

Die glasfaserverstärkten Kunststoffe

Von Y. SIEGWART, Lucens*

Glasfaserverstärkte Kunststoffe haben heute eine außerordentlich weite Verbreitung erfahren. Wir begegnen diesem Material täglich in Form von verschiedenen Gegenständen, wie Welldächern, Karosserieteilen, Booten usw., und gar mancher von uns arbeitet bereits im Betrieb oder im Labor mit Rohren, Behältern, elektrischen Teilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Deshalb soll hier ein Überblick über den Entwicklungsstand dieser verhältnismäßig jungen Werkstoffgruppe gegeben werden. Dabei werden wir uns aber damit begnügen müssen, vor allem die physikalische und chemische Seite des Problems zu behandeln und die Fragen mehr mechanischer Art, wie Handhabung und Bearbeitung der glasfaserverstärkten Kunststoffe, auf der Seite zu lassen.

Die Glasfasern

Die Glasfasern haben ihre Verwendung als Verstärkungsmaterial von Kunststoffen vor allem ihrer hohen Festigkeit zu verdanken. Diese Festigkeit ist allerdings keine allgemeine Eigenschaft des Glases, sondern sie tritt erst auf, wenn das Glas zu Fasern verzogen wird, und zwar um so mehr, je feiner die Fasern. Tabelle 1 gibt diese Sonderheit des Glases zahlenmäßig wieder, wobei als Vergleich gleichzeitig die Festigkeitswerte von verschiedenen anderen Stoffen aufgeführt sind.

Das Glas, das zur Fasererzeugung dient, weicht in seiner Zusammensetzung etwas von den üblichen Formeln für Massivglas ab. In den meisten Fällen wird da-

bei alkalifreies oder wenigstens schwach natrium- und kalium-alkalisches Glas verwendet. Dieses besondere Glas wird mit E-Glas bezeichnet und entspricht ungefähr folgender Zusammensetzung:

SiO ₂	54,6
Al ₂ O ₃	14,8
Fe ₂ O ₃	
CaO	17,4
MgO	4,5
B ₂ O ₃	8
Na ₂ O	0,6
K ₂ O	

Kleine Werte für Na₂O und K₂O bewirken eine Verbesserung der Eigenschaften der Glasfasern und folglich der verstärkten Kunststoffe, die hauptsächlich in einem verminderten Abfall der Festigkeiten unter Einfluß von Wasser oder Feuchtigkeit besteht. Sie sind ferner für den Gebrauch von Glasfasern im elektrischen Sektor notwendig.

Die sonderbar hohen Festigkeitswerte der Glasfasern im Vergleich zu Massivglas können hingegen nicht der Formel allein zugeschrieben werden. Zu deren Erklärung bestehen verschiedene Theorien, von denen einige kurz erwähnt seien:

1. Das Ausziehen des Glases zur Faser bewirkt eine Orientierung des Silikatnetzes, womit ähnlich wie bei der Verdehnung organisch-synthetischer Fasern eine Festigkeitsteigerung in der Längsrichtung erreicht wird.

Tabelle 1: Meßergebnisse von Glas und anderen Stoffen

Material	Spezifisches Gewicht	Zugfestigkeit in kg/mm ²	Spezifische Zugfestigkeit	Bruchdehnung in %	E.-Modul in kg/mm ²	Spezifische Biegefestigkeit
Massivglas	2,5 bis 3	7 bis 13	2,5 bis 4,7	—	4000 bis 8000	—
Glasfasern	2,52	90 bis 140	36 bis 56	etwa 2	7300	—
Stahl	7,8	37 bis 45	4,7 bis 5,8	20 bis 30	19000 bis 21000	etwa 24
Reinaluminium	2,7	13 bis 18	4,8 bis 6,5	4,8	6500 bis 7000	etwa 43
Aluminiumlegierungen	2,7 bis 2,9	40 bis 50	14 bis 18	—	etwa 7000	—
Phenolharz	1,15	4 bis 5	3,8 bis 5,7	—	etwa 700	etwa 7
Polyesterharz	1,3	2,8	1,5 bis 6,2	—	200 bis 500	etwa 9
Baumwolle	1,5	35 bis 75	23 bis 50	7 bis 10	etwa 5000	—
Naturseide	1,25	40 bis 55	32 bis 44	13 bis 31	etwa 750	—
Polyamidfasern	1,14	45 bis 60	39 bis 52	26 bis 32	200 bis 400	—

* Adresse des Autors: Dr. Y. SIEGWART, Lucens VD (Schweiz).

