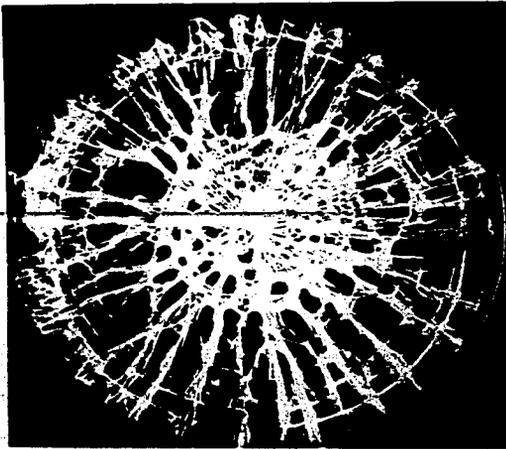


Abb. 33 Überdruckfestigkeit verschiedener Gläser
 a Mehrschichtenglas
 b Plexiglas
 c Astralon
 d Reilit

Zahlentafel 14
Eigenschaften durchsichtiger Kunststoffe

| | | Celluloid | Celion | Plexiglas M 83 | Plexiglas M 132 | Plexiglas M 222 | Astralon | Reilit |
|-----------------------------------------|-----------------------|-----------|--------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|--------|
| Spezifisches Gewicht | g/cm ³ | 1,88 | 1,80 | 1,18 | 1,18 | 1,18 | 1,85 | 1,26 |
| Zugfestigkeit bei 20° | kg/cm ² | 700 | 650 | 700 | 700 | 770 | 688 | 587 |
| Bruchdehnung | % | 50 | 40 | — | — | 0,3 | 64 | 10 |
| E-Modul bei 20° | kg/cm ² | — | — | 1220 | 1110 | 1850 | — | — |
| Biegefestigkeit bei 20° | kg/cm ² | 600 | 550 | 1140 | 1190 | 1410 | 1085 | 790 |
| Druckfestigkeit bei 20° | kg/cm ² | 80 000 | 60 000 | 81 000 | 81 000 | 82 000 | 32 000 | 27 000 |
| Spezifische Schlagbiegearbeit | cm kg/cm ² | 200 | 200 | 21 | 20 | 22 | 40 | 71 |
| Querkontraktionszahl [32] | — | — | — | — | 0,320 | — | 0,355 | 0,290 |
| Ausdehnungskoeffizient $\times 10^{-6}$ | — | 100 | 110 | 105 | 130 | 82 | 68 | 73 |
| Härte*) | — | — | — | — | — | 0,82 | 1,16 | 1,30 |
| Wärmebeständigkeit nach Vicat | °C | — | — | — | — | 96 | 70 | 110 |

*) Eindringtiefe einer mit 31,25 kg belasteten 2,5 mm Kugel nach 60 sek.

durch Ausbildung von gekrümmten Scheiben und Hauben der aerodynamischen Form der Flugzeuge angepaßt werden. Die Verformungstemperatur der Kunstgläser liegt zwischen 100 und 150°. Ein Nachteil der Kunstgläser ist ihre geringe Oberflächenhärte, die ein häufiges Nachpolieren der im Flugbetrieb verschrammten Gläser erfordert. Die Kunstgläser sind auch durch spanabhobende Formung (Sägen, Fräsen, Bohren) gut zu bearbeiten. Beim Einbau der Kunstgläser muß ihre hohe Wärmeausdehnung berücksichtigt werden (Abb. 31). Die Scheiben dürfen nicht starr eingespannt und bei Nietungen oder Verschraubungen müssen die Bohrlöcher größer als der Schaftdurchmesser von Schraube und Niet gewählt werden (Abb. 32).

2. Prüfung der Gläser

DIN DVM 2302 sieht für die Beurteilung von Sicherheitsglas [29], [30] eine optische Prüfung, den Kugelfallversuch, Bewitterungsversuche und Biegeversuche vor. Die optische Prüfung beschränkt sich hierbei auf die Feststellung von Blasen, Trübungen, verfahrenen Stellen, Streifen, Wellen, Schlieren und Kratzern durch Beobachtung mit dem Auge. Im Flugzeugbau erfolgt im allgemeinen eine genauere Untersuchung der Planparallelität der Gläser und Kunststoffe. Hierzu dienen Ablenkungswinkelmessung oder es werden Prüflinien bzw. Prüfnetze auf eine Leinwand projiziert und deren Verzerrung durch die dazwischen gehaltenen Scheiben beobachtet. Darüber hinaus werden bei den Kunstgläsern, die beispielsweise bei der Verwendung für Überdruckkammern in stärkerem Maße einer mechanischen Beanspruchung ausgesetzt sind, zur Bestimmung ihrer mechanischen und elastischen Eigenschaften die Verfahren der allgemeinen Werkstoffprüfung angewandt.

3. Eigenschaften der durchsichtigen Kunststoffe

Einen allgemeinen Überblick gibt Zahlentafel 14 [31]. Plexiglas zeichnet sich durch geringes Gewicht, hohe Festigkeit und verhältnismäßig große Härte aus. Reilit und Astralon besitzen demgegenüber ein besonders hohes Arbeitsaufnahmevermögen.

Zahlentafel 15 enthält Versuchsergebnisse über die Überdruckfestigkeit der Kunststoffe im Vergleich zu Hart- und Mehrschichtenglas bei verschiedenen Temperaturen. 1,5 bis 12,5 mm dicke Rundscheiben wurden in ein Stahlgefäß eingespannt und durch Preßluft einem einseitigen Überdruck ausgesetzt, der bis zum Bruch der Gläser gesteigert wurde.

