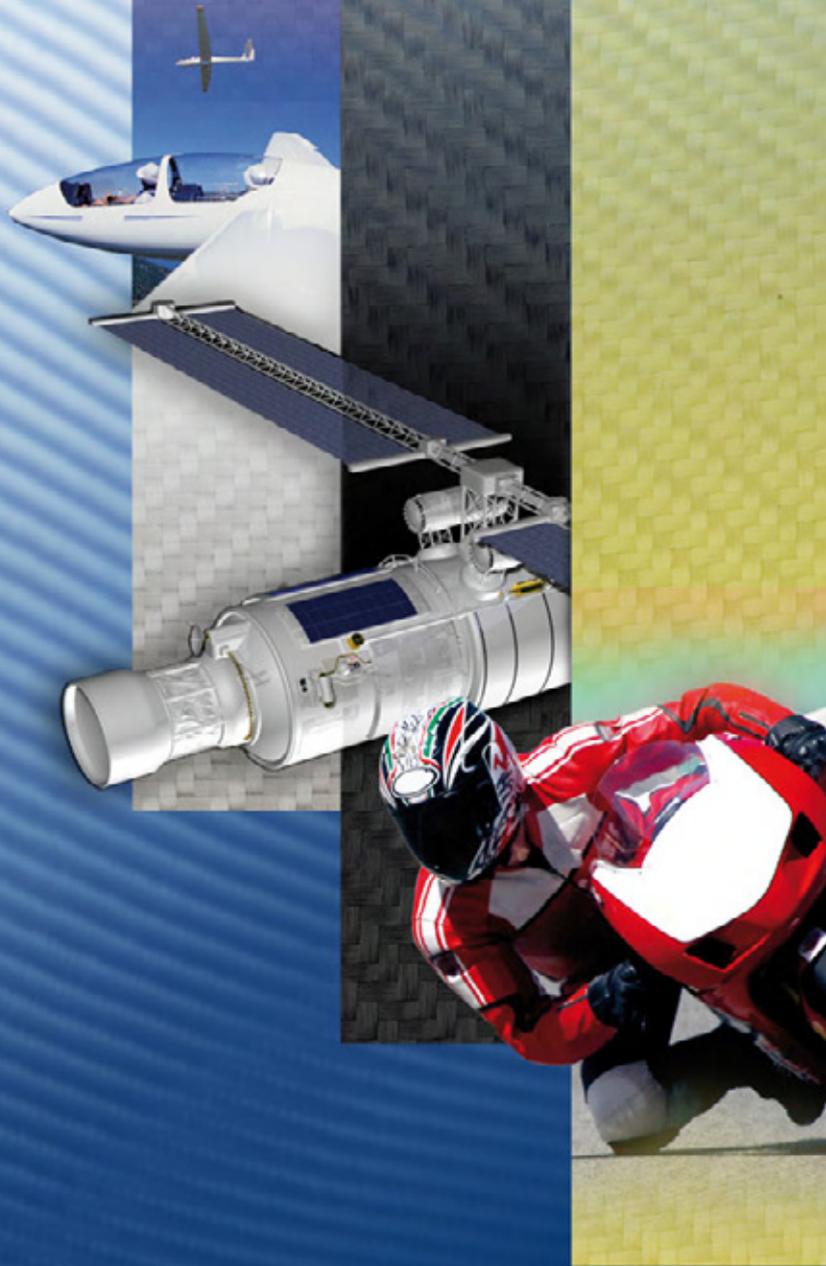




Faserverbundwerkstoffe

Composite Technology



Faserverbundwerkstoffe

HANDBUCH
EDITION 06/2009

Composite materials

HANDBOOK

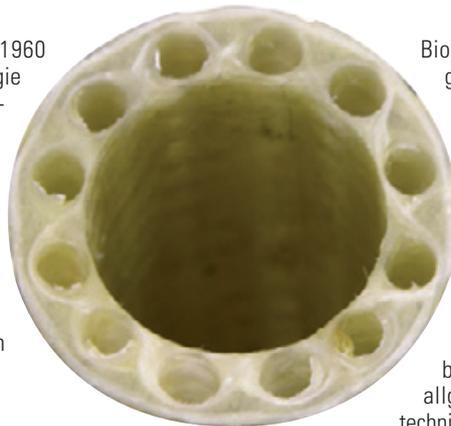


Dr. Markus Milwich
ITV Denkendorf

BIONIK

SYSTEMATISCHES LERNEN VON DER NATUR

Der Begriff Bionik wurde erstmals im Jahre 1960 verwendet und setzt sich aus den Worten Biologie und Technik zusammen. Im Gegensatz zur Biotechnologie, welche die Stoffwechselleistung von Mikroorganismen industriell nutzt, befasst sich die Bionik oder Biomimetik mit der Erforschung und der systematischen Übertragung von Konstruktionsprinzipien und Problemlösungen der Natur in technische Anwendungen. Als Fundgrube biomimetischer Innovationen haben sich neben Tieren auch zunehmend Pflanzen erwiesen, deren Vielfalt in einem 3,8 Milliarden Jahre andauernden Evolutionsprozess entstanden ist.



Die Bionik als Wissenschaft begann mit Leonardo da Vincis (1452-1519) Beobachtungen zum Vogelflug und seinen ersten Flugapparaten, auch wenn die Umsetzung seiner Ideen an den eingeschränkten technischen Mitteln seiner Zeit scheiterte. Erst 3 Jahrhunderte später, ca. 1810, gelang Albrecht Ludwig Berblinger („Der Schneider von Ulm“) mit vom Eulen- und Storchenflug inspirierten gewölbten Tragflächen erste Gleitflüge. Jean-Marie Les Bris flog 1856 mit einer nach dem Vorbild der Albatrosse konstruierten Flugmaschine, 1890 folgte Clément Ader mit der vom Fledermausflug inspirierten Flugmaschine „Eole“, Otto Lilienthal führte 1891 die ersten Gleitflüge durch. Schon im Jahre 1762 fand die erfolgreiche Jungfernfahrt eines Unterwasserfahrzeugs aus Holz statt („Steinhuder Hecht“), welches die Form eines Hechts nachahmte. 1829 wurde der Fallschirm nach dem Vorbild des Wiesenbockbarts erfunden.

Einige spektakuläre bionische Entwicklungen in neuerer Zeit haben ein breites Interesse an der Bionik geweckt, beispielsweise der schmutzabweisende Lotuseffekt, der sehr gute cw-Wert des Mercedes Benz Bionic Car nach dem Vorbild der Kofferfische oder die Entdeckung des reibungsmindernden Effekts der speziellen Hautschuppung von schnell schwimmenden Haien, welcher von Speedo auf Wettkampfschwimmanzüge übertragen wurde.

Mit dem Wissen, dass zukünftige technische Innovationen hauptsächlich in den Überschneidungsbereichen zwischen den Natur- und Ingenieurwissenschaften entstehen werden, besteht die Erwartung, dass durch eine engere Zusammenarbeit von Mechanik, Chemie und Biologie wesentliche technische Entwicklungen stattfinden werden. Zusätzlich wird erwartet, dass die Bionik auch ökologisch vorteilhafte Lösungen bietet, was jedoch nicht zwangsläufig der Fall sein wird.

Natürliche Vorbilder können selten 1:1 in die Technik übernommen werden. Nur bei wenigen Ausnahmen wie dem Klettverschluss oder den ersten Flugapparaten war diese direkte Übertragung möglich. Vielmehr greift moderne Bionik die Problemlösungen der Natur auf, versucht die zugrundeliegenden biologischen Prinzipien zu entschlüsseln und daraus eine differenzierte technische Umsetzung zu generieren. Gerade die in den letzten Jahren entwickelten neuartigen Methoden zur Charakterisierung der Materialien, des Aufbaus und der Funktionsweise biologischer Gewebe haben einen erstaunlichen Erkenntnisgewinn über das bionische Potential natürlicher Werkstoffe erbracht. Hochauflösende Mikroskopie, Mikrotomographie oder Mikrospektroskopie ermöglichen die Untersuchung der mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften und die Klärung des Zusammenhangs von Funktion, Struktur und biochemischem Aufbau.

GRUNDLEGENDE MERKMALE BIOLOGISCHER SYSTEME

Bionik ist eine klar formulierbare Disziplin und Vorgehensweise. Sie führt die in der Biologie entdeckten und erforschten Aspekte der Natur wie natürliche Konstruktionen („Konstruktionsbionik“), Vorgehensweisen oder Verfahren („Verfahrensbionik“) und deren Informationsübertragungs-, Entwicklungs- und Evolutionsprinzipien („Informationsbionik“) einer technischen Umsetzung zu. Die in den verschiedenen Bereichen der Bionik untersuchten und bewerteten biologischen Systeme sind zwar höchst vielfältig, dennoch können wesentliche gemeinsame prinzipielle Merkmale benannt werden, welche ohne Einschränkung als allgemeingültige Ziele und Vorbilder für zukünftige technische Entwicklungen Gültigkeit besitzen:

Adaptivität:
Die Anpassungsfähigkeit an variable Umweltbedingungen sichert das Überleben und die optimale Funktion des biologischen Systems auch bei veränderten Umgebungsbedingungen.

Selbstheilung:
Biologische Systeme besitzen eine hohe Schadenstoleranz, aufgetretene Schäden werden schnell, effizient und dauerhaft repariert.

Nachhaltigkeit:
Die Lebensdauer biologischer Systeme ist begrenzt, nach dem Absterben werden die Materialien vollständig abgebaut und in den biologischen Stoffkreislauf zurückgeführt.

Material- und Energieeffizienz:
Der Aufbau, der „Betrieb“, und die Funktionserfüllung der biologischen Systeme erfolgt mit geringstmöglichem Verbrauch an Rohstoffen und Energie. Beispiele sind das passive Kühlsystem der Termitenbauten, die effiziente aktive Kühlung und Heizung des Bienenstocks durch Bienenflügelschlag, Energiespeicherung und -rückführung in der Fortbewegung des Känguru und die Reibungsminimierung durch den speziellen Aufbau der Hai- und Delphinhaut.

Selbstorganisation:
Biologische Produktentwicklung ist eine genetisch kontrollierte Selbstorganisation, die den Aufbau kleinster Molekülbausteine bis zum Lebewesen regelt. Die Selbstorganisation und Schwarmintelligenz von Vogel- und Fischschwärmen, Bienen- und Ameisenvölkern oder Piranhas geschieht mittels einfachster Algorithmen und wird vor allem durch Duftbotenstoffe organisiert. Bioniker wollen daraus Erkenntnisse ziehen, wie Verkehrs- oder Materialflüsse optimiert gesteuert werden können.

Leichtbau:
Vermeidung von Spannungskonzentrationen durch Anpassung der Faserorientierungen und Einsatz effizienter, angepasster Werkstoffe.

Multifunktionalität:
Mehrere Funktionen sind in einer Struktur zusammengefasst. Ein Baumstamm vereint mechanische Stabilität (Eigengewicht, Wind-, und Schneelast) mit Wasserleitung und Wasserspeicherfunktionen.

Hierarchischer und Gradientenaufbau:

Pflanzenhalme sind auf 5 Ebenen von der Molekülkette über Einzelfasern, Faserbündel zum Halm hierarchisch aufgebaut und sind gekennzeichnet durch graduelle Steifigkeitsübergänge zwischen Fasern und Gewebematrix. Ein Beispiel für einen Gradientenaufbau im Tierreich sind Kalmare. Diese sind zwar Weichtiere, besitzen aber einen harten gekrümmten Schnabel. Der graduelle, allmähliche Übergang vom sehr weichem Körpergewebe zum harten Schnabel ergibt sich beim Kalmar durch eine höchst variable Steifigkeit von unterschiedlich modifizierten Chitinen. Bionische Anwendungen dieses Prinzips wären die Verbesserung von Faser-Matrix-Übergängen in Faserverbundwerkstoffen, oder die Entwicklung von Orthesen mit graduellen Steifigkeitsübergang vom Beinstumpf zur Orthese.

Die zentralen bionischen Themen Konstruktionsbionik, Verfahrensbionik und Informationsbionik können in weitere bionische Forschungsfelder untergliedert werden, welche im folgenden vorgestellt und mit einigen Beispielen näher erläutert werden. Natürlich gibt es häufige Überschneidungen und fließende Übergänge zwischen den Forschungsfeldern und den zu untersuchenden Themen, da diesen zumeist die gleichen bionischen Merkmale zugrunde liegen.

POTENZIALE DER BIONIK

Struktur- und Konstruktionsbionik

Die Struktur- und Konstruktionsbionik beschäftigt sich mit hochintegrierten, multifunktionalen technischen Konstruktionen, welche durch spezielle Materialien, Strukturen, Oberflächen und Formgestaltungsmechanismen sowie einen material- und energiesparenden Leichtbau gekennzeichnet sind. Ein interessantes Beispiel aus diesem Bereich sind die Kieselalgen. Sie besitzen sehr leichte und trotzdem stabile schützende Panzer (wenige μm bis 2 mm) aus Siliziumdioxid-Glas, welche wie reliefverzierte Glaskugeln oder Speicher-Räder aussehen. Gemeinsames Merkmal sind die auf verschiedenen Skalierungen bzw. Unterebenen regelmäßig angeordneten Poren und strukturversteifenden Rippen. Siliziumdioxid-Glas ist an sich schwerer wie Wasser, durch die Rippen/Poren-Leichtbaustruktur schwimmt die Kieselalge aber dennoch im Oberflächenwasser und maximiert so die Energieausbeute ihrer Photosynthese. Die Fressfeinde der Kieselalge, die ca. 1 mm großen Flusskrebse, haben im Laufe der Evolution ihre Fresswerkzeuge an die Beute angepasst, indem diese mit hartem Siliziumdioxid überzogen sind, um den Kieselalgenpanzer zu knacken. Nach dem Vorbild des strukturellen Aufbaus der Kieselalge ist eine bionische ultraleichte Autofelge entwickelt worden.

Baubionik

Die „organischen“ Formen und Strukturen der Natur inspirierten schon seit Jahrhunderten Architekten bei der Gestaltung von Bauwerken. Ein aufsehenerregendes Beispiel dafür war das Eingangstor der Pariser Weltausstellung im Jahre 1900, welches einem Kieselalgenpanzer nachempfunden war. Heutige Architektur versucht jedoch, die den natürlichen Strukturen zugrundeliegende Funktionalitäten zu verstehen und zu nutzen, vor allem bezüglich ökologischem, nachhaltigem, energiesparendem Bauen und materialeffizientem Leichtbau. Während im Leichtbau natürliche Funktionen wie vorgespannte, durch Turgor-Innendruck stabilisierte Strukturen (Bananenblatt) bereits schon zur Anwendung kommen, stehen die natürlichen Prinzipien der passiven energieeffizienten Belüftung und Klimatisierung (Termitenbauten, Erdmännchenbauten, Eisbärfell) noch am Anfang einer breiten Umsetzung.

Bewegungsbionik

Die Bewegungsbionik beschäftigt sich mit energieeffizienter, reibungsarmer Fortbewegung, beispielsweise der Strömungswirbelminderung der Haifischhaut oder dem speziellen adaptiven Aufbau der Delphinhaut, bei welcher ein flüssigkeitsgefülltes, schwammartiges Gewebe direkt unter der Haut auftretende Strömungswirbel auslöscht. Der Bug moderner Schiffe bildet die Kopfform eines Orcas nach und erzeugt erheblich günstigere, energiesparende Strömungsverhältnisse um den Schiffsrumpf. BMW hat 2008 mit der Zukunftsstudie Gina Light ein Automobil vorgestellt, welches eine adaptive textile Außenhaut besitzt. Zukünftig sollen adaptive Formanpassungen der Außenhaut von Flugzeugen, Autos und Schiffen die Reibung zum umgebenden Medium verringern.

Anthrobionik

Themen in der Anthrobionik sind die Entwicklung von leistungsfähigen Mensch-Maschine-Interaktionen, dezentralen Steuerungen und optimierten neuronalen Netzwerken sowie „mechanische“ Themen wie Ergonomie, Robotertechnik und künstliche Muskeln. Erforscht werden (elektro-) aktive Polymere für künstliche Augenmuskeln, für Schutzsysteme im Sport und Beruf, beispielsweise als adaptive bequeme kugelsichere Westen. Ein interessantes biologisches Vorbild ist die Seegurke, deren normalerweise elastische Haut sich bei Gefahr sehr schnell durch chemische Versteifung von Gewebefasern in einen steifen Panzer verwandelt.

Sensorbionik

Sensorbionik erforscht die fantastischen Möglichkeiten natürlicher Sensorsysteme zur Entwicklung von hochauflösender, einfach aufgebauter, zuverlässiger Sensorik. Ziel ist beispielsweise die Verbesserung von Nachtsichtgeräten oder von Thermokameras durch die Erforschung der Ortungssysteme von Fledermäusen (Ultraschall), der Elektrofische (elektrische Felder) und von Schlangen bzw. Kieferprachtkäfern (hochpräziser, breitbandiger Wärmeblick). Weitere bionische Themen sind künstliche Nasen, welche Lungenkrebs „erschnüffeln“ können. Ein Vorbild ist hier der Seidenspinner, welcher minimalste Duftänderungen erkennen kann. Eine erfolgreiche bionische Entwicklung ist seit kurzem im Tsunami-Frühwarnsystem im Einsatz. Die Informationen der Meeresbodensensoren werden durch modulierten Ultraschall nach dem Vorbild der Delphine störungsfrei an die Wasseroberfläche übermittelt. Weitere bionische Themen sind taktile Sensoren nach dem Vorbild von Schnurrhaaren, oder die Entwicklung von technischen Facettenaugen, die ein wesentlich vergrößertes Blickfeld und zehnfach höheres Auflösungsvermögen besitzen.

Verfahrensbionik

Verfahrensbionik befasst sich mit dem Lernen von komplexen biologischen Prozessen bezüglich Ökologie und Abfallvermeidung, der Energiegewinnung mittels Photosynthese sowie der Speicherung von Energie, beispielsweise durch das Abfangen und Speichern des Wasserstoffs aus der Photosynthese.

Evolutionsbionik

Evolutionsbionik nutzt den Erkenntnisgewinn aus biologischen evolutionären Prozessen zur Simulation und Optimierung von komplexen technischen Systemen.

Faserverbundwerkstoffe und Bionik

Ein Grundprinzip lasttragender lebender Materie ist der Aufbau der Materialien als Faserverbundwerkstoff, d.h. lasttragende Fasern sind in eine formgebende, lasteinleitende Grundgewebematrix eingelagert. Fasern und Matrix sind aus nur wenigen biologischen Werkstoffen aufgebaut: Proteine, Polysaccharide, Hydroxylapatit-Keramik (Knochen) sowie Silikat-Keramik (Pflanzen). Diese Grundwerkstoffe bilden lediglich 4 Arten von natürlichen Fasern aus: Cellulose in Pflanzen, Collagen in Tieren, Chitin in Insekten und Krustentieren sowie Spinnenseide. Die natürlichen Fasern haben eine sehr hohe Fähigkeit zur Lastaufnahme bei gleichzeitig geringerer Dichte als Glas-, Kohlenstoff oder Aramidfasern. Durch oft nur geringe Änderungen des chemischen Aufbaus der Fasern und Gewebe ergeben sich sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften. Beispielsweise bilden nahezu identische Kollagenfasern hochsteife Knochenstrukturen, feste und flexible Kreuzbänder oder hochelastische Blutgefäße aus.

Das hohe Leistungsvermögen natürlicher Faserverbunde resultiert nicht nur aus der gewichtsbezogenen Zugfestigkeit und Steifigkeit, sondern in hohem Maße auch aus einer geschickten, anisotropen Anordnung gebündelter Faserstränge auf mehreren hierarchischen Ebenen. Diese Anisotropie erzeugt richtungsabhängige Materialeigenschaften: Festigkeit und Steifigkeit der Gewebe sind somit an die Größe und Richtung der äußeren, auf sie einwirkenden, Kräfte angepasst. Eine besondere Eigenschaft zeichnet Knochen aus. Ähnlich wie bei Bäumen werden hochbeanspruchte Zonen mit (Knochen-) Material verstärkt. Zusätzlich wird in unterbeanspruchten Zonen Knochensubstanz abgebaut und damit Gewicht reduziert.

Ähnlich wie die Natur Holz und Knochen aufbaut, werden auch technische Faserverbundwerkstoffe konstruiert. Hauptziel bei der Herstellung eines Bauteils ist es, die Fasern best möglich entlang den Kraftflusslinien

anzuordnen und so hohe Festigkeit und Steifigkeit mit geringstem Gewicht zu vereinen. Zu Beginn des Einsatzes der Faserverbundwerkstoffe (1953 Corvette-Karosserieteile, 1954 Segelflugzeug Uni Stuttgart, 1957 Monsanto Haus, 1968 Benghazi Dome, 1972 Dachstruktur Dubai Flughafen) wurden die Fasern vor allem in Gewebeform von Hand zu Bauteilen verarbeitet, wobei entsprechende Kompromisse bezüglich einer optimalen Ausrichtung der Fasern gemacht werden mussten. Heutzutage stehen jedoch verschiedene textile Techniken und robotergestützte Legetechniken als industrielle, kostensparende Alternativen zur Verfügung, mit welchen Fasern wesentlich genauer analog dem Verlauf der Kraftflusslinien ausgerichtet werden können. Nach dem Vorbild des Wachstums von Holz und Knochen hat Prof. Claus Mattheck vom Forschungszentrum Karlsruhe das SKO-Rechenprogramm entwickelt, welches an wenig beanspruchten Bereichen der Konstruktion Material entfernt und an besonders beanspruchten Bereichen hinzugefügt, so dass Bauteile mit geringstem Gewicht entstehen. Die damit berechnete Karosserie des Bionic Car ist um 30% leichter als herkömmliche Karosserien. Der filigrane, komplexe Aufbau wäre nur sehr aufwendig mit geschweißten Metallprofilen darstellbar. Wesentlich geeigneter ist die Herstellung mittels Faserverbundwerkstoffen, weil die Fasern relativ einfach entlang den Kraftflusslinien und Verzweigungen angeordnet werden können und zusätzlich Gewicht eingespart werden kann.

Eine bekannte bionische Entwicklung sind die Winglets an der Spitze von Flugzeugflügeln, welche nach dem Vorbild der Aufspreizung der Flügelenden von großen Vögeln entwickelt wurden. Die zumeist aus Faserverbundwerkstoffen hergestellten Winglets reduzieren die Ausdehnung der Wirbelschleppel an den Flügelenden. Dies spart Kerosin und die Flugzeuge können in geringerem Abstand starten und landen. Eine weitergehende Wirbelreduzierung erreichen die Schlaufenpropeller der Fa. Evologics, bei denen die verlängerten Winglets der Propellerblätter ineinander übergehen. Ebenfalls wirbelreduzierend und energiesparend sind die bionischen Flügel des Owllet-Ventilators von Ziehl-Abegg, welche ähnlich den Vögelflügeln eine unregelmäßige, ausgefranzte Flügelhinterkante aufweisen. Zukünftige bionische Entwicklungen wird es bezüglich der adaptiven aktiven oder passiven Formanpassung der Flügel für verschiedene Flugbedingungen geben, unter anderem durch die Umsetzung des bionischen Finray-Effekts. Die Nutzung des Finray-Effekts als Flossenantrieb wurde anschaulich durch verschiedene fliegende oder schwimmende Objekte der Fa. Festo aufgezeigt.

Weitere biologische Vorbilder im Bereich der Faserverbundwerkstoffe sind Pflanzenhalme. Diese pflanzlichen Faserverbundgewebe werden mit geringstem Material- und Energieaufwand aufgebaut, erzielen aber erstaunliche mechanische Leistungen. Beispielsweise ist der Winterschachtelhalme aus äußerem und innerem Druckzylinder und verbindenden, abstandshaltenden Stegen aufgebaut. Dieser Sandwich-Aufbau mit hoher spezifischer Biegesteifigkeit und Knickstabilität verhindert Beulen und Knicken der dünnen Halmstruktur. (Abb. 1). Ein weiteres interessantes Vorbild ist das Pfahlrohr, welches durch den Wind angeregte Schwingungen über einen graduellen Steifigkeitsübergang zwischen Fasern und Grundgewebe-Matrix hervorragend dämpft. Ausserdem weist das Pfahlrohr ein gutmütiges, zähes Bruchverhalten auf, welches in starkem Gegensatz zu dem spröden Bruchverhalten technischer Faserverbundwerkstoffe steht. In einer engen Zusammenarbeit von Freiburger Biologen und Ingenieuren des ITV Denkendorf im Baden-Württemberg Kompetenznetz „Biomimetik“ wurden die pflanzlichen Vorbilder „ultraleichter Sandwichaufbau des Winterschachtelhalms“ und „Schwingungsdämpfung des Pfahlrohrs“ kombiniert und daraus der „technische Pflanzenhalm“ entwickelt (Abb. 2). Dieser kann mittels der am ITV Denkendorf aufgebauten Flechtpultrusions-Technik großserientauglich hergestellt werden, der Steifigkeitsgradient zwischen Fasern und Matrix wird mittels auf die Fasern aufgebrauchte Nano-Partikel erreicht. Die Einsatzbereiche des technischen Pflanzenhalms sind überall dort zu sehen, wo druck- und biegebelastete Faserverbundprofile eingesetzt werden, von der Luft- und Raumfahrttechnik, Fahrzeugbau, Sportgeräte bis zum Bauwesen. Zusätzlich können die Nebenkanäle des technischen Pflanzenhalms zum Transportieren von Flüssigkeiten oder zum Einlagern von vorgespannten stabförmigen Festigkeitsträgern genutzt werden.

Auch zukünftig wird es eine Fülle von bionischen Entwicklungen geben. Erst in jüngerer Zeit gelang es, Spinnenseide aus Seidenproteinen künstlich herzustellen. Spinnenseide ist hochfest, dehnfähig, leicht und wasserfest. Ein Faserverbundwerkstoff aus Spinnenseidenrovings oder aus natürlichen, besonders leichten Glasfasern nach dem Vorbild des Glasschwamms, die Fasern beschichtet mit einem festen, zähen, wasserabweisenden Haftvermittler nach dem Vorbild des Klebstoffs der Seepocken, kombiniert mit einer Matrix aus Biopolymeren, die einzelnen Bauteile fest und doch leicht austauschbar gefügt mit Haftstrukturen ähnlich den Geckofüßen: Sieht so die Faserverbundtechnik der Zukunft aus?

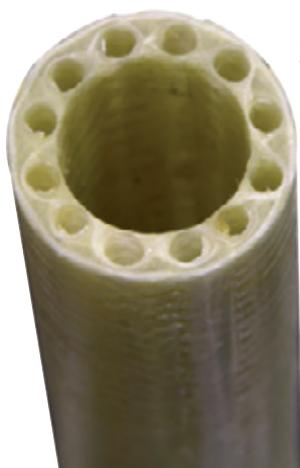


Abb. 2
Technischer Pflanzenhalm



Abb. 1
Querschnitt eines Pflanzenhalms

INHALT

CONTENTS

Einleitung	1
Inhaltsverzeichnis	4
KAPITEL 1: Grundlagen Epoxydharze, Arbeitsanleitungen	5
Faserverbundwerkstoffe	16
Einsatzbereiche von Faserverbundwerkstoffen	17
Bauteilkonstruktionen Aussagen über das Auslegen von Composite-Bauteilen	18
Laminatberechnung	24
Gestalten von Werkstücken aus FVK, Grundregeln nach VDI-Richtlinie	30
Verklebungen	34
Gebräuchliche Fertigungsverfahren	40
Epoxydharze: Eine Übersicht der Eigenschaften und Anwendungen	52
Das Tempern: Epoxydharze und Temperatur	66
Vom richtigen, sicheren Umgang mit der Chemie	70
Arbeitsschutz Epoxydharz	74
Arbeitshygiene im Umgang mit Epoxyd- und Polyesterharzen	76
Arbeitsvorbereitung: Hinweise zum Umgang mit Gefahrstoffen	77
Gefahrenhinweise und Sicherheitsratschläge	78
Überschlägiges Dimensionieren mit Faserverbundwerkstoffen	80
Der Formenbau	86
Formenbau mit GFK	88
KAPITEL 2: Polyesterharze	105
Übersicht: Ungesättigte Polyesterharze	106
Formenbau mit ungesättigten Polyesterharzen	110
KAPITEL 3: Polyurethane	115
Übersicht: Polyurethane	116
KAPITEL 4: Laminierkeramik	120
Formenbau mit Laminierkeramik	122
KAPITEL 5: Elastomere	125
Übersicht: Elastomere	126
Auswahlhilfe: Elastomere	136
KAPITEL 6: Trennmittel, Löse- und Reinigungsmittel	139
Eigenschaften Trennmittel	140
KAPITEL 7: Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern	143
Verstärkungsfasern: Einführung in das Gebiet der Faserverbundstoffe	144
Verstärkungsfasern: Physikalische Eigenschaften der wichtigsten Fasern	148
Webarten: Die wichtigsten Gewebekonstruktionen in Kürze	152
Glasfasern: Herstellung und Eigenschaften	155
Aramidfasern: Herstellung und Eigenschaften	160
Kohlenstofffasern: Herstellung und Eigenschaften	163
Die Kohlenstoff-Weberei: Blick in die Weberei C. Cramer & Co.	170
Gewebe für die Luft- und Raumfahrt	172
Glasgewebe	174
Glasgelege und - matten	176
Aramid- und Kohlegewebe	178
Hybridgewebe	183
Rovings	184
Füllstoffe	186
KAPITEL 8: Stützstoffe, Halbzeuge	189
Übersicht: Stützstoffe	190
Herstellung Wabensandwich	196
Formenbau mit Waben	200
Waben im Modellbau	202
Stützstoffe: Literaturhinweis	206
Verarbeitung von Stützstoffen	208
Halbzeuge	210
KAPITEL 9: GFK-Werkzeuge, Hilfsmittel	219
KAPITEL 10: Vakuumtechnik	227
KAPITEL 11: Anhang	231

GRUNDLAGEN EPOXYDHARZE, ARBEITSANLEITUNGEN
GENERAL INFO EPOXY RESINS, APPLICATION PROCEDURES

Jahrtausendlang waren natürliche Werkstoffe Grundlage menschlicher Existenz. Kleidung, Werkzeuge und Gebrauchsgegenstände wurden aus Leder, Metall, Stein, Ton und anderen Naturstoffen hergestellt.

Werkstoffe wie Porzellan, Glas und Metall-Legierungen wurden meist mehr oder weniger zufällig entdeckt.

Die Verknappung und Verteuerung wichtiger Rohstoffe löste zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine intensive Suche nach synthetischen (künstlich hergestellten) Ersatzwerkstoffen aus. Grundlegend veränderte technische Anforderungen der schnell wachsenden Industrie konnten mit Naturstoffen allein nicht mehr erfüllt werden.

Aus natürlichen Rohstoffen wie Kohle, Steinkohlenteer, Erdöl und Erdgas wurden im Laufe der Zeit unzählige Verbindungen, darunter zahlreiche Kunststoffe, synthetisiert.

¹⁾Das Ziel, **verschiedenartige Materialien** zu einem **Werkstoffverbund** zu kombinieren, um verbesserte Eigenschaften und Synergieeffekte zu erzielen, ist in der Natur Gang und Gebe. Der Schnitt durch eine Paracortex-Zelle von Merinowolle und der Querschliff eines unidirektionalen kohlenstoffaser-verstärkten Epoxydharzes (Cf-EP) zeigen ähnliche Strukturen wie der Querschnitt von Cf-EP und der Längsschnitt eines Bambusstabes. Nicht nur bei der Mikrostruktur kann die Natur als Vorläufer für Faserverbund-Kunststoffe angesehen werden, sondern auch bei der Anwendung von Prinzipien des Leichtbaus.

Werkstofftechnische Gründe für die Verwendung von Fasern als Werkstoffelemente ergeben sich aus den vier Paradoxen der Werkstoffe:

1. Paradoxon des festen Werkstoffes

Die wirkliche Festigkeit eines festen Stoffes ist sehr viel niedriger als die theoretisch berechnete (F. Zwicky).

2. Paradoxon der Faserform

Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach größere Festigkeit als das gleiche Material in anderer Form und je dünner die Faser, umso größer ist die Festigkeit (A. A. Griffith).

3. Paradoxon der Einspannlänge

Je kleiner die Einspannlänge, umso größer ist die gemessene Festigkeit einer Probe/Faser.

4. Paradoxon der Verbundwerkstoffes

Ein Verbundwerkstoff kann als Ganzes Spannungen aufnehmen, die die schwächere Komponente zerbrechen würde, während von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden kann, als wenn sie alleine belastet würde (G. Slayter).

¹⁾(nach Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, Hanser-Verlag)

For thousands of years natural materials had formed the basis of human existence: clothing, tools, and articles of consumption, all were made from leather, metal, stone, clay, or other substances obtained directly from nature.

In contrast, most of the manmade materials such as porcelain, glass, and metal alloys were discovered more or less by accident.

At the beginning of the twentieth century, dwindling deposits of important resources and their escalating prices triggered off an intensive search for synthetic, or manmade, substitute materials. The demand from the fast-growing industries was increasing in line with fundamental technical changes and could no longer be satisfied with natural materials alone.

In time, countless compounds, including a high number of plastics, were synthesised from naturally occurring raw materials such as coal, coal tar, crude oil, and natural gas.

¹⁾The object behind combining **different materials** to form a **composite** with enhanced properties and synergetic effects is par for the course in nature. A section through a paracortical cell in merino wool or through a bamboo stem exhibits structures similar to the micrograph of a unidirectional carbon-fibre-reinforced epoxy resin (CF-EP). Not only in the microstructure can nature be seen as the progenitor of fibre-reinforced plastics, but also in the application of lightweight design principles.

Why material scientists integrate fibres in materials to such advantage can be answered by the following four paradoxes of engineering materials.

1. The paradox of the solid material

The actual strength of a solid material is very much lower than the calculated theoretical value (F Zwicky).

2. The paradox of the fibre form

The strength of a material in fibre form is many times higher than that of the same material in another form, and the thinner the fibre, the greater the strength (A A Griffith).

3. The paradox of the free clamped length

The shorter the length between the clamps, the greater the strength measured on the test piece (fibre).

4. The paradox of composites

When taken as a whole, a composite can withstand stresses that would fracture the weaker component, whereas the composite's stronger component can exhibit a greater percentage of its theoretical strength than when loaded singly (G.Slayter).

¹⁾(Data based on Ehrenstein's Faserverbundkunststoffe available from Hanser Verlag)

Duroplaste

...härtbare Kunststoffe, die nicht erneut plastisch geformt werden können.

Duroplaste sind unlöslich, unschmelzbar und nicht schweißbar. Bei hohen Temperaturen verkohlen sie.

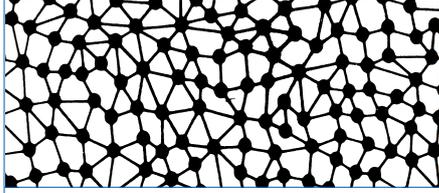
Thermosets

...are curable plastics that can no longer be remoulded.

Thermosets are insoluble, infusible, and unweldable. High temperatures carbonise them.

**Epoxydharze
Polyesterharze
Polyurethanharze
Vinylesterharze**
...und andere

**epoxy resins
polyester resins
polyurethane resins
vinyl ester resins**
...and others



Strukturmodell für Duroplaste
Die Moleküle bilden ein dreidimensionales Netzwerk, sind also in alle Richtungen fest miteinander verbunden.

Structural model for thermosets
The molecules form a three-dimensional network, i.e. they are interlinked by strong chemical bonds in all directions.

Thermoplaste

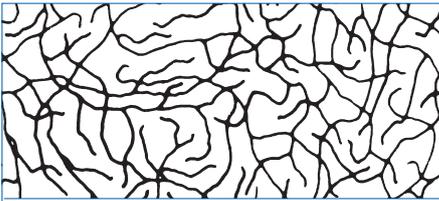
...werden in der Wärme plastisch und lassen sich wiederholt verformen. Reste sind durch Einschmelzen wiederverwendbar. Viele Thermoplaste sind in organischen Lösemitteln löslich. Verbindung untereinander durch Schweißen bzw. „kaltes Schweißen“ mit Lösemitteln.

Thermoplastics

... soften when subjected to heat and so can be repeatedly remoulded. Cut-offs can be remelted and introduced back into the production process. Many thermoplastics are soluble in organic solvents. Thermoplastics can be joined by welding under the application of heat or by the action of solvents.

**ABS
Polystyrol
PVC
Polyethylen**
...und andere

**ABS
polystyrene
PVC
polyethylene**
...and others



Strukturmodell Thermoplaste
Die Molekülketten sind sehr lang und orientierungslos angeordnet.

Structural model for thermoplastics
The molecular chains are very long and aligned in no particular direction.

Elastomere

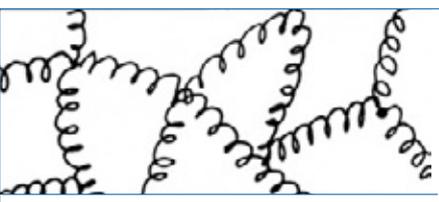
...gummiartig elastische Werkstoffe. Unter Spannung dehnt sich der Werkstoff. Nach Wegnahme der Kraft bildet sich die Verformung fast vollständig zurück. Elastomere sind hitzefest bis zum Verkohlen und durch Wärme nicht schweißbar - Verbindung untereinander durch Vulkanisieren.

Elastomers

... are rubbery elastic materials that elongate under load. When the load is removed, the material returns almost completely to its original state. Elastomers are heatproof up to the point of carbonisation and cannot be welded with heat – they can, however, be joined by vulcanisation.

**Silikonkautschuk
Gummi**
...und andere.

**silicone rubber
vulcanised rubber**
...and others



Strukturmodell Elastomere
Lange Molekülketten, die stark verknäuel sind und sich unter Spannung dehnen.

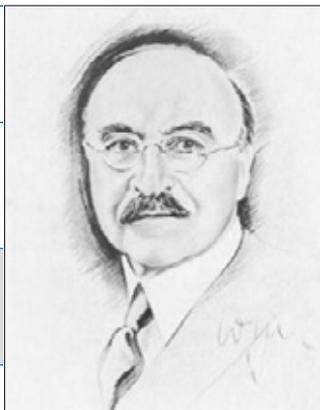
Structural model for elastomers
Tight coils of long molecular chains that elongate under load.

1907 Patent zur Herstellung von Phenolharzen („Bakelit“) an L. H. Baekland

1916 Patent über die Herstellung eines vollständig aus faserverstärkten Kunststoffen bestehenden Flugzeugs an R. Kemp

1935 Beginn der großtechnischen Herstellung von Glasfasern bei der Owens-Corning Fiberglass Corporation (USA)

1938 Patent zur Herstellung von Epoxydharzen (P. Castan)



L.H. Baekland

L.H. Baekland was granted a patent for the manufacture of phenolic resins (Bakelite)

R. Kemp was granted a patent for the manufacture of an aircraft made completely of fibre-reinforced plastics

The US Owens-Corning Fiberglass Corporation was the first to manufacture glass fibres on a large scale

P. Castan was granted a patent for the manufacture of epoxy resins

1942 Erste Bauteile aus ungesättigtem Polyesterharz (UP)/Glasfaser für Flugzeuge, Boote und Autos

1943 Erste Sandwichbauteile für Flugzeuge aus Polyesterharz/Glasfasern und Balsaholz als Stützstoff

1944 Entwicklung und erfolgreiche Flugerprobung eines Flugzeugrumpfes, der in einer GFK/Sandwichbauweise hergestellt wurde

1945 Produktion von Wabenkernen (Honeycombs), eines leichten und druckfesten Kernmaterials für Sandwichkonstruktionen (L.S. Meyer)

1945 Entwicklung des Faserwickelverfahrens (G. Lubin und W. Greenberg)

1951 Erstes Pultrusionspatent (Strangziehverfahren zur Herstellung von Profilen), Patentierung von Allylsilan-Glasschichten, den Vorläufern der heutigen Silan-Haftvermittler (R. Steinmann)

1953 Produktionsbeginn von GF-UP (Glasfaser/Polyesterharz) -Außenteilen im Automobilbau (Chevrolet Corvette)
Entwicklung der ersten GFK-Segelflugzeuge in Deutschland

1959 Produktionsbeginn von Kohlenstofffasern bei der Union-Carbide (USA)

1967 Flugerprobung des ersten, fast vollständig aus GFK hergestellten Flugzeuges (Windecker Research Inc.)

1971 Produktionsbeginn von Aramidfasern (DuPont) unter dem Markennamen „Kevlar®“

The first components made of glass-fibre-reinforced unsaturated polyester resin (UP) for aircraft, boats, and cars

The first sandwich components for aircraft of glass-fibre-reinforced polyester resin on a bed of balsa wood

Development and successful test flight of a fuselage made from a GRP sandwich construction

L.S. Meyer began production on honeycombs, a lightweight and compression-resistant core material for sandwich constructions

G. Lubin and W. Greenberg developed the filament winding method

The first patent granted for pultrusion, a method for manufacturing profiles, whereby the moulding compound is pulled through a die. R. Steinmann was granted a patent for allyl silane glass sizing agents, the predecessors of today's silane coupling agents

*Chevrolet started production on GF-UP (glass-fibre-reinforced unsaturated polyester resin) for the exterior parts of its Corvette model
The first GRP gliders developed in Germany*

The US corporation Union Carbide started production on carbon fibres

Windecker Research Inc. conducted a test flight on the first aircraft made almost completely of GRP

DuPont started production on aramid fibres under the brand name Kevlar®



FVW	Faserverbundwerkstoff besteht aus (Harz-) Matrix und Verstärkungsfasern	FC	Fibre composite made up of a (resin) matrix and reinforcing fibres.
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff	GRP	Glass-fibre-reinforced plastic
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff (Kohlefaserkunststoff)	CRP	Carbon-fibre-reinforced plastic
SFK	Synthesefaserverstärkter Kunststoff (Aramid)	SRP	Synthetic-fibre-reinforced plastic
Matrix	Einbettungsmaterial für Verstärkungsfasern (meist Duroplaste, z.B. Epoxydharz). Funktion der Matrix: <ul style="list-style-type: none"> - formt das Bauteil - leitet und überträgt auftretende Kräfte auf die Fasern - schützt die Fasern 	matrix	<i>The material that surrounds the reinforcing fibres (mostly thermosets such as epoxy resin), its purpose is to:</i> <ul style="list-style-type: none"> - give shape to the component - direct and transfer applied forces to the fibres - protect fibres
Laminat	(von lat. lamina = die Schicht) Ein Laminat ist ein flächiges Produkt, das aus einem Verbund von Harz und Faser besteht, unabhängig von seiner Form und dem Fertigungszustand (feuchtes Laminat, ausgehärtetes Laminat).	laminate	<i>(from Latin. lamina = plate, sheet)</i> A laminate is a flat compound of resin and fibre, irrespective of its shape and stage of manufacture (wet or cured laminate)
uni-direktional	Bedeutet „nur in eine Richtung“. Die Verstärkungsfasern verlaufen nur in eine Richtung.	uni-directional	<i>This is used to describe reinforcing fibres that are aligned in the one direction only</i>
bi-direktional	Hier verlaufen die Fasern in zwei Richtungen, meist im Winkel von 0°/90°.	bi-directional	<i>This is used to describe reinforcing fibres that are aligned in two directions, usually at an angle of 90° to each other</i>
multi-direktional	Faserverlauf in min. 3 Richtungen, meist 0°/90° und ± 45°	multi-directional	<i>This is used to describe reinforcing fibres that are aligned in at least three directions, usually of 0°, ± 45° and 90°</i>
Anisotropie	Unterschiedliche Werkstoffeigenschaften in verschiedene Richtungen, bei FVW abhängig vom Faserverlauf (in Faserrichtung hohe Festigkeiten, quer dazu geringe). Isotrope Werkstoffe sind z.B. Metalle mit gleichen Eigenschaften in jede Richtung.	anisotropy	<i>Different material properties in different directions, in the case of FCs these properties are defined by the fibres' alignment: high strengths along the fibres, low strengths traverse to them. Isotropic materials are, for example metals, which exhibit the same properties in every direction.</i>

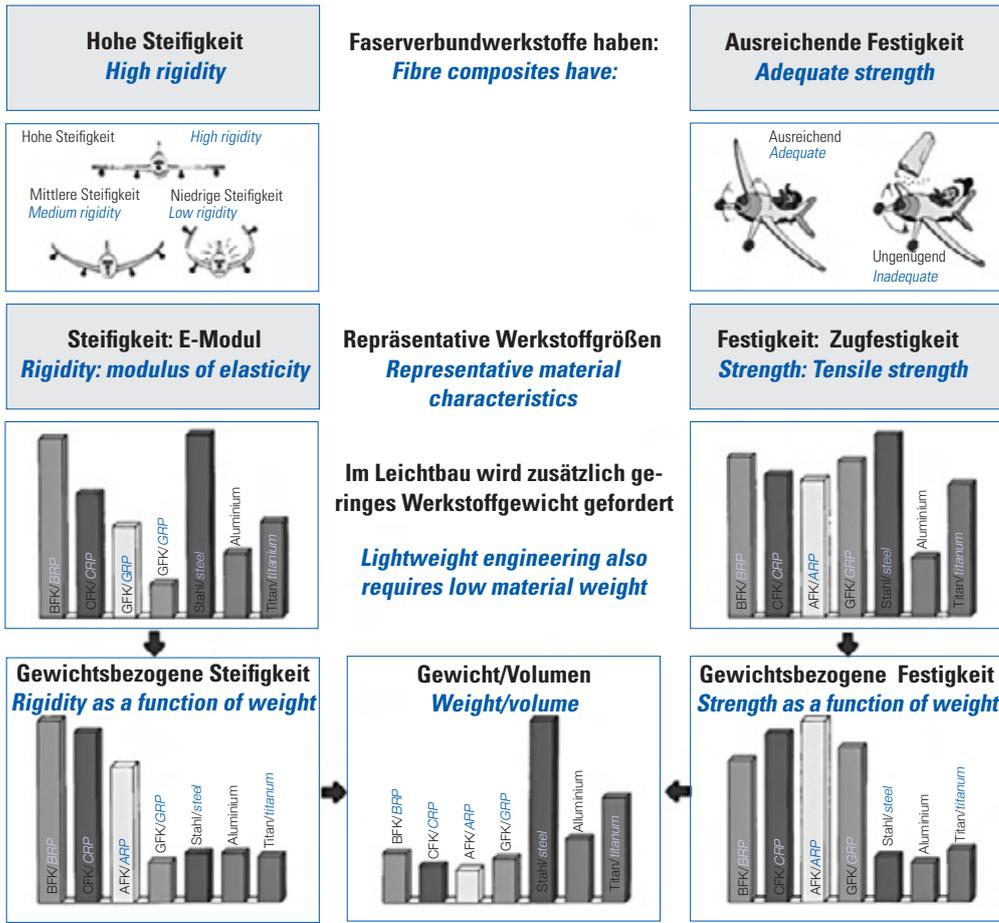
Weitere Fachtermini sind im Anhang am Ende des Handbuches erklärt.

Other technical terms are explained in the annex to this handbook.



Foto Bakelite

WARUM FASERVERBUNDWERKSTOFFE? WHY FIBRE COMPOSITES?



Günstige Werkstoffkennwerte und werkstoffgerechte Konstruktion ermöglichen:
Good material characteristics and a suitable design are the key to:

Leichtbauweisen *Lightweight structures*



<p>Weitere Werkstoffvorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wärmeausdehnung • Korrosionsbeständigkeit • Stufenweises Versagen • Hohe Schwingfestigkeit • Günstiges Schlagverhalten 	<p>Other material advantages</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Low thermal expansion</i> • <i>Corrosion resistance</i> • <i>Gradual failure</i> • <i>High dynamic strength</i> • <i>Good impact behaviour</i>
<p>Kostengünstige Bauweisen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weniger Einzelteile • Geringer Materialabfall • Gute Formbarkeit 	<p>Low-priced designs</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Fewer components</i> • <i>Low material waste</i> • <i>Good mouldability</i>

(nach/date based on DLR Stuttgart)

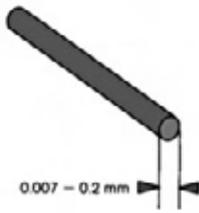


Ausgangsmaterial
Starting material

Faser
Fibres

Laminat (Einbetten)
Laminate (for embedding)

Bettungsmasse (Matrix)
Matrix



Typische Verstärk.fasern

Typical reinforcing fibres

- Glasfaser (GFK)
- Kohlenstofffaser (CFK)
- Aramidfaser (SFK)

- Glass fibre (GRP)
- Carbon fibre (CRP)
- Aramid fibre (SRP)

Typische Bettungsmassen *Typical matrices*

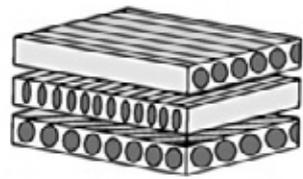
- Polyesterharz
- Epoxydharz
- Vinylesterharz
- Thermoplast

- Polyester resin
- Epoxy resin
- Vinyl ester resin
- Thermoplastic

Laminat einzelschicht
Laminate ply



Schichten
Layers



Pressen, Aushärten
Pressing, curing



Unidirektionales Laminat
Unidirectional laminate

Multidirektionales Laminat
Multidirectional laminate

- Hochbelastbar in Faserrichtung
- Aufbau zur gewünschten Gesamtdicke

- High-strength properties in the direction of the fibres
- Any number of layers up to the required thickness

- Belastbar in mehreren Richtungen
- Aufbau zur gewünschten Gesamtdicke

- High-strength properties in several directions
- Any number of layers up to the required thickness

Faserverbundwerkstoff
Fibre composite

Ausg./Ed. 06.09 Änderungen vorbehalten / Modifications reserved

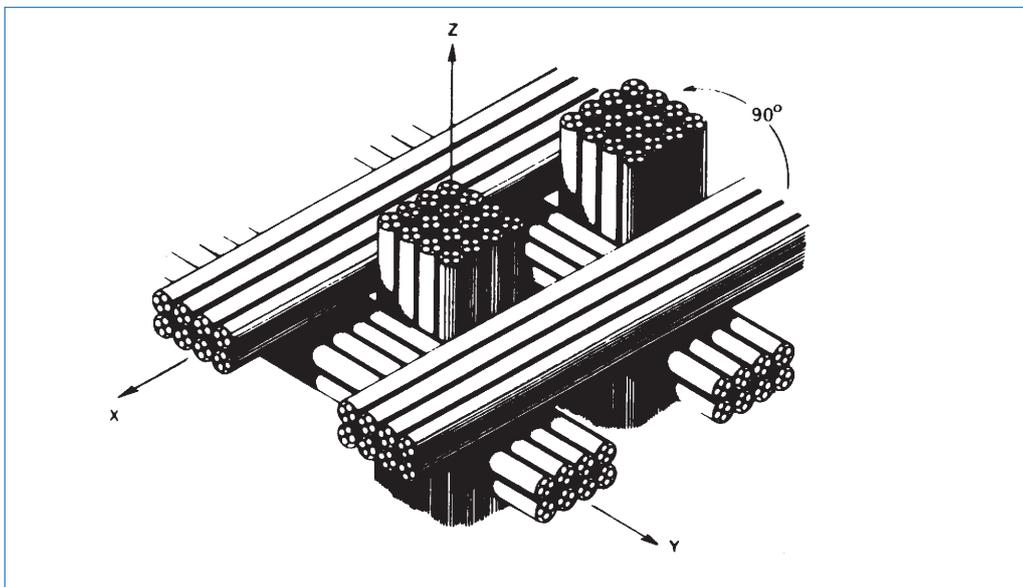


(nach/data based on DLR Stuttgart)

Faserverbundwerkstoffe sind anders als Metalle

The differences between fibre composites and metals

- | | |
|---|--|
| ■ Richtungsabhängige Eigenschaften | ■ <i>Anisotropic properties</i> |
| ■ Werkstoffendzustand wird erst im Bauteil erreicht | ■ <i>Material reaches its final state when the component is finished</i> |
| ■ Vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten durch Variation von: | ■ <i>Wide-ranging design potential with varying:</i> |
| - Faser- und Matrixwerkstoff | - <i>Fibre and matrix materials</i> |
| - Faserrichtung | - <i>Fibre orientation</i> |
| - Lagenanzahl | - <i>Number of plies</i> |



(nach/data based on DLR Stuttgart)



Regeln für die Bauteilgestaltung

Rules for designing components

- | | |
|--|---|
| ■ Fasern in Richtung der angreifenden Lasten | ■ <i>Fibres aligned in the direction of the applied loads</i> |
| ■ Möglichst symmetrischer Lagenaufbau | ■ <i>Maximum possible symmetry of the plies</i> |
| ■ Großflächige Krafteinleitungen | ■ <i>Forces applied over large areas</i> |



Werkstoff Material	Dichte Density	Bruchdehnung Elongation at break	Lieferform Delivered state	Verarbeitungstemperatur Processing temperature	Gebrauchstemperatur der Bauteile Service temperature of components
UP ungesättigte Polyesterharze UP unsaturated polyester resins	1,12 - 1,25g/cm ³	> 3 %	flüssig liquid	Raumtemperatur bis 180°C Room temperature to 180°C	50 - 160 °C
EP Epoxydharze EP Epoxy resin	1,1 - 1,25g/cm ³	6 - 8 %	flüssig liquid	Raumtemperatur bis 230°C Room temperature to 230°C	45 - 230 °C

Die **Bruchdehnung** von Laminierharzen sollte vorzugsweise gleich oder größer der Bruchdehnung der Verstärkungsfasern sein, damit im Belastungsfall kein Bauteilversagen durch Brüche und Risse im Harz eintritt.

The **elongation at break** for laminate resins must always be equal to or greater than that for the reinforcing fibres. Otherwise, fractures and cracks caused by the loads in the resin will lead to component failure.

Verarbeitungstemperatur

Der höchste Wert beschreibt die maximal erforderliche Temperatur bei der Warmhärtung. Diese Warmhärtung ist nur bei einigen Temperharzen mit entsprechend hoher Temperaturbelastbarkeit erforderlich. Die überwiegend angebotenen kalthärtenden Harze erreichen bei Raumtemperatur nahezu ihre volle Festigkeit. Die Gebrauchstemperatur der Bauteile liegt meist bei 50-80 °C.

Processing temperature

The higher value is the maximum temperature needed for hot curing. Only a small number of annealing resins with the correspondingly high thermal resistance are hot curers. Predominant on the market are the cold-curing resins, which solidify almost completely at room temperature. In most cases, the service temperatures for these components range from 50 to 80 °C.

Werkstoff Material	Verarbeitungsschwindung Shrinkage during processing	Nachschwindung Post-shrinkage	Reaktionswärme Reaction heat	Lagerfähigkeit Shelf life
UP ungesättigte Polyesterharze UP unsaturated polyester resins	-10, linear um 2 % - 10, linearly = 2 %	bis 3 % max 3 %	exotherme Reaktion mit teilweise hoher Wärmeentwicklung (besonders beim Vergießen zu berücksichtigen, Härter entsprechend auswählen).	dunkel, kühl, gut verschlossen bis 6 Monate up to 6 months in a dark, cool, well-sealed environment
EP Epoxydharze EP Epoxy resin	1 - 3 %	< 1 %	exothermal reaction, sometimes with high heat development (particularly important for potting, so choose an appropriate hardener)	dunkel, kühl, gut verschlossen 12 Monate up to 12 months in a dark, well-sealed environment

Verarbeitungsschwindung

Der Schwund erfolgt bei **Epoxydharzen** in der flüssigen Phase, also hauptsächlich innerhalb der Verarbeitungszeit.

Shrinkage during processing

Epoxy resins undergo shrinkage in the liquid phase, in other words primarily during the processing time.

Die **Nachschwindung** ist bei unverstärkten Harzmassen am größten. Verstärkungen, z.B. durch Glasgewebeeinlagen, verringern das Schwundmaß erheblich. Beim **Tempern** (Nachhärten bei erhöhter Temperatur) ist ebenfalls eine leichte Nachschwindung zu erwarten, da sich noch reaktionsfähige Harz- und Härtermoleküle verbinden und somit enger zusammentreten.

Post-shrinkage is greatest with unreinforced resin compounds. The degree of shrinkage is reduced considerably by reinforcements, for example in the form of embedded glass fabric. **Annealing** (post-curing at higher temperatures) also gives rise to slight post-shrinkage because there are still reactive resin and hardener molecules that bond and so move closer together.

Werkstoff Material	Beständig gegen (Auswahl) Resistant to (examples)	Nicht beständig gegen (Auswahl) Not resistant to (examples)	Brennbarkeit Combustibility	Reparatur Repair
UP ungesättigte Polyesterharze UP unsaturated polyester resins	Wasser, wäßrige Lösungen, Heizöl, Benzin Water, aqueous solutions, fuel oil, petrol	heißes Wasser, konzentrierte Säuren und Laugen, Benzol, Alkohol, Toluol hot water, concentrated acids and alkalis, benzene, alcohol, toluene	nicht selbstverlöschend not self-extinguishing	aufflamieren und kleben a layer is glued over the top
EP Epoxydharze EP Epoxy resin	Alkohol, Benzin, Benzol, Mineralöle, Fette Petrol, benzene, mineral oil, greases	heißes Wasser, Ester, konzentrierte Säuren und Laugen, Ketone, Aceton hot water, ester, concentrated acids and alkalis, ketones, acetone	schwer entzündbar, brennt weiter difficult to ignite, continues burning	

Werkstoff Material	Zugfestigkeit MPa Tensile strength MPa	Zugmodul GPa Tensile modulus GPa	Biegefestigkeit MPa Flexural strength MPa	Biegemodul GPa Flexural modulus GPa
UP ungesättigte Polyesterharze UP unsaturated polyester resins	50 - 70	3,5 - 4,7	60 - 120	4,0 - 5,0
EP Epoxydharze EP Epoxy resin	70 - 90	2,8 - 3,6	140 - 160	4,5 - 6,0

Ausg./Ed. 06.09 Änderungen vorbehalten / Modifications reserved

Verschiedenartige Materialien zu einem Werkstoffverbund zu kombinieren, um **verbesserte Eigenschaften** zu erzielen, ist in der Natur ein ebenso selbstverständliches Prinzip wie der Leichtbau.

Diese, der Natur abgeschauten Bauweise hat viele technische Bereiche geradezu revolutioniert. Erstmals stehen hochfeste und dabei leichte Werkstoffe mit überragenden Eigenschaften zur Verfügung.

Insbesondere in der Luft- und Raumfahrt werden durch niedrige Strukturgewichte wesentliche Energieeinsparungen und Leistungssteigerungen erzielt.

Der Einsatz von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen in der Raumfahrt ist vor allem wirtschaftlich begründet. Wegen der hohen Energiekosten ist man bereit, in diesem Bereich bis zu Euro 25.000 pro kg Gewichtersparnis aufzuwenden. Bei der Luftfahrtindustrie sind dieses 250 - 750 Euro/kg, in der Fahrzeugindustrie 0 - 2,50 Euro/kg (ausgenommen im Rennsport).

Da FVW im allgemeinen teurer sind als Kompaktwerkstoffe (z.B. Metalle) und höhere Anforderungen an die Auslegung und die Verarbeitungstechnologie gestellt werden, ist dieser Anreiz für den normalen Fahrzeugbau relativ gering, während er in der Luft- und Raumfahrt deutlich zum Tragen kommt.

Mit sinkendem Preis und zunehmendem, allgemein zugänglichem Know-How für die Verarbeitung haben sich FVW auf breiter Ebene durchgesetzt. Kaum noch wegzudenken sind sie im Motorsport, Modell- und Sportgerätebau. Anwendungen im Maschinenbau sind im Vormarsch.

DAS FUNKTIONSPRINZIP

Ein Faserverbundwerkstoff (FVW) wird durch Zusammenfügen mehrerer Werkstoffe hergestellt:

- 1.) der formgebenden **Matrix** (z.B. Epoxyd- oder Polyesterharz)
- 2.) den verstärkenden, hochfesten **Fasern** (meist Glas-, Aramid- und Kohlenstoff)



FVW sind im Prinzip vergleichbar mit Stahlbeton, bei dem ein spröder, formgebender Werkstoff (Beton) durch Stahleinlagen verstärkt wird.

Die Fasern werden in eine flüssige Reaktionsharzmasse eingebettet und beim Härten des Harzes in dem so entstehenden festen Formstoff verankert. Auch kompliziert gestaltete und sehr große Teile können in einem Arbeitsgang mit verhältnismäßig geringem Aufwand hergestellt werden.

Die Wahl des Verfahrens richtet sich nach der Stückzahl und der Größe der herzustellenden Teile sowie nach den Anforderungen in Bezug auf mechanische Festigkeit und sonstige Eigenschaften, wie z.B. Transparenz, Beschaffenheit der Oberfläche, Maßhaltigkeit usw.

Generell gilt: Der Faserverbundwerkstoff entsteht erst durch das Zusammenfügen von Harz und Fasern, d.h.

der Verarbeiter stellt ihn selbst her.

Für die Eigenschaften des Endprodukts sind daher ein sorgfältiges Verarbeiten und Aushärten neben der Bauteilauslegung (Faserorientierung, Faseranteil, Lagenzahl und Gewebe) zwangsläufig von entscheidender Bedeutung.

1.10

*The principle of combining different materials to form a composite with **enhanced properties** is just as common in nature as it is in lightweight engineering.*

This design method based on nature's example has virtually revolutionised many fields of technology, with the result that they can now utilise the superior properties of high-tensile, lightweight materials for the first time.

In particular the aerospace industries benefit from these low structural weights, which contribute considerably towards cutting energy requirements and enhancing performance.

The reasons behind the use of high-performance fibre composites in space travel are primarily financial ones. In view of the high costs for energy, the space agencies are willing to spend up to 25,000 euros for every kilogram saved. For the aeronautics industry this is 250 to 750 euros per kg, in the automobile industry 0 to 2.50 euros per kg (except in racing).

FCs, however, are generally more expensive than compact materials (such as metals) and place greater demands on the design and processing technologies. As a consequence, the attraction of these materials for normal automotive engineering is relatively low, whereas its benefits for aerospace technologies are obvious.

Now that prices are falling and the processing know-how is becoming generally accessible, FCs have asserted themselves over a wide field. Who today can imagine motor sports, model construction, or the design of sports equipment without them?

And applications in machine construction are also gaining ground.

THE PRINCIPLE

A fibre composite (FC) is the result when the following materials are combined:

- 1.) the **matrix** (e.g. epoxy or polyester resin), which gives shape to the final component, and
- 2.) the reinforcing, high-tensile **fibres** (mostly of glass, aramid, or carbon).



Herstellen eines Handlaminats mittels Schaumstoffwalze
A hand lay-up laminate being made with a foam roller

In principle, FCs can be likened to reinforced concrete sections, whose final shape is defined by a brittle material (concrete) reinforced with embedded steel.

The fibres are embedded in a liquid compound of reactive resin. When this resin hardens in a mould, the fibres are anchored in place. Also complex or very large part designs can be manufactured in a single working cycle at relatively low costs.

Which manufacturing method to use depends on the number and size of the parts for manufacturing as well as the requirements placed on mechanical strength and other properties, such as transparency, surface quality, dimensional stability, etc.

The general rule is that a fibre composite first comes into being when resin and fibres are combined, i.e.

the processor alone manufactures it.

So of crucial importance for the properties of the end product is not only the component's design (fibre orientation, proportion of fibres, number of plies, and fabric), but also painstakingly conducted processing and curing.



Festigkeit

Die Festigkeit eines FVV wird wesentlich durch die Verstärkungsfasern bestimmt.

Prinzip 1: Ein Werkstoff in **Faserform** hat eine vielfach größere Festigkeit als das gleiche Material in anderer Form. Zudem gilt: je dünner die Faser, umso größer ist die Festigkeit. (A.A. Griffith)

Prinzip 2: Ein **Verbundwerkstoff** kann als Ganzes Spannungen aufnehmen, die die schwächere Komponente zerbrechen würden, während von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden kann, als wenn sie alleine belastet würde. (G. Slayter)

Bei der Betrachtung der Festigkeiten unterscheidet man zwischen statischer und dynamischer Festigkeit.

Die **statische Festigkeit** bezieht sich auf einfache Belastungsfälle (Zug, Druck, Biegung etc.) während die **dynamische Festigkeit** das Verhalten bei häufig wechselnder Belastung (Biegewechsel mit wechselnder Kraft und Frequenz, entsprechend kombiniert auftretende Zug-, Druck- und Schubkräfte) bestimmt.

Vor allem dort, wo häufige Biegewechsel auftreten, ist eine gute dynamische Festigkeit erforderlich (z.B. Holmkonstruktionen im Flugzeugbau).

Epoxidharze zeigen selbst bei mehreren zehntausend Lastwechseln den geringsten Festigkeitsabfall und damit die größte dynamische Festigkeit.

Matrix (Harz-Einbettung)

Das Reaktionsharz als Bindemittel (Matrix) hat die Aufgabe, die Fasern zu stützen und die auf das Formteil einwirkenden Kräfte auf sie zu verteilen. Dies macht eine gute Haftung des Harzes auf den Fasern notwendig.

Das Reaktionsharz bestimmt im wesentlichen folgende Eigenschaften: Chemikalienfestigkeit, Alterungsbeständigkeit, Kratzfestigkeit, elektrische Eigenschaften sowie den Schwund beim Härten.

Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmedehnung und spezifische Wärme hängen ab vom Mengenverhältnis der Komponenten Reaktionsharz, Reaktionsmittel, Fasern und Füllstoffe.

Fasern

Die mechanischen Eigenschaften der Formstoffe, z.B. Zug-, Biegefestigkeit und Schlagzähigkeit sowie die Fähigkeit zur Arbeitsaufnahme, sind hauptsächlich durch die Eigenschaften der Fasern bedingt. Sie können durch Wahl der Fasererzeugnisse, den Fasergehalt und die Orientierung der Fasern beeinflusst werden.

Härten

Die Eigenschaften des gehärteten Reaktionsharzformstoffes und damit des Formteiles hängen nicht nur vom Ausgangsmaterial ab, sondern auch in hohem Maße von der Führung des Härtingsprozesses. Kenntnisse über die Vorgänge beim Härten des Reaktionsharzes sind daher für den Verarbeiter unerlässlich.

Beim Härten, d.h. beim Übergang der flüssigen Reaktionsharzmassen in dreidimensional vernetzte Produkte, wird zwischen drei Reaktionsarten unterschieden:

Polymerisation

(z.B. ungesättigte Polyesterharze)

Unter dem Einfluß von Reaktionsmitteln, z.B. Peroxiden und Beschleunigern, reagieren die Doppelbindungen der Ausgangskomponenten unter Freiwerden von Reaktionswärme miteinander; es entstehen durch Vernetzen der Moleküle der Ausgangskomponenten hochmolekulare Substanzen.

Liegen mehrere Ausgangskomponenten vor, wie z.B. ungesättigte Polyester und Styrol bei UP-Harzen, so spricht man von Mischpolymerisation.

Die Polymerisationsreaktion benötigt nach dem Zugeben der Reaktionsmittel eine gewisse Anlaufzeit. Anschließend geht die Reaktionsharzmasse ohne Freiwerden flüchtiger Produkte verhältnismäßig schnell unter Erwärmung und raschem Ansteigen der Viskosität in den festen Zustand über. Der einmal eingeleitete Härtingvorgang kann nicht mehr unterbrochen werden und ist irreversibel.

Strength

The strength of an FC is essentially defined by the reinforcing fibre.

Principle 1: *The strength of a material in fibre form is many times greater than that of the same material in another form. Also, the thinner the fibre, the greater the strength. (A.A. Griffith)*

Principle 2: *When taken as a whole, a composite can withstand stresses that would fracture the weaker component, whereas the composite's stronger component can exhibit a greater percentage of its theoretical strength than when loaded singly. (G. Slayter)*

A material's strength properties can be divided into static and dynamic.

Static strength is a measure of the material's behaviour under simple (static) loading conditions (tension, compression, bending), whereas **dynamic strength** is a measure of the material's behaviour under frequently changing load conditions (bending cycles of varying strengths and frequencies and the resulting combination of tensile, compressive, and shear stresses).

A good dynamic strength is above all needed when the component is subjected to frequent bending cycles (e.g. strut designs in aircraft construction).

Even after several tens of thousands of load cycles, epoxy resins suffer only the slightest losses in strength – and so have the greatest dynamic strength.

Matrix

This is a reactive resin that acts as a binder, supporting the fibres and transferring to them the forces acting on the moulded part. So one important property of the resin is that it must adhere well to the fibres.

Essentially, the reactive resin defines the following properties: chemical resistance, ageing resistance, scratch resistance, electrical properties, and shrinkage during curing.

Density, thermal conductivity, thermal expansion, and specific heat are all affected by the respective proportions of reactive resin, solidifying agents, fibres, and fillers.

Fibres

The mechanical properties of moulded materials, e.g. tensile and flexural strength, impact strength, and ability to absorb energy, are defined primarily by the properties of the fibres. Other influencing factors are the fibre structures, fibre content, and fibre orientation.

Curing

The properties of the cured and moulded reactive resin, and therefore of the moulded part itself, are defined not only by the starting material, but also to a great extent by how the curing process is controlled. Knowledge of the processes involved in the curing of reactive resin is therefore crucial.

Curing, i.e. when liquid compounds of reactive resin solidify into three-dimensionally cross-linked products, can take place as one of three reaction types.

Polymerisation

(e.g. unsaturated polyester resins)

Under the effects of reactive agents, e.g. peroxides and accelerators, the double bonds of the starting components react with each other, releasing heat in the process. The molecules of the starting components cross-link to yield macromolecular structures.

When there are several starting components, such as unsaturated polyesters and styrene for UP resins, then this process is called copolymerisation.

The polymerisation reactions do not take place until a certain time after the reactive agents have been added. Then, the compound of reactive resin solidifies relatively quickly with increasing viscosity and heat generation, but without releasing volatile products. Once the curing process has started, it can no longer be stopped and is irreversible.

Polyaddition
(z.B. Epoxyd-Harze)

Im Gegensatz zur Polymerisationsreaktion werden hier dem Reaktionsharz wesentlich größere Mengen an Reaktionsmitteln zugegeben, und zwar in stöchiometrischen Mengen. Die Eigenschaften des Endproduktes hängen daher sowohl vom eingesetzten Reaktionsharz als auch vom Reaktionsmittel ab. Der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand vollzieht sich bei der Polyaddition im allgemeinen langsamer und gleichmäßiger als bei der Polymerisation. Bei der Reaktion wird Wärme frei.

Polykondensation
(z.B. Phenolformaldehyd-Harze)

Im Gegensatz zur Polymerisation und Polyaddition reagieren hier die Ausgangskomponenten unter Abspalten von Nebenprodukten, z.B. Wasser. Die Reaktion kann stufenweise durchgeführt werden. Im Allgemeinen werden vorkondensierte Harze verarbeitet, zu deren Härtung meist nur noch Wärme notwendig ist.

Bruchdehnung

Bei einer Zugbeanspruchung darf das Harz nicht vor der Faser brechen, da es sonst durch Risse zu einem Versagen des gesamten Bauteils kommt. Die Bruchdehnung der Harze sollte daher vorzugsweise größer sein, als die der üblichen Verstärkungsfasern.