Tabelle 2: Wichtigste Kupplungsmittel

Bezeichnung	Beschreibung	Chemische Formel
Volan (DuPont de Nemours)	Dichlor-Chrom-Methacrylat als Komplexverbindung gelöst in wasserverdünntem Isopropanol	$ \begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{C}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{O} \quad \text{O} \\ \vdots \quad \vdots \\ \text{Cl}_2\text{Cr} \quad \text{CrCl}_2 \\ \vdots \\ \text{O} \\ \\ \text{H} \end{array} $
Silan A 150 (Union Carbide)	Vinyltrichlorsilan	$ \begin{array}{c} \text{Cl} \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH}-\text{Si}-\text{Cl} \\ \\ \text{Cl} \end{array} $
Silan A 172 (Union Carbide)	Vinylsilantriester von Methylglykoläther	$ \begin{array}{c} \text{OC}_2\text{H}_4-\text{O}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH}-\text{Si}-\text{OC}_2\text{H}_4-\text{O}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{OC}_2\text{H}_4-\text{O}-\text{CH}_3 \end{array} $
Silan 1100 (Union Carbide)	γ -Aminopropyltriäthoxysilan	$ \begin{array}{c} \text{OC}_2\text{H}_5 \\ \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}-\text{OC}_2\text{H}_5 \\ \quad \quad \quad \\ \text{NH}_2 \quad \quad \quad \text{OC}_2\text{H}_5 \end{array} $
NOL 24 (Naval Ordnance Laboratory)	Allyldichlorresorcoxysilan	$ \begin{array}{c} \text{Cl} \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{Si}-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}) \\ \\ \text{Cl} \end{array} $
Garan (Johns Manville Fiberglass Inc.)	Auf Basis von Vinyltriäthoxysilan	$ \begin{array}{c} \text{OR} \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH}-\text{Si}-\text{OR} \\ \\ \text{OR} \end{array} $
T 31 (Dow Corning)	Silicon nicht definierter Zusammensetzung, gelöst in Methylcellosolve	

In der Tat sind die Verhältnisse etwas komplizierter, und die Entstehung einer chemischen Bindung wird jetzt nicht mehr als einziger und zum Teil sogar nicht mehr als Hauptgrund für die Wirkungsweise der Kupplungsmittel angegeben. Bei den neuesten Arbeiten auf diesem Gebiet, die speziell in den USA durchgeführt werden, sind die verschiedenartigsten Methoden, wie Absorptions- und Desorptionsmethoden, elektronenmikroskopische Untersuchungen, photoelektrische Prüfungen, Strahlen-Diffraktion, Infrarotabsorption, Analyse von radioaktiven Spurenelementen, neben den üblichen chemischen und mechanischen Verfahren herangezogen worden. Große Bedeutung wird dabei der sogenannten dünnen Zwischenschicht (*interface*) zwischen Glas und Kunststoff, in der sich die entscheidenden Vorgänge abspielen, beigemessen.

Im Falle von Volan wurde festgestellt, daß dieses, nachdem das behandelte Glasgewebe gewaschen und ge-

trocknet wurde, in mehr oder weniger polymerisierter Form koordinativ am Glas haftet. Die Einstellung eines schwach sauren pH wirkt sich günstig auf diese Haftung aus, indem die SiOH- oder sonstigen -OH-Gruppen des Glases sich negativ aufladen und dadurch absorbierend für Chromverbindungen sind. Im weiteren entstehen Chromkomplexe, was von Vorteil für die Kupplung ist. Das Kunstharz und das Volan gehen ihrerseits entweder kovalente Bindungen ein, sie reagieren miteinander unter Austritt von HCl oder H₂O, oder kopolymerisieren. Eine Kopolymerisation konnte analytisch festgestellt werden, indem Chrom nur im hochpolymerisierten Anteil der Reaktionsprodukte zwischen Volan und Kunststoff gefunden wurde. Der Acrylrest ist für diese Eigenschaft maßgeblich verantwortlich, welche beim Ersatz z. B. durch einen Butylrest größtenteils verlorengeht.

Die Ergebnisse mit den Silanprodukten sind noch vielseitiger. Es wurde z. B. gefunden, daß die Naßfestig-

keiten der glasfaserverstärkten Kunststoffe stetig zu nehmen, wenn die Vinylsilan-Konzentration auf den Glasfasern von etwa 0,02% bis 0,25% ansteigt, wobei der erste Wert einer monomolekularen Schicht, der zweite Schichten von ungefähr 8 Molekülen entspricht. Bei einer weiteren Zunahme der Konzentration bleibt die Festigkeit stationär und nimmt beim Überschreiten einer Schichtdicke von 70 Molekülen sogar wieder ab. Diese Tatsachen zeigen, daß zur Erzielung einer lückenlosen Schicht auf dem Glas ein großer Überschuß an Silan nötig ist. Von diesem Überschuß wird ein Teil kapillar zwischen den Fibrillen festgehalten und geht somit für die Kupplung verloren. Ein weiterer Teil hydrolysiert, bevor er in Kontakt mit dem Glas kommt, und führt dann zu Kupplungspolymeren, welche als Ganze mit dem Glas Verbindungen eingehen.