Die größte Überdruckfestigkeit wurde von den Kunstgläsern erreicht. Sie liegt bei einer Plattendicke von 6 mm und einer lichten Weite von 150 mm teilweise höher als 20 atü. Bei gleichartigen Hartglasscheiben beträgt der Überdruck beim Bruch im Mittel 9,3 atü. Die Mehrschichtengläser erreichen bei einer Dicke von 6 mm nur Werte von 2 bis 3 atü. Das Hartglas und die Mehrschichtengläser zeigen mit abnehmender Temperatur einen Anstieg, die Kunststoffe (Plexiglas 1,5 mm) dagegen einen geringen Abfall der Überdruckfestigkeit.

Die Bruchformen der Mehrschichten- und Kunstgläser gehen aus Abb. 33 hervor. Die Mehrschichtengläser zerplatzen in viele Splitter, die aber zum größten Teil auf der Zwischenschicht haften blieben. Bei dem Plexiglas brachen größere Bruchstücke heraus. Die Reilitplatten wurden bei starker Durchwölbung aus der Einspannung herausgezogen. Astralon zerfiel in viele kleine stumpfe Splitter. Bei dem Hartglas trat ein vollständiger Zerfall der Scheiben in wabenförmige Teildchen ein.

In Abb. 34 wurde die maximale Durchwölbung der Gläser bei einem Überdruck bis zu 2 atü ermittelt. Es zeigt sich, daß die geringere Steifigkeit der Kunststoffe auch bei den eingespannten Gläsern in Erscheinung tritt. Die Durchwölbung beträgt bei den Kunststoffen bis zu 6,0 mm, bei Hartglas und Mehrschichtenglas dagegen nur etwa 0,6 mm.

Es ist bekannt, daß Sonnenstrahlung bei bestimmten Intensitäten in festen Körpern chemische Reaktionen auszulösen vermag. Im Hinblick auf Flüge in großen Höhen mußte daher untersucht werden, ob die Kunststoffe unter dem Einfluß der in der Höhe wirksamen Strahlung Schaden erleiden. Bei Bestrahlung mit einer Hanau-Quecksilber-Quarzlampe (3,7 Amp, 220 Volt) verhielten sich die Kunststoffe sehr verschieden. Bei Plexiglas bildeten sich an der Oberfläche kleine Krater, Reilit nahm bei starkem Verziehen der Proben eine schmutzig-gelbe Verfärbung an und Astralon wurde dunkelbraun. Die Zugfestigkeit (Abb. 35) weist bei Plexiglas einen starken, bei Reilit geringen und bei Astralon keinen Abfall durch die Bestrahlung auf. Um das gefährliche Gebiet enger abzugrenzen, wurden anschließend Bestrahlungsversuche mit verschiedenen Wellenbereichen durchgeführt, indem die Proben teilweise mit Filtern abgedeckt wurden. Die Versuche ergaben, daß bei Plexiglas und Reilit die chemische Wirksamkeit der Strahlung offensichtlich unterhalb einer Wellenlänge von 3000 AE liegt, während bei Astralon auch in dem Bereich von 3000 bis 4000 AE mit einer Einwirkung gerechnet werden muß. Dieses Resultat wird bestätigt

Zahlentafel 15

Überdruckfestigkeit von Hartglas, Mehrschichtenglas und durchsichtigen Kunststoffen

Lichte Weite der Versuchseinrichtung: 150 bis 250 mm \varnothing

Auflagerbreite: 5, 10 und 15 mm

Einspannung: Gummidichtung, 1 bis 3 mm dick

| Glasart | Werkstoff | Dicke mm | Lichte Weite mm | Temperatur °C | Überdruckfestigkeit atu Grenzen | Mittel |
|---------------------------|-------------------------------------|----------|-----------------|-------------------|---------------------------------|--------|
| Hartglas | — | 3,0 | 150 | - 60 | 6,0 bis 7,0 | 6,8 |
| | | | | - 20 | 4,0 bis 4,5 | 4,2 |
| | | | | 50 | 3,0 bis 3,5 | 3,3 |
| | | 4,0 | 150 | - 60 | 7,5 bis 10,0 | 8,5 |
| | | | | - 20 | 5,5 bis 6,0 | 5,7 |
| | | | | 50 | 5,0 bis 5,5 | 5,2 |
| | | 6,0 | 250 | - 20 | 6,5 bis 11,5 | 9,3 |
| | | | | 20 | 5,5 bis 6,0 | 5,8 |
| | | | | 20 | 5,5 bis 6,0 | 5,8 |
| Mehrschichtengläser | Zwischenschicht: Celluloseacetat | 4,0 | 180 | - 60 | 2,6 bis 3,0 | 2,8 |
| | | | | - 20 | 1,5 bis 1,8 | 1,7 |
| | | | | 20 | 1,7 bis 2,2 | 2,0 |
| | | 60 | 0,7 bis 0,9 | 0,8 | | |
| | | 6,0 | 150 | 20 | 1,2 bis 3,0 | 2,0 |
| | Zwischenschicht: Akrylat | 6,0 | 150 | 20 | 1,1 bis 1,7 | 1,3 |
| | | | | - 40 | — | 12,0 |
| | | | | - 30 | — | 10,0 |
| | | 8,8 | 170 | - 20 | — | 8,0 |
| | | | | - 10 | — | 7,0 |
| Durchsichtige Kunststoffe | Plexiglas | 1,5 | 150 | 20 | — | 4,0 |
| | | | | 20 | — | 18,5 |
| | | | | 20 | — | 22,0 |
| | | | | 20 | 2,7 bis 2,8 | 2,8 |
| | | | | - 40 | 8,0 bis 8,8 | 8,5 |
| Astralon | 3,0 | 150 | - 20 | 4,4 bis 5,2 | 4,7 | |
| | | | 0 | 4,0 bis 4,5 | 4,2 | |
| | | | 20 | 3,0 bis 5,8 | 4,2 | |
| | | | 60 | 7,0 bis 8,0 | 7,3 | |
| | | | 20 | 7,5 bis >19,0 | 18,4 | |
| Reilit | 5,0 | 150 | - 60 | > 12,0 bis > 12,0 | > 12,0 | |
| | | | - 60 | — | > 6,0 | |
| | | | 20 | — | 20,0 | |
| | | | 60 | — | > 6,0 | |
| | | | 20 | > 12,0 bis > 30,0 | > 20,0 | |