Harz/Faser-Haftung

Die Güte eines Verbundwerkstoffes hängt vor allem auch von der Haftung des Harzes auf den Verstärkungsfasern ab. Je besser diese Haftung, umso höher ist die Festigkeit. Um dies zu erreichen, werden **Glasgewebe** mit Haftvermittlern (Silanen, verschiedenen Finishes) behandelt, damit eine möglichst feste (chemische) Verbindung mit dem Harz entsteht. Eine Ausnahme bilden **Aramidfasern** (Kevlar®, Twaron®) und Polyethylengarne (Dyneema®), für die kein chemischer Haftvermittler verfügbar ist. **Kohlenstofffasern** werden mit einer Epoxydharzschicht versehen.

Polyaddition
(e.g. epoxy resins)

In contrast to the polymerisation reaction, essentially larger quantities of reactive agents are added here to the reactive resin, with the additional difference that these quantities are stoichiometric. So the properties of the end product are influenced by both the reactive resin used and the reactive agent. In polyaddition, the transition from the liquid to the solid state generally takes place more slowly and uniformly than in polymerisation. The reactions release heat.

Polycondensation
(e.g. phenol-formaldehyde resins)

In contrast to polymerisation and polyaddition, the starting components release by-products, e.g. water, when they react. This reaction can be controlled in a step-by-step process. In general, precondensed resins are used that in most cases can be cured under the application of heat.

Elongation at break

When subjected to tensile stress, the resin must not break before the fibres. Otherwise, cracking in the resin will cause the whole component to fail. The resin's elongation at break should therefore always be greater than the reinforcing fibres'.

Adhesion between resin and fibres

*The quality of a composite is also defined to a great extent by the resin's adhesion to the reinforcing fibres. The stronger this adhesion is, the greater the strength. One solution involves treating **Glass fabrics** with coupling agents (silanes, various finishes) to give rise to the strongest possible (chemical) bonding to the resin. The exceptions are **Aramid fibres** (Kevlar®, Twaron®) and polyethylene yarns (Dyneema®) for which there are no chemical coupling agents available. **Carbon fibres** are coated with epoxy resin.*



Handlaminat
Tränken eines Kohle/Aramid-Gewebes mit Epoxydharz für einen Segelflugzeugrumpf.

Hand lay-up laminate
Carbon-aramid fabric being impregnated with epoxy resin for a glider's fuselage.

(Nach VDI-Richtlinie 2010 und Ehrenstein, Faserverbundkunststoffe, Hanser-Verlag)



Handlaminat
Verkleben von Tragflächenrippen auf einen Holm aus GFK (Flugzeugbau-Workshop der Aero-Luftfahrtmesse, Friedrichshafen).

Hand lay-up laminate
Ribs being glued to a wing spar of GRP (workshop for aircraft construction, Friedrichshafen aerospace exhibition).

(Data based on VDI guideline 2010 and Ehrenstein's Faserverbundkunststoffe, Hanser-Verlag)



Einsatzbereich
Application fields

Anwendungsbeispiele
Example applications

Besondere Eigenschaften
Particular properties



Raumfahrt **Astronautics**

Antennenkomponenten, Satellitenstrukturen, Druckbehälter, Parabolspiegel, Hohlleiter, Gestelle für optische Geräte und Meßapparaturen.
Aerial components, satellite structures, pressure vessels, parabolic reflectors, wave guides, frames for optical and measuring instrumentation.

Geringes Gewicht, Wärmedehnung durch ausgewählte Verstärkung bis Null einstellbar.
Low weight, carefully selected reinforcing material for near-zero thermal expansion.



Luftfahrt **Aeronautics**

Komplette Rümpfe, Holmkonstruktionen und Tragflächenleitwerke (z.B. im Motor- und Segelflugzeugbau, Ultraleichtflugzeuge), Sekundärstrukturen (Fußboden und Wandverkleidungen) sowie Teile der Primärstruktur (Leitwerk) bei Verkehrsflugzeugen (Airbus), Hubschrauberzellen, Rotorblätter, Propeller, Tanks.
Complete fuselages, spar structures for wings and tail units (e.g. in powered aircraft and glider construction, microlights), secondary structures (floors and wall cladding), and parts of the primary structure (tail unit) for passenger planes (airbus), helicopter bodies, rotor blades, propellers, tanks.

Geringes Gewicht, ausgezeichnete statische und dynamische Festigkeit, sehr gute Ermüdungsbeständigkeit, integrierte Bauweise, Einsparung bei der Montage aufgrund weniger Bauteile, korrosionsbeständig.
Low weight, superior static and dynamic strength, excellent fatigue strength, integrated design, fewer components for lower assembly costs, corrosion-resistant.



Sport- und Freizeit **Sports and recreation**

Modellbau, Boots- und Surfbrettbau, Skier, Schläger aller Art, Angelruten.
Model construction, boat building, surfboard design, skis, all kinds of clubs, bats, and rackets, fishing rods.

Geringes Gewicht, kostengünstige Fertigung, gute Anpassungsmöglichkeit an schnelle Produkte.
Low weight, low-cost manufacture, good adaptability to fast-moving products.



Fahrzeugbau/Verkehrstechnik
Automotive/traffic engineering

Großflächige Karosserieteile, Kardanwellen, Blatt- und Spiral-federn, Drehstäbe, Stoßfänger, Chassisrahmen, Versteifungs-elemente, Zwischenwände und Verkleidungen bei Eisenbahn-waggonen, LKW-Aufbauten.
Large-area body parts, cardan shafts, leaf and coil springs, torsion bars, bumpers, chassis frames, stiffeners, partitions and panelling for railway wagons, truck bodywork.

Kraftstoffeinsparung durch besonders niedriges Gewicht, gute Dämpfungseigenschaften, korrosionsbeständig.
Particularly low weight for lower fuel consumption, good energy absorption properties, corrosion-resistant.



Energietechnik **Power engineering**

Flügel von Windenergieanlagen, Windkanalgebläse, Gas-leitsysteme.
Rotor blades for wind turbines, wind tunnel blowers, gas ducting.

Dynamisch hoch belastbar, lange Lebensdauer, korrosionsbeständig.
High dynamic load properties, long service life, corrosion-resistant.



Maschinen- und Anlagenbau
Machine and plant construction

Schnell bewegte Teile in Verpackungs-, Druck-, Strick- und Webmaschinen, Behälter, Rohrleitungssysteme, Rührwerke, Pumpenelemente und -gehäuse.
Fast-moving parts in packaging machines, printing presses, knitting machines, and power looms, vessels, pipework systems, agitators, pump elements and housings.

Geringe Massenträgheit, hohe Schwingfestigkeit, Wartungs-armut, sehr gute chemische Beständigkeit, einfache und anfor-derungsgerechte Gestaltung.
Low inertia, high dynamic strength, low maintenance, high chemical resistance, simple design meeting with all require-ments.



Medizintechnik **Medical engineering**

Arm- und Beinprothesen, Orthesen, Implantate, medizinische Geräte (z.B. Liegen für Röntgenapparate).
Artificial arms and legs, orthopaedic devices, implants, medical equipment (e.g. examination tables for X-ray

Geringes Gewicht, gute Körperverträglichkeit.
Low weight, good physiological tolerance.



Jörg Willing
 Labor Advanced Materials
 Akzo, Wuppertal
 Focus

Die Entwicklung der Hochleistungsfasern führt zu völlig neuen Möglichkeiten bei der Konstruktion und Auslegung von Bauteilen. Durch den gezielten Einsatz von Verstärkungen, d.h. das Ausrichten der Verstärkungsfasern in Belastungsrichtung, ist es möglich, ein optimal an die Belastung angepaßtes Bauteil mit minimalem Materialaufwand zu konstruieren. Nicht nur für die Luft- und Raumfahrt sind diese Gewichtseinsparungen interessant, sondern auch im konventionellen Maschinenbau. Durch Gewichtseinsparungen kann z.B. auf zusätzliche Lagerungen, größere Antriebsaggregate oder kostspielige Bahnführungselemente verzichtet werden. Durch das geringere Massenträgheitsmoment sind wesentlich höhere Dreh- und Taktzahlen möglich. Insgesamt haben die sogenannten „Neuen Werkstoffe“ gegenüber den konventionellen Materialien viele Vorteile.

The development of high-performance fibres opens up completely new possibilities in the design and structure of components. The targeted application of reinforcing measures, i.e. orienting the reinforcing fibres along the direction of loading, has made it possible to adapt a component design optimally to the load conditions with the minimum of material expenditure. These savings in weight are of interest not only to the aerospace travel sectors, but also to conventional machine construction. With these savings in weight, for example, the designer can do away with extra bearings, more cumbersome drive units, and costly path guide elements. And owing to the low moment of inertia, essentially higher rotational speeds and cycle times are possible. All in all, these so-called new materials offer a lot of advantages over the conventional ones.

Bei Faserverbundwerkstoffen handelt es sich, im Gegensatz zu den konventionellen Werkstoffen, um **anisotrope Materialien**. Der Verbund besteht aus Fasern, die in eine sie umgebende Matrix (Harze oder Thermoplaste) eingebettet sind. Während die Faser die Verstärkungskomponente in dem entstehenden Werkstoff übernimmt, dient die Matrix dazu:

*In contrast to conventional materials, fibre composites are **anisotropic**. The composite is made up of fibres that are embedded in an all-surrounding resin or thermoplastic, the so-called matrix. Whereas the fibres take over the job of reinforcing the resulting material, the purpose of the matrix is:*

- Die Fasern räumlich zu fixieren
- Die Kräfte auf die Fasern zu übertragen
- Die Fasern bei Druckbeanspruchung zu stützen
- Die Fasern vor der Einwirkung von Umgebungsmedien zu schützen

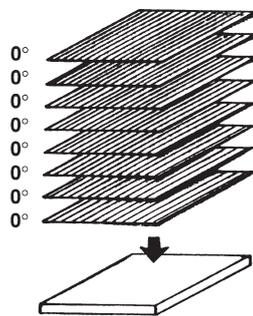
- To fix the fibres in place
- To transfer applied forces to the fibres
- To support the fibres under compressive loading
- To protect the fibres from the effects of ambient media.

Durch das Ausrichten der Fasern in den Beanspruchungsrichtungen ist es möglich, den Werkstoff genau an seine speziellen Anforderungen (Lastfälle) anzupassen. Gerade durch diese Adaption wird es dem Konstrukteur ermöglicht, das Bauteil optimal zu dimensionieren und die maximale Gewichtseinsparung zu erzielen.

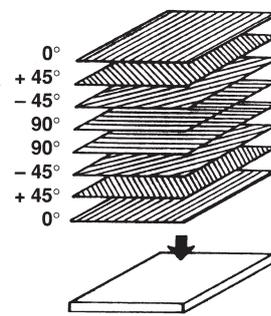
Orienting the fibres in the various directions of loading serves to adapt the material precisely to the specific requirements placed on it (loading conditions). And it is exactly this adaptation that enables the designer to dimension the component optimally and to achieve the maximum savings in weight.

Die **Anisotropie** der Faserverbundwerkstoffe erfordert von den Konstrukteuren ein Umdenken gegenüber dem Umgang mit den **konventionellen isotropen Werkstoffen**. Das gezielte Verstärken der Bauteile mit Fasern führt zu **richtungsabhängigen** mechanischen Kennwerten des Bauteils. Bei den Faserverbundwerkstoffen wird nicht nur das Bauteil, sondern auch das Laminat konstruiert.

*In face of the **anisotropic** properties of fibre composites, designers are forced to take a different approach from that in handling **conventional isotropic materials**. The targeted reinforcement of components with fibres gives rise to a series of mechanical characteristics **that differ when measured along different directions** in the component. In the case of fibre composites, the design applies not only to the component itself, but also to the laminate.*



Unidirektionales Laminat
 Unidirectional laminate



Multidirektionales (quasiisotropes) Laminat
 Multidirectional (quasi-isotropic) laminate

Um dies bei der Konstruktion zu beachten und die sich aus diesen Möglichkeiten ergebenden Vorteile richtig zu nutzen, ist es notwendig, dem Konstrukteur Auslegungshinweise und Berechnungsmethoden an die Hand zu geben. Nachfolgend sind einige Schritte aufgeführt, die bei der Auslegung von Faserverbundteilen beachtet bzw. durchgeführt werden müssen. Die Reihenfolge, in der dies geschieht, richtet sich nicht zuletzt nach den Wünschen der Auftraggeber und den existierenden Anforderungen und Restriktionen.

Before these factors can be taken up adequately in the design, and the associated advantages properly utilised, the designer must first be given the design criteria and the appropriate methods of calculation. The following presents a list of steps that must be included in the design phase for fibre composite components. The order in which these steps are taken does not finally depend on the customer's wishes or the existing requirements and restrictions.

Belastungen, Restriktionen, Anforderungskatalog

Bevor über Konstruktion und Auslegung nachgedacht wird, müssen die wirklichen Anforderungen ermittelt werden. Oft wird von einem Bauteil aus konventionellen Werkstoffen ausgegangen und eine 1:1 Substitution gewünscht, bzw. werden dieselben mechanischen Kennwerte des bisherigen Bauteils verlangt. Dies führt nicht zu optimalen Lösungen. Um das Faserverbundbauteil optimal zu konstruieren, müssen die realen Belastungen und Restriktionen bekannt sein. Die Erstellung eines Anforderungskataloges kann hierbei sehr hilfreich sein.

Konstruktion/Herstellungsverfahren

Schon vor der eigentlichen Konstruktion muß das Verfahren, das man zur Herstellung des Bauteils verwenden will, bekannt sein. Jedes Herstellungsverfahren hat seine Eigen- und Besonderheiten, die bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen. Die Seriengröße ist ein zusätzliches Auswahlkriterium. Abhängig vom Herstellungsverfahren sind auch einige mechanische Kennwerte, d.h. daß nicht mit jedem Verfahren jede gewünschte Bauteileigenschaft erreicht werden kann.

Gestaltungsregeln, die man bei der Auslegung betrachten sollte, ergeben sich aus den Richtlinien beim Umgang mit dem verwendeten Material und ähneln denen bei der Konstruktion von reinen Kunststoffbauteilen. Einige beachtenswerte Regeln lauten:

- Geringe Wandstärken anstreben
- Masseanhäufungen vermeiden
- Zulässige Radien für Fasern betrachten
- Hinterschneidungen vermeiden
- Entformungsschrägen vorsehen
- Werkstoffgerechte Verbindungen vorsehen
- Erreichbare mechanische Eigenschaften beachten
- Fasergerecht konstruieren

Dimensionierung des Bauteils

Die **Auslegung** von Bauteilen erfolgt größtenteils durch die Berücksichtigung von zulässigen Verformungen, Dehnungen bzw. Auslenkungen. Bei der Auslegung von Composite-Bauteilen sollte sicherheitshalber so dimensioniert werden, daß neben den geforderten maximalen Verformungen die einzelnen Laminatschichten die zulässigen bzw. kritischen Dehnungen nicht überschreiten, d.h. es wird gegen ein rißfreies Laminat dimensioniert.

Erste **Mikroschädigungen** (Crazings) in einzelnen Schichten des Laminates führen zu weiterer Rißausbreitung und erlauben z.B. Medien in das Laminat einzudringen und es zu schädigen. Dies führt zu einer kürzeren Lebensdauer des Bauteils und ist somit unerwünscht. Das Bauteil wird bei Überschreitung der kritischen Dehnung in einer Schicht nicht schlagartig versagen, jedoch wird die Lebensdauer herabgesetzt.

Im Gegensatz dazu kann auch **festigkeitsorientiert** dimensioniert werden. Dann richtet sich die Berechnung danach, ob das Bauteil bei maximaler Beanspruchung versagt oder nicht. Das Versagen einzelner Schichten kann dabei erlaubt sein, solange nicht das ganze Bauteil zerstört wird.

Loading conditions, restrictions, catalogue of requirements

Before any preliminary work on the design and structure, the actual requirements must first be determined. As is often the case, the designer takes a component of conventional materials as the basis and aims for a one-to-one substitution, or the customer wants the same mechanical characteristics as the former component. This approach does not promote optimal solutions. Before the fibre composite component can be given the optimal design, the actual loading conditions and restrictions must first be known. Creating a catalogue of requirements can prove very helpful here.

Design/manufacturing method

Before the actual design phase, the most suitable method for manufacturing the component must first be determined. Every manufacturing method has its attributes and salient features that the designer must take into consideration. The size of the series is an additional selection criterion. Furthermore, a number of mechanical characteristics also depend on the manufacturing method, i.e. not all of the desired component properties can be obtained with all methods.

*The **design rules** that must be observed follow from the guidelines for handling the used materials and are similar to those for the design of pure plastic components.*

Some of the more important rules:

- Minimise wall thicknesses
- Avoid concentrated masses
- Note the permitted radii for fibres
- Avoid undercuts
- Provide drafts
- Provide joins suitable for the materials used
- Note the obtainable mechanical properties
- Create a design suitable for the fibres

Dimensioning the component

*The component's **dimensions** are based for the most part on considerations to the permitted deformation, elongation, and deflection. As a measure for ensuring the reliability of composite components, their dimensions should be such that in addition to the specified maximum deformations no one of the laminate plies can exceed the permitted or critical elongation, i.e. the dimensions ensure a laminate free of cracks.*

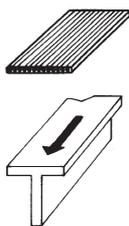
*The undesirable alternative is that initial **crazing** can form in the laminate plies, which promotes crack propagation and allows, for example, media to penetrate and damage the laminate, shortening the component's service life in the process. This is also true when a ply exceeds the critical elongation, although the component itself does not fail at once.*

*In contrast to the above, the dimensions can be **based on the component's strength**. In this case, the calculations are based on the component's tendency to fail or not under maximum loading. Single plies can be allowed to fail, as long as the component itself does not break.*

Konstruiert wird der Werkstoff, vor allem im Großflugzeugbau, aus unidirektional- und/oder gewebeverstärkten Prepregs. Der Lagenaufbau, Anzahl und Ausrichtung der Schichten richtet sich nach den speziellen mechanischen Anforderungen. Dadurch entstehen bei jedem neuen Anwendungsfall neue mechanische Kennwerte für das entstandene Bauteil, die sich aus den mechanischen Kennwerten und Eigenschaften der Einzelschichten ableiten lassen.

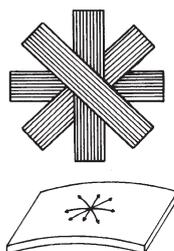
The material is made, above all in the construction of large aircraft, of unidirectionally and/or fabric-reinforced prepregs. The structure of the plies as well as their number and alignment are defined by the specific mechanical requirements. As a consequence, each new application case brings with it a new set of mechanical characteristics for the resulting component, characteristics that can be derived from the mechanical characteristics and properties of the individual plies.

unidirektionaler Lagenaufbau
unidirectional structure of plies



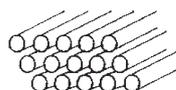
unidirektionale Belastung
unidirectional loading

multidirektionaler Lagenaufbau
multidirectional structure of plies



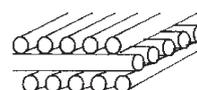
multidirektionale Belastung
multidirectional loading

Unidirektionaler Verbund mit hochbelastbarer Matrix
Unidirectional composite with a high-strength matrix



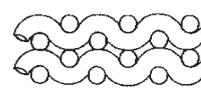
Hoher E-Modul in Faserrichtung
High modulus of elasticity in direction of fibres

Multidirektionaler Verbund mit nieder belastbarer Matrix
Multidirectional composite with a low-strength matrix



Mittlerer E-Modul in Faserrichtung
Medium modulus of elasticity in direction of fibres

Gewebeverbund mit nieder belastbarer Matrix
Fabric composite with a low-strength matrix



Niederer E-Modul in Faserrichtung
Low modulus of elasticity in direction of fibres

Elastizitätsmodul verschiedener Faserverbunde
Modulus of elasticity of various fibre composites

Faserorientierung im FVW-Bauteil
Fibre orientation in the FC component

Festlegung der Materialien

Die Festlegung der Materialien richtet sich nach vielfältigen Gesichtspunkten:

- Einsatztemperatur
- Steifigkeit
- Festigkeit
- Umgebungsmedien
- Preis
- Gewicht
- Wandstärke, Einbauplatz
- Bauteilausdehnung bei Temperatur
- Andere Kriterien

Ist man sich über die o.g. Punkte im klaren, kann die Materialkombination aus Faser und Harz festgelegt werden.

Auswahl der Berechnungsmethode

Allgemein können zur Berechnung vier Methoden herangezogen werden, die nachfolgend noch näher beleuchtet werden.

Bei den ersten drei Methoden handelt es sich um **analytische Betrachtungen**, die zur Berechnung **einfacher flächiger** Bauteile ausreichen. Die neuen Materialien -wie CFK- erlauben jedoch eine sehr freie Formgestaltung, so daß die Berechnung der komplizierten Geometrien nicht mehr auf einfache geschlossene Lösungen zurückgeführt werden können. Hier bietet sich die **Finite-Elemente-Methode** als ein numerisches Verfahren zur Lösung der strukturmekanischen Probleme an. Komplizierte Geometrien werden im Rechner konstruiert, mit Belastungen und Restriktionen versehen und danach berechnet. Diese Art der Berechnung ermöglicht es auch, die in Wirklichkeit 3-dimensionale Struktur der Bauteile zu berücksichtigen.

Choosing the right materials

The choice of materials depends on a large number of aspects:

- Working temperature
- Rigidity
- Strength
- Ambient medium
- Price
- Weight
- Wall thickness, installation site
- Component's thermal expansion when heated
- Other criteria

Once the above have been clarified, the material combination of resin and fibres can be determined.

Choosing the right calculation method

In general there are four methods of calculation.

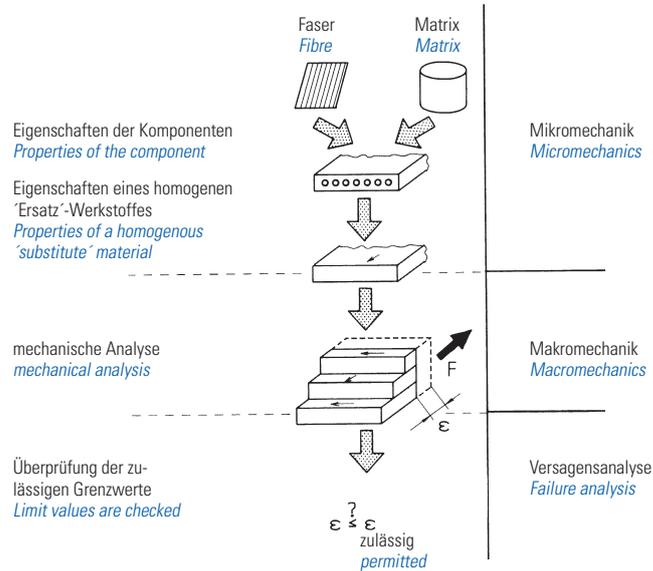
The first of these **involves analytical** observations that are sufficient for the calculation of components with **relatively uncomplicated surfaces**. However, the new materials, such as CRP, allow a far greater freedom in the design, with the result that the calculations of the complex geometries can no longer be equated with simple, self-contained solutions. In this case, the **finite elements method** presents itself as a suitable numerical method for solving problems of this kind in structural mechanics. Complex geometries are simulated in the computer, virtual loads and restrictions are applied, and the behaviour is calculated. This method of calculation also takes into account the three-dimensional structure of the components.

Anhand der Berechnungen werden die in den einzelnen Laminatschichten auftretenden Spannungen und Dehnungen ermittelt.

These calculations are then used to determine the stresses and strains generated in each laminate ply.

Der prinzipielle Ablauf stellt sich wie folgt dar:

The basic procedure is illustrated in the following:



Allgemeiner Berechnungsablauf für Faser-Kunststoff-Verbunde
General sequence of calculations for fibre-reinforced plastics

Netztheorie

Network theory

Voraussetzung:

The component must exhibit the following:

- Orthotropie
- Symmetrie
- Halten der Schichten aneinander

- Orthotropy
- Symmetry
- No relative displacement between plies

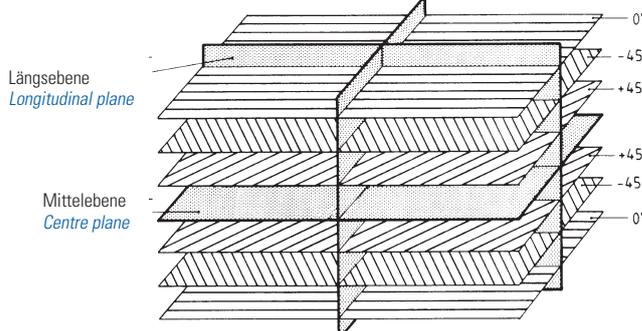
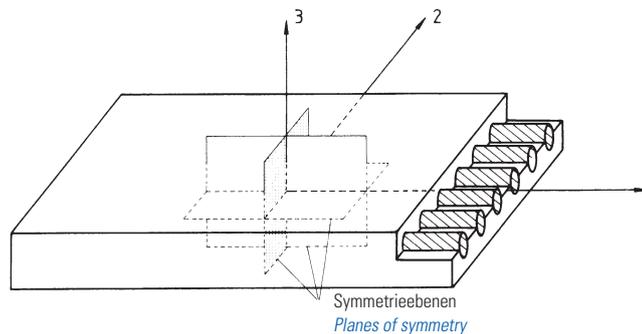
Bemerkungen:

Brief description:

Bei der Netztheorie übernimmt das Harz keine Kräfte. Der Festigkeitsnachweis für wenig intensiv ausgelastete Bauteile, ohne Korrosionseinflüsse und dynamische Lasten, kann mit Hilfe der Netztheorie durchgeführt werden.

With this theory, no forces are applied to the resin. The network theory can be used to verify the strength of less intensively loaded components, without corrosive effects or dynamic loading.

Orthotrope Einzelschicht
Orthotropic ply



Orthotropes Laminat
Orthotropic laminate

Kontinuumstheorie

Voraussetzung:

- Orthotropie
- Symmetrie zur Mittelebene
- Ebener Spannungszustand

Bemerkungen:

Bei der Kontinuumstheorie werden im Laminat Faser und Harz als fest miteinander verbunden angesehen. Behindert wird die Anwendung der Theorie lediglich durch die Voraussetzung des symmetrischen Aufbaus des Laminates.

Laminattheorie

Voraussetzung:

- Die Schichten sind fest miteinander verbunden
- Bei einer Belastung ist in jeder Einzelschicht die Verformung gleich groß

Finite-Elemente-Methode (FEM)

Voraussetzung:

Die FEM ist sicherlich die **allgemeingültigste Methode** zur Auslegung und Berechnung von Faserverbundbauteilen. Einige Firmen bieten speziell zur Berechnung von Faserverbundbauteilen Module an, die die Besonderheiten, Anisotropie u.ä. von Faserverbundwerkstoffen berücksichtigen. Einschränkungen für diese Berechnungsmethode bestehen je nach der verwendeten Software. Inwieweit Voraussetzungen für die Verwendung einzelner Programme erfüllt sein müssen (Orthotropie, Symmetrie zur Mittelebene, ebener Spannungszustand, etc.) muß je nach eingesetztem Programm in Erfahrung gebracht werden.

Ermittlung der Materialdaten

Voraussetzungen für die Berechnungen ist die Kenntnis über die mechanischen Daten der eingesetzten Materialien. Die Anzahl und Art der benötigten Daten hängt von der verwendeten Berechnungsmethode und dem gewünschten Materialaufbau ab. Oftmals liegen die benötigten Kennwerte für die gewünschte Materialkombination nicht vor. Mittels theoretischer Ansätze ist es möglich, aus den mechanischen Daten der einzelnen Komponenten, Faser und Matrix, diese zu berechnen. Ist die Berechnung nicht möglich, sind zerstörende mechanische Prüfungen zur Ermittlung der Daten notwendig.

Versagensanalyse

Nachdem die Berechnung durchgeführt wurde, ist die Analyse des Ergebnisses notwendig. Speziell für Faserverbundbauteile wurden in der Vergangenheit mehrere Versagenshypothesen entwickelt. Diese Theorien unterscheiden sich in den betrachteten Belastungen (statisch oder dynamisch), in der Bewertung der auftretenden Versagensarten (Faserbruch, Matrixbruch, Grenzflächenversagen) und in den grundsätzlichen Überlegungen, ob festigkeitsorientiert oder gegen maximale Dehnungen dimensioniert werden soll.

Ähnlich wie bei den Versagenshypothesen für konventionelle Werkstoffe soll eine Vergleichbarkeit zwischen einem mehrachsigen Beanspruchungszustand und einem unter einachsigen Laborversuchen ermitteltem Vergleichswert ermöglicht werden.

Ergebnis

Die Aus- und Bewertung der Auslegung von Faserverbundbauteilen ist der letzte Schritt. Die vielfältigen Variationsmöglichkeiten der Materialien, der Faserorientierungen, die freie Formgestaltung und Fertigungseinflüsse erschweren die rein theoretische Betrachtung des Problems. Eine Fertigung von Prototypen und praxisnahe Tests mit ihnen sind somit unbedingt notwendig. Erst diese Ergebnisse geben letztendlich Aufschluß darüber, ob das Bauteil in der Praxis eingesetzt werden kann.

Continuum theory

The component must exhibit the following:

- Orthotropy
- Symmetry about the centre plane
- Plane state of stress

Brief description:

The continuum theory treats the laminate's fibres and resin as being firmly combined. Applying this theory is restricted solely by the requirement that the laminate exhibits a symmetrical structure.

Laminate theory

The component must exhibit the following:

- The plies are joined firmly together
- When loaded, each ply undergoes equal deformation

Finite elements method (FEM)

The component must exhibit the following:

Without doubt, the finite elements method is **the most common method** used in the design and calculation of fibre composite components. A number of companies offer modules that specifically take into consideration the salient features, anisotropy, and other aspects in the calculation of fibre composites. This method of calculation can be restricted in its scope by the software used, so it is important to know beforehand what the software requires to run properly (orthotropy, symmetry about the centre plane, plane state of stress, etc.).

Determining the material data

This stage requires mechanical data that must be obtained beforehand from the materials used. As to the quantity and type of these data, this depends in turn on the adopted method of calculation and the planned material structure.

The characteristics needed for the planned material combination are often not known. A theoretical approach could be taken to derive these values from the mechanical data of each component, i.e. of the fibres and matrix. If these calculations are not possible, then the designer must resort to destructive mechanical tests.

Failure analysis

Once the calculations have been concluded, the results must be analysed. In the past, several failure hypotheses were developed specifically for fibre composite components. These theories differ in the observed loading conditions (static or dynamic), the evaluation of the failure type (fibre fracture, matrix fracture, interface failure), and the underlying consideration as to whether the dimensioning is based on the component's strength or the maximum permitted elongations.

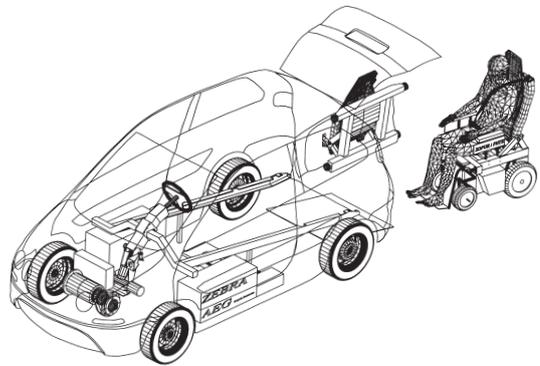
Similar to those for conventional materials, these failure hypotheses are intended to facilitate comparisons between a multiaxial state of stress and a reference value obtained from uniaxial laboratory tests.

Results

The last step involves evaluating and assessing the design of fibre composite components. The purely theoretical observation of this problem is made difficult by the wide range of possible variations, the fibre orientations, the freedom in the design, and manufacturing effects. So it is highly important that a prototype is produced and subjected to field trials. Only these final findings can verify whether the component can be used in practice.

Normalbeanspruchung <i>Normal stress</i>	Scherbeanspruchung <i>Shear stress</i>	Materialverhalten <i>Material behaviour</i>
		isotrop <i>isotropic</i>
Orthotropieachsen <i>Orthotropic axes</i> 		orthotrop <i>orthotropic</i> Beanspr. Richtung <i>Direction of forces</i> Orthotropierichtung <i>Orthotropic axis</i>
		orthotrop <i>orthotropic</i> Beanspr. Richtung <i>Direction of forces</i> Orthotropierichtung <i>Orthotropic axis</i>
		anisotrop <i>anisotropic</i>
Dehnung und Drillung <i>Elongation and twisting</i>	Scherung und Drillung <i>Shearing and twisting</i>	

Verformungen bei Faser-Kunststoff-Verbundlaminate
Deformation types with fibre-reinforced plastic laminates



ZENTAUR Chiron - Konzeption und Entwicklung eines behindertengerechten Fahrzeuges mit Unterstützung durch CAD und FEM an der Fachhochschule für Technik, Esslingen.

ZENTAUR Chiron - CAD and FEM were used for the conception and development of a car adapted to the needs of the disabled (Esslingen Fachhochschule für Technik)

LAMINATBERECHNUNG

NACH DER KLASSISCHEN LAMINATTHEORIE (CLT)

Von Dr.-Ing. Herbert Funke, zusammengefaßt nach Michaeli/Huybrechts/Wegner „Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen“, Hanser-Verlag

Die klassische Laminattheorie (CLT) ist ein Verfahren zur Berechnung mehrschichtiger inhomogener Laminataufbauten. Sie beinhaltet eine ausführliche Verformungs- und Spannungsanalyse unter Einbeziehung spezieller Beanspruchungen von Faserverbundlaminaten wie auch spezielle Versagens-hypothesen.

Verformungs- und Spannungsanalyse

Bei der Verformungsanalyse von Laminaten nach der klassischen Laminattheorie (CLT) handelt es sich um die Lösung eines statisch unbestimmten Systems, so dass neben den Gleichgewichtsbedingungen zusätzlich Stoffgesetze wie auch die Passbedingung zu berücksichtigen sind.

Es wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Die Einzelschicht (ES) ist die kleinste Berechnungseinheit des Laminates. Die Eigenschaften der inhomogenen Einzelschicht werden über die Einzelschicht als „verschmiert“ betrachtet und somit „homogenisiert“.
- Bei der Laminatberechnung werden die Einzelschichten zu einem Laminat „gestapelt“. Dabei werden die Einzelschichten als fest miteinander verklebt angenommen (Passbedingung).

Während die vollständige CLT auch Wölbungen, Verdrillungen und Biegungen mit berücksichtigt, die bereits bei ebener Belastung nicht orthotroper Laminataufbauten auftreten, werden beim sogenannten „Scheibenproblem“ nur ebene Spannungen und Verformungen berücksichtigt. Ferner beinhaltet die CLT auch Wärmedehnungen und Quellungen (z.B. durch Feuchtigkeitseinfluß). Eine ausführliche Darstellung der CLT liefert [MIC °94].

Wir wollen uns hier auf die Grundbegriffe der CLT beschränken und anhand der Berechnungsmöglichkeiten nach der CLT die Ingenieurkonstanten (E-Moduli, Schubmodul, Querdehnzahl) für beliebige (orthotrope) Laminataufbauten ermitteln.

LAMINATE CALCULATIONS

WITH THE CLASSICAL LAMINATE THEORY (CLT)

The following is a summary by Dr.-Ing. Herbert Funke of Michaeli's, Huybrecht's, and Wegner's „Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen“ published by Hanser-Verlag

The classical laminate theory (CLT) is a method for conducting calculations on multi-ply inhomogeneous laminate lay-ups. It includes a thorough deformation and stress analysis based on the specific stress conditions in fibre composite laminates and specific failure hypotheses.

Deformation and stress analysis

Using the classical laminate theory (CLT) to conduct a deformation analysis on laminates yields a solution to a statically indeterminate system which has to take into account not only the equilibrium conditions, but also additional constitutive equations as well as stacking assumptions.

The analysis assumes the following:

- *The ply is the smallest calculation unit in the laminate. The properties of the inhomogeneous ply are “smeared” over the ply, and so “homogenised”.*
- *For the calculations on the laminate, the plies are “stacked” and firmly glued to each other to form the laminate (stacking assumptions).*

Whereas the full CLT also considers bulges, twists, and bends that arise as soon as coplanar forces are applied to non-orthotropic laminate lay-ups, the method of treating the laminate as a plane considers coplanar stresses and deformations only. Moreover, the CLT anticipates thermal expansions and swelling, for example through the effects of moisture. The CLT is presented in more detail by [MIC °94].

This paper restricts itself to the basic concepts of the CLT and utilises the models it offers to calculate the engineering constants (moduli of elasticity, shear modulus, Poisson ratio) for any (orthotropic) laminate lay-up.

Literaturhinweis:

VDI 2014, Blatt 3: Entwicklung von Faser-Verbund-Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund, Berechnung

Alfred Puck: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis, Hanser-Verlag 1996, ISBN 3-446-18194-6

Der Berechnungsblauf der vollständigen CLT erfolgt in 10 Schritten. Nach 4 Schritten können die Ingenieurkonstanten des Laminates ermittelt werden:

The calculations according to the full CLT involve ten steps. The engineering constants for the laminate can be determined after four steps:

Schichtmodul <i>Plies' moduli</i> $E_{II}, E_I, G_{III}, \nu_{III}$	→	1) Bestimmung der Steifigkeit der Einzelschichten <i>1) Determine the plies' rigidities</i>	----->	$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix}$	
Schichtorientierung <i>Plies' orientations</i> α_k	→	2) Transformation der Steifigkeiten in das Laminat-Koordinatensystem <i>2) Transform the rigidities into the laminate's coordinate system</i>	----->	$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix}$	= [Q']
Schichtdicken <i>Plies' thicknesses</i> t_k	→	3) Berechnung der Steifigkeitsmatrix des Laminates <i>3) Calculate the rigidity matrix for the laminate</i>	----->	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix}$	= [A]
		4) Invertieren zur Nachgiebigkeitsmatrix <i>4) Invert to obtain the compliance matrix</i>	----->	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}$	= [a]
Äußere Lasten <i>External loads</i> - N_x, N_y, N_{xy} - ΔT	→	5) Verzerrung des Laminates <i>5) Distortions in the laminate</i>	→	$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$	
		6) Verzerrungen der Schichten <i>6) Distortions in the plies</i>	→	$\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma_{12}$	
- ΔM		7) Schichtspannungen <i>7) Stresses in the plies</i>	→	$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{21}$	

Berechnungsschritte der klassischen Laminattheorie [MIC °94]

Calculation steps with the classical laminate theory [MIC °94]

Vorbereitungen

Bevor mit der eigentlichen Berechnung begonnen werden kann, müssen zunächst für alle Einzelschichten (ES) des zu berechnenden Laminates die Ingenieurkonstanten ermittelt werden:

- $E_{1,k}$: E-Modul der Einzelschicht "k" in Faserrichtung
- $E_{2,k}$: E-Modul der Einzelschicht "k" quer zur Faserrichtung
- $G_{12,k}$: Schubmodul Einzelschicht "k"
- $\nu_{12,k}$: Querdehnzahl Einzelschicht "k"

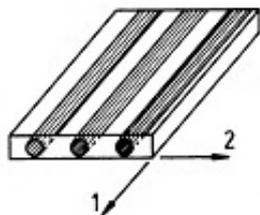
Preliminary work

Before we can start on the calculations, we first have to determine the engineering constants for all of the plies in the specimen laminate:

- $E_{1,k}$: modulus of elasticity of ply "k" along the fibres
- $E_{2,k}$: modulus of elasticity of ply "k" transverse to the fibres
- $G_{12,k}$: shear modulus of ply "k"
- $\nu_{12,k}$: Poisson ratio of ply "k"

Die Berechnung erfolgt nach der Mischungsregel nach nachfolgenden Formeln.

The calculations are based on the rule of mixtures in accordance with the following formulae.



UD-Einzelschicht [MIC °89]

Unidirectional ply [MIC °89]

$$E_1 = \varphi \cdot E_F + (1 - \varphi) \cdot E_H$$

$$E_2 = \frac{E_H \cdot E_{F2}}{\varphi \cdot E_H + (1 - \varphi) \cdot E_{F2}}$$

$$G_{12} = \frac{G_F \cdot G_H}{\varphi \cdot G_H + (1 - \varphi) \cdot G_F}$$

$$\nu_{12} = \varphi \cdot \nu_F + (1 - \varphi) \cdot \nu_H$$

Während die Werte des Längsmoduls und der Querkontraktion gut mit Messungen übereinstimmen, ergeben sich Unterschiede beim Quermodul und beim Schubmodul. So gibt [Puck] folgende modifizierte Regeln an:

$$E_2 = \frac{E_H^* \cdot (1 + 0,85 \varphi^2)}{\varphi \cdot E_H^* / E_F + (1 - \varphi)^{1,25}} \quad \text{mit/with:} \quad E_H^* = \frac{E_H}{(1 - \nu_H^2)} \quad G_{12} = \frac{G_H \cdot (1 + 0,6 \varphi^{0,5})}{\varphi \cdot G_H / G_F + (1 - \varphi)^{1,25}}$$

Whereas the values for the modulus along the fibres and for the Poisson ratio agree well with measurements, there is disagreement between the corresponding values for the modulus transverse to the fibres and the shear modulus. [Puck] gives the following modified rules:

Ferner ist für jede ES die Laminatstärke t_k zu ermitteln. Dabei werden mehrachsiale Faserhalbbeuge ggf. in mehrere ES aufgeteilt.

Also the laminate thickness t_k has to be determined for each ply. This step may involve splitting up multiaxial semi-finished fibre products into several plies.

Die Berechnung nach der CLT erfolgt dann in 10 Einzelschritten:

The calculations with the CLT are then conducted in ten steps as follows.

Schritt 1: Bestimmung der ES-Steifigkeiten

Step 1: Determining the plies' rigidities

Die Moduli beschreiben nur das Werkstoffverhalten bei einachsiger Beanspruchung bzw. reiner Schubbeanspruchung. Im Laminat liegen aber i. d. R. stets mehrachsige Spannungszustände vor. Die unter Berücksichtigung der Querkontraktion zu ermittelnden Steifigkeiten Q_{ij} beschreiben somit das Werkstoffverhalten bei mehrachsiger Beanspruchung.

The moduli describe only the material's behaviour under uniaxial loading or simple shearing. As a rule, however, the laminate exhibits multiaxial stress states. For this reason, the rigidities Q_{ij} , which are calculated as a function of the Poisson ratio, serve to describe the material's behaviour under multiaxial loading.

Bestimmung der ES-Steifigkeiten $[Q]_k$ der orthotropen Einzelschichten im ES-Koordinatensystem (ESKS):

The plies' rigidities $[Q]_k$ for the orthotropic plies in the ply coordinate system (plyCS) are determined as follows:

$$[Q]_k = \begin{bmatrix} Q_{21} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}_k$$

Schritt 2: Transformation der ES-Steifigkeiten

Step 2: Transforming the plies' rigidities

Die Steifigkeiten $[Q]_{\text{ESKS},k}$ jeder ES werden mit Hilfe von Transformationsbeziehungen aus dem „lokalen“ Einzelschichtkoordinatensystem (ESKS) in das globale Koordinatensystem des Laminates (LamKS) transformiert.

The rigidities $[Q]_{\text{plyCS},k}$ of each ply are transformed from the "local" ply coordinate system (plyCS) to the global coordinate system of the laminate (lamCS) in accordance with the transformation laws.

$$[Q]_{\text{LamKS},k} = [T_{\sigma}]_k \cdot [Q]_{\text{ESKS},k} \cdot [T_{\sigma}]_k^T$$

mit/with:

$$[T_{\sigma}]_k = \begin{bmatrix} \cos^2 & \sin^2 & 2\sin \cos \\ \sin^2 & \cos^2 & -2\sin \cos \\ -\sin \cos & \sin \cos & \cos^2 - \sin^2 \end{bmatrix} ; \quad [T_{\sigma}]_k^T = \begin{bmatrix} \cos^2 & \sin^2 & -\sin \cos \\ \sin^2 & \cos^2 & \sin \cos \\ 2\sin \cos & -2\sin \cos & \cos^2 - \sin^2 \end{bmatrix}$$

Der Winkel ist dann positiv, wenn man im mathematisch positiven Drehsinn (Gegen-Uhrzeigersinn) von der 1-Achse des jeweiligen ES-Koordinatensystems in die 1-Achse des Laminatkoordinatensystems dreht.

The angle is positive when the 1 axis of the respective ply coordinate system is rotated in the mathematically positive sense (anticlockwise) towards the 1 axis of the laminate coordinate system.

Schritt 3: Berechnung der Laminat-Steifigkeitsmatrix

Die transformierten Steifigkeiten aller ES werden, gewichtet mit ihrem Querschnittsanteil, zu einer homogenen Laminatsteifigkeit aufaddiert. Man erhält die Laminat-Steifigkeitsmatrix [A]:

$$[A] = \sum_k \frac{t_k}{t_{Lam}} \cdot [Q]_{LamKS,k}$$

Step 3: Calculating the laminate rigidity matrix

The transformed rigidities of all plies, weighted according to their cross-sectional ratios, are added together to yield a homogeneous laminate rigidity. The result is the laminate rigidity matrix [A]:

Schritt 4: Invertierung zur Laminat-Nachgiebigkeitsmatrix

Um die Verzerrungen des Laminates ermitteln zu können, muss die Steifigkeitsmatrix [A] zur Nachgiebigkeitsmatrix [a] invertiert werden:

$$[a] = [A]^{-1}$$

Step 4: Inverting to obtain the laminate compliance matrix

Before we can determine the distortions in the laminate, we must first invert the rigidity matrix [A] to obtain the compliance matrix [a]:

Aus den Elementen der Nachgiebigkeitsmatrix werden die Ingenieurkonstanten des Laminates ermittelt:

$$E_{x,Lam} = \frac{1}{a_{11}} \quad E_{y,Lam} = \frac{1}{a_{22}} \quad G_{xy,Lam} = \frac{1}{a_{33}} \quad \nu_{xy,Lam} = \frac{a_{21}}{a_{11}} \quad \nu_{yx,Lam} = \frac{a_{12}}{a_{22}}$$

The engineering constants for the laminate are obtained from the elements of the compliance matrix:

Schritt 5: Berechnung der Laminatverzerrungen

Die mechanischen Laminatverzerrungen werden durch Aufbringung der mechanischen Lasten ermittelt:

$$\{\epsilon_{Lam}^{mech}\} = [a] \cdot \{\sigma_{Lam}^{mech}\} \quad ; \quad \text{mit: } \{\sigma_{Lam}^{mech}\} = \frac{1}{t_{Lam}} \cdot \{N\} \quad ; \quad N = \text{Kraftfluß / flow of forces}$$

Step 5: Calculating the distortions in the laminate

The mechanical distortions in the laminate are determined with the application of mechanical loads:

Für die Ermittlung der Laminatverzerrungen aufgrund von Temperaturänderung und Quellung siehe [MIC °94].

For determining distortions in the laminate caused by a change in temperature or swelling, see [MIC °94].

Schritt 6: Gesamtverzerrung des Laminates

Die Gesamtverzerrung des Laminates ist die Summe der Verzerrungskomponenten aus mechanischer, thermischer und Quellbeanspruchung. (Thermische und Quellbeanspruchung siehe [MIC °94])

Step 6: Total distortion of the laminate

The total distortion of the laminate is the sum of the component distortions arising from mechanical, thermal, and swelling stresses (for thermal and swelling stresses see [MIC °94]).

Schritt 7: Berechnung der Einzelschichtspannungen

Die spannungswirksamen (^{sp}) mechanischen Verzerrungen des Laminates sind aufgrund der „Verklebung“ der Schichten untereinander (Passbedingung) identisch mit den mechanischen Verzerrungen jeder Einzelschicht (ES) im Laminatkoordinatensystem (LamKS):

$$\{\epsilon_{sp,ES}^{mech}\}_{LamKS,k} = \{\epsilon_{Lam}^{mech}\}$$

Step 7: Calculating the stresses in the ply

Following the initial assumption that the plies are “glued” to each other (stacking assumptions), the stress-promoting (^{sp}) mechanical distortions in the laminate are identical to the mechanical distortions of each ply in the laminate coordinate system (lamCS):

Die spannungswirksamen Verzerrungen aufgrund von thermischer und Quellbeanspruchung müssen für jede ES einzeln ermittelt werden, siehe [MIC °94].

The stress-promoting distortions as a result of thermal and swelling stresses must be determined for each of the plies (see [MIC °94]).

Schritt 8: Summe der spannungswirksamen Verzerrungen:

Die insgesamt pro ES spannungswirksamen Verzerrungen ergeben sich aus der Summe der mechanischen und thermischen Verzerrung und der Verzerrung aufgrund von Quellung, siehe [MIC °94].

Schritt 9: Rücktransformation der spannungswirksamen Verzerrungen in das jeweilige ESKS

Für jede ES erfolgt die Rücktransformation der spannungswirksamen Verzerrungen in das jeweilige Einzelschichtkoordinatensystem (ESKS):

$$\{\epsilon_{sp,ES}\}_{ESKS,k} = [T_\epsilon]_k \cdot \{\epsilon_{s,ES}\}_{LamKS,k} \quad \text{mit/with:} \quad [T_\epsilon]_k = \begin{bmatrix} \cos^2 & \sin^2 & -\sin \cos \\ \sin^2 & \cos^2 & \sin \cos \\ 2\sin \cos & -2\sin \cos & \cos^2 - \sin^2 \end{bmatrix}$$

Schritt 10: Berechnung der Spannungen in den Einzelschichten

Unter Einbeziehung der Einzelschichtsteifigkeiten $[Q]_{ES}$ erhält man die Spannungen für jede Einzelschicht:

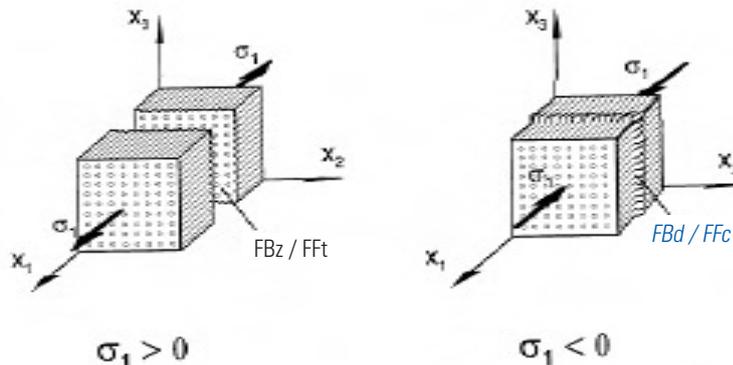
$$\{\sigma_{ES}\}_k = [Q]_{ESKS,k} \cdot \{\epsilon_{sp,ES}\}_{ESKS,k}$$

Festigkeitsberechnungen

Die Festigkeitsberechnungen erfordern die Einbeziehung spezieller Bruchkriterien sowie vorliegender, zumeist experimentell ermittelter, Festigkeitskennwerte. Eine ausführliche Darstellung der Bruchkriterien liefert [MIC °94]. Die Darstellung hier beschränkt sich auf die Erläuterung der beiden wesentlichen Versagensmechanismen.

Faserbruch (FB)

Unter Faserbruch ist das Versagen einer Einzelschicht aufgrund von Zug- oder Druckspannungen in Faserrichtung (σ_1 -Spannung) zu verstehen. Die Bruchfläche verläuft quer zur Faserrichtung durch die gesamte Einzelschicht. Ursache können sowohl Zug- wie auch Druckspannungen sein. Bei Zugspannungen als Ursache des Versagens reißen die Fasern der Einzelschicht aufgrund zu hoher Zugbeanspruchung. Bei Druckbeanspruchungen als Versagensursache knicken die Fasern der Einzelschicht aus (Mikroknicken). Die Festigkeit gegen Faserbruch ist sehr hoch, wobei unter dem Begriff Faserbruch das Versagen **aller!** Fasern einer Einzelschicht und nicht etwa das einer einzelnen Faser zu verstehen ist.



Faserbruch, [MIC °94]

Step 8: Sum of the stress-promoting distortions

The total stress-promoting distortions per ply are obtained from the sum of the mechanical and thermal distortions plus the distortion caused by swelling (see [Mic 94]).

Step 9: Retransforming the stress-promoting distortions into the respective plyCS

For each ply, the stress-promoting distortions are retransformed into the respective ply coordinate system (plyCS):

Step 10: Calculating the stresses in the plies

The stresses in each ply are obtained as a function of the plies' rigidities $[Q]_{ply}$:

Strength calculations

Before we can calculate the strengths, we must first set down specific fracture criteria and obtain the mechanical properties that in most cases have been determined in experiments. Fracture criteria are presented in more detail by [Mic 94]. The presentation here is restricted to an explanation of the two essential failure mechanisms.

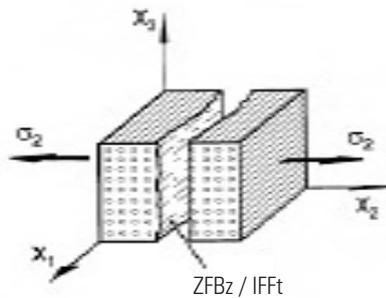
Fibre fracture (FF)

Fibre fracture is understood to be the failure of a ply as a result of tensile or compressive stresses acting along the fibres (σ_1 stress). The fracture face runs transversely to the fibres through the whole ply. When tensile stresses are the cause of failure, the fibres in the ply break as soon as these stresses exceed a maximum value. When compressive stresses are the cause of failure, the fibres in the ply buckle out (micro-buckling). The fibre fracture strength is very high, whereby fibre fracture means the failure of **all** (!) fibres in a ply.

Fibre fracture [MIC °94]

Zwischenfaserbruch (ZFB)

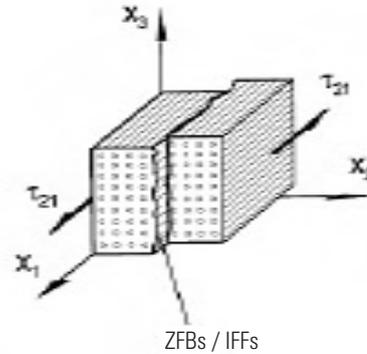
Beim Zwischenfaserbruch versagt die Einzelschicht wobei die Bruchfläche durch die gesamte Einzelschicht in Faserrichtung durch die Matrix oder entlang der Faser / Matrix-Grenzfläche verläuft. Ursache für den Zwischenfaserbruch sind Zugspannungen quer zur Faserrichtung (σ_2 -Spannung) oder Schubspannungen (τ_{21}) die einzeln oder gemeinsam wirken können.



Zwischenfaserbruch (ZFB) durch Zug oder/und Schub, [MIC °94]

Inter-fibre fracture (IFF)

An inter-fibre fracture is the failure of a ply, whereby the fracture face runs through the matrix in the direction of the fibres over the whole ply, or along the interface between the fibres and the matrix. Inter-fibre fracture is caused by tensile stresses acting transversely to the fibres (σ_2 stress) or by shear stresses (τ_{21}) that can act singly or in combination.



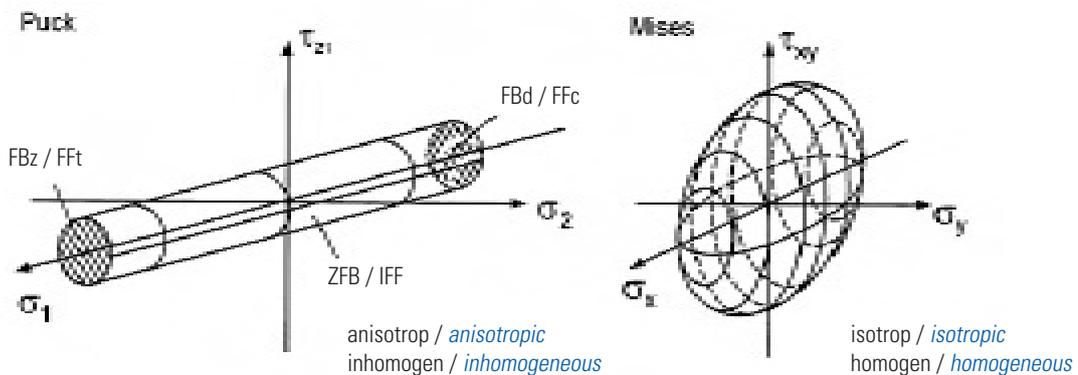
Inter-fibre fracture (IFF) caused by tension and / or shear [MIC °94]

Festigkeitskriterien

Die Festigkeiten allein wirkender σ_1 , σ_2 und τ_{21} Spannungen können für unterschiedliche Einzelschichten experimentell ermittelt werden. Bei mehrachsigen Spannungszuständen führt die Interaktion mehrerer Beanspruchungen zum Versagen. Hier greift man (wie bei isotropen Werkstoffen) auf Versagenshypothesen zurück, die das Versagen der Einzelschicht durch einen mathematischen Zusammenhang zwischen den gemeinsam wirkenden Beanspruchungen beschreiben. Als Bruchkörper visualisiert ist der Festigkeitskörper einer Faserverbund-UD-ES näherungsweise ein langer, dünner Zylinder. Faserbruch (FB) und Zwischenfaserbruch (ZFB) müssen getrennt untersucht werden. Die Zylindermantelfläche steht für die Versagensgrenze gemeinsam wirkender σ_2 und τ_{21} -Spannungen, welche den ZFB verursachen. Die mehr oder weniger kreisrunden Zylinderenden stellen die Grenzfläche für den Faserbruch dar, der aufgrund von Normalspannungen in Faserrichtung (σ_1 -Spannung) auftritt.

Strength criteria

The strengths of various plies against σ_1 , σ_2 and τ_{21} stresses acting singly can be determined in experiments. In the case of multiaxial stress states, the interaction between several applied stresses leads to failure. Just like the procedure for isotropic materials, we have recourse here to failure hypotheses that describe the failure of a ply in the form of a mathematical relationship between the stress effects. The fracture body in our example represents a unidirectional fibre composite ply and is approximately a long, thin cylinder. Fibre fracture (FF) and inter-fibre fracture (IFF) must be investigated separately. The outer cylinder surface marks the failure zone between combined σ_2 and τ_{21} stresses causing the IFF. The more or less circular cylinder ends are the limiting surfaces for the fibre fracture caused by normal stresses acting along the fibres (σ_1 stress).



Qualitative Darstellung eines ES-Bruchkörpers und eines Fließkörpers duktiler Werkstoffe, [MIC °94]

Qualitative depiction of a ply fracture body and a flowing body of ductile materials [MIC °94]

Wanddicken

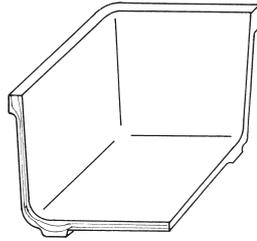
- Die Wanddicke und der Laminataufbau sollten möglichst gleichmäßig sein
- Harzanreicherungen z.B. in Vertiefungen und Kanten führen zu Eigenspannungen, Verzug und Rißbildungen
- Ecken und Kanten müssen mit ausreichenden Radien versehen sein

Ungünstige Bauteilgestaltung

Harzansammlungen in der Kante und der Verdickung des Behälterbodens führen zu Schwindungsriszen.

Unsuitable component design

Resin accumulations in the edge and the thick part of the tank bottom promote shrinkage cracking.



Wall thicknesses

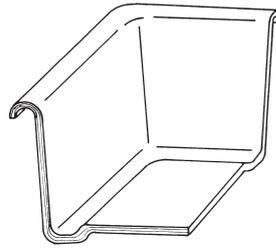
- The wall thickness and the laminate structure should be as uniform as possible
- Resin accumulation, e.g. in indentations and edges, promotes internal stress, warpage, and crack formation
- Corners and edges must be provided with adequate radii

Günstig Bauteilgestaltung

Spannungsrisse werden vermieden, besserer Kraftfluß im Verstärkungsmaterial. Höhere Formsteifigkeit bei geringerem Gewicht.

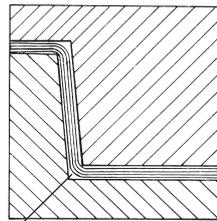
Good component design

Stress cracking is prevented, better flow of forces through the reinforcing material. Greater inherent rigidity with lower weight.

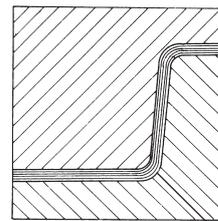


Gestaltung von Ecken und Kanten

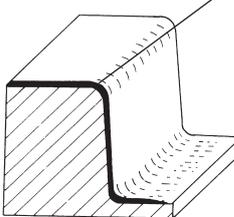
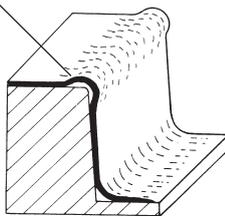
Designing corners and edges



Ungünstig! Zu kleine Radien
Bad! Radii too small



Besser: ausreichende Radien
Better: adequate radii



Entformungsschrägen

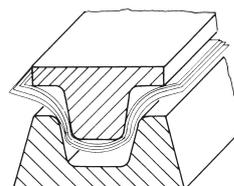
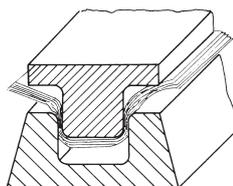
Drafts

Falsch!

Seitenflächen haben keine oder nicht ausreichende Neigungen

Wrong!

The sides are not or only insufficiently inclined

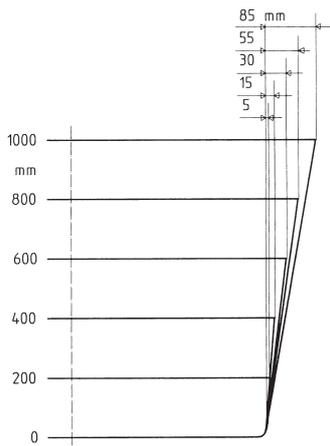


Richtig:

Seitenflächen haben ausreichende Neigungen

Right:

Sides are sufficiently inclined



Richtwerte für die Seitenneigung in Abhängigkeit von der Tiefe des Formteiles.

Recommended values for the side angles as a function of mould depth

Versteifungen

Zur Versteifung von Bauteilen bestehen folgende Möglichkeiten:

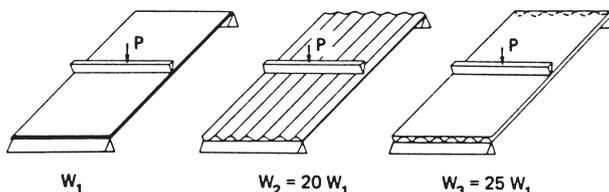
- Bauteilgestaltung mit räumlicher Tragwirkung
- Versteifen durch Sicken oder aufgeklebte bzw. einlamierte Profile
- Sandwichkonstruktionen (erhöhte Wandstärke durch Einlaminiern eines leichten, druckfesten Kernwerkstoffes wie z.B. Aramidwaben, Schäume, Balsaholz etc.)

Stiffeners

Components can be stiffened as follows:

- The component itself is designed as a structure that can withstand loads at any point
- The component is stiffened with beads or sections in the form of glued or laminate inserts
- The component is designed as a sandwich construction (however, inserting a laminate of lightweight, compression-resistant core material such as aramid honeycombs, foam, balsa wood, etc., increases the wall thickness)

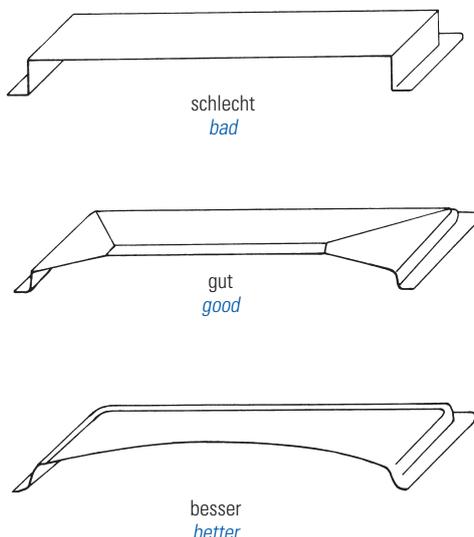
Durch Formgebung verändertes Widerstandsmoment W bei gleichem Querschnitt F



How the design affects the section modulus W for the same cross section F

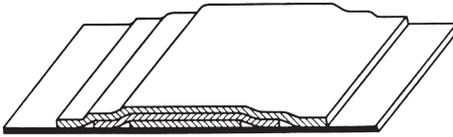
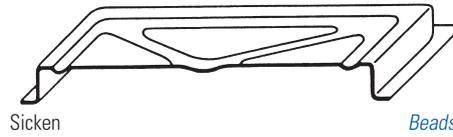
Versteifung durch **Gestalten mit räumlicher Tragwirkung**. Diese Art der Versteifung ist werkstoffgerecht. Das Formteil kann in einem Arbeitsgang gefertigt werden.

The component itself is designed as **a structure that can withstand loads at any point**. This type of stiffening method is suitable for all materials. The moulded part can therefore be manufactured in one working cycle.

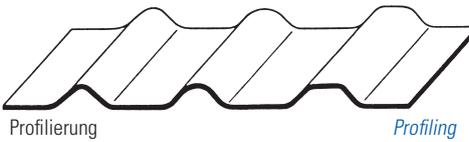


Versteifung durch **Sicken oder aufgeklebte bzw. auflamierte Profile.**
 Ist ein Gestalten mit räumlicher Tragwirkung nicht möglich, so bieten sich die folgenden Versteifungsmöglichkeiten an:

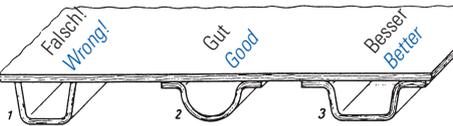
The component is stiffened with **beads or sections in the form of glued or laminate inserts.** If the component cannot be designed as a structure that can withstand loads at any point, one of the following alternative methods can be used instead:



zusätzliche Verstärkungslagen *additional reinforcing plies*



Profilierung *Profiling*

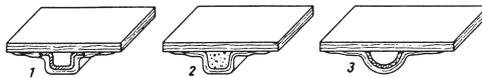


aufgeklebte Profile

- 1) Falsch! Zu kleine Klebefläche, schlechte Verbindung
- 2) Gute Verklebung
- 3) Besser, größeres Widerstandsmoment

Glued sections

- 1) Wrong! Glued surfaces too small, bad join
- 2) Good adhesion
- 3) Better, higher section modulus



auflamierte Profile und verschiedene Werkstoffe als Kerne

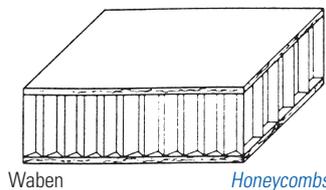
- 1) Aluminium
- 2) Hartschaum oder Holz
- 3) Pappe oder halbiertes Kunststoffschlauch

Laminated sections with various core materials

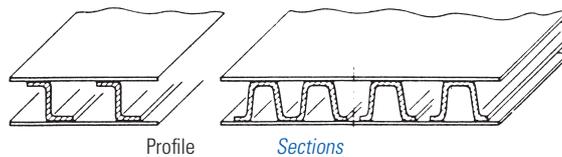
- 1) Aluminium
- 2) Rigid foam or wood
- 3) Cardboard or plastic tube cut down the centre

Versteifen durch **Verbundbauweise (Sandwichkonstruktionen)**
 Die Verbundbauweise stellt die optimale Lösung für flächige Bauteile mit geringem Gewicht und hoher Steifigkeit dar. Als Kernmaterial werden verwendet: Aramid- und Aluminiumwaben, Hartschäume (z.B. aus Polystyrol, PVC, Polyurethan, PMMA), Holzwerkstoffe (z.B. Balsaholz) und Profile aller Art.

The component is designed as a **sandwich construction.** The sandwich construction presents the optimal solution for large-area components with a low weight and high rigidity. Used as the core materials are aramid and aluminium honeycombs, rigid foams (e.g. of polystyrene, PVC, polyurethane, PMMA), wood materials (e.g. balsa), and sections of all kinds.



Waben *Honeycombs*

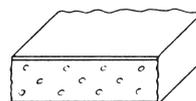


Profile *Sections*

Holz
Wood



Schaumstoff
Foam

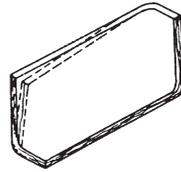


Versteifen von Bauteilkanten

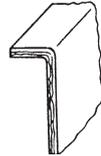
Stiffening the edges of components

Glatte Abschlusskanten sind ungünstig, Wandungen neigen zum Durchbiegen

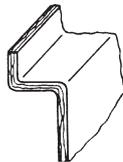
Smooth edges are impractical, the walls tend to bend



gut
good



gut
good



sehr gut
very good



sehr gut
very good

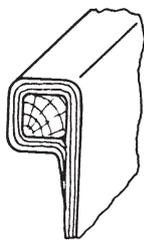


Vollkante, vorzugsweise für Preßmassen, Mattenlaminat bzw. Rovings geeignet

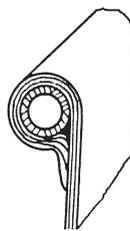
A full square edge, ideal for moulding compounds, mat laminates, and rovings

Einbettungen zur Versteifung von Abschlusskanten.

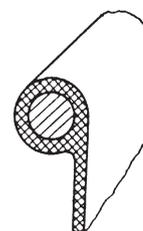
Materials are embedded in the edges to stiffen them.



Holz
Wood



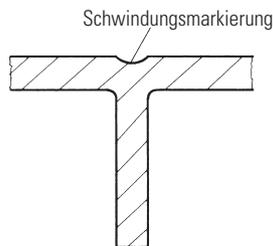
Metallrohr
Metal tube



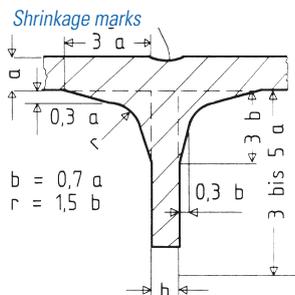
Stabmaterial
Rod

Gestaltung von Rippen

Designing ribs



falsch
wrong



richtig
right

Literatur: VDI-Richtlinie 2012 Gestalten von Werkstücken aus GFK, Beuth-Verlag

Literature: VDI guideline 2012 "Gestalten von Werkstücken aus GFK", Beuth-Verlag

Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, Hanser-Verlag, bei R&G erhältlich unter Bestell-Nr. 380 109-1

"Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe", Hanser-Verlag, available from R&G: order no. 380 109-1

Klebstoffe auf Basis Cyanacrylat (Sekundenkleber) und Epoxydharz besitzen eine ausgezeichnete Haftung auf unterschiedlichen Werkstoffen. Sie werden für die Verklebung von Kunststoffen, Metallen, Holz, Glas, Beton, Keramik u.a. eingesetzt.