Dem Lösungsmittel, in dem sich das Silan befindet, wird noch anderweitig Bedeutung beigemessen. Die Verwendung von Silan A1100 in vollständig wasserfreiem Zustand erschwert z. B. die Reaktion zwischen Glas und Kupplungsmittel. Es scheint, daß dadurch vor allem weniger Brücken zustande kommen. Bei Anwendung wäßriger Lösungen entspricht die Aufnahme von Silan durch das Glas ungefähr seiner Konzentration in der Lösung. Zusätzlich hängt die Absorption auch noch von gewissen Gruppen in den Silanverbindungen ab; so wird sie erhöht durch $\begin{array}{c} | \\ -C-O-C- \\ | \end{array}$ oder $\begin{array}{c} | \\ -Si-O-C- \\ | \end{array}$ -Gruppen.

Zum Teil wird die Anwesenheit von Wasser als Notwendigkeit für den Kupplungseffekt betrachtet, weil die Reaktion zwischen Glas und Kupplungsmittel über Wassermoleküle zu erfolgen hat. Tatsächlich wurde festgestellt, daß nach Vorbehandeln von Glas und Alkylsilan bei 300°C im Hochvakuum keine Reaktion mehr eintritt.

Von andern Autoren wird dem Kupplungsmittel vor allem eine Benetzungsaufgabe zuerkannt. Es soll das Eindringen des Harzes in die Kapillarräume zwischen den Fibrillen und den Austritt der Luft erleichtern. Sind die Zwischenräume nicht richtig mit dem Harz aufgefüllt, so wird sich Feuchtigkeit darin absetzen. Hat ein Laminat z. B. 0,05% Feuchtigkeit aufgenommen, so fallen die Festigkeitswerte wesentlich schlechter aus. Geeignete Kupplungsmittel erlauben die Feuchtigkeitsaufnahme bis auf 0,01% zu senken und sichern damit bessere Festigkeitswerte. Das Kupplungsmittel kann auch einen schützenden Einfluß ausüben, indem es den Eintritt von Feuchtigkeit verhindert, welche die Bindungen zwischen Glas und Kunststoff löst und die Glasfasern angreift. Wenn das Glas normalerweise 1 bis 7 Molekülschichten Wasser absorbieren kann, so wird diese Eigenschaft durch den Silanauftrag weitgehend geändert. Die Absorption wird dann durch die Permeabilität des Silanfilms für Wassermoleküle bestimmt und weiter durch wasserempfindliche und mit dem Silan chemisch nicht gebundene Stellen an die Glasoberfläche beeinflußt.

Der Reinheitsgrad des Glases selbst scheint ebenfalls eine gewisse Rolle zu spielen. So wurde festgestellt, daß die Hitzereinigung von Glasfasern unter Mitwirkung von Sauerstoff diese zu einer festeren Bindung mit dem Kupplungsmittel anregt, wobei wahrscheinlich mehr Bindungen ionischer Art zustande kommen. Auch andersartige Manipulation der Glasfasern kann die Anzahl der entstehenden Bindungen beeinflussen.

Die Bindungskräfte zwischen Glas und Kunststoff werden aber noch auf andere Ursachen zurückgeführt. So haben Messungen an speziellen Probestücken ergeben, daß nach Zerstörung der eigentlichen Haftung, wie sie durch Wechselbelastung möglich ist, trotzdem 75 bis 90% der ursprünglichen Festigkeit übrigbleibt. Diese Tatsache ist auf reine Friktion zwischen Glas und Kunststoff zurückzuführen. Die Eindringbarkeit des Harzes sowie Kohäsionskräfte sind demnach entscheidend für die Festigkeit von Laminaten.

Infolge Schrumpfung des Harzes, die verschieden von derjenigen der Glasfasern ist, befinden sich letztere in einem Spannungszustand. Dem Kupplungsmittel fällt die Aufgabe zu, einen Bruch zwischen beiden Komponenten zu verhindern. Somit ist seine Wirkung auch stark abhängig vom verwendeten Harz und seiner Aushärtung sowie von den entstehenden Spannungen.

Die Besprechung einiger Erklärungsversuche für die Wirkung der Kupplungsmittel gab uns eine Ahnung von der Komplexität dieses Problems. Für die Praxis ist es allerdings vor allem wichtig, daß geeignete Kupplungsmittel vorhanden sind und daß deren günstiger Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften der glasfaserverstärkten Kunststoffe eindeutig feststeht.

Wie zu erwarten, sind die verschiedenen Kupplungsmittel nicht für alle Kunststoffe gleich gut geeignet. So eignen sich Vinyltrichlorsilan (A150), Vinylsilanester (A172) und Garan vorwiegend bei Verwendung von Polyesterharzen. γ -Aminopropyltriäthoxysilan (A1100) gibt hingegen schlechte Ergebnisse mit Polyestern, dafür wird es mit Vorteil bei Epoxy-, Phenol- und Melaminharzen gebraucht. NOL 24 wird ebenfalls in erster Linie für diese Harze empfohlen; gleichzeitig ist es aber auch mit Polyester gut verträglich. Volan und T31 sind für alle Harze brauchbar, wenn auch nicht mit dem gleichen Erfolg wie die spezifischen Kupplungsmittel.