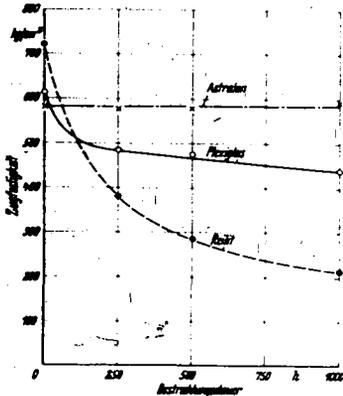


Abb. 35 Festigkeit durchsichtiger Kunststoffe nach verschieden langer Bestrahlung mit der Hanau-Quecksilber-Quarzlampe

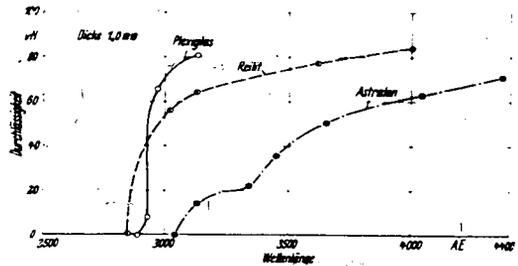


Abb. 36 Durchlässigkeit durchsichtiger Kunststoffe im ultravioletten Spektralbereich

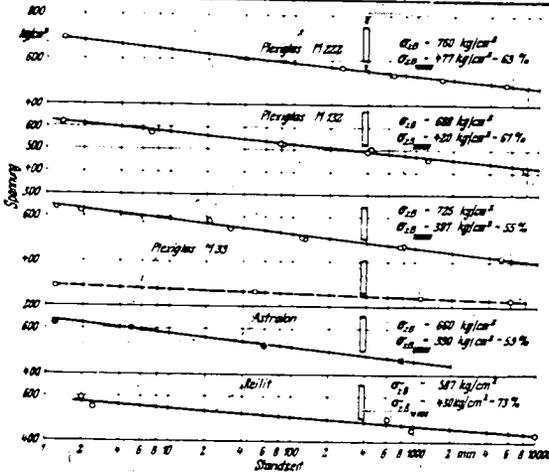


Abb. 37 Standfestigkeit durchsichtiger Kunststoffe bei 20°

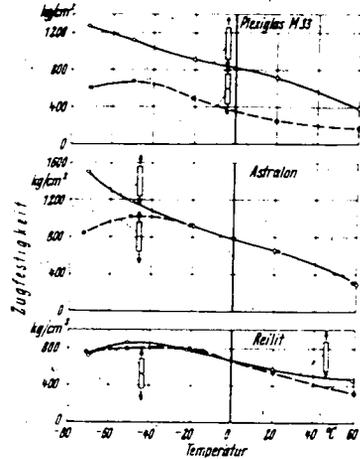


Abb. 39 Zugfestigkeit durchsichtiger Kunststoffe bei verschiedenen Temperaturen

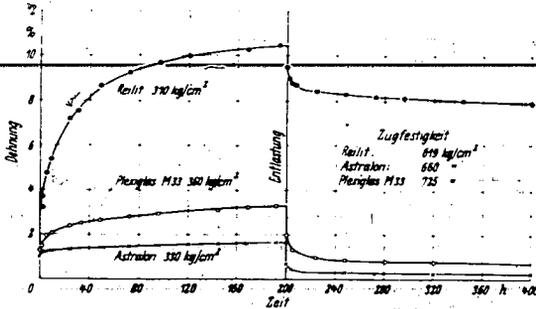


Abb. 38 Zeit-Dehnungs-Kurven durchsichtiger Kunststoffe bei 20°

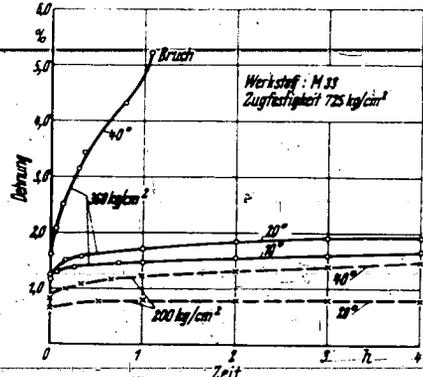


Abb. 40 Zeit-Dehnungs-Kurven von Plexiglas bei verschiedenen Temperaturen

durch-spektroskopische Untersuchungen über die Absorption der verschiedenen Kunstgläser (Abb. 36). Die Grenze der Ultraviolett-Totalabsorption liegt bei Plexiglas und Reilit bei 2850 bis 2890 AE, bei Astralon dagegen in der Nähe von 3040 AE. Oberhalb dieser Werte steigt die Durchlässigkeit bei Plexiglas und Reilit stark, bei Astralon allmählich mit zunehmender Wellenlänge an. Die Beanspruchung der Kunststoffe liegt bei Bestrahlung mit der Quecksilberlampe über der selbst in großen Höhen zu erwartenden Strahlungsintensität. Die Einwirkung ultravioletter Strahlen unter einer Wellenlänge von 2900 AE nennenswerter Intensität ist bei den in Frage kommenden Höhen unwahrscheinlich. Eine weitere Versuchsreihe, bei der die tatsächlich beim Höhenflug auftretenden Strahlungsbedingungen durch Einwirkung einer Wasserstoffgas-Wolframglühfadens-Lampe nachgeahmt wurden, ergaben daher auch keine nachteilige Einwirkung. Es kann hiernach angenommen werden, daß die untersuchten Kunstgläser bei der Verwendung im Höhenflug keinen Schaden erleiden.