Für die **Festigkeit** einer Verklebung sind folgende Klebstoffeigenschaften entscheidend:

- Die Festigkeit des Klebstoffes (Kohäsion = Zusammenhangskraft)
- die Klebkraft/Haftfähigkeit an Oberflächen (Adhäsion)
- the strength of the adhesive (cohesion)
- its adhesiveness to surfaces (adhesion)

Oberflächenvorbereitung

Das Säubern der Klebeflächen dient der Entfernung von anhaftenden festen Schichten wie Schmutz, Rost, Zunder, Farben, Lacken etc. Es wird vorzugsweise auf mechanischem Wege mittels Schleifen und Bürsten durchgeführt. Selbst für gering beanspruchte Klebungen ist das Säubern eine Grundvoraussetzung für die angestrebte Festigkeit einer Klebung, da Fremdschichten von vornherein als Ausgangspunkt für Klebfugenbrüche anzusehen sind.

Passendmachen

Hierunter versteht man das Entfernen von Schnittgraten und -bei größeren Klebeflächen- das Richten der Fügeteile als Voraussetzung für parallele Klebfugen.

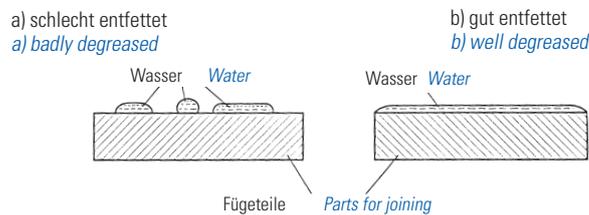
Entfetten

Das Entfetten kann mittels organischer Lösemittel oder heißem (ca. 60 - 80 °C), mit flüssigem Reinigungsmittel (ca. 1 - 3 %) versetztem Wasser erfolgen. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, daß z.B. Spülmittel geringe Anteile an Siliconverbindungen enthalten können, die bei Verbleiben auf der Oberfläche eine Benetzung erschweren.

Die Entfettung ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine einwandfreie Benetzung, daher sollte sie in jedem Fall erfolgen, unabhängig davon, ob eine weitere Oberflächenbehandlung erfolgt oder nicht.

Als **Lösemittel** eignen sich verschiedene Alkohole, Aceton und andere; nur in besonderen Fällen sollten die früher häufig verwendeten chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) wie z.B. Chloroform, Methylenchlorid, Tri, Tetra usw. eingesetzt werden. CKW's sind gesundheitsschädlich und biologisch schwer abbaubar.

Zur Kontrolle der Entfettung kann destilliertes Wasser aufgetropft werden:



Chemische Vorbehandlung

Die vorgenannten Verfahren der Oberflächen-Vorbehandlung (Entfetten und Aufrauhern) reichen in den meisten Fällen aus; sie sind auch verhältnismäßig einfach anzuwenden.

Für höchste Anforderungen ist eine weitergehende chemische Behandlung erforderlich. Die Festigkeitssteigerung beträgt bis zu 20 %. Chemikalienbäder eignen sich wegen ihrer komplizierten Handhabung (Herstellung, Gebrauch, Entsorgung) im Regelfall nicht für eine einzelne Anwendung, sondern nur für die Serie. Der Umgang damit stellt hohe Anforderungen an die Sorgfalt des Verarbeiters und ist nur Fachleuten zu empfehlen.

Cyanoacrylate-based adhesives (super glue) and epoxy resin exhibit superior adhesive properties on various materials and are used for bonding plastics, metals, wood, glass, concrete, ceramics, etc.

*The decisive properties affecting the **strength** of a glued bond are:*

Preparing the surfaces for gluing

The surfaces are cleaned to remove any layers of solid substances such as dirt, rust, scale, paint, varnish, etc., adhering to them. The most common method of cleaning is by mechanical means (grinding and brushing). Layers of foreign matter must be regarded from the outset as an initial cause of glued bond failure, so even for less intensively loaded glued bonds, cleaning the surfaces is an essential measure if the bond is to develop its full design strength.

Priming

What is understood by this term is the removal of burr and, for larger glued surfaces, the parallel alignment of the parts' glued surfaces.

Degreasing

Organic solvents or hot (approx. 60 - 80 °C) water containing 1 - 3% of a liquid cleaning agent can be used to degrease surfaces. At the same time, however, it must be borne in mind that cleaning agents, for example, contain small quantities of silicone compounds which as a residue can prevent the adhesive from wetting the surfaces properly.

Degreasing is one of the most important measures if the adhesive is to wet the surfaces properly. Alone for this reason, the surfaces should always be degreased, irrespective of whether they will be subjected to further surface treatment or not.

*Suitable **solvents** are various alcohols, acetone, and others. Only in special cases should chlorinated hydrocarbons be used, for example chloroform, methylene chloride, TRI, carbon tetrachloride, etc., although these were frequently used substances in the past. Chlorinated hydrocarbons are harmful to health and resistant to biological degradation.*

Drops of distilled water can then be applied to the surfaces as a test of their degreased state:

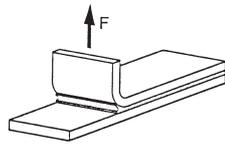
Chemical pretreatment

The methods described above for pretreating the surfaces (degreasing and roughing) are in most cases adequate and are relatively simple to apply.

Yet for the most stringent requirements, further chemical treatment is necessary. The associated increase in strength can be as high as 20 %. Owing to their complex handling (manufacture, use, disposal), chemical baths are not as a rule suitable for a single application, but for series production only. Handling therefore places great demands on the care of the processor and is recommended for specialists only.

Gestaltung von Klebungen

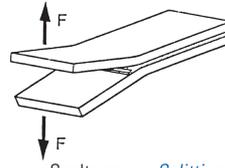
Klebung müssen so gestaltet sein, daß die angreifenden Kräfte nicht zu einem Schälen oder Spalten in der Klebschicht führen können:



Schälung *Peeling*

Designing glued bonds

Glued bonds must be designed so that the forces applied to them cannot cause peeling or splitting in the adhesive layer:



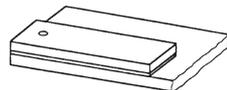
Spaltung *Splitting*

Konstruktive Möglichkeiten zur Vermeidung der Schälbeanspruchung

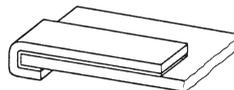
Examples of designs for counteracting peeling forces



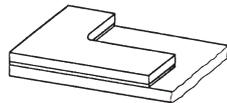
Mechanisches Verstärken eines Fügebauteils durch:
Mechanical reinforcement of bond through



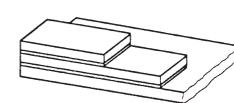
Zusätzliches Nieten / Schrauben
Auxiliary rivet / screws



Umfalzen
Folding



Flächenvergrößerung
Increased area

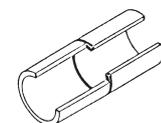
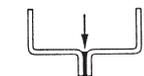
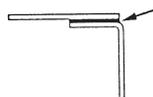


Steifigkeitserhöhung
Increased rigidity

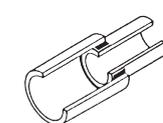
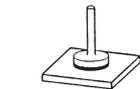
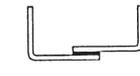
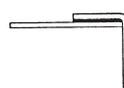
Beispiele für ungünstige und günstige klebetechnische Gestaltungen

Examples of designs promoting and impairing adhesive strength

Ungünstige Gestaltung
Impairing design



Günstige Gestaltung
Promoting design



*** Sicherheitshinweis: Achten Sie beim Herstellen von Säurebädern darauf, daß stets die Säure unter ständigem Rühren in das Wasser gemischt wird und nicht umgekehrt, da sonst heftige Reaktionen erfolgen können. Tragen Sie stets Schutzbrille, Schutzhandschuhe und Arbeitskleidung! Eine Augendusche muß bereitgestellt werden.**

ABS

Anschleifen und entfetten mit Methanol oder 5 - 20 Minuten ätzen* in einem warmen Bad aus:

- 1,0 l konzentrierter Schwefelsäure
- 14 g Kaliumbichromat
- 350 g Wasser

Anschließend spülen mit kaltem und warmem Wasser, trocknen.

Aluminium

und Aluminium-Legierungen:

Anschleifen/sandstrahlen, anschließend entfetten oder 30 Minuten ätzen* in einem 60 °C warmen Bad aus:

- 1,0 l konzentrierter Schwefelsäure
- 0,5 kg Natriumdichromat
- 5,5 l Wasser

Anschließend mit Wasser abspülen und mit Warmluft trocknen. Verklebung sofort ausführen.

Beton

Sämtliche losen Teile an der Oberfläche, also Schmutz oder Zementschlamm, müssen abgebürstet werden. Der Staub wird am besten abgesaugt. Außer durch Schleifen wird die Oberfläche hauptsächlich durch Stahlkugel-Strahlen, Feuchtstrahlen, Wasserhochdruckstrahlen und Flammstrahlen vorbereitet.

Die früher gebräuchlichen chemischen Vorbehandlungen, meist das Ätzen mit Säuren, haben sich als äußerst problematisch erwiesen, denn es ist nicht auszuschließen, daß Säurereste im Beton verbleiben und zu Schäden führen.

Blei

Aufrauen mit Schleifpapier oder feiner Stahlwolle; mit Aceton entfetten, bis ein weißer Lappen sauber bleibt.

Chrom

und verchromte Teile:

Aufrauen mit Schleifpapier oder durch Feinsandstrahlen.

Chemisch erfolgt die Vorbehandlung durch Ätzen* in einem Bad aus:

- 1,0 l konzentrierter Salzsäure
- 1,2 l Wasser

Die Fügeteile werden 1 - 5 Minuten in das 90 °C warme Bad getaucht, dann mit kaltem und anschließend mit warmem Wasser gespült und getrocknet.

Edelmetalle

(Platin, Gold, Silber)

Entfetten und ggf. mit feinem Schleifpapier aufrauen.

Edelsteine/ Halbedelsteine

Entfetten

Faserverbundwerkstoffe

GFK/CFK/AFK mit duroplastischer Matrix aus Epoxyd-, Polyester-, Vinylester- und Polybismaleinimidharz. Hier genügt ein Aufrauen mit Schleifpapier sowie gründliches Entfetten mit Aceton und Beseitigen eventueller Trennmittelreste.

Gips

Mit Schleifpapier aufrauen, Schleifstaub entfernen; Gips muß trocken sein!

*** NOTE ON SAFETY When preparing acid baths, make sure that at all times the acid is constantly mixed into the water and not vice versa, otherwise violent reactions can occur. Always wear goggles, protective gloves, and working clothes. An eyebath must be provided.**

ABS

Grind and degrease the surfaces with methanol, or etch them for five to twenty minutes in a hot bath of*

- 1.0 l concentrated sulphuric acid
- 14 g potassium bichromate
- 350 g water

Finally rinse with cold and hot water and then dry.

Aluminium

and aluminium alloys:

Grind or sandblast, then degrease the surfaces or etch them for thirty minutes in a 60 °C bath of:*

- 1.0 l concentrated sulphuric acid
- 0.5 kg sodium dichromate
- 5.5 l water

Finally rinse with water, and dry with hot air. Immediately join the surfaces.

Concrete

All loose matter on the surface such as soiling or laitance must be brushed off. Dust is best removed with a vacuum cleaner. Besides grinding, the predominant measures for preparing the surface are shot peening, wet sandblasting, high-pressure hydroblasting, and flame blasting.

The chemical pretreatment methods used earlier, in most cases etching with acids, have proved extremely problematic: acid residue that is not washed out of the concrete causes damage.

Lead

Roughen the surfaces with abrasive paper or fine steel wool, and degrease them with acetone until a white cloth remains unstained.

Chromium

and chromium-plated parts:

Roughen the surfaces with abrasive paper, or blast them with fine sand. Chemical pretreatment involves etching in a bath of:*

- 1.0 l concentrated hydrochloric acid
- 1.2 l water

The parts to be joined are immersed for one to five minutes in a 90 °C bath, rinsed with cold and then hot water, and dried.

Precious metals

(platinum, gold, silver)

Degrease and, if necessary, roughen the surfaces with fine abrasive paper.

Precious / semi-precious stones

Degrease

Fibre composites

GRP / CRP / ARP with a thermosetting matrix of epoxy, polyester, vinyl ester, and poly-bis-maleinimide resin. It proves sufficient to roughen the surfaces with abrasive paper, degrease them thoroughly with acetone, and remove any residue of release agents.

Plaster

Roughen the surfaces with abrasive paper, and remove the grinding dust. The plaster must be dry.

Glas/Quarz

Entfetten mit Aceton und mit feinem Schleifpapier mattschleifen oder chemische Vorbehandlung durch Ätzen* (15 - 20 Minuten) in einer Lösung aus:

- 1,0 kg Chromtrioxid
- 5,0 l destilliertes Wasser

Anschließend mit dest. Wasser waschen und bei einer Temperatur von 80 °C trocknen.

Graphit/Kohlenstoff

Aufrauen und entfetten mit Aceton; Lösemittel vor dem Klebstoffauftrag ablüften lassen.

Holz

Bei einer Holzfeuchtigkeit bis 10 % bedarf es keiner Vorbehandlung. Feuchteres Holz kann nicht verklebt werden.

Kautschuk

(Natur-Kautschuk)

Gründliches Aufrauen und Entfetten oder Klebeflächen ca. 2 - 10 Minuten mit konzentrierter Schwefelsäure* behandeln und anschließend mit kaltem und warmem Wasser abspülen.

Kautschuk

(Synthese-Kautschuk)

Vorbehandlung mit konzentrierter Schwefelsäure* wie beim Naturkautschuk (bis zu 20 Minuten). Sehr glatte Oberflächen müssen vor der Säurebehandlung aufgeraut werden. Sowohl bei Synthese- als auch bei Naturkautschuk erkennt man eine ausreichende Vorbehandlung daran, daß beim Umbiegen des Gummis feine Haarrisse sichtbar werden.

Keramik

Aufrauen mit Schleifpapier (Siliciumcarbid) oder Feinsandstrahlen.

Kupfer

und Kupfer-Legierungen:

Aufrauen mit Schleifpapier und entfetten oder chemische Vorbehandlung (1 - 2 Minuten bei Raumtemperatur) in einem Bad aus:

- 1,0 l Eisen-III-chlorid (42 %ige Lösung)
- 2,0 l konzentrierte Salpetersäure
- 13,0 l Wasser

Wie bei allen Ätzbädern*, muß auch hier zunächst mit kaltem und dann mit warmem Wasser gespült werden.

Leder

Aufrauen und entfetten.

Magnesium

und Magnesium-Legierungen:

Aufrauen mit Schleifpapier und entfetten, Klebstoff sofort auftragen, da sonst die Oberfläche wieder oxidiert oder chemische Vorbehandlung (ca. 5 Minuten) in einer 75 °C warmen Lösung* aus:

- 1,0 kg Natriumhydroxid
- 8,0 l Wasser

anschließend wird mit kaltem Wasser gespült und in folgender Lösung geätzt*:

- 1,0 kg Chromsäure
- 10,0 l Wasser
- 6 g Natriumsulfat

Anschließend erfolgt eine Spülung mit kaltem und warmem Wasser sowie die Trocknung. Klebstoff sofort auftragen.

Glass / quartz

Degrease the surfaces with acetone, and dull them with fine abrasive paper. Alternatively, chemical pretreatment for fifteen to twenty minutes in an etching bath solution of*

- 1.0 kg chromium trioxide
- 5.0 l distilled water

Finally the surfaces are washed with distilled water and dried at a temperature of 80 °C.

Graphite / carbon

Roughen and degrease the surfaces with acetone. Before applying the adhesive, allow any air trapped in the solvent to escape.

Wood

No pretreatment is required when the wood moisture content does not exceed 10%. Wood with a higher moisture content cannot be bonded.

Rubber

(natural rubber)

The surfaces must be roughened thoroughly and degreased or treated for about two to ten minutes with concentrated sulphuric acid before being rinsed with cold and hot water.*

Rubber

(synthetic rubber)

Like natural rubber, the surfaces are pretreated with concentrated sulphuric acid for up to twenty minutes. Very smooth surfaces must be roughened before this acid treatment. One reliable indication of adequate pretreatment on both synthetic and natural rubbers is hairline cracks when the rubber is flexed.

Ceramic

Roughen the surfaces with abrasive paper (silicon carbide), or blast them with fine sand.

Copper

and copper alloys:

Roughen the surfaces with abrasive paper and degrease them. Alternatively, chemical pretreatment for one to two minutes at room temperature in a bath of

- 1.0 l iron trichloride (42 % solution)
- 2.0 l concentrated nitric acid
- 13.0 l water

As with all etching baths, the part must first be rinsed with cold and then hot water.*

Leather

Roughen and degrease the surfaces.

Magnesium

and magnesium alloys:

Roughen the surfaces with abrasive paper, and degrease them. The adhesive must be applied immediately, otherwise the surface will again oxidise. Alternatively, chemical pretreatment for about five minutes in a 75 °C solution of*

- 1.0 kg sodium hydroxide
- 8.0 l water

The surfaces are then rinsed with cold water and etched in the following solution:*

- 1.0 kg chromic acid
- 10.0 l water
- 6 g sodium sulphate

Finally the surfaces are rinsed with cold and hot water and dried. The adhesive must be applied immediately afterwards.

Messing

Anschleifen und entfetten.

Nickel

Anschleifen und entfetten oder ca. 5 Sekunden mit konzentrierter Schwefelsäure* behandeln, mit klarem kaltem und warmem Wasser spülen und trocknen.

Nylon/Polyamide

Anschleifen/feinsandstrahlen und entfetten mit Aceton.

Polyester-Formstoffe

Aufrauen mit Schleifpapier und entfetten mit Aceton.

Polyethylen/Polypropylen

Die Verklebung dieser thermoplastischen Kunststoffe ist sehr schwierig. In keinem Falle werden die Festigkeiten von Metallverklebungen erreicht. Zunächst werden die Teile mit Aceton entfettet und in einem Bad nach folgender Rezeptur geätzt*:

- 1,0 kg konzentrierte Schwefelsäure
- 80 g Kaliumbichromat
- 50 g Wasser

PE und PP wird bei einer Badtemperatur von 70 °C ca. 2 Minuten behandelt, anschließend mit Wasser gespült und getrocknet. Neben der chemischen ist auch eine thermische Vorbehandlung möglich. Dazu wird die Oberfläche mit einer nicht leuchtenden Gasflamme kurzzeitig leicht abgeflammt, bis sie blank erscheint. Das Schmelzen des Kunststoffes ist zu vermeiden.

Polystyrol-Schaumstoffe

Schmutz abschleifen, Schleifstaub absaugen.
Saubere Oberflächen benötigen keine Vorbehandlung.

Polyurethan-Schaumstoffe

Schmutz abschleifen, Schleifstaub absaugen.
Saubere Oberflächen benötigen keine Vorbehandlung.

Magnesium

und Magnesium-Legierungen:
Aufrauen mit Schleifpapier und entfetten. Klebstoff sofort auftragen, da sonst die Oberfläche wieder oxidiert oder chemische Vorbehandlung (ca. 5 Minuten) in einer 75 °C warmen Lösung* aus:

- 1,0 kg Natriumhydroxid
- 8,0 l Wasser

anschließend wird mit kaltem Wasser gespült und in folgender Lösung geätzt*:

- 1,0 kg Chromsäure
- 10,0 l Wasser
- 6 g Natriumsulfat

Anschließend erfolgt eine Spülung mit kaltem und warmem Wasser sowie die Trocknung. Klebstoff sofort auftragen.

PTFE

(wie z.B. Teflon®)

Die Verklebung ist sehr schwierig. Zunächst wird ein Tränkbad nach folgender Rezeptur hergestellt:

In 1 l Tetrahydrofuran werden 130 g Naphtalin gelöst. Anschließend gibt man 23 g in kleine Würfel geschnittenes metallisches Natrium bei. Nach 2 Stunden ist die Lösung gebrauchsfertig. Die Lagerstabilität beträgt ca. 2 Monate. Die Fügeile werden mit Aceton entfettet und dann 15 Minuten in das Natrium-Naphtalin-Bad getaucht. Danach wird gründlich mit Aceton gewaschen und mit Wasser gespült. Durch die Behandlung verändert sich die Oberfläche des PTFE und verfärbt sich schwarz-braun.

Brass

Grind and degrease the surfaces.

Nickel

Grind and degrease the surfaces, or treat them for approx. five seconds with concentrated sulphuric acid*. The surfaces are then rinsed under clear hot and cold water and dried.

Nylon / polyamides

Grind, fine-sandblast, and degrease the surfaces with acetone.

Moulded polyester material

Roughen the surfaces with abrasive paper, and degrease them with acetone.

Polyethylene/polypropylene

These thermoplastics are bonded only with great difficulty. In no event are the strengths of metal bonds obtained. The parts are first degreased with acetone and etched* in a bath with the following constituents.

- 1.0 kg concentrated sulphuric acid
- 80 g potassium bichromate
- 50 g water

PE and PP are treated in a 70 °C bath for about two minutes, then rinsed with water and dried. Pretreatment is not restricted to chemical processes, heat can also be used. In this case, the surface is briefly held in a non-luminous gas flame until it appears polished. The plastic should not be allowed to melt.

Polystyrene foams

Grind off soiling, suction off grinding dust.
Clean surfaces do not have to be pretreated.

Polyurethane foams

Grind off soiling, suction off grinding dust.
Clean surfaces do not have to be pretreated.

Magnesium

and magnesium alloys:
Roughen the surfaces with abrasive paper, and degrease them. The adhesive must be applied immediately, otherwise the surface will again oxidise. Alternatively, chemical pretreatment for about five minutes in a 75 °C solution* of

- 1.0 kg sodium hydroxide
- 8.0 l water

The surfaces are then rinsed with cold water and etched* in the following solution:

- 1.0 kg chromic acid
- 10.0 l water
- 6 g sodium sulphate

Finally the surfaces are rinsed with cold and hot water and dried. The adhesive must be applied immediately afterwards.

PTFE

(for example Teflon®)

PTFE is bonded only with great difficulty. First of all, an impregnating bath is prepared with the following constituents.

First, 130 g of naphthalene are dissolved in one litre of tetrahydrofuran. Now 23 g of finely diced sodium metal are added. After two hours the solution is ready for use. The shelf life is about two months. The parts to be joined are degreased with acetone and then immersed for fifteen minutes in the sodium-naphthalene bath. Afterwards, the parts are washed thoroughly with acetone and rinsed with water. This treatment causes the surface of PTFE to turn a blackish brown colour.



PVC (hart)

Anschleifen und entfetten mit Methanol.

PVC-Schaumstoffe

Eventuell vorhandene Trennmittelreste durch Abschleifen entfernen. Schleifstaub absaugen oder abkehren.

Silikonkautschuk-Abformmasse

Entfetten mit Aceton und verkleben mit Methyl- oder Ethyl-Cyanacrylaten (R&G Sekundenkleber).

Stahl

Aufrauen und entfetten mit Aceton oder Behandlung in einem Ätzbath* aus:

- 1,0 l Phosphorsäure (ca. 90 %ig)
- 0,5 l Methylalkohol

Die Teile werden ca. 10 Minuten in das 60° C warme Bad getaucht. Der entstehende schwarze Belag wird unter fließendem kaltem Wasser abgebürstet.

Stahl (rostfrei, Chromstahl, Chromnickelstahl etc.)

Anschleifen/feinsandstrahlen und entfetten mit Aceton oder 10 Minuten ätzen* in einem 80° C warmen Bad aus:

- 1,0 kg Oxal-Säure
- 0,87 kg konzentrierter Schwefelsäure
- 5,0 l Wasser

Anschließend wird die Oberfläche unter fließendem Wasser von dem entstandenen schwarzen Belag befreit und getrocknet. Verklebung unmittelbar nach der Vorbehandlung.

Stahl (verzinkt)

Aufrauen und entfetten mit Aceton oder 2 - 4 Minuten ätzen* in einem Bad aus:

- 1,0 Liter konzentrierter Salzsäure
- 5,7 Liter Wasser

Anschließend spülen in warmem und kaltem Wasser, trocknen.

Titan

Anschleifen und entfetten mit Aceton.

Wolfram

Anschleifen und entfetten mit Aceton oder ätzen* in einer Lösung aus:

- 10 g Flußsäure
- 60 g konzentrierte Salpetersäure
- 100 g konzentrierte Schwefelsäure
- 30 g Wasser

Anschließend spülen und trocknen.

Zink

und Zink-Legierungen:

Hier empfiehlt sich neben dem Anschleifen eine chemische Behandlung durch Eintauchen der Teile in eine Lösung* aus:

- 1,0 l konzentrierter Salzsäure
- 5,7 l Wasser

Anschließend abspülen und trocknen.

PVC (hard)

Grind and degrease the surface with methanol.

PVC foams

Grind off the surface to remove any residue of release agents. Brush or suction off grinding dust.

Silicone rubber moulding compound

Degrease the surfaces with acetone before joining them with methyl or ethyl cyanoacrylate (R&G superglues).

Steel

Roughen and degrease the surfaces with acetone or treat them in an etching bath* of

- 1.0 l phosphoric acid (approx. 90 %)
- 0.5 l methyl alcohol

The parts are immersed in the 60 °C bath for about ten minutes. Black smut is brushed off under running cold water.

Steel (stainless, chromium steel, chromium nickel steel, etc.)

Grind or fine-sandblast and degrease the surfaces with acetone, or etch* them for ten minutes in an 80 °C bath of

- 1.0 kg oxalic acid
- 0.87 kg concentrated sulphuric acid
- 5.0 l water

Finally the surface is held under running water, brushed clean of black smut, and dried.

The surfaces are joined immediately after the pretreatment.

Steel (galvanised)

Roughen and degrease the surfaces with acetone, or etch* them for two to four minutes in a bath of:

- 1.0 l concentrated hydrochloric acid
- 5.7 l water

The surfaces are finally rinsed in hot and cold water and dried.

Titanium

Grind and degrease the surfaces with acetone.

Tungsten

Grind and degrease the surfaces with acetone, or etch* them in a solution of

- 10 g hydrofluoric acid
- 60 g concentrated nitric acid
- 100 g concentrated sulphuric acid
- 30 g water

Finally rinse and dry.

Zinc

and zinc alloys:

We recommend in addition to grinding the surfaces a chemical treatment, whereby the parts are immersed in a solution* of

- 1.0 l concentrated hydrochloric acid
- 5.7 l water

Finally rinse and dry.

GEBRÄUCHLICHE FERTIGUNGSVERFAHREN

CUSTOMARY MANUFACTURING METHODS

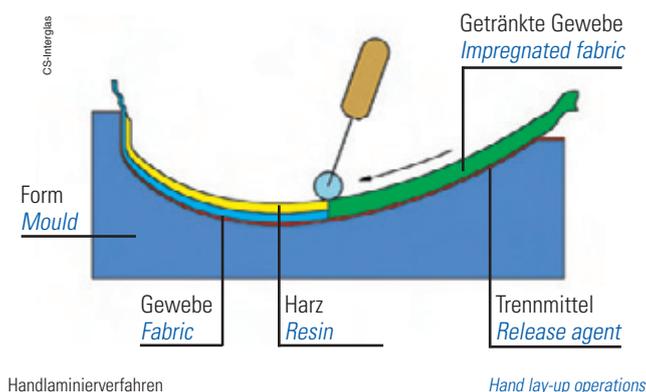
		Handlaminieren <i>Hand lay-up</i>	Wickeln <i>Winding</i>	Faserspritzen <i>Spray lay-up</i>	Strangziehen <i>Pultrusion</i>	Vakuumpressen <i>Vacuum press moulding</i>
Investitionskosten <i>Capital costs</i>		gering <i>low</i>	hoch <i>high</i>	mittel <i>medium</i>	hoch <i>high</i>	mittel <i>medium</i>
Lohnkosten <i>Labour costs</i>		sehr hoch <i>very high</i>	gering <i>low</i>	hoch <i>high</i>	gering <i>low</i>	hoch <i>high</i>
Stückzahlen¹⁾ <i>Piece numbers¹⁾</i>		klein bis mittel <i>small to medium</i>	mittel <i>medium</i>	mittel <i>medium</i>	hoch <i>high</i>	klein bis mittel <i>small to medium</i>
Bauteilgröße <i>Component size</i>		jede Größe <i>any size</i>	jede Größe <i>any size</i>	jede Größe/ <i>any size</i> < 1m ² unüblich/ <i>unusual</i>	endlos <i>continuous</i>	bis 10 m ² üblich <i>up to 10 m² usual</i>
Hinterschnidungen <i>Undercuts</i>		geteilte Formen <i>split moulds</i>	nicht möglich <i>not possible</i>	geteilte Formen <i>split moulds</i>	in Ziehrichtung <i>in pulling direction</i>	geteilte Formen <i>split moulds</i>
Mindestradien <i>Minimum radii</i>		ca. 1 mm <i>approx. 1 mm</i>	ca. 10 mm <i>approx. 10 mm</i>	ca. 5 mm <i>approx. 5 mm</i>	keine <i>none</i>	ca. 0,5 <i>approx. 0.5 mm</i>
übliche Wanddicken <i>Usual wall thickness</i>		0,1 - 10 mm <i>0,1 - 10 mm</i>	1 - 10 mm <i>1 - 10 mm</i>	2 - 10 mm <i>2 - 10 mm</i>	0,5 - 20 mm <i>0,5 - 10 mm</i>	0,1 - 5 mm <i>0,1 - 5 mm</i>
Wanddickensprünge <i>Sectional transitions</i>		möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>	praktisch unmöglich <i>practically impossible</i>	möglich <i>possible</i>
Faser-Volumenanteil <i>Fibre volume fraction</i>		bis 50% <i>max 50%</i>	bis 70% <i>max 70%</i>	bis 20% <i>max 20%</i>	bis 80% <i>max 80%</i>	> 80% <i>> 80%</i>
Faserorientierung <i>Fibre orientation</i>		möglich <i>possible</i>	möglich bis ca ±30° <i>possible up to approx. ±30°</i>	nicht möglich <i>not possible</i>	Bänder/ <i>Tapes</i> 0/90° Rovings in Zugrichtung <i>Rovings in pulling direction</i>	möglich <i>possible</i>
Luftporengehalt <i>Air voids content</i>		1 - 3% <i>1 - 3%</i>	0,5 - 2% <i>0,5 - 2%</i>	2 - 3% <i>2 - 3%</i>	2 - 3% <i>2 - 3%</i>	0 - 2% <i>0 - 2%</i>
Deckschicht <i>Overlay</i>		einseitig üblich <i>usual on one side</i>	unüblich <i>unusual</i>	einseitig üblich <i>usual on one side</i>	nicht möglich <i>not possible</i>	einseitig üblich <i>usual on one side</i>
Oberfläche <i>Surface treatment</i>		einseitig glatt <i>smooth on one side</i>	unüblich <i>unusual</i>	einseitig glatt <i>smooth on one side</i>	nicht möglich <i>not possible</i>	einseitig glatt <i>smooth on one side</i>
Durchbrüche <i>Apertures</i>		möglich <i>possible</i>	unüblich <i>unusual</i>	möglich <i>possible</i>	nicht möglich <i>not possible</i>	möglich <i>possible</i>
Einlegeteile (z.B. Stützstoffe) <i>Inserts (e.g. support materials)</i>		möglich <i>possible</i>	bedingt möglich <i>possible with restrictions</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>
Sicken <i>Beads</i>		möglich <i>possible</i>	bedingt möglich <i>possible with restrictions</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>
Rippen <i>Ribs</i>		möglich <i>possible</i>	nicht möglich <i>not possible</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>	möglich <i>possible</i>
Nachbearbeitung²⁾ <i>Finishing²⁾</i>		besäumen <i>trimming</i>	trennen <i>parting</i>	besäumen <i>trimming</i>	trennen <i>parting</i>	besäumen <i>trimming</i>

¹⁾ **klein** = Prototypen und Einzelstücke, **mittel** = einige hundert bis tausend Teile, **groß** = >1000 Teile
small = prototypes and single pieces; **medium** = several hundred to a thousand pieces; **large** = over 1000 pieces

²⁾ **Besäumen** = Abschneiden des Randes z.B. mittels Stichsäge, Trennscheibe, Laser oder Hochdruck-Wasserstrahl. **Trennen** = Ablängen, Kapfen mittels Säge.
Trimming = the edges are removed, e.g. with a compass saw, cutting-off wheel, laser, or high-pressure water jet; **parting** = cutting off or to length with a saw

HANDLAMINIEREN

Das Handlaminiere ist das älteste, einfachste und am weitesten verbreitete Verfahren. Es genügen minimale technische Voraussetzungen, weshalb es hauptsächlich für kleinere Serien, einfachere Bauteilgeometrien und für den Formenbau angewandt wird. Typische Bauteile sind Segelflugzeuge, Flugmodelle, Boote, Behälter und Prototypen aller Art. Die Formen dazu werden ebenfalls handlaminiert. Bei Verwendung von Formenharzen lassen sich hohe Oberflächengüten erreichen. Die Aushärtung erfolgt fast immer drucklos bei Raumtemperatur. Erhöhte Temperaturen bei der Aushärtung sind nur dann erforderlich, wenn Formen und Bauteile später einer höheren Wärmebelastung ausgesetzt sind (> ca. 60 °C).



Arbeitsschritte

1. Auftragen eines **Trennmittels** auf die Formoberfläche.
2. Einstreichen- oder spritzen einer **Deckschicht** auf Epoxyd- oder Polyesterbasis (z.B. UP-Vorgelat).
3. Nach dem Angelieren der Deckschicht (wird auch als Feinschicht oder Gelcoat bezeichnet) werden die nachfolgenden Gewebelagen schichtweise naß-in-naß aufgebracht.

Deckschichten aus UP-Vorgelat werden über Nacht durchgehärtet, bevor mit Epoxydharz weiterlaminiert wird.

Zum **Laminieren** wird zunächst eine Harzschicht aufgetragen. Danach werden die Gewebeverstärkungen eingelegt und sorgfältig mit Harz durchtränkt. Als Werkzeuge dienen vor allem Pinsel und Rillenroller/Velourwalzen.

4. Den **Abschluß** bildet oft ein Abreißgewebe. Das aus Nylonfasern bestehende Gewebe läßt sich nach dem Aushärten des Harzes abschälen („abreißen“) und erzeugt dabei eine definiert raue, saubere und klebfreie Oberfläche zur weiteren Verarbeitung (z.B. zum Verkleben).

5. Die **Aushärtung** der Lamine erfolgt meist drucklos bei Raumtemperatur. Lediglich bei optimierten Leichtbauteilen, vor allem Sandwichbauteilen mit einem leichten Kern aus Schaum oder Waben, wird im Vakuum unter Druck gehärtet.

Bestimmte Harzsysteme, vor allem Harze für den Flugzeugbau, benötigen zur optimalen Durchhärtung höhere Temperaturen. Die Bauteile werden entweder in der Form oder nach dem Entformen zusätzlich getempert. Die hierfür erforderlichen Temperaturen liegen, je nach Harzsystem, meist bei 50 - 230 °C.

6. Nach der vollständigen Durchhärtung der Teile erfolgt die weitere **Bearbeitung**, z.B. durch Besäumen, Schleifen, Kleben.

HAND LAY-UP

The hand lay-up is the oldest, simplest, and most common method. Only minimum technical requirements need to be fulfilled, which is why it is primarily applied on minor series, less complex component geometries, and mould construction. Typical components are gliders, model aircraft, boats, vessels, and prototypes of all kinds. The moulds to manufacture these are also laid up by hand. Good surface qualities can be obtained when mould resins are used. The mould is almost always cured without the application of pressure at room temperature. Higher temperatures for curing are required only when the moulds and components are subjected to a more intensive heat load (> approx. 60 °C) at a later point.

Procedure

1. A **release agent** is applied to the mould surface.
2. An epoxy- or polyester-based **overlay** (e.g. UP pre-gel) is spread or sprayed on this agent.
3. As soon as the overly starts to gel to form the so-called gel coat, the following fabric layers are applied on top of each other “wet-in-wet”.

Overlays of UP pre-gel are cured thoroughly overnight before further laminating operations are continued with epoxy resin.

Laminating first involves the application of a resin layer. Afterwards, the fabric reinforcements are immersed and carefully impregnated with resin. The most commonly used tools are brushes and grooved or non-woven rollers.

4. The **edge** is often formed by a tear-off fabric. This fabric of nylon fibres can be peeled off (hence the name) after the resin has cured, creating in the process a clean and adhesive-free surface of predefined roughness for further processing (e.g. for glued bonds).

5. The laminates are **cured** in most cases without the application of pressure at room temperature. Only optimised lightweight components, above all sandwich components with a lightweight core of foam or honeycombs, are cured under pressure in a vacuum.

Particular resin systems, and especially resins for aircraft construction, require higher temperatures for optimal curing. In addition, the components are annealed either when still in the mould or after they have been demoulded. Depending on the resin system, the required temperatures in most cases lie between 50 and 230 °C.

6. Once the parts have completely cured, they are then subjected to further **mechanical processing**, e.g. trimming, grinding, gluing.

Geeignete Materialien

Als Matrix (Bettungsmasse) werden flüssige Harze verarbeitet, vor allem Epoxyd- und Polyesterharze.

Zur Verstärkung eignen sich die speziell für diesen Zweck hergestellten und oberflächenbehandelten Glas-, Aramid- und Kohlefasern. Diese werden in einer Vielzahl geeigneter textiler Produkte angeboten. Die wichtigsten sind Rovings, Gewebe, Gelege, Bänder, Schläuche, Litzen, Vliese, Matten und Schnitzel.

Erreichbarer Faservolumengehalt:

- Bei Mattenlaminaten ca. 15 - 20 Vol.-%
- Bei Geweben ca. 40 - 50 Vol.-%

Klimatisierung des Arbeitsraumes:

- Min. 20 °C Raumtemperatur
- Luftfeuchtigkeit um 60 %
- Gute Be- und Entlüftung

Merkmale des Handlaminierverfahrens:

- Geringer Werkzeugaufwand
- Geringe Investitionskosten
- Für kleinere und mittlere Serien bis ca. 1000 Stück gut geeignet
- Lohnintensiv, da überwiegend Handarbeit

Suitable materials

Liquid resins, above all epoxy and polyester resins, are used for the matrix. Suitable materials for the reinforcements are surface-treated glass, aramid, and carbon fibres manufactured specifically for this purpose. These are offered in a great number of suitable textile products. The most important are rovings, fabrics, inlays, tapes, tubes, strands, non-wovens, mats, and chopped fibres.

Obtainable fibre volume content:

- With mat laminates approx. 15 - 20 %vol
- With fabrics approx. 40 - 50 %vol

Ambient conditions:

- Min. 20 °C room temperature
- Air humidity about 60 %
- Good ventilation

Features of hand lay-up operations:

- Low mould costs
- Low capital costs
- Ideal for smaller and medium-size series up to about 1000 pieces
- Wage-intensive owing to high labour content

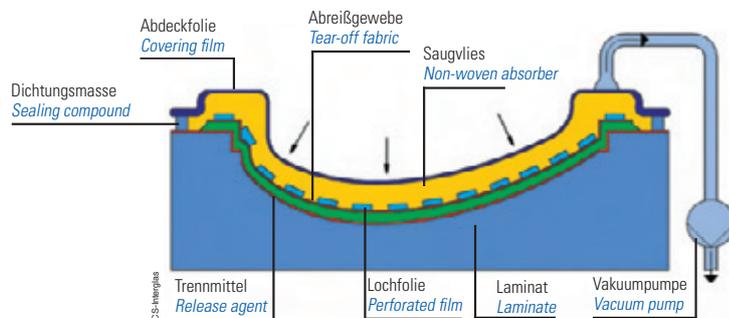


Handlaminieren von Glas-, Aramid- und Kohlenstoff-Filamentgeweben im Flugzeugbau

Hand lay-up of glass, aramid, and carbon filament fabrics in aircraft construction

VAKUUMPRESSEN

Beim Vakuumpressen wird das zuvor handlamierte Bauteil mit der Form in einen Foliensack geschoben (nur bei kleinen Teilen möglich) oder mit einer Folie abgedeckt, die am Formenrand luftdicht aufgeklebt wird. Durch Absaugen der Luft presst sich die Folie auf das Laminat und drückt es gegen die Form. Der max. erreichbare Druck ist der Umgebungs-Luftdruck und beträgt ca. 1 bar. Die P3-Pumpe von R&G beispielweise erzeugt ein Vakuum von ca. 0,9 bar, dies entspricht einem Preßdruck von 9 t/m²!



Handlaminierverfahren mit Vakuumhärtung Hand lay-up operations with vacuum curing

Das Vakuumpressen wird vor allem angewandt um:

- Den Faseranteil des Laminates zu erhöhen, also um überschüssiges Harz herauszudrücken.
- Leichte Stützstoffe wie z.B. Schaumkunststoffe oder Waben mit hochfesten Deckschichten aus Harz und Gewebe zu verkleben und so ein extrem leichtes und steifes Bauteil herzustellen.

Um diese Ergebnisse zu erzielen, muß das Bauteil mit gleichmäßigem Druck gepreßt werden. Dazu wird das Laminat zunächst mit Abreißgewebe und einer nichthaftenden Lochfolie abgedeckt. Darauf wird ein luftdurchlässiges Vlies gelegt, das die Aufgabe hat, das Vakuum gleichmäßig zu verteilen und überschüssiges Harz aus dem Laminat aufzusaugen. So wird ein hoher und gleichmäßiger Fasergehalt im Bauteil erzielt.

Die **Formen** werden beim Vakuumieren nicht besonders hoch belastet, so daß sie wie schon beim Handlaminierverfahren relativ leicht aufgebaut sein können.

Die Aushärtung erfolgt meist bei Raumtemperatur. Eine anschließende Temperung der Bauteile ist, wie schon bei Handlaminaten, noch in der Form oder nach dem Entformen möglich.



Flügelschale eines UL-Flugzeuges im Vakuum Skin of a microlight wing in vacuum

Merkmale des Vakuumverfahrens:

- Geringer Werkzeugaufwand
- Mittlere Investitionskosten
- Arbeitsintensiv
- Hohe Festigkeiten der Bauteile

VACUUM PRESS MOULDING

In vacuum press moulding, the hand lay-up component together with the mould is inserted into a film bubble (possible with small parts only) or covered with a film that is glued to the edges of the mould to form an airtight seal. When the air is evacuated, the film presses against the laminate, pushing it into the mould. The max obtainable pressure is the pressure of the surrounding air, i.e. 1 bar. The P3 pump from R&G, for example, generates a vacuum of approx. 0.9 bar, which corresponds to a moulding pressure of nine tonnes per square metre.

Vacuum press moulding is used primarily:

- To increase the fibre volume fraction in the laminate, i.e. to press out excess resin.
- To glue lightweight support materials, e.g. cellular plastics or honeycombs with high-tensile overlays of resin and fabric, for manufacturing an extremely lightweight and rigid component.

This can be achieved only when the component is moulded under a constant pressure. First of all, the laminate is covered with a tear-off fabric and a non-adhesive perforated film. Placed on this is an air-permeable non-woven which serves to apply the vacuum uniformly and to soak up the excess resin from the laminate. The result is a high and uniform fibre content in the component.

Evacuating the air does not place particularly high loads on the **moulds** so that they are relatively simple to lay up just as in hand lay-up operations.

In most cases, the mould is cured at room temperature. As with hand lay-up laminates, the components can then be annealed either when still in the mould or after demoulding.

Features of vacuum moulding:

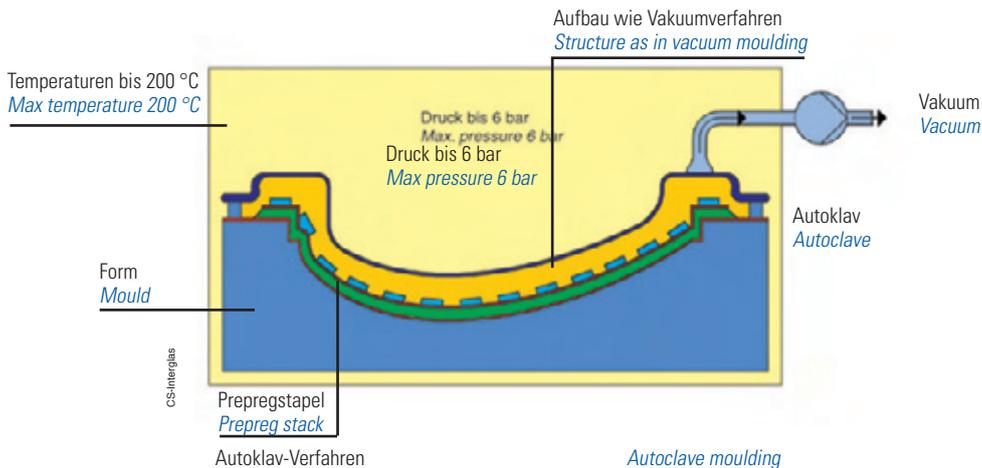
- Low mould costs
- Medium capital costs
- Labour-intensive
- High tensile strengths for the components

AUTOKLAV - VERFAHREN

Das Autoklav-Verfahren ist eines der teuersten und aufwendigsten Verarbeitungsverfahren. Es wird in der Regel nur beim Einsatz von Prepregs angewandt. **Prepregs** sind mit einem speziellen Harz vorimprägnierte (**Preimpregnated**) und „angehärtete“ Verstärkungsgewebe, die von spezialisierten Firmen (den sogenannten Prepregern) nach Kundenwunsch gefertigt werden.

Aus Prepregs lassen sich komplizierte, mechanisch und thermisch hochbelastbare Bauteile pressen. Der Faservolumengehalt liegt dabei über 60 %, der Luftporengehalt ist äußerst gering.

Aufgrund der hohen Kosten wird das Autoklav-Verfahren hauptsächlich zur Herstellung komplexer Bauteile mit höchsten Anforderungen z.B. in der Luft- und Raumfahrt (Airbus) sowie im Rennsport (Formel 1) eingesetzt.



AUTOCLAVE MOULDING

Autoclave moulding is one of the most costly and complex processing methods. As a rule, it is applied only when prepregs are used. Manufactured on request by specialised firms (so-called prepreggers), prepregs are reinforcing fabrics preimpregnated with a special, partially cured resin.

Complex components of high mechanical strength and thermal resistance can be moulded from prepregs. Moreover, their fibre volume content is over 60 % and the air voids content extremely low.

Owing to the high costs involved, autoclave moulding is used predominantly for the manufacture of complex components meeting with the highest requirements, e.g. in aerospace (airbus) and in racing (Formula1).

Arbeitsschritte

1. Ablegen der einzelnen Prepreg-Lagen (manuell oder mittels Tapelegemaschine)
2. Abdecken mit Lochfolie, Saugvlies und Vakuumfolie
3. Vakuum anlegen (Dichtheit prüfen)
4. Aufbau in den Autoklaven bringen
5. Aushärten unter Druck und hoher Temperatur
6. Abkühlen
7. Belüften und Entnehmen

Während beim „normalen“ Vakuumverfahren ein max. Druck von 1 bar erreicht wird (nämlich der Umgebungsluftdruck) kann der Autoklav, der ja ein Druckgefäß darstellt, einen Druck von > 6 bar auf das Laminat bringen. Um Prepregs aushärten zu können, wird im Autoklav üblicherweise eine Temperatur von 170 °C erzeugt.

Formen

- GFK, Metall, Holz, Gips
- Für die Herstellung großer, sphärisch geformter CFK-Bauteile werden meist CFK-Formen verwendet, da aufgrund der annähernd gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Form und Bauteil der Verzug der Bauteile äußerst gering ist

Merkmale des Autoklav-Verfahrens:

- Hohe Investitionen erforderlich
- Arbeitsintensiv
- Lange Taktzeiten (bedingt durch den manuellen Aufbau, Aufheiz- und Härtezyklus bis zu 7 h)
- Höchste Festigkeit der Bauteile

Procedure

1. The prepregs are laid in place (either by hand or with a tape laying machine).
2. They are then covered with a perforated film, non-woven absorber, and vacuum film.
3. The vacuum is generated (and the bubble checked for leaks).
4. The structure is placed in the autoclave.
5. The structure cures under pressure and high temperature.
6. The structure cools.
7. The autoclave is ventilated, and the structure taken out.

Whereas a max pressure of 1 bar (i.e. the ambient pressure) is achieved with "normal" vacuum moulding, the autoclave, which acts as a pressure vessel, can apply a pressure greater than 6 bar to the laminate. So that prepregs can cure completely, the temperature usually generated in the autoclave is 170 °C.

Moulds

- GRP, metal, wood, plaster
- For the manufacture of large spherical components of CRP, the material used for the moulds is in most cases also CRP. The reason is that both the mould and the component then exhibit approximately equal coefficients of thermal expansion, so component warpage is reduced to a negligible minimum

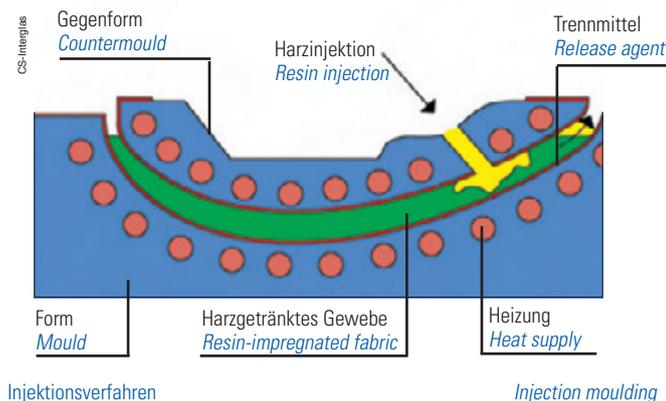
Features of autoclave moulding:

- High investments necessary
- Labour-intensive
- Long cycle times (owing to the manual lay-up as well as the heating and curing cycles of up to seven hours)
- Highest tensile strengths for the components

INJEKTIONSVERFAHREN

Beim Injektionsverfahren wird zunächst das trockene Verstärkungsmaterial in die Form eingelegt. Die Imprägnierung mit Harz erfolgt erst nach dem Schließen der Form, indem die Matrix (Harz) in die Form eingespritzt oder eingesaugt wird.

Als **RTM** (Resin Transfer Moulding) bezeichnet man das Verfahren, bei dem die Harz/Härter-Mischung aus einem Vorratsbehälter in die Form eingebracht wird, während beim **RIM** (Resin Injection Moulding)-Verfahren die hochreaktiven Komponenten erst unmittelbar vor dem Einspritzen gemischt werden.



Injektionsverfahren

Injection moulding

Für die Herstellung komplizierter Bauteile ist es sinnvoll, vorgeformte Verstärkungsmaterialien zu verwenden. Hauptsächlich werden thermoplastisch gebundene Matten und Gewebe eingesetzt, die vorher durch Wärme vorgeformt wurden. Eine zweite Variante sind geflochtene oder gewickelte „Vorformlinge“, die auf einem Formkern mit wechselndem Durchmesser aufgebaut werden.

Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit des Harzes und der Fixierung der Fasern bleibt die vorgesehene Faserorientierung erhalten, was zu reproduzierbar guten mechanischen Eigenschaften der Bauteile führt.

Geeignete Materialien

Als Matrix (Bettungsmasse) werden niedrigviskose Epoxyd- und Polyesterharze verarbeitet. Zur Verstärkung eignen sich die speziell für diesen Zweck hergestellten und oberflächenbehandelten Glas-, Aramid- und Kohlefasern in Form von Geweben, Gelegen, Bändern, Vliesen und Matten.

Formen

- GFK- oder Aluminiumformen bei Prototypen und Kleinserien (im RTM-Verfahren)
- Beheizte Stahl- oder Aluminiumformen bei größerer Stückzahl (im RIM-Verfahren)

Merkmale des Injektionsverfahrens:

- Formkosten sind bei RIM und RTM etwa gleich, aber höher als beim Vakuumverfahren
- Höhere Investitionskosten beim RIM-Verfahren als bei RTM
- Zykluszeiten bei RTM je nach Harz einige Stunden (in beheizten Formen), RIM erheblich kürzer durch Verwendung reaktiverer Matrixsysteme

INJECTION MOULDING

With injection moulding, the dry reinforcing material is placed in the mould. This material is first impregnated with resin after the mould has closed. The resin for the matrix is then either injected or sucked into the mould.

RTM, or resin transfer moulding, is the method of introducing the mixture of resin and hardener into the mould from a store tank, whereas RIM, or resin injection moulding, mixes the highly reactive components directly before they are injected.

For the manufacture of complex components, preformed reinforcing materials offer practical solutions. Predominantly used are thermoplastic-bonded mats and fabrics that have been preformed under the application of heat. A second variant is braided or wound preforms on a mould core of varying diameter.

The resin's low flow rate and the fixed position of the fibres helps to retain the predefined fibre orientation, which ensures the reproducibility of a component's targeted mechanical properties.

Suitable materials

The matrix is made of a low-viscosity epoxy or polyester resin. Suitable reinforcing materials are fabrics, inlays, tapes, non-wovens, and mats of surface-treated glass, aramid, and carbon fibres manufactured specifically for this purpose.

Moulds

- GRP or aluminium moulds for prototypes and short runs (with RTM)
- Heated steel or aluminium moulds for larger runs (with RIM)

Features of injection moulding:

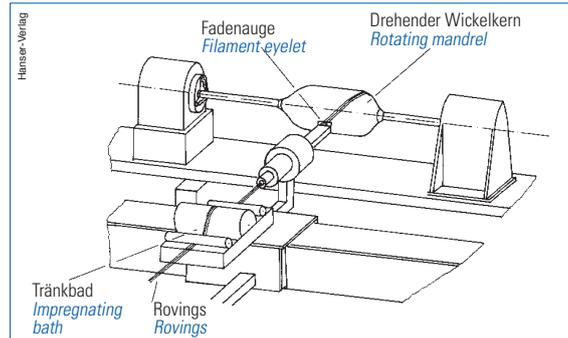
- *Mould costs are about the same for RIM and RTM, but higher than for vacuum moulding*
- *Higher capital costs for RIM than for RTM*
- *Cycle times for RTM of several hours, depending on the resin (in heated moulds), considerably shorter for RIM because matrix systems of greater reactivity are used*

WICKELN

Beim Wickelverfahren werden die Verstärkungsfasern auf einen Positivkern aufgewickelt. Dieses Verfahren eignet sich vorwiegend zur Herstellung rotationssymmetrischer Bauteile wie Behälter, Rohre und Wellen. Mit mehrachsig bewegbaren Fadenführungen können auch kompliziertere Bauteile wie z.B. Rohrkrümmer gewickelt werden.

Man unterscheidet zwischen Drehmaschinen, Taumel- und Planetenwickelverfahren.

Eine Wickelmaschine besteht aus einer Drehvorrichtung für die Rotationsbewegung des Wickelkerns, einer Fadenführung, einem Harz-Tränkbad und einem Spulenständer für den Roving (Faserstrang).



Drehbank-Wickelverfahren

WINDING

With winding, the reinforcing fibres, or filaments, are wound on a core or mandrel in the shape of the part. This method is primarily suitable for manufacturing rotationally symmetrical components such as vessels, pipes, and shafts. Filament guides operating along several axes mean that also more complex components, e.g. pipe bends, can be wound.

The two basic methods are biaxial and helical filament winding which are usually performed on automated machinery.

A winding machine consists of a turning device for rotating the mandrel, a filament guide, a resin impregnating bath, and a bobbin for the roving.

Geeignete Materialien

Als Matrix (Bettungsmasse) werden niedrigviskose Epoxyd- und Polyesterharze verarbeitet.

Zur Verstärkung werden hauptsächlich Rovings, zum Teil auch Bänder verwendet.

Wickelkerne

Die Kerne sind je nach Bauteilgeometrie:

- Wiederverwendbar (leicht konisch)
- Verlorene Kerne (verbleiben im Bauteil, bestehen meist aus Metall oder Kunststoff)
- Auswaschbar bzw. herauslösbar (Spezialgips, Schaumstoffe)

Merkmale des Wickelverfahrens:

- Hohe Genauigkeit und gute Reproduzierbarkeit
- Weitgehend automatisierbar
- Wirtschaftlich (Drehbankwickelanlage)

Suitable materials

The matrix is made of a low-viscosity epoxy or polyester resin.

The reinforcing materials are predominantly rovings, also in the form of tape.

Mandrels

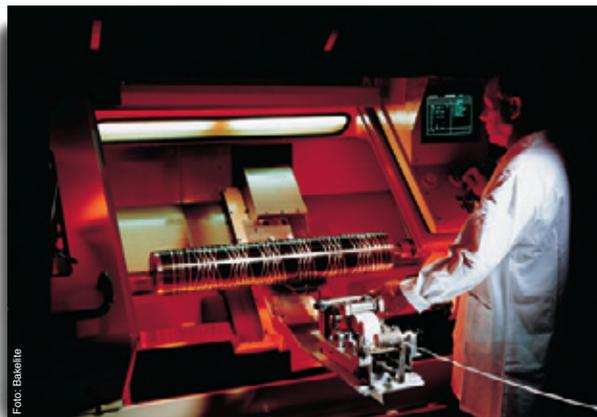
Depending on the component geometry, the mandrels can be:

- Reusable (slightly tapered)
- Lost (i.e. they remain in the component and are mostly made of metal or plastic)
- Removed by washing or other means (special-purpose plaster, foams)

Features of winding:

- High precision and good reproducibility
- High degree of automation
- Economical (automatic winding machine based on a lathe)

Für das Wickeln von Bauteilen -hier mit einem Glasroving- werden sehr dünnflüssige Harz/Härter-Systeme wie L 20 /Härter SG eingesetzt.



Resin/hardener systems of very low viscosity such as L 20 / SG are used for winding components - here with a glass roving

PRESSVERFAHREN

Das Preßverfahren ist für die Herstellung von FVV-Teilen in großen Stückzahlen geeignet. Die Reproduzierbarkeit ist gut, die Fertigung weitgehend automatisierbar, die Taktzeiten sind gering.

Benötigt wird eine hydraulische Oberkolben-Kurzhubpresse mit Steuerung.

Geeignete Materialien

Hauptsächlich Glasfasern in Form von Matten und Geweben sowie Aramid- und Kohlenstoff-Filamentgewebe in Verbindung mit Epoxyd- und Polyesterharzen. Man unterscheidet in:

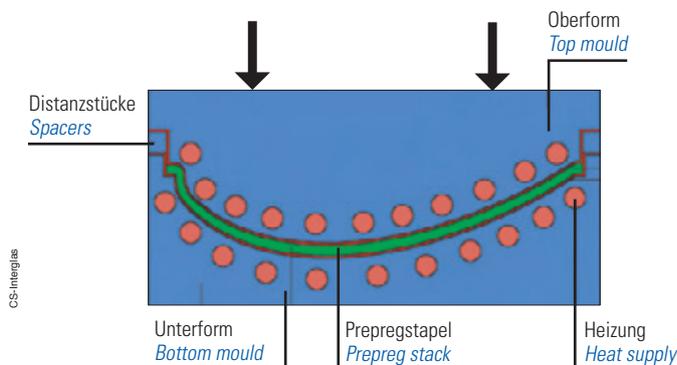
- **SMC** (Sheet Moulding Compound)
- **BMC** (Bulk Moulding Compound)
- **GMT** (Glasmatteverstärktes Thermoplast)

Übliche Verfahren

- Heißpreßtechnik
- Kaltpreßtechnik
- Naß-Preßverfahren
- Prepreg-Preßverfahren

Heißpreßtechnik

Herstellung kleiner und mittlerer Bauteile in Großserien. Es werden beheizbare, hartverchromte und polierte Metallwerkzeuge eingesetzt.



Heißpreßverfahren

Hot press moulding

PRESS MOULDING

Press moulding is suitable for the manufacture of large numbers of FC parts. The reproducibility is good, manufacture can be automated to a high degree, and the cycle times are low.

What is needed is a down-acting short-stroke hydraulic press with controller.

Suitable materials

These are predominantly glass fibres in the form of mats and fabrics as well as aramid or carbon filament fabrics embedded in epoxy or polyester resins. These materials can be divided into:

- **SMCs** (sheet moulding compounds)
- **BMCs** (bulk moulding compounds)
- **GMTs** (glass-mat-reinforced thermoplastics)

Usual methods

- Hot press moulding
- Cold press moulding
- Liquid resin press moulding
- Prepreg press moulding

Hot press moulding

For manufacturing small and medium-sized components in large batches. Finding application here are heatable, hard-chromium-plated, and polished metal moulds.

Kaltpreßtechnik

Fertigung größerer Teile in mittleren Stückzahlen in einer unbeheizten Kunststoffform.

Cold press moulding

for manufacturing larger parts in medium-sized batches in an unheated plastic mould.



Getriebeabdeckung aus Kohlefaser/Epoxydharz

Gearbox cover of carbon-fibre-reinforced

Naß-Preßverfahren

Trockene Verstärkungsmaterialien (Gewebe, Gelege, Matten oder Vorformlinge) werden in die Form eingelegt. Danach wird eine abgewogene Menge Harzes eingegossen oder injiziert. Die Schließgeschwindigkeit des Werkzeuges wird so gewählt, daß ein Aufreißen der Glasverstärkung infolge hoher Strömungsgeschwindigkeit des Harzes vermieden wird. Die Werkzeugtemperatur beträgt je nach Art des Harzes 90 - 140 °C, der Preßdruck auf dem Bauteil 5 - 25 bar.

Prepreg-Verfahren

Hier werden vorimprägnierte Verstärkungsmaterialien verarbeitet. Zur Herstellung flächiger Bauteile mit konstanter Wandstärke werden Matten- und Gewebeprepreps (GMT, SMC) verwendet, für Formteile mit unterschiedlichen oder scharf abgesetzten Wandstärken Preßmassen (BMC).

Verarbeitungsbedingungen z.B. beim SMC:

- Preßdruck 20 - 250 bar
- Temperatur 140 - 160 °C Naß-Preßverfahren

Liquid resin press moulding

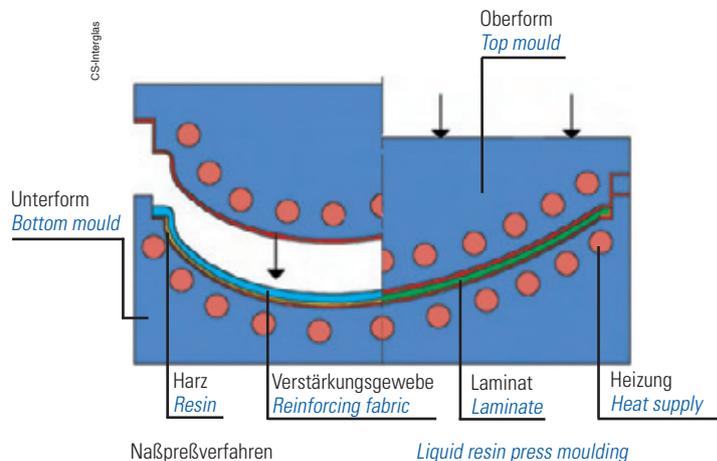
Dry reinforcing materials (fabrics, inlays, mats, or preforms) are placed in the mould, which is then filled or injected with a predefined weight of resin. The mould closing speed is such that the glass-fibre reinforcement cannot be ripped open by the resin's high rate of flow. Depending on the resin type, the mould temperature ranges from 90 to 140 °C, the moulding pressure on the component from 5 to 25 bar.

Prepreg moulding

As described earlier, prepregs are preimpregnated reinforcing materials. Mat and fabric prepregs (GMTs, SMCs) are used for manufacturing large-area components with unchanging wall thickness; moulding compounds (BMCs) for moulded parts with varying wall thicknesses or shoulders.

Processing conditions, e.g. for SMCs:

- Moulding pressure 20 - 250 bar
- Temperature 140 - 160 °C



Bauteil: Inge Carbon (www.inge-carbon.de)
Verwendetes Gewebe: Design-Kohlegewebe rot 405 g/m²

Part: Inge Carbon (www.inge-carbon.de)
Applied fabric: Design-Carbon fabric red 405 g/m²



NACHBEARBEITUNG VON FVW

Bauteile aus FVK müssen nach dem Entformen meistens noch nachbearbeitet werden. So sind z.B. Trennnähte zu entgraten, Löcher zu bohren oder Ränder zu besäumen.

Eine spanabhebende Bearbeitung ist möglich. Es müssen dafür Hartmetall-Schneidwerkzeuge (Bohrer, Fräser) oder Diamant-Werkzeuge eingesetzt werden. Falls eine Kühlung erforderlich ist, sollte nur Wasser ohne ölhaltige Zusätze verwendet werden.

ÜBLICHE VERFAHREN

Sägen

Die besten Schnittergebnisse werden mit Diamantsägen feiner bis grober Körnung erzielt. Grundsätzlich gilt: je mehr ein Material „schmiert“, desto größer das Korn. Die Schnittgeschwindigkeit liegt bei ca. 200 - 1000 m/min, die Vorschubgeschwindigkeit bei ca. 200 - 500 mm/min.

Schleifen

Scharfe Schnittkanten von FVW-Teilen werden nachgeschliffen. Dies ist in der Regel reine Handarbeit. Hilfsmittel sind elektrisch oder pneumatisch angetriebene Schleifteller.

Die verwendeten Körnungen des Schleifpapiers liegen bei 60-1500. Beim Schleifen ist unbedingt auf einen zuverlässigen Atem- und Hautschutz zu achten! Am besten wird abgesaugt oder naß geschliffen, um den entstehenden Schleifstaub zu binden. Beim Schleifen von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) entsteht leitfähiger Staub, der in elektrischen Anlagen zu Kurzschlüssen führen kann! Schutzart IP 54 ist erforderlich.

Bohren

Bis zu einem Durchmesser von ca. 12 mm werden Spiralbohrer für Metall eingesetzt. Für größere Löcher eignen sich Kreisschneider oder Hohlbohrer. Diamantbesetzte Werkzeuge sind auch hier am besten.

Um Delaminationen auf der Bohrertrittsseite zu vermeiden, sollte eine beschichtete Spanplatte oder Hartholz unterlegt werden.

Als Schnittgeschwindigkeit wird 20 - 25 mm/min, als Vorschubgeschwindigkeit 0,03 - 0,09 mm/U empfohlen.

Fräsen

Beim Fräsen lassen sich auch räumlich gekrümmte Konturen bearbeiten und Aussparungen herstellen. Die Fräswerkzeuge unterliegen einem starken Verschleiß und sollten daher eine Diamantbeschichtung besitzen. Die Schnittgeschwindigkeit beträgt ca. 300 - 1000 m/min und der Vorschub bis zu 0,2 mm/U.

Die Vorschubgeschwindigkeit darf nicht zu groß gewählt werden, da sonst Delaminationen auftreten können. Das Fräsen von GFK und CFK ist problemlos möglich. Bei SFK (Aramidfaserverstärkung) fransen die Schnittkanten aus.

Drehen

Die Nachbearbeitung auf der Drehbank ist, mit Ausnahme von SFK, problemlos möglich. Auf scharfe Drehmeißel achten, um Delaminationen zu verhindern.

FINISHING FCS

In most cases, FC components require finishing work after they are demoulded. For example, mould seams must be deflashed, holes drilled, or edges trimmed.

Machining is one possible solution, whereby cemented carbide or diamond tools (drills, milling cutters) must be used. If cooling proves necessary, then the coolant must be water containing no oily additives.

USUAL METHODS

Sawing

The best cutting results are obtained with diamond saws ranging from fine to coarse. The basic rule is that the more a material "sweats", the coarser the saw has to be. The cutting speed ranges from 200 to 1000 m/min, the feed rate between 200 and 500 mm/min.

Grinding

Sharp edges produced by cutting operations on FC parts are ground. As a rule, this work is conducted exclusively by hand. The tools used are electrically or pneumatically driven grinding wheels.

The abrasive paper used exhibits grain sizes of between 60 and 1500. Reliable respiratory equipment and skin protection must be used during grinding operations. To bind the resulting grinding dust, wet grinding or the use of a suction device is highly recommended.

Grinding carbon-fibre-reinforced plastics (CRPs) generates conductive dust that can cause short circuits in electrical equipment. System of protection IP 54 is required.

Drilling

For holes with diameters up to about 12 mm, twist drills for metals are used. Larger holes require trepans of various sizes. Diamond-tipped tools are the best choice here too.

So that the drill cannot cause delamination after passing through the component, a sheet of coated particle board or hardwood must be clamped to the exit side.

The recommended cutting speed is from 20 to 25 mm/min, the feed rate from 0.03 to 0.09 mm per rotation.

Milling

This machining method can also create three-dimensional contours and recesses. Milling cutters are subjected to a high degree of wearing and should therefore be diamond-tipped. The cutting speed ranges from about 300 to 1000 m/min, and the feed up to 0.2 mm per revolution.

The chosen feed rate should not be too high, otherwise delamination can occur. GRPs and CRPs can be milled without problems. In the case of SRP (aramid fibre reinforcements), the edges of the cut become ragged.

Turning

With the exception of SRPs, no problems are encountered when the components are finished on a lathe. The turning tools must be sufficiently sharp so as not to cause delamination.

TECHNISCH AUFWENDIGE VERFAHREN

für die Bearbeitung von Großserien

Wasserstrahlschneiden

Beim Wasserstrahlschneiden wird Wasser in hohem Druck (4000 bar) durch eine Düse mit 0,1 - 0,2 mm Durchmesser gepreßt. Beim Schneiden werden die Bauteile mechanisch und thermisch nur gering belastet. Der entstehende Materialabtrag ist gebunden und fließt mit dem Wasser ab. Nach der Bearbeitung ist ein Trockenvorgang notwendig.

Die Schnittgeschwindigkeit, der Wasserdruck und der Düsenquerschnitt, die Matrix/Faser-Kombination und die Wandstärke des Bauteils haben einen großen Einfluß auf die Schnittqualität.

Maximale Vorschubgeschwindigkeiten:

CFK-Laminat 3 mm dick	10 m/min
SFK-Laminat 3 mm dick	2 m/min

Es versteht sich, daß der Wasserstrahl nicht wie ein anderes Werkzeug von Hand geführt wird. Die Steuerung erfolgt elektronisch nach vorher programmierten Koordinaten.

Laser

Die beim Laserschneiden möglichen Ergebnisse werden umso besser, je näher Schmelz- und Zersetzungstemperatur von Matrix und Fasern beieinander liegen und je geringer deren Leitfähigkeiten sind. Bei FVW werden die besten Schnittqualitäten wegen der geringen Wärmebeständigkeit mit hohen Energiedichten und Vorschubgeschwindigkeiten erreicht.

Erreichbare Schnittqualitäten:

SFK	sehr gut
GFK	befriedigend
CFK	ungenügend

Auch beim Laserschneiden gilt: die Steuerung erfolgt elektronisch anhand vorher programmierter Koordinaten.

COMPLEX TECHNOLOGIES

for machining large batches

Water jet cutting

With this method, water is pressed under a high pressure (4000 bar) through a nozzle of 0.1 - 0.2 mm diameter. Cutting places only a negligible mechanical and thermal load on the components. The material thus removed is bound and washed away in the water. This machining method makes a subsequent drying process necessary.

The cutting speed, the water pressure, the nozzle cross sectional area, the combination of matrix and fibres, and the component wall thickness all have a considerable effect on the quality of the cut.

Maximum feed rates:

CRP laminate, 3 mm thick	10 m/min
SRP laminate, 3 mm thick	2 m/min

It is, of course, evident that the water jet cannot be guided by hand like any other tool. Instead, it is manipulated electronically according to a preprogrammed set of coordinates.