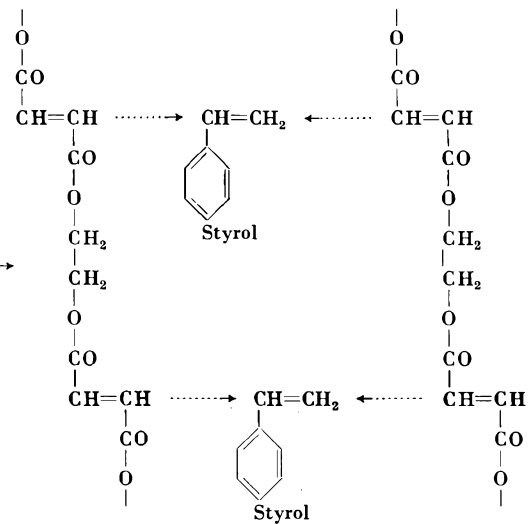
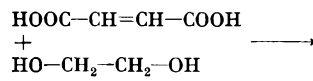
Die Harze

Aus dem Gesagten geht bereits hervor, daß mehrere Kunststoffe zur Herstellung von Laminaten dienen können. Es würde zu weit führen, alle Kunststoffe, die sich mit Glasfasern verstärken lassen, eingehend zu besprechen. Wir werden uns deshalb damit begnügen müssen, bloß über die wichtigsten Vertreter Angaben zu machen und deren Chemismus schematisch darzulegen:

Die ungesättigten Polyesterharze liefern die bekanntesten und verbreitetsten glasfaserverstärkten Kunststoffe. Sie haben den Vorteil, größtenteils wenigstens, ohne

Druck und Temperatur auszukommen. Ferner ist ihr Preis verhältnismäßig niedrig.

Im Prinzip kondensiert eine ungesättigte Dicarbonsäure, z. B. Maleinsäure, mit Äthylglykol unter Entstehung eines ungesättigten Esters:



Durch Zugabe eines polymerisierbaren Lösungsmittels, wie Styrol oder Methylmethacrylat, kann dann unter geeigneten Bedingungen eine netzartige Polymerisation eintreten. Damit diese zustande kommt, braucht es meistens noch ein Aktivierungsprodukt, wie z. B. Kobaltnaphthenat; auch Temperaturerhöhung wirkt aktivierend. Ferner benützt man einen Katalysator, meistens ein organisches Peroxyd, wie Benzoylperoxyd. Da aber die Reaktion bei ungünstiger Lagerung auch vorzeitig eintreten könnte, werden den Ausgangsstoffen im allgemeinen noch Inhibitoren, wie Phenol oder Hydrochinon, beigegeben.

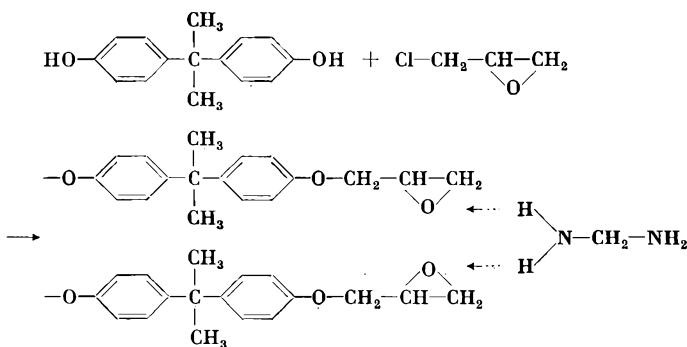
Die ungesättigten Polyesterharze haben den Nachteil, eine verhältnismäßig große Schrumpfung zu zeigen. Verstärkt mit Glasfasern sind die Produkte ziemlich feuchtigkeitsempfindlich, wenn kein geeignetes Kuppelungsmittel verwendet wurde.

Man verfügt heutzutage über eine große Anzahl von ungesättigten Polyesterharzen. Neuerdings werden sie auch mit Epoxyverbindungen modifiziert, womit man den besseren Eigenschaften der Epoxyharze näherkommt.

Anwendungsbeispiele der glasfaserverstärkten Polyesterkunststoffe sind: Welldächer, Boote, Möbel, Behälter, Rohre, Wände und Bodenbeläge sowie Autokarosserieteile, um nur die wichtigsten Gruppen zu nennen.

Die Epoxyharze werden ebenfalls sehr oft mit Glasfasern verstärkt. Sie sind teurer als die Polyesterharze, zeigen aber zum Teil wesentlich bessere Eigenschaften, wie erhöhte Naß-Biegefestigkeit.