Die Beständigkeit der Kunststoffe gegen Chemikalien geht aus Zahlentafel 16 hervor. Die Kunststoffe sind gegen Benzin, Bleibenzin, Gasöl, Schmieröl und Glykol beständig. Reilit zeigt im Gegensatz zu Plexiglas und dem Astralon hohe Widerstandsfähigkeit gegen Tetrachlorkohlenstoff, aber eine verhältnismäßig starke Aufnahmefähigkeit für Alkohol. Dem Kochversuch widersteht nur das Plexiglas. Die beiden anderen Gläser werden mildig und undurchsichtig.

Abb. 37 und 38 zeigen das Ergebnis von Versuchen über das Kriechverhalten der durchsichtigen Kunststoffe [31]. In Abb. 37 sind die Standzeiten bei verschiedenen hohen Spannungen für eine Versuchsdauer bis zu 7 Tagen wiedergegeben. Wird für die Zeit ein logarithmischer Maßstab gewählt, so ergibt sich eine geradlinige Abhängigkeit der Bruchspannung von der Zeit. Für eine Zeit von 7 Tagen beträgt die Standfestigkeit bei Plexiglas M 33 55%, bei Plexiglas M 132 61%, bei Plexiglas M 222 63%, bei Astralon 59% und bei Reilit 73% der im Kurzversuch ermittelten Zugfestigkeit. Eine vergleichende Versuchsreihe mit gekerbten Zugstäben (90°-Spitzkerb) ergab eine Verringerung der Kerbempfindlichkeit mit steigender Belastungsdauer, die mit einer gleichmäßigeren Ordnung der Moleküle bei Verformungsvorgängen, die sich über längere Zeit erstrecken, erklärt werden kann. Abb. 38 gibt Zeit-Dehnungs-Kurven der Kunststoffe bei 200stündiger Belastung und anschließender Entlastung für eine Spannung etwa gleich der halben Zugfestigkeit wieder. Die Nachwirkungserscheinungen von Reilit sind wesentlich größer als bei Astralon und Plexiglas. Die verschiedenen Plexiglasarten verhalten sich gleichartig.

Neben der Zeit ist der wichtigste Einflussfaktor die Temperatur. Bei jedem Stoff besteht ein allgemeines

Zahlentafel 16
Beständigkeit der durchsichtigen Kunststoffe gegen Chemikalien

Prüfverfahren: Gewichtszunahme nach 6 Tagen in vH
 Probenform: 100 mm x 20 mm x 3 mm

| Tränkstoff | Plexiglas | Reilit | Astralon |
|------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| Benzin | 0 | + 0,37 | + 0,44 |
| Benzol | - 5,20 | 1,75 | nach 2 Std. auf-geblättert |
| Bleibenzin | 0 | + 0,48 | + 0,44 |
| Alkohol | 0,35 | + 9,24 | 0 |
| Casöl | 0 | + 0,48 | + 0,15 |
| Schmieröl | 0 | + 0,06 | + 0,10 |
| Glykol | - 0,26 | + - 0,54 | + 0,10 |
| Tetrachlor-kohlenstoff | Proben angelöst | 0,19 | nach 2 Std. auf-geblättert |
| Kochversuch | keine Veränderung | nach 2 Std. milchig | nach 2 Std. milchig |

Temperaturgesetz, nach dem mit zunehmender Temperatur der Widerstand gegen Formänderungen geringer wird. Bei den hochmolekularen organischen Verbindungen ist diese Erscheinung besonders stark ausgeprägt. Thermische Einwirkungen setzen die zwischen den Molekülen vorhandenen Bindungskräfte herab und bewirken daher eine Zunahme des Fließens und einen Abfall der Festigkeit. Abb. 39 zeigt die Zugfestigkeit der Kunststoffe bei Temperaturen zwischen -70° und +60° in ungekerbtem und gekerbtem Zustand [31]. Bei den sämtlichen Gläsern fällt die Festigkeit mit steigender Temperatur ab. Sie beträgt bei 60° bei Plexiglas M 33 54%, bei Astralon 45% und bei Reilit 80% der Werte bei 20°. Plexiglas ist zwischen -70° und +60°, Astralon nur unterhalb -20° kerbempfindlich. Reilit zeigt in dem ganzen Bereich keine Kerbempfindlichkeit. In Abb. 40 sind für Plexiglas M 33 Zeit-Dehnungs-Kurven bei verschiedenen Temperaturen aufgezeichnet. Mit fallender Temperatur werden die Formänderungen geringer. Bei einer Spannung gleich der halben Zugfestigkeit und +40° treten derart hohe Dehnungen auf, daß der Bruch bereits nach einer Stunde erfolgt.