Laser

The closer the matrix's and fibres' melting and degradation temperatures are and the lower their electrical conductivity, the better are the results obtained with laser cutting. Owing to their low resistance to heat, FCs can be cut with the best qualities when the energy density and feed rate are high.

Obtainable cutting qualities:

SRP	very good
GRP	satisfactory
CRP	unsatisfactory

With laser cutting, too, the beam is manipulated electronically according to a preprogrammed set of coordinates.



Besäumen der Kante eines Roboterarmes aus FVW mit einem Diamantfräser bei sehr hoher Schnittgeschwindigkeit und geringem Vorschub (Fa. Polywest/Ahaus).

A diamond-tipped milling cutter trimming the edge of a robot arm at a high cutting speed and low feed rate (Polywest in Ahaus).



Die beiden Halbschalen eines Roboterarmes mit eingeklebten Aluminiumelementen und Aramidgewebe-Laminat als innerer Sandwich-Decklage (Kernwerkstoff: Aramidwabe).

Two shells of a robot arm with glued aluminium elements and aramid fabric laminate as an internal sandwich overlay (core material aramid honeycombs)



Fred Horst
Akzo, Wuppertal

Focus

	Wasserstrahlschneiden <i>Water jet cutting</i>	Laserstrahlschneiden <i>Laser beam cutting</i>	Umrißfräsen <i>Contour milling</i>
Mechanische Belastung <i>Mechanical loads</i>	gering <i>low</i>	sehr gering <i>very low</i>	mittel <i>medium</i>
Thermische Belastung <i>Thermal loads</i>	sehr gering <i>very low</i>	sehr hoch <i>very high</i>	gering bis mittel <i>low to medium</i>
Schadstoffentwicklung <i>Pollutant emissions</i>	keine <i>none</i>	sehr hoch <i>very high</i>	gering bis mittel <i>low to medium</i>
Geräuschentwicklung <i>Noise levels</i>	hoch <i>high</i>	mittel <i>medium</i>	sehr hoch <i>very high</i>
Schnittfugenbreite <i>Width of cut</i>	gering <i>low</i>	gering <i>low</i>	mittel <i>medium</i>
Engste Radien <i>Min radii</i>	0,5 - 1,0 mm <i>0.5 - 1.0 mm</i>	0,5 mm <i>0.5 mm</i>	Werkzeugdurchmesser <i>tool diameter</i>
Symmetrie der Schnittkante <i>Edge symmetry of cut</i>	parallel zur Strahlrichtung <i>parallel to jet</i>	parallel zur Strahlrichtung <i>parallel to beam</i>	senkrecht zur Werkzeugachse <i>vertical to tool axis</i>
Werkzeugverschleiß <i>Tool wear</i>	gering <i>low</i>	sehr gering <i>very low</i>	mittel bis hoch <i>medium to high</i>
Zugänglichkeit des Werkstücks <i>Work piece accessibility</i>	beidseitig <i>both sides</i>	beidseitig <i>both sides</i>	beidseitig <i>both sides</i>



Unsaubere Schnittkanten im Vergleich zu einer sauberen Kantenbearbeitung von Twaron® (Aramid)-Laminaten

Ragged edges compared with the clean-cut edges of Twaron® (aramid) laminates



Schneiddüse einer Wasserstrahlanlage

Cutting nozzle of a water jet unit



Bohren von Twaron® (Aramid)-Laminaten mit einem Hartmetallbohrer mit spezieller „Sichel-Schneide“

Cemented carbide drill with special crescent-shaped chisel edge for drilling Twaron® (aramid) laminates



Sägen eines Tenax® (Kohlenstoff-Faser)-Laminats mit einer Präzisionsäge

Precision saw cutting a Tenax® (carbon-fibre) laminate

Faserverbundwerkstoffe und Beschichtungen, die höchsten Anforderungen an Zuverlässigkeit und Langlebigkeit genügen müssen, werden vorzugsweise aus Epoxydharz hergestellt.

Fibre composites and coatings that have to meet with the **highest demands** placed on reliability and long service life are manufactured in the majority of cases from epoxy resin.

Vorteile:

- Hohe statische und dynamische Festigkeit
- Geringer Härtungsschwund, gute Maßhaltigkeit
- Starke Haftung, sehr guter Klebstoff
- Hohe Temperaturbeanspruchbarkeit
- Gute Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit
- Sehr gute dielektrische Eigenschaften (isolierend)
- Geringe Brennbarkeit, hohe Glutfestigkeit

Advantages:

- High static and dynamic strength
- Low curing shrinkage, good dimensional stability
- Strong adhesion, very good adhesive
- High thermal resistance
- Good chemical and weather resistance
- Very good dielectric (insulating) properties
- Low combustibility, high resistance

Nachteile:

- Genaues Dosieren der Komponenten erforderlich
- Relativ teuer (im Vergleich zu Polyesterharzen)

Drawbacks:

- The constituents must be precisely dosed
- Relatively expensive (compared with polyester resins)

Herstellung

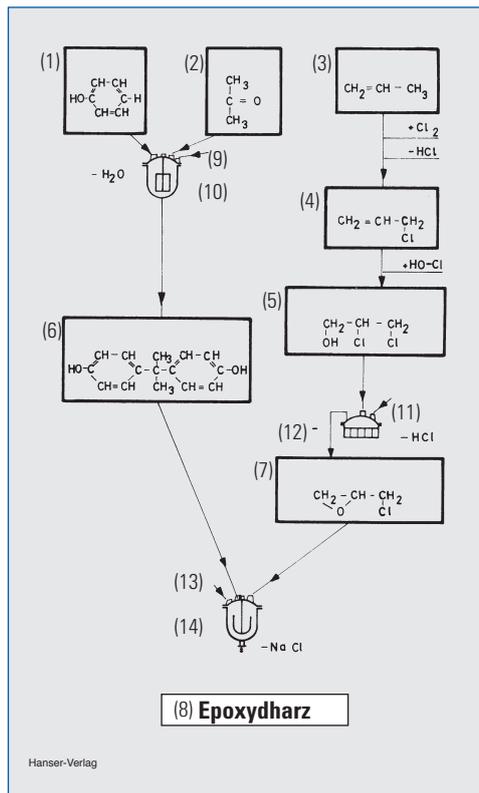
Die technisch wichtigsten Epoxydharze werden durch Kondensation von Epichlorhydrin und Bisphenol A / Bisphenol F hergestellt. Die Vernetzungsprodukte aus kettenförmigen Verbindungen sind charakterisiert durch die Epoxygruppe, deren hohe Reaktivität durch die extreme Ringspannung zu erklären ist. Epoxydharze auf Basis von BPA/F sind kristallisationsfrei und damit besser transport- und lagerfähig als die herkömmlichen Bisphenol-A-Harze. Die Härtung (Vernetzung) erfolgt in einer Polyaddition durch Zugabe eines Härtungsmittels in bestimmten Mengenverhältnissen. Die Art des Härter beeinflusst die Verarbeitungseigenschaften und die Materialkenndaten des Endproduktes.

Manufacture

The most important epoxy resins for engineering purposes are manufactured through the condensation of epichlorohydrin and bisphenol A / bisphenol F. The cross-linked products of chained bonds are characterised by the epoxy group whose high reactivity can be explained by the extreme ring strain. Epoxy resins based on BP A/F are free of crystallisation and so are better suited for transport and storage than the customary bisphenol A resins. Curing (cross-linking) is initiated as polyaddition by the introduction of a certain proportion of curing agent. The type of hardener influences the processing properties and the material characteristics of the end product.

Herstellungsschema Epoxydharze

- (1) Phenol
- (2) Aceton
- (3) Propylen
- (4) Allylchlorid
- (5) Glycerindichlorhydrin
- (6) Bisphenol A
- (7) Epichlorhydrin
- (8) Epoxydharz
- (9) Schwefelsäure
- (10) Reaktionsbehälter
- (11) Kalkmilch
- (12) Reaktionsbehälter
- (13) Natronlauge
- (14) Polykondensationsbehälter



Flow chart for the manufacture of epoxy resins

- (1) phenol
- (2) acetone
- (3) propene
- (4) allyl chloride
- (5) glycerin dichlorohydrin
- (6) bisphenol A
- (7) epichlorohydrin
- (8) epoxy resin
- (9) sulphuric acid
- (10) reaction vessel
- (11) lime milk
- (12) reaction vessel
- (13) sodium hydroxide solution
- (14) polycondensation vessel

Systeme

Nach Anwendungsgebieten werden Laminier-, Gieß- und Klebharze sowie Formenbau- und Deckschichtharze (Gelcoats oder Feinschichtharze) unterschieden.

Kalthärtung

Die Kalthärtung ist eine exotherme Reaktion, die bei Raumtemperatur und atmosphärischem Druck stattfinden kann.

Kalthärtende Systeme sind am einfachsten einzusetzen. Sie werden vorzugsweise bei Raumtemperatur (20 °C) verarbeitet und gehärtet. Nach ca. 24 Stunden kann entformt werden.

Innerhalb von 7 Tagen härtet das Harz nach und gewinnt nochmals an Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit. Danach kommt die Reaktion zum Stillstand.

Durch zusätzliche **Temperung** steigt die Glasübergangstemperatur T_g an. Durch den höheren Vernetzungsgrad wird die Beweglichkeit der Makromoleküle vermindert: Härte und Festigkeit nehmen zu.

Für optimale Endigenschaften ist es zu empfehlen, auch kalthärtende Harze nochmals z.B. 2 - 3 h bei 50 - 60 °C zu tempern.

Warmhärtung

Kaltanhärtende Systeme

Diese Harze vernetzen bei Raumtemperatur so gut, daß sich Bauteile daraus problemlos entformen und bearbeiten lassen.

Für „normale“ Anwendungen ist die Festigkeit bereits ausreichend. Die Endfestigkeit wird jedoch erst durch eine Wärmenachbehandlung erreicht. Speziell die Luftfahrtzugelassenen Epoxidharzsysteme müssen mit Wärme nachgehärtet werden. Meist genügt eine Temperatur von 50 - 60 °C über ca. 10 Stunden zur vollständigen Härtung.

Heißhärtung (Temperung)

Eine aufwendige Temperung ist bei der Anhydridhärtung erforderlich (Martens-Plus-EP). Die Heißhärtung erfolgt bei Temperaturen zwischen 100 und 200 °C. Die warmhärtenden Vernetzer sorgen durch eine hohe Polarität und steife Ringe für eine hohe Glasübergangstemperatur T_g . Die Formstoffe weisen sehr gute mechanische, thermische, chemische und elektrische Eigenschaften auf. Die Dauertemperaturbeständigkeit liegt bei über 200 °C.

Tieftemperatureigenschaften

Mit abnehmender Temperatur werden Epoxidharze zunehmend härter, ohne daß sich die Schlagzähigkeit verschlechtert.

Die Festigkeit steigt beträchtlich an:

Von +25 °C auf -76 °C verbessern sich Zug-, Druck- und Biegefestigkeit sowie Zug- und Biege-E-Modul von Epoxidharz um rund 10%.

Im Bereich von -76 °C bis -242 °C werden nochmals um etwa 25% höhere Festigkeiten erreicht (Literaturwerte).

Systems

Depending on their application, resins can be divided into laminating resins; cast and adhesive resins; and mould construction and overlay resins (gel coats).

Cold curing

Cold curing is an exothermal reaction that can take place at room temperature and under atmospheric pressure.

Cold-curing systems are the easiest to use. In most cases, they are processed and cured at room temperature (20 °C). After about twenty-four hours they can be demoulded.

For the next seven days the resin undergoes a post-curing process, increasing its strength and heat distortion temperature. Afterwards, the reaction comes to a stop.

*Additional **annealing** raises the glass transition temperature T_g . The greater degree of cross-linking reduces the mobility of the macromolecules, and hardness and strength increase.*

For the optimal final properties, an additional annealing is also recommended for cold-curing resins, e.g. two to three hours at 50 - 60 °C.

Hot curing

Systems with preliminary cold curing

These resins cross-link at room temperature so well that components made of these can be demoulded and machined without problems.

The strength of these components is fully adequate for "normal" applications. Yet the final strength is first obtained after a post-heat treatment. Specifically, the epoxy resin systems approved for aviation must undergo post-heat treatment. In most cases, a temperature of 50 - 60 °C applied over a period of about ten hours is enough to obtain complete curing.

Annealing

Complex annealing is required for anhydride curing (Martens Plus EP). Annealing takes place at temperatures between 100 and 200 °C. The high polarity and stiff rings of hot-curing cross-linking agents give rise to a high glass transition temperature T_g . The moulded materials exhibit very good mechanical, thermal, chemical, and electrical properties. Their long-term temperature resistance is over 200 °C.

Low-temperature properties

With increasing temperature, epoxy resins become increasingly harder without any loss in impact strength.

The strength increases considerably as follows:

From +25 °C to -76 °C, the tensile, compressive, and flexural strength as well as the tensile and flexural modulus of epoxy resin improve by about 10%.

And about 25% higher strengths are obtained in addition in the temperature range from -76 °C to -242 °C (reference data).





Toxikologie

Harze sind in der Regel als **reizend**, Härter als **ätzend** eingestuft. Bei unsachgemäßem Umgang können Haut- und Schleimhautreizungen bzw. auch Verätzungen auftreten. Die ausgehärteten Formstoffe dagegen sind gesundheitlich unbedenklich und nicht toxisch. Gefahrenhinweise und Sicherheitsratschläge sind gesetzlich vorgeschrieben.

Wir räumen dem Thema Arbeitsschutz in diesem Handbuch viel Platz ein, denn eines ist uns besonders wichtig: die sichere Verarbeitung unserer Produkte in Ihrem Hause.

Härter

Zur Vernetzung flüssiger Epoxyharze gibt es eine Vielzahl brauchbarer Härtungsmittel, die teils schon bei Raumtemperatur, teils nur unter Wärmezufuhr reagieren.

Bei der Festlegung einer Härterrezeptur wird vor allem auf eine möglichst gute Verträglichkeit für den Verarbeiter geachtet. Die meisten Härtermischungen enthalten aliphatische und cycloaliphatische Di- und Polyamine.

Die Amine sind in vier Gruppen eingeteilt:

- **Lineare aliphatische Amine**
hohe Reaktivität mit großer Vernetzungsmöglichkeit
- **Aromatische Amine + Beschleuniger**
hohe Wärmeformbeständigkeit und Chemikalienfestigkeit
- **Cycloaliphatische Amine**
Alternative zu den linearen, aliphatischen Aminen, längere Topfzeit
- **Tertiäre Amine**
bessere Kaltaushärtung, katalytisch wirksam

Harz / Härter-Systeme

Empfehlenswert ist die Verwendung von Harz/Härter-Kombinationen, die in der Praxis erprobt sind. Prinzipiell lassen sich jedoch **alle Harze und Härter** miteinander mischen und kombinieren. Zur Erzielung optimaler Eigenschaften ist es erforderlich, daß jede reaktive Gruppe ihren „Reaktionspartner“ erhält. Dazu muß einer vorgegebenen Anzahl der Epoxydgruppen die gleiche Anzahl von Amin-Wasserstoff-(NH)- Bindungen entsprechen. Diese Anforderung ist erfüllt, wenn jeweils die Äquivalentmasse des EP-Harzes den NH-Äquivalentmassen des Härter hinzugefügt werden.

Beispiel:

Epoxyharz L EP-Äquivalentmasse 179
Härter L NH-Äquivalentmasse 71
werden im Verhältnis 179:71 g gemischt.

Zur Vereinfachung wird die benötigte Härtermenge auf jeweils **100 g** EP-Harz bezogen.

Daraus ergibt sich pro **100 g Epoxyharz L**:

$$\frac{100}{179} \times 71 = 40 \text{ g Härter L}$$

Allgemein gilt:

EP-Wert x NH-Äquivalentmasse = g Härter pro 100 g EP-Harz

Toxicological properties

In general, resins are categorised as **irritants**, hardeners as **caustics**. Improper handling can lead to irritation of the skin and mucous membranes and even chemical burns. The cured moulded materials, on the other hand, are non-toxic and harmless to health.

Danger notices and safety advice are stipulated by law.

Industrial safety has been given generous treatment in this handbook. It is of particular importance to us that our products are processed safely by your personnel.

Hardeners

To initiate cross-linking in liquid epoxy resins, there are a great number of suitable hardeners that react either at temperatures as low as room temperature or under the application of heat. When a recipe for a hardener is put together, particular importance is placed above all on the maximum possible compatibility for the processor. Most of the hardener mixtures contain aliphatic and cycloaliphatic diamines and polyamines.

The amines are divided into four groups:

- **Linear aliphatic amines**
high reactivity with large cross-linking potential
- **Aromatic amines + accelerators**
high heat distortion temperature and chemical resistance
- **Cycloaliphatic amines**
alternatives to the linear, aliphatic amines, longer pot lives
- **Tertiary amines**
better cold curing, catalytic activity

Resin / hardener systems

Recommended is the use of resin/ hardener combinations that have been tried and tested in practice. In principle, however, **all resins and hardeners** can be mixed and combined with each other. Before the optimal properties can be obtained, each reactive group must be given its so-called reaction partner. In other words, a specified number of epoxy groups must be matched by the same number of amine-hydrogen (NH) bonds. This requirement is fulfilled when the equivalent mass of the EP resin is added to the equivalent NH masses of the hardener.

An example:

epoxy resin L equivalent EP mass 179
hardener L equivalent NH mass 71
are mixed in the ratio 179:71 g.

To simplify the calculations, the required quantity of hardener is based in each case on **one-hundred grams** of EP resin.

Needed for every **100 g of epoxy resin L**:

$$\frac{100}{179} \times 71 = 40 \text{ g of hardener L}$$

In general:

EP value x equivalent NH mass = g of hardener for every 100 g of EP resin

Kombinationsmöglichkeiten von Harzen und Härtern

R&G bietet verschiedene, geprüfte Laminierharzsysteme an, so z.B. das Epoxydharz L, L 1100 und L 20 mit unterschiedlichen Härtern.

Wir empfehlen, die Harzsysteme so wie angeboten zu verwenden. Sie verfügen dann über gesicherte Festigkeitswerte und die jeweiligen Zulassungen z.B. für den Flugzeug-, Boots- und Windkraftflügelbau.

Grundsätzlich lassen sich alle Harzsysteme mit allen Härtern mischen. Die resultierenden Verarbeitungsparameter/Festigkeiten der Endprodukte lassen sich aber nicht verbindlich zusichern, liegen jedoch meist erwartungsgemäß in dem jeweiligen Eigenschaftsbereich der Härter.

Das heißt beispielsweise: Härter EPH 161 erzielt, kombiniert mit Epoxydharz L, L 20 oder L 1100 jeweils ähnliche Endeneigenschaften, eine Luftfahrtzulassung ist aber nur mit L 20 gegeben.

Je nach Reaktivität der Harze ergeben sich abweichende Mischungsverhältnisse.

Possible resin and hardener combinations

R&G offers various approved laminating resin systems, e.g. the epoxy resins L, L 1100, and L 20 with diverse hardeners.

We recommend applying the resin systems as provided. They will then develop their assured, approved strengths e.g. for building aircraft, boats, and wind turbine blades.

In principle all resin systems can be mixed with all hardeners. However, there can be no binding assurances of processing parameters or end product strengths, although most may be expected to lie within the hardeners range of properties.

For example, EPH 161 hardener returns similar final properties when combined with L, L 20, or L 1100 epoxy resin, but only L 20 is approved for aviation.

The mixing ratios vary with the resins' reactivities (see the following

Mischungsverhältnis Gewichtsteile <i>Mixing ratio by weight</i>	Epoxydharz L <i>Epoxy resin L</i>	Epoxydharz L 1100 <i>Epoxy resin L 1100</i>	Epoxydharz L 20 <i>Epoxy resin L 20</i>	
Härter / Hardener				
S	100 : 40	100 : 37	100 : 40	
L	100 : 40	100 : 37	100 : 40	
EPH 161	100 : 25	100 : 23	100 : 25	
EPH 294	100 : 31	100 : 30	100 : 31	
EPH 295	100 : 31	100 : 30	100 : 31	
EPH 500	100 : 63	100 : 58	100 : 63	
EPH 573	100 : 23	100 : 21	100 : 23	



Behindertensport

Foto: Bakelite

Sports for the disabled

WICHTIGE VERARBEITUNGSHINWEISE

IMPORTANT PROCESSING INFORMATION

Aufrühren

Harzkomponenten, die **Füllstoffe** enthalten (Gelcoat, Formenharz), sollten vor Gebrauch gründlich aufgerührt werden. Ein Erwärmen im Wasserbad/Mikrowelle vereinfacht die Homogenisierung.

Wichtig: Füllstoffe setzen sich ab und entmischen sich!

Dosieren

Harz- und Härterkomponenten sollten mit einer Toleranz von +/- 2 % Abweichung in **Gewichtsteilen** dosiert werden. Ansätze **unter 20 g** sind am zweckmäßigsten nach **Volumen** mittels Dosierspritze zu bestimmen.

Wichtig: Eine **höhere Härterzugabe** als vorgeschrieben ergibt **keine schnellere Härtung**, sondern nur schlechtere Eigenschaften. Ebenso lässt sich die Verarbeitungszeit durch eine geringere Härterzugabe nicht verlängern. Bei großen Abweichungen kann die Härtung ausbleiben!

Mischen

Das Mischen der Harz-/Härterkomponenten muss sehr sorgfältig geschehen. Die Rührzeit sollte minimal 60 Sekunden betragen. Einen scharfkantigen Rührspatel verwenden, um ein Abstreifen zu ermöglichen.

Wichtig: Dem Becherrand und -boden sind größte Aufmerksamkeit zu schenken. Ein mehrmaliges Abstreifen mittels Rührholz verhindert zuverlässig eine ungleichmäßige Durchmischung!

Verarbeitungsbedingungen

a.) Temperatur: Die optimale Verarbeitungstemperatur liegt zwischen 20 und 25 °C. Eine Temperatursteigerung von 10 °C halbiert die Topfzeit/verdoppelt die Reaktivität.

Wichtig: Bei höheren Verarbeitungstemperaturen sollten, vor allem bei hochreaktiven Systemen (kurze Topfzeit/kleiner 40min.), keine grösseren Mengen angemischt werden. Da die Wärmeableitung aus dem Mischgefäß sehr gering ist, wird der Behälterinhalt durch die Reaktionswärme sehr schnell erhitzt. Dabei können Temperaturen über 200 °C entstehen, bei denen die Harzmasse unter starker Rauchentwicklung verkocht. Dies trifft auch auf großvolumige Vergüsse von hochreaktiven Systemen zu.

b.) Luftfeuchtigkeit: Die Luftfeuchtigkeit während der Verarbeitung sollte 70 % rel. Luftfeuchte nicht überschreiten. Feuchte Füllstoffe können die Aushärtung ebenfalls negativ beeinflussen.

Wichtig: PU-Harze reagieren sehr stark mit der Luft - bzw. Umgebungsfeuchtigkeit unter Aufschäumen (Feuchtigkeit begrenzt auch die Haltbarkeit). EP-Harze werden durch Feuchtigkeit beschleunigt!



Stirring

Resin constituents containing **fillers** (gel coat, mould resin) should be stirred thoroughly before use. Heating these constituents in a water bath or microwave oven accelerates homogenisation.

Important: Fillers precipitate out of the mixture!

Dosing

Resin and hardener constituents should be dosed as a **ratio of weights** with $\pm 2\%$ tolerance. Formulations **under 20 g** can best be mixed as a ratio of **volumes** with the dosing injector.

Important: Adding **more hardener** than specified does **not** result in **faster curing**, but poor properties. Likewise the processing time cannot be extended when less hardener is added. On greater deviations the mixture may fail to cure!

Mixing

The resin and hardener constituents must be mixed with great care. The mixing time should not be less than sixty seconds. The constituents can be processed more thoroughly with a sharp-edged mixing spatula.

Important: The edge and base of the receptacle must be given the greatest attention. A homogeneous mixture is assured when a wooden mixing spatula is used repeatedly to remove residue on the edges and base.

Processing conditions

a.) Temperature – The optimal processing temperature is 20–25 °C. Raising the temperature by 10 °C halves the pot life and doubles the reactivity

Important: Larger quantities should not be mixed at higher processing temperatures, above all with highly reactive systems (short pot life less than forty minutes). The mixing vessel exhibits very low heat dissipation, so its contents are very quickly heated by the reaction. This can give rise to temperatures in excess of 200 °C at which the resin compound burns up emitting a great quantity of smoke. This also affects large-volume casts of highly reactive systems.

b.) Air humidity – The relative air humidity during processing should not exceed 70%. Also moist fillers can adversely affect curing.

Important: PU resins react very strongly with air and ambient humidity to produce foaming (humidity also restricts shelf life). EP resins accelerate under the action of humidity!

Lagerung

R&G Epoxydharze und Härter dürfen nur in Originalgebinden gelagert werden. Bitte beachten Sie folgendes:

- Inhaltsbezeichnung und Gefahrenhinweise müssen gut lesbar sein;
- Für die Lagerung sind umschlossene Räume erforderlich, in denen die rel. Feuchte 80% nicht überschreiten sollte;
- Die Lagertemperatur beträgt max. 25 °C und mindestens 10 °C. Kurzfristige Überschreitungen (max. 5 Stunden, max. 35 °C) sind unkritisch. Bei Temperaturüberschreitungen (auch kurzfristig) muß wegen einer möglichen Entmischungsfahr sichergestellt werden, daß der Inhalt des Gebindes wieder gut homogenisiert wird (z.B. Faßrührer, Dissolver).

Standard-Epoxydharze auf Bisphenol-A-Basis können unter bestimmten Bedingungen **krystalline Ausscheidungen** bilden. Kritisch sind **Lagertemperaturen unter 15 °C**. Durch Kälte krystallisierte Harze und Härter können nicht verarbeitet werden. Zur Wiederherstellung des flüssigen Ausgangszustandes ist eine **Erwärmung** auf 50 - 60 °C erforderlich. Die Qualität des Harzes bleibt erhalten.

Epoxydharze sind in ungeöffneter Originalpackung praktisch unbegrenzt haltbar.

Härter lassen sich in ungeöffneter Originalpackung bei 20 - 25 °C mindestens 1 Jahr lagern. Da die Härter mit dem Kohlendioxid der Luft reagieren, sollten **angebrochene Gebinde** bald verbraucht werden. Unsere Empfehlung: Harz und Härter sollten innerhalb der von R&G angegebenen Garantiezeit (jeweils 1 Jahr) aufgebraucht werden. Ist das Material über diesen Garantiezeitraum hinaus gelagert, kann es immer noch verwendet werden, wenn die Wiederholung der Eingangsanalysen eine erneute Freigabe zu lassen.

Verarbeitung

Harz und Härter sollen nur in Räumen verarbeitet werden, die sauber sind, gut gesäubert werden können, Ablufteinrichtungen besitzen und von Sozialräumen getrennt sind.

Die Harz- und Härtergebände werden nur kurzfristig für die Entnahme geöffnet. Anschließend werden die Gebinde gut verschlossen und evtl. von Harz- und Härterresten an der Außenseite gesäubert.

■ **Nur mit sauberen Werkzeugen und auf sauberen Arbeitsplätzen können reproduzierbar gute Lamine gefertigt werden!**

Die Gebindegröße sollte zweckmäßigerweise so gewählt werden, daß ein Aufbrauchen innerhalb einiger Wochen möglich ist.

Mischen

Harz und Härter müssen sorgfältig gemischt werden. Dabei ist auf die Einhaltung des vorgegebenen Mischungsverhältnisses zu achten. Die **Toleranzen beim Einwiegen** sollten **± 2 %** nicht überschreiten. Das bedeutet, daß getrenntes Einwiegen und anschließendes Zusammengeben nicht möglich ist, da in den Gefäßen undefinierbare Mengen Harz und Härter zurückbleiben. Die Mischung erfolgt daher entweder, indem der Härter in das Harz eingewogen wird, oder indem mit einer Dosier- und Mischanlage beide Materialien vereinigt werden.

Mengen bis ca. 20 g können mit herkömmlichen Wagen nicht ausreichend genau dosiert werden. Selbst elektronische Briefwaagen können eine Toleranz von $\pm 1 - 2$ g aufweisen.

Dies kann bei einem Kleinstansatz von z.B. 10 g Harz : 4 g Härter (MV 100:40) zu einer Abweichung von 50% vom richtigen Mischungsverhältnis führen. Denn statt 4 g Härter auf der Anzeige kann der Becher 2 oder 6 g enthalten.

Storage

R&G epoxy resins and hardeners must be stored in the original packaging. In addition, please observe the following.

- *The name of the contents and the danger notices must be clearly visible and legible.*
- *The products must be stored in enclosed rooms in which the relative humidity does not exceed 80%.*
- *The storage temperature should not exceed 25 °C nor fall below 10 °C. The max value may be exceeded for no longer than five hours, as long as the max temperature does not exceed 35 °C. Temperatures below 10 °C, even for short periods, may cause the constituents to separate, so it must be ensured that the contents of the packaging are thoroughly homogenised (e.g. barrel agitator, dissolver).*

*Under certain conditions, standard bisphenol-A-based epoxy resins can form **crystalline exudates**. The **critical storage temperatures are below 15 °C**. Resins and hardeners that have crystallised under the effects of cold cannot be processed. They must be **heated** to 50 - 60 °C before they can enter the liquid state needed for further processing. The quality of the resin is unaffected.*

Epoxy resins can be stored for a virtually indefinite period in the unopened original packaging.

*In the unopened original packaging, **hardeners** can be stored for at least one year at 20 - 25 °C. Hardeners react with atmospheric carbon dioxide, so the contents of an **opened packaging** should be quickly consumed. We recommend that the resin and hardeners are consumed within the warranty period granted by R&G (one year each). If the materials are stored for longer than this warranty period, they may still be used when the results from the second analysis of the goods permit their approval for use.*

Processing

Resin and hardeners should be processed only in rooms that are clean, allow thorough cleaning, are fitted with ventilating systems, and are isolated from social rooms.

The packaging for the resin and hardeners is opened only for the time taken to withdraw the required quantity of contents. Afterwards the packaging must be completely sealed and its outside cleaned of any resin or hardener residue.

■ **Laminates of reproducible high quality can be manufactured only with clean tools at clean workplaces.**

The size of the packaging should be chosen so that the contents can be consumed within a few weeks.

Mixing

*The resin and hardeners must be mixed with care and the specified mixing ratio strictly observed. The **weights of the constituents** must not exceed the **tolerance range of ±2%**. This means that weighing and mixing cannot take place separately because indefinable quantities of resin and hardener will then remain in the respective receptacles. So the constituents are mixed in a process whereby either the hardener is weighed into the resin or the two materials are combined with a dosing and mixing system.*

***Quantities up to 20 g** cannot be dosed with adequate precision on customary carriages. Even electronic letter scales can exhibit tolerances of $\pm 1 - 2$ g. In the case of smallest-scale mixtures of, say, 10 g resin to 4 g hardener (i.e. a mixing ratio of 100:40), this circumstance can lead to a deviation of 50% from the correct mixing ratio. Instead of 4 g of hardener as shown on the display, the beaker may contain 2 or 6 g.*



Kleinstmengen sollten daher mit Einwegspritzen nach **Volumen** dosiert werden. Dabei ist zu beachten: **Gewichtsteile sind nicht gleich Volumenteile**, da die Komponenten ein unterschiedliches spezifisches Gewicht aufweisen (Harze um 1,1 und Härter um 1,0 g/cm³).

Eine höhere Härterzugabe als vorgeschrieben ergibt keine schnellere Härtung, sondern nur schlechtere Eigenschaften!

Ebenso läßt sich die Verarbeitungszeit durch eine geringere Härterzugabe nicht verlängern!

Bei Abweichungen im MV verschlechtern sich die Formstoffeigenschaften. Bei großen Abweichungen kann die Härtung völlig ausbleiben. Es entstehen dann nur Molekülkettenverlängerungen, Verzweigungen oder Teilvernetzungen, die für FVV unbrauchbar sind.

Füllstoffe und Zusätze

Die Eigenschaften von Epoxydharzen können durch verschiedene Zusätze verbessert werden. Pigmente werden zur Farbgebung, Füllstoffe zur Erhöhung der mechanischen Festigkeiten des Formstoffes verwendet. Wir empfehlen die Verwendung fertiger **Pigment-Farbpasten** (Epoxydfarbpasten), die sich leicht und ohne zu verklumpen einmischen lassen.

Füllstoffe sind z.B. Glasschnitzel, Thixotropiermittel, Baumwollflocken und Glass-Bubbles. Füllstoffe können kugel-, stäbchen- oder plättchenförmig sein.

Beim Mischen der Komponenten empfehlen wir eine bestimmte **Reihenfolge**: **Füllstoffe** werden dem fertigen Harz-Härter-Gemisch zugesetzt. Das Mischungsverhältnis wird nicht verändert. Vor allem Metallpulver dürfen nicht direkt in die Härterkomponente gegeben werden, da sie Verdickungen und harte Bodenabsetzungen bilden. Die Zugabe **reaktiver Zusätze** sollte **nicht** in die fertige Harz/Härter-Mischung erfolgen, da sie das Mischungsverhältnis verändern:

Komponenten, die **Epoxydgruppen** enthalten (Epoxydfarbpasten, Reaktivverdünner), werden in die **Harzkomponente** gemischt.

Aminhaltige Zusätze wie z.B. Haftvermittler (Aminsilane) dürfen demzufolge nur der Härterkomponente zugesetzt werden.

Mischtabelle

Eine Mischtablette zum Aushang am Arbeitsplatz befindet sich hinten im Handbuch. Dort finden Sie auf einen Blick das entsprechende Mischungsverhältnis für verschiedene Ansatzgrößen.

Das Rühren

Kleine Mengen bis 500 g sollten gründlich von Hand 1 - 2 Minuten gerührt werden. Dazu empfehlen wir Holzrührstäbchen (Bestell-Nr. 325 100-X). Größere Ansätze lassen sich nur noch mittels Mischpropeller und Bohrmaschine vermischen. Trotz maschineller, intensiver Vermischung der Komponenten sollte der Boden und die Wandung des Mischgefäßes mit einer sauberen Holzlatte abgestreift werden.

Arbeitsgeräte und Mischgefäße

Die für Harz und Härter verwendeten Gefäße, Geräte und Werkzeuge müssen sauber sein. Es darf sich auch kein Öl-, Wachs- oder Fettfilm an den Teilen befinden. Arbeitsgeräte, mit denen Trennmittel gehandhabt werden, sind getrennt von den Arbeitsgeräten für Harz und Härter zu halten. Um die Verschmutzungsgefahr weiter ausschließen zu können, sollten Harz, Härter oder die Mischung abgedeckt werden.

*Smallest-scale quantities should therefore be dosed according to **volume** with disposable injectors. At the same time, it is important to note that **parts by weight are not the same as parts by volume**, because the constituents exhibit different specific gravities (resins about 1.1 g/cm³, hardeners about 1.0 g/cm³).*

A greater proportion of hardener than specified does not yield faster curing, but worse properties.

Likewise, a lower proportion of hardener does not extend the processing time!

Deviations in the mixing ratio cause deterioration in the properties of the moulded material. And greater deviations can even prevent the curing process from taking place. The outcome is extended molecular chains, branching, or incomplete cross-linking that are unsuitable for FCs.

Fillers and additives

*Various additives can be used to enhance the properties of epoxy resins. Pigments are used for coloration, and fillers for boosting the mechanical strengths of the moulded materials. We recommend the use of ready-made **pigment pastes** (epoxy colour pastes) that can be mixed easily and without clumping.*

*Some examples of **fillers** are chopped glass fibres, thixotropy-enhancing agents, cotton flock, and glass bubbles. Fillers can be spherical, rod-shaped, or laminate.*

*We recommend the following particular **sequence** for mixing the constituents. **Fillers** are added to the ready-made mixture of resin and hardener. The mixing ratio remains unchanged. Above all, metal powder must not be added directly to the hardener constituent, because the viscosity will increase and a hard sediment will form on the base. **Reactive additives** should **not** be added to the ready-made mixture of resin and hardener because this will change the mixing ratio. Instead:*

*Constituents containing **epoxy groups** (epoxy colour pastes, reactive diluents) are mixed in the **resin constituent**.*

*Accordingly, additives containing **amines**, such as coupling agents (aminosilanes), must be added to the **hardener constituent** only.*

Table of mixing ratios

A table of mixing ratios for pinning up at the workplace is annexed to this handbook. There you will find an overview of the corresponding mixing ratios for various initial quantities.

The mixing process

Small quantities up to 500 g should be mixed thoroughly by hand for one to two minutes. We recommend the use of wooden stirring rods (order no. 325 100-X). Larger quantities can be processed only with a circulation agitator and drilling machine. Despite this intensive mechanical mixing of the constituents, a clean wooden slat should be used to wipe down the base and walls of the mixing vessel.

Tools and mixing vessels

The vessels, equipment, and tools used for the resin and hardener must be clean. There must be no film of oil, wax, or grease adhering to any of the parts. The tools and equipment used to handle release agents must be kept separate from the tools and equipment used for the resin and hardener. The risk of contamination can be reduced even further when the resin, hardener, and mixture are covered.

Es sollten flache Mischgefäße mit glatter Wand und glattem Boden verwendet werden. Am besten eignen sich PE-Mischbecher (Bestell-Nr. 320 100-X oder 320 105-X). Einweggefäße sind aus arbeitshygienischen Gründen von der Berufsgenossenschaft Chemie empfohlen. Anhaftende, vollständig gehärtete Harzreste sind umweltneutral, eine Deponierung mit dem Hausmüll- oder Gewerbemüll ist zulässig. Prinzipiell lassen sich auch mehrfach verwendbare Kunststoffgefäße (z.B. aus PE) einsetzen.

Die Verarbeitungszeit

Die Gebrauchsdauer (Topfzeit, Verarbeitungszeit) der Mischung ist abhängig von der Ansatzgröße (je größer, desto schneller) und von der Temperaturvorgeschichte.

Größere Mengen

... verkürzen aufgrund exothermer Reaktion (Reaktionswärme) die offene Zeit; sie sollten in flache Schalen umgefüllt werden, um einen Wärmestau zu vermeiden.

Eine zügige Verarbeitung ist erforderlich.

Kleine Ansätze

... unter 100 g haben eine verlängerte Topfzeit.

Wenn die Temperatur im Mischgefäß merklich ansteigt und 40°C (Fiebertemperatur!) überschritten hat, darf die Mischung für hochwertige Laminare nicht mehr verwendet werden, da eine gleichmäßige Laminatherstellung nicht gewährleistet ist.

Verdünner

Epoxyd-Laminierharze von R&G sind lösemittelfrei. Die für die Tränkung von Verstärkungsfasern notwendige niedrige Verarbeitungsviskosität wird mit Reaktivverdünnern eingestellt. Reaktivverdünner (RV) sind epoxydgruppenhaltige, niedermolekulare Verbindungen, die mit aushärten.

R&G Epoxydharze sind hauptsächlich difunktionell verdünnt. Difunktionelle RV verhindern gegenüber monofunktionellen RV einen Molekülkettenabbruch, so daß die Festigkeitswerte des Harzes sowie die Wärmeformbeständigkeit weitgehend erhalten bleiben. In Sonderfällen kann die Viskosität durch eine weitere Zugabe von R&G Reaktiv-Verdünner eingestellt werden. Mit steigender Menge wird jedoch die Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit der Formstoffe herabgesetzt.

Für **dünne Schichten** bis etwa 1 mm können als Verdünnung verschiedene Alkohole, Ketone und Kohlenwasserstoffe verwendet werden. Es sollte sich um wasserfreie, chemisch reine Lösungsmittel handeln. Bewährt haben sich Aceton und Methanol (beide feuergefährlich!).

Die Viskosität

Die Fließfähigkeit von Harzen und Härtern (ausgenommen gefüllte Systeme, die z.B. Thixotropiermittel enthalten) ist in der Einheit **mPa·s** (Millipascal x Sekunden) angegeben.

Diese, mit einem Rotationsviskosimeter bestimmte dynamische Viskosität, läßt sich am besten einschätzen, wenn man die Werte bekannter Flüssigkeiten betrachtet.

Flat mixing vessels with smooth walls and base should be used. Ideal are PE mixing cups (order no. 320 100-X or 320 105-X). For industrial hygiene reasons, the professional association of chemical workers Berufsgenossenschaft Chemie recommends disposable receptacles. Adherent residue of completely cured resin is environmentally neutral and its disposal is permitted in solid domestic or commercial waste. In principle, reusable plastic receptacles (e.g. of PE) can also be used.

The processing time

The service life (pot life, processing time) of the mixture is defined by the initial quantity (the larger, the faster) and by its history of experienced temperature effects.

Larger quantities

The effects of their exothermal reaction (reaction heat) serve to reduce the open time. They should be transferred to flat dishes to prevent heat accumulation.

They must be processed quickly.

Small quantities

Quantities under 100 g have an extended pot life.

If the temperature in the mixing vessel should rise noticeably and exceed 40 °C, then the mixture may no longer be used for high-quality laminates. Unvarying quality in the manufacture of laminates can then no longer be guaranteed.

Diluents

The epoxy laminating resins from R&G are free of solvents. The low processing viscosity needed to impregnate reinforcing fibres is obtained with reactive diluents. Reactive diluents are low-molecular compounds containing epoxy groups that also cure together with the resin.

R&G epoxy resins are primarily diluted with difunctional compounds. In contrast to monofunctional reactive diluents, difunctional reactive diluents prevent the molecular chains from breaking so that the resin's mechanical properties as well as its heat distortion temperature are retained to a great extent. In special cases, the viscosity can be modified by a further addition of R&G reactive diluent. The greater the added quantity, however, the greater the sacrifice to the strength and heat distortion temperature of the moulded materials.

*In the case of **thin layers** up to about 1 mm, various alcohols, ketones, and hydrocarbons can be used as the diluent. These should be anhydrous, chemically pure solvents. Acetone and methanol (although both highly flammable!) have proved reliable in practice.*

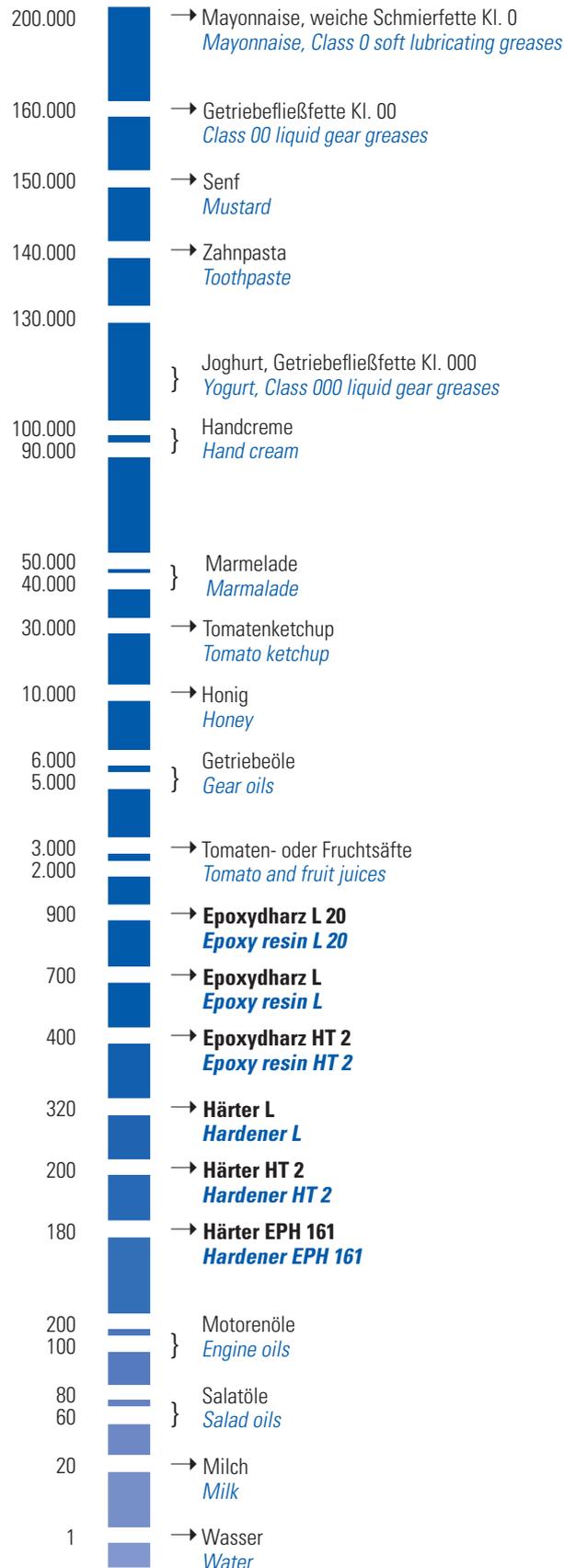
The viscosity

*The flowability of resins and hardeners (with the exception of filled systems containing, for example, thixotropy-enhancing agents) is given the unit **mPa·s** (or millipascal x seconds).*

This dynamic viscosity measured with a rotational viscometer can best be assessed when it is compared with the values known from other liquids.

Viskositätsbereiche
Viscosity ranges

Medien
Media



nach Wilhelm Endlich „kleben & dichten“ (Vieweg-Verlag)
Data obtained from Wilhelm Endlich's "kleben & dichten" (Vieweg-Verlag)

Laminatherstellung

Der günstigste Verarbeitungstemperaturbereich liegt zwischen 25 und 35 °C im Laminat. Die relative Luftfeuchtigkeit sollte 70 % nicht überschreiten.

Niedrige Temperaturen des Harzes und kalte Formoberflächen verlängern die Verarbeitungs-, Gelier- und Aushärtezeit. Unter 15 °C verläuft die Reaktion sehr gebremst, unter 10 °C kommt sie schnell zum Stillstand. Eine vollständige Durchhärtung ist dann nur noch möglich, wenn die Reaktion durch Erwärmen auf 20 - 30 °C erneut gestartet wird.

Eine Ausnahme bilden sehr reaktive Systeme wie z.B. das 5-Minuten-Epoxy, das als Klebharz auch bei Temperaturen um den Gefrierpunkt verwendet werden kann.

Höhere Temperaturen beschleunigen die Reaktion. Bei einer Erwärmung von 20 auf 30 °C steht nur noch die halbe Verarbeitungszeit zur Verfügung.

Die **Raumluft** muß staubfrei sein. Eine Filterung der Zuluft ist jedoch nur dann notwendig, wenn in der Umgebung intensiv Stäube emittiert werden. Die mechanische Bearbeitung von Laminaten darf nicht im gleichen Fabrikationsraum erfolgen wie die Naßlaminiierung. Ist die räumliche Trennung nicht möglich, muß es eine zeitliche Trennung geben. Vor dem Laminiieren ist dann der Bereich besonders gründlich zu reinigen.

Bei der Herstellung von hochwertigen Laminaten müssen Handschuhe getragen werden, damit an Klebstellen keine Fettschichten auftreten können.

Härtungstemperaturen

Die meisten Systeme werden kalt gehärtet (bei Raumtemperatur ca. 20 °C). Die Formstoffe erreichen bereits nach ca. 24 Stunden eine gute Festigkeit, härten aber noch einige Tage nach und gewinnen dabei an Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit.

Luftfahrtzugelassene Harze sind teilweise kalt anhärtend. Bauteile daraus können nach einer Anhärtung von 24 Stunden bei 20 °C entformt und bearbeitet werden. Optimale Eigenschaften ergeben sich erst nach einer zusätzlichen Warmhärtung. Speziell bei sicherheitsrelevanten Bauteilen in der Luftfahrt sind die Tempervorschriften einzuhalten.

Tempereinrichtungen

Alle Harze erreichen durch eine Wärmenachbehandlung bessere Festigkeitswerte. Der Grund dafür ist der Aushärtungsgrad, der bei Raumtemperatur keine 100 %, sondern anfänglich meist nur 85 - 90 % erreicht. Dieser Wert verbessert sich zwar im Ablauf von 7 Tagen auf 90 - 95 %, kann jedoch durch höhere Härtungstemperaturen auf bis zu 100 % gesteigert werden. Dadurch ergeben sich optimale Formstoffeigenschaften. Durch die höhere Vernetzungsdichte steigt die Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit beträchtlich an.

Ausführlichere Hinweise zum **Tempern** finden Sie im Handbuch auf Seite 1.62 ff.

Manufacture of laminates

The ideal processing temperatures range from 25 to 35 °C in the laminate. The relative humidity should not exceed 70 %.

Low temperatures in the resin and cold mould surfaces increase the processing, gelling, and curing times. Under 15 °C the reaction is extremely retarded, and under 10 °C it quickly comes to a stop. Full curing is possible only when the reaction is reactivated at a temperature of 20 - 30 °C.

The exceptions are highly reactive systems, for example the five-minute epoxy, which can be used as an adhesive resin at temperatures about the freezing point.

Higher temperatures accelerate the reaction. Raising the temperature from 20 to 30 °C cuts the processing time by half.

The air in the processing environment must be free of dust. However, the supply air needs to be filtered only when the environment generates intensive levels of dust. Laminates must not be machined in the same production room as the wet-in-wet lamination. If it is not possible to separate the two processes physically, then they must be performed in sequence after a certain time has passed. The area must be cleaned with particular thoroughness before work is started on the lamination.

When high-quality laminates are being manufactured, gloves must be worn to prevent grease from coating the adhesive sites.

Curing temperatures

Most systems are cold-cured (at room temperature of about 20 °C). The moulded materials develop good strength properties within just twenty-four hours, yet continue to cure for a number of days afterwards, gaining in strength and heat distortion temperature.

Some resins approved for aviation undergo a preliminary phase of cold curing. Components made of these resins can be demoulded and machined after a preliminary phase of cold curing over twenty-four hours at 20 °C. Yet the optimal properties are first obtained after an additional period of hot curing. The annealing regulations must be observed especially for components contributing to safety in aviation.

Annealing systems

All resins obtain improved strength properties after a post-heat treatment. The reason lies in the degree of curing that does not reach the 100 % mark at room temperature, but in most cases an initial value of only 85 - 90 %. Although this value improves in the course of seven days to 90 - 95 %, only higher curing temperatures can raise this to 100 %. The result is the optimal properties of the moulded material. And the greater cross-link density contributes considerably to an increase in strength and heat distortion temperature.

*More detailed information on **annealing** can be found on pages 1.62 ff of this handbook.*

Allgemeine Daten

für gehärtete Epoxydharze

General specifications

for cured epoxy resins

Wärmeausdehnungskoeffizient <i>Coefficient of thermal expansion</i>	60 - 70 x 10 ⁻⁶ K
Wärmeleitfähigkeit <i>Thermal conductivity</i>	0,52 W/mK
Oberflächenwiderstand <i>Surface resistance</i>	10 ¹³ Ω
spez. Durchgangswiderstand <i>Volume resistivity</i>	10 ¹⁵ Ω cm

**Wärmeleitfähigkeit
verschiedener
Werkstoffe**
**Thermal conductivity
of various
materials**

Werkstoff <i>Material</i>	Wert in (W/m·K) <i>Thermal conductivity (W/m·K)</i>
Aluminium <i>Aluminium</i>	230
Duraluminium <i>Duralumin</i>	170
Zink <i>Zinc</i>	112
Eisen <i>Iron</i>	172
Stahl <i>Steel</i>	50,2
V2A-Stahl <i>V2A steel</i>	14
Epoxydharz gefüllt mit Alu oder Graphit <i>Epoxy resin and aluminium or graphite</i>	1,6 - 2,6
Epoxydharz <i>Epoxy resin</i>	0,52
UP-Laminat <i>UP laminate</i>	0,31
SFK (Aramidfaser) <i>SRP (aramid fibre)</i>	0,13
GFK (Glasfaser) <i>GRP (glass fibre)</i>	0,8
CFK (Kohlenstofffaser) <i>CRP (carbon fibre)</i>	15 - 40
E-Glas, R-Glas, S-Glas <i>E glass, R glass, S glass</i>	1
Aramidfaser (HM) <i>Aramid fibre (HM)</i>	0,04 - 0,05
Kohlenstofffaser <i>Carbon fibre</i>	17
Eichenholz <i>Oak</i>	0,186
Tannenholz <i>Fir</i>	0,128
Glasgewebe <i>Glass fabric</i>	0,9

Fehler Problem	Ursache Cause	Abhilfe Remedy
Harz bleibt weich und klebrig <i>Resin stays soft and sticky</i>	Falsches Mischungsverhältnis oder Dosierfehler bei kleinen Ansätzen von z.B. nur 10 g (Unge- nauigkeit der Waage), zu niedrige Temperatur. <i>Incorrect mixing ratio or incorrect dosing for initial quantities of e.g. only 10 g (weighing imprecision); temperature too low.</i>	Zusätzliche Wärmebehandlung der Bauteile. War die Abweichung nicht zu groß, härten die Formstoffe bei 30 - 50 °C innerhalb einiger Stunden durch. <i>The component needs additional heat treatment. If the deviation is not too large, the moulded materials cure fully at 30 - 50 °C within a few hours.</i>
Harz bleibt stellenweise weich und klebrig <i>Resin stays soft and sticky in places</i>	Schlechte Vermischung von Harz und Härter beim Anrühren <i>Resin and hardener not mixed properly.</i>	¹⁾ Nachhärtung bei erhöhter Temperatur <i>¹⁾ Post-curing at increased temperature.</i>
Topfzeit weicht von den Angaben ab <i>Pot life inconsistent with the specifications</i>	Ansatzmenge kleiner als 100 g = längere Topfzeit. Ansatzmenge größer als 100 g = kürzere Topfzeit. Verarbeitungstemperatur zu hoch (beschleunigt) oder zu niedrig (verzögert oder verhindert Här- tung). <i>Initial quantity less than 100 g = longer pot life; initial quantity greater than 100 g = shorter pot life. Processing temperature too high (accelerates) or too low (retards or prevents curing).</i>	Auf optimale Verarbeitungstemperatur (20 - 22 °C) achten <i>Note the optimal processing temperature (20 - 22 °C).</i>
Harz härtet in der angegebenen Aushärtezeit nicht durch <i>Resin does not cure fully in the specified curing time</i>	Verarbeitungs- und Härtungstemperatur zu niedrig; sehr geringe Schichtstärken. <i>Processing and curing temperature too low; plies very thin.</i>	Bauteile warmhärten Harz-, Form- und Raumtemperatur sollten mög- lichst 20 °C betragen. <i>Hot-cure components. Resin, mould, and ambient temperature should be 20 °C wherever possible.</i>
Stark eingedicktes Harz härtet nicht richtig durch <i>Highly inspissated resin does not cure properly</i>	Füllstoff wurde vor der Härterzugabe ins Harz gemischt. Dadurch kann sich das Mischungs- verhältnis ändern. <i>The filler was mixed into the resin before the hardener was added, and the mixing ratio was changed as a result.</i>	¹⁾ Bauteil warmhärten Füllstoff nur in das fertig verrührte Harz/Härter- Gemisch geben <i>¹⁾ Hot-cure the component. Add the filler to the ready-mixed system of hardener and resin only.</i>
Klebrige oder schmierige Oberfläche <i>Sticky or greasy surface</i>	Falsches Mischungsverhältnis Hohe Luftfeuchtigkeit (systembedingt) <i>Incorrect mixing ratio; high air humidity (applies only to some systems).</i>	¹⁾ Wärmenachbehandlung Abwaschen mit Lösemittel (Aceton) Luftfeuchtigkeit beachten <i>¹⁾ Post-heat treatment. Wash off with solvent (acetone). Note the air humidity.</i>
Klebestellen platzen bei Belastung ab <i>Joins split when loaded</i>	Mangelhafte Untergrundvorbehandlung <i>Inadequate pretreatment of the underlying surface.</i>	Fügeteile anschleifen und entfetten <i>Grind and degrease the parts to be joined.</i>
Laminate zeigen bei Belastung Weißbruch <i>Laminates exhibit stress whitening when loaded</i>	Sprödes Harzsystem Ungeeignetes Glasgewebe (oft 2. Wahl mit Fehlern im Haftvermittler/Finish) <i>Brittle resin system. Unsuitable glass fabric (often second choice with defects in the coupling agent or finish).</i>	¹⁾ Bauteil warmhärten Gewebe 1. Wahl bzw. Luftfahrtnorm verwenden oder 2. Wahl vor Einsatz testen <i>¹⁾ Hot-cure the component. Use first-choice fabric or standardised fabric approved for aviation, or test second-choice fabric for suitability.</i>

¹⁾ Abhilfe nur bedingt möglich.
This remedy is possible only within certain restrictions.

<p>Farbschwankungen beim Einfärben</p> <p><i>Uneven colouring</i></p>	<p>Eigenfarbe von Harz und Härter beeinflusst den Tonwert.</p> <p><i>The resin's and/or hardener's own colour influences the hue.</i></p>	<p>Klare Systeme oder fertige eingefärbte Deckschichtharze verwenden (speziell Farbton weiß).</p> <p><i>Use transparent systems or ready-coloured overlay resins (specifically white hues).</i></p>
<p>Klare oder weiß eingefärbte Bauteile dunkeln nach</p> <p><i>Transparent or white components darken</i></p>	<p>Vergilbung durch ultraviolettes Licht (Sonnenlicht).</p> <p><i>Ultraviolet light (sunlight) causes yellowing.</i></p>	<p>Lackieren der Oberfläche. UV-stabilisierte Deckschichtharze verwenden.</p> <p><i>Coat the surfaces, or use UV-stabilised overlay resins.</i></p>
<p>Kleine Löcher (Pinholes) in der Oberfläche</p> <p><i>Small holes (so-called pinholes) in the surface</i></p>	<p>Bauteil ohne Deckschicht direkt in die Form laminiert.</p> <p><i>The component was laminated without overlay directly in the mould.</i></p>	<p>Spachteln, füllern, schleifen. Besser Deckschichtharz als erste Schicht vorstreichen/spritzen.</p> <p><i>Fill and grind. A better solution is to brush or spray overlay resin as the first layer.</i></p>
<p>Schlechte Verbindung von Gewebelagen untereinander, lassen sich abschälen</p> <p><i>Fabric plies are badly joined and can be pulled apart</i></p>	<p>Alte Schicht war bereits gehärtet; Laminat aus groben Geweben oder für die Kunststoffverstärkung ungeeignete Glasgewebe.</p> <p><i>The old ply had already cured. Laminate of coarse fabric or glass fabric unsuitable for reinforcing plastics.</i></p>	<p>Laminat naß-in-naß aufbauen, sonst gehärtete Schicht anschleifen. Zwischen sehr groben Geweben eine Lage feineres Gewebe einarbeiten. Nur Gewebe zur Kunststoffverstärkung verwenden, da sonst keine gute Verbindung mit dem Reaktionsharz erfolgt. Nur trockene Verstärkungsgewebe verwenden.</p> <p><i>Lay up laminates "wet-in-wet", or grind the cured ply. Integrate a ply of finer fabric between very coarse fabrics. Use only fabrics for reinforcing plastics, otherwise there will be no good adhesion with the reactive resin. Use only dry reinforcing fabrics.</i></p>
<p>Schlechte Verbindung des Laminates zum UP-Vorgelat bzw. unvollständige Härtung</p> <p><i>Poor joining between the laminate and the UP pre-gel, or curing incomplete</i></p>	<p>Vorgelat und Epoxydharz wurde naß-in-naß verarbeitet.</p> <p><i>Pre-gel and epoxy resin were laid up wet-in-wet.</i></p>	<p>Vorgelat klebfrei angelieren lassen (min. 3 Std.), besser 12 Std. bei 20 °C aushärten.</p> <p><i>The pre-gel must lose its stickiness (after at least three hours). A better solution is to cure it at 20 °C for twelve hours.</i></p>
<p>Schlieren im Harz</p> <p><i>Streaks in the resin</i></p>	<p>Meist feuchte Füllstoffe oder zu hohe Luftfeuchtigkeit.</p> <p><i>The most probable cause is wet fillers or too high air humidity.</i></p>	<p>Füllstoffe, auch Glas- und Aramidgewebe ggf. vor der Verarbeitung im Ofen bei 50 - 100 °C mehrere Stunden trocknen.</p> <p><i>If necessary, dry fillers, including glass and aramid fabrics, for several hours at 50 - 100 °C in an oven before they are processed.</i></p>
<p>Gießlinge, Füll- oder Preßmassen „verkochen“</p> <p><i>Mouldings, filling compounds, or moulding compounds "burn up"</i></p>	<p>Zu großes Volumen bei zu reaktivem Härter und daher Wärmestau in der Mischung; kann durch manche Füllstoffe (z.B. Glass-Bubbles) noch verstärkt werden.</p> <p><i>Too large a volume and too reactive hardeners cause heat to build up in the mixture. This effect can be promoted further by a number of fillers (e.g. glass bubbles).</i></p>	<p>Ansatz sofort abkühlen, falls möglich in eine flache Schale umgießen; Langsame Härter verwenden oder mehrere Schichten vergießen; Füllstoffe mit eingeschlossener Luft (Glass-Bubbles) begünstigen einen Wärmestau, metallische Füllstoffe wie Alupulver leiten Wärme besser ab.</p> <p><i>Immediately cool the quantity, if possible transferring it to a shallow dish. Use slow hardeners, or lay up several plies. Fillers with air inclusions (glass bubbles) promote the build-up of heat: a better solution is a metallic filler such as aluminium powder which conducts away heat.</i></p>



Dr.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Jorden



Universität-GH Paderborn

Die richtige Temperatur ist ein entscheidender Faktor bei der Verwendung von Epoxydharzen. Dieses gilt sowohl für die Lagerung und Verarbeitung als auch für die Aushärtung und Nachbehandlung der Harze und Formstoffe. Im Folgenden werden auf einfache und verständliche Weise einige nützliche Tips gegeben, wie durch die richtige Temperaturwahl und die Beachtung einiger Grundregeln die Verarbeitung von Epoxydharzen vereinfacht und die Produktqualität optimiert werden kann.

Lagerung von Epoxydharzen

Epoxydharze sollten bei einer Temperatur zwischen 15 und 25 °C gelagert werden. Bei längerer Lagerung unter 15 °C können Harze und Härter kristallisieren. Bei dieser Kristallisation findet eine Entmischung der einzelnen Komponenten statt. Deshalb müssen vor dem nächsten Gebrauch und auch vor dem Abfüllen diese Kristallisationen durch Erwärmung und unter ständigem Rühren wieder aufgelöst werden. Nach vollständiger Auflösung der Kristallisationen sind Harze und Härter aber ohne Qualitätsverlust weiter verwendbar.

Verarbeitung von Epoxydharzen

Die Verarbeitung kalthärtender Epoxydharzsysteme erfolgt bei Raumtemperatur (20 - 25 °C). Durch eine gezielte Temperaturwahl können sowohl die Eigenschaften der Harze bei der Verarbeitung als auch die Eigenschaften der ausgehärteten Formstoffe entscheidend beeinflusst werden. Tendenziell wirken sich Veränderungen der Temperatur bei der Verarbeitung wie folgt aus:

Temperaturerhöhung

- Verminderung der Viskosität (das Harz wird dünnflüssiger)
- Bessere Benetzbarkeit der Fasern
- Verkürzung der Verarbeitungszeit

Umgekehrt bewirkt eine verringerte Temperatur eine Viskositätssteigerung mit der damit verbundenen schlechteren Benetzbarkeit der Fasern. Andererseits kann bei niedrigen Temperaturen aber auch die Verarbeitungszeit verlängert werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß bei Temperaturen unter 15 °C der Härtingsprozeß nur noch sehr langsam verläuft und dünnwandige Lamine bei zu niedrigen Temperaturen zum Teil nach mehreren Tagen noch nicht ausgehärtet sind.

Vorteile einer geringfügig erhöhten Verarbeitungstemperatur

Insbesondere bei der Verarbeitung im Handlaminierverfahren ist eine sehr geringe Viskosität von Vorteil, da sich Fasern und Gewebe mit dünnflüssigen Harzen deutlich besser durchtränken lassen. Die Verminderung der Viskosität mit Reaktivverdünnern oder Lösungsmitteln ist aber nur bedingt möglich und kann zum Abbruch der Molekülketten führen. Durch eine Temperatursteigerung von nur 5 °C kann hingegen die **Viskosität nahezu halbiert** werden, ohne daß dabei die Vernetzung negativ beeinträchtigt wird.

Für eine optimale Verarbeitbarkeit können das Harz und die Formen angewärmt werden!

The right temperature is a crucial factor wherever epoxy resins are used. This applies not only to the storage and processing, but also to the curing and post-treatment of the resins and moulded materials. The following presents in a simple and understandable format a number of useful tips on how the correct choice of temperature and the observance of a number of fundamental rules can simplify the processing of epoxy resins and optimise the product quality.

Storing epoxy resins

Epoxy resins should be stored at a temperature between 15 and 25 °C. For longer storage periods at temperatures below 15 °C, resins and hardeners can crystallise, with the result that the mixture separates into its individual constituents. For this reason, any crystallisation must first be dissolved by heating and constant mixing before the mixture is processed. This complete dissolution of crystallisation does not give rise to any losses in the resins' or hardeners' processing quality.

Processing epoxy resins

Cold-curing epoxy resin systems are processed at room temperature (20 - 25 °C).

The choice of a specific temperature can have a decisive influence on the properties of both the resins when processed and the cured moulded materials. Changes in temperature tend to affect the processing as follows:

Increasing the temperature

- Reduces the viscosity (the resin flows more freely)
- Improves the fibres' wetting properties
- Shortens the processing time

Reducing the temperature, as can be expected, increases the viscosity, with the result that the fibres are not as susceptible to wetting. On the other hand, low temperatures can increase the processing times. What must be noted in this respect is that at temperatures under 15 °C the curing process takes place only very slowly and, at too low temperatures, thin-walled laminates cannot cure completely even after several days.

Advantages of a slightly raised processing temperature

*A very low viscosity is of particular advantage in hand lay-up operations because low-viscosity resins can better impregnate fibres and fabrics. Reducing the viscosity with reactive diluents or solvents, however, is possible only within certain restrictions and can cause the molecular chains to break. On the other hand, an increase in temperature of only 5 °C can **reduce the viscosity by almost 50%** without having any adverse effects on the cross-linking.*

The optimal processability can be obtained when the resin and moulds are heated up.

Die zu verarbeitenden Harze sollten eine Temperatur von mindestens 25 °C haben. Dazu kann man die Gebinde vor Gebrauch z.B. im Wasserbad erwärmen. Eine weitere Erwärmung auf bis zu 35 °C verringert die Viskosität noch einmal deutlich.

Allerdings muß man hier beachten, daß eine Temperaturerhöhung um 10 °C die Verarbeitungszeit der Harze halbiert. Deshalb sollten angewärmte Harze nur in kleinen Mengen angesetzt und zügig verarbeitet werden. Da das Harz in dünnen Schichten sehr schnell abkühlt, sollten zudem auch die Formen angewärmt werden. Dieses kann einfach geschehen, indem man die Formen bis unmittelbar vor dem Gebrauch in einem warmen Raum lagert. Formen aus Laminierkeramik halten dabei aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität besonders gut ihre Temperatur.

Aushärtung von Epoxydharzen

Die Aushärtung von Epoxydharzen ist ein chemischer Prozeß, bei dem die Moleküle der Einzelkomponenten miteinander reagieren und dabei lange, räumlich vernetzte Molekülketten bilden. Bei Epoxydharzen erfolgt der Härtingsprozeß als Polyaddition, d.h. für jeden Baustein im Harz ist immer auch eine bestimmte Anzahl von Bausteinen der Härterkomponente erforderlich. Wird das Mischungsverhältnis nicht genau eingehalten, bleiben unvernetzte Bausteine einer Komponente übrig. Diese unvollständige Vernetzung kann zu verminderten Festigkeitseigenschaften der Formstoffe führen.

Auch wenn das Mischungsverhältnis genau eingehalten wurde, werden wie bei jeder chemischen Reaktion einzelne Moleküle übrig bleiben, die keinen Reaktionspartner gefunden haben. Um optimale Festigkeitseigenschaften erzielen zu können, muß aber ein möglichst hoher Vernetzungsgrad erreicht werden. Zusätzlich zur genauen Einhaltung des Mischungsverhältnisses kann durch eine gezielte Erwärmung (Temperung) der Vernetzungsgrad auf annähernd 100% gesteigert werden. Die Erwärmung muß aber vorsichtig und gezielt erfolgen, damit sich kein Verzug einstellt. Dabei werden durch die Temperung die mechanische Festigkeit und insbesondere auch die Wärmeformbeständigkeit der Harze erhöht. Aus diesen Gründen ist z.B. für Strukturbauteile im Flugzeugbau eine Temperung zwingend vorgeschrieben.

Temperung von Faserverbundbauteilen

Bei der Verwendung kalt aushärtender Epoxydharzsysteme können die Bauteile zunächst bei Raumtemperatur aushärten, entformt und ggf. nachbearbeitet werden. Eine Temperung sollte innerhalb der nächsten Tage erfolgen. Dabei werden die Bauteile in einem geeigneten Raum verzugsfrei gelagert und langsam erwärmt. Die Temperaturerhöhung sollte 10 °C pro Stunde nicht überschreiten. Wenn die Zieltemperatur erreicht ist, muß diese mindestens 10 Stunden gehalten werden. Für die von R&G vertriebenen Epoxydharzsysteme gilt bis zu einer gewissen Temperatur ein Temperaturvorlauf von 30 °C. Das bedeutet, daß Bauteile die z.B. bei 55 °C 10 Stunden lang getempert wurden, eine Wärmeformbeständigkeit von 85 °C aufweisen (LF-Harz).

Warmhärtung im Temperzelt

Achtung!

Das Temperzelt darf während des Heizens aus Sicherheitsgründen nie unbeaufsichtigt bleiben!



Hot curing in an annealing tent

Important!

For safety reasons, the annealing tent may not be left unattended when in operation!

The resins for processing should have a temperature of at least 25 °C. The packaging, for example, can be heated in a water bath before use. Heating further up to 35 °C effects a further considerable reduction in viscosity.

However, it must be noted at this point that an increase in temperature of 10 °C halves the processing time for the resins. For this reason, heated resins should be mixed in small quantities only and quickly processed. Resin in thin layers cools very quickly, so the moulds should be heated in addition. The simplest method is to store the moulds in a warm environment until directly before they are used. Owing to their heat capacity, moulds of laminating ceramics maintain their temperature especially well.

Curing epoxy resins

When epoxy resins cure, they undergo a chemical process, whereby the molecules of the individual constituents react with one another, forming in the process three-dimensional cross-links of long molecular chains. In the case of epoxy resins, this curing process takes place as so-called polyaddition, i.e. every structural unit in the resin always needs a certain number of structural elements from the hardener constituent. If the mixing ratio is not precisely observed, structural units from one constituent will be left over that are not cross-linked. This incomplete cross-linking can lead to a deterioration in the moulded materials' strength properties.

Even when the mixing ratio has been observed precisely, individual molecules, as in every chemical reaction, will be left over that have not found a reaction partner. Yet the greatest possible degree of cross-linking must take place if the optimal strength properties are to result. In addition to the precise observation of the mixing ratio, a specific heating process (annealing) can be employed to raise the degree of cross-linking to approximately 100%. This heating process must, however, be conducted carefully and under specific conditions so that no warpage can occur.