Als Beispiel eines Epoxykunststoffes sei das Reaktionsprodukt zwischen Bisphenol und Epichlorhydrin betrachtet:



Mit Äthylendiamin als Katalysator oder gar als beteiligter Stoff tritt die Polymerisation des primären Kondensationsproduktes an den Epoxygruppen ein. Andere Amine, wie Diäthylentriamin, Piperidin und Methylendianilin, wirken ähnlich. Eine allerdings anders verlaufende Polymerisation kann auch von Säureanhydriden, Harnstoff, Melamin- oder Phenolformaldehydharz verursacht werden. Die Reaktion ist in diesem Falle unübersichtlicher, dafür verbleiben keine toxisch wirkenden Amine im Kunststoff zurück.

Mit geeigneten Katalysatoren kann die Härtung der Epoxyharze schon in der Kälte stattfinden, meistens erfolgt sie aber in der Wärme.

Die Epoxyharze besitzen sehr hohe Adhäsionskräfte, so daß die Anwendung eines Kupplungsmittels nicht so ausschlaggebend ist wie bei den Polyesterharzen. Es wird angenommen, daß das Glas direkt mit dem Harz reagieren kann, und zwar scheint die Halogengruppe des Epoxymonomeren maßgeblich an dieser Reaktion beteiligt zu sein, so daß siloxan-artige Bindungen $-\text{Si}-\text{O}-\text{C}-$ entstehen. Daraus ergeben sich ganz natürlich eine geringere Wasserempfindlichkeit und die damit verknüpften Vorteile.

Zu den Anwendungsgebieten der glasfaserverstärkten Epoxyharze gehört vor allem der elektrische Sektor, ferner der Formenbau, die Herstellung von Gießereimodellen und Lehren, Sportsartikeln usw.

Die Phenolharze werden als glasfaserverstärkte Kunststoffe verwendet, weil man damit Laminare von größerer Steifheit und höherer Hitzebeständigkeit erhalten kann. Man benützt dabei die üblichen Vorkondensate aus Phenol und Formaldehyd, welche in Anwesenheit einer Base ausgehärtet werden.

Die Glasfasern werden meistens mit einem in Alkohol gelösten oder geschmolzenen Phenolharz getränkt und bei schwacher Hitze unverpreßt vopolymerisiert. Die eigentliche Härtung erfolgt dann unter Druck und Tem-

peratur. Zu hohe Drucke sind unerwünscht wegen der Anforderungen an die Preßwerkzeuge und der Gefahr einer Beschädigung der Glasfasern. Deshalb werden heutzutage vor allem Niederdrucklamine fabriziert, welche größtenteils modifizierte Phenolharze enthalten.

Glasfaserverstärkte Phenolharze kommen hauptsächlich dort zum Einsatz, wo hohe Hitzebeständigkeit verlangt wird, so z. B. im Raketenbau.

Die Melamin- und Furanharze stellen zwei weitere Kunststoffgruppen dar, welche mit Glasfasern verstärkt werden, die ersten besonders wegen ihrer besseren elektrischen Eigenschaften und die zweiten wegen ihrer ausgesprochen guten Chemikalienbeständigkeit.

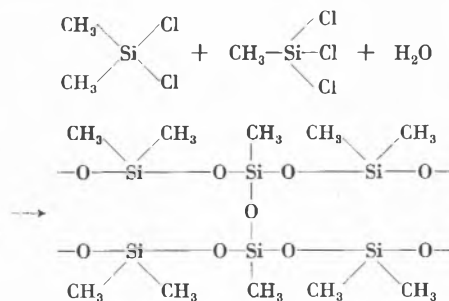
Die Herstellung dieser Harze geschieht im Prinzip ähnlich wie bei den Phenolharzen, wobei das Phenol durch Melamin ersetzt wird bzw. Furfurylalkohol mit sich selbst oder mit Furfurylaldehyd oder Phenol kondensiert.

Ähnlich wie bei den Phenolharzen müssen die Glasfasern zuerst im Melaminharz getränkt und vorpolymerisiert werden. Die Härtung erfolgt dann unter hohem Druck. Die Melaminharze besitzen eine sehr hohe Flammenresistenz.

Die Furanharze benötigen ebenfalls erhöhten Druck und eine längere Aushärtungszeit. Die Lamine können zwischen -30°C und bis etwa 200°C verwendet werden; eine Verformung tritt erst bei etwa 240°C ein.

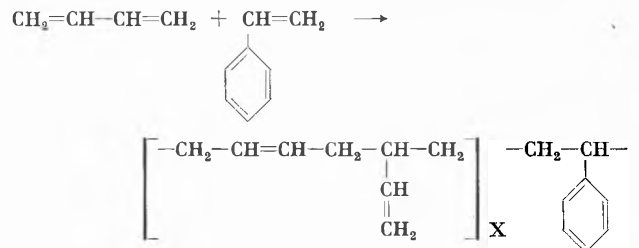
Entsprechend ihren Eigenschaften werden glasfaserverstärkte Melamin Kunststoffe hauptsächlich in der Elektroindustrie eingesetzt. Die glasfaserverstärkten Furan Kunststoffe sind für die Konstruktion von Rohren, Pumpen, Behälter für die chemische Industrie prädestiniert. Allerdings ist ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber oxydierenden Chemikalien begrenzt. Sie sind auch brennbar.