Zur Beurteilung des Beschußverhaltens der Kunstgläser wurde ihre Schlag- und Kerbschlagzähigkeit in Schlagbiegeversuchen bei verschiedenen Temperaturen ermittelt [31]. Es kann erwartet werden, daß die Beobachtung dieser Eigenschaft bei verhältnismäßig geringem Material- und Zeitaufwand sichere Schlüsse über das Verhalten der Gläser bei Beschuß oder durch Beschuß hervorgerufene Verletzungen zuläßt. Abb. 41 zeigt das Ergebnis derartiger Untersuchungen mit Plexiglas M 33, Astralon und Reilit. Die spezifische Schlagbiegearbeit von Plexiglas liegt verhältnismäßig niedrig. Sie beträgt etwa nur 1/4 der bei geschichteten Phenolharz-Preßstoffen üblichen Werte. Außerdem tritt auch bei dynamischer Beanspruchung die hohe Kerbempfindlichkeit des Plexiglasses in Erscheinung. Aber auch Astralon und Reilit sind bei Schlagbiegung kerbempfindlich. Bei Plexiglas ist die Schlagbiegearbeit bei tiefen Temperaturen etwa die gleiche wie bei +20°, während bei Astralon und Reilit ein starker Abfall stattfindet. Hieraus kann gefolgert werden, daß das Beschußverhalten von Plexiglas bei Kälte nicht schlechter ist als unter normalen Bedingungen, und daß bei Astralon und Reilit nur bei Raumtemperatur oder mäßiger Kälte ein besseres Verhalten zu erwarten ist. Bei Plexiglas werden sich in jedem Fall seine geringe Arbeitsaufnahme bei Schlagbeanspruchung und seine hohe Kerbempfindlichkeit hinsichtlich des Beschußverhaltens ungünstig auswirken. Eine Möglichkeit der Verbesserung besteht in der Ausbildung von Schichtgläsern, bei denen in der

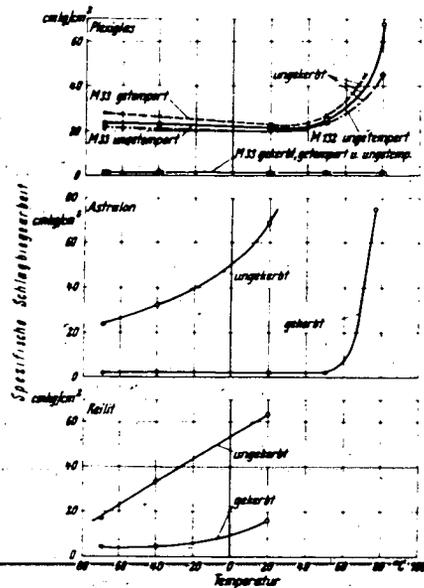


Abb. 41 Spezifische Schlagbiegearbeit durchsichtiger Kunststoffe bei verschiedenen Temperaturen

gleichen Weise wie bei Silikat-Sicherheitsglas dünne Plexiglasscheiben mit elastischen Zwischenschichten untereinander verbunden werden. Doch werden bei einem derartigen Glas die Zwischenschichten in Kälte verspröden, so daß das bei normaler Temperatur sicher bessere Beschußverhalten bei tiefer Temperatur wahrscheinlich nicht zur Auswirkung kommen kann. Vielleicht ist ein Vorteil erzielbar durch die Verwendung von vorgerecktem Kunstglas. Versuche [31], die zum Ziele hatten, festzustellen, ob die Eigenschaften des Plexiglasses durch eine Warmverformung, wie sie bei der Ausbildung von Kanzelhauben und Kuppeln angewandt wird, beeinflusst werden, führten nämlich zu dem überraschenden Ergebnis, daß die Kerbempfindlichkeit des Glases vollständig behoben werden kann, wenn das Material um mindestens 40% gereckt wird (Abb. 42). Durch die Behandlung findet eine Orientierung der Molekülketten in der Reckrichtung statt. Möglicherweise wird man die hierdurch hervorgerufene Anisotropie des Materials durch einen Aufbau des Glases aus mehreren gegeneinander versetzten Lagen ausgleichen müssen.

Zahlentafel 17 enthält das Ergebnis von Messungen über die Wärmeausdehnung der Kunstgläser [33]. Es wurden die linearen Ausdehnungskoeffizienten für einen Temperaturbereich von -70° bis +60° mit einem Leitz-Dilatometer nach Bollenrath (vgl. Beitrag II C 9) ermittelt. Die Temperaturänderungsgeschwindigkeit betrug 1°/1,5 min. Die Wärmeausdehnung verläuft nicht linear, sondern nimmt mit der Temperatur zu. Astralon hat die geringste Wärmeausdehnung. Bei den übrigen Kunststoffen sind die Werte annähernd gleich. Bei einer Versuchsreihe mit Plexiglas wurde an Proben, die in zwei zueinander senkrechten Richtungen entnommen waren, übereinstimmende Wärmeausdehnung festgestellt. Ebenso ist ein Einfluß des Tempers und der Warmverformung auf die Wärmedehnung nicht vorhanden. Werden bei einer im Anschluß an die Erwärmung vorgenommenen Abkühlung die Formänderungen beobachtet (Abb. 43) so zeigt sich, daß die Ausdehnungen in dem ganzen Temperaturbereich höher liegen. Mit der Zeit erreicht jedoch bei Raumtemperatur die