Annealing serves to improve the resin's mechanical strength and, in particular, its heat distortion temperature as well. For these reasons, annealing is compulsory on, for example, structural components in aircraft construction.

Annealing fibre composites

When cold-curing epoxy resin systems are used, the components can first of all be cured at room temperature, demoulded, and if necessary finished. Annealing should be conducted within the next few days. In this process, the components are stored in a suitable room and slowly heated without distorting. The increase in temperature should not exceed 10 °C per hour. Once the target temperature has been reached, this must be maintained for at least ten hours. The epoxy resin systems marketed by R&G exhibit up to a certain temperature a 30 °C difference between their annealing and heat distortion temperatures; in other words, components that have been annealed, say, at 55 °C for ten hours exhibit a heat distortion temperature of 85 °C (LF resin).

Die **Temperung größerer Bauteile** ist häufig problematisch, da entsprechende Räumlichkeiten selten zur Verfügung stehen. Hier kann ein provisorisches Temperzelt Abhilfe schaffen, bei dem die Bauteile mit einer Plane oder ähnlichem abgedeckt werden und die Innenluft dann über ein geeignetes Heizgerät erwärmt wird. Bei dieser provisorischen Temperung ist besonders darauf zu achten, daß z.B. mit einem Ventilator eine gleichmäßige Temperaturverteilung erreicht wird, da sich die Bauteile sonst verziehen können. Wesentlich professioneller ist die Temperung in einer Temperkammer. Dazu wird ein Raum entsprechend isoliert und beheizt.

Aufbau einer Temperkammer

Wichtig für eine Temperkammer ist eine gute Isolierung sowie eine feuerhemmende Auskleidung der Kammer. Dabei wird je nach Größe der Kammer ein Raum oder auch eine Holzkiste mit Styropor isoliert und von innen mit Gipsplatten ausgekleidet. Die Temperkammer sollte sich möglichst dicht verschließen lassen. Dann ist selbst mit geringer Heizleistung eine höhere Temperatur zu erreichen.

Eine Temperkiste kann bis zu Temperaturen von 40 °C mit einem einfachen elektrischen Heizlüfter beheizt werden. Für höhere Temperaturen sind solche Geräte aber in der Regel nicht geeignet; hier kann die Heizung dann aus Glühbirnen oder anderweitigen Heizelementen bestehen. Sehr gute Resultate wurden mit **Keramikheizplatten** erzielt. Diese können einfach aus R&G Laminierkeramik in Verbindung mit M1-Gewebe hergestellt werden. Zwischen zwei Lagen Laminierkeramik wird dabei ein UD-Kohlefaserband verlegt und elektrisch angeschlossen. Die Keramikplatte gibt auf einer großen Fläche sehr gleichmäßig die Wärme ab und garantiert damit eine gute Temperaturverteilung in der Kammer. Mit Hilfe einer solchen Heizplatte sind Temperaturen bis über 100 °C zu erzielen. Allerdings ist bei diesen Temperaturen zu beachten, daß alle Anschlußelemente für derart hohe Temperaturen geeignet sein müssen.

Ohnehin gilt:

Der elektrische Anschluß einer Temperkammer muß den gültigen VDE-Bestimmungen genügen und darf nur von qualifizierten Fachleuten vorgenommen werden!

Annealing larger components frequently has its problems because the corresponding rooms are seldom available. One solution takes the form of a provisional annealing tent. Here, the components are covered with a sheet or similar draping, and the trapped air heated by a suitable device. With this temporary method of annealing, the operator must ensure that the temperature is distributed uniformly, e.g. with a fan, otherwise the components may warp.

A much more professional approach is with the annealing chamber. This method involves insulating and heating a room.

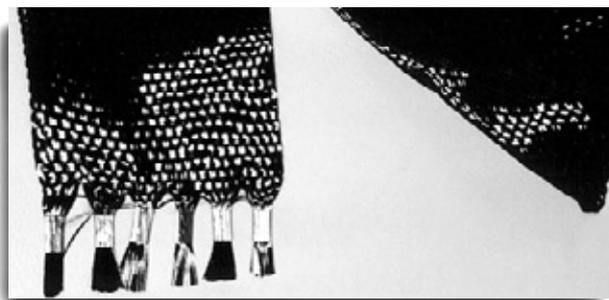
Layout of an annealing chamber

The important features of an annealing chamber are good insulation and a fire-retardant lining on the chamber walls. Depending on the size of the chamber, either a room or a wooden crate is insulated with foamed polystyrene and the inner walls lined with plaster panels. The annealing chamber should close as tightly as possible. As a result, even a low heating capacity can then generate a higher temperature.

An annealing box can be heated up to a temperature of 40 °C with a simple electric fan heater. However, these devices are generally not suitable for higher temperatures. Instead, light bulbs or other heating elements can be used. Excellent results have been obtained with **ceramic hotplates**. These can be easily manufactured from R&G laminating ceramic in conjunction with M1 fabric. Here, a tape of unidirectional carbon fibres is placed between and connected electrically to two layers of laminating ceramic. The ceramic hotplate gives off heat very uniformly over a large area and so ensures that the temperature is distributed evenly throughout the chamber. These hotplates can be used to generate temperatures over 100 °C. However, it must be ensured that all of the connecting elements are approved for these high-temperature operations.

The general rule is:

The annealing chamber must be connected to a source of electrical energy by qualified and authorised personnel in accordance with the valid VDE terms!



Verschalten des Kohlefaserbandes

The electric terminals of a carbon-fibre tape

Temperbox
Heizleistung und Temperatur
Annealing box
Heating capacity and temperature

Heizleistung (W) Heating capacity (W)	Temperatur (°C) Temperature (°C)
0	20
50	28
100	36
150	44
200	51
250	57
300	63
350	69
400	74
450	79
500	83
550	87
600	90
650	93

$T_u = 20\text{ °C}$ (Umgebungstemperatur)

Abmessungen der Temperbox

L x B x H 1.8 x 0.72 x 0.75 m

Isolierung

10 mm Gipskartonplatte

40 mm Styropor

$T_u = 20\text{ °C}$ (ambient temperature)

Internal dimensions of the annealing box

L x W x H 1.8 x 0.72 x 0.75 m

Insulation

10 mm plasterboard

40 mm foamed polystyrene



Verlöten der Aderendhülsen am Kohleband

Soldering the connector sleeves on the carbon tape



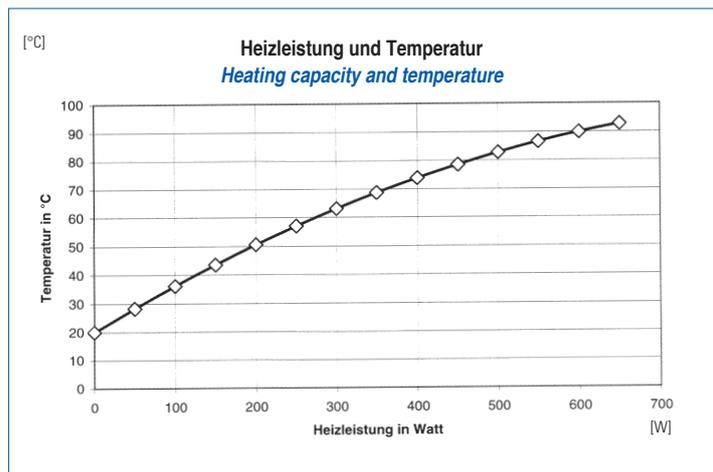
Das anschlussfertige Kohleband wird auf die erste Lage Laminierkeramik gelegt und getränkt.

Ready for the electrical connection, the carbon tape is placed on the first layer of laminating ceramic and impregnated.



Eine weitere Lage M1-Gewebe/Laminierkeramik deckt das stromführende Kohleband ab.

The next layer of M1 fabric and laminating ceramic covers the electrically conducting carbon tape.



WACKER

Dr. Ingo Craubner
Wacker-Chemie, München

In den letzten 25 Jahren hat sich deutlich ein Fachgebiet herausgebildet, das sich intensiv mit den - vorhandenen - Gefahren der Chemie befaßt. Es wird heute allgemein mit dem Begriff „Produktsicherheit“ bezeichnet. Dabei geht es um die Erfassung von Gefahren, um erforderliche Schutzmaßnahmen und um eine für Fachleute und Laien verständliche Darstellung. Gerade die Information über mögliche Gefahren und deren Vermeidung, ist besonders wichtig für uns alle. Denn jeder hat täglich, wissentlich oder nicht, mit Chemie zu tun.

Dr. Ingo Craubner, bei der Wacker-Chemie innerhalb des Geschäftsbereichs Silicone für Produktsicherheit verantwortlich, gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Dinge.

Von den für Produktsicherheit Verantwortlichen wird verständlicherweise erwartet, daß Gefahren möglichst von vornherein ausgeschlossen werden. Aber das ist in unserer Welt und bei unserer gewohnten Lebensweise nicht möglich. Jeder einzelne braucht daher ein gewisses Verständnis für Produktsicherheit, um mit den chemischen Stoffen des täglichen Lebens in richtiger Weise umgehen zu können.

Das Aufgabengebiet Produktsicherheit innerhalb eines Unternehmens dient der Schadensverhütung. Dies geschieht durch gezielte Information über relevante Produkteigenschaften und den sicheren Umgang mit Produkten, sowie die Erfüllung gesetzlicher Verpflichtungen. Die nötigen Risikoabschätzungen sind häufig Grundlage für unternehmenspolitische Entscheidungen bezüglich Gesundheit, Sicherheit und Umwelt.



*The last twenty-five years have witnessed the conspicuous development of a specialised field that has come to deal intensively with the (known) risks associated with chemicals. The name it is generally given today is "product safety". Under product safety, the risks are identified, the requisite protective measures elaborated, and the whole presented in a form that can be understood by both the experts and the lay alike. It is especially the information on possible risks and their prevention that is of particular importance to us all. After all, everybody comes into contact with chemicals every day, whether they know it or not. Dr Ingo Craubner, responsible for the field of product safety for **Wacker-Chemie's** silicone line, presents an overview of the present state of affairs.*

It is, understandably, expected of persons responsible for product safety that risks are excluded from the very outset. Yet in our world and with our accustomed way of life this is not possible. So each and every one of us needs

a certain understanding of product safety if we are to be able to handle the chemical substances of our daily lives in the proper way.

The field of activities dealing with product safety within a company serves to prevent damage and injury. This takes the form of specific information on relevant product properties, the safe handling of the products, and compliance with the legal requirements. The necessary risk assessments frequently form the basis for decisions affecting corporate policies on health, safety, and the environment.

Gesetzliche und andere Regelungen

Werfen wir einen kurzen Blick auf die wichtigsten gesetzlichen Regelungen und Maßnahmen, die dem Schutz vor schädlichen Einwirkungen gefährlicher Produkte -also der Produktsicherheit- dienen.

Das **Chemikaliengesetz** bezieht sich auf die Bereiche Gesundheits-, Arbeits- und Umweltschutz. Danach müssen Mensch und Umwelt vor schädlichen Einwirkungen gefährlicher Stoffe geschützt werden. Dieses Ziel soll durch die Verpflichtung zur Prüfung und Anmeldung von Stoffen, zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung gefährlicher Produkte und andere Regelungen erreicht werden.

Nach diesem Gesetz darf ein chemisches Produkt nur dann in den Verkehr gebracht werden, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind, die das Chemikaliengesetz vorgibt. Außer der Europäischen Union haben eine Reihe anderer Länder entsprechende Gesetze erlassen. Das **Chemikaliengesetz** unterscheidet zwischen alten Stoffen, die vor dem Stichtag 18. September 1981 schon auf dem Markt waren, und neuen Stoffen. Erstere sind in einem „Altstoffregister“ genannt. Die neuen Stoffe dürfen nur in Verkehr gebracht werden, wenn sie zuvor in bestimmter Weise untersucht und bei der zuständigen Behörde angemeldet worden sind. Hierfür sind aufwendige physikalisch-chemische, toxikologische und ökologische Prüfungen erforderlich. Aber auch bei den Altstoffen müssen gefährliche Eigenschaften ermittelt und kenntlich gemacht werden.

Das **Chemikaliengesetz** schreibt weiterhin vor, daß alle chemischen Produkte in geeigneter Weise verpackt und gekennzeichnet werden, sofern sie gefährliche Eigenschaften aufweisen. Für die Kennzeichnung werden je nach Gefährdung zehn verschiedene Symbole auf orangegelbem Untergrund verwendet, außerdem die sogenannten R-Sätze als Gefahrenhinweise (z.B. R10 bedeutet „entzündlich“) und S-Sätze als Sicherheitsratschläge (z.B. S 3 steht für „kühl aufbewahren“).

Legal and other rules

Let us take a look at the most important legal rules and measures that are intended to provide protection against the harmful effects of hazardous products, i.e. that define the product safety.

*The **Chemikaliengesetz** [toxic substances control act] applies to the fields of health protection, industrial safety, and environmental protection and stipulates that persons and the environment must be protected against the harmful effects of hazardous substances. This must be attained through the obligation to test and register substances, to classify, designate, and package hazardous products, and other regulations.*

According to this act, a chemical product may be brought into service only when certain requirements that the Chemikaliengesetz specifies have been fulfilled. Not only the European Union, also a number of other countries have enacted corresponding legislation.

*The **Chemikaliengesetz** distinguishes between "old" substances, which were already on the market before the effective date of 18 September 1981, and "new" substances. The former are listed in the so-called "Altstoffregister" ["old substances register"]. The new substances may be brought into service only when they have been previously examined in a particular manner and registered at the competent authority. The examinations needed involve complex physico-chemical, toxicological, and ecological tests. But the hazardous properties of the old substances, too, have to be investigated and identified.*

*The **Chemikaliengesetz** also prescribes that all chemical products, provided they exhibit dangerous properties, are packaged and labelled in a suitable manner. Depending on the danger level posed, chemical products are labelled with one of ten different symbols on an orange yellow background, in addition with the so-called R phrases serving as danger notices (e.g. R10 for "flammable") and S phrases serving as safety advice (e.g. S3 for "keep in a cool place").*

Das **Chemikaliengesetz** gibt der Bundesregierung die Möglichkeit, die Herstellung und Verwendung bzw. das Inverkehrbringen gefährlicher Produkte zu beschränken oder zu untersagen.

Die Verordnung zur **Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe** (englisch: **REACH** – Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) ist eine Verordnung der Europäischen Gemeinschaft zur Reform des europäischen Chemikalienrechts. Die Verordnung ist seit dem 1. Januar 2007 als unmittelbares Recht in jedem Mitgliedstaat direkt gültig und trat am 1. Juni 2007 in Kraft.

Es existiert eine **Chemikalien-Verbotsverordnung**, in der Beschränkungen für 19 Stoffe und Stoffgruppen genannt sind.

Die **Gefahrstoffverordnung** unterstützt das Chemikaliengesetz bei der Umsetzung im Betrieb. Der Schutz von Beschäftigten ist ausführlich in der Gefahrstoffverordnung geregelt. Besonderer Schutz gilt Jugendlichen und werdenden oder stillenden Müttern. Der Arbeitgeber hat die Verpflichtung, Gefahrstoffe zu ermitteln, zu beurteilen und deren Verwendung soweit möglich zu vermeiden. Bei Verwendung von Gefahrstoffen hat der Arbeitgeber eine Schutzpflicht, die in verschiedenen Vorschriften und Regeln festgelegt ist. Außerdem besteht eine Überwachungspflicht, wenn gefährliche Stoffe in der Luft am Arbeitsplatz nicht auszuschließen sind. Begriffe wie Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert), Technische Richtkonzentration (TRK) und Biologischer Arbeitsplatztoleranzwert (BAT) sind hier von Bedeutung.

Diese, noch gebräuchlichen Grenzwerte, werden durch AGW (Arbeitsplatzgrenzwerte) im Rahmen der Union ersetzt. Ergebnisse von Ermittlungen und Messungen sind mindestens 30 Jahre aufzubewahren. Die Gefahren und nötigen Schutzmaßnahmen sind in Betriebsanweisungen festzuhalten und den Beschäftigten mitzuteilen.

Von besonderer Bedeutung ist das **Sicherheitsdatenblatt**, das durch die Gefahrstoffverordnung für alle gefährlichen Produkte, die in den Verkehr gebracht werden, vorgeschrieben ist.

Das **Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter** gilt für den Transport mit Eisenbahn-, Straßen-, Wasser- und Luftfahrzeugen. Eine Reihe von Verordnungen, Richtlinien und internationaler Vereinbarungen regelt den Transport zu Land, zu Wasser und in der Luft.

Zweck des **Bundes-Immissionsschutzgesetzes** und zugehöriger Verordnungen ist es hauptsächlich, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen.

Eine Benutzung der Gewässer, so bestimmt es das **Wasserhaushaltsgesetz (WHG)** und die zugehörigen Verordnungen und Verwaltungsvorschriften, bedarf in der Regel der behördlichen Erlaubnis oder Bewilligung. Unbefugtes Verunreinigen – ein sehr weitgefäster Begriff – wird im Umweltstrafrecht auch schon bei Fahrlässigkeit mit empfindlichen Strafen bedroht. Eine Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser ist an die Einhaltung strenger Anforderungen gebunden.

Alle chemischen Produkte müssen in Wassergefährdungsklassen eingestuft werden (WGK 0 bis 3). Entsprechend dieser Einstufung sind unterschiedliche Vorsichtsmaßnahmen beim Lagern, Abfüllen, Umschlagen und Befördern der Produkte zu treffen.

Das sehr weitreichende **Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz** mit den zugehörigen Verordnungen und Richtlinien unterscheidet zwischen Lebensmittel-Zusatzstoffen und den sogenannten Bedarfsgegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen können. Hierzu gehören z.B. Verpackungen, aber auch Bekleidung oder Spielwaren und sogar Reinigungs- und Pflegemittel. Auch kosmetische Mittel fallen unter dieses Gesetz. Für viele chemische Produkte ist daher die Frage zu klären, ob sie den Bestimmungen dieses Gesetzes entsprechen, und das heißt vor allem, daß sie keine gesundheitsschädigenden Wirkungen aufweisen dürfen.

Auch Fragen der gefahrlosen, umweltverträglichen Entsorgung oder Verwertung von Produktabfällen gehören zur Produktsicherheit, sie sind im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz mit zugehörigen Verordnungen geregelt.

The **Chemikaliengesetz** enables the federal government to restrict or forbid the manufacture, application, or other introduction of hazardous products.

REACH, or the **Registration, Evaluation, and Authorisation of Chemicals**, is a body of regulations issued by the European Community for the purpose of reforming the European chemical laws. These regulations have been incorporated directly in the laws of each member state since 1 January 2007 and came into force on 1 June 2007.

The **Chemikalien-Verbotsverordnung** [chemical prohibitions] lists restrictions on nineteen substances and substance groups.

The **Gefahrstoffverordnung** (toxic chemicals ordinance) serves to implement the Chemikaliengesetz at industrial locations and regulates to a great extent the protection of workers. The protection of employees is regulated in detail under the Gefahrstoff-verordnung [toxic chemicals ordinance]. Special protection applies to adolescents and nursing and expectant mothers. The employer is obliged to identify hazardous substances and to prevent their application as far as possible. Before authorising the use of hazardous substances, the employer is obliged to implement protective measures that are set down in various sets of rules and regulations. Furthermore, the employer is obliged to implement monitoring measures when the possibility of hazardous substances contaminating the air at the workplace cannot be excluded. Important terms that find application here are maximum workplace concentration (the MAK value), technical orientation concentration (TRK), and biological threshold limit value at the workplace (BAT).

Within the Union these thresholds, still in use, are being replaced with AGW (occupational exposure limits). The results obtained from investigations and measurements must be kept on record for at least thirty years. The risks and the requisite protective measures must be set down in **operating instructions** and the employees informed thereof.

Of particular importance is the **safety data sheet** which the Gefahrstoffverordnung prescribes for all hazardous products that are brought into service.

The **Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter** [carriage of dangerous substances act] applies to transport by rail, road, water, and air and is supported in addition by various bodies of regulations, guidelines, directives, and international agreements.

The primary objective of the **Bundes-Immissionsschutzgesetz** [federal immissions protection act] and its appurtenant regulations is to protect persons, flora and fauna, the soil, water, and the atmosphere as well as cultural and other assets from the damaging effects of the environment.

The use of the waters, as stipulated in the **Wasserhaushaltsgesetz** or **WHG** [water laws] and the appurtenant regulations and administrative provisions, requires as a rule the permission or approval of the pertinent authorities. The environmental criminal laws severely punish unauthorised contamination (a very broadly defined term), even when the cause is negligence. And strict requirements must be observed before permission is granted to discharge waste water.

All chemical products must be categorised into groups depending on the hazardous effects they have on water. These groups are designated WGK 0 to WGK 3 and require that different precautionary measures are implemented when the products are stored, packaged, handled, and conveyed.

The very extensive **Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz** [food and commodities act] with the appurtenant regulations and guidelines distinguishes between food additives and the so-called commodities that can come into contact with food. Such commodities include, for example, packaging, but also clothing or toys, and even cleaning agents. Also cosmetic products come under this act. So for many chemical products, the question must be clarified as to whether they comply with the terms under this act, and this means above all that they must not exercise any effects harmful to health.

Also issues concerning the harmless, environmentally compatible disposal or recycling of product waste forms part of product safety and are regulated under the **Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz** [recycling and waste act] with the appurtenant regulations.

Die Erfassung und Bestimmung sicherheitsrelevanter Produkteigenschaften

Aufgrund der skizzierten Aufgaben müssen im Prinzip von allen chemischen Produkten im Unternehmen die bekannten sicherheitsrelevanten Produkteigenschaften erfaßt und nicht bekannte bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Daten sind Gefährdungspotentiale festzustellen und Risikoeinschätzungen durchzuführen. Es werden physikalisch-chemische, toxikologische und ökotoxikologische Eigenschaften hierfür herangezogen.

Es ist sicher verständlich, daß der physikalische Zustand -fest, flüssig oder gasförmig-, die Brennbarkeit, die Löslichkeit, die Eigenschaften sauer, basisch oder neutral, die Reaktionsfähigkeit und andere Eigenschaften für die Produktsicherheit von Bedeutung sind. Diese Eigenschaften sind objektiv feststellbar und lassen Gefährdungspotentiale im allgemeinen gut erkennen.

Sehr viel schwieriger ist es, toxikologische Potentiale und die **Umweltverträglichkeit** festzustellen. Hierunter versteht man die möglichen kurz- und längerfristigen, direkten und indirekten Schädigungen, einschließlich deren Relevanz in belebter und unbelebter Natur. Man unterscheidet zwischen akuter, subakuter und chronischer Toxizität, fragt nach reizenden, ätzenden und sensibilisierenden sowie fortpflanzungsgefährdenden, erbgutverändernden und krebserzeugenden Eigenschaften, der Toxizität gegenüber Wasserorganismen, Bodenorganismen, Pflanzen und anderem. Von großer Bedeutung sind biologische und abiotische Abbaubarkeit, Bioakkumulation und Mobilität in der Umwelt.

Zahlreiche **Informationen** findet man in der **Fachliteratur**. Oft sind diese Ergebnisse jedoch nicht ausreichend, unter abweichenden Bedingungen gemessen oder aus sonstigen Gründen nicht verwendbar. Wenn entscheidende Daten nicht beschafft werden können und keine sinnvollen Analogieschlüsse möglich sind, müssen entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden. Eine wesentliche Hilfe ist die Zusammenarbeit mit anderen Firmen, mit denen man sonst im Wettbewerb steht. In Fragen der Produktsicherheit hat sich weltweit eine für alle Beteiligten oft sehr nützliche Beziehung herausgebildet.

Chemische Produkte können einzelne Stoffe, Zubereitungen (Stoffgemische) oder andere Erzeugnisse sein. Da toxikologische und ökologische Untersuchungen in der Regel an reinen Stoffen durchgeführt werden, erfolgt die Beurteilung zusammengesetzter Produkte, soweit möglich, aufgrund ihrer Bestandteile. Wenn Anhaltspunkte dafür bestehen, daß das Zusammenwirken verschiedener Stoffe wesentliche nachteilige Wirkungen hat, müssen auch zusammengesetzte Produkte experimentell untersucht werden.

Außer der experimentellen Toxikologie kommt auch die **Epidemiologie**, d.h. die gezielte Untersuchung von Auswirkungen auf den Menschen, zur Ermittlung sicherheitsrelevanter Eigenschaften infrage (z.B. bei Arzneimitteln oder Kosmetikartikeln). Die so erhaltenen Erkenntnisse und auch Informationen aus den Behandlungszentren für Vergiftungen können höhere Aussagefähigkeit haben, als die durch Tierversuche und in vitro-Tests ermittelten Daten.

Wenn ein Stoff schädliche Wirkungen zeigt, kann eine Risikobewertung in Bezug auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt erforderlich werden. Hierfür benötigt man außer den schon genannten Daten auch Informationen über die Exposition, d.h. über Stoffkonzentrationen und Wege der Einwirkung auf Mensch und Umwelt sowie den Grenzwert der Konzentration, bei der noch keine Schädigung zu beobachten ist.

Identifying and defining safety-relevant product properties

In face of the tasks outlined above, a company must in principle identify the known safety-relevant properties of its chemical products and define the unknown properties. Based on these data, the potential dangers must be determined and the risks assessed on the basis of the physico-chemical, toxicological, and ecotoxicological properties.

It should be evident that the physical state (solid, liquid, gaseous), combustibility, solubility, the pH values, the reactivity, and other properties are important for the product safety. These properties can be determined objectively and generally provide a good picture of potential dangers.

*Much more difficult, however, is determining the **toxicological potential** and the **environmental compatibility**. These terms cover possible short- and long-term, direct and indirect harmful effects including their relevance in animate and inanimate nature. Distinctions are drawn between acute, subacute, and chronic toxicity, questions asked as to irritating, caustic, or sensitising properties as well as to properties that are harmful to biological reproduction, induce mutation, or are carcinogenic, and the toxicity assessed with respect to aquatic organisms, soil organisms, flora, and others. Of great importance are biodegradability and abiotic degradability, bioaccumulation, and mobility in the environment.*

*A wide range of **information** can be obtained from **specialist literature**. However, these results often prove unsatisfactory when transferred to other conditions, or cannot be utilised for a number of other reasons. If crucial data cannot be acquired and meaningful arguments by analogy are not possible, then the corresponding investigations must be conducted. Essential assistance can be obtained through cooperation with other firms that would otherwise be regarded as competitors. In issues of product safety, such a relationship has often proved useful to all parties throughout the world.*

Chemical products can be single substances, formulations (mixtures of more than one substance), or other products. Because toxicological and ecological investigations are generally conducted on pure substances, composite products are assessed as far as possible on the basis of their constituents. If, however, there is reason to believe that the interaction between various substances gives rise to essentially deleterious effects, then composite products, too, must be subjected to experimental investigations.

*Not only experimental toxicology, also **epidemiology**, i.e. the specific investigation into the effects on people, can find application in determining properties relevant to health (e.g. medicines or cosmetics). The results obtained from this method as well as information from treatment centres for poison cases have a far higher utilisable content than data supplied from animal experiments or in vitro tests.*

When a substance exhibits harmful effects, a risk assessment may become necessary with respect to human health and the environment. This assessment needs not only the data given above, but also information on the exposure, i.e. on the concentration of the substance and the ways it can affect persons and the environment as well as the limit of concentration above which the first signs of harmful effects can be observed.

Literatur für Verarbeiter, Gewerbebetriebe, Gefahrgutbeauftragte

Unfallverhütungsvorschrift VBG 81 der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Abschnitt 48 „Verarbeitung von Klebstoffen“. Erhältlich beim Jedermann-Verlag, Mittelgewannweg 15, 69021 Heidelberg, www.jedermann.de

Buch „**Gefahrstoffverordnung**“ mit Anhang
Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Str. 449, 50939 Köln
ISBN 3 452 18162-6, www.heymanns.com

Merkblatt M 004
„Reizende Stoffe/Ätzende Stoffe“

Merkblatt M 023
„Polyester- und Epoxidharze“
erhältlich bei der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie,
69115 Heidelberg, www.bgchemie.de

oder bei

Jedermann-Verlag Dr. Otto Pfeffer oHG,
Mittelgewannweg 15, 69021 Heidelberg, www.jedermann.de

Literature for processors, business enterprises, authorised agents for hazardous goods

Unfallverhütungsvorschrift VBG 81 [accident prevention regulations] from the Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Section 48 "Verarbeitung von Klebstoffen" ("processing adhesives") available from Jedermann-Verlag Mittelgewannweg 15, 69021 Heidelberg, www.jedermann.de

The book **Gefahrstoffverordnung** [toxic chemicals ordinance] with appendix
Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Str. 449, 50939 Köln
ISBN 3 452 18162-6, www.heymanns.com

Merkblatt M 004 [code of practice for irritants and caustics]
"Reizende Stoffe / Ätzende Stoffe"

Merkblatt M 023 [code of practice for polyester and epoxy resins]
"Polyester- und Epoxidharze"
available from the Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie,
69115 Heidelberg, www.bgchemie.de

or from

Jedermann-Verlag Dr. Otto Pfeffer oHG,
Mittelgewannweg 15, 69021 Heidelberg, www.jedermann.de



Epoxydharz-Lagertank bei Hexion

Epoxy resin storage tank at Hexion

Epoxyd- und Polyesterharze haben in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und werden heute in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen eingesetzt. Trotz dieser weiten Verbreitung sind bislang keine schwerwiegenden Gesundheitsschäden bekannt geworden, die auf dermatologische oder toxische Wirkungen der Flüssigkunststoffe zurückzuführen wären. Diese positive Bilanz wurde möglich durch einen vorbeugenden Arbeitsschutz, d.h. Einhaltung der gewerbehygienischen Vorschriften und durch die Auswahl verträglicher Harz/Härter-Systeme.

„Jahrelange Erfahrungen bei der Verarbeitung von Epoxydharzsystemen haben gezeigt, daß ein gesundheitsgefährdendes Risiko bei Beachtung der allgemeinen Vorsichtsmaßnahmen, wie sie beim Umgang mit Chemikalien üblich sind, und bei Einhaltung der sicherheitstechnischen und arbeitshygienischen Maßnahmen, wie sie von den Herstellern der Epoxydharz-Systeme empfohlen und von Behörden vorgeschrieben werden... verhindert werden konnte.“¹⁾

Zu unterscheiden sind:

- Wirkung der Harze und Härter in **reiner, ungemischter Form**
- Wirkung der **Harz/Härter-Mischung**, wie die Produkte in der Praxis verarbeitet werden

Aussagen über die Giftigkeit (LD₅₀-Werte etc.) einzelner Produkte für sich alleine gesehen geben nicht unbedingt einen verlässlichen Hinweis darauf, ob die Systeme in der Praxis gut verträglich sind.

Nach der Härtung sind die Formstoffe, bei Einhaltung der Verarbeitungsvorschriften wie z.B. dem Mischungsverhältnis und der Härtungsbedingungen, vollkommen inert und unschädlich.

Schädigungen werden daher im Zeitraum zwischen dem Anmischen von Harz und Härter und dem Gelieren verursacht.

Zu unterscheiden sind hier **Hautreizungen** und **Allergien**.

Hautreizungen

Bei akuten Hautreizungen bilden sich rote Flecken z.B. auf den Handrücken, den Fingern und verschiedenen Partien des Gesichtes und des Halses. Mit Hilfe entsprechender Hautschutzsalben und peinlich genauer Einhaltung der hygienischen Verarbeitungsvorschriften klingen diese Symptome meist innerhalb von 1 - 2 Tagen bis ca. 2 Wochen ab, wobei die Flecken abschuppen und der Juckreiz verschwindet. Langzeituntersuchungen sowie Auswertungen der täglichen Praxis am Arbeitsplatz zeigen, daß bei dem überwiegenden Teil der Beschäftigten die Dermatose nicht über das Stadium einer harmlosen Hautreizung hinausgeht. Es tritt also eine Anpassung der Haut (Desensibilisierung) ein. Wie in anderen Fällen von Berufsdermatosen kann es ratsam sein, die beschäftigten Personen nicht bei den ersten Anzeichen einer Hautreizung vom Arbeitsplatz fortzunehmen, damit Gelegenheit zur Anpassung und Desensibilisierung gegeben wird.

Allergien

Allergien sind unkontrollierte Abwehrreaktionen des Körpers. Die Symptome sind vielseitig und reichen von Schwellungen bis zur Bildung stark juckender Pusteln und Blasen. In diesen Fällen muß zu einem Wechsel des Arbeitsplatzes geraten werden.

Arbeitsschutzmaßnahmen

Neben einigen betrieblichen Einrichtungen ist die persönliche Hygiene des Verarbeiters am wichtigsten. Die meisten **Gesundheitsgefährdungen** entstehen durch **leichtfertigen Umgang** mit den Gefahrstoffen.

¹⁾Text von Dr. F. Galle Kunststoff-Handbuch Duroplaste 10, Hanser-Verlag, München.

Over the last few years epoxy and polyester resins have been gaining in importance and are today used in the most diverse range of applications. Yet in spite of this, there has as yet been no case of any serious damage to health that could be put down to dermatological or toxic effects of liquid plastics. These positive results were made possible by a preventive policy of industrial safety, i.e. adherence to regulations governing industrial hygiene and the choice of compatible resin / hardener systems.

“Years of experience in the processing of epoxy resin systems have shown that risks prejudicial to health [...] can be prevented when we observe the general precautions usually applying to the handling of chemicals and follow exactly the safety and industrial hygiene measures as recommended by the manufacturers of epoxy resin systems and stipulated by the authorities.”¹⁾

Two distinctions are made here:

- the effects of resins and hardeners in **pure, unmixed form**
- the effects of a **mixture of resin and hardener**, as the products are processed in practice.

Statements on the toxicity (LD₅₀ values, etc.) of the individual products when in pure form do not necessarily provide reliable information as to whether the systems themselves exhibit adequate compatibility in practice.

Provided that the processing regulations for e.g. the mixing ratio and the curing conditions have been observed, the moulded materials after curing are completely inert and harmless.

*So **harm** is caused in the time it takes for the resin and hardener to be mixed and for the mixture to gel.*

*The form this harm takes can be divided into **skin irritation** and **allergies**.*

Skin irritation

In the case of acute skin irritation, red spots develop, for example, on the backs of the hands, the fingers, and parts of the face and neck. When a suitable protective skin cream is applied and the regulations for hygienic processing are followed with painstaking precision, these symptoms mostly disappear after one or two days to about two weeks, whereby the spots peel off and the itching stops. Long-term studies and evaluations of data obtained from the daily routine at the workplace have shown that for the majority of employees this dermatosis does not develop into anything more serious than a harmless irritation of the skin. In other words, the skin adapts, or desensitises. As in other cases of occupational dermatosis, it is often advisable not to remove the affected person from the workplace at the first signs of a skin irritation so that the skin is given an opportunity to adapt and desensitise.

Allergies

Allergies are uncontrolled defensive reactions of the body. The symptoms are many and range from swellings to the formation of highly itchy pustules and blisters. In this event, the best advice is a change of workplace.

Industrial safety precautions

*Besides a certain number of operational installations, the personal hygiene of the processor is the most important contribution. Most **health hazards** arise as a result of **carelessness in handling** hazardous substances.*

¹⁾ From Dr F Galle's "Kunststoff-Handbuch Duroplaste 10", Hanser-Verlag, München



Alle Gefahrstoffverpackungen enthalten **Gefahrenhinweise** (R-Sätze) und **Sicherheitsratschläge** (S-Sätze), die beachtet werden müssen.

- **Direkten Hautkontakt vermeiden**
Schutzhandschuhe und/oder spezielle Hautschutzcremes verwenden; Sekundärkontaminationen (Übertragung über Gegenstände, die normalerweise sauber sein sollten, wie Telefonhörer, Türklinken etc.) vermeiden. Verschüttete Chemikalien bzw. Tropfnasen an den Gebinden sofort entfernen (Reinigungstücher, Reinigungsmittel).
- **Hautverschmutzungen sind sofort mit Papiertüchern zu beseitigen.**
Die betroffenen Stellen müssen anschließend mit einem Handreiniger (siehe R&G-Hautschutzprogramm) gewaschen, abgetrocknet und mit einer Hautcreme gepflegt werden.
- **Das Einatmen von Harz- und Härterdämpfen ist zu vermeiden.**
Dies gilt auch für den Schleifstaub gehärteter Epoxydharzmassen. Chemikalienbehälter möglichst nicht über weite Strecken offen transportieren. Harz und Härter sollten in der Nähe der Verarbeitungsstelle gemischt werden.
- **Nicht essen, trinken und rauchen während der Arbeit.**
Nach dem Arbeitsende und vor der Benutzung der Toilette Hände gründlich reinigen.
- **Die Hautreinigung darf nur mit speziellen, schonenden Handreinigern erfolgen.**
Keine Lösemittel (Aceton oder ähnliches) verwenden, da diese die Haut austrocknen und verspröden. Falsche Pflege ist in vielen Fällen der Grund für eine Sensibilisierung.
- **Zum Abtrocknen der Hände möglichst nur Einwegpapier tücher verwenden.**
Hände nach dem Waschen mit einer feuchtigkeitsspendenden Creme pflegen.

Betriebliche Voraussetzungen und Betriebsanweisung

Durch sinnvolle **Aufteilung der Arbeitsräume** sowie günstige **Gestaltung der Arbeitsabläufe** kann die Kontaktzeit mit Chemikalien eingeschränkt werden. Diese Empfehlung ist unabhängig von der jeweiligen Toxizität des eingesetzten Produktes, denn die Giftwirkung hängt bekanntlich von der Menge bzw. Expositionsdauer ab.

Für eine gute **Durchlüftung** der Arbeitsräume, ggf. durch eine Arbeitsplatzabsaugung, ist zu sorgen. Der Luftstrom soll dabei **Dämpfe** vom Verarbeiter **wegführen**. Am zweckmäßigsten ist eine Absaugung direkt an der Form.

Lösemitteldämpfe, z.B. von Styrol, sind schwerer als Luft und werden am besten in **Bodennähe** abgesaugt.

Handschuhe, Schutzcremes, Waschlösungen, Papierhandtücher sowie eine Erste-Hilfe-Ausstattung (inclusive Augenspülflasche) müssen vorhanden sein.

Bei starker Dampf- bzw. Staubeentwicklung sind leichte Gasschutzmasken mit **Staubfilter** und **A2-Filter** gegen organische Dämpfe bereitzuhalten.

Die Mitarbeiter sind auf **Sauberkeit und Ordnung am Arbeitsplatz** hinzuweisen.

Zur Sauberkeit der Arbeitsstätte trägt auch die Verwendung von **Einmal-Arbeitsgeräten** bei (z.B. Pappbecher, Holz-Rührstäbchen, Einwegpinsel etc.). Daran haftende, ausgehärtete Harzreste sind inert.

Personen, die vorwiegend mit dem Zuschneiden von Glas-, Aramid- und Kohlenstoffasern beschäftigt sind, sollten wegen möglicher Mikroverletzungen der Haut durch Faserstaub nicht unmittelbar mit Laminierarbeiten betraut werden.

All packaging for hazardous substances bear **danger notices** (R phrases) and **safety advice** (S phrases) that must be observed.

- **Avoid direct contact with the skin**
Use protective gloves and / or special protective skin creams, and prevent secondary contamination (for example via objects that should normally be clean such as telephone receivers, door handles, etc.). Immediately remove spilled chemicals or drips on the packaging (cleaning cloths, cleaning agents).
- **Any soiling of the skin must be removed immediately with paper towels.**
The affected places must then be washed with a hand cleanser (see R&G skin protection programme), dried, and a skin cream applied.
- **Inhaling resin and hardener vapours must be avoided.**
This also applies to the dust generated when cured epoxy resin compounds are ground. Wherever possible, do not transport open-topped receptacles filled with chemicals over long distances. The resin and hardener should be mixed near the processing site.
- **Do not eat, drink, or smoke during the work.**
After finishing work and before using the toilet, wash your hands thoroughly.
- **Skin must be cleansed with special, gentle hand cleansers only.**
Do not use solvents (such as acetone or similar) because these will dry out and chap the skin. In many cases, incorrect care is the reason behind sensitised skin.
- **Whenever possible, use only disposable paper towels to dry your hands.**
After washing your hands, apply a moisturising cream.

Operational requirements and operating instructions

Contact times with chemicals can be minimised when **the working areas are divided up** sensibly and **the sequence of operations planned economically**. This recommendation is not based on the toxicity of the product used: it is a known fact that toxic effects depend on the quantity and exposure time.

It must be ensured that the working areas are well **ventilated** or are fitted with extractors. The flow of air should **carry vapours away** from the processor. The most practical solution is an extractor installed directly at the mould.

Vapours from solvents, e.g. styrene, are heavier than air and are best extracted **near the floor**.

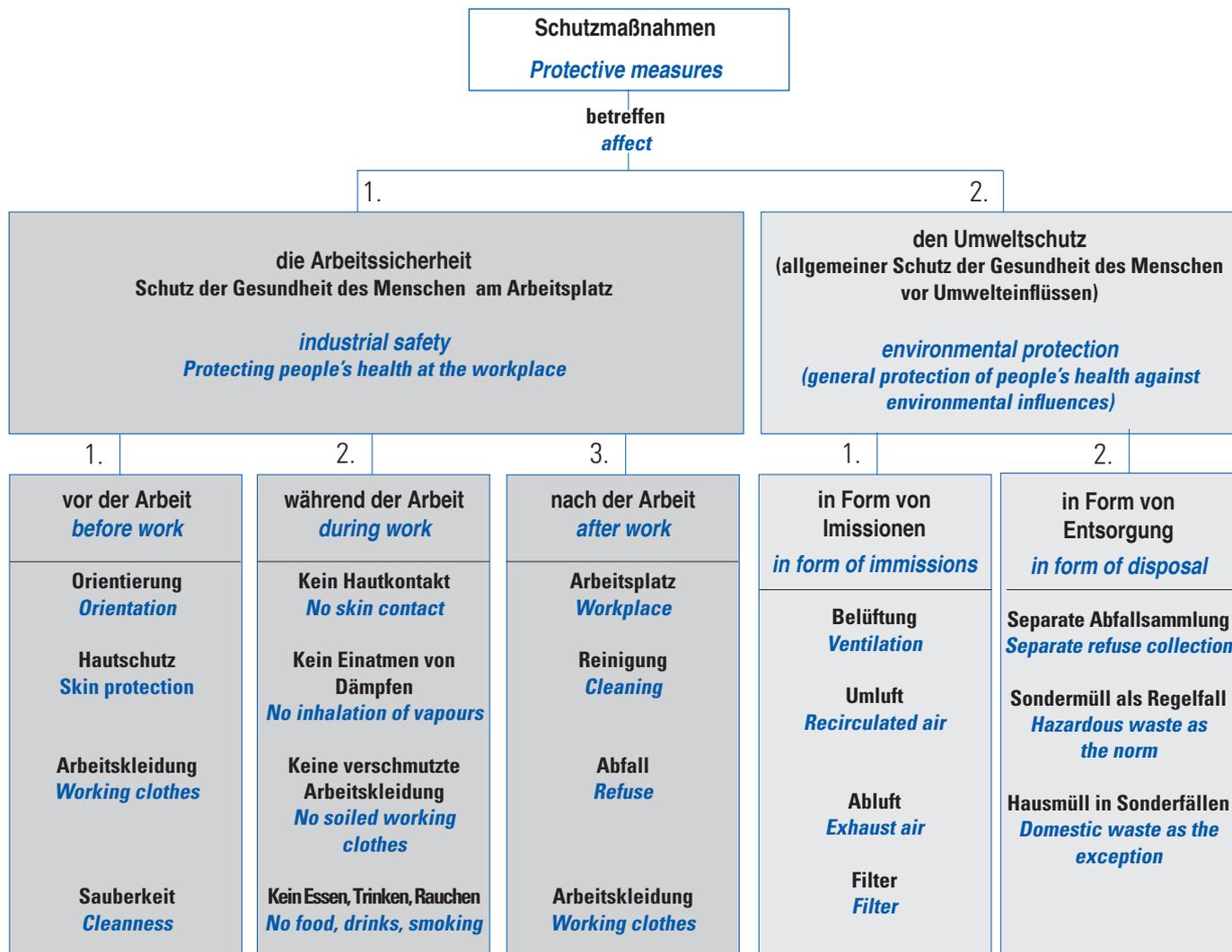
Gloves, protective creams, washing solutions, paper towels, and a first-aid kit (including a bottle of eyebath solution) must be provided.

In the case of large quantities of vapour or dust, light gas masks with **dust and A2 filters** for organic vapours must be provided.

The personnel must be instructed to **keep their workplace clean and tidy**.

Disposable tools can also be used to clean the workplace, e.g. paper cups, wooden stirring rods, disposable brushes, etc.). Any residue of cured resin adhering to the tools is inert.

Persons whose main task is to cut glass, aramid, or carbon fibres should not undertake laminating work directly afterwards owing to possible microscopic skin injuries caused by fibre dust.



Quelle/Source: ibc

1. Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz im Handbuch Seite 1.68 lesen.



1. Read the general notes on industrial safety on page 1.68 of this handbook.

2. Gefahrenhinweise und Sicherheitsratschläge auf den Liefergebinden beachten.
Kleingebinde mit Gefahrgut, die auch an Endverbraucher gelangen könnten, sind bei R&G mit kindersicheren Verschlüssen ausgestattet. Dennoch: **Für Kinder unzugänglich aufbewahren!**
Weitere Informationen enthalten die Sicherheitsdatenblätter.



2. Observe the danger notices and safety advice on the supplier's packaging. Smaller-sized packaging containing hazardous products that could reach the end consumer is fitted with childproof caps. Notwithstanding, **keep out of the reach of children!** Further information can be found in the safety data sheets.

3. Arbeitsschutz und Arbeitshygiene beachten!
Persönliche Arbeitsschutzausrüstung (insbesondere Handschuhe oder Schutzcremes) benutzen!



3. Observe the instructions for industrial safety and industrial hygiene. Use personal industrial safety equipment (in particular gloves or protective creams).



z.B.

Gefahrenhinweise

R 10: Entzündlich.

Danger notices

R 10: Flammable.

Sicherheitsratschläge

S 23.1: Aerosol nicht einatmen.

Safety advice

S 23.1: Do not inhale the aerosol.



Reizend

Irritant

z.B.
Epoxydharze

e.g.
Epoxy resins

Gefahrenhinweise

R 36/38: Reizt die Augen und die Haut.
R 43: Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.

Danger notices

R 36/38: Irritates the eyes and skin.
R 43: Skin contact can cause sensitisation.

Sicherheitsratschläge

S 37/39: Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen.
S 28: Bei Berührung mit der Haut sofort mit viel Wasser und Seife abwaschen.

Safety advice

S 37/39: During the work, wear suitable protective gloves and goggles or other eye protection (e.g. mask).
S 28: On contact with the skin, immediately wash with copious amounts of soap and water.



Brandfördernd

Supportive of
combustion

z.B.
**Peroxidhärter
(MEKP) für
Polyesterharz**

e.g.
**Peroxide
hardeners
(MEKP) for
polyester**

Gefahrenhinweise

R 7: Kann Brand verursachen.
R 22: Gesundheitsschädlich beim Verschlucken.
R 34: Verursacht Verätzungen.

Danger notices

R 7: Can cause fire.
R 22: Harmful to health if swallowed.
R 34: Causes chemical burns.

Sicherheitsratschläge

S 3/7: Behälter dicht geschlossen halten und an einem kühlen Ort aufbewahren.
S 14: Von reduzierenden Substanzen (z.B. Aminen), Säuren, Alkalien und Schwermetallverbindungen (z.B. Beschleunigern, Trocknungsmitteln, Metallseifen) fernhalten.
S 36/37/38: Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen.
S 50: Nicht mit Peroxidbeschleunigern oder Reduktionsmitteln mischen.

Safety advice

S 3/7: Keep the container tightly sealed and store it in a cool place.
S 14: Keep away from reductive substances (e.g. amines), acids, alkalis, and heavy metal compounds (e.g. accelerators, desiccants, metallic soap).
S 36/37/38: During the work, wear suitable protective clothing, protective gloves, and goggles or other eye protection (e.g. mask).
S 50: Do not mix with peroxide accelerators or reducing agents.



z.B. Epoxydharze

e.g. Epoxy resins

Gefahrenhinweise

R 51/53: Giftig für Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkungen haben.

Sicherheitsratschläge

S 61: Freisetzung in die Umwelt vermeiden. Besondere Anweisungen einholen/ Sicherheitsdatenblatt zu Rate ziehen.

Danger notices

R 51/53: Toxic to aquatic organisms, can retain its harmful effects in waters for longer periods.

Safety advice

S 61: Prevent its release into the environment: enquire about special instructions and / or consult the safety data sheet.



z.B. Aminhärter für Epoxydharze

e.g. Amine hardener for epoxy resins

Ätzend

Caustic

Gefahrenhinweise

R 34: Verursacht Verätzungen.
R 20/21/22: Gesundheitsschädlich beim Einatmen, Verschlucken und Berührung mit der Haut.
R 43: Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.

Sicherheitsratschläge

S 1: Unter Verschluss aufbewahren.
S 2: Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen.
S 36/37/39: Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen.
S 26: Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt aufsuchen.
S 45: Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, dieses Etikett vorzeigen).

Danger notices

R 34: Causes chemical burns.
R 20/21/22: Harmful to health if inhaled, swallowed, or allowed to contact the skin.
R 43: Skin contact can cause sensitisation.

Safety advice

S 1: Store under lock and key.
S 2: Keep out of the reach of children.
S 36/37/39: During the work, wear suitable protective clothing, protective gloves, and goggles or other eye protection (e.g. mask).
S 26: On contact with the eyes, immediately wash with copious amounts of water and consult a doctor.
S 45: In the event of an accident or indisposition, immediately consult a doctor (show this label whenever possible).



z.B. ungesättigte Polyesterharze (Styrol)

e.g. unsaturated polyester resins (styrene)

Gesundheitsschädlich

Harmful to health

Gefahrenhinweise

R 10: Entzündlich.
R 20: Gesundheitsschädlich beim Einatmen.
R 36/38: Reizt die Augen und die Haut.

Sicherheitsratschläge

S 1: Unter Verschluss aufbewahren.
S 2: Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen.
S 51: Nur in gut gelüfteten Bereichen verwenden.
S 26: Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt aufsuchen.
S 23: Bei Spritzverarbeitung zusätzlich beachten: Aerosole (Spritznebel) nicht einatmen.
S 38: Bei unzureichender Belüftung Atemschutzgerät anlegen.
S 45: Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, dieses Etikett vorzeigen).

Danger notices

R 10: Flammable.
R 20: Harmful to health if inhaled.
R 36/38: Irritates the eyes and skin.

Safety advice

S 1: Store under lock and key.
S 2: Keep out of the reach of children.
S 51: Use only in well-ventilated rooms.
S 26: On contact with the eyes, immediately wash with copious amounts of water and consult a doctor.
S 23: When applying as a spray, ensure in addition that you do not inhale the spray mist (aerosol).
S 38: In poor ventilating conditions, wear breathing apparatus.
S 45: In the event of an accident or indisposition, immediately consult a doctor (show this label whenever possible).



Dr.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Jordan



Universität-GH Paderborn

Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie auf einfache Weise eine überschlägige Vordimensionierung von Faserverbundbauteilen möglich ist. Hier werden dabei Werkstoffkennwerte aus dem Segelflugzeugbau zugrunde gelegt. Für eine exakte Auslegung ist ggf. eine Ermittlung der Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit vom Herstellverfahren erforderlich.

1. Einführung in die Problematik

2. Aufbau eines Kunststoffschalentr Tragflügels

3. Berechnungsbeispiel

- Ermittlung der Belastungen im Tragflügel
- Berechnung der Schnittlasten
- Dimensionierung der Gurtquerschnitte
- Ermittlung der Rovinganzahl in den Gurten
- Dimensionierung der Stegbeschichtung
- Ermittlung der erforderlichen Gewebestärke für die Gurtbeschichtung

4. Zusammenfassung

1. Einführung in die Problematik

Fragestellung beim Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen:

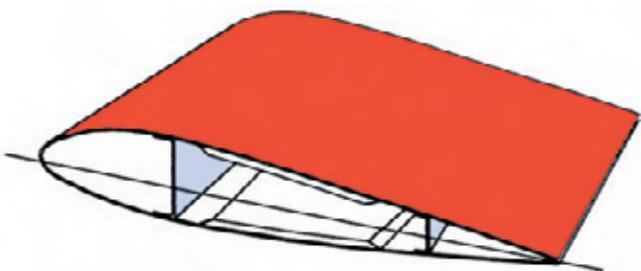
Welche Anzahl an Fasern sind erforderlich, damit das Bauteil den Beanspruchungen standhält?

Vorgehensweise bei einer überschlägigen Berechnung:

- Zunächst werden die Belastungen ermittelt.
- Die Belastungsarten werden unterschiedlichen Belastungsrichtungen zugeordnet.

Für jede Belastungsrichtung kann entsprechend gültiger Bauvorschriften die erforderliche Menge an Fasern errechnet werden.

2. Aufbau eines Kunststoffschalentr Tragflügels



Flügelschale als geschlossenes Profil
The skin of a wing, here depicted as a closed section

The simplified example given in the following shows how preliminary dimensions can be roughly calculated for fibre composite components. The values are based on material characteristics encountered in glider construction. Exact dimensioning may necessitate determining the material characteristics from case to case, which vary depending on the manufacturing method.

1. Introduction to the problems

2. Structure of a plastic monocoque wing

3. Example calculations

- Determining the loads in the wing
- Calculating the internal loads
- Dimensioning the brace sections
- Determining the number of rovings in the braces
- Dimensioning the web coatings
- Determining the thickness of the fabric needed for the brace coating

4. Summary

1. Introduction to the problems

The question that must be answered before dimensions are calculated with fibre composites is:

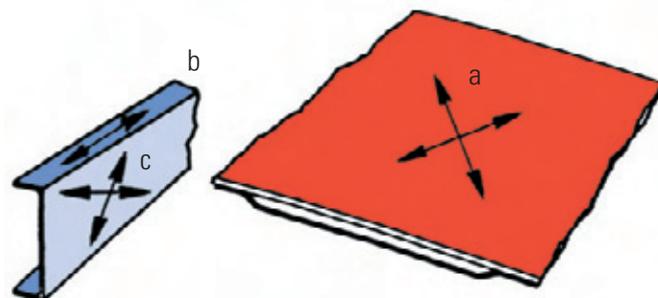
How many fibres are needed if the component is to withstand the loads acting on it?

Procedure for rough calculations:

- The loads must first be determined.
- The various loads must then be assigned directions.

For every direction of load, the quantity of fibres can be calculated as a function of values obtained from the pertinent construction regulations.

2. Structure of a plastic monocoque wing



- Flügelschale als geschlossenes Profil → Torsion des Flügels
The skin of the wing (here as a closed section) → for torsional strength
- Holmgurte → Biegesteifigkeit des Flügels
Spar booms → for the wing's flexural strength
- Schubsteg → nimmt die Querkräfte auf
Shear webs → for absorbing shear forces

Aufbau eines Kastenholmes

- a) Ober- und Untergurt aus Kohlefaserrovings zur Aufnahme der Biegebelastung (Zug-Druckspannungen in Längsrichtung). Rechnerische Bruchspannung* bei einem Faservolumengehalt von 54 %:

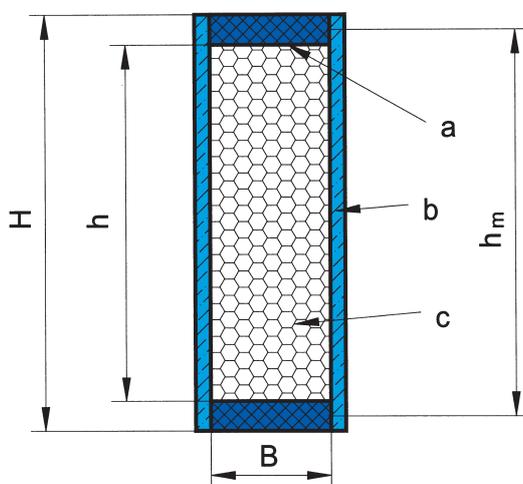
$$\sigma_{b,B} = 600 \text{ N/mm}^2$$

- b) Stegbeschichtung aus Kohlefasergewebe zur Aufnahme der Querkräfte (Schubspannungen).

Rechnerische Bruchspannung bei einem Faservolumengehalt von 35 %:

$$\tau_B = 114 \text{ N/mm}^2$$

- c) Schaumstoffkern, um ein Ausbeulen der Stegbeschichtung zu verhindern (extrudierte Schaumstoffe mit besonderen Eigenschaften).



Structure of a box spar

- a) Top and bottom booms of carbon-fibre rovings for absorbing the bending stresses (compressive and tensile stresses acting along the length). Theoretical fracture stress* for a fibre volume content of 54 %:

$$\sigma_{b,B} = 600 \text{ N/mm}^2$$

- b) Web coating of carbon-fibre fabric for absorbing the shear forces (shear stresses).

Theoretical fracture stress for a fibre volume content of 35 %:

$$\tau_B = 114 \text{ N/mm}^2$$

- c) Foam core for preventing the web coating from bellying (extruded foams with special properties).

* Wert nach IDAFLIEG, Dimensionierungsrichtwerte für den Motor- und Segelflugzeugbau, erhältlich beim Luftfahrt-Bundesamt, Hermann-Blenk-Str. 26, 38108 Braunschweig, Tel. 0531-2355-0, Fax 0531-2355-710

* Value obtained from IDAFLIEG's Dimensionierungsrichtwerte für den Motor- und Segelflugzeugbau, available from the federal aviation authority: Luftfahrt-Bundesamt, Hermann-Blenk-Str. 26, D-38108 Braunschweig, Germany, tel. +49 (0)531 2355-0, fax: +49 (0)531 2355-710

3. Berechnungsbeispiel

Es soll der Tragflügelholm eines Leichtflugzeuges als Kastenholm dimensioniert werden. Gesucht ist die Anzahl der Rovings im Ober- und Untergurt. Weiterhin ist die Anzahl der Gewebelagen für die Stegbeschichtung zu ermitteln.

3. a) Ermittlung der Belastungen im Tragflügel

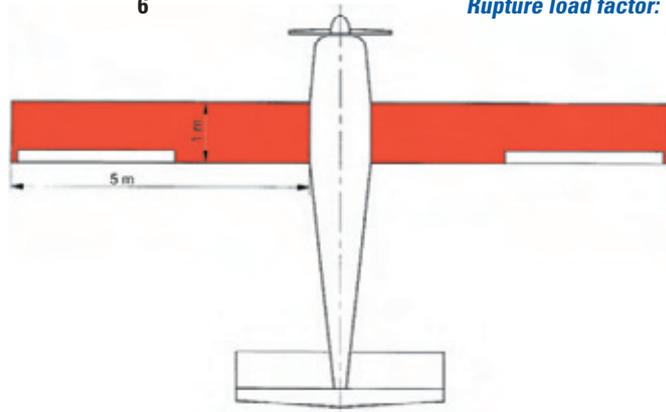
Gesamtabfluggewicht: 340 kg
Eigengewicht der Tragflügel: 40 kg
Gesamtflügelfläche: 10 m²
Tragflügelteufe: 1 m
Bruchlastvielfaches: 6

3. Example calculations

The wing spar of a light plane is to be dimensioned as a box spar. What has to be determined here is the number of rovings in the top and bottom boom as well as the number of fabric plies for the web coating.

3. a) Determining the loads in the wing

Total take-off mass: 340 kg
Weight of the wings: 40 kg
Total wing area: 10 m²
Wing chord: 1 m
Rupture load factor: 6



Vereinfachte Annahme: Der Tragflügel trägt sich selbst.

Für die Dimensionierung der Tragflügelholme ist die am Rumpf konzentrierte Masse maßgeblich.

For the sake of simplicity, the calculations will assume that the wing is self-supporting.

The mass concentrated at the fuselage is a decisive factor influencing the wing spar's final dimensions.

Bei einem Lastvielfachen von 6 g müssen die Tragflügel folgende Auftriebskraft liefern, um den Rumpf zu tragen:

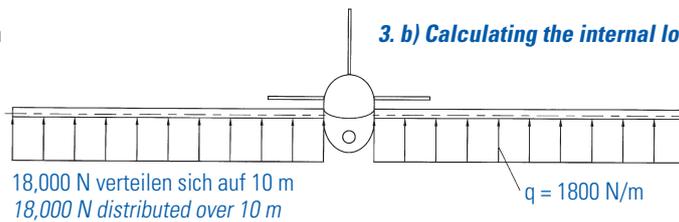
With a load factor of 6, the lift that the wings must provide to carry the fuselage is calculated as follows:

$$F = 300 \text{ kg} \cdot 6 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18.000 \text{ N}$$

$$F = 300 \text{ kg} \cdot 6 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18.000 \text{ N}$$

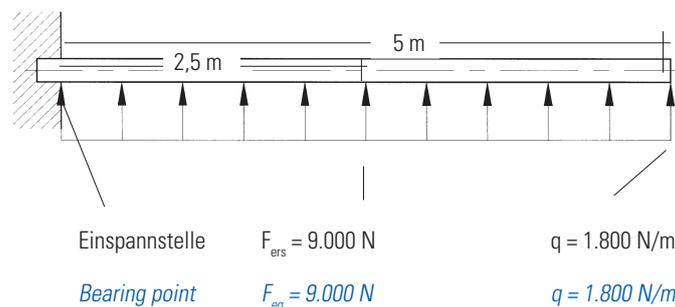
3. b) Berechnung der Schnittlasten

3. b) Calculating the internal loads



Das mechanische Modell zur Ermittlung der Schnittlasten in einer Tragflügelhälfte ist:

The mechanical model for determining the internal loads in one half of the wing:



Die mittig anzuordnende Ersatzkraft weist zur Einspannstelle im Rumpf einen Hebelarm von 2,5 m auf.

Der Moment an der Einspannstelle ist damit:

$$9.000 \text{ N} \cdot 2,5 \text{ m} = 22.500 \text{ Nm}$$

Die Querkraft an der Einspannstelle ist:

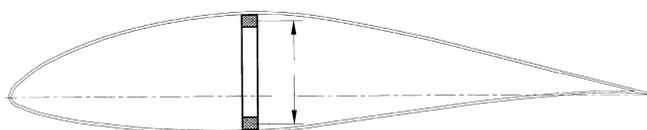
$$F_q = 9.000 \text{ N}$$

3. c) Dimensionierung der Gurtquerschnitte

Bei positiver Abfanglast entstehen im Untergurt Zug- und im Obergurt Druckkräfte. Diese Kräfte bilden das Gegenmoment zum Biegemoment im Tragflügel.

Die mittlere Gurthöhe sei hier:

$$h_m = 150 \text{ mm}$$



Die Gurtkräfte sind:

$$F_{\text{Zug, Druck}} = \frac{\text{Moment}}{\text{Hebelarm}} = \frac{22.500 \text{ Nm}}{0,15 \text{ m}} = 150.000 \text{ N}$$

Bei einer rechnerisch zulässigen Biegebruchspannung von $\sigma_{b,B} = 600 \text{ N/mm}^2$ ist folgender Gurtquerschnitt erforderlich:

$$\text{Querschnitt} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Spannung}} = \frac{150.000 \text{ N}}{600 \text{ N/mm}^2} = 250 \text{ mm}^2 = 2,5 \text{ cm}^2$$

3. d) Ermittlung der erforderlichen Rovinganzahl in den Gurten

Der Gurt muß mindestens die Anzahl von Kohlefaserrovings enthalten, die einem Faservolumengehalt von 54 % entsprechen. Maßgeblich ist dabei nicht der Querschnitt, sondern die Anzahl korrekt verlegter und korrekt getränkter Fasern.

Es werden Fasern der Stärke **1610 tex = 1610 g/km** verwendet. Bei einer Dichte $\rho_{\text{Faser}} = 1,8 \text{ g/cm}^3$ ist der Querschnitt einer einzelnen Faser:

$$A_{\text{Faser}} = \frac{1610 \text{ g} \cdot \text{cm}^3}{\text{km} \cdot 1,8 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{100.000 \text{ cm}} = 0,00894 \text{ cm}^2$$

54 % des Gurtquerschnittes sind der Faseranteil, der Rest ist Harzanteil. Jeder Gurt muß also folgende Anzahl der beschriebenen Rovings enthalten:

$$\begin{aligned} \text{Anzahl der Rovings} &= 0,54 \cdot \frac{\text{Gesamtquerschnitt}}{\text{Querschnitt des Einzelrovings}} \\ &= \frac{2,5 \text{ cm}^2}{0,00894 \text{ cm}^2} \cdot 0,54 = 152 \end{aligned}$$

The equivalent force F_{eq} acts at the centre of the wing half, i.e. at a distance (moment arm of the force) of 2.5 m from the bearing point in the fuselage.

So the bending moment acting on the bearing point is:

$$9.000 \text{ N} \cdot 2,5 \text{ m} = 22.500 \text{ Nm}$$

and the shear force at this point is:

$$F_q = 9.000 \text{ N}$$

3. c) Dimensioning the brace sections

A positive manoeuvring load generates tensile stresses in the bottom boom and compressive stresses in the top boom. These forces in turn generate a bending force that acts against the bending moment calculated above for the wing.

With, say, a mean height of the brace:

$$h_m = 150 \text{ mm}$$

The forces acting on the brace are:

$$F_{\text{tens.comp.}} = \frac{\text{moment}}{\text{moment arm}} = \frac{22.500 \text{ Nm}}{0,15 \text{ m}} = 150.000 \text{ N}$$

A theoretical max. bending fracture stress $\sigma_{b,B}$ of 600 N/mm^2 requires the following brace section:

$$\text{Section} = \frac{\text{force}}{\text{tension}} = \frac{150.000 \text{ N}}{600 \text{ N/mm}^2} = 250 \text{ mm}^2 = 2,5 \text{ cm}^2$$

3. d) Determining the number of rovings in the braces

The brace must contain at least that number of carbon-fibre rovings that corresponds to a fibre volume content of 54%. The decisive factors here are not only the cross section, but also the number of correctly laid and correctly impregnated fibres.

Finding application are fibres with a density of **1610 tex, or 1610 g/km**. With a density r_{fibre} of **1.8 g/cm³**, the cross section of a single fibre is calculated as follows:

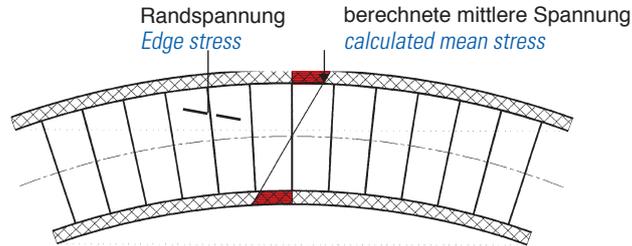
$$A_{\text{Fibre}} = \frac{1610 \text{ g} \cdot \text{cm}^3}{\text{km} \cdot 1,8 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{100.000 \text{ cm}} = 0,00894 \text{ cm}^2$$

The fibre volume fraction is 54% of the brace section, the rest is the resin fraction. Accordingly, every brace must contain the following number of the rovings described above:

$$\begin{aligned} \text{number of rovings} &= 0,54 \cdot \frac{\text{total cross section}}{\text{cross section of a single roving}} \\ &= \frac{2,5 \text{ cm}^2}{0,00894 \text{ cm}^2} \cdot 0,54 = 152 \end{aligned}$$

In den Holmgurten wurde die mittlere Biegespannung, d.h. die Spannung in der Mitte des Gurtes berechnet. Am äußeren Rand des Gurtes sind die Dehnungen und damit auch die Spannungen höher. Bei zumeist dünnen Holmgurten ist diese Vorgehensweise für eine überschlägige Berechnung aber in den meisten Fällen ausreichend.

The bending stress calculated earlier is the mean value acted along the centre of the spar boom. At the outer edge of the boom, the elongations, and therefore the stresses, are higher. The procedure adopted here is, however, in most cases adequate for the rough dimensioning of spar booms, which are usually thin.



3. e) Dimensionierung der Stegbeschichtung

Die beidseitige Beschichtung des Holmsteges nimmt die Querkraft im Tragflügel auf.

Die Schubspannungen in der Beschichtung sind:

$$\tau_B = \frac{\text{Querkraft}}{\text{Querschnittsfläche der Stegbeschichtung}}$$

Bei einer rechnerisch zulässigen Schubbruchspannung von $\tau_B = 114 \text{ N/mm}^2$ ist folgender Gesamtquerschnitt beider Stege zusammen erforderlich:

$$\begin{aligned} \text{Querschnittsfläche} &= \frac{\text{Querkraft}}{\text{Schubspannung}} \\ &= \frac{9.000 \text{ N}}{114 \text{ N/mm}^2} = 78,9 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Die Querschnittsfläche der Stegbeschichtungen ergibt sich aus der Höhe des Holmes und der Dicke der Beschichtung. Es ist also folgende Beschichtungsstärke mindestens erforderlich:

$$\begin{aligned} \text{Beschichtungsstärke} &= \frac{\text{Querschnittsfläche}}{2 \cdot \text{Holmhöhe}} \\ &= \frac{78,9 \text{ mm}^2}{2 \cdot 150 \text{ mm}} = 0,263 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. f) Ermittlung der erforderlichen Gewebestärke für die Gurtbeschichtung

Die Beschichtung soll mit einem Kohlefasergewebe mit einem Flächengewicht von 125 g/m^2 erfolgen.

Eine einzelne Lage eines solchen Gewebes ergibt bei 35 % Faservolumenanteil eine Laminatstärke von:

$$\begin{aligned} \text{Lagenstärke} &= \frac{\text{Flächengewicht}}{\text{Faservolumenanteil} \cdot \text{Faserdichte}} \\ &= \frac{125 \text{ g/m}^2}{0,35 \cdot 1,8 \text{ g/cm}^3} = \frac{125 \text{ g/m}^2}{10.000 \text{ cm}^2 \cdot 0,35 \cdot 1,8 \text{ g/cm}^3} \\ &= 0,02 \text{ cm} = 0,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Alle Angaben ohne Gewähr, da eine korrekte Umsetzung nicht überprüft werden kann.

3. e) Dimensioning the web coatings

The coating on both sides of the spar web absorbs the shear forces in the wing.

The shear stresses in the coating are calculated as follows:

$$\tau_B = \frac{\text{shear force}}{\text{sectional area of the web coating}}$$

A theoretical max shear fracture stress τ_B of 114 N/mm^2 requires the following total cross section for both webs:

$$\begin{aligned} \text{Sectional area} &= \frac{\text{shear force}}{\text{shear stress}} \\ &= \frac{9.000 \text{ N}}{114 \text{ N/mm}^2} = 78,9 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

The sectional area of the web coatings is a function of their thickness and the spar's height. So the following minimum thickness is needed for the coating:

$$\begin{aligned} \text{Coating thickness} &= \frac{\text{sectional area}}{2 \cdot \text{spar height}} \\ &= \frac{78,9 \text{ mm}^2}{2 \cdot 150 \text{ mm}} = 0,263 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. f) Determining the thickness of the fabric needed for the brace coating

The brace is to be coated with a carbon-fibre fabric of 125 g/m^2 .