Glasfaserverstärkte Siliconharze sind ebenfalls bekannt. Die Siliconharze entstehen nach folgender Reaktion:



Die Siliconharze besitzen bekanntlich keine guten Festigkeitswerte. Durch den Einbau von Glasfasern können diese Werte merklich verbessert werden, ohne allerdings diejenigen der Polyester-, Epoxy- und Phenolharze zu erreichen. Ihr Vorteil liegt vor allem in der hohen Temperaturbeständigkeit, was erlaubt, Gegenstände aus glasfaserverstärkten Siliconharzen längere Zeit auf 260°C zu halten und kurzzeitig noch viel höher. Ihren Haupteinsatz finden sie deshalb im Flugzeug- und Raketenbau.

Zu den aufgeführten Kunststoffen kommen immer noch neue hinzu. So ist vor einiger Zeit ein Kohlenwasserstoff-Kopolymerisat mit dem Handelsnamen Buton von der Esso AG herausgekommen, welches auch in Verbindung mit einer Glasfaserverstärkung rasch einen wichtigen Platz eingenommen hat. Es handelt sich dabei um ein Polymerisationsprodukt aus Butadien und Styrol, welches nach folgendem Schema zustande kommt:



Ähnlich wie bei den Polyestern dienen monomeres Styrol oder Vinyltoluol zur Einstellung der gewünschten Viskosität, wobei diese Produkte anschließend mit dem Harz polymerisieren. Die Aushärtung erfolgt unter Zugabe von Peroxyden als Katalysatoren und bei Temperaturen von mindestens 130°C . Als Kupplungsmittel wird bei Buton mit Vorteil das Silan A 172 verwendet.

Im Preis liegt Buton zwischen den Polyester- und Epoxyharzen, wobei aber noch zu berücksichtigen ist, daß sein spezifisches Gewicht besonders niedrig ist.

Die glasfaserverstärkten Buton Kunststoffe haben eine sehr geringe Wasseraufnahme, gute Chemikalienresistenz und ausgezeichnete elektrische Eigenschaften. Sie haben zuerst in der Elektrotechnik gefunden, dürften aber in der Zukunft noch in verschiedenen anderen Gebieten zur Anwendung kommen.

Thermoplastische Kunststoffe sind für eine direkte Verarbeitung mit Glasfasern nicht sehr geeignet. Es ist aber z. B. möglich, Polyvinylchlorid in Verbindung mit Glasfaserpolyester zu benutzen, wobei letzterer neuerdings direkt auf die Polyvinylchloridform aufgetragen oder aufgesprüht wird, wodurch eine innige Bindung zwischen den zwei Stoffen entsteht.

Meßergebnisse

Es bleibt nun noch die Frage, wie groß die Verstärkung ist, welche mit den Glasfasern erreicht werden kann.

Die mechanischen Eigenschaften der glasfaserverstärkten Kunststoffe hängen ab vom Kunstharz, von der Menge Glas und der Form, in welcher es benützt wird, und schließlich von den Bedingungen, denen die Stücke ausgesetzt sind. Vor allem besteht eine verhältnismäßig große Empfindlichkeit gegenüber Wassereinwirkung, und zwar speziell bei der besonders verbreiteten Gruppe der Polyesterharze. Mit Hilfe geeigneter Kupplungsmittel ist es aber möglich, den ungünstigen Einfluß der Feuchtigkeit auf ein erträgliches Maß zu beschränken.

Wir wollen nun anhand einiger Tabellen diese mechanischen Eigenschaften und deren Beeinflussung durch verschiedene Faktoren betrachten.

Tabelle 3: Festigkeiten der glasfaserverstärkten Kunststoffe im Vergleich mit Metallen

Material	Spezifisches Gewicht	Zugfestigkeit in kg/mm ²	Spezifische Zugfestigkeit	Biegefestigkeit in kg/mm ²	Spezifische Biegefestigkeit
Polyesterharz unverstärkt	1,3	etwa 3	2 bis 3	etwa 9	etwa 7
Glasfaserverstärktes Polyesterharz	1,6 bis 1,9	20 bis 35	etwa 15	35 bis 42	etwa 22
Glasfaserverstärktes Epoxyharz	1,8 bis 1,9	35 bis 42	etwa 20	31 bis 56	etwa 24
Glasfaserverstärktes Melaminharz	etwa 1,9	21 bis 35	etwa 14	19 bis 38	etwa 15
Glasfaserverstärktes Niederdruck-Phenolharz	etwa 1,7	etwa 25	etwa 14	etwa 32	etwa 18
Glasfaserverstärktes Siliconharz	1,7 bis 1,9	21 bis 28	etwa 14	22 bis 31	etwa 15
Aluminiumlegierung	etwa 2,7	32 bis 36	etwa 12	etwa 40	etwa 15
Konstruktionsstahl	etwa 7,8	75 bis 86	etwa 10	etwa 90	etwa 12