Zahlentafel 17
Wärmeausdehnungsbeiwerte von Kunstgläsern
 $\beta \cdot 10^{-6} \text{ mm} / ^\circ\text{C}$

| Temperaturbereich zwischen 10° C und | Erwärmung | | | Abkühlung | | | Abkühlung | | | | Erwärmung | | | |
|--------------------------------------|-----------|------|------|-----------|------|-------|-----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
| | 80° | 50° | 60° | 60° | 50° | 80° | -10° | -80° | -50° | -70° | -70° | -50° | -80° | -10° |
| Werkstoff Nr. | | | | | | | | | | | | | | |
| Plexiglas M 222 längs | 75,6 | 82,5 | 87,6 | 88,7 | 88,8 | 90,5 | 69,2 | 67,0 | 64,8 | 61,5 | 61,8 | 65,0 | 67,7 | 71,5 |
| Plexiglas M 222 quer | 75,6 | 82,0 | 88,0 | 88,5 | 88,3 | 89,2 | 69,7 | 68,0 | 64,2 | 61,4 | 61,7 | 65,1 | 67,8 | 71,0 |
| Plexiglas M 222 getempert | 76,2 | 82,8 | 87,5 | 88,4 | 88,5 | 89,4 | 69,4 | 66,5 | 61,5 | 61,5 | 61,8 | 64,8 | 68,0 | 71,8 |
| Plexiglas M 222 warmverformt | 75,4 | 82,3 | 87,8 | 88,2 | 88,7 | 89,8 | 69,6 | 67,6 | 64,9 | 61,2 | 61,7 | 64,9 | 68,0 | 71,8 |
| Plexiglas M 183 | 89,6 | 95,0 | 98,2 | 100,0 | 99,0 | 100,0 | 79,6 | 74,8 | 70,6 | 67,6 | 68,2 | 71,6 | 75,5 | 88,4 |
| Plexiglas M 83 | 82,1 | 88,0 | 91,7 | 93,8 | 91,0 | 90,2 | 75,3 | 71,7 | 68,2 | 65,8 | 65,6 | 68,8 | 78,2 | 79,9 |
| Astralon | 67,0 | 70,2 | 74,6 | 76,6 | 78,3 | 78,4 | 64,8 | 61,0 | 58,8 | 57,7 | 57,9 | 60,8 | 68,4 | 66,4 |
| Reilit | 86,5 | 96,5 | | | 96,7 | 91,5 | 75,0 | 70,2 | 67,2 | 64,0 | 64,5 | 67,9 | 72,5 | 78,8 |

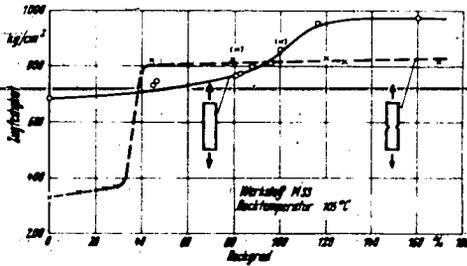


Abb. 42 Einfluss von Warmreissen auf die Festigkeit und Kerbempfindlichkeit von Plexiglas

Probe ihre Ausgangslänge wieder. Es handelt sich demnach um eine Nachwirkungserscheinung. Die während der Erwärmung und Abkühlung auftretenden Nachwirkungserscheinungen sind bei den gewählten Versuchsbedingungen vernachlässigbar gering. Die Wärmeausdehnung der Kunstgläser beträgt rund das 5fache der Werte bei den Metallen.

Zusammenfassung

Die Arbeit gibt einen Überblick über die Herstellung und die Eigenschaften der aus härtbaren Harzen hergestellten Preßstoffe und für die Verglasung von Flugzeugen dienenden thermoplastischen Kunststoffe auf Grund der in den letzten Jahren in großem Umfang durchgeführten Forschungsarbeiten. Systematische Untersuchungen über den Einfluss des Aufbaues der Preßstoffe auf ihre mechanischen Eigenschaften haben zu einer Verbesserung der Werkstoffe geführt. Die Anwendungsgebiete der Preß- und Kunststoffe im Flugzeugbau werden beschrieben und Richtlinien für die Weiterentwicklung aufgestellt.

Schrifttum

- [1] R. Houwink, Chemie und Technologie der Kunststoffe. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig 1939.
- [2] F. Pabst, Kunststoff-Taschenbuch. Verlag Physik, F. u. L. Pabst, Berlin-Dahlem 1938.
- [3] Zeitschrift Plastische Massen, November 1937, Verlag Physik, F. u. L. Pabst, Berlin-Dahlem.
- [4] W. Küch., Untersuchungen an Holz, Sperrholz und Schichtholzern im Hinblick auf ihre Verwendung im Flugzeugbau. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 2 (1939), Nr. 7/8, S. 257/272.
- [5] W. Küch., Neuere Untersuchungen über die Verwendung härterer plastischer Massen im Flug-