With a fibre volume fraction of 35%, a single ply of this fabric yields a laminating thickness calculated as follows:

$$\begin{aligned} \text{Ply thickness} &= \frac{\text{weight per unit area}}{\text{fibre volume fraction} \cdot \text{fibre density}} \\ &= \frac{125 \text{ g/m}^2}{0,35 \cdot 1,8 \text{ g/cm}^3} = \frac{125 \text{ g/m}^2}{10.000 \text{ cm}^2 \cdot 0,35 \cdot 1,8 \text{ g/cm}^3} \\ &= 0,02 \text{ cm} = 0,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

In view of the difficulties associated with verifying correct applications, we cannot accept any liability for the data given herein.

Um die ermittelte Beschichtungsstärke von 0,263 mm zu erzielen, muß jede Seite des Holmes also mit 2 Lagen des 125 g/m² Kohlefasergewebes beschichtet werden. Entsprechend der Belastung (Schub) müssen die Fasern in einem Winkel unter 45° zur Holmachse verlaufen.

4. Zusammenfassung

- Im vorliegenden Beispiel wurde der Holm eines Kleinflugzeuges am Rumpfübergang (der am höchsten belasteten Stelle) dimensioniert. Eine überschlägige Dimensionierung von Faserverbundstrukturen ist auch mit einfachen Mitteln und unter Zuhilfenahme einfacher Formeln möglich.
- Die in den Vorschriften genannten rechnerischen Grenzwerte gelten für bestimmte Faservolumenanteile und dürfen nicht überschritten werden.
- Maßgeblich für die Festigkeit eines Bauteiles in Faserverbundbauweise ist, daß genügend Fasern in Belastungsrichtung angeordnet sind.
- Bei veränderten Faservolumenanteilen muß eine entsprechende Umrechnung erfolgen.
- Bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen muß neben einer ausreichenden Dimensionierung auf eine fasergerechte Bauteilgestaltung geachtet werden. Hier liefern die Bauvorschriften sowie Fachbücher und Anwendungsblätter der Werkstofflieferanten zahlreiche Hinweise.

The calculated coating thickness of 0.263 mm is obtained when each side of the spar is coated with two plies of the 125 g/m² carbon-fibre fabric. To absorb the (shear) loads effectively, the fibres must run at an angle of 45° to the spar's axis.

4. Summary

- *The presented example calculated the dimensions for a spar at the transition to the fuselage (the site of maximum loading) of a light plane, demonstrating that also simple means and simple formula can be used to calculate roughly the dimensions of fibre composite structures.*
- *The theoretical limit values given in the regulations apply to certain fibre volume contents and must not be exceeded.*
- *The strength of a component manufactured from fibre composites depends decisively on the correct orientation of an adequate number of fibres in the direction of loading.*
- *After any changes to the fibre volume content, the values must be recalculated.*
- *The manufacture of fibre composite components not only depends on adequate dimensioning, but also on a component design that can utilise the advantages of fibre reinforcement. Numerous tips and other information can be found in the construction regulations, specialised reference works, and the application data sheets available from material suppliers.*



Holm und Flächenschale eines UL-Nurflüglers

Spar and skin of an ultralight flying wing



Aufbringen eines gefüllten Epoxydharzes zum Verkleben der Tragflächen-Halbschalen

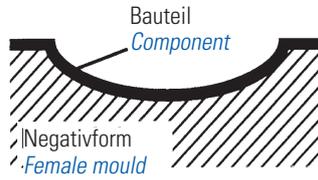
Filled epoxy resin being applied to glue wing shells

Zur Fertigung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen sind entsprechende Werkzeuge (z.B. Negativ-Formen) erforderlich. Diese werden in der Regel preisgünstig und schnell aus GFK gefertigt. Je nach Anforderung sind auch Formen aus Gips, Holz oder Metall sinnvoll.

The manufacture of components from fibre composites needs the appropriate tools (e.g. female moulds). In general, these tools can be manufactured quickly and at low cost from GRP. Depending on the respective requirements, other possible mould materials are plaster, wood, and metal.

Negativ-Formen

Stets dann, wenn die Fertigteile glatte Außenflächen aufweisen, wird eine **Negativ-Form** erstellt (Boote, Karosserieteile, Flugzeugrümpfe und -flächen, etc.). Es handelt sich praktisch um einen „Abdruck“ des Originalteiles.

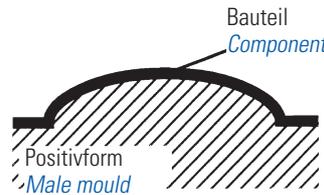


Female moulds

A female mould is always created whenever the finished parts have to exhibit smooth external surfaces (boats, body parts, fuselages and other aircraft surfaces, etc.). The mould is practically an "imprint" of the original part.

Positiv-Formen

Gegenstände mit glatten Innenflächen (Behälter, Springbrunnen, Schalen) benötigen eine **Positiv-Form** d.h. einen Formkern.



Male moulds

Objects with smooth internal surfaces (vessels, fountains, dishes) need a male mould, i.e. a mould core.

Geeignete Materialien

Gips

Ein Gipswerkzeug ist nur für wenige Abformungen geeignet. Die Oberflächen haben nicht die hohe Güte von GFK.

Suitable materials

Plaster

A plaster mould is suitable for a small number of demouldings only. The surfaces do not exhibit the high quality of GRP.

Holz

Eine Holzform ist ebenfalls nur für kleinere Serien geeignet. Um die üblichen Trennmittel verwenden zu können, sollte die Oberfläche lackiert werden. Kastenförmige Bauteile (z.B. Behälter) können in einer einfachen Form aus kunststoffbeschichteten Spanplatten hergestellt werden.

Wood

Likewise, a wooden mould is suitable only for smaller-scale series. Before the usual release agents can be applied, the surface must be varnished. Box-type components (e.g. tanks) can be manufactured in a simple mould of plastic-lined particle boards.

Hartschalengips

Für Serien eignet sich die R&G **Laminierkeramik** (ein synthetischer Gips), die in Verbindung mit einer harten Oberflächenschicht aus Epoxyd-Formenharz eingesetzt wird. Die Entformungsstückzahlen sind ähnlich hoch wie bei GFK-Formen.

Hauptnachteil dieser Bauweise ist das relativ hohe Gewicht (ca. 20-30 kg/m²), Hauptvorteil die einfache Anwendung, die völlige Ungiftigkeit des Produktes und der vergleichsweise günstige Preis.

Hard shell plaster

A suitable material for series production is the R&G laminating ceramic (a synthetic plaster) that is used in conjunction with a hard surface layer of epoxy mould resin. The number of demouldings is about as high as for GRP moulds.

The main drawback of this manufacturing method is the relatively high weight (approx. 20 - 30 kg/m²), the main advantages are the ease of use, the complete absence of toxicity, and the comparably low price.



Zweiteilige Negativform mit Epoxyd-Deckschicht (Formenharz P) und einem tragenden Laminat aus Hartschalengips (R&G Laminierkeramik)

Two-part female mould with epoxy overlay (mould resin P) and a base laminate of hard shell plaster (R&G laminating ceramic)

Metall

Metallwerkzeuge sind am haltbarsten und werden vor allem für Großserien eingesetzt. Sie sind im Vergleich zu den gebräuchlichen GFK-Formen außerordentlich teuer.

Metal

Metal moulds are the most durable and are used primarily for large batches. Compared with conventional GRP moulds, they are inordinately expensive.

Dauerelastische Formen

Für Formen mit starken Hinterschnidungen oder reliefartigen Oberflächen werden hochflexible Siliconkautschuk-Abformmassen verwendet. Die Dehnfähigkeit beträgt zwischen 350 und 500%. Siliconkautschuk ist selbsttrennend und für Entformungen mit Polyesterharz, Gips, Wachs etc. geeignet. Bei Verwendung von Epoxyd-Gieß/Laminierharzen sollte zuvor R&G Grundierwachs aufgetragen werden.



Dauerelastische Form aus Siliconkautschuk

Permanently elastic mould of silicone rubber

GFK

Eine Form aus **Glasfaserkunststoff (GFK)** erlaubt die Herstellung von wenigstens einigen hundert Teilen in jeder Größe.

Die Deckschicht bestimmt die Güte der Oberfläche.

Formenharz P ist hartelastisch, kantenfest und gut schleif- und polierbar.

Glasfaser-Polyesterharz (GF-UP)

Preiswerte Formen werden aus GF-UP gefertigt (Deckschicht aus **UP-Vorgelat farblos**, schwarz eingefärbt und einem Glaslaminat mit **Polyester-Laminierharz U 569 TV-01V**).

Polyesterformen schwinden stärker als solche aus Epoxydharz. Sie sind daher vor allem für Formteile wie z.B. Behälter und Bootsschalen geeignet, bei denen nicht die höchste Maßhaltigkeit gefordert ist.

Glasfaser-Epoxydharz (GF-EP)

Hochwertige, sehr maßhaltige Formen, z.B. für Flugzeug-, Modell- und Maschinenteile werden aus GF-EP angefertigt. Sie sind sehr genau und langlebig.

Die Formoberflächen sind polierfähig und je nach verwendetem Formenharz unterschiedlich hart.

Bei der Härtung der EP-Harze tritt ein geringfügiger Volumenschwund auf. Dieser Schwund ist in den unverstärkten Harzschichten (Formenharz) am stärksten, im Glasgewebelaminat am geringsten. Soll ein Verzug sicher vermieden werden, muß das Laminat für die Form **symmetrisch** aufgebaut werden. Dieses Verfahren wird ab Seite 1.76 „Formenbau mit GFK“ ausführlich beschrieben.



GFK-Form im Segelflugzeugbau

GRP mould in glider construction

Permanently elastic moulds

Moulds with extreme undercuts or with surfaces bearing relief structures are made of highly flexible silicone rubber moulding compounds. The extensibility is between 350 and 500%. Silicone rubber is self-releasing and suitable for demouldings with polyester resin, plaster, wax, etc. When epoxy cast / laminating resin systems are used, R&G priming wax must first be applied to the mould.

GRP

*A mould of **glass-fibre-reinforced plastic (GRP)** can be used to manufacture at least several hundred parts of any size.*

The overlay defines the quality of the surface.

***Mould resin P** is hard-elastic, has a good edge strength, and can be ground and polished to a high degree.*

Glass-fibre-reinforced polyester resin (GF-UP)

*Low-cost moulds are made of GF-UP (overlay of **colourless UP pre-gel coloured black** and a glass laminate with **polyester laminating resin U 569 TV-01V**).*

Moulds of polyester undergo greater shrinkage than those of epoxy resin. For this reason, they are primarily suitable for mould parts such as vessels, boat hulls, etc., which do not require the highest dimensional stability.

Glass-fibre-reinforced polyester resin (GF-PU)

High-quality moulds of high dimensional stability, e.g. for aircraft, model, and machine parts, are manufactured from GF-EP. They are highly precise and have long service lives.

*The mould surfaces are polishable and exhibit various hardness values depending on the mould resin used. There is negligible dimensional shrinkage when these EP resins cure. This shrinkage is greatest in the unreinforced resin layers (mould resin), smallest in the glass fabric laminate. A reliable measure to prevent warpage is to lay up the laminate for the mould **symmetrically**. This method is described in detail on pages 1.76 ff "Mould construction with GRP".*



Dr.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Jorden



Universität-GH Paderborn

HERSTELLUNG EINER KUNSTSTOFF-FORM

Faserverbundbauteile werden in der Regel in Formen hergestellt, die selbst aus Faserverbundwerkstoffen aufgebaut sind. Die Herstellung einer Kunststoff-Form erfordert nur wenige Hilfsmittel und ist mit etwas Geschick einfach und rasch zu bewältigen. Es sind jedoch einige wichtige Punkte zu beachten, die im folgenden am Beispiel einer Form für einen Modellflugzeugrumpf dargestellt werden.

Der Herstellungsprozeß läßt sich prinzipiell in folgende Arbeitsschritte unterteilen

- 1.) Herstellung und Vorbereitung des Positivkernes
- 2.) Festlegung der Trennebenen und Erstellung des Trennbrettes
- 3.) Vorbereitungen zum Abformen
- 4.) Laminieren der Formteile
- 5.) Nachbehandlung der Form

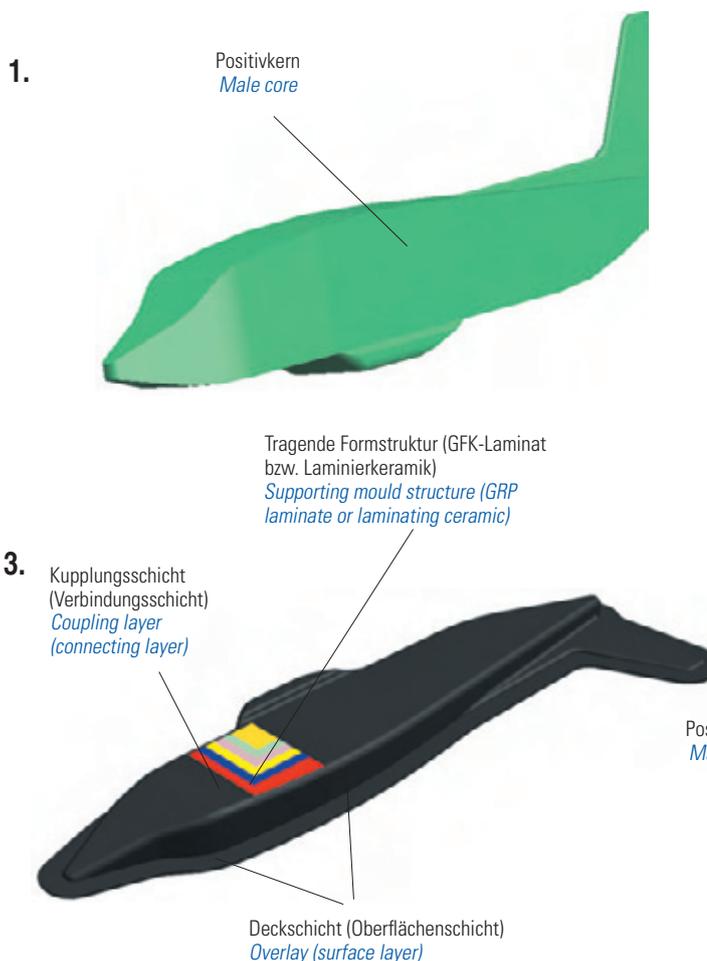
MANUFACTURE OF A PLASTIC MOULD

As a rule, fibre composite components are manufactured in moulds that are also made of fibre composites. The manufacture of a plastic mould needs only very few aids and is quick and simple with a little skill. However, there are a number of important points to be observed. These points are depicted in the following, which takes as its example a mould for a model fuselage.

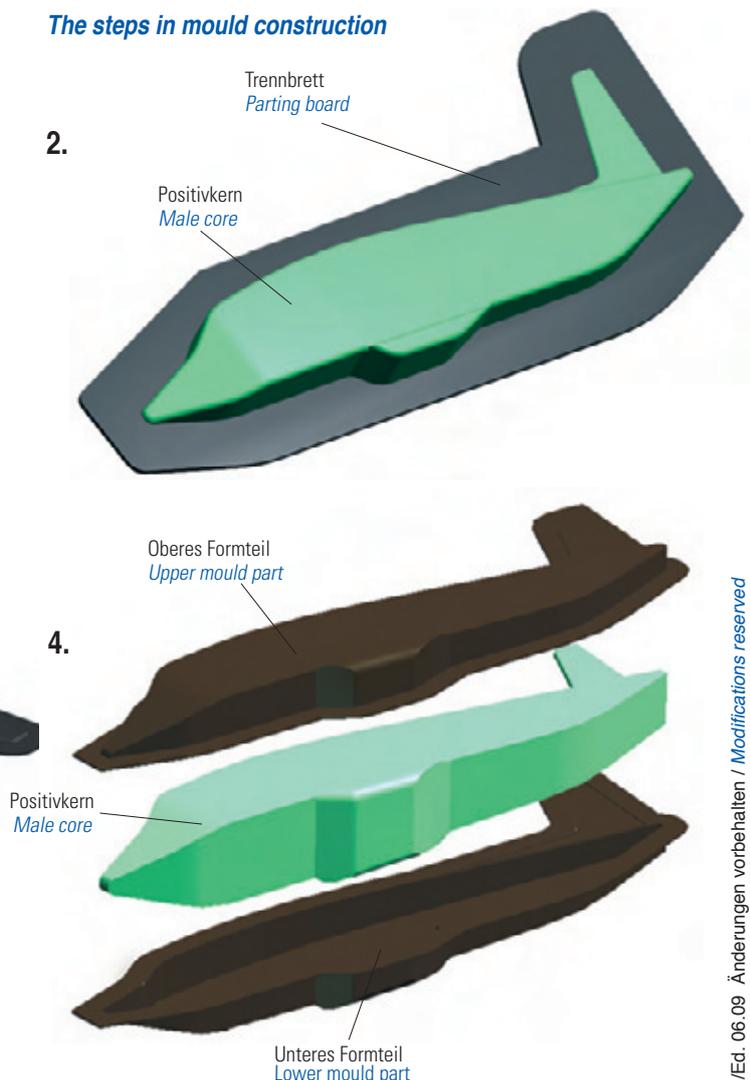
In principle, the manufacturing process can be divided into the following steps

- 1.) Manufacturing and preparing the male core
- 2.) Determining the parting lines and creating the parting board
- 3.) Preparing the demoulding procedure
- 4.) Laminating the mould parts
- 5.) Post-treating the mould

Die einzelnen Arbeitsschritte beim Formenbau



The steps in mould construction



Werkstoffe

- Grundierwachs und Folientrennmittel PVA
- Formenharz (z.B. Typ P)
- Epoxyd-Laminierharz (z.B. Typ L, L 20, LF)
- Glasgewebe 163 - 580 g/m²
- Glasfaserschnitzel 4,5 mm und Baumwollflocken
- Paßstifte oder Paßdübel
- Fix-a-Form Formverschraubungen
- Modelliermasse
- Sekundenkleber

Werkzeuge + Hilfsstoffe

- Glas- oder Aramidscheren
- Pinsel
- Schaumstoffwalzen (Mini-Laminiererset)
- Mischbecher und Rührstäbchen
- Digitalwaage
- Bohrmaschine, Stichsäge
- Beschichtete Spanplatten
- Gips
- Messer, Stechbeitel

1) Herstellung und Vorbereitung des Positivkernes

Der Positivkern, auch als Urmodell bezeichnet, ist die Kontur für die Bauteile, die später in der Form entstehen sollen. Vorhandene Bauteile, die z.B. in Styropor/Holzbauweise erstellt wurden, lassen sich häufig schon als Urmodell verwenden. Soll ein Positivkern neu angefertigt werden, kann dieser aus einem festen Schaumstoff wie z.B. Roofmate modelliert und mit mehreren Lagen GFK überzogen werden. Um eine glatte Oberfläche zu erreichen, wird der Positivkern nach anschließendem Spachteln mit einem Hochglanzlack lackiert (**Bild 1**).

Lackierte Positivkerne können vor dem Abformen poliert werden. Dabei ist jedoch unbedingt zu beachten, daß die verwendete Politur siliconfrei ist, da Siliconrückstände das Trennergebnis beeinträchtigen. Autopolituren enthalten häufig Siliconbestandteile und sind deshalb nicht empfehlenswert. R&G bietet Polituren an, die speziell auf den Kunststoffformenbau abgestimmt sind.



Bild 1

Fig. 1

Bevor der Positivkern das erste Mal mit Trennmittel behandelt wird, sollte er mit einem Reinigungsmittel, z.B. Waschbenzin, gereinigt werden. Dabei ist vorher die Verträglichkeit des Reinigungsmittels mit der Oberfläche zu testen. Das Reinigungsmittel muß vor dem ersten Wachsauftrag mehrere Stunden in einem warmen Raum vollständig ablüften. Auch wenn das Reinigungsmittel oberflächlich schon lange abgetrocknet ist, könnten ansonsten Rückstände des Lösungsmittels, die in tieferen Poren zurückbleiben, chemisch mit dem Trennmittel reagieren und das Trennergebnis beeinflussen.

Materials

- Priming wax and film release agent PVA
- Mould resin (e.g. type P or aluminium)
- Epoxy laminating resin (e.g. type L, L 20, LF)
- Glass fabric 163 - 580 g/m²
- Chopped glass fibre strands 4.5 mm and cotton flock
- Alignment pins or dowels
- Fix-A-Form mould screw unions
- Modelling compound
- Superglue

Tools + aids

- Glass or aramid shears
- Brushes
- Foam rollers (mini laminating set)
- Mixing cups and stirring rods
- Digital scales
- Drilling machine, compass saw
- Coated particle boards
- Plaster
- Knife, chisel

1) Manufacturing and preparing the male core

Also called the master pattern, the male core bears the contours of the components that are to be generated later in the mould. Also components that have been created beforehand as structures of e.g. foamed polystyrene and wood can often be used as master patterns. If a new male core has to be created, this can be modelled from a rigid foam, e.g. Roofmate, and coated with several layers of GRP. A smooth surface can be obtained when the male core is coated with a high-gloss varnish after some filling work (**Fig. 1**). Varnished male cores can be polished before they are placed in a mould. However, it is imperative that the polish is free of silicone, any residue of which will impair the releasing process. Finish restorers for automobiles often contain silicone constituents, and their use is therefore inadvisable. R&G offers polishes whose formulae are specifically compatible with the manufacture of plastic moulds.

Before it is treated for the first time with a release agent, the male core should be cleaned with a cleaning agent, e.g. benzene. Beforehand, however, the compatibility between the cleaning agent and the surface must be tested. Before the first application of wax, the cleaning agent must be left for several hours in a warm room until it no longer contains any trapped air. Even when the cleaning agent seems to have long dried, there can still be solvent residue in deeper pores which react chemically with the release agent and so influence the releasing process.

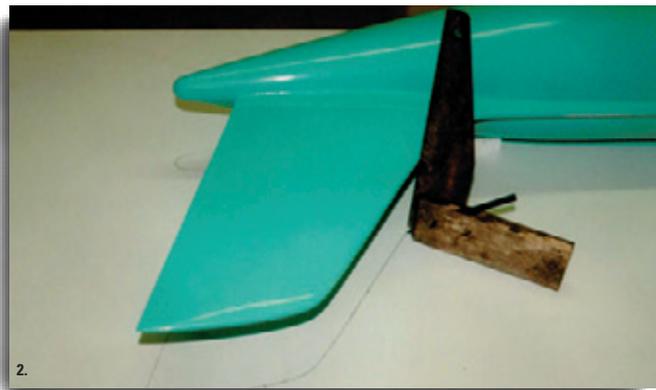
2) Festlegung der Trennebenen und Erstellung des Trennbrettes

Je nach Geometrie können Formen aus mehreren Teilen bestehen. Die Trennebenen sind so zu wählen, daß Hinterschnitte vermieden werden und eine eindeutige Entformungsrichtung mit genügend Formschräge für jedes Formsegment möglich ist. Symmetrische Formen können zumeist zweiteilig erstellt werden. Im Beispiel wird die Rumpfform des Modellflugzeuges in der Symmetrieebene geteilt. Dazu muß die Seitenkontur des Rumpfes auf das Trennbrett übertragen werden.

2) Determining the parting lines and creating the parting board

Depending on their geometry, moulds can consist of several parts. The parting lines must be chosen so that there are no undercuts, and every mould segment has a clear demoulding direction with an adequate draft. In most cases, symmetrical moulds can be made as two parts. In the example, the fuselage of a model aircraft is divided along its plane of symmetry. Afterwards, the fuselage's side contour must be transferred to the parting board.

Das Urmodell wird parallel zum Trennbrett ausgerichtet. Das Trennbrett besteht aus einer kunststoffbeschichteten Spanplatte. Die Projektion der Rumpfsseitenfläche wird auf das Trennbrett übertragen. Ein Winkel, der diagonal durchbohrt wurde, führt den Stift (Bild 2).



The master pattern is aligned parallel to the parting board, here a particle board lined with plastic. The fuselage's side is projected on to the parting board. In this case, this projection is drawn with a pen inserted through a diagonal hole (Fig. 2).

Die Rumpfkontur wird aus dem Trennbrett ausgesägt (Bild 3).



The fuselage's contour is sawn out of the parting board (Fig. 3).

Eine zweite Platte wird über eine Abstandsleiste mit dem Trennbrett verschraubt. So ergibt sich eine verwindungssteife Einheit und es wird vermieden, daß sich beim späteren Hantieren die Trennfugen verschieben (Bild 4).



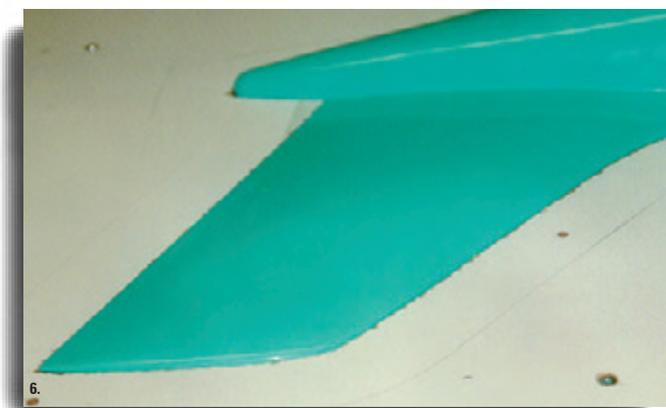
A spacer bar is used to connect a second panel to the parting board. This gives rise to a torsion-resistant unit and prevents the parting lines from displacing during later operations (Fig. 4).

Gipsmörtelkleckse, in die der Positivkern unter Zwischenlage einer Folie hinein gedrückt wird, bilden eine definierte Auflage für den Positivkern (**Bild 5**).



*Pressing the male core on an intermediate film into lumps of plaster causes them to adopt the exact shape of the male core and so present a predefined base (**Fig. 5**).*

Der Positivkern wird genau bis zur Trennebene im Trennbrett eingelassen. Die Fugen zwischen Positivkern und Trennbrett werden mit Modelliermasse geschlossen (**Bild 6**).



*The male core is inserted precisely to the parting line in the parting board. The gaps between the male core and the parting board are sealed with a modelling compound (**Fig. 6**).*

Dazu wird die Modelliermasse in der Mikrowelle erwärmt und dann mit einem Finger in die Fuge gestrichen (**Bild 7**).

*The modelling compound is first heated in a microwave oven before it is spread in the gap with a finger (**Fig. 7**).*



Die überstehende Masse kann anschließend mit einem scharfen Werkzeug abgezogen werden (**Bild 8**).

*The excess compound can then be removed with a sharp tool (**Fig. 8**).*



Reste werden mit einem weichen Baumwolltuch weggpoliert (Bild 9).

Any residue is polished off with a soft cotton cloth (Fig. 9).



Auf diese Weise entsteht eine scharfe Kante zwischen Urmodell und Trennbrett, die Voraussetzung für präzise Kanten der Negativform und saubere Nähte späterer Bauteile ist (Bild 10).

In this manner, a sharp edge is created between the master pattern and the parting board. This sharp edge is indispensable if the female mould is to exhibit precise edges, and all subsequent components clean seams (Fig. 10).

3) Vorbereitungen zum Abformen

Damit die Formhälften zueinander zentriert werden können, werden im Formenrand Paßdübel eingelassen.

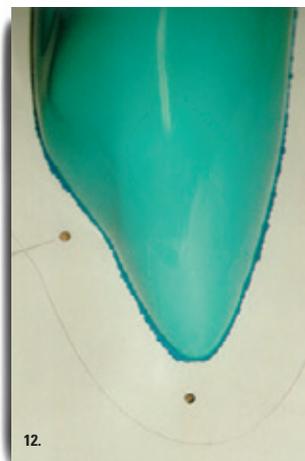
3) Preparing the demoulding procedure

So that the mould halves can be centred to one another, dowels are inserted into their edges.



Der Formenrand wird durch Leisten, die mit Sekundenkleber auf das Trennbrett geklebt werden, abgegrenzt. Dadurch wird das spätere Besäumen des Formenrandes vereinfacht (Bild 11).

The edge of the mould is contained by strips superglued to the parting board. This simplifies subsequent trimming work on the edge of the mould (Fig. 11).



Die dreiteiligen Paßdübel von R&G mit ihren herausnehmbaren Paßstiften vereinfachen es später, den Formenrand sauber zu halten. Zudem stören bei diesem System keine spitzen Dübel, wenn eine Form z.B. für die Herstellung von Wabensandwichbauteilen Vakuum gezogen werden soll. Über Formenverschraubungen können Formenteile verbunden werden. Damit sich Paßdübel und Formenverschraubungen beim Laminieren der Formhälften nicht verschieben, wird das Trennbrett an entsprechenden Stellen angebohrt (Bild 12).

The three-part dowels from R&G with their removable alignment pins simplify the work at a later point of keeping the edge of the mould clean. In addition, this system does not present any sharp points that could disrupt the process when, say, a mould has to be created in a vacuum for manufacturing honeycomb sandwich components. Mould screw unions can be used to join mould parts. To prevent the dowels and mould screw unions from displacing when the mould halves are being laminated, blind holes are drilled in the parting board at appropriate sites (Fig. 12).

Über Stifte bzw. Schrauben werden die Paßdübel und die Formverschraubungen auf dem Trennbrett befestigt. Vor dem Auftrag des Trennmittels werden Positivkern und Trennbrett gründlich gereinigt. Wenn dabei ein Lösungsmittel verwendet wird, muß auch hier wiederum darauf geachtet werden, daß das Lösungsmittel vollständig ablüften kann. Für eine hohe Oberflächenqualität der Form sollten die folgenden Arbeitsschritte in möglichst sauberer Umgebung erfolgen. Grundierwachs wird mit einem weichen Baumwollappen oder Pinsel aufgetragen (**Bild 13**).



*Pins or screws are then used to secure the dowels and the mould screw unions in place on the parting board. Before the release agent is applied, the male core and the parting board must be cleaned thoroughly. When a solvent is used, it must be ensured in this case, too, that the solvent does not contain any trapped air. The mould can exhibit a high surface quality only when the following steps are performed in as clean an environment as possible. Priming wax is applied with a soft cotton cloth or brush (**Fig. 13**).*

Durch die Vorbehandlung mit Grundierwachs verläuft das Folientrennmittel sehr gleichmäßig. Für große Flächen gibt es auch ein spritzfähig eingestelltes Folientrennmittel.

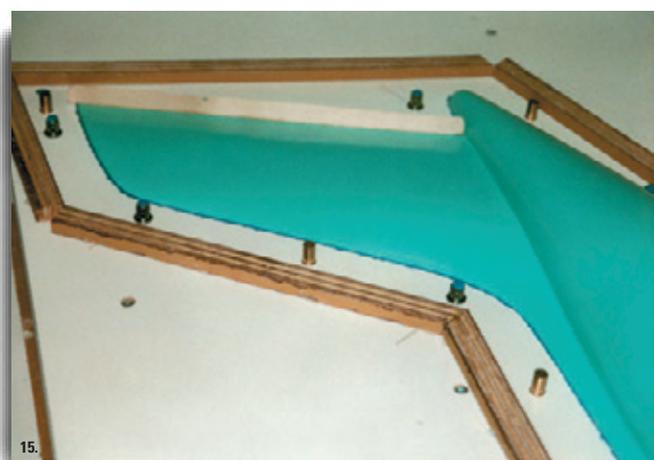
The pretreatment with priming wax enhances the uniformity of the film release agent's flow properties. In the case of large surfaces, a film release agent is available that can be applied as a spray.

Das Folientrennmittel kann mit einem Schwämmchen oder einem Pinsel aufgetragen werden (**Bild 14**).



*The film release agent can be applied with a sponge or a brush (**Fig. 14**).*

Erst nach dem Auftragen der Trennmittel werden die Paßdübel und die Formenverschraubungen auf den Formenrand gesetzt. Damit die Formenverschraubungen nicht mit Harz volllaufen, werden Sie mit Modelliermasse gefüllt. Sie sind über Stifte auf dem Trennbrett fixiert, damit sie beim Laminieren nicht verrutschen (**Bild 15**).



*Not until after the release agent has been applied are the dowels and the mould screw unions inserted into the edge of the mould. So that they cannot fill up with resin, the mould screw unions are sealed with modelling compound. Pins secure them in place on the parting board so that they cannot slip during laminating work (**Fig. 15**).*

4) Laminieren der Formteile

Nach den Vorbereitungen können die Formenhälften laminiert werden. Der Laminataufbau einer Form kann auf unterschiedliche Weise und mit unterschiedlichen Materialien erfolgen. Im Folgenden wird der klassische Laminataufbau einer GFK-Form mit symmetrischem Laminataufbau dargestellt:

Als Deckschicht für die Form wurde hier das Formenharz P verwendet. Diese Formenharz zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit, hohe Kantenfestigkeit und thixotropes Verhalten an steilen Flächen aus. Es läßt sich mit einem Pinsel blasenfrei auftragen, so daß sich die porenfreien Oberflächen der Negativform hochglänzend aufpolieren lassen. Der Hinterbau der Form erfolgt mit einem dünnflüssigen Epoxyd (z.B. Epoxydharz L, L 20 oder LF) und mehreren Lagen Glasgewebe.

4) Laminating the mould parts

After these preparations, the mould halves can now be laminated. The laminates for a mould can be laid up in a variety of ways. The following presents the classical lay-up method for a GRP mould with a symmetrical laminate structure:

Used for the mould's overlay here is the mould resin P. This mould resin is characterised by good processability, high edge strength, and thixotropic behaviour on steeply inclined surfaces. It can be applied free of bubbles with a brush so that the non-porous surfaces of the female mould can be polished to a high gloss.

The mould's base structure is made up of a low-viscosity epoxy resin system (e.g. epoxy resin L, L 20, or LF) and several layers of glass fabric.



Um einen Verzug der Form zu verhindern, erfolgt der Lagenaufbau symmetrisch. Zunächst wird das Formenharz aufgetragen und mit dem Pinsel gleichmäßig verstrichen. Damit in den Kanten keine Lufteinschlüsse entstehen, muß das Formenharz entlang der Kanten mit einem weichen Pinsel gründlich verstrichen werden (Bild 16).

A symmetrical structure of layers prevents the mould from warping. First of all, the mould resin is applied and spread uniformly with a brush. So that the edges are free of air inclusions, a soft brush must be applied thoroughly over the edges of the mould resin (Fig. 16).

Um eine gute Verbindung zwischen der Deckschicht und dem tragenden Hinterbau zu schaffen, werden in das Formenharz Glasfaserschnitzel eingestreut, die eine mechanische Verankerung zwischen Deckschicht und Laminat gewährleisten (Bild 17).

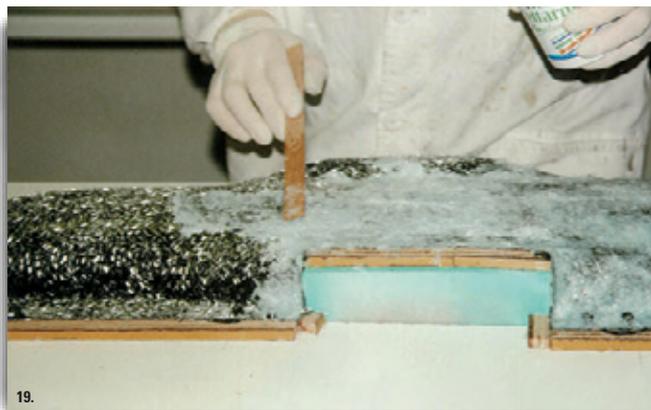
To ensure a good connection between the overlay and the supporting base structure, chopped glass fibre strands that promote mechanical anchorage between the overlay and laminate are strewn in the mould resin (Fig. 17).

In das frisch eingestrichene Formenharz werden Kurzglasfaserschnitzel eingestreut, überschüssige Glasfaserschnitzel werden, nachdem die Deckschicht ca. 2 Stunden angeliert ist, vorsichtig wieder abgesaugt (Bild 17 + 18).

Chopped glass fibre is strewn in the freshly spread mould resin, and after the overlay has had about two hours to gel, excess chopped glass fibre is carefully removed by suction (Figs. 17 + 18).

Für die Kupplungsschicht werden Kurzglasfasern und Baumwollflocken zu gleichen Teilen in das Harz gemischt.

Die Kupplungsschicht (**Bild 19**) vermeidet Lufteinschlüsse zwischen Deckschicht und Laminat und wird insbesondere in Ecken und Kanten sowie im Bereich der Paßdübel etwas dicker aufgetragen (**Bild 20**), damit die erste Gewebelage faltenfrei laminiert werden kann (**Bild 21**). Zunächst wird eine Lage 163 g/m² Glasgewebe laminiert.



For the coupling layer, equal quantities of chopped glass fibre and cotton flock are mixed into the resin.

*The coupling layer (**Fig. 19**) prevents air inclusions from forming between the overlay and the laminate, and a thicker coat must be applied in particular to corners and edges as well as near dowels (**Fig. 20**) so that the first fabric layer can be laminated free of creases (**Fig. 21**). First of all, a layer of 163 g/m² glass fabric is laminated.*



Die erste Gewebelage wird harzreich laminiert, damit oberflächennahe Lufteinschlüsse vermieden werden (**Bild 22**), überschüssiges Harz aus den ersten Gewebelagen wird ohnehin von den nächsten Gewebelagen aufgesaugt.

*The first fabric layer is laminated with a high resin content so that no air inclusions can form near the surface (**Fig. 22**). Excess from this high resin content can then be absorbed by the following fabric layers.*

Um genügend Wandstärke aufzubauen, folgen zwei Lagen Glasrovingewebe 580 g/m² (**Bild 23**).

Sehr gut eignet sich auch das besonders drapierfähige Multiaxial-Glasgelege 408 g/m².



*An adequate wall thickness is obtained when two layers of 580 g/m² glass roving fabric follow (**Fig. 23**).*

A further ideal material is the particularly drapable 408 g/m² multi-axial glass inlay.

Um mit einem symmetrischen Lageraufbau den Verzug der Form zu vermeiden, wird danach wieder ein 163 g/m² Glasgewebe auflaminiert (**Bild 24**). Bei dem symmetrischen Aufbau der Form ist auch die gleichmäßige Orientierung der Faserrichtungen zu berücksichtigen. Die letzte Gewebelage wird dabei immer relativ harzarm laminiert, da genügend Harz aus den unteren Gewebelagen zur Verfügung steht (**Bild 25**).



A symmetrical structure of layers as a preventive measure against mould warpage is now obtained when a 163 g/m² glass fabric is laminated on top (**Fig. 24**). The symmetrical layout of the mould must also consider the uniform orientation of the fibres. The last fabric layer is always applied with a relatively low resin content because sufficient resin is available from the layers beneath (**Fig. 25**).

Zum Schluß wird das Laminat noch einmal mit Formenharz eingestrichen (**Bild 26**). Die erste Formenhälfte sollte anschließend mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur aushärten, bevor das überstehende Gewebe am Formenrand abgeschnitten (**Bild 27**) und das Trennbrett entfernt wird.



Finally, mould resin is once more spread on the laminate (**Fig. 26**). The first mould half should now cure for at least twenty-four hours at room temperature before the fabric projecting from the edge of the mould is cut off (**Fig. 27**) and the parting board removed.

Anschließend werden Vorbereitungen getroffen, um die zweite Formenhälfte laminieren zu können. Der Positivkern sollte dabei möglichst in der Form bleiben. Der Formenrand der ersten Formenhälfte dient nun als Trennbrett für die zweite Hälfte. Dazu wird der Rand neu abgetrennt (**Bild 28**) und, nachdem Kern und Formenrand mit Trennmittel eingestrichen wurden, die Paßdübel und die Formverschraubungen aufgesetzt (**Bild 29**). Auf gleiche Weise, wie schon zuvor beschrieben, wird die zweite Formenhälfte laminiert.



The next step involves preparations for laminating the second mould half. During these preparations, the male core should remain in the mould whenever possible. The edge of the first mould half now serves as the parting board for the second half. Here the edge is again removed (**Fig. 28**) and, once a release agent has been applied to the core and mould's edge, the dowels and the mould screw unions are attached (**Fig. 29**). The second mould half is laminated in the same manner as described above.

(**Bild 30**) Nach dem Aufbringen der Trennmittel erfolgt der Aufbau der zweiten Formhälfte, beginnend mit einer Schicht Formenharz.



(**Fig. 30**) Once the release agent has been applied, the second mould half is now laid up, the first layer being of mould resin.

Einstreuen von Kurzglasfasern in die „nasse“ Deckschicht (**Bild 31**).



*Chopped glass fibre being strewn in the "wet" overlay (**Fig. 31**).*

Auflaminieren der ersten Glasgewebelage 163 g/m² (**Bild 32**).



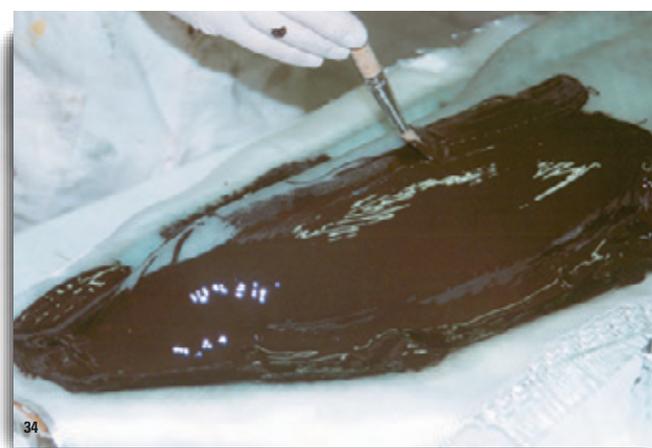
*The first glass fabric layer 163 g/m² being laminated on top (**Fig. 32**).*

Überschüssiges Harz der ersten Gewebelagen wird von den weiteren Gewebelagen aufgesaugt (**Bild 33**).



*Excess resin from the first fabric layers is absorbed into the following fabric layers (**Fig. 33**).*

Zum Schluß wird wiederum ein 163 g/m² Glasgewebe laminiert, auf das die abschließende Lage Formenharz aufgetragen wird (**Bild 34**).



*Finally, a 163 g/m² glass fabric is again laminated, to which the last layer of mould resin is applied (**Fig. 34**).*

5) Nachbehandlung der Form

Um einen Verzug zu vermeiden, muß die Form mindestens 24 Stunden bei einer Temperatur von 25 °C aushärten. Es wird empfohlen, die Form vor dem Öffnen zu tempern oder zumindest einige Tage möglichst warm zu lagern. Beim Tempern darf die Temperatur nur langsam erhöht werden.

Nach dem Aushärten und Tempern wird das überstehende Gewebe abgeschnitten und die Form geöffnet.

Die Leistenabschnitte am Formenrand werden entfernt (**Bild 35**). Nach außen überstehendes Laminat wird am einfachsten mit einem Metallsägeblatt abgetrennt.



5) Post-treating the mould

So that no warpage can occur, the mould must cure at a temperature of 25 °C for at least twenty-four hours. It is recommended to anneal the mould before opening or at least to store it in as hot an environment as possible for a few days. In the case of annealing, the temperature must be increased only gradually.

*After curing and annealing, the projecting fabric is cut off and the mould opened. The strip sections at the edge of the mould are removed (**Fig. 35**). The simplest method for removing projecting laminate is to use a hacksaw blade.*



Das Folientrennmittel verbleibt in den Negativformen und kann mit Wasser ausgewaschen werden. Bei sorgfältiger Arbeitsweise präsentieren sich die beiden Formenhälften hochglänzend. Fehlstellen können bei Bedarf ausgeschliffen und aufpoliert werden. Bevor die ersten Bauteile hergestellt werden, müssen neue Formen mehrmals gründlich gewachst werden.

Der Positivkern ließ sich ohne Beschädigungen entformen. Das ist allerdings nur möglich, wenn die Form keine Hinterschneidungen aufweist und bei den Vorbereitungen, insbesondere dem Trennmittelauftrag, auf Sauberkeit geachtet und sorgfältig gearbeitet wurde. Eine auf diese Weise hergestellte GFK-Form übersteht bei sachgerechter Vorgehensweise mehrere hundert Entformungen.

The film release agent remains in the female mould and can be rinsed out with water. If the work has been performed carefully, the two mould halves should present high-gloss surfaces. Any voids can be removed by grinding, and the affected sites polished. Before the first components are manufactured, new moulds must be thoroughly waxed several times.

The male core can be demoulded without incurring damage. However, this is possible only when the mould does not exhibit any undercuts, cleanness was observed during the preparations, and the work was conducted carefully. A GRP mould manufactured in this manner can survive several hundred demouldings when used properly.

Weitere Hinweise

Wenn noch Fehler in der Form festgestellt werden, können diese mit Softflex-Schleifpapier Korn 500 - 1200 im Naßschliff beseitigt werden.

Matte Stellen lassen sich durch Schwabbeln mit geeigneten, siliconfreien Poliermitteln beseitigen (z.B. R&G Glanzwachs Bestell-Nr. 315 100-1).

Kleine Löcher an der Oberfläche werden mit einem „Klecks“ Formenharz versehen und durch einen aufgeklebten Tesafilm geglättet.

Further information

If the mould is still found to have flaws, these can be remedied with Softflex abrasive paper applied in a wet grinding process.

Matt places can be treated with a polishing wheel and a suitable polishing agent free of silicone (e.g. R&G priming wax, order no. 315 100-1).

Small holes in the surface are filled with a dab of mould resin and smoothed over with a strip of adhesive tape.

Automatisches Trennen

Beim Trennen der Formenhälften (Entfernen des Urmodells als auch von Positiv-Bauteilen) gibt es gelegentlich Schwierigkeiten; üblicherweise wird dann mit Schraubendrehern, Holzkeilen etc. nachgeholfen, wodurch die Form, zumindest auf Dauer, beschädigt wird.

Automatic parting of the mould halves

There are occasionally difficulties when the mould halves part (when the master pattern or the male-moulded components are removed); the subsequent procedure usually avails itself of a screwdriver, wooden wedges, etc., whereby the mould, at least when repeatedly subjected to this procedure, suffers damage.



Einfacher ist es, beim Bau gleich mehrere Fix-A-Form Gewindestücke einzulaminieren, die auf der Gegenseite, also der anderen Formhälfte, ein Metallteil als Gegenstück erhalten (kleines Stück Flacheisen o.ä.). Zum Entformen werden dann Inbusschrauben eingedreht, die gegen das Metallstück der zweiten Formhälfte drücken. Dadurch kann die Form leicht, gleichmäßig und ohne Beschädigung geöffnet werden.

Druckluft / Wasserkraft

Eine komfortable Methode ist das Öffnen der Form mit Druckluft, die mittels Kompressor eingeleitet wird. Dazu wird an einer tiefen Stelle der Form ein Loch mit etwa 2 - 3 mm Durchmesser gebohrt und auf der Rückseite ein Druckluftanschluß aufgeklebt. Verwenden Sie zum Fixieren 5-Min.-Epoxy und zum Einbetten eingedicktes Epoxydharz (Rezeptur wie Kupplungsschicht). Ähnlich funktioniert das Trennen durch Einpressen von Wasser. Besonders bei sehr großen Bauteilen (Bootsbau) wird diese Methode angewandt.

HERSTELLUNG VON FWV-TEILEN IN FORMEN

Handlaminieren

Für die Herstellung kleinerer Serien sowie komplizierter Teile eignen sich am besten handwerkliche Verfahren wie das Handlaminieren (Handauflegeverfahren), da nur ein geringer technischer Aufwand erforderlich ist.

Vorbereitung

Eine neue Form muß zunächst gereinigt und poliert und anschließend z.B. mit Grundierwachs und Folientrennmittel behandelt werden. Bitte beachten Sie die Hinweise zur Verarbeitung der Trennmittel.

Deckschicht

Zuerst wird ein Gelcoat (Deckschichtharz) in die Form gestrichen, gespritzt oder gerollt.

Es eignen sich die **Epoxyd-Gelcoats farblos** und **weiß**, die mit Epoxydfarbpasten eingefärbt werden können.

Ebenfalls sehr gut geeignet sind **Polyester-Vorgelate**, die wegen ihrer guten Polierbarkeit auch **Schwabbellack** genannt werden.

Die Deckschicht ist sozusagen das Kleid des Kunststoffbauteils. Sie schützt das Laminat vor Umwelteinflüssen (z.B. Feuchtigkeit) und gibt dem Bauteil das ansprechende Äußere.

Wird ohne Deckschicht laminiert, weist die GFK-Oberfläche unzählige Pinholes (kleine Löcher) auf, die vor dem Lackieren mit Spachtel gefüllt werden müssen.

Lacke

Im Prinzip kann man Bauteile auch schon **in der Form** mehrfarbig lackieren.

Soll der Lack anstelle einer Deckschicht aufgebracht werden, sind unbedingt Vorversuche erforderlich, um die Wirksamkeit der Trennmittel zu prüfen. Lacke enthalten oft einen „**Lösemittelcocktail**“, der Trennmittel angreift.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, zunächst eine Schicht Vorgelat farblos aufzutreiben und auszuhärten. Auf dieser Oberfläche kann mit schwachhaftenden Folien (Maskierfilm aus dem Grafikerbedarf) abgeklebt und lackiert werden.

Es eignen sich praktisch alle Acryl- und Kunstharzlacke, 2-Komponenten-Lacke und natürlich auch eingefärbte Epoxydharze und UP-Vorgelat. Schriftzüge aus Folie können ebenfalls eingelegt werden.

Sind diese Arbeiten beendet, wird mit Epoxydharz laminiert.

Bei Verwendung von Polyester-Laminierharz muß zuvor die Styrolverträglichkeit der Lacke getestet werden. Nach dem Entformen zeigt sich ein Hinterglasmalerei-Effekt, der sehr schön wirken kann.

A simpler alternative involves laminating several Fix-A-Form screws in the structure of the mould and providing them on the opposite side, i.e.: The other mould half, with a metal counterpiece (small piece of flat steel or similar). Allen screws are then turned to press against the metal counterpiece of the second mould half and so push apart the two mould halves. The mould can then be opened easily, uniformly, and without incurring damage.

Compressed air / hydraulic power

One comfortable method involves opening the mould with compressed air supplied by a compressor. Here, a hole of about 2 - 3 mm diameter is drilled at a deep point on the mould, and a compressed air supply glued to the rear. Use five-minute epoxy for securing, and insipitated epoxy resin for embedding (recipe as coupling layer). Parting the mould under the application of pressurised water works similarly. This method is used in particular on very large components (boat building).

MANUFACTURING FC PARTS IN MOULDS

Hand lay-up operations

Because they do not need any special technical requirements, hand lay-up operations prove to be the best method a skilled worker can use for manufacturing both smaller-scale series and complicated parts.

Preparatory work

A new mould must first be cleaned, polished, and then treated e.g. with priming wax and film release agent. Please observe the information on how release agents are processed.

Overlay

First of all, a gel coat is applied with a brush, sprayer, or roller in the mould.

*Suitable **epoxy gel coats are colourless** or **white** because they can be mixed with epoxy colour pastes.*

*Also highly suitable are **polyester pre-gels**, which exhibit good polishing properties.*

The overlay is so to speak the dress of the plastic component. It protects the laminate against environmental influences (e.g. humidity) and gives the component its aesthetic exterior.

If laminating does not include an overlay, then the GRP surface exhibits countless pinholes that have to be filled before the surface is varnished.

Varnishes

*In principle, varnishes of various colours can be applied to components when they are still **in the mould**.*

*If a varnish is to be applied instead of an overlay, then it is absolutely important beforehand to conduct preliminary tests on the efficacy of the release agents. Varnishes often contain a **cocktail of solvents** that attack release agents.*

A second possibility involves first applying with a brush a layer of pre-gel colourless and letting it cure. Weakly adhesive films (graphic designers' masking film) can then be stuck over this surface and varnished.

Practically all acrylic and synthetic resin varnishes, two-component varnishes, and, of course, coloured epoxy resins and UP pre-gels as well are suitable. Lettering on film can also be embedded.

Once this work has been concluded, the next laminate is of epoxy resin.

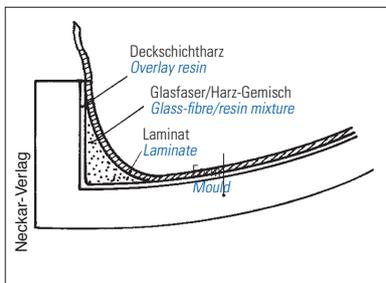
If polyester laminating resin is used, the varnishes' compatibility with styrene must first be tested. After demoulding, effects similar to verre églomisé are presented that many find pleasing to the eye.

Ecken abrunden und verstärken

Das Verstärkungsgewebe, meist aus Glas, hat eine gewisse Rückstellkraft und läßt sich daher nicht in scharfe Ecken legen. Es hat die Tendenz, sich immer wieder abzulösen, was zu einer Blasenbildung führt. Es ist also notwendig, scharfe Innenkanten vor dem Laminieren auszurunden.

Für die Herstellung einer Hohlkehle eignet sich ein dicker Brei aus Epoxidharz und Glasfaserschnitzel + Baumwollflocken. Wenn gleichzeitig eine höhere Belastbarkeit erwünscht ist, können auch Glas-, Aramid- oder Kohlerovings eingelegt werden.

Sehr leichte Füllmassen (Dichte um $0,5 \text{ g/cm}^3$) erhält man bei Verwendung von Glass-Bubbles (Micro-glashohlkugeln). Durch zusätzliches Eindicken mit Baumwollflocken oder Thixotropiermittel kann der Kugellagereffekt und damit das Abfließen der Mischung vermieden werden.



1) schematische Darstellung der Kantenbehandlung
1) schematic diagram of edge treatment

Radiusing and reinforcing corners

In most cases made of glass, the reinforcing fabric exhibits a certain restoring force that makes it virtually impossible to place correctly in sharp corners. Its tendency to detach each time leads to the formation of bubbles. It therefore becomes necessary to radius sharp inner edges before laminating.

A suitable compound for manufacturing a fillet is a thick paste of epoxy resin, chopped glass-fibre strands, and cotton flock. And if a greater load capacity is required, glass, aramid, or carbon rovings can also be laid.

Very light filling compounds (density about 0.5 g/cm^3) are obtained with glass bubbles. Additional inspissation with cotton flock or a thixotropy-enhancing agent helps to minimise the ball-bearing effect and so the mixture's tendency to sag.

Laminataufbau

Nachdem die Vorarbeiten abgeschlossen sind, kann mit dem eigentlichen Laminieren begonnen werden.

Vorher noch einige Bemerkungen zum Material:

Neben der Anzahl der verschiedenen Gewebelagen sollte auch die Faserrichtung den auftretenden Belastungen angepaßt sein. Der Vorteil von faserverstärkten Kunststoffen liegt ja gerade darin, daß die größte Festigkeit immer in Richtung der Faser erzielt wird. Der Konstrukteur ist damit in der Lage, die Festigkeit eines Bauteils durch entsprechende Faserorientierung zu gestalten.

Ein „normales“ Verstärkungsgewebe hat zwei Faserrichtungen, die Kette (Längsrichtung) und den Schuß (Querrichtung). Die Filamente kreuzen sich im rechten Winkel, liegen also senkrecht und waagrecht. In diesen beiden Richtungen ist die Festigkeit des Gewebes hoch. Wird Gewebe z.B. unter einem Winkel von 45° (diagonal) eingelegt und auf Zug und Druck belastet, ist die Festigkeit und Steifigkeit geringer als bei einer rechtwinkligen Ausrichtung. Wird ein unter 45° eingelegtes Gewebe allerdings auf Verdrehung (Torsion) belastet, liegen die Fasern in diesem Fall in Richtung der Belastung und erfüllen ihren Zweck optimal.

Wird hohe Biegefestigkeit in eine Vorzugsrichtung gefordert, kann ein unidirectionales Gewebe verwendet werden, bei dem etwa 90% der Fasern in Längsrichtung verlaufen.

Selbstverständlich lassen sich für die verschiedenen Belastungen auch verschiedene Gewebelagen einbringen, um die Festigkeit zu optimieren.

Das Laminieren

Unter Laminieren verstehen wir das schichtweise Einbringen von Verstärkungsgewebe von Hand (Handlaminieren). Dabei wird zuerst das Gewebe auf die richtige Größe zugeschnitten. Oft lohnt sich die Herstellung einer Kartonschablone.

Die mit einer Deckschicht versehene Form wird mit Harz eingestrichen und Gewebe aufgelegt. Nun wird laminiert, also das Gewebe mit dem darunter liegenden Harzanstrich getränkt.

Das Harz wird vorzugsweise von unten nach oben durch das Gewebe gearbeitet. Dies ergibt eine optimale Tränkung ohne Luft einschluß.

Die sorgfältige Benetzung läßt sich bei Glasgeweben optisch leicht kontrollieren: nicht getränkte Stellen erscheinen weiß, richtig getränkte Stellen transparent.

Laminate lay-up

Once this preliminary work has been concluded, the actual laminating work can begin.

But first a few remarks on the material:

Not only the number of the various fabric plies, also the fibre orientation should be chosen in view of the loads applied. After all, the advantage offered by fibre-reinforced plastics is that the greatest strength is always obtained in the direction of the fibres. As a result, the designer can modify the strength of a component by orienting the fibres accordingly.

In a "normal" reinforcing fabric the fibres are oriented along two directions, the warp (longitudinal direction) and the weft (transverse direction). The filaments cross at right angles, i.e. in the horizontal and vertical directions. The strength of the fabric in these two directions is high. On the other hand, if the fabric, for example, is laid at an angle of 45° (diagonally) and then subjected to tensile and compressive forces, its strength and rigidity are lower. If, however, a fabric laid at 45° is subjected instead to torsion (twisting), then the fibres lie along the respective load directions in this case and so optimally fulfil their purpose.

If high flexural strength is required in the one direction only, then a unidirectional fabric in which about 90% of the fibres are oriented along the longitudinal direction can be used.

Of course, different fabric plies can also be laid for optimising the strength with respect to the different load types.

Laminating

Laminating is understood to be the ply-by-ply build-up of reinforcing fabric by hand (hand lay-up). Here, the fabric is first cut to size. Often a cardboard template is manufactured to facilitate this work.

Provided with an overlay, the mould is coated with resin, and fabric laid on top. Now laminating begins, i.e. the fabric is impregnated with the underlying resin coat.

The most common method involves working the resin through the fabric from bottom to top. This results in the optimal impregnation without air inclusions.

Whether glass fabrics have been wetted correctly by the resin can be easily checked by eye: places that haven't been impregnated appear white, correctly impregnated places are transparent.



Gegebenenfalls muß mittels Pinsel weiteres Harz aufgetragen werden. Das **Entlüften** der Gewebe erfolgt durch **Stupfen** und **Streichen** mit einem Borstenpinsel oder bei größeren Bauteilen durch Abrollen mittels Velour-Walze und Teflonroller.

Danach folgt eine zweite Gewebelage, welche meist noch mit dem darunterliegenden Harz getränkt werden kann. Ein erneuter Harzauftrag ist nur dort nötig, wo das Gewebe trotz Stupfens weiß, also trocken bleibt.

Alle glänzenden Stellen deuten auf zuviel Harz hin. Dieses muß mit dem Pinsel an die Stellen gebracht werden, wo möglicherweise zuwenig vorhanden ist oder durch Auflegen von saugfähigem Papier entfernt werden. **Ein gutes Laminat** zeigt an der Rückseite die rauhe Gewebestruktur.

Der Faseranteil

Ein optimales Volumenverhältnis Harz : Verstärkungsgewebe wäre etwa 40:60, was jedoch beim Handlaminieren kaum erreicht wird. Mit einem Anteil 50:50 kann man bereits zufrieden sein.

Einfärbungen

Wenn farbige Deckschichten eingebracht werden, lohnt es sich, auch das Laminierharz abzutönen, damit die Deckkraft der Farbe erhöht wird. Die Verarbeitung farbigen Harzes erschwert allerdings das Feststellen von Luftblasen beim Laminiervorgang.

Gewebe

Beachten Sie, daß Sie zuerst ein eher dünneres Gewebe verwenden, welches sich gut um Ecken und Kanten laminieren läßt. Die nachfolgenden Lagen können dicker sein.

Bitte bedenken Sie, daß mehrere dünne Gewebe evtl. leichter einzubringen sind, als ein dickes Gewebe. Dazu kommt noch die Möglichkeit, daß bei mehreren Lagen die ggf. Festigkeit dadurch optimiert werden kann, daß die Lagen im Faserwinkel von 0°/90° und ± 45° orientiert werden.

Bei dünnen, flachen Geweben liegen die Fasern gestreckter im Laminat, als bei schweren Sorten. Mehrere Lagen dünnes Gewebe ergeben daher eine höhere Festigkeit, als wenige Lagen einer dicken Type.

Glasmatten (Vliese) eignen sich nur für Polyesterharze und ergeben sehr harzreiche Laminat mit vergleichsweise geringer Festigkeit. Ihr Einsatz ist daher hauptsächlich auf Anwendungen beschränkt, bei denen der Preis mit maßgebend ist und auf möglichst günstige Art ein dickes Laminat hergestellt werden soll (Kfz-Bauteile, Boote und Behälter etc.).

Zusammensetzen der Formteile (bei mehrteiligen Formen)

1.) Nach dem Laminieren wird das überstehende Gewebe mit einer gerundeten Schere abgeschnitten (**Skizze 2**), der Formrand gereinigt und das Bauteil mit einem vorgetränkten Gewebeband zusammengefügt. Man kann auch warten, bis das Harz angeliegt ist. Das überstehende Gewebe wird dann mit einem Messer abgeschnitten.

Beim Zusammenfügen der Halbschalen mittels Gewebeband sollte das Laminat noch klebrig sein, um eine optimal haftende Verbindung zu erzielen. Ist das Laminat bereits gehärtet, muß vorher angeschliffen werden.

2.) Die zweite Möglichkeit ist das bewährte naß-in-naß-Verfahren. Hier wird jeweils auf der einen Seite ein Streifen überstehendes Gewebe belassen (**Skizze 3**). Dieser Gewebeüberstand wird dann für die Verbindung der beiden Bauteilhälften verwendet.

Bei mehrschichtigen Laminaten können die ersten Gewebelagen bündig abgeschnitten werden. Nur die letzte Gewebelage wird wie vor beschrieben überstehend abgeschnitten.

If necessary, more resin must be applied with a brush.

De-airing the fabrics takes the form of **dabbing** and **stroking** with a bristle brush or, in the case of larger components, of rolling with a non-woven or Teflon roller.

A second fabric ply now follows which in most cases the underlying resin can still impregnate. A second application of resin becomes necessary only when the fabric remains white, i.e. dry, despite the above de-airing measures. All glossy places are a sign of too much resin.

A brush must be used to transfer this to places with possibly too little resin, or absorbent paper applied to remove it. **A good laminate** bears on its rear side the rough structure of the fabric.

The fibre volume fraction

The optimal volume ratio between resin and reinforcing fabric is about 40:60, a ratio, however, that can scarcely be achieved with hand lay-up operations. Instead, a ratio of 50:50 is considered to be a satisfactory result.

Colouring

When coloured overlays are applied, it often proves practical to tint the laminating resin as well in order to enhance the covering power of the colour. However, processing coloured resins makes more difficult the detection of air bubbles during the laminating process.

Fabrics

Always remember to use at first a thinner fabric that can be laminated well in corners and over edges. The subsequent layers can be thicker.

Please also remember that several thin fabrics are possibly easier to apply than one thick fabric. A further possibility is that, when several plies are applied, the strength can be optimised when the plies are oriented at fibre angles of 0°/90° or ±45°.

In thin, flat fabrics, the fibres are more elongated in the laminate than in heavier fabric types. So several plies of thin fabric yield a higher strength than fewer plies of a thick type.

Glass mats (non-wovens) are suitable for polyester resins only and yield laminates with a very high resin content and comparatively low strength. Their use is therefore mainly limited to applications with which the price plays a decisive role and a thick laminate must be manufactured in as economical a manner as possible (automobile parts, boats, tanks, etc.).

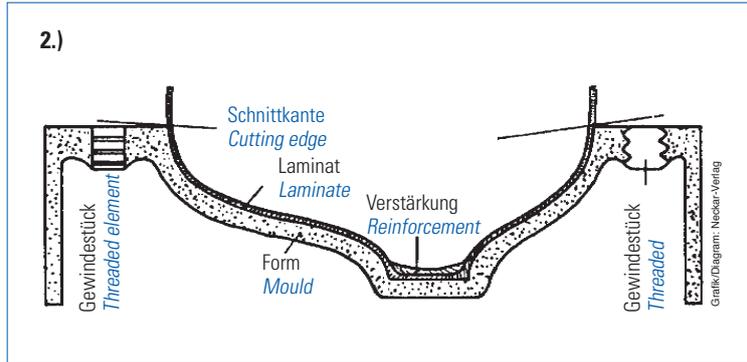
Assembling the mould parts (for split moulds)

1.) After laminating, the projecting fabric is cut off with a rounded pair of shears (**Diagram 2**), the edge of the mould cleaned, and the component assembled with a pre-impregnated fabric tape. Alternatively, the resin can be allowed to gel for a time. The projecting fabric is then cut off with a knife.

When the two shells are assembled with fabric tape, the laminate should still be sticky so that the optimal adhesive bond is obtained. If the laminate has already cured, it must first be ground.

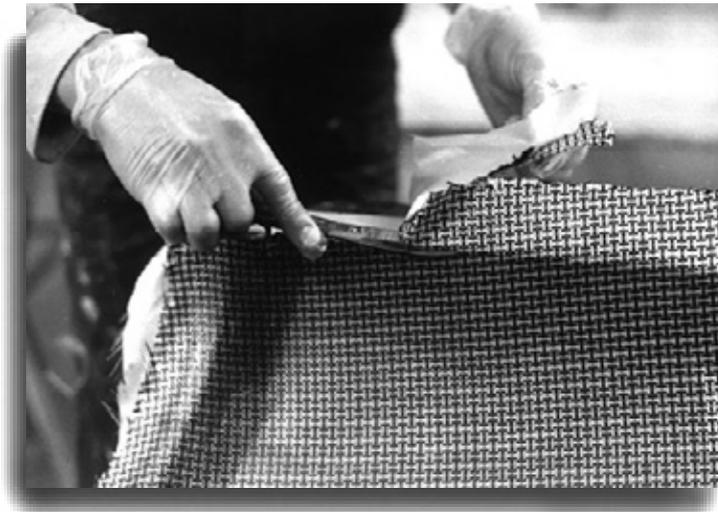
2.) The second possibility is the established wet-in-wet method. With this method, a strip of projecting fabric is left uncut on one side (**Diagram 3**). This projecting fabric is then used to assemble the two halves of the component.

In the case of multi-ply laminates, the first fabric plies can be cut flush to the mould's inner surface: only the last fabric ply is cut along the edge of the mould as described above.



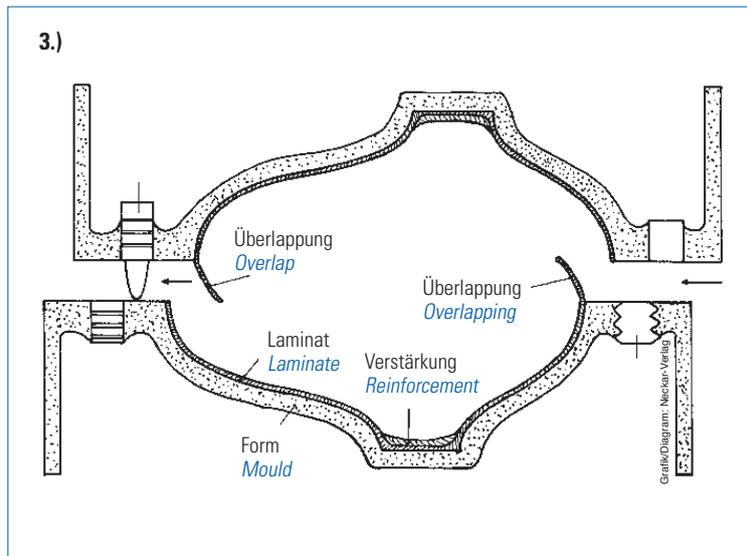
(Skizze 2) überstehendes Gewebe wird an der Formkante abgeschnitten

(Diagram 2) Projecting fabric is cut off along the edge of the mould



Abschneiden des überstehenden Gewebes mit einer gebogenen Spezialschere (siehe R&G-Zubehörprogramm).

Special curved shears for cutting off the projecting fabric (see R&G accessories programme)



(Skizze 3) Zusammensetzen nach der naß-in-naß-Methode

(Diagram 3) Wet-in-wet assembly of the two mould halves

POLYESTERHARZE
POLYESTER RESINS

UNGESÄTTIGTE POLYESTERHARZE

R&G führt eine Auswahl ungesättigter Polyesterharze (**UP**-Harze) für Anwendungen im Boots-, Fahrzeug- und Behälterbau. Zahlreiche Spezialharze, Härter und Sonderfarbtöne sind auf Anfrage lieferbar.

Geschichtliches

Die ersten ungesättigten linearen Polyesterharze wurden 1894 beschrieben, die technischen Grundlagen für die Herstellung jedoch erst 1934 geschaffen. Seit 1942 werden UP-Harze in Verbindung mit Glasfasern eingesetzt.

Aufbau der UP-Harze / Reaktionsmechanismus

Alle nachfolgend beschriebenen Harze sind ungesättigte Polyester (UP), die in Styrol gelöst sind.

Hinsichtlich ihres chemischen Aufbaus handelt es sich um die Veresterungsprodukte ungesättigter und gesättigter Dicarbonsäuren mit bifunktionellen Alkoholen im Verhältnis 1 : 1. Je nach Veresterungsgrad bilden sie zähflüssige bzw. halbhart Harze, die zwecks leichter Verarbeitungsmöglichkeit in monomeren, polymerisierbaren Flüssigkeiten, z.B. Monostyrol oder Diallylphthalat, gelöst werden (siehe Herstellungsschema).

Ersetzt man einen Teil der ungesättigten Säuren durch gesättigte, kann man die Reaktivität der Harze variieren und durch Kombination geeigneter Ausgangskomponenten die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften ihrer Härtingsprodukte gezielt beeinflussen. Die so erhaltenen flüssigen Produkte unterschiedlicher Konsistenz bezeichnet man als **Klarharze**.

Klarharze lassen sich durch Einarbeitung von Farbmitteln, Füllstoffen, Verstärkungsmaterialien und anderen Substanzen für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete konfektionieren. Sie eröffnen dem Verarbeiter in einer Reihe von Herstellungsverfahren einen breiten Spielraum für die Lösung seiner Fertigungsaufgaben.

Härtung

Polyesterharze bedürfen zur Aushärtung des Zusatzes von Reaktionsmitteln. Während bei der **Warmhärtung** (100 - 130 °C) lediglich organische Peroxide als Härter für die Copolymerisation zwischen monomeren Lösungsmittel und ungesättigtem Polyester eingesetzt werden, erfordert bei **Kalthärtung** (18 - 25 °C) die Zugabe sowohl eines Peroxid-Härters, als auch kleiner Mengen eines **Beschleunigers**, um die chemische Reaktion (Vernetzung) in Gang zu setzen. Viele Polyesterharzsysteme werden bereits ab Werk **Cobalt-vorbeschleunigt** geliefert, um die Verarbeitung zu vereinfachen. Auch Lichtinitiatoren können für die Härtung verwendet werden. Diese setzen bei Einwirkung bestimmter Wellenlängen die Reaktion in Gang. Solche Härtungen werden bevorzugt bei einer kontinuierlichen Verarbeitung verwendet.