Tabelle 4: Einfluß der Anwendungsform der Glasfasern auf die Festigkeiten von glasfaserverstärkten Polyestern

Messungen	Matten aus geschnittenen Fasern	Preßmasse mit geschnittenen Fasern	Satin-Gewebe Typ 181	Roving-Gewebe	Unidirectional Roving-Gewebe
Spezifisches Gewicht	1,5 bis 1,6	1,5 bis 1,6	1,7 bis 1,9	1,7 bis 1,9	1,7 bis 1,9
Normaler Glasgehalt in %	35 bis 45	35 bis 45	60 bis 65	55 bis 75	50 bis 70
Zugfestigkeit in kg/mm ² { trocken	10 bis 16	4 bis 12	28 bis 33	24 bis 42	56 bis 91
nach 30 Tagen in kaltem H ₂ O	9 bis 16	3 bis 12	25 bis 33	21 bis 42	52 bis 90
Biegefestigkeit in kg/mm ² { trocken	17 bis 26	7 bis 21	35 bis 42	28 bis 38	70 bis 140
nach 30 Tagen in kaltem H ₂ O	16 bis 26	6 bis 21	30 bis 42	24 bis 38	64 bis 140

Tabelle 5: Einfluß des Kupplungsmittels auf Trocken- und Naßbiegefestigkeiten von glasfaserverstärkten Kunststoffen (Biegefestigkeiten in kg/mm²)

Behandlung	Polyester		Epoxy		Phenol		Melamin	
	trocken	nach 2 Stunden in kochendem H ₂ O	trocken	nach 2 Stunden in kochendem H ₂ O	trocken	nach 2 Stunden in kochendem H ₂ O	trocken	nach 2 Stunden in kochendem H ₂ O
Hitzereinigung ohne Kupplungsmittel	46	19	51	37	37	21	26	19
Volan	56	53	62	56	53	53	47	46
A172	61	56	—	—	—	—	—	—
A1100	—	—	57	52	61	63	61	63
Garan	51	53	52	46	32	33	31	33
NOL24	66	55	72	70	71	71	72	71

Tabelle 6: Einzelne Literaturangaben über den Einfluß der Temperatur auf glasfaserverstärkte Kunststoffe

Bedingungen	Normaler Polyester		Epoxy Biegefestigkeit in kg/mm ²	Phenol Zugfestigkeit in kg/mm ²
	Zugfestigkeit in kg/mm ²	Biegefestigkeit in kg/mm ²		
Zimmertemperatur	28	42	51	24
Gemessen bei 40°C	27	39		
Gemessen bei 60°C	26	30		
Gemessen bei 80°C	23	20		
Gemessen bei 100°C	23	10		
Nach 1 Std. bei 200°C			53	
Nach 4 Std. bei 200°C			54	
Nach 1 Std. bei 260°C				26
Nach 144 Std. bei 260°C				10

NB.: Unterschiede in den Werten von einer Tabelle zur andern sind auf verschiedene Quellen zurückzuführen.

Tabelle 3 zeigt, wie die Glasfasern die Zug- und Biegefestigkeit der Harze erhöhen und absolute Werte erreichen lassen, die an diejenigen von Aluminium gelangen und zum Teil nicht weit von denjenigen des Stahls liegen. Diese Metalle werden in bezug auf spezifische Werte von den glasfaserverstärkten Kunststoffen stark übertroffen.

Aus Tabelle 4 ersieht man den Einfluß des Verstärkungsmaterials, das verschieden wirkt je nach Form und Menge, in der es zur Anwendung kommt. Die Wahl des Glasfasermaterials wird sich nach dem Preis, den man fordern kann, den mechanischen Eigenschaften, die man verlangt, und der Art der herzustellenden Gegenstände richten. In der gleichen Tabelle findet man auch den Einfluß der Wassereinwirkung. Es handelt sich allerdings um eine verhältnismäßig milde Prüfung bei Laminaten mit guten Voraussetzungen.

Tabelle 5 gibt einen Eindruck von der Wichtigkeit des Kupplungsmittels. Einmal erkennt man, daß speziell bei den Polyestern das Kupplungsmittel unentbehrlich ist, um gute Naßfestigkeiten zu erhalten; dann geht weiter die Bedeutung der richtigen Wahl unter den vorhandenen Produkten hervor, wenn man maximale Festigkeiten erzielen will.