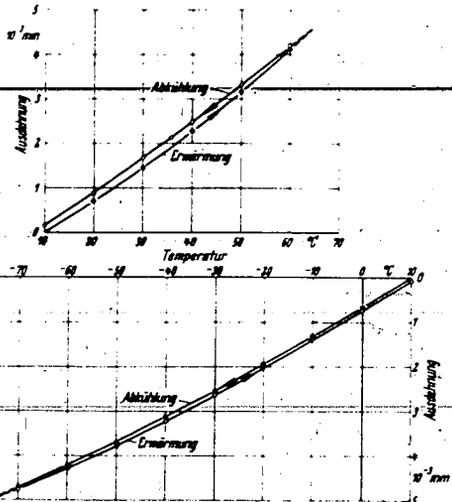


Abb. 43 Wärmeausdehnung von Plexiglas

- zeugbau, Jahrb. 1938 d. Deutschen Luftfahrtforschung, 1, S. 561/573.
- [6] O. Kraemer, Kunstharzstoffe und ihre Entwicklung zum Flugzeugbaustoff. DVL-Jahrbuch 1933, VI, S. 69/81.
- [7] W. Küch., Der Einfluss der Preßbedingungen und des Aufbaues auf die Eigenschaften geschichteter Kunstharzpreßstoffe. Jahrbuch 1939 der Deutschen Luftfahrtforschung, Z. VDI., Bd. 83 (1939), 30. Dez. 1939.
- [8] W. Küch., Über den Einfluss des Harzgehaltes auf die statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften von geschichteten Kunstharz-Preßstoffen. Jahrbuch 1940 der Deutschen Luftfahrtforschung.
- [9] N. A. de Bruyne, Plastic materials for aircraft construction. T. roy. aeron. soc. Jan. Vortrag Bd. 41 (Juli 1937), Nr. 319, S. 523/590. ZWB-Übersetzung 659.
- [10] W. Weigel, Gefügeuntersuchung von Preßstoffen, Kunst- und Preßstoffe. Heft 1 und 2, Berlin, VDI-Verlag 1937.
- [11] H. Perkuhn, Kriechverhalten geschichteter Kunstharz-Preßstoffe. Luftfahrtforschung, Januar 1941.