Die Härtungsreaktion

Der einmal begonnene Härtungsprozess setzt sich von selbst fort und kann nicht mehr unterbrochen werden. Die Härtungszeit hängt von folgenden **Faktoren** ab:

- **Art und Zusammensetzung des UP-Harzes**
- **Angewandetes Reaktionsmittelsystem**
- **Menge der dazugegebenen Reaktionsmittel**
- **Arbeitstemperatur**
- **Form und Größe des Werkstücks**

Man unterscheidet schnellhärtende (hochreaktive) und langsamhärtende (niedrigreaktive) UP-Harze. Dazwischen liegen Harze mittlerer Reaktivität. Die genaue Kenntnis der Reaktivität und des chemischen Harzaufbaus liefert dem Verarbeiter Unterlagen über die Gelierzeit und gestattet Rückschlüsse auf den Vernetzungsgrad, der wiederum maßgeblichen Einfluß auf Formbeständigkeit in der Wärme, sowie mechanische und chemische Eigenschaften des Fertigteils hat.

UNSATURATED POLYESTER RESINS

R&G provides a selected range of unsaturated polyester resins (**UP** resins) for applications in the construction of boats, automobiles, and vessels. Numerous special resins, hardeners, and special colour tones are available on request.

History

The first unsaturated linear polyester resins were described in 1894, but the technical basis for their manufacture was first created in 1934. UP resins have been used in conjunction with glass fibres since 1942.

Structure of UP resins / reaction mechanism

All of the resins described in the following are unsaturated polyesters (UPs) that are dissolved in styrene.

According to their chemical structure, these resins are esterification products of unsaturated and saturated dicarboxylic acids with bifunctional alcohols in the ratio 1:1. Depending on the degree of esterification they yield high-viscosity or semi-rigid resins that are dissolved in monomeric, polymerisable liquids, e.g. monostyrene or diallyl phthalate, for easier processing (see manufacturing flow chart).

Replacing part of the unsaturated acids with saturated acids serves to vary the reactivity of the resins, and combining suitable starting components can have specific effects on the mechanical, thermal, and electrical properties of their cured products. The liquid products of varying consistencies thus yielded are called **clear resins**.

Incorporating colourants, fillers, reinforcing materials, and other systems can modify the properties of **clear resins** for the most diverse range of applications. Facilitating a series of manufacturing methods they give the processor great freedom in finding solutions to specific manufacturing problems.

Curing

Before they can cure, polyester resins need the addition of solidifying agents. Whereas **hot curing** (100 - 130 °C) involves solely the use of organic peroxides as hardeners for the copolymerisation between a monomeric solvent and an unsaturated polyester, **cold curing** (18 - 25 °C) requires the addition of both a peroxide hardener and small quantities of an **accelerator** before the chemical reaction (cross-linking) can be initiated. Before leaving the production plant, many polyester resin systems have already been preaccelerated with cobalt in order to facilitate their processing. Also light initiators can be used for curing. The interaction of particular wavelengths then set the reaction in motion. This curing method is preferred for continuous processing.

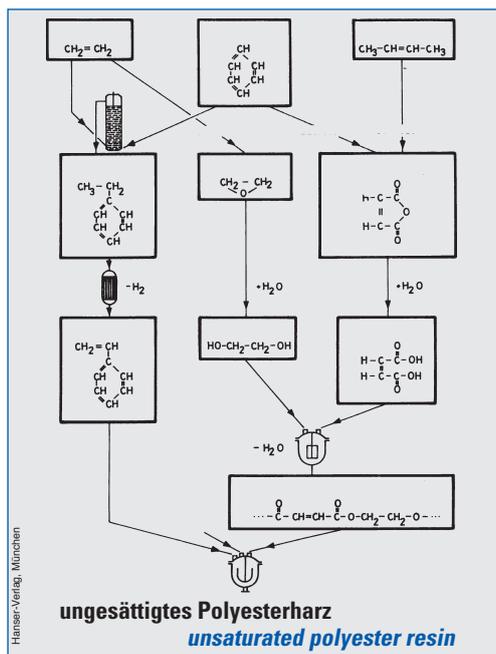
The curing reaction

Once the curing process has started, it runs by itself and can no longer be stopped. The curing time depends on the following **factors**:

- **Type and composition of the UP resin**
- **Solidifying agent system used**
- **Quantity of solidifying agent added**
- **Working temperature**
- **Size and shape of the work piece**

UP resins are divided into fast-curing (highly reactive) and slow-curing (low-reactive). Between these two are the resins of medium reactivity. Precise knowledge of the reactivity and the resin's chemical structure provides the processor with a basis for the gelling time and allows conclusions to be drawn on the cross-link density, which in turn has a decisive effect on the heat distortion temperature as well as the mechanical and chemical properties of the finished part.

Herstellungsschema ungesättigtes Polyesterharz



Flow chart for the manufacture of unsaturated polyester resins

Härter und Beschleuniger

Härter für Polyesterharze sind energiereiche Stoffe, welche unter der Einwirkung von Wärme, Licht oder Beschleunigern in Molekülbruchstücke (Radikale) zerfallen. Es handelt sich hierbei um organische Peroxide, deren reaktionsfähige Spaltstücke sich an den Doppelbindungen des UP und des Styrols anlagern und deren räumliche Vernetzung herbeiführen. Der Peroxidzerfall ist eine temperaturabhängige chemische Reaktion, die **exotherm** verläuft, d.h. selbst Wärme erzeugt, wenn die Spaltung einmal begonnen hat. Dies ist der Fall, sobald das Peroxid eine bestimmte Wärmezufuhr (bei den üblichen Härtern mindestens 60 °C) erfährt. Man spricht hier von **Anspringtemperatur**.

Heizt man also ein Harz/Härter-Gemisch bis zum Erreichen der Anspringtemperatur des Peroxids auf, beginnt der Zerfall der Peroxid-Moleküle und damit eine weitere selbsttätige Wärmesteigerung, welche die Härtung vorantreibt. Dieses Verfahren nennt man **Warmhärtung**. Es wird hauptsächlich beim Pressen (Warmpressen) angewandt.

Für die **Kalthärtung** von UP-Harz (Verarbeitung bei Raumtemperatur) ist der Zusatz von Peroxiden und beschleunigend wirkenden Substanzen (**Beschleunigern**) notwendig, welche den Zerfall des Peroxides schon bei Raumtemperatur bewirken. Als Beschleuniger für organische Peroxide werden reduzierend wirkende Stoffe verwendet.

Kalthärtung

In der Praxis haben sich zwei Kalthärtungssysteme durchgesetzt:

- **Ketonperoxid (z.B. MEKP) + Cobaltbeschleuniger**
- **Benzoylperoxid (BP) + Aminbeschleuniger**

Härter und Beschleuniger müssen aufeinander abgestimmt sein, wenn die gewünschte Wirkung eintreten soll.

Von außerordentlicher Wichtigkeit ist, daß **Peroxide und Beschleuniger niemals gleichzeitig**, sondern **unbedingt nacheinander mit dem Harz verrührt** werden müssen, um Brände oder Verpuffungen zu vermeiden!

Die Wahl des optimalen Kalthärtungssystems ist einmal von den Verarbeitungsbedingungen und zum anderen von den an das Fertigteil zu stellenden Anforderungen abhängig.

Hardeners and accelerators

Hardeners for polyesters are high-energy substances whose molecules fragment under the effects of heat, light, or accelerators to form radicals. These substances are organic peroxides whose reactive fragments attach to the double bonds of both the UP and the styrene and so initiate their cross-linking.

*This fragmentation of the peroxide is a temperature-dependent chemical reaction that takes place **exothermally**, i.e. with the generation of heat, as soon as the fragmentation has started. This is the case as soon as peroxide experiences a certain application of heat (at least 60 °C for the usual hardeners), called the **light-off temperature**.*

*In other words, when a mixture of resin and hardener is heated to the peroxide's light-off temperature, the peroxide molecules start to fragment, and the generated heat increases automatically, promoting the curing process. This process is called **hot curing** and is predominantly used in press moulding (hot press moulding).*

*The **cold curing** of UP resin (processing at room temperature) requires the addition of peroxides and accelerating substances (**accelerators**) that cause the peroxide to fragment at temperatures as low as room temperature. Reducing agents are used as the accelerators for organic peroxides.*

Cold curing

In practice, two cold curing systems have gained acceptance:

- **Ketone peroxide (e.g. MEKP) + cobalt accelerator**
- **Benzoyl peroxide (BP) + amino accelerator**

The hardener and accelerator must be matched to each other before the desired effect can be achieved.

*It is extremely important that **peroxides and accelerators are never mixed with the resin at the same time, but always after each other**. This minimises the risk of fire and deflagration.*

The optimal cold curing system depends on the processing conditions and on the requirements placed on the finished part.

Lagerung

Polyesterharze müssen verschlossen, kühl und vor Licht geschützt gelagert werden. In verschlossenen Originalgebinden sind sie bei Raumtemperatur oder darunter ca. 3 - 6 Monate lagerfähig.

Da der **Flammpunkt** bei etwa 34 °C liegt, die Viskosität nach DIN 53211 meistens mehr als 60 Sekunden Auslaufzeit beträgt und der Gehalt an brennbaren Flüssigkeiten unter 60 % liegt, fallen R&G-Polyesterharze bei Verwendung bruchsicherer Behälter im allgemeinen nicht unter die Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF).

Die **Verarbeitungstemperatur** sollte der Wärme im Arbeitsraum entsprechen und mindestens 15 - 20 °C betragen.

Peroxide sind bei niedrigen Temperaturen (nicht über 25 °C) im Dunkeln zu lagern, **streng getrennt von Beschleunigern** (Aktivatoren) oder irgendwelchen Wärmequellen. Jeder Umgang mit offenem Feuer ist in der Nähe von Peroxiden strengstens verboten! Bei der Verarbeitung ist das Tragen von Schutzhandschuhen und einer **Augenschutzbrille** vorgeschrieben!

MEKP-Härter können nach Anbruch bei längerer Lagerung Wasser aufnehmen. Dies führt vor allem bei Deckschichten zu Fehlstellen wie z.B. Augenbildung. Ist die Ursache in einem solchen Fall nicht eindeutig auf einen anderen Fehler zurückzuführen, sollte versuchsshalber ein frischer Härter verwendet werden.

Verarbeitungsprobleme

(von Prof. Dr.-Ing. Ehrenstein aus „Glasfaserverstärkte Kunststoffe“, Expert-Verlag)

Viele Fehlschläge mit GFK im chemischen Apparatebau beruhen auf Verarbeitungsfehlern mit letztendlich stets den gleichen Ursachen. Diese Ursachen sind bekannt und werden deshalb im folgenden mit den sich daraus ergebenden Verarbeitungs Konsequenzen geschildert.

Die Einwirkung von Luft

Während Epoxyharze fast unbeeinflusst so klebfrei an der Luft härten, daß man tags darauf schon mit Verbundschwierigkeiten rechnen muß, wird die Polymerisation von UP-Harzen durch Luftsauerstoff beeinträchtigt. Die Oberflächen bleiben mehr oder weniger stark klebrig, riechend, chemikalien- und witterungsanfällig, je nachdem, wie tief der Luftsauerstoff eindringen konnte. Beim späteren Harzauftrag gibt es keine Verbundschwierigkeiten - aber irgendwann kommt die letzte Schicht, und die sollte ordentlich gehärtet sein: dort muß man also tunlichst den Sauerstoff ausschließen. Man kann mit Gegenform arbeiten, mit Trennfolienstreifen überlappend abdecken, oder, wenn das alles nicht realisierbar ist, dem Harz entweder ein geeignetes mehrfunktionelles Isocyanat oder eine styrolische Paraffinlösung zusetzen.

Der Paraffinzusatz ist billig, beeinträchtigt nach bisherigen Erfahrungen die Chemikalienbeständigkeit nicht, sollte aber mit exakter Dosierung nach Vorschrift des Harzherstellers erfolgen, da die verschiedenen Harztypen sehr unterschiedliche Mengen benötigen, um optimale Oberflächen zu ergeben. Außerdem funktioniert er nur bei Harzmasse Temperaturen von mindestens 18 °C, und wenn der zu beschichtende Untergrund und die Umgebung maximal 35 °C warm sind.

Die Styrolverdunstung paraffinhaltiger Harzansätze ist sehr gering, die Haftung von nicht innerhalb weniger Stunden aufgetragenen weiteren Schichten allerdings auch.

Sollen solche Schichten später weiter beschichtet werden, so muß gut angeschliffen werden: die Haftung ist dann genauso gut wie bei nicht paraffinierten Schlißflächen von GF-UP.

Storage

Polyester resins must be stored in a cool, sealed environment protected from the effects of light. In sealed original packing drums they can be stored for about three to six months at room temperature or below.

*Their **flash point** of approx. 34 °C, their viscosity in most cases of over sixty seconds' flow time (DIN 53 211), and their proportion of flammable liquids below 60% mean that R&G polyester resins when stored in shockproof packaging generally do not come under the VbF [German regulations for flammable liquids].*

*The **processing temperature** should equal the temperature in the working area and be at least 15 - 20 °C.*

***Peroxides** must be stored at low temperatures (max 25 °C) in a dark place, **strictly isolated from accelerators** (activators) or any other heat sources. **Naked flames near peroxides are strictly forbidden!** Before peroxides are processed, protective gloves and **goggles** must be worn.*

***MEKP hardeners** can absorb water when they are stored for long periods after their packaging has been opened. This promotes the formation of voids, particularly in overlays.*

If the cause of such voids cannot be traced unequivocally to another defect, then a fresh hardener should be used by way of experiment.

Processing problems

(Extracted from Prof. Dr.-Ing. Ehrenstein's "Glasfaserverstärkte Kunststoffe" published by Expert-Verlag)

Many of the failures experienced with GRP in the construction of chemical apparatus have their roots in processing errors that in the end always have the same causes. These causes are known and for this reason will be explained in the following together with the associated consequences for the processing.

The effects of air

Whereas epoxy resins cure in air without any other external effects to yield such a tack-free surface that problems with bonding can be expected as early as the next day, atmospheric oxygen is detrimental to the polymerisation of UP resins. The surfaces remain more or less highly adhesive, emit odours, and are susceptible to chemical attack and weathering depending on the depth to which atmospheric oxygen could penetrate. Subsequent applications of resin have no difficulties in bonding-but sooner or later it's the turn of the last coat, and this should be properly cured. And here is where every effort must be made to prevent the effects of oxygen. A countermould can be used, strips of release film overlapped, or, if all this is not possible, then either a suitable polyfunctional isocyanate or a styrene-based paraffin solution is added to the resin.

The paraffin additive is cheap, has no known detrimental effects on the chemical resistance, but should be precisely dosed in accordance with the instructions from the resin manufacturer so that the various resin types, which require very different dosed quantities, can develop their optimal surfaces. Moreover, this additive works only when the temperature of the resin compound does not fall below 18 °C and the temperature of both the base surface for coating and the environment does not exceed 35 °C.

Styrene volatilisation is very negligible from resins containing paraffin; unfortunately, this is also true for the adhesion of further coats that have been applied after a few hours have passed.

If such coats are to serve as surfaces for later applications, then they have to be ground well: the adhesion is then just as good as for non-paraffined ground surfaces of GF-UP.



Die Einwirkung von Härtingsabgasen

Daß kleinere Luft einschüsse die Härtung von UP- und Vinylesterharzen (VE) viel gründlicher zum Erliegen bringen als größere Luftmengen, ist den meisten Verarbeitern nicht geläufig. Bei schlechter Belüftung können sich bittermandelartig nach Benzaldehyd riechende Härtingsabgase an der Formstoffoberfläche ansammeln. Benzaldehyd inhibiert (verzögert) die Härtung zwar kaum, aber irgendwie bringen die Abgase die Härtung so gründlich zum Stillstand, daß sich - unter Umständen zentimetertief! - auch durch späteres Erwärmen nichts mehr retten läßt.

Man muß daher auf folgendes achten:

- **Waben-Sandwichkonstruktionen** entweder mit andersartigen Klebstoffen oder sehr rasch und klebfrei an der Luft härtenden UP-Harzmassen schließen;
- **Polyesterharzbeton** nie zu hoch füllen;
- **Formteile**, die stellenweise von der Form abschwinden können (und welche können das nicht?), möglichst bald nach dem Abklingen der Reaktionswärme einer Kalthärtung entformen;
- **Trennfolien**, die nicht ganz 100 %ig am Formteil anliegen, ebenfalls bald abziehen, damit sie nicht infolge der Gaseinschlüsse zu mehr oder weniger großflächigen Unterhärtungen führen;
- **Beschichtungen** in unten schlecht oder gar nicht belüfteten Räumen nicht nur während der Arbeit, sondern auch danach noch (mindestens noch über Nacht, möglichst länger) gut belüften;
- **Behälterboden** zumindest bis zur Nachhärtung bei erhöhter Temperatur stets mit der Wölbung nach oben stapeln (und da man erst nach der Montage nachhärten soll, ist also grundsätzlich so zu stapeln);
- **Luftblasen** im Laminat und natürlich auch in Fein- oder Vliesschichten um so mehr vermeiden, je mehr es auf optimale Eigenschaften ankommt (um jede Luftblase herum befindet sich eine unterhärtete Zone).

Die Einwirkung von Wasser

Kann, z.B. durch Diffusion, Wasser eindringen, so löst es aus dem unterhärteten Bereich alles Lösliche heraus. Die Lösung will sich verdünnen, zieht weiteres Wasser nach, das wieder lösend wirkt u.s.w., bis die osmotischen Kräfte die Blase vergrößern und schließlich aufsprengen.

Die Einwirkung von Wasser kann nicht nur auf unterhärteten Stellen in der eben geschilderten Weise Unheil anrichten, es kann auch selbst Ursache einer Unterhärtung sein, wenn UP- oder VE-Harze mit Hilfe von Cobaltbeschleuniger gehärtet werden (Kalthärtung). Dazu muß es nicht in ein offen stehendes Faß hineingerechnet haben; es genügt der Einfluß der Luftfeuchtigkeit, wenn man nicht bedacht hat, daß sie an kalten Flächen zu kondensieren pflegt. Deshalb sind kalt gelagerte Harzvorräte in einem geschlossenen Gebinde auf Raumtemperatur zu bringen.

Trennmittel und Werkzeuge

Trennfilme sind vor dem Auftragen der Harzmasse gut ablüften zu lassen; dementsprechend sind Pinsel, Lammfellrollen, Rillenwalzen und ähnliche Werkzeuge nicht gleich nach der Reinigung in Lösungsmitteln und deren Ausschwenken, sondern erst nach gründlichem Ablüften zu nutzen. (Am besten macht man es sich zur Regel, nicht das gerade ausgeschwenkte Werkzeug zu benutzen, sondern ein anderes, das man beim vorherigen Arbeitsgang zum Trocknen hingelegt hatte.)

Daß die gleiche Sorgfalt auch im Umgang mit den Verstärkungsmaterialien und den Füllstoffen angebracht ist, sollte selbstverständlich sein.

The effects of curing vapours

It is not a commonly known fact amongst most processors that smaller air inclusions have a far greater retarding effect on the curing of UP and vinyl ester resins (VEs) than larger quantities of air. Under poor ventilation conditions, curing vapours with the bitter almond odour of benzaldehyde can accumulate at the surface of the moulded material. Although benzaldehyde scarcely inhibits the curing, the vapours somehow manage to stop the curing so effectively - under certain circumstances up to a depth of one centimetre (!) - that even subsequent heating can do little to repair the damage.

For this reason, the following must be observed:

- **Honeycomb sandwich constructions** must be sealed with either different types of adhesives or UP resin compounds that cure in air quickly and tack-free,
- **Polyester resin concrete** should not reach too high a filling level,
- **Moulded parts** that can shrink away from the mould in places (and which do not?) should be demoulded immediately the reaction heat from cold curing has subsided,
- **Release films** that do not lie in full contact with the moulded part should also be drawn off quickly so that the gas inclusions cannot impair the curing of more or less large areas,
- **Coatings** should be well ventilated in poorly or unventilated rooms not only during the work, but afterwards as well (at least overnight and if possible for longer),
- **Tank bottoms** should always be stacked with the bulge pointing upwards, at least until post-curing at increased temperature (post-curing must take place after assembly anyway, so the bottoms must be stacked in this manner),
- **Air bubbles** in the laminate and, of course, in the gel and non-woven coats must be prevented, especially if the optimal properties are to be obtained (every air bubble is surrounded by an undercured zone).

The effects of water

If water is allowed to penetrate, e.g. by diffusion, it will dissolve everything soluble out of the undercured zone. The solution tends to accept further diluents, absorbs more water, and the dissolving process therefore continues until the osmotic pressure rises and finally bursts the bubble.

The effects of water cannot only cause devastation to undercured zones as described above, it can also itself be the cause of undercuring when UP or VE resins are cured with the aid of cobalt accelerators (cold curing). And this does not mean that rain has to fall into an open barrel: the effects of air humidity prove adequate when it is allowed to condense on cold surfaces. For this reason, cold-stored resin stocks should be kept in a sealed packing drum at room temperature.

Release agents and tools

Before the resin compound is applied, any air trapped in release films must be allowed to escape; accordingly, brushes, lamb's wool rollers, grooved rollers, and similar tools should not be used immediately after cleaning in solvents and rinsing, but after all trapped air has escaped. The best method that should be made the rule is not to use the freshly rinsed tool, but the one left to dry during a previous working cycle.

The same care, of course, also applies to the reinforcing materials and fillers.

Die Wirkung von Reaktionsmitteln

Bei UP-Harzen schleppt man mit den Reaktionsmitteln weichmachende Fremdstoffe ein. Man sollte also im Normalfall versuchen, mit möglichst wenig Peroxid und Beschleuniger auszukommen. Man kann aber nicht prinzipiell dadurch optimale Formstoffeigenschaften erzielen, daß man minimale Reaktionsmittelmengen benutzt.

Bei der **Herstellung von Feinschichten** oder Schlußstrichen aus UP-Harzen ist eine schnelle Durchhärtung vorrangig vor der Überlegung, man könnte zu viel Weichmacher einschleppen - immer noch besser dieses Übel als eine nur getrocknete, aber nicht gehärtete Schicht. Das hier hinsichtlich der Reaktionsmitteldosierung anzuwendende Motto „viel hilft viel“ gilt auch für Teile, die nicht bei erhöhter Temperatur nachgehärtet werden können und sich auch nicht infolge hoher Schichtdicke durch die eigene Reaktionswärme quasi selbst nachhärten können. Besonders ein hoher Peroxidgehalt ist hier wichtig.



Elefantenhaut in einer Polyesterdeckschicht.

Alligating in a polyester overlay

In solchen Fällen gilt es allerdings stets, nicht ins entgegengesetzte Extrem zu verfallen: **Mehr als 5 %** eines handelsüblichen **Peroxids** (3 % bei Acetylacetonperoxidlösungen) sind **immer von Übel**, desgleichen mehr als 2,5 % einer handelsüblichen 10 %igen Aminbeschleunigerlösung. Als Folge einer Überdosierung erreicht man nämlich sehr plötzlich und sehr gründlich das Gegenteil einer guten Aushärtung: Man erhält Produkte, die um so weicher sind (und auch bei Nachhärtungsversuchen bleiben), je wärmer das Teil bei der Härtung war (oder wurde). Es handelt sich um eine anomale Härtung auf Grund eines Radikalüberangebots, also nicht nur um eine Weichmachereffekt.

Untervernetzungen

Ein häufiger Fehler ist das mehr oder weniger großflächige Auftreten einer Elefantenhaut in der Polyester-Deckschicht (siehe Bild oben). Diese Schäden entstehen bei falsch gehärteten, untervernetzten Deckschichten, wenn erneut Polyesterharz aufgetragen wird.

Im wesentlichen sind **Untervernetzungen** immer auf **falsche Härter- und Beschleunigermengen** zurückzuführen.

Die meisten UP-Harze werden vorbeschleunigt geliefert. Dies schränkt zwar die Lagerfähigkeit etwas ein, ermöglicht jedoch eine einfachere Handhabung. Es muß lediglich die vorgeschriebene Härtermenge dosiert werden. Diese ist nach Vorschrift so zu wählen, daß die Deckschicht nach max. 15 - 20 Minuten auf der Form geliert.

Bei zu **langer Gelierzeit** ist die **Styrolverdunstung zu hoch**, die **Deckschicht härtet ungenügend** und trocknet mehr physikalisch aus. Die Folge ist eine eventuelle Anlösung durch das Laminierharz (Elefantenhautbildung), sowie spätere Verfärbung und eine schlechtere Witterungs- und Wasserbeständigkeit. Nach ca. **2 Stunden Anhärtung** sollte die **erste Lage Laminat** aufgebracht werden.

Einige zusätzliche Verarbeitungsfehler begünstigen die Entstehung einer Elefantenhaut:

- Kalte Formen bzw. niedrige Harztemperatur (< 15° C), durch verlängerte Gelierzeit mit der Gefahr erhöhter Styrolverdunstung und daraus resultierender Untervernetzung der Deckschicht
- Schlechte Belüftung der Formen, besonders an tiefen Stellen (hohe Styrolkonzentration in der Luft)
- Überlagertes, vorbeschleunigtes Polyesterharz (verlängerte Gelierzeit, bzw. gar keine Reaktion, im Zweifelsfall einen Testansatz herstellen und gegebenenfalls mit COB nachbeschleunigen)

The effects of solidifying agents

Introducing solidifying agents into UP resins also introduces plasticizing foreign substances. In the normal case, the processor should try to use as little peroxide and accelerator as possible. In principle, however, the optimal properties of the moulded material cannot be obtained when the minimum quantities of solidifying agent are used.

In the case of **gel coats** or finishing coats of UP resins, fast curing must be given greater priority to considerations that too much plasticizer might be introduced - this evil is still far less than a layer that has only dried, but not cured.

The saying "a lot helps a lot" that is applied here to the dosing of solidifying agent also applies to parts that cannot cure at a higher temperature nor can generate enough reaction heat in a thick layer for self-initiated curing. In particular, a high peroxide content is important here.

In such cases, care must always be exercised to the effect that the opposite extreme is not taken: **more than 5 %** of a commercially available **peroxide** (3 % for acetylacetone peroxide solutions) is **always detrimental**, ditto for more than 2,5 % of a commercially available 10 % amino accelerator solution. The extremely sudden and extremely thorough consequence of overdosing is the exact opposite of good curing: obtained are products that are softer (and stay so after post-curing attempts) the hotter the part was (or became) during curing. This is an anomalous curing caused by a surplus of radicals, i.e. not just by the effects of a plasticizer.

Inadequate cross-linking

A frequent problem is the appearance of alligating over more or less large areas of the polyester overlay (see the figure above). This damage occurs on wrongly cured, inadequately cross-linked overlays to which a further coat of polyester resin is applied.

Essentially, **inadequate cross-linking** can always be put down to **incorrect quantities of hardener and accelerator**.

Most UP resins are supplied in the preaccelerated state. Although this somewhat restricts the shelf life, it does simplify handling. Solely the specified quantity of hardener must be dosed. The dose specified in the instructions is such that the overlay gels on the mould after max fifteen to twenty minutes.

If the **gelling time is too long**, then **too much styrene volatilises**, and the **overlay cures inadequately** and the degree of physical drying is greater. The consequence is that the laminating resin may "bite" (alligating), discolour with time, and deteriorate in water and weather resistance. After approx. **two hours' preliminary curing**, the **first layer of laminate** should be applied.

A number of other processing errors also promote alligating:

- Cold moulds or low resin temperature (< 15° C), the extended gelling time increases the risk that styrene volatilises, giving rise to inadequate cross-linking of the overlay
- Poor ventilation of the moulds, in particular at deep points (high concentration of styrene in the air)
- Overlapped, preaccelerated polyester resin (extended gelling time or no reaction at all, in case of doubt a test quantity must be mixed and if necessary preaccelerated with cobalt)

FORMENBAU MIT POLYESTERHARZEN

Will man ein Fertigteil aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (GF-UP) herstellen, steht am Anfang jeden Bemühens der **Bau eines entsprechenden Werkzeuges**.

Stets dann, wenn Fertigteile mit glatten Außenflächen (Boote, Karosserieteile) hergestellt werden sollen, muß eine **Negativ-Form** gefertigt werden.

Gegenstände mit glatten Innenflächen (Behälter, Springbrunnen, Schalen) benötigen eine **Positiv-Form**, d.h. einen Formkern.

Eine **Form aus Glasfaserkunststoff** erlaubt die Herstellung von Teilen fast beliebiger Größe und Stückzahl. Als Werkzeugmaterial hat sich glasfaserverstärktes Polyesterharz (GF-UP) in Bezug auf Haltbarkeit und Preis gut bewährt.

Zur Formherstellung wird ein Urmodell im Handlaminierverfahren mit harzgetränkter Glasfasermatte beschichtet und abgeformt.

Im **1. Schritt** wird die glatte Oberfläche des Urmodells mit Grundierwachs dünn und gleichmäßig überzogen. Diesen Auftrag läßt man einige Minuten trocknen. Eventuelle Schlieren werden sofort nach dem Wachsaufrag durch vorsichtiges Polieren mit einem weichen Baumwolltuch beseitigt. Ein Hochglanz wird dabei nicht erzeugt.

Danach bringt man Folientrennmittel PVA mit einem feinporigen Schwamm auf die Oberfläche auf und läßt dieses bis zur völligen Trocknung etwa 20 Minuten ablüften. Dabei entsteht von alleine eine hochglänzende Oberfläche.

2. Schritt

UP-Vorgelat farblos wird mit 5 - 10 % schwarzer Farbpaste kontrastreich eingefärbt und als Deckschicht mit einem Pinsel (Laminierpinsel, Bestell-Nr. 335 125-1) in zweimaligem Auftrag von je 400 g/m² möglichst blasenfrei aufgebracht. Zur Vermeidung von Pinselschaum ist das Arbeitsgerät öfter in Styrol zu spülen.

Die Gelierzeit von UP-Vorgelat beträgt bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) etwa 60 Minuten.

Nach dieser Anhärtung wird eine Lage Glasfasermatte 225 g/m² aufgelegt und mit dem Standard-Laminierharz U 569 TV-01V getränkt.

Zum Harzauftrag dienen Laminierpinsel mit unlackierten Stielen oder, bei größeren Teilen, Mohair-Walzen.

Luftblasen im Mattenlaminat werden durch Abrollen mit einem Metallscheibenroller entfernt.

Nach genügender Anhärtung erfolgt dann der weitere Aufbau, in 4 - 10 mm Wanddicke, je nach Formgröße, mit 450 g/m² - Matten. Diese Mattenlagen sollten jeweils 3-fach in einem Arbeitsgang mit Zwischenhärtung aufgebracht werden.

Eine Lage Glasmatte 450 g/m² ergibt eine Laminatdicke von etwa 1 mm.

Die fertig laminierte Form soll auf dem Urmodell bei Raumtemperatur zunächst 24 - 36 Stunden verweilen und darauf nach Möglichkeit 12 Std. bei 40 - 50 °C nachgehärtet werden (Temperzelt/Temperschrank).

MOULD CONSTRUCTION WITH PES RESINS

*Before finished parts can be manufactured from glass-fibre-reinforced polyester resin (GF-UP), all work must begin with the **construction of the corresponding mould**.*

*A **female mould** must be manufactured whenever the finished parts are to exhibit smooth external surfaces (boats, body parts).*

*Objects with smooth internal surfaces (tanks, fountains, dishes) require a **male mould**, i.e. a mould core.*

*A **mould of glass-fibre-reinforced plastic** can be used to manufacture almost any size and number of parts. With respect to durability and price, glass-fibre-reinforced polyester resin (GF-UP) has established itself well as a mould material.*

For the construction of a mould, a master pattern is copied by being laid up by hand with a resin-impregnated glass-fibre mat.

*The **first step** involves applying a thin and uniform coat of priming wax to the smooth surface of the master pattern. This coat is then left to dry for a few minutes. Immediately after the wax has been applied, any streaks are then carefully polished over with a soft cotton cloth. This does not give rise to a high gloss.*

Afterwards, a finely pored sponge is used to apply the film release agent PVA to the surface, which is then left for about twenty minutes until all trapped air has escaped and it has completely dried. This gives rise by itself to a high-gloss surface.

Second step

***UP pre-gel colourless** is mixed with 5 - 10 % colour paste of a high-contrast black and applied with a brush (laminating brush, order no. 335 125-1) as a double-coated overlay (400 g/m² each) containing the minimum of bubbles. Rinsing the brush in styrene at shorter intervals prevents the application from frothing.*

The gelling time for UP pre-gel is about sixty minutes at room temperature (approx. 22 °C).

After this preliminary curing, a layer of 225 g/m² glass-fibre mat is laid up and impregnated with the standard laminating resin U 569 TV-01V.

Used to apply the resin are laminating brushes with unvarnished handles or, for larger parts, mohair rollers.

Air bubbles in the mat laminate are removed with a metal disc roller.

After adequate preliminary curing, the laying up is continued with 450 g/m² mats in wall thicknesses of 4 - 10 mm, depending on the size of the mould. These mat layers should be applied as three-ply layers in one working cycle with intermediate curing.

One layer of 450 g/m² yields a laminate thickness of about 1 mm.

The ready-laminated mould should remain on the master pattern for an initial period of 24 to 36 hours at room temperature and then, if possible, post-cured for twelve hours at 40 - 50 °C (annealing tent or chamber).

DIE FERTIGTEIL - HERSTELLUNG

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wird die Form-oberfläche mit Grundierwachs und Folientrennmittel sorgfältig vorbehandelt, damit die nachträgliche, problemlose Entformung gewährleistet ist.

Hierauf erfolgt das Einbringen der **Deckschicht** in einer Schichtdicke von etwa 0,2 mm = 250 g/m².

Die Deckschicht, auch Gelcoat oder Feinschicht genannt, hat die Aufgabe, das spätere Eindringen von Feuchtigkeit in das Laminat zu verhindern und gleichzeitig dem Fertigteil eine glatte, meist farbig ausgeführte, glänzende Oberfläche mit erhöhter Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit zu geben.

UP-Deckschichtharze sind meist so eingestellt, daß die Gelierzeit bei 20 °C zwischen 10 und 30 Minuten liegt. Zu lange offene Zeiten begünstigen die Styrolverdunstung und führen dadurch zu unbefriedigenden Härtungsergebnissen.

Nach einer **ausreichenden Härtungszeit** (je nach Verarbeitungstemperatur 1 - 2 Stunden) kann mit dem Laminieren begonnen werden, ohne befürchten zu müssen, daß die vorgelegte Deckschicht durch den weiteren Harzauftrag anquillt (Elefantenhaut- oder Apfelsinenschaleneffekt).

Die **Wartezeit bis zur Härtung** des Deckschichtharzes nutzt man, um die benötigten Glasfaserplatten nach Anzahl und Größe vorzubereiten und zurechtzulegen.

Es ist zweckmäßig, Plattenstücke nicht mit der Schere zuzuschneiden, sondern diese entlang einer fest aufgedrückten Holzleiste abzureißen. Zusätzlich sollte man die Reißkante und die in der Fabrik scharf geschnittenen Ränder noch ca. 3 cm breit mit einem groben Metallkamm (Nagelbrett) ausdünnen bzw. ausfransen, um einen nahtlosen, gleichmäßigen Übergang zu erreichen. Beim fertigen Laminat soll man nicht feststellen können, wo die einzelnen Stücke aufeinandergelegt worden sind.

Textilglasgewebe dagegen können nur geschnitten werden und sollten sich daher ca. 3 cm überlappen, um einen festen Anschluß der Bahnen zu gewährleisten. Die Stöße werden durch die verdoppelte Wandstärke sichtbar.

Kurz vor Beginn des Laminierens stellt man sich die Tränkmischung z.B. aus dem **Standard-Laminierharz U 569 TV-01 V** her.

Wie beim Formenbau arbeitet man zunächst mit einer Lage dünner Matte 225 g/m², und läßt diese anhärteln. Der weitere Aufbau erfolgt dann mit 450 g/m²-Matten, bis die gewünschte Wanddicke erreicht ist.

Eine Lage Glasfaserplatte 450 g/m² ergibt etwa 1 mm Schichtdicke bei einem Harzverbrauch von 1 - 1,2 kg/m².

Alternativ zu Glasmatten können selbstverständlich auch Glasfilament- oder Glasrovingsgewebe verarbeitet werden. Der Harzverbrauch ist ca. 30 % geringer.

Für den **Auftrag des Deckschichtharzes** (Gelcoat) verwendet man einen weichen Haar- oder Borstenpinsel (Laminierpinsel, Bestell-Nr. 335 125-1)

Nach vorheriger Verdünnung mit Styrol und ggf. auch mit Aceton sind Polyester-Deckschichtharze **spritzfähig** (Düse 1,5 mm, Druck 3 - 5 bar). Zum Spritzen muß ein Wasserabscheider eingebaut sein, um Augen in der Deckschicht zu vermeiden.

Das **Tränken** der Glasmatte mit Harz erfolgt am besten mit einer Mohair-Walze; das Ausrollen und Entlüften geschieht mittels Metallscheiben- oder Teflon-Rillenrollern.

Beim **Laminieren** ist darauf zu achten, daß die Mattenlagen vollständig und gleichmäßig durchtränkt werden und keine weißen Stellen mehr sichtbar sind. Es soll jedoch nicht zuviel Harz aufgebracht werden, da der Glasgehalt und damit die Festigkeiten des gehärteten Materials herabgesetzt würden. Die Struktur der Verstärkungsfaser sollte an der Oberfläche gut sichtbar sein (rauh Oberfläche).

Sehr **wichtig** ist in jedem Falle die **Entfernung eingeschlossener Luftblasen**. Sehr feine, gehäuft auftretende Bläschen führen zu Fehlhärtungen, verursachen Mikroporosität und verringern dadurch die Dauerfestigkeit der Schichtstoffe.

MANUFACTURING FINISHED PARTS

As described in the previous section, the surface of the mould is carefully pretreated with priming wax and film release agent. These measures ensure that no problems are encountered with the subsequent demoulding.

Afterwards, the **overlay** is then applied to a thickness of about 0,2 mm, or 250 g/m².

The purpose of the overlay, also called the gel coat, is to prevent moisture from afterwards penetrating into the laminate and, at the same time, to give the finished part a smooth, mostly coloured, and glossy surface with enhanced chemical and weathering resistance.

The composition of UP overlay resins is mostly such that the gelling time at 20 °C is between ten and thirty minutes.

When the resins are open for too long, the volatilisation of styrene is promoted, leading to unsatisfactory curing results.

After an **adequate curing time** (one to two hours depending on the processing time), work can start on laminating without the risk that the next coating of resin will cause the previously laid overlay to swell (alligating or orange peel effect).

The **time needed** for the overlay resin to cure can be utilised to prepare and arrange the requisite number and sizes of the glass-fibre mats.

A convenient method for sizing pieces of mat is not to cut them with shears, but to tear them off along a wooden bar pressed into place. In addition, a smooth, gradual transition can be obtained when a strip about 3 cm wide around both the tear edge and the sharp edges cut in the production plant is thinned out or worn down with a coarse metal comb (card). The ready-laid laminate should not reveal where the individual pieces overlap.

Glass textiles, on the other hand, can be cut only and should therefore overlap by about 3 cm to ensure a strong bond between the courses. The double wall thickness will then mark the overlaps.

A short time before work is begun on laminating, the impregnating resin is mixed, e.g. from the **standard laminating resin U 569 TV-01V**.

Just as with mould construction, the work begins with a layer of thin 225 g/m² mat which is left to cure. The next lay-up is with 450 g/m² mats until the required wall thickness is reached.

One layer of 450 g/m² glass-fibre mat yields a coat of about 1 mm thickness with a resin consumption of 1 - 1,2 kg/m².

Glass mats are, of course, not the only solutions. Alternatives are offered with glass filament or glass roving fabric. In these cases, the resin consumption is about 30% less.

A soft hair or bristle brush (laminating brush, order no. 335 125-1) is used to **apply the overlay resin** (gel coat).

When they have been previously diluted with styrene and, if necessary, with acetone as well, polyester overlay resins **can be sprayed** (1,5 mm nozzle, 3 - 5 bar pressure). Before spraying work, a water separator must be installed to prevent voids in the overlay.

The glass mat is best **impregnated** with resin when a mohair roller is used: metal disc rollers or grooved teflon rollers are used for rolling out and de-airing.

When **laminating**, the processor must make sure that the mat layers are impregnated fully and uniformly and white zones are no longer visible.

On the other hand, too much resin should not be applied, because this would reduce the glass content and therefore the strength of the cured material. The structure of the reinforcing fibres should be clearly visible at the surface (rough texture).

In all cases, it is very **important** that **all trapped air bubbles are removed**. Very fine patches of bubbles impair curing, promote microporosity, and so reduce the fatigue limit of the coating material.

Zur **Stabilisierung** vor allem größerer, **dünnwandiger Formteile** werden häufig zusätzliche Versteifungen oder Randwülste vorgesehen. Man verwendet zu deren Herstellung Holzprofile, Schaumstoffeinlagen, Winkeleisen, Deko- oder Flexrohre, die mit einlaminiert werden.

An der **Luft gehärtete** UP-Harzlaminate zeigen im Gegensatz zu der auf der Form gehärteten Seite eine schwach klebrige Oberfläche mit Glasfaser-Struktur. Diese Seite sollte später nicht mit Flüssigkeiten (Wasser) in Berührung kommen, da sie an der Oberfläche verseifbar oder löslich bleibt.

Nachträgliches Aufbringen einer Versiegelung mit UP-Vorgelat bringt hier einwandfreie Ergebnisse.

Bei **Raumtemperatur gehärtete** Teile sind unter Verwendung der angegebenen Harzrezeptur ca. 3 - 4 Stunden nach Beginn der Gelierung so weit durchpolymerisiert, daß sie entformt und gelagert werden können. Sehr große Teile läßt man zweckmäßig 10 bis 12 Stunden in der Form.

Nachhärtung

Da die Endhärte von kaltgehärteten GF-UP-Teilen ohne Nachhärtung bei erhöhter Temperatur erst nach vielen Wochen oder gar nicht erreicht wird, sollte man Formteile nach Möglichkeit in einer Temperkammer während 4 - 6 Stunden bei höheren Temperaturen (60 - 110 °C) nachhärten. Auch eine gleichmäßige¹⁾ Infrarot-Bestrahlung oder -wenn anders nicht möglich- pralle Sonnenbestrahlung über mehrere Tage im Sommer führen zum Ziel (nur zur Nachhärtung empfohlen, beim Laminieren sollte **direkte Sonneneinstrahlung** unbedingt **vermieden** werden).

Je besser die Nachhärtung durchgeführt wird, um so sicherer lassen sich die angestrebten Endwerte hinsichtlich mechanischer, chemischer und thermischer Qualität von Bauteilen aus ungesättigten Polyesterharzen erreichen.

In allen Fällen ist aber zu beachten, daß **UP-Harze** bei der Härtung eine (unterschiedliche) **Volumenkontraktion** erfahren. Der dadurch bedingte Schwund des Harzes ist abhängig vom Harzaufbau, der Härtungsgeschwindigkeit, dem Füllstoff- bzw. Glasgehalt etc. und muß bei der Fertigung von GF-UP mit einkalkuliert werden.

¹⁾ Nur zu empfehlen, wenn eine exakte, gleichmäßige Bestrahlung möglich ist! Ansonsten sollte wegen Gefahr des Verzugs darauf verzichtet werden.

*Measures for **stabilising** above all larger, **thin-walled mould parts** frequently take the form of additional stiffeners or beads made from wooden sections, embedded foam, angle irons, decorative or flexible tubes, which are then integrated in the laminations.*

*UP resin laminates that have **cured in the air**, in contrast to the side cured on the mould, exhibit a weakly adhesive surface with a glass-fibre structure. This side remains saponifiable or soluble and so should not afterwards come into contact with liquid (water).*

A subsequent application of a seal with UP pre-gel is the perfect solution here.

*When the specified resin recipe is used and about three to four hours have passed since the onset of gelling, the degree of polymerisation in the parts **cured at room temperature** is such that they can be demoulded and stored. It proves advisable to leave very large parts for ten to twelve hours in the mould.*

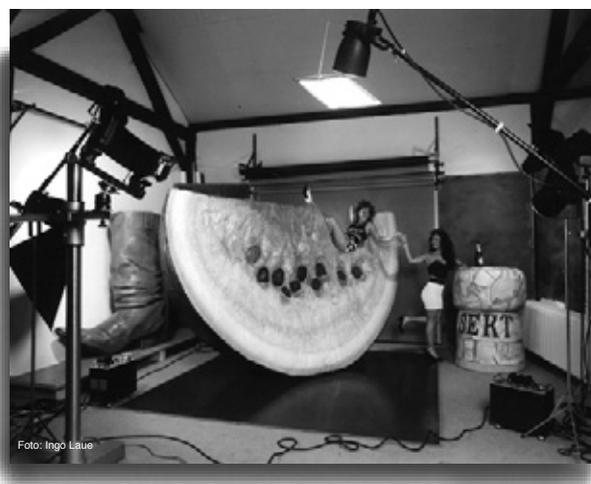
Post-curing

*If they do not undergo post-curing at an increased temperature, cold-cured GF-UP parts cannot obtain their final hardness until many weeks have passed, if at all. For this reason, moulded parts should be post-cured, if possible, in an annealing chamber for four to six hours at higher temperatures (60 - 110 °C). This curing state can also be achieved with uniform¹⁾ infrared irradiation or - if all else is not possible - intense sunlight over several days in summer (recommended for post-curing only, **direct sunlight** should be **avoided** in all circumstances when laminates are laid up).*

The more precisely the post-curing process is conducted, the more reliable the final values obtained for the mechanical, chemical, and thermal qualities of the components made from unsaturated polyester resins.

*In all cases, the processor must note that **UP resins** experience (varying) **contractions in volume** when curing. The shrinkage the resin undergoes as a result depends on the structure of the resin, the speed of curing, the filler and glass content, etc., and must be included in the calculations for manufacturing with GF-UP.*

¹⁾ Recommended only when precise, uniform irradiation is possible! Otherwise, the risk of warpage is too high.



Studiodekoration aus glasfaserverstärktem Polyesterharz, hergestellt von der Fa. Ingo Laue Werbeobjekte, Buggingen.

Studio decorations of glass-fibre-reinforced polyester resin, built by the company Ingo Laue Werbeobjekte in Buggingen.

POLYURETHANE
POLYURETHANE

R&G führt eine Auswahl von **Polyurethan-Harzen (PUR)** für unterschiedliche Anwendungen:

- Zum **Verguß** von Bauteilen und Herstellung von Gießmodellen (**PU-Gießharz 89-279**)
- Zum **Ausschäumen** von Hohlräumen (**PU-Hartschaum 43-10**)

Geschichtliches

Die Polyurethane wurden 1937 von dem Chemiker O. Bayer in Leverkusen entwickelt. Sie werden seit 1940 im technischen Maßstab hergestellt und sind heute in einer außerordentlichen Vielzahl von Anwendungen vertreten.

Neben **Gießharzen** und **elastischen PUR-Formmassen** sind es vor allem **PUR-Schaumstoffe**, die uns überall begegnen. Daher ist für die Polyurethane kein Eigenschaftsbild aufzeigbar wie bei anderen Werkstoffgruppen (z.B. Epoxy- und Polyesterharze). Differenziert wird eher nach Anwendungsgebieten.

Wir stellen hier die allgemeinen Eigenschaften der bei R&G erhältlichen Produkte auf:

R&G provides a selection of **polyurethane resins (PUR resins)** for various applications:

- For manufacturing **permanently elastic moulds** as a low-cost alternative material to silicone (**PU rubber 85-81**)
- For **foaming cavities (rigid PU foam 43-10)**

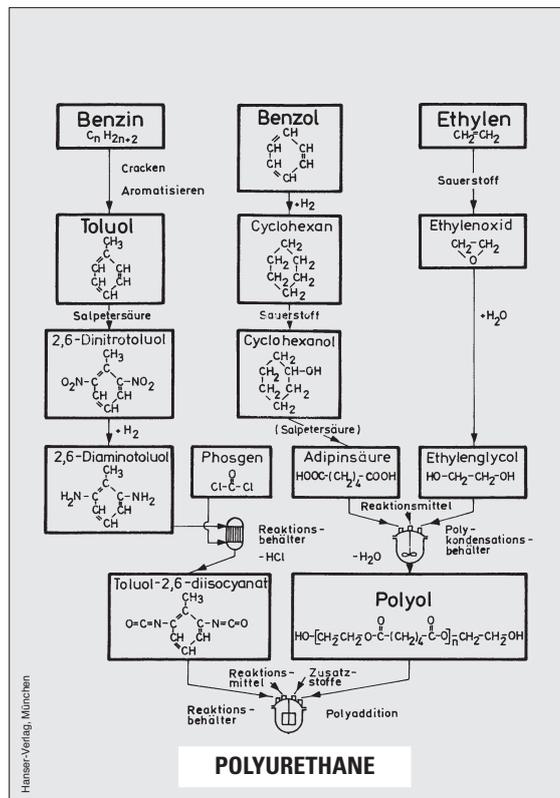
History

Polyurethanes were first developed in 1937 by O Bayer, a chemist in Leverkusen. Since 1940, they have been manufactured on an industrial scale and today are used in a great many applications.

Besides **cast resins** and **elastic PU moulding compounds**, it is above all **PUR foams** that we find everywhere we look. For this reason, polyurethane does not present a unified set of properties as do other material groups (e.g. epoxy and polyester resins), but instead are classified according to their range of applications.

The following lists the general properties of the products available from R&G:

Herstellungsschema Polyurethane



Flow chart for the manufacture of polyurethanes



PU-HARTSCHAUM 43-10

Allgemeine Eigenschaften von Formteilen

- Niedrige Dichte (frei geschäumt 37 kg/m³)
- Geschlossenzellig, daher keine Wasseraufnahme
- Gute Haftung auf allen Werkstoffen
- Gute Druckfestigkeit
- Enthält Flammschutzmittel, geeignet für Boote

Bei der **Verarbeitung** von PUR-Schaum ist folgendes wesentlich

- Kaltverarbeitbar bis zu Temperaturen von 0 °C
- Geringe Selbsterwärmung bei der Härtung
- Sehr schnelle Durchhärtung (ca. 140 Sekunden)

Anwendungsgebiete

Leichte Sandwichbauteile in der GFK-Technik durch nachträgliches Ausschäumen von Hohlräumen sowie zur Kälte- und Wärmedämmung. Zugelassen für die Ausschäumung von Hohlräumen bei Rettungsbooten.

Härtung

Der PU- Hartschaum ist **zweikomponentig**, bedarf also zur Aushärtung des Zusatzes von Reaktionsmitteln.

Verwendet werden flüssige Härter auf Basis von MDI (Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat). Die Mischungsverhältnisse sind vorgegeben und sollten genau eingehalten werden.

Die Härtungsreaktion

Der einmal begonnene Härtungsprozess setzt sich von selbst fort und kann nicht mehr unterbrochen werden. Die Härtungszeit hängt von folgenden **Faktoren** ab:

- Arbeitstemperatur
- Form und Größe des Werkstücks

Je größer diese Parameter sind, umso schneller erfolgt die Durchhärtung.

Lagerung

Günstige Lagertemperatur 15 - 20 °C, keinesfalls unter 0 °C. Gebinde stets gut verschließen, da die Komponenten feuchteempfindlich sind.

Arbeitsschutz

Die Hinweise zum sicheren Umgang mit Chemikalien unbedingt beachten. Die A-Komponenten sind in der Regel keine gefährlichen Zubereitungen im Sinne des Chemikaliengesetzes bzw. der Gefahrstoffverordnung. Die B-Komponenten sind gesundheitsschädlich, so daß in jedem Fall Arbeitsschutzmaßnahmen zu treffen sind. Nähere Angaben in den Sie in den Sicherheitsdatenblättern, die im Internet unter www.r-g.de als Download angeboten werden.

RIGID PU FOAM 43-10

General properties of moulded parts

- Low density (37 kg/m³ for unrestricted expansion)
- Closed-cell structure, so no water absorption
- Good adhesion to all materials
- Good compressive strength
- Contains flame retardants, so suitable for boats

It is essential that you observe the following when **processing** PUR foam

- PUR foam can be processed at temperatures as low as 0 °C
- Curing generates a low level of spontaneous heating
- Very fast thorough curing (approx. 140 seconds)

Range of applications

Subsequent foaming of cavities, also for low-temperature and heat insulation, yields lightweight sandwich components for GRP engineering. Approved as a foaming material in the cavities of lifeboats.

Curing

The rigid PU- foam is a **two-component product**, i.e. a solidifying agent must be added before curing can take place.

These solidifying agents take the form of liquid hardeners based on MDI (4,4'-diphenylmethane diisocyanate).

The mixing ratios are specified and should be precisely adhered to.

The curing reaction

Once the curing process has been initiated, it continues automatically and can no longer be stopped. The curing time depends on the following **factors**:

- The working temperature and
- The size and shape of the workpiece

The greater these parameters, the faster the curing.

Storage

The storage temperature should be 15–20 °C, under no circumstances should it drop below 0 °C. The constituents are sensitive to humidity, so always re-seal carefully the packing drum.

Industrial safety

It is imperative that you observe the information on how to handle chemicals safely. As a rule, the A components are not hazardous formulations in the sense of the Chemikaliengesetz (toxic substances control act) or the Gefahrstoffverordnung (toxic chemicals ordinance). The B components are harmful to health so that measures must be implemented to ensure industrial safety. More detailed information is given in the safety data sheets that you can download from the internet at www.r-g.de.

LAMINIERKERAMIK
LAMINATING CERAMIC

EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNG

Die R&G Laminierkeramik ist ein veredelter, synthetischer Hartschalengips mit großer Härte.

Vorteile

- absolut ungiftiges und umweltfreundliches Material
- sehr einfach anzuwenden, schnelle Aushärtung
- präzise, verzugsfreie Formen mit **geringer Ausdehnung** (Abformgenauigkeit 0,2 - 0,3 mm pro Meter) und hoher Festigkeit
- preiswert
- einsetzbar bei Normal- und Unterdruck (Vakuum), auch für höhere Temperaturen (Prepregverarbeitung)
- beständig bis 150 °C.

Verarbeitung

Das **Einkomponenten-Pulver** wird mit Wasser angemischt und härtet spannungsfrei und mit sehr geringer **Ausdehnung** (ca. 0,2 - 0,3 mm pro Meter) in 50 Minuten aus.

Die **Kombination mit Epoxyd-Formenharz-Deckschichten** ist **möglich!** Dadurch erhält man polierfähige, verschleißfeste Oberflächen mit einer sehr steifen, präzisen und einfach aufzubringenden Hinterfütterung. Geeignet sind alle R&G-Formenharze.

Die Vorzüge dieser Bauweise werden seit einigen Jahren im Flugzeug- und Automobilbau genutzt.

Formen für 1:1-Prototypen, Triebwerksverkleidungen, Flugzeug-Tragflächen und Rumpfe sowie Schäum- und Preßwerkzeuge werden aus diesem Material hergestellt.

Trennmittel

Da die Deckschicht wie bei herkömmlichen GFK-Formen aus **Epoxyd-Formenharz** besteht, können die bewährten R&G-Trennmittel verwendet werden.

Einsatzgrenzen

Obwohl hitzebeständig, sollten Formen aus **Laminierkeramik mit Epoxydharzdeckschichten** nach Möglichkeit nur bei Temperaturen bis ca. 50 °C eingesetzt werden.

Bei höheren Temperaturen härten die Epoxydharz-Deckschichten mit leichtem Schwund nach, während die Laminierkeramik dimensionsstabil bleibt. Dadurch kann sich die Form leicht wölben, gerade Flächen zeigen unter Umständen eine Wellenbildung an der Oberfläche.

PROPERTIES AND APPLICATIONS

R&G laminating ceramic is a refined, synthetic hard shell plaster exhibiting great hardness.

Advantages

- absolutely non-toxic and environmentally acceptable material
- very easy to use, fast curing
- precise, distortion-free moulds with **low expansion** (moulding precision 0.2–0.3 mm per metre) and high strength
- low-priced
- suitable for normal pressure and vacuum, also at higher temperatures (for processing prepregs)
- resistant up to 150 °C

Processing

The **one-component powder** is mixed with water and cures completely, free of stress, and with very low **expansion** (approx. 0.2–0.3 mm per metre) in fifty minutes.

Laminating ceramic **can be combined with epoxy mould resin overlays**. This yields polishable, wear-resistant surfaces with a highly rigid and precise backup coat that is easy to apply. All R&G mould resins are suitable. The advantages associated with this structure have been utilised in the construction of aircraft and automobiles for a number of years. Moulds for 1:1 prototypes, engine cowlings, aircraft wings and fuselages as well as foaming and pressure moulds are made of this material.

Release agents

The overlay, like the customary GRP moulds, consists of **epoxy mould resin**, so the established R&G release agents can be used.

Application limits

Although heat-resistant, moulds of **laminating ceramic with epoxy resin overlays** should not be exposed wherever possible to temperatures greater than approx. 50 °C.

At higher temperatures, the epoxy resin overlays undergo slight shrinkage when post-curing, whereas the laminating ceramic remains dimensionally stable. This can cause the mould to warp slightly, and plane surfaces may exhibit waviness.



Laminierkeramik <i>Laminating ceramic</i>	Verarbeitung <i>Processing</i>	Formaufbau + Materialverbrauch <i>Mould layout & material consumption</i>
<p>Weißer, dünnflüssige Masse zum Tränken von M1-Glasgewebe für Laminat mit hoher Biegezugfestigkeit</p> <p>Zur Herstellung von Formen jeder Größe. Pro Lage Gewebe ergibt sich eine Schichtstärke von ca. 5 mm.</p> <p>1 - 2 Lagen reichen je nach Formgröße aus.</p>	<p>Pulver in Wasser einstreuen, kräftig verrühren (von Hand bzw. mit Schneebesen)</p>	<p>In Kombination mit Epoxyd-Formenharzen als Deckschicht.</p> <p>Empfohlener Aufbau:</p> <ol style="list-style-type: none">1.) Formenharz (= 0,25 kg/m²)2.) 2 Lagen Glasgewebe 163 g/m² + Epoxydharz (= 0,58 kg/m²)3.) 1 Lage Glasgewebe 280 g/m² + Epoxydharz (= 0,5 kg/m²)4.) 1 Lage M1-Glasgewebe + Laminierkeramik + Wasser = 11,5 kg
<p>White, low-viscosity compound for impregnating M1 glass fabric to make laminates with high tensile bending strength.</p> <p><i>For constructing moulds of all sizes. Each fabric layer yields a coat thickness of approx. 5 mm. One to two layers are sufficient, depending on the size of the mould.</i></p>	<p><i>Scatter the powder in water, and mix vigorously (by hand or with a whisk)</i></p>	<p>In combination with epoxy mould resins as overlay.</p> <p><i>Recommended layout:</i></p> <ol style="list-style-type: none">1. mould resin (= 0.25 kg/m²)2. 2 layers 163 g/m² glass fabric + epoxy resin (= 0.58 kg/m²)3. 1 layer 280 g/m² glass fabric + epoxy resin (= 0.5 kg/m²)4. 1 layer M1 glass fabric + laminating ceramic + water = 11.5 kg <p>Total mould weight</p> <p><i>with 1 layer laminating ceramic approx. 12.8 kg/m²</i></p> <p><i>with 2 layers laminating ceramic approx. 24.3 kg/m²</i></p>

ANWENDUNGSBEISPIELE

Flugzeugbau

am Beispiel eines Nurfüglers



Auflegen einer mit Laminierkeramik vorgetränkten M 1-Gewebelage auf das „nasse“ Epoxydharzlaminat.

An M1 fabric layer pre-impregnated with laminating ceramic is laid on the "wet" epoxy resin laminate.



Die Formrückseite wird zur Versteifung mit Rippen aus M 1-Gewebe/Laminierkeramik verstärkt.

Stiffening ribs of M1 fabric / laminating ceramic reinforce the rear side of the mould.



Die Innenseite der Negativform zeigt die glatte, glänzende Oberfläche aus R&G Formenharz P.

The female mould's inner side shows the smooth, glossy surface of R&G mould resin P.

EXAMPLE APPLICATIONS

Aircraft construction

A flying wing

Flugzeugbau

am Beispiel eines einsitzigen Sportflugzeuges



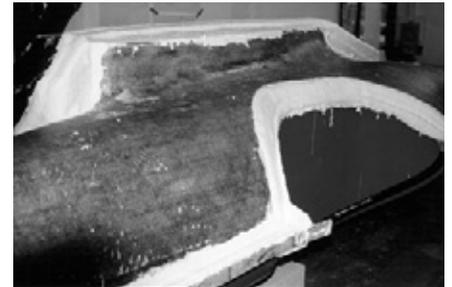
Abmessen und Zuschneiden von M 1-Glasgewebe

M1 glass fabric is measured and cut to size.



Laminieren der Randverstärkung

The edge reinforcements are laminated.



Die fertige Randverstärkung. Die großen Flächen der Form sind aus Gewichtsgründen in Waben-Sandwichbauweise hergestellt.

The finished edge reinforcements. A honeycomb sandwich construction was adopted for the large surfaces to reduce weight.

Aircraft construction

A single-seater sports plane

Flugzeugbau

am Beispiel von Verkleidungen



Triebwerksverkleidung für eine General Electric CF 6/50 (Boeing 747, DC 10, Airbus A 300). Anheben des Urmodells mit einem Kran.

Engine cowling for a General Electric CF 6/50 (Boeing 747, DC 10, Airbus A 300). The master pattern is lifted with a crane.



Seitenansicht der fertigen Form

Side view of the finished mould.



Radom aus keramischer Formmasse

Radome of ceramic moulding compound.

Fahrzeugbau

am Beispiel eines Kaltpreßwerkzeuges für BMW-Frontspoiler



Obere und untere Formhälfte

Upper and lower mould halves.

Automobile construction

A cold-pressing mould for BMW front spoilers



Geschlossenes Preßwerkzeug

Closed pressure mould.



Lackierter Spoiler am BMW-Allrad der 3er-Serie

Painted spoiler on the BMW 3 Series AWD model.

Bootsbau

am Beispiel eines Segelkanus



Negativ-Form aus Epoxydharz/Laminierkeramik

Female mould of epoxy resin / laminating ceramic.

Boat building

A sailing canoe



Die fertige Bootsschale wird mit dem Deck verklebt

The finished hull is glued to the top panel.



Montage der Aufbauten

The superstructure is assembled.

Modellbau

am Beispiel einer Segelflugzeug-Tragflächenform



Auf das nasse Epoxydharz/Glasgewebelaminat wird mit Laminierkeramik vorgetränktes M 1-Glasgewebe aufgelegt

M1 glass fabric pre-impregnated with laminating ceramic is laid on the wet epoxy resin / glass fabric laminate.

Model construction

A mould for a glider's wing



Versteifung der Formhälften mit je zwei 50 mm Alu-Rohren

Each mould half is stiffened with two 50 mm aluminium tubes.



Positiv und Negativ

Male and female.

ELASTOMERE
ELASTOMERS

ELASTOSIL® M SILICONKAUTSCHUK

Hochflexible Formen aus Siliconkautschuk erlauben die Reproduktion komplizierter Formteile mit Hinterschneidungen. Die hauptsächlichen **Einsatzgebiete** sind z.B. die Herstellung von Modellteilen, Möbelverzierungen, Reliefbildern, Schmuckkerzen, Architekturmodellen, Zierknöpfen, Puppenkörpern, Dichtungsprofilen sowie Reproduktionen in der Denkmalpflege.

Urmodelle aus den üblichen Werkstoffen wie Holz, Metall, Kunststoff, Gips, Stein und Wachs sind für Abformungen mit Siliconkautschuk gut geeignet. Bei glatten, nichtsaugenden Oberflächen wie z.B. Kunststoff oder Metall, sind Trennmittel in der Regel nicht notwendig (lediglich Silicon auf Silicon verklebt, so daß mit R&G Grundierwachs vorbehandelt werden muß).

Poröse Modelle aus Gips, Holz oder Stein sollten vor der Abformung versiegelt werden, um den Saugeffekt zu beheben. Üblich sind für diesen Zweck wasserlösliche Kunstharze, z.B. Methylzellulose (Tapetenkleister), Polyvinylalkohol oder Acryl-Tiefgrund bzw. Nitro-Schnellschliffgrund. Aufgrund der hohen Flexibilität des Kautschuks ist die Abformung starker Hinterschneidungen möglich.

Abformungen

In den Formen aus Siliconkautschuk können Positiv-Gießlinge aus Polyester-, Epoxyd- und Polyurethanharzen sowie Gips, Wachs und Beton hergestellt werden. Hierzu sind besondere **Trennmittel** für die Form in der Regel nicht erforderlich (mit **Ausnahme** von **Epoxydharzen**).

Mit Polyester- und Polyurethanharzen können größere Stückzahlen abgeformt werden. **Amingehärtete Epoxydharze greifen das Silicon an.** Um die Lebensdauer der Formen zu erhöhen, wird vor der Abformung zunächst eine dünne Schicht R&G **Grundierwachs** aufgebracht. **Grundierwachs** wurde speziell für schlecht benetzbare Oberflächen wie z.B. Silicon entwickelt. Dieses Trennmittel ist auch erforderlich, wenn als erste Schicht EP- oder UP-Deckschichtharze in die Siliconform gestrichen werden sollen, da sonst aufgrund schlechter Benetzbarkeit Fehlstellen in Form von Augen oder Pinselstrichen entstehen können.

Allgemeines

Die wesentlichen Merkmale der Wacker ELASTOSIL® M-Siliconkautschuke sind:

- **Konsistenz**
- **Reaktivität**
- **Vulkanisateigenschaften**
- **Vernetzungssystem**

Konsistenz

Hinsichtlich Konsistenz unterscheidet man zwischen gießbaren, streichbaren, streichbar-standfesten und knetbaren Systemen. Die Viskosität beschreibt näherungsweise das Fließverhalten. Je höher der Zahlenwert, desto dickflüssiger ist die Gieß- bzw. steifpastöse die Streichmasse.

Reaktivität

Die Reaktivität wird durch die Kenngrößen Verarbeitungs- (Topf-) und Vulkanisationszeit beschrieben. Als Verarbeitungszeit wird üblicherweise die Zeitspanne angegeben, an deren Ende die katalysierte Kautschukmasse gerade noch gieß-, streich- oder knetbar ist. Bei Anwendungen, die sehr hohe Anforderungen hinsichtlich Fließfähigkeit stellen, wie z.B. beim Vergießen elektronischer Bauteile mit engen Spalten, wird aber meist die Zeitspanne bis zur Verdoppelung der Ausgangsviskosität als Verarbeitungszeit angeführt. Die Vulkanisationszeiten geben in der Regel nur die Zeitspanne an, nach der der Kautschuk klebfrei ausvulkanisiert und damit handhabbar ist. Die endgültigen Vulkanisateigenschaften werden bei Raumtemperaturvulkanisation meist erst nach einigen Tagen erreicht.

WACKER

ELASTOSIL® M SILICONE RUBBER

Highly flexible moulds of silicone rubber are ideal for the reproduction of *complex parts with undercuts*. These moulds are **used primarily** in the manufacture of *model parts, decorative elements for furniture, reliefs, ornamental candles, architectural models, decorative buttons, dolls' bodies, sealing sections, and reproductions for the preservation of historical monuments*.

Master patterns of the usual materials such as wood, metal, plastic, plaster, stone, and wax are highly suitable for making moulds with silicone rubber. *Smooth, non-absorbent surfaces, e.g. of plastic or metal, generally do not need release agents (solely silicone adheres to silicone, so the surfaces must be pretreated with R&G priming wax).*

The surfaces of **porous models**, e.g. of plaster, wood, or stone, are highly absorbent, so they must be sealed beforehand. The sealants commonly used for this purpose are water-soluble synthetic resins such as methyl cellulose (wallpaper paste), polyvinyl alcohol, acrylic penetrating stopper, nitro primer, etc. The high flexibility of the rubber means that moulds can be made with extreme undercuts.

Mould making

Moulds of silicone rubber can be used to make male casts not only of polyester, epoxy, and polyurethane resin, but also of plaster, wax, and concrete. **Special release agents** generally do not need to be applied to the mould (with the **exception of epoxy resins**).

Moulds of polyester or polyurethane resin are recommended for greater piece numbers.

Amine-hardened epoxy resins attack silicone. The service life of the mould is extended when a thin coat of R&G **priming wax** is applied before the first cast. This **priming wax** was developed specially for surfaces with low wetting properties, e.g. silicone.

This release agent also becomes necessary when EP or UP overlay resins are to be applied as the first coat in a silicone mould. Otherwise, the silicone's poor wetting properties could give rise to voids in the form of bubbles or brush marks.

General information

The essential features of Wacker ELASTOSIL® M silicone rubbers are:

- **Consistency**
- **Reactivity**
- **Vulcanisate properties**
- **Curing (cross-linking) system**

Consistency

This property can be divided into pourable, spreadable, firm-spreadable, and kneadable systems. The viscosity is an approximate measure of the flow characteristics. The higher the value for the viscosity, the thicker the pourable compound or the stiffer the pastiness of the spreadable compound.

Reactivity

The processing time (pot life) and the vulcanisation time are a measure of a system's reactivity. Usually the processing time is specified as the period after which the catalysed rubber compound has just become pourable, spreadable, or kneadable. However, where very high demands are placed on flowability, e.g. when the compound is to embed electronic components separated by narrow gaps, the processing time is usually specified as the time needed for the viscosity to reach double the initial value.

As a rule, the vulcanisation times specify only that period after which the rubber has fully cured (to exhibit a tack-free surface) for further processing. In most cases, the final vulcanisate properties are not reached until the system has undergone vulcanisation a number of days at room temperature.



Auch bei höheren Temperaturen hergestellte Vulkanisate vernetzen in der Regel während der anschließenden Raumtemperaturlagerung noch in unterschiedlichem Ausmaß nach.

Die endgültigen Vulkanisateigenschaften stellen sich am schnellsten durch eine mehrstündige Lagerung bei nicht zu hohen Temperaturen (100 - 120 °C), das sogenannte **Tempern**, ein.

Vulkanisateigenschaften

Zu den wichtigsten Vulkanisateigenschaften gehören die **mechanischen und elektrischen Werte**.

Bei den **mechanischen Vulkanisateigenschaften** stellt, neben der meist in Shore A-Punkten angegebenen Eindrückhärte (je höher der Shore A-Wert, desto härter das Vulkanisat!), der Weiterreißwiderstand eine der wesentlichsten Kenngrößen dar. Werte über etwa 10 N/mm bedeuten, daß es sich um eine sogenannte „kerbfeste“ Type handelt, d.h. sie weist eine deutlich höhere Ein- und Weiterreißfestigkeit auf als die Typen mit „Standardmechanik“.

Die elastischen Eigenschaften von Silikonkautschuken bleiben in einem Bereich von ca. - 50 °C bis + 200 °C erhalten. Mit Spezialtypen läßt sich dieser Bereich bis zu - 100 °C in der Kälte ausweiten.

Die Beständigkeit gegen hohe Temperaturen ist einerseits typenabhängig und andererseits abhängig von der Umgebung des Materials. Im Allgemeinen bleiben Silikonkautschuk-Vulkanisate bei extremen Temperaturen elastisch, jedoch spielt die Anwesenheit von Luftsauerstoff für die Langzeitalterung eine wichtige Rolle. Unter Luftzutritt sind RTV-2 Silikonkautschuk-Vulkanisate bis zu + 200 °C dauerbeständig. Bei besonders hitzestabilen RTV-2 Produkten bleibt die Elastizität selbst bei + 250 °C noch bis 1000 Stunden erhalten. Kurzfristig ertragen sie sogar Temperaturen über +300 °C. Bei längerer Hitzeeinwirkung über + 180 °C werden in Gegenwart von Sauerstoff durch Oxydation langsam Vernetzungsstellen zwischen den Polymerketten geschaffen.

Dieser irreversible Prozeß zeigt sich durch Gewichtsverlust, Schrumpfung und zunehmende Versprödung. Er ist verbunden mit einem Anstieg der Härte, einem Abfall der Reißfestigkeit und Reißdehnung sowie einer Verschlechterung des Weiterreißwiderstandes. Unter Luftausschluß in geschlossenen Systemen dominieren bei erhöhter Temperatur Alterungsprozesse durch Polymerisation oder Reversion.

Dies gilt insbesondere in Gegenwart von Feuchtigkeitsspuren (bzw. Hydroxylgruppen) oder zinnorganischen Verbindungen, die in den Härtern von kondensationsvernetzenden Kautschuken enthalten sind. Bei kondensationsvernetzenden Typen muß deshalb auf eine vollständige Entfernung der Spaltprodukte geachtet werden. In dieser Hinsicht sind die meisten additionsvernetzenden Produkte wegen der Abwesenheit von zinnorganischen Verbindungen den kondensationsvernetzenden Produkten überlegen.

Die **elektrischen Vulkanisateigenschaften** sind weitgehend unabhängig von Konsistenz, Reaktivität, mechanischen Eigenschaften oder Vernetzungssystem. Die meisten Verarbeitungs- und Vulkanisateigenschaften werden jedoch wesentlich von der Art des Vernetzungssystems mitbestimmt. Man unterscheidet zwei Vernetzungssysteme:

- **Kondensationsvernetzung**
- **Additionsvernetzung**

Kondensationsvernetzung

Die Vulkanisation von kondensationsvernetzenden Silikonkautschuken erfolgt durch Zugabe eines flüssigen oder pastenförmigen Härters der **Reihe T** zur Kautschukmasse.

Je nach Type und zugesetzter Menge des Härters ergeben sich längere oder kürzere Verarbeitungs- und Vulkanisationszeiten, wobei für jede Kautschuktype bestimmte Härter und Mengenbereiche festgelegt sind.

Wird der vorgeschriebene Mengenbereich des Härters unterschritten (**Unterdosierung**), kommt es zur Untervulkanisation: Der Kautschuk bleibt weich oder sogar klebrig; die mechanische Festigkeit ist wesentlich geringer; die Beständigkeit gegen Quellung durch Lösemittel und Gießharzbestandteile ist deutlich reduziert.

*Even when vulcanisates are manufactured at higher temperatures, they generally undergo differing degrees of post-cross-linking during subsequent storage at room temperature. The fastest method for obtaining the final vulcanisate properties is to store the products for several hours at temperatures that are not too high (100–120 °C). This method is so-called **annealing**.*

Vulcanisate properties

*The most important vulcanisate properties include the **mechanical and electrical properties**.*

*Of a **vulcanisate's mechanical properties**, the tear propagation strength is one of the key characteristics next to the indentation hardness (mostly specified in Shore A, whereby the higher the Shore A value, the harder the vulcanisate). Tear propagation strengths greater than about 10 N/mm mean that the vulcanisate exhibits a high notch toughness, i.e. a far higher tear and tear propagation strength than the standard mechanical properties.*

The elastic properties of silicone rubbers remain constant from about 50 °C to +200 °C. Special types can even retain their properties at temperatures as low as 100 °C.

Resistance to high temperatures depends on both the type and environment. In general silicone rubber vulcanisates remain elastic at extreme temperatures, yet a key factor in long-term aging is the presence of atmospheric oxygen. On exposure to air RTV-2 silicone rubber vulcanisates are permanently resistant up to +200 °C. Particularly heat-stable RTV-2 products retain their elasticity for up to 1000 hours even at 250 °C. Over the short term they can even withstand temperatures in excess of +300 °C. Heating over +180 °C for longer periods causes oxygen in the environment to oxidise, gradually creating crosslinks between the polymer chains.

This irreversible process manifests itself in loss of weight, shrinkage, and growing embrittlement, entailing increased hardness, reduced tear strength and elongation at break, and deteriorated tear propagation strength. When air is excluded from closed systems, aging processes induced by polymerisation or reversion dominate at high temperatures.

This applies in particular when there are traces of moisture (or hydroxyls) or organotin compounds constituting the hardeners of condensation curing rubbers. It is therefore imperative that all breakdown products are removed from condensation curing types. In this respect most addition curing products are superior to condensation curers because the former have no organotin compounds.

*A **vulcanisate's electrical properties** are to a great extent independent of the consistency, reactivity, mechanical properties, and curing (cross-linking) system. However, the type of curing system is an essential factor affecting most of the processing and vulcanisate properties.*

There are two types of curing system:

- **Condensation curing**
- **Addition curing**

Condensation curing

*Silicone rubbers from the condensation-curing category undergo vulcanisation on the addition of a liquid or pasty hardener from the **T series**, which has been developed for rubber compounds.*

Different types and added quantities of hardener serve to lengthen or shorten the processing and vulcanisation times. These hardeners and quantity ranges are fixed for every rubber type.

*Introducing less than the prescribed quantities of hardener (**underdosing**) leads to undervulcanisation: the rubber stays soft or even tacky, the mechanical strength is considerably reduced, and its resistance to the swelling effects of solvents and cast resin constituents clearly suffers.*

Wird der vorgeschriebene Mengenbereich des Härters überschritten (**Überdosierung**), liegt ein Überschuß des Vernetzers im Vulkanisat vor. Die Trennfähigkeit des Kautschuks nimmt ab. Außerdem kommt es durch Einwirkung von Luftfeuchtigkeit zu einer Nachhärtung des Vulkanisates, die zum weitgehenden Verlust seiner mechanischen Festigkeit führen kann.

Die Vulkanisation der kondensationsvernetzenden Siliconkautschuke kann bei Temperaturen zwischen 0 °C und max. 70 °C vorgenommen werden (bei Temperaturen > 80 °C kommt es zu einer Umkehrung der Vernetzungsreaktion, der sogenannten Reversion: das System bleibt oder wird wieder klebrig bis flüssig!).

Zur ordnungsgemäßen Vulkanisation werden zusätzlich zu dem im Härter enthaltenen Organozinn-Katalysator geringe Mengen an Feuchtigkeit sowohl in der Kautschukmasse als auch in der Umgebungsluft benötigt. Bei der Vernetzung entsteht als Reaktionsprodukt ein niedriger Alkohol, meist Ethanol oder Propanol. Erst wenn sich der gesamte gebildete Alkohol aus dem Vulkanisat verflüchtigt hat, ist dieses einsatzfähig. Durch die Verflüchtigung des Alkohols kommt es zu einem Masseverlust, der zu einer dreidimensionalen Schrumpfung des Vulkanisates im Bereich von < 5 Volumenprozent führt.

*Introducing a greater amount of hardener than that specified (**overdosing**) gives rise to an excess of catalyst in the vulcanisate. Not only does the rubber's resistance to the separating procedure increase, the vulcanisate undergoes post-curing under the effects of air humidity, with the result that it loses most of its mechanical strength.*

Silicone rubbers that undergo condensation curing can be vulcanised at temperatures between 0 and max 70 °C. It is important to note that temperatures higher than 80 °C cause the cross-linking reaction to switch directions: so-called reversion, whereby the system remains or again becomes tacky or even liquid.

For vulcanisation to take place without problems, what is needed is not only the organotin catalyser contained in the hardener, but also small quantities of moisture in both the rubber compound and the ambient air. The reaction product generated by the cross-linking is a low-concentration alcohol, in most cases ethanol or propanol. The alcohol thus formed must first volatilise out of the vulcanisate before it can be used. This volatilisation leads to a loss in mass, which in turn causes the vulcanisate to shrink along all three axes by as much as 5 % vol.





ELASTOSIL® M SILICONKAUTSCHUK

Additionsvernetzung

Die Vulkanisation der additionsvernetzenden Siliconkautschuke erfolgt durch Vermischen der beiden Komponenten A und B.

Die beiden Komponenten sind **genau aufeinander abgestimmt** und werden deshalb nur zusammen ausgeliefert, d.h. ein Einzelbezug ist nicht möglich.

Die Komponenten A und B dürfen ausschließlich im vorgeschriebenen Gewichtsverhältnis verarbeitet werden! Ein abweichendes Mischungsverhältnis A:B führt im allgemeinen zur Untervulkanisation mit ähnlichen Folgen, wie bereits bei den kondensationsvernetzenden Typen beschrieben.

Die Vulkanisation der additionsvernetzenden Siliconkautschuke kann bei Temperaturen zwischen 10 °C und 200 °C vorgenommen werden. Da bei der Vernetzung keine flüchtigen Reaktionsprodukte gebildet werden, kommt es weder zu einer Umkehrung der Vernetzungsreaktion bei höheren Temperaturen noch zu einer chemischen Schrumpfung des Vulkanisates durch einen Masseverlust. Vulkanisate aus additionsvernetzenden Siliconkautschuken sind daher unmittelbar nach Entformung einsatzfähig.

Mit dem unvulkanisierten Kautschuk in Kontakt kommende, sogenannte „inhibierende“, d.h. die Vernetzung durch Reaktivitätshemmung des Platinkomplex-Katalysators störende Substanzen können jedoch den Einsatz von additions-vernetzenden Siliconkautschuken erschweren oder sogar unmöglich machen.

Sicherheitshinweise / Sicherheitsvorkehrungen

Die in mehreren Jahrzehnten Anwendung gewonnene Erfahrung mit Siliconkautschuken hat ergeben, daß die kondensationsvernetzenden und additionsvernetzenden Kautschukmassen im Lieferzustand weder als toxisch noch als aggressiv anzusehen sind. Daher erübrigen sich besondere, über die allgemeinen arbeitshygienischen Vorschriften hinausgehende Vorsichtsmaßnahmen.

Dagegen können die zur Verarbeitung der kondensationsvernetzenden Typen eingesetzten Härter der Reihe „T“ Reizerscheinungen auslösen, wenn sie unverdünnt auf die Haut oder gar in die Augen gelangen. Bei besonders disponierten Personen können auch allergische Symptome auftreten. Daher sind entsprechende Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

Weitere Hinweise

Unvulkanisierte Reste von Siliconkautschuk lassen sich problemlos mit fettlösenden Lösemitteln wie Benzin oder Aceton aus Gefäßen oder von Kleidungsstücken entfernen. Topfreste läßt man am besten vulkanisieren; danach kann man sie mühelos aus den Arbeitsgefäßen entnehmen. Bereits an- oder gar ausvulkanisiertes Material läßt sich nur mehr nach vorherigem Anquellen in einem der oben genannten Lösemittel durch mechanische Einwirkung entfernen; ein Auflösen ist nicht mehr möglich! Dies sollte bei der Wahl einer zweckmäßigen Arbeitskleidung berücksichtigt werden.

Beim Umgang mit Lösemitteln muß für eine ausreichende Belüftung des Arbeitsplatzes gesorgt werden.

Lagerung

Kondensationsvernetzende Typen

Die kondensationsvernetzenden Siliconkautschuke benötigen, wie bereits erwähnt, zur ordnungsgemäßen Vulkanisation, besonders in dickerer Schicht, geringe Mengen an Wasserdampf in der Kautschukmasse. Um ein Entweichen der bei der Herstellung zugesetzten Feuchtigkeit aus dem unvulkanisierten Kautschuk zu verhindern, müssen die Gebinde dicht verschlossen bei **Temperaturen** zwischen 5 und 30 °C gelagert werden.

ELASTOSIL® M SILICONE RUBBER

Addition curing

Silicone rubbers from the addition-curing category undergo vulcanisation when the two constituents A and B are mixed.

*These two constituents must be **precisely matched to one another** and so are always supplied together, i.e. it is not possible to purchase the one constituent only.*

The constituents A and B must be processed exclusively in the prescribed ratio of weights. A different mixing ratio A:B generally gives rise to undercuring with similar consequences to those described above for condensation curing.

Addition-curing silicone rubbers can be vulcanised at temperatures between 10 and 200 °C. This type of cross-linking does not form volatile reaction products, so the cross-linking reaction is not reversed at higher temperatures, nor does the vulcanisate undergo chemical shrinkage as a result of any loss in mass. So vulcanisates that have been made from these silicone rubbers can be used directly after demoulding.

However, the possible applications for addition-cured silicone rubbers can be severely restricted and even made impossible should the unvulcanised rubber come into contact with so-called inhibiting substances, i.e. substances whose reactivity suppresses the cross-linking ability of the platinum complex catalyser.

Notes on safety / safety precautions

The experience gained from several decades of applications involving silicone rubbers has shown that the rubber compounds from both categories of condensation and addition curing may be regarded as neither toxic nor aggressive in the delivered state. For this reason, no special precautions need be taken beyond those specified in the general rules for industrial hygiene.

On the other hand, the hardeners from the T series used to process the condensation-curing types may cause irritation when, in the undiluted state, they come into contact with the skin or eyes. Particularly susceptible persons may show allergic symptoms, so the corresponding protective measures must be taken.

Other notes

Unvulcanised silicone rubber residue can be easily removed from receptacles and clothing with grease solvents such as petrol or acetone. The best method for residue in curing pots is to vulcanise it first: afterwards, it can be removed from the curing pot with the minimum of effort.

“Scorched” (prevulcanised) or even fully cured residue, on the other hand, can no longer be dissolved. Instead, it must be removed with a mechanical aid after the residue has undergone prior swelling under the effects of one of the solvents named above. The processor should take this into account when choosing suitable working clothes.

There must be adequate ventilation at the workplace when solvents are handled.

Storage

Condensation-curing types

*For vulcanisation to take place properly (and especially in a thick coat), this category of silicone rubbers, as mentioned above, needs small quantities of water vapour in the rubber compound. So that this moisture added to the compound during its manufacture cannot escape from the unvulcanised rubber, the packaging must be sealed tightly at **temperatures** between 5 and 30 °C.*

Nach der Entnahme von Teilmengen Kautschukmasse muß das Gebinde sofort wieder dicht verschlossen werden, darf also keinesfalls längere Zeit offen bzw. mit nur locker aufgelegtem Deckel gelagert werden. Anderenfalls kann es zu Untervulkanisation kommen, d.h. deutlich verlängerten Zeiten bis zur Entformbarkeit bzw. Klebfreiheit, verzögerter Durchhärtung in dicker Schicht und starker Haftungstendenz an der Form. Treten derartige, durch **Feuchtigkeitsmangel** hervorgerufene Vulkanisationsstörungen auf, kann durch eine einfache Maßnahme ein ordnungsgemäßes Vulkanisationsverhalten wieder hergestellt werden: Dazu rührt man 1 - 2 Gramm Wasser pro Kilogramm Kautschuk in die unvulkanisierte, noch nicht mit dem Härter versetzte Kautschukmasse ein, und lagert diese anschließend im dicht verschlossenen Gebinde mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur. Dabei verdunstet das flüssige Wasser und sättigt den Kautschuk mit der benötigten Feuchtigkeit.

Die Härter der Reihe T reagieren dagegen mit Feuchtigkeit unter Bildung eines flockigen Niederschlags. Die Härterflaschen müssen deshalb sofort nach Entnahme einer Teilmenge wieder dicht verschlossen werden. Die Lagerung sollte möglichst kühl, am besten zwischen 5 °C und 25 °C, erfolgen. Geringe Mengen des Niederschlags haben aber keine Auswirkungen auf Verarbeitungs- und Vulkanisateigenschaften.

Überlagerte Härter (älter als 6 Monate) **können die Verarbeitungszeit des Silicons erheblich verkürzen!** Daher sollten gelieferte Gebinde innerhalb dieses Zeitraums verarbeitet werden.

Additionsvernetzende Typen

Die Komponenten der additionsvernetzenden Siliconkautschuke sollten bei Temperaturen zwischen 5 °C und 30 °C gut verschlossen gelagert werden.

Achtung! Bereits winzige Mengen des Platinkatalysators reichen, falls sie -versehentlich- in die vernetzerhaltige Komponente gelangen, aus, eine Reaktion zu bewirken.

Man findet dann vulkanisierte Partikel bis zu mehreren Zentimetern Durchmesser im unvulkanisierten Material, oder es kommt möglicherweise zur Freisetzung von Wasserstoff. Eine derartige Verunreinigung mit Platinkatalysator („Kontamination“) kann bereits dann stattfinden, wenn die Gebinde von A- und B-Komponente offen nebeneinander stehengelassen werden. Daher müssen die Gebinde nach der Entnahme einer Teilmenge sofort wieder **dicht verschlossen** werden!

Es ist auch unbedingt darauf zu achten, daß Verarbeitungsgeräte, die jemals mit der katalysatorhaltigen Komponente oder der Mischung der beiden Komponenten in Verührung gekommen sind, keinesfalls in Kontakt mit der vernetzerhaltigen Komponente kommen! Es wird daher dringend empfohlen, die nur getrennt zu verwendenden Verarbeitungsgeräte jeweils unterschiedlich und gut sichtbar zu kennzeichnen, um Verwechslungen zu vermeiden.

Verarbeitung

Siliconkautschuke sind **hochentwickelte technische Produkte**, deren Verwendung gewisse **Kenntnisse** erfordert, um das gesamte Leistungsvermögen der jeweiligen Type auszunützen bzw. grundsätzliche **Anwendungsfehler vermeiden** zu können.

Vor Beginn der Verarbeitung sollte man sich daher unbedingt davon überzeugen, daß alle notwendigen Produktinformationen vorliegen.

Empfohlene Grundausstattung

Für die Verarbeitung kleinerer Mengen empfehlen wir folgende Grundausstattung:

- **Waage** (Genauigkeit 0,1 g) oder Meßgefäß oder Pipette bzw. Einwegspritze
- Saubere **Mischgefäße** aus Metall oder Kunststoff (am besten PE oder PP) oder Papp-Mischbecher
- **Spatel** aus Metall, Holz oder Kunststoff
- Steifer **Kurzhaarpinsel**
- Mechanisches **Rührgerät** (z.B. Bohrmaschine mit Blattrührer)
- Vakuumpumpe und Vakuumpfäß (z.B. **Exsikkator** aus Glas oder Kunststoff)
- Fettlösendes **Lösemittel** (z.B. Benzin, Aceton, MEK)

*When only part of the contents is removed, the packaging holding the rubber compound must be resealed tightly immediately afterwards: it must not remain open for a long time or be stored with a loose lid. Otherwise, undercuring is the consequence, i.e. considerably longer times until the part is ready to demould or develops a tack-free surface, delayed curing in thick coats, and a strong tendency to adhere to the mould. Should **lack of moisture** disrupt vulcanisation in this manner, it can be made to progress properly with a simple measure: simply mix 1–2 g of water for every kilogram of rubber in the unvulcanised rubber compound (without added hardener), and then store this in its tightly sealed packaging at room temperature for at least twenty-four hours. During this time, the water evaporates, saturating the rubber compound with the required moisture in the process.*

The hardeners from the T series, on the other hand, react with moisture to form a flocculent precipitate. In other words, when only part of the contents is removed from the hardener's packaging, it must be resealed tightly immediately afterwards. The hardener must be stored in as cool an environment as possible, at best between 5 and 25 °C. Small quantities of precipitate, however, have no effect on the processing or vulcanisation properties.

Hardeners that have been stored for longer than the specified period (over six months) can cut the processing time for the silicone considerably. The contents of packaging must be consumed within the period specified.

Addition-curing types

The constituents of these types should be stored at temperatures between 5 °C and 30 °C in tightly sealed packaging.

Important! Even a minute quantity of the platinum catalyst is enough to initiate a reaction should it (accidentally) come into contact with the constituent containing the cross-linking agent.

*In this event, unvulcanised material may contain vulcanised zones with diameters up to several centimetres, or the material may possibly release hydrogen. The material is so susceptible to contamination with the platinum catalyst that the packaging for the constituents A and B should not even be placed next to each other when they are open. When only part of the contents is removed, the packaging must be **tightly sealed** immediately afterwards.*

It is imperative that the processor also ensures that tools and equipment used to prepare the constituent containing the catalyst or the mixture of the two constituents do not under any circumstances come into contact with the constituent containing the cross-linking agent. For this reason, we urgently recommend that the tools and equipment used separately to process the respective constituents are provided with different and highly visible markings so that they cannot be confused.

Processing

Silicone rubbers are **highly developed technical products** that require a certain level of knowhow if the full potential of these products is to be utilised and fundamental **errors are avoided in their application**.

So before commencing work on processing, you should always convince yourself that you have all the required product information to hand.

Recommended basic equipment

When smaller quantities are processed, we recommend the following basic equipment.

- **Balance** (precision 0.1 g) and measuring vessel or pipette or disposable injector
- Clean **mixing vessels** of metal or plastic (ideally of PE or PP) or cardboard mixing cups
- **Spatulas** of metal, wood, or plastic
- Stiff **short-bristle brushes**
- Mechanical **mixing device** (e.g. drill with paddle agitator),
- Vacuum pump and vacuum vessel (e.g. **desiccator** of glass or plastic)
- Grease **solvent** (e.g. petrol, acetone, MEK)



ELASTOSIL® M SILICONKAUTSCHUK

Vorbereiten der Komponenten

Die gießbaren Massen bzw. Komponenten (ausgenommen die glasklar transparenten Typen) müssen vor jeder Entnahme einer Teilmenge aus dem Gebinde bzw. vor der Verarbeitung im Gebinde gründlich durchgerührt werden, um eine gleichmäßige Verteilung der enthaltenen Füllstoffe zu gewährleisten, die sich während der Lagerung abgesetzt haben könnten. Bei den Typen mit hoher Weiterreißfestigkeit, die bei längerer Lagerung etwas verdicken können, wird durch das Aufrühren wieder die optimale Fließfähigkeit erzielt.

Dosieren der Komponenten

Es wird dringend empfohlen, die Komponenten exakt zu dosieren, da nur bei genauer Einhaltung des Mischungsverhältnisses reproduzierbare Verarbeitungs- und Vulkanisationszeiten sowie, noch wichtiger, spezifikationsgerechte Vulkanisateigenschaften erhalten werden. Die Dosierung kann entweder über das Gewicht (Waage) oder das Volumen (Meßgefäß, Pipette oder Einwegspritze) erfolgen.

Da in den Verarbeitungsunterlagen das Mischungsverhältnis meist nur in Gewichtsteilen angegeben ist, muß für die Volumendosierung zuvor das Volumenverhältnis mittels der in den Produktmerk- sowie Sicherheitsdatenblättern angeführten Dichten errechnet werden.

Achtung!

Wird die Entlüftung der katalysierten Masse im Einwaagegefäß vorgenommen, muß dessen Fassungsvermögen mindestens dem vierfachen Volumen der katalysierten Kautschukmasse entsprechen (siehe unter „Entfernen der eingemischten Luft“!). Bei den kondensationsvernetzenden Siliconkautschuken führen Härter-Fehldosierungen zu folgenden Problemen:

Überdosierung

- Verkürzte Verarbeitungszeiten (bei sehr großer Überdosierung keine Vulkanisation!)
- Haftungstendenz auf Kontaktmaterialien (Grundierungseffekt!)
- Drastisch erhöhte chemische Schrumpfung
- Nachhärtung der Vulkanisate unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit („Versprödung“)
- Bei hoch ein- und weiterreißfesten Typen nach kurzer Zeit starker Rückgang des Weiterreißwiderstandes

Unterdosierung

- Verzögerte Vernetzungsreaktion (im Extremfall gar keine oder keine vollständige Ausvulkanisation!)
- Haftungstendenz auf Kontaktmaterial (Klebeeffekt!)
- Weiche, „lappige“ Vulkanisate mit geringer mechanischer Festigkeit und stark erhöhter Quellbarkeit

Bei den **additionsvernetzenden** Siliconkautschuken sind die konkreten Auswirkungen einer **Fehldosierung** der Komponente B unterschiedlich, abhängig vom Mischungsverhältnis A : B sowie davon, in welcher Komponente sich der Vernetzer bzw. der Platin-Katalysator befindet. In jedem Fall kommt es jedoch zu einer Veränderung des optimalen Polymer/Vernetzer-Verhältnisses sowie der Katalysator-Konzentration.

Die Folgen sind

- Verlängerte oder verkürzte Verarbeitungszeiten (bei sehr starker Abweichung vom vorgeschriebenen Mischungsverhältnis keine oder keine vollständige Vulkanisation!)
- Weiche, „lappige“ Vulkanisate mit geringer mechanischer Festigkeit und stark erhöhter Quellbarkeit Nachhärtung der Vulkanisate (bei Vernetzerüberschuß!)
- verstärkte Inhibierbarkeit (bei Katalysatormangel!)

ELASTOSIL® M SILICONE RUBBER

Preparing the constituents

The pourable compounds or constituents (excluding the transparent types) must be thoroughly mixed before they are removed from or processed in the packaging. This ensures that the fillers that may have precipitated during the storage period are distributed uniformly throughout. Stirring also ensures that types with high tear propagation strength, which may have thickened slightly during storage, regain their optimal flowability.

Dosing the constituents

It is essential that the constituents are precisely dosed. Only meticulous adherence to the mixing ratio ensures reproducible processing and vulcanisation times and, more importantly, the vulcanisate properties required for the respective application. Either the weight (determined with the balance) or the volume (determined with the measuring vessel, pipette, or disposable injector) can serve as the basis for dosing.

In most cases, the processing instructions specify the mixing ratio in parts by weight only, so the volume ratio needed for volumetric dosing must first be calculated from the densities given on the product's information and safety data sheets.

Important!

If the catalysed compound is de-aired in the weighing receptacle, the receptacle must be able to hold at least four times the initial volume of the catalysed rubber compound (see the section "Removing trapped air"). In the case of condensation-curing silicone rubbers, dosing the wrong quantity of hardener can cause the problems listed below.

Overdosing

- Shortened processing times (extreme overdosing suppresses vulcanisation).
- Tendency to adhere to contacting materials ("primer effect").
- Sharp increase in chemical shrinkage.
- Vulcanisates post-cure, and so embrittle under the effects of air humidity.
- High tear and tear propagation strengths drop sharply after a short time.

Underdosing

- Retarded cross-linking reaction (in extreme cases there is no or only partial curing).
- Tendency to adhere to contacting material ("adhesive effect").
- Soft, limp vulcanisates with low mechanical strength and an exaggerated tendency to swell.

*In the case of **addition-curing** silicone rubbers, the specific effects of a **wrongly dosed quantity** of constituent B vary, depending on the mixing ratio A : B and on which of the constituents contains the cross-linking agent and which the platinum catalyser.*

In all cases, both the optimal ratio of polymer to cross-linking agent and the concentration of the catalyser are changed as a result.

The consequences are

- Extended or shortened processing times (with extreme deviations from the specified mixing ratio there is no or only partial curing).
- Soft, limp vulcanisates with low mechanical strength and an exaggerated tendency to swell.
- Vulcanisates undergo post-curing (owing to the excess of cross-linking agents).
- Increased susceptibility to inhibiting effects (inadequate quantity of catalyser).

Vermischen der Komponenten (Katalysierung)

Es ist darauf zu achten, daß die beiden Komponenten Kautschuk und Härter bei den Kondensationsvernetzenden Typen völlig gleichmäßig (homogen) vermischt werden. Dies läßt sich bei den gieß- und streichbaren Produkten per Hand mit dem Spatel bzw. bei größeren Mengen mittels eines mechanischen Rührwerkes oder einer automatischen Misch- und Dosieranlage erreichen. Als Rührwerkzeuge für mechanische Rührwerke haben sich mehrfach gelochte, leicht aus der Achsenebene gekantete Blattrührer bewährt, im Fall von Hochgeschwindigkeitsrührwerken (Dissolvern) auch Zahnscheiben.

Achtung! Sind die Viskositäten der beiden zu vermischenden Komponenten deutlich verschieden, wie z.B. beim Einmischen eines flüssigen Härters der Reihe T in eine Kautschukmasse, dann neigt die dünnerflüssige Komponente dazu, sich an der Wand des Mischgefäßes anzureichern. Um eine örtliche Überkonzentration mit ihren negativen Folgen (ungleichmäßige Ausvulkanisation, Inhomogenitäten) zu vermeiden, muß die Gefäßwand während des gesamten Mischvorganges mit einem Spatel in kurzen Abständen abgestreift werden, auch bei einer Vermischung mit Hilfe eines mechanischen Rührwerkes!

Entfernen der eingemischten Luft

Durch die Vermischung von Masse und Härter bzw. der beiden Komponenten A und B unter Luftzutritt wird zwangsläufig eine bestimmte Menge Luft in die Kautschukmasse eingetragen. Nur in wenigen Fällen ist aber die Viskosität der katalysierten Mischung so niedrig, daß sich innerhalb der jeweiligen Verarbeitungszeit eine vollständige bzw. ausreichende Selbstentlüftung der Kautschukmasse ergibt. Zur Erzielung **völlig luftblasenfreier** Vulkanisate müssen daher gießbare, d.h. fließfähige Mischungen (Viskositätswerte bis 200.000 mPa·s) unter vermindertem Druck (10 - 20 mbar!) in einem Exsikkator oder Vakuumschrank entlüftet (evakuiert) werden.

Da sich die katalysierte Masse während des Evakuierens sehr stark ausdehnt, darf das verwendete Gefäß nur zu höchstens einem Viertel seines Gesamtvolumens mit dieser gefüllt werden, um eine maximale Expansion der Kautschukmasse zu erlauben und damit die kürzestmögliche Entlüftungszeit zu gewährleisten. Während des Evakuierens steigt die Masse zunächst hoch und fällt dann, bei ausreichendem Volumen des Mischgefäßes, von selbst zusammen, bevor der Gefäßrand erreicht wird. Droht die Masse dennoch überzulaufen, muß kurz belüftet werden, wobei dieser Vorgang so oft zu wiederholen ist, bis die Masse bei vollem Vakuum in sich zusammenfällt. Kurz darauf wird das Evakuieren abgebrochen.

Die gesamte Dauer des Evakuiervorganges sollte **5 Minuten** nicht überschreiten. Es sollte keinesfalls so lange evakuiert werden, bis sich keine Blasen mehr bilden, da in diesem Fall für die ordnungsgemäße Vulkanisation notwendige flüchtige Bestandteile entfernt werden könnten. Außerdem geht durch zu langes Evakuieren Verarbeitungszeit verloren.

Im Gegensatz zu Gießmassen können **höherviskose Streichmassen** nicht durch Evakuieren entlüftet werden. In diesem Fall sollte entweder versucht werden, die Luftbläschen durch intensives Rühren klein und damit wenig störend zu halten, oder aber man bringt auf die Kontaktflächen (die abzuförmende Oberfläche) zuerst eine **dünne, blasenfreie Schicht einer Gießmasse** auf, läßt diese leicht anvulkanisieren (nicht bis zur Klebfreiheit!) und appliziert dann erst die luftblasenhaltige Streichmasse.

Applikation

Gießbare Siliconkautschuke werden nach dem Entlüften im Vakuum- aus möglichst geringer Höhe in dünnem Strahl auf- bzw. eingegossen. Falls keine Evakuiermöglichkeit besteht, wird ein gewisser Entlüftungseffekt erreicht, wenn die Masse aus größerer Höhe in möglichst dünnem Strahl gegossen wird. Sollen jedoch völlig blasenfreie Kontaktflächen erzielt werden oder handelt es sich um eine streichbare Type, wird zuerst eine dünne Schicht katalysierte Gießmasse mit Hilfe eines steifen Kurzhaarpinsels luftblasenfrei aufgetragen. Nachdem diese Schicht leicht anvulkanisiert, aber noch klebrig ist, wird ein gießbares System, wie oben beschrieben, aufgegossen, eine streichbare Type mit einem Spatel aufgestrichen. Knetmassen werden von Hand oder mittels einer Walze appliziert.

Mixing (catalysing) the constituents

It must be ensured that the two constituents, rubber and hardener, are mixed completely uniformly (homogeneously) when the result is a condensation-curing type. Pourable and spreadable products can be homogeneously mixed by hand with the spatula or, for larger quantities, with a mechanical mixing device or an automated mixing and dosing system. Perforated paddle agitators set at a slight angle to the axial plane have proved efficient in mechanical mixing devices, but also toothed discs are used in high-speed mixers (dissolvers).

Important! *If the two constituents exhibit too great a difference in their viscosities, e.g. a liquid hardener from the T series must be mixed into the rubber compound, then the lower-viscosity constituent tends to accumulate on the sides of the mixing vessel. So that local overvulcanisation and its negative consequences (inhomogeneous curing or consistency) cannot arise, a spatula must be used to scrape down the sides of the receptacle at short intervals for the whole mixing process – even when a mechanical mixing device is used.*

Removing trapped air

*When the compound and hardener or the two constituents A and B are mixed in a vessel exposed to air, it is inevitable that a certain quantity of air becomes trapped in the rubber compound. Only in very few cases, however, is the viscosity of the catalysed mixture so low that the full or an adequate quantity of the air trapped in the rubber compound can escape within the respective processing time. Vulcanisates **completely free of air bubbles** are obtained only when pourable, i.e. flowable mixtures (max viscosity 200,000 mPa·s) are de-aired (evacuated) under a reduced pressure (10–20 mbar) in a desiccator or vacuum chamber. During evacuation, the catalysed compound undergoes extreme expansion. So that the rubber compound can expand to the maximum extent in the shortest possible evacuation time, the vessel holding the compound should not be filled to more than a quarter of its capacity. During the evacuation process, the compound first expands and then (provided that the capacity of the mixing vessel is large enough) collapses before reaching the vessel's rim. Should the compound be on the point of spilling over, air must be introduced into the chamber for a short period. This procedure must be repeated until the compound collapses in the hardest obtainable vacuum. The evacuation process is now stopped.*

*The full duration of the evacuation process should not exceed **five minutes**. Under no circumstances should evacuation be continued until bubbles no longer form: this could cause volatile constituents to escape that are needed for vulcanisation to take place properly. Moreover, too long an evacuation adds to the processing time.*

*In contrast to pouring compounds, **higher-viscosity spreadable** compounds cannot be de-aired through evacuation. Instead, one of two methods can be applied. The first involves intensive mixing to minimise the size, and therefore the disruptive potential of air bubbles. Alternatively, **a thin, bubble-free coat of a pourable compound** is applied to the contact surfaces (the surfaces forming the cast) and left to prevulcanise slightly (but not until the surface becomes tack-free) before serving as the base coat for the spreadable compound containing air bubbles.*

Application

After the de-airing process in a vacuum, pourable silicone rubbers are applied in thin jets as close to the base surface as possible.

If evacuation is not possible, a certain de-airing effect is achieved when the compound is applied in as thin a jet as possible from a greater height.

If, however, the contact surfaces should not exhibit any bubbles at all or the rubber compound is a spreadable type, then the catalysed pourable compound is first of all applied in a thin, bubble-free coat with a stiff short-bristle brush.

Once this coat has prevulcanised slightly, but is still tacky, the pourable system is introduced as described above or the spreadable system applied with a spatula. Kneadable compounds are applied by hand or with a roller.

ELASTOSIL® M SILICONKAUTSCHUK

Verarbeitungs- und Vulkanisationszeit

Die Verarbeitungs- oder Topfzeit, also jene Zeitspanne, innerhalb der sich die katalysierte Kautschukmasse noch gut verarbeiten lässt, hängt sowohl bei den kondensations- wie auch den additionsvernetzenden Typen stark von der Temperatur ab. Durch Erwärmen der Masse verkürzt, durch Abkühlen verlängert sich der Verarbeitungsspielraum wesentlich. Als Faustregel gilt eine Halbierung bzw. Verdoppelung der Topfzeit bei einer Erwärmung bzw. Abkühlung um etwa 7 °C.

Die **beginnende Vulkanisation** macht sich durch einen zunehmenden **Anstieg der Viskosität** (Verdickung, Abnahme der Fließfähigkeit bzw. der Plastizität) bemerkbar. Daher sollte der gesamte Topfzeitraum nicht vollständig ausgenutzt werden. Vielmehr sollte die katalysierte Masse in möglichst niedrigviskosem, d.h. dünnflüssigem bzw. weichpastösem Zustand angewendet werden. Auch die **Vulkanisationszeit** hängt, bei den kondensationsvernetzenden weniger, bei den additionsvernetzenden Typen jedoch sehr stark von der Temperatur ab.

Man unterscheidet die Zeit bis zur Klebfreiheit des Vulkanisates, nach der z.B. entformt werden bzw. das vergossene oder beschichtete Teil ohne Beschädigung manipuliert werden kann, und die Zeit bis zur vollständigen Ausvulkanisation. Letztere kann, je nach Temperatur, von wenigen Minuten bei additionsvernetzenden bis zu mehreren Monaten bei kondensationsvernetzenden Produkten reichen. So lange die Vulkanisation nicht vollständig abgeschlossen ist, können längerdauernde Verformungen des Vulkanisates durch Nachvernetzung zu bleibenden Verformungen führen!

Wird die **Vulkanisation** durch Anwendung **höherer Temperaturen** beschleunigt (Achtung! Bei kondensationsvernetzenden Typen dürfen 70 °C wegen der Gefahr einer Reversion des Vernetzungsprozesses nicht überschritten werden!), kommt es beim Abkühlen des Vulkanisates zu einer thermischen Volumen-Schrumpfung, entsprechend dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Kautschuks. Je nachdem, ob die thermische Ausdehnung des Kautschuks im unvernetzten oder vernetzten Zustand erfolgt, was u.a. von der Topfzeit abhängt, kann es beim Abkühlen auf Raumtemperatur zu Verzerrungen der Vulkanisationsgeometrie kommen. Dies gilt sowohl für kondensations- (hier kommt noch die chemische Schrumpfung hinzu!) als auch für additionsvernetzende Produkte. Ist höchste Maßgenauigkeit gefordert, muß daher entweder die Vulkanisation bei der späteren Einsatztemperatur des Kautschuks vorgenommen, oder aber die Dimensionsänderung durch Berechnung oder Vorversuche ermittelt und entsprechend berücksichtigt werden.

Vulkanisationsstörungen

Kondensationsvernetzende Siliconkautschuke benötigen für eine schnelle und vollständige Aushärtung geringe Mengen an Feuchtigkeit. Informationen zum Fall eines Feuchtigkeitsmangels in der Kautschukmasse finden Sie unter „Lagerung“.

Enthält die Umgebungsluft weniger als 40 % relative Feuchtigkeit, können die der Luft zugewandten Vulkanisatoberflächen klebrig bis flüssig bleiben. In diesem Fall muß der Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft durch geeignete Maßnahmen (Verdunster, Zerstäuber, feuchte Tücher) entsprechend angehoben werden, was sich leicht mittels eines Hygrometers kontrollieren läßt. Ein Wasserzusatz zur Masse stellt in diesem Fall keine geeignete Maßnahme dar!

Bei den **additionsvernetzenden Siliconkautschuken** kann es durch eine Reihe von Substanzen oder Werkstoffen, die die Funktion des Platin-Komplekxkatalysators beeinträchtigen, im Falle eines Kontaktes mit der unvulkanisierten Mischung zu **Vulkanisationsstörungen** kommen, auch „Inhibierung“ genannt. Diese Substanzen können sich sowohl an der Oberfläche eines mit der Kautschukmasse in Kontakt kommenden Substrates (Modell, Mischwerkzeug etc.) als auch in der Umgebungsluft befinden, u.a. in Temperöfen oder Wärmeschränken, in denen Gießharze ausgehärtet wurden, die inhibierende Stoffe freisetzen.

ELASTOSIL® M SILICONE RUBBER

Processing and vulcanisation times

Whether condensation- or addition-curing types, the processing time or pot life, i.e. the time during which the catalysed rubber compound can be processed without difficulty, depends greatly on the temperature. Higher temperatures essentially shorten the processing time, lower temperatures essentially increase it. A general rule of thumb is that a rise in temperature of about 7 °C halves the pot life, the equivalent drop in temperature doubles it.

*A perceptible sign of **incipient vulcanisation is the constant increase in viscosity** (inspissation, drop in flowability or plasticity). For this reason, the pot life should not be utilised to the full extent. Instead, the catalysed compound should be used when it exhibits the lowest possible viscosity, i.e. when it is in a free-flowing or soft-pasty state.*

*Also the **vulcanisation times** depend on the temperature. This applies less to the condensation-curing types than to the addition-curing types, whose dependency is greater.*

The vulcanisation time is divided further into the time needed for the vulcanisate to yield a tack-free surface, thus allowing e.g. demoulding or safe manipulation of the cast or coated part, and the time needed for full curing. Depending on the temperature, the latter can range from a few minutes in the case of addition-curing products to several months in the case of condensation-curing types. When vulcanisates have not cured completely, post-cross-linking can cause in the long term any deformation of the vulcanisate to become permanent.

*If **vulcanisation** is accelerated at **higher temperatures** (Important! condensation-curing types must not be exposed to temperatures higher than 70 °C, otherwise the cross-linking process may undergo reversion), the vulcanisate, when cooled, experiences a thermally induced dimensional shrinkage based on the rubber constituent's coefficient of thermal expansion. Depending on whether the rubber undergoes thermal expansion in the cross-linked or un-cross-linked state (influenced by such factors as the pot life), the three-dimensional progress of vulcanisation can become distorted when the compound is cooled to room temperature. This applies to both addition-curing types and condensation-curing types (these latter undergo in addition chemically induced shrinkage). If the greatest dimensional accuracy is required, then either vulcanisation must take place at the subsequent working temperature of the rubber, or appropriate consideration is given to the dimensional changes that are calculated or determined beforehand in preliminary tests.*

Disruptions to vulcanisation

-curing silicone rubbers need small quantities of moisture in order to cure completely and quickly. The consequences of a lack of moisture in the rubber compound are described under the section "Storage".

If the relative humidity of the ambient air is less than 40 %, then the surfaces of the vulcanisate exposed to the air can remain tacky or even liquid. In this event, suitable measures must be implemented (e.g. evaporator, atomiser, moist cloths) to raise the moisture content of the air in the processing environment, which can then be easily measured with a hygrometer. Adding water to the compound is not a suitable measure in this event.

*In the case of **addition-curing silicone rubbers**, there are a number of substances or engineering materials that counteract the function of the platinum complex catalyser and so **disrupt**, or inhibit the **progress of vulcanisation** when they come into contact with the unvulcanised mixture. These substances can be found both on the surfaces of the substrate in contact with the rubber compound (model, mixer tools, etc.) and in the ambient air, e.g. in annealing ovens or hot-curing chambers used for cast resins that release inhibitors when curing.*

Die wichtigsten dieser inhibierenden Stoffe sind:

- Schwefel, bestimmte Schwefelverbindungen wie Polysulfide und Polysulfone sowie andere schwefelhaltige Stoffe wie Natur- und bestimmte Synthetikgummiarten (u.a. EPDM)
- Amine, Urethane und aminhaltige Stoffe wie amingehärtete Epoxidharze, bestimmte Polyurethane etc.
- Organometall- speziell Organozinn-Verbindungen und solche Substanzen enthaltende Stoffe wie z.B. Vulkanisate und Härter kondensationsvernetzender Siliconkautschuke
- Diverse natürliche und synthetische Öle, Fette, Wachse und Harze sowie solche Substanzen enthaltende Stoffe wie z.B. viele Trennmittel und fast alle Plastillsorten

Es wird daher dringend empfohlen, über entsprechende Vorversuche abzusichern, daß die mit dem unvulkanisierten additionsvernetzenden Kautschuk in Berührung kommenden Materialien keine Inhibierung verursachen. Flüssige Anteile, klebrige oder deutlich weichere Vulkanisatoberflächen im Kontaktbereich oder eine deutlich verzögerte Ausvulkanisation weisen auf das Vorliegen einer Inhibierung hin.

Vorbereitung des Vulkanisates

Vor dem ersten Einsatz eines vulkanisierten Siliconkautschukes müssen je nach Vernetzungssystem, Vulkanisations- und Einsatzbedingungen im einzelnen Fall bestimmte Voraussetzungen erfüllt bzw. spezielle Maßnahmen getroffen werden:

Vulkanisate kondensationsvernetzender Kautschuke müssen absolut frei sein vom bei der Vernetzungsreaktion gebildeten flüchtigem Alkohol, bevor sie:

- Dauernd verformt werden, z.B. als Dichtung; anderenfalls kommt es zu einem Druckverformungsrest von bis zu 100 %, d.h. es ist kein Rückstellvermögen mehr vorhanden
- Auf Temperaturen über 90 °C erhitzt werden, da sonst Reversion eintritt, d.h. eine Umkehrung der Vernetzungsreaktion, die zur Erweichung bis Verflüssigung des Kautschuks innerhalb dickerer Schichten bzw. im geschlossenen System führt
- Alkoholdampfdicht verschlossen werden, z.B. im gekapselten Elektroverguß, da es sonst zu massiver Metall- und Kunststoffkorrosion kommt, als Langzeiteffekt auch bei Raumtemperatur
- Mit chemisch aggressiven oder physikalisch quellenden Agentien in Kontakt gebracht werden, z.B. als Formen zur Gießharzverarbeitung, da daraus sonst eine drastische Erniedrigung der erreichbaren Abformzahlen resultiert

Die Alkoholfreiheit frischer kondensationsvernetzter Vulkanisate läßt sich entweder durch mehrtägige Lagerung bei Raumtemperatur (Faustregel: ca. 24 Stunden je cm Schichtdicke bis zur nächstliegenden freien Oberfläche) oder mehrstündige Lagerung bei maximal 70 °C (Faustregel: ca. 6 Stunden je cm Schichtdicke bis zur nächstliegenden freien Oberfläche) erreichen, wobei das Vulkanisat offen, mit möglichst großer freier Oberfläche gelagert werden sollte.

The following is a list of the most important inhibitors:

- Sulphur, certain sulphur compounds such as polysulphides and polysulfones as well as other sulphurous substances such as natural and some synthetic rubbers (e.g. EPDM)
- Amines, urethanes, and substances containing amines such as amine-hardened epoxy resins, some polyurethanes, etc.
- Organometallic compounds, but specifically organotin compounds, and other substances containing these such as e.g. vulcanisates and hardeners for condensation-curing silicone rubbers
- Various natural and synthetic oils, greases, waxes, and resins as well as other substances containing these such as e.g. a large number of release agents and almost all plasticine brands

It is therefore urgently recommended to conduct the corresponding preliminary tests which can verify that the materials coming into contact with the unvulcanised addition-curing rubber do not inhibit vulcanisation. Liquid zones, tacky or perceptibly softer vulcanisate surfaces in the contact area, or severely retarded curing are indications of the presence of inhibitors.

Preparing the vulcanisate

Before a vulcanised silicone rubber can be put to use in a specific situation, a number of conditions must first be fulfilled or specific measures implemented depending on the curing system as well as the vulcanisation and field conditions.

Vulcanisates of condensation-curing rubbers must be absolutely free of the volatile alcohol formed during the cross-linking reaction before they can be:

- Subjected to plastic deformation operations, e.g. for manufacturing gaskets; otherwise, the compression set may be as high as 100 %, i.e. the vulcanisate no longer exhibits a restoring force
- Heated to temperatures over 90 °C; otherwise, the cross-linking reaction will reverse, causing the rubber to soften or liquefy in thicker coats or a closed system
- Sealed tightly against alcohol vapour, e.g. in cast encapsulations for electronic components; otherwise, there will be severe corrosion to metals and plastics, in the long term at room temperature as well
- brought into contact with chemically aggressive or physically swelling agents, e.g. as moulds for processing cast resins; otherwise, the maximum number of demouldings will be drastically reduced as a result

The alcohol content of fresh condensation-cured vulcanisates can be reduced to zero when they are stored for several days at room temperature (the general rule of thumb is approx. twenty-four hours for every centimetre of coat thickness to the next exposed surface) or for several hours at a maximum temperature of 70 °C (here the rule of thumb is approx. six hours for every centimetre of coat thickness to the next exposed surface). The vulcanisate must be stored with as much of its surface area exposed as possible.



ELASTOSIL® M SILICONKAUTSCHUK

Vulkanisate **additionsvernetzender Kautschuke** enthalten kein Reaktionsprodukt und sind deshalb im Prinzip sofort nach vollständiger Vernetzung einsetzbar. Da dieser Vorgang bei Raumtemperatur jedoch ebenfalls einige Tage dauern kann, empfiehlt sich eine anschließende mehrstündige Wärmebehandlung bei 100 °C, um die Vernetzung abzuschließen, insbesondere dann, wenn ein möglichst niedriger Druckverformungsrest gefordert wird. Generell läßt sich sagen, daß sich eine mehrstündige Wärmebehandlung, zumindest bei der künftigen Einsatztemperatur, maximal aber bei 180 °C, sowohl für alkoholfreie kondensations- wie auch für additionsvernetzende Vulkanisate im Hinblick auf das Erreichen ihrer höchstmöglichen Leistungsfähigkeit als günstig erwiesen hat.

Verkleben mit verschiedenen Materialien

Bereits vulkanisierte Silikonkautschuke lassen sich mit Hilfe von unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit ausvulkanisierenden Silikonkautschuk-Klebern mit anderen Werkstoffen verbinden. Besonders bewährt hat sich dafür das Produkt ELASTOSIL® E 4 (lösemittelfrei, standfest, transparent).

Zur Verklebung wird der Einkomponenten-Kautschuk dünn auf die vorbehandelte und entsprechend grundierte Werkstoff-Haftfläche sowie auf die mit Aceton oder Benzin gereinigte Silikonkautschuk-Vulkanisatoberfläche aufgetragen, worauf beide Teile ohne Wartezeit zusammengefügt werden. Durch seitliches Verschieben kann die Passung, falls erforderlich, noch korrigiert werden. Der seitlich herausquellende, überschüssige Kleber wird anschließend abgestreift. Bereits nach 1 - 2 Stunden ist meist eine gute Haftung gegeben, wobei allerdings die Schichtdicke des Kautschukvulkanisates, der Feuchtigkeitsgehalt der Umgebungsluft und die Temperatur einen starken Einfluß auf die Vulkanisationszeit des Klebers ausüben. Der bei der Vernetzung der ELASTOSIL® E-Typen auftretende Geruch nach Essigsäure verschwindet nach abgeschlossener Vulkanisation vollständig.

Sollen Silikonkautschuk-Vulkanisate miteinander verklebt werden, so bestreicht man die mit Aceton oder Benzin gereinigten Haftflächen jeweils mit einer möglichst dünnen Schicht ELASTOSIL® E 4 und fügt sie ohne Wartezeit zusammen. Im übrigen gilt das bereits beim Verkleben von RTV-2 Silikonkautschuk-Vulkanisaten mit Nichtsilicon-Werkstoffen erwähnte.

Einfärben

Silikonkautschuke können durch Zusatz von bis zu 4 Gew.-% mit ELASTOSIL®-Farbpaste FL eingefärbt werden. Die ELASTOSIL®-Farbpasten FL sind verarbeitungsfertige, weichpastöse und somit leicht einarbeitbare Zubereitungen aus sehr feinverteilten anorganischen Pigmenten und einem Siliconpolymer. Sie stehen standardmäßig in drei Farbstellungen zur Verfügung, sind physiologisch unbedenklich und ergeben licht-, UV- und heißluftbeständige Einfärbungen.

ELASTOSIL® M SILICONE RUBBER

*Vulcanisates of **addition-curing rubbers** do not contain any reaction product and so in principle can be put to use immediately they have completely cured. This process, however, may also take several days at room temperature, so one recommended procedure is subsequent heat treatment at 100 °C over several hours to bring cross-linking to a close, in particular when the lowest possible compression set is required. It is a generally accepted fact that heat treatment of several hours, at temperatures no less than the intended working temperature, yet no greater than 180 °C, is particularly effective as a measure for maximising the service properties of both alcohol-free condensation- and addition-curing vulcanisates.*

Gluing various materials

Silicone rubber glues that undergo vulcanisation when exposed to air humidity can be used to bond fully cured silicone rubbers to other materials. The product ELASTOSIL® E 4 (solvent-free, firm, transparent) has proved particularly effective in this respect.

First of all, a thin coat of one-component rubber is applied to the pretreated and adequately primed surface of the material to be glued and then to the surface of the silicone rubber vulcanisate. Both surfaces can now be joined without any further delay. If necessary, the parts can be pushed into place if they are misaligned. Any excess glue extruded from the sides of the join is then scraped off. In most cases, there is good adhesion as early as one to two hours later, depending on the applied thickness of the rubber vulcanisate, the moisture content of the ambient air, and the temperature, all of which greatly affect the vulcanisation time for the glue. The odour of acetic acid emitted by the ELASTOSIL® E types when undergoing cross-linking disappears once vulcanisation has completed.

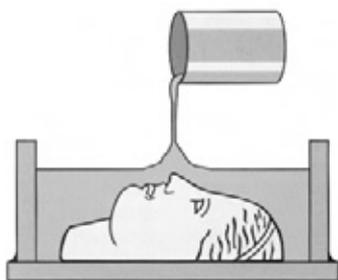
When the two parts to be joined are silicone rubber vulcanisates, ELASTOSIL® E 4 is spread as thinly as possible over each of the contact surfaces cleaned previously with acetone or petrol. The parts can now be joined without any further delay. Please also see the information provided earlier on bonding RTV-2 silicone rubber vulcanisates with non-silicone materials.

Colouring

Silicone rubbers can be coloured through the addition of up to 4 % by weight of ELASTOSIL® colour paste FL. ELASTOSIL® colour pastes FL are formulations ready for processing that are made up of inorganic pigments distributed extremely finely through a silicone polymer and whose soft-pasty consistency makes them easy to work into the compound. They are available in three standard colours, are physiologically safe, and yield colours that are resistant to light, UV, and hot air.

AUSWAHLHILFE ELASTOMERE SELECTION CHART ELASTOMERS

Auswahlhilfe / <i>Selection chart</i> ELASTOSIL® Silicon-Abformmassen ELASTOSIL® silicone moulding compounds	Kondensationsvernetzend <i>Condensation curing</i> ELASTOSIL® M 4503	Kondensationsvernetzend <i>Condensation curing</i> ELASTOSIL® M 4470
Konsistenz <i>Consistency</i>	gießfähig <i>pourable</i>	gießfähig <i>pourable</i>
Farbe des Vulkanisats <i>Colour of vulcanisate</i>	weiß <i>white</i>	rotbraun <i>reddish brown</i>
Vulkanisateigenschaften <i>Vulcanisate properties</i>	weich; hohe Dehnbarkeit und mechanische Festigkeit <i>soft, high extensibility and mechanical strength</i>	hart, hohe Hitzebeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit <i>hard, high heat resistance and thermal conductivity</i>
Verarbeitung <i>Processing</i>	Gießen/ <i>Pouring</i> Streichen (nur mit Verdickungsadditiv M) <i>Spreading (only in conjunction with thickening additive M)</i>	Gießen/ <i>Pouring</i> Streichen (nur mit Verdickungsadditiv M) <i>Spreading (only in conjunction with thickening additive M)</i>
Gut geeignete Reproduktionsstoffe <i>Ideal reproduction materials</i>	Polyesterharz / <i>Polyester resin</i> Polyurethanharz / <i>Polyurethane</i> Gips / <i>Plaster</i> Wachs / <i>Wax</i>	niedrigschmelzende Metalllegierungen <i>low-melting metal alloys</i> ; Wachs/ <i>Wax</i> Polyurethanharz / <i>Polyurethane</i> ; Gips / <i>Plaster</i> Polyesterharz / <i>Polyester resin</i>
Reproduktionswerkstoffe, bei denen Grundierwachs als Trennmittel verwendet wird <i>Reproduction materials needing priming wax as release agent</i>	Epoxydharz <i>Epoxy resin</i>	Epoxydharz <i>Epoxy resin</i>
Mischungsverhältnis <i>Mixing ratio</i>	100:5 Gewichtsteile Vernetzer T 35 <i>100:5 parts by weight catalyst T 35</i>	100:2 - 100:3 Gewichtsteile Vernetzer T 40 <i>100:2 - 100:3 parts by weight catalyst T 40</i>
Verarbeitungszeit <i>Processing time</i>	90 Minuten <i>90 Minutes</i>	20 - 40 Minuten <i>20 - 40 Minutes</i>
Entformbar nach (Std./23 °C) <i>Demoulding after (hours at 23 °C)</i>	15	5 - 7
Lineare Schrumpfung nach 7 Tagen (%) <i>Linear shrinkage after 7 days (%)</i>	0,5	0,8



Einteilige Formen im Gießverfahren



Casting in one-part moulds

Auswahlhilfe / Selection chart ELASTOSIL® Silicon-Abformmassen ELASTOSIL® silicone moulding compounds	Additionsvernetzend Addition curing ELASTOSIL® M 4601	Additionsvernetzend Addition curing ELASTOSIL® M 4641
Konsistenz <i>Consistency</i>	gießfähig <i>pourable</i>	gießfähig <i>pourable</i>
Farbe des Vulkanisats <i>Colour of vulcanisate</i>	rotbraun <i>reddish brown</i>	transparent <i>colourless</i>
Vulkanisateigenschaften <i>Vulcanisate properties</i>	weich; sehr hohe Dehnbarkeit und mechanische Festigkeit <i>soft, very high extensibility and mechanical strength</i>	mittelhart, gute Dehnbarkeit und mech. Festigkeit; spez. für transparente Formen <i>medium-hard, good extensibility and mechanical strength, specifically for transparent moulds</i>
Verarbeitung <i>Processing</i>	Gießen / <i>Pouring</i> Streichen (nur mit Stabilisator 43) <i>Spreading (only in conjunction with stabiliser 43)</i>	Gießen / <i>Pouring</i> Streichen (nur mit Sabilisator 43) <i>spreading (only in conjunction with stabiliser 43)</i>
Gut geeignete Reproduktionsstoffe <i>Ideal reproduction materials</i>	Polyesterharz / <i>Polyester resin</i> ; Epoxydharz / <i>Epoxy resin</i> ; Polyurethanharz / <i>Polyurethane</i> Gips / <i>Plaster</i> ; Beton / <i>Concrete</i> Wachs / <i>Wax</i> ; Kunststein / <i>Cast stone</i>	Polyesterharz / <i>Polyester resin</i> ; Epoxydharz / <i>Epoxy resin</i> ; Polyurethanharz / <i>Polyurethane</i> Gips / <i>Plaster</i> ; Beton / <i>Concrete</i> Wachs / <i>Wax</i> ; Kunststein / <i>Cast stone</i>
Reproduktionswerkstoffe, bei denen Grundier- wachs als Trennmittel verwendet wird <i>Reproduction materials needing priming wax as release agent</i>	Epoxydharz in größeren Stückzahlen <i>Greater quantities of epoxy resins</i>	Epoxydharz in größeren Stückzahlen <i>Greater quantities of epoxy resin</i>
Mischungsverhältnis <i>Mixing ratio</i>	9:1 Gewichtsteile Komp. A:B <i>9:1 Parts by weight Const. A:B</i>	10:1 Gewichtsteile Komp. A:B <i>10:1 Parts by weight Const. A:B</i>
Verarbeitungszeit <i>Processing time</i>	90 Minuten <i>90 Minutes</i>	100 Minuten <i>100 Minutes</i>
Entformbar nach (Std./23 °C) <i>Demoulding after (hours at 23 °C)</i>	12	15
Lineare Schrumpfung nach 7 Tagen (%) <i>Linear shrinkage after 7 days (%)</i>	< 0,1	< 0,1



Hautformen im Streichverfahren (ELASTOSIL® M 4503 + Verdickungsadditiv M bzw. M 4601/4641 + Stabilisator 43)

Spread coating on skin moulds (ELASTOSIL® M 4503 + thickening additive M or M 4601 / 4641 + stabiliser 43)

TRENNMITTEL, LÖSE- UND REINIGUNGSMITTEL
RELEASE AGENTS, SOLVENT AND CLEANING A

Lieferbare Produkte
■ Grundierwachs + Folientrennmittel PVA

Wird immer in Kombination verwendet. Absolut sichere Trennwirkung, glänzende Oberfläche, leichte Pinselstriche und Staubeinschlüsse sind jedoch möglich.

■ Formula Five® Reinigungs- und Poliercreme Clean 'N' Glaze + Formula Five® Mold Release Wax (Trennpaste)

Wird in Kombination verwendet. Sichere Trennwirkung, hochglänzende Oberfläche.

■ Partall® Hi-Temp-Wax

Wird alleine in gut gereinigten Formen eingesetzt, wenn bei hohen Temperaturen warmgehärtet wird. Beständig bis ca. 180 °C.

■ Trennspray

Wird alleine in gut gereinigten Formen eingesetzt, relativ dicker Auftrag in mehreren Schichten möglich. Trocknet mit matter Oberfläche.

Available products
■ Priming wax + film release agent PVA

Always used in combination. Absolutely reliable release effect, glossy surface, but slight brush marks and dust inclusions are possible.

■ Formula Five® cleaning and polishing cream Clean 'N' Glaze + Formula Five® Mold Release Wax (release paste)

Used in combination. Reliable parting effect, high-gloss surface.

■ Partall® Hi-Temp Wax

Used alone in thoroughly cleaned moulds when hot curing takes place at high temperatures. Resistant to approx. 180 °C.

■ Release spray

Used alone in thoroughly cleaned moulds, several applications of relatively thick coats are possible. Dries to form a matt surface.

	Grundierwachs <i>Priming wax</i>	Folientrennmittel <i>Film release agent</i>	Trennspray <i>Release spray</i>	Formula Five® Reinigungs- und Poliercreme <i>Formula Five® cleaning and polishing cream</i>	Formula Five® Trennpaste <i>Formula Five® release paste</i>	Partall® Hi-Temp-Wax <i>Partall® Hi-Temp-Wax</i>
Lieferform <i>Delivered state</i>	fließfähige Paste <i>flowable paste</i>	flüssig <i>liquid</i>	flüssig <i>liquid</i>	fließfähige Paste <i>flowable paste</i>	pastös <i>pasty</i>	pastös <i>pasty</i>
Aussehen <i>Appearance</i>	weiß-gelb, trübe <i>whitish yellow, dull</i>	farblos <i>colourless</i>	weiß-trübe <i>dull white</i>	braun <i>brown</i>	gelb-braun <i>yellowish brown</i>	weiß-braun <i>whitish brown</i>
Verarbeitung <i>Processing</i>	mit Lappen auftragen, innerhalb von 10 Minuten nachreiben (nicht auspolieren!) <i>apply with a cloth, rub the whole surface before 10 minutes have passed (but not to a polish!).</i>	einschichtig mit	aufsprühen, dann innerhalb von 10 Minuten polieren <i>spray on, then polish before 10 minutes have passed.</i>	mit Lappen auftragen, sofort glänzend auspolieren <i>apply with a cloth, then immediately polish to a glossy finish.</i>	mit Lappen auftragen, nach 10 - 12 Minuten glänzend auspolieren <i>apply with a cloth, after 10-12 minutes polish to a glossy finish.</i>	mit Lappen auftragen, nach 1 Minute glänzend auspolieren! <i>apply with a cloth, after one minute polish to a glossy finish.</i>
Verbrauch/m ² <i>Consumption per m²</i>	ca. 20 g <i>approx. 20 g</i>		ca. 70 g <i>approx. 70 g</i>	ca. 30 g <i>approx. 30 g</i>	ca. 16 g <i>approx. 16 g</i>	ca. 10 g <i>approx. 10 g</i>
Trockenzeit bei 20 °C und 60 - 70 % rel. Luftfeuchte <i>Drying time at 20 °C and 60-70% relative humidity</i>	ca. 5 Minuten <i>approx. 5 minutes</i>		ca. 5 Minuten <i>approx. 5 minutes</i>	ca. 5 Minuten <i>approx. 5 minutes</i>	ca. 10 - 12 Minuten <i>approx. 10-12 minutes</i>	ca. 1 Minute <i>approx. 1 minute</i>
Löslich in <i>Soluble in</i>	Testbenzin <i>white spirit</i>		Testbenzin <i>white spirit</i>	Testbenzin <i>white spirit</i>	Testbenzin <i>white spirit</i>	Testbenzin <i>white spirit</i>
Verarbeitungstemp. <i>Processing temp.</i>	15 - 30 °C		15 - 30 °C	15 - 30 °C	15 - 30 °C	15 - 30 °C
Einsatztemperatur <i>Working temperature</i>	bis ca. 100 °C <i>up to approx. 100 °C</i>		bis ca. 120 °C <i>up to approx. 120 °C</i>	bis ca. 100 °C <i>up to approx. 100 °C</i>	bis ca. 100 °C <i>up to approx. 100 °C</i>	bis ca. 180 °C <i>up to approx. 180 °C</i>

7.02



Was sind Trennmittel

Trennmittel sind flüssige oder pastöse Produkte, die eine Haftung zwischen zwei Materialien verhindern. Für die Abformung von Bauteilen aus Kunststoff- und Metallformen werden hauptsächlich Wachstrennmittel oder Kombinationen aus Wachstrennmittel (Grundierwachs) und Folientrennmittel verwendet. Schuhcreme, Bohnerwachs, Autopolitur u.ä. sind als Trennmittel nicht geeignet!

Verarbeitungsempfehlung

- **Behälter gut schütteln (bei flüssigen Produkten)**
- vor dem Auftrag **ölige und fettige Rückstände** (z.B. verursacht durch Autopolitur, Bohnerwachs, Schuhcreme u.ä.) mit **Lösemittel/feiner Stahlwolle entfernen**.
- **Temperatur beachten** (Formoberfläche + Trennmittel ca. 20 °C)
- **Polieren** von Wachsen **nur mit Baumwollappen**, keine Kunstfasern oder Papiertücher
- **Neue Formen mehrfach einwachsen** (siehe Empfehlung zu den Produkten)

Der Untergrund

Trennmittel dürfen nur auf sauberen, also öl- und fettfreien Untergründen verwendet werden. Wird dieser Hinweis mißachtet, reibt sich der Wachsfilm beim Polieren praktisch vollständig aus, da er auf einem Ölfilm schwimmt.

Ebenso ungeeignet sind saugende Untergründe wie Schaumstoffe, Holz, Gips und andere. Diese Werkstoffe müssen vorher versiegelt und gegebenenfalls lackiert werden.

Besonders gut eignet sich eine GFK-Beschichtung aus Glasgewebe 80 - 163 g/m² und Epoxydharz oder UP-Vorgelat. Lackierte Oberflächen, z.B. bei Urmotellen (Kfz-Teile etc.) lassen sich grundsätzlich mit allen R&G Trennmitteln abformen. Voraussetzung ist jedoch eine ausreichende Beständigkeit des Lackes gegen die Lösemittel im Trennmittel. Bei geringer Chemikalienfestigkeit können die Lösemittel in den Lack „einwandern“ und eine saubere Trennung verhindern. Der Lack haftet meist fest in der Form und das Urmotell wird beschädigt. Ohne Ausschleifen sind die Formen nicht zu gebrauchen.

Allgemein haben sich **2-Komponenten-Lacke** (Polyurethan, Epoxyd- oder Acryl-Basis) am besten bewährt. Vorversuche (Probeabformungen) sind zu empfehlen.

Trennen der Formen

Der beste Weg zum Trennen von Bauteil und Form hängt von der Formgröße und Bauteilgestaltung ab. In den meisten Fällen läßt sich das Bauteil leicht entnehmen, wenn es zuvor an den Kanten von der Form gelöst wurde. Druckluft zwischen Form und Bauteil kann das Lösen ebenfalls erleichtern. Sehr dicke, große Teile lösen sich leichter, wenn man mit einem Gummihammer auf Bauteil und Form klopft. Aus einer gut eingearbeiteten Form fallen die Teile „fast von alleine“ heraus.

Formenreinigung

Nach zahlreichen Wachseinsätzen kann das Trennmittel in der Form aufbauen. Zwar wird dies weitgehend schon dadurch vermieden, daß sich die jeweils vorherige Schicht beim Neuauftrag auflöst, doch spätestens nach einigen hundert Anwendungen ist eine Totalreinigung angebracht. Die verhärteten Schichten werden am einfachsten mit feiner Stahlwolle und warmem Wasser ausgeschliffen.

Die matte Formoberfläche kann anschließend mit R&G Glanzwachs und einer Schwabbelnscheibe auf Hochglanz poliert werden.

What are release agents?

Release agents are liquid or pasty products that prevent two materials from adhering to each other. In most cases, wax release agents or combinations of a wax release agent (priming wax) and film release agent are used to facilitate the extraction of components from plastic and metal moulds. Shoe polish, floor polish, finish restorers for automobiles, or similar substances are not suitable as release agents.

Recommended processing

- **Shake the container thoroughly (for liquid products).**
- Before applying, **remove all oily and greasy residue** (e.g. from finisher restorers, floor polish, shoe polish, etc.) with **a solvent or fine steel wool**.
- Note the temperature (mould surface and release agent approx. 20 °C).
- Use **only cotton cloths**, and not manmade fibres or paper towels, **to polish** waxes.
- **Apply several coats of wax to new moulds** (see the recommendations provided with the products).

The base surface

Release agents must be used only on clean base surfaces, i.e. free of oil and grease. If this condition is not observed, the oil film beneath the wax coat practically causes it to detach from the surface when it is polished.

Also unsuitable are absorbent base surfaces such as foams, wood, plaster, and similar materials. These must be sealed and, if necessary, varnished beforehand.

One ideal material is a GRP coating of 80–163 g/m² glass fabric and epoxy resin or UP pre-gel.

Varnished surfaces, e.g. on master patterns (automobile parts), are suitable for all R&G release agents. However, the varnish must exhibit an adequate resistance to the solvents in the release agent. If the chemical resistance is too low, then the solvents could migrate into the varnish and prevent a clean release process. In addition, the varnish sticks firmly to the mould, and there is damage to the master pattern. The moulds are useless if they cannot be ground clean.

Generally, the best results have been obtained with **two-component varnishes** (epoxy- or acrylic-based polyurethane). Preliminary tests (trial demouldings) are recommended.

Demoulding

The best procedure for releasing the component from the mould depends on the size of the mould and the component design. In most cases, the component can be easily removed when it has been detached from the edges of the mould beforehand. This process is made easier by the introduction of compressed air between the mould and the component. Very thick and large parts can be detached more easily when the component and mould are first struck a number of times with a rubber mallet. If the mould has been prepared properly beforehand, the components should drop out more or less by themselves.

Cleaning moulds