Tabelle 7: Einfluß einiger Chemikalien auf die glasfaserverstärkten Polyesterharze

Einwirkung während 30 Tagen bei Zimmertemperatur	Verbleibende Biegefestigkeit in %
Destilliertes Wasser	87
5% HCl	83
30% HCl	78
5% H ₂ SO ₄	82
30% H ₂ SO ₄	85
5% HNO ₃	82
30% HNO ₃	70
5% CH ₃ COOH	88
30% CH ₃ COOH	93
25% NH ₄ OH	57
2% NaOH	28
10% NaOH	28
40% HCHO	98
Aceton	18
Benzol	100
Dioxan	69
Öl	100
Methanol	36
Äthylacetat	18
Tetrachlorkohlenstoff	100

In Tabellen 6 und 7 sind einige weitere interessante Meßwerte zusammengestellt, welche einen Hinweis auf das Verhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffen bei erhöhter Temperatur oder unter Chemikalieneinfluß geben.

Ein Vergleich soll zum Abschluß nochmals den vollen Wert und die Möglichkeiten der glasfaserverstärkten

Kunststoffe vor Augen führen. Damit eine Platte aus glasfaserverstärktem Polyesterharz die Zug- und Biegefestigkeit einer Stahlplatte erreicht, muß sie nur ungefähr doppelt so dick wie diese sein. Dabei ist aber ihr Gewicht bloß halb so groß wie das der Stahlplatte und sie benötigt keinen Anstrich, ist korrosionsbeständig, wirkt isolierend und ist leicht zu reparieren.

Literaturverzeichnis

- RALPH H. SONNEBORN, *Fiberglass Reinforced Plastics*, Reinhold Publishing Corporation, New York 1954.
- HARRO HAGEN, *Glasfaserverstärkte Kunststoffe*, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1956.
- ROGER UZAC und FRANÇOIS LAPORTE, *Les plastiques armés*, Dunod, Paris 1957.
- PHILLIP MORGAN, *Plastiques stratifiés en verre textile*, übersetzt von GEORGES GENIN und MICHEL GENIN, Editions Eyrolles, Paris 1957.
- E. B. SHAND, *Glassengineering Handbook*, 2. Auflage, McGraw-Hill Book Company, New York/Toronto/London 1958.
- HENRY ALEXANDER PERRY, *Adhesive Bonding of Reinforced Plastics*, McGraw-Hill Book Company, New York/Toronto/London 1959.
- HERMANN SCHWARZ und HANS SCHLEGEL, *Metallkleben und glasfaserverstärkte Kunststoffe in der Technik*, VEB Verlag Technik, Berlin 1961.
- P. W. ERICKSON, I. SILVER und H. A. PERRY, *Universal Type Chemical Finishes for Glass Fibers Used in Reinforced Plastics*. NOL, Division of Paint, Plastics & Printing Ink Chemistry, Naval Ordnance Laboratory, White Oak (MD).
- Aachen-Gerresheimer Textilglas-GmbH, Düsseldorf: *Technische Merkblätter für Glasseide und Glasfaser/Kunststoffanwendung*.
- Critical Study of the Optical and Mechanical Properties of Glass Fibers, *J. Appl. Physics I* (1958) 13.
- Cooling Time of Strong Glass Fibers, *J. Appl. Physics I* (1958) 9.
- K. SCHMIDT, Warum Glasfasern zur Kunststoffverstärkung? *Der Plastverarbeiter 11* (1960) Heft 4.
- FREDERICK K. MCGARRY, Resin-Glass Bond Characteristics, *ASTM Bull.* 1959 (January).
- P. H. MOREL, Les silicones et leurs applications dans le verre textile, Syndicat général des utilisateurs de fibres de verre, Paris 1961 (janvier).
- ROBERT L. PATRICK, *Physical Techniques Used in Studying Interfacial Phenomena*, 16th Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division, Chicago, February 1961.
- PAUL C. YATES und JOHN TREBILCOCK, *Chemistry of Chromium Complexes as Coupling Agents in Fiberglass-Resin Laminates*, 16th Annual Meeting of Reinforced Plastics Division, Chicago, February 1961.
- KURT GUTFREUND und H. S. WEBER, *Interaction of Organic Monomers and Water with Fiberglass Surfaces*, 16th Annual Meeting of Reinforced Plastics Division, Chicago, February 1961.
- H. B. BARDLEY und S. STERMAN, *A New Interpretation of the Glasscoupling Agent Surface through Use of Electron Microscopy*, 16th Annual Meeting of Reinforced Plastics Division, Chicago, February 1961.
- WEST und JOHN O. OUTWATER, *The Stress Distribution in the Resin of Reinforced Plastics*, 16th Annual Meeting of Reinforced Plastics Division, Chicago, February 1961.
- AVK: Informationen über verstärkte Kunststoffe, *Mitteilungsblatt der Arbeitsgemeinschaft für verstärkte Kunststoffe im Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie E. V.*, Sondernummer, Oktober 1961.