- [12] F. Gentner, Die Auswertung von Dauerstandversuchen. Archiv für das Eisenhüttenwesen, Heft 9, März 1936, S. 441/450.
- [13] Kunst- und Preßstoffe, Heft 1 und 2, Berlin, VDI-Verlag 1937.
- [14] A. Thum u. H. R. Jacobi, Mechanische Festigkeit von Phenol-Formaldehyd-Kunststoffen. VDI-Forschungsheft 396.
- [15] K. Riechers, Kunststoffe im Flugzeugbau. Luftwissen, Bd. 4 (1937), Nr. 8, S. 235/242.
- [16] K. Riechers, Versuche an Kunststoffen für den Flugzeugbau. Z. VDI, Bd. 82 (1938), Nr. 22, S. 685/71. Frühere Versuche der DVL.
- [17] F. W. Caldwell u. N. S. Clay, Micarta Propellers. I. Materials. T.N. Nr. 198, NACA, 1924. II. Methods of construction. T.N. Nr. 199, NACA, 1924.
- [18] Plastic airscrew blades. Z. Aeroplane, Bd. 53 (1937), Nr. 1364, S. 61.
- [19] L. v. Reiss, Vorgespanntes Spiegelglas. Z. VDI, Bd. 77 (1933), Nr. 23, S. 615/618.
- [20] E. Dietel, Über die Herstellung und Eigenschaften von Sicherheitsglas und dessen Zwischenschicht. Z. „Kunststoffe“, 22. Jahrg. (1932), S. 8/11.
- [21] E. Radde, Nicht splittendes Glas. Z. „Kunststoffe“, 19. Jahrg. (1929), S. 121/123, 153/155, 180/182.
- [22] W. Röhm, Der Stand der Technik in der Sicherheitsglasindustrie. Z. „Kunststoffe“, 23. Jahrg. (1933), S. 121/128.
- [23] A. Bresser, Kunstharze u. dgl. als Zwischenschichten für Sicherheitsglas. Z. „Kunststoffe“, 23. Jahrg. (1933), Nr. 2, S. 30/32.
- [24] K. Schaernack, Durchsichtiges Kunstharz. Z. VDI, Bd. 78 (1934), Nr. 51, S. 1484.
- [25] G. P. Young, Plexiglas in Aircraft. Aero Digest, Vol. 30, Febr. 1937, S. 50.
- [26] B. M. Axilrod and G. M. Kline, Study of transparent plastics for use on aircraft. Bur. Stand. J. Res., Bd. 19 (Okt. 1937), Nr. 4, S. 367/400.
- [27] G. M. Kline, Transparent Plastics for Aircraft Windows. Modern Plastics, Vol. 13, Jan. 1936, S. 17.
- [28] M. Abraham, Über die Prüfung von Sicherheitsglas. 286. DVL-Bericht, DVL-Jahrbuch 1932.
- [29] H. D. Murray and D. A. Spencer, Testing Safety Glass. The Industrial Chemist and Chemical Manufacturer (London), Vol. 6, Nr. 69 (Okt. 1930), S. 399/401.
- [30] W. Küch, Untersuchungen über die Verwendbarkeit von Sicherheitsgläsern und durchsichtigen Kunststoffen für die Verglasung von Höhenflugzeugkammern. DVL-Bericht-UM Nr. 514 und neuere Untersuchungen der DVL.
- [31] W. Küch u. H. Perkuhn, Untersuchungen über die elastischen Eigenschaften der durchsichtigen Kunststoffe. Bericht FB Nr. 1263 der DVL.
- [32] H. Perkuhn u. W. Küch, Die Wärmeausdehnung von Kunstgläsern. DVL-Bericht, z. Z. im Druck.
- Weiter befassen sich die folgenden Arbeiten mit der Verwendung von Preßstoffen im Flugzeugbau:
- Moulding the plastic mind. Aeroplane, Bd. 49 (1935), Nr. 1282, S. 747, ZWB-Übersetzung 306.
- Alwood plane completed. Aviation, Bd. 34 (1935), S. 64.
- M. Langley, Plastic materials for aircraft construction. Aeroplane, Bd. 49 (1935), Nr. 1272, S. 441/446, und Nr. 1275, S. 529/532, und Nr. 1282, S. 747, ZWB-Übersetzung 241.
- M. Langley, Plastics and aviation. Flight, Bd. 28, Nr. 1408, S. 653/655, ZWB-Übersetzung 307.
- Towards the moulded aeroplane. Aeroplane, Bd. 49 (1935), S. 432.
- A discussion about plastics. Aeroplane, Bd. 49 (1935), S. 529/532.
- G. de Havilland, Filled resins and aircraft construction. J. aeron. sci., Bd. 3 (1936), Nr. 10, S. 356 bis 357.
- T. Delmonte, Plastics appear on aircraft. J. aeron. sci., Bd. 4 (Nov. 1936), Nr. 1, S. 12/18.
- N. A. de Bruyne u. T. N. Maas, A property of synthetic resins. Aircraft Engng., Bd. 8 (Okt. 1936), Nr. 92, S. 289/290.
- H. Pennington, The increasing application of plastics. Aero Digest, Juli 1936, S. 30. ZWB-Übersetzung 577.
- A private aeronautical research works. Engineer, Bd. 112 (1936), Nr. 4213, S. 386.
- Ireland, Sidney, Design for a plastics wing. Aeroplane, Bd. 50 (1936), S. 345/347.
- F. R. Shanley, Thin walled structures. Aviation, Bd. 35 (1936), S. 29/31.
- B. Stubblefield, Plastics in aviation. Modern Plastics, Bd. 13 (1936), S. 17/19.
- C. C. Walker, The expanding aircraft industry and its possible uses for plastics (1936). Cf. I chem. ind. Chem. and ind. rev., Bd. 54 (1935), S. 1112/1113.
- G. M. Kline, Organic plastics. Circular of the national bureau of standards, C 411 (1936), S. 1/27.
- Towards an ideal. Aeroplane, Bd. 53 (1937), Nr. 1376, S. 431/432, ZWB-Übersetzung 752.
- G. P. Young, Plastics in the aircraft industry. Vortrag, Okt. 1937 der Society of automotive engineers, Los Angeles, Calif. ZWB-Übersetzung 750.
- New plastics of aeronautical interest. Modern Plastics, Juni 1937, S. 42, ZWB-Übersetzung 799.
- Toward thermoplastics. Flight, Bd. 32 (22.7.37), Nr. 1491, S. 100.
- G. M. Kline, Plastics as structural materials for aircraft. NACA techn. note (Dez. 1937), Nr. 628.
- N. A. de Bruyne, Synthetic materials for aircraft construction. Aeroplane, Bd. 52 (1937), S. 142/145.
- E. P. King, Discussion of the Bruyne's paper. Aeroplane, Bd. 52 (1937), S. 186/197.
- A. F. C. Boys, Possibilities for plastics. Aeroplane, Bd. 52 (1937), S. 506.
- F. R. Shanley, Criteria of structural efficiency. Aeroplane, Bd. 52 (1937), S. 654.
- Uses for plastics. Aeroplane, Bd. 52 (1937), S. 681.
- Plastic progress. Aeroplane, Bd. 53 (1937), S. 81.
- A new wing. Aeroplane, Bd. 53 (1937), S. 75/76.
- M. Langley, Plastic in aircraft construction. British plastics, Bd. 9 (1937), S. 5/8, S. 55/58, S. 185/190.
- T. James, Plastics in aircraft construction. Plastics (London), Bd. 1 (1937), S. 44/47.
- G. M. Kline, Über die Verwendung von Kunstharz-Preßstoffen im Flugzeugbau. Modern Plastics (1938), Nr. 8, S. 35, Nr. 9, S. 44.
- To turn out airplanes from molds. Canad. Engr., Bd. 75 (5. Juli 1938), Nr. 1, S. 14.
- H. T. Gough, Kunststoffe im Flugzeugbau. Engineer, Bd. 165 (1938), S. 627/628.
- G. M. Kline, Kunststoffe als Baumaterial für Flugzeuge. J. aeron. sci., Bd. 5 (Aug. 1938), Nr. 10, S. 391, ZWB-Übersetzung-1063.
- M. Langley, Built in slots. Aeroplane, Bd. 56, Nr. 1445, S. 135/136.
- M. Langley, Towards the moulded. Aeroplane, Bd. 56, Nr. 1448, S. 241.
- M. Langley, Moulded structures. Bd. 56, Nr. 1446, S. 185/186.
- M. Fishbein, Physical properties of synthetic resin materials. Technical notes national advisory committee for aeronautics, Nr. 694, Washington, März 1939.
- N. A. de Bruyne, Plastic progress. Flight, Bd. 35 (12. 1. 1939), Nr. 1568, S. 38 a/c.
- A. H. Tiltmann, A. E. Ellison, Plastic materials. Aircr. Prod., Bd. 1 (Jan. 1939), Nr. 3, S. 79/83, ZWB-Übersetzung 1158.
- E. P. King, The use of plastics in Aircraft. Aircr. Engng., Bd. 11 (März 1939), Nr. 121, S. 96/100.
- H. Chase, Kunststoffe in Amerika. Aircr. Prod., Bd. 1 (Sept. 1939), Nr. 11, S. 371, ZWB-Übersetzung 1157.
- Improving the creep stress of plastics. Aeroplane, Bd. 50 (1936), Nr. 1291, S. 231/232.
- I. B. Johnson, Materials for airplane construction. J. Aeronaut. Sci. 6, Nr. 5, S. 185/202, 1909.
- F. E. Weick, Composite Wood and plastics propeller blades. Society of Automotive Engineers, Detroit, 9-13. Jan. 1939.
- Preßstoff Duramold für Flugzeuge. British Plastics, Bd. 11 (1939), Nr. 122, S. 82/83, u. Aero Digest, Sept. 1939.
- Plastics and the Aeroplane. Aeroplane, Nr. 1489, 8. 12. 1939, S. 708/709.
- Plastics in American aircraft. Plastics 3, Nr. 30, S. 331 bis 333, 1939.

Abgeschlossen am 31. Januar 1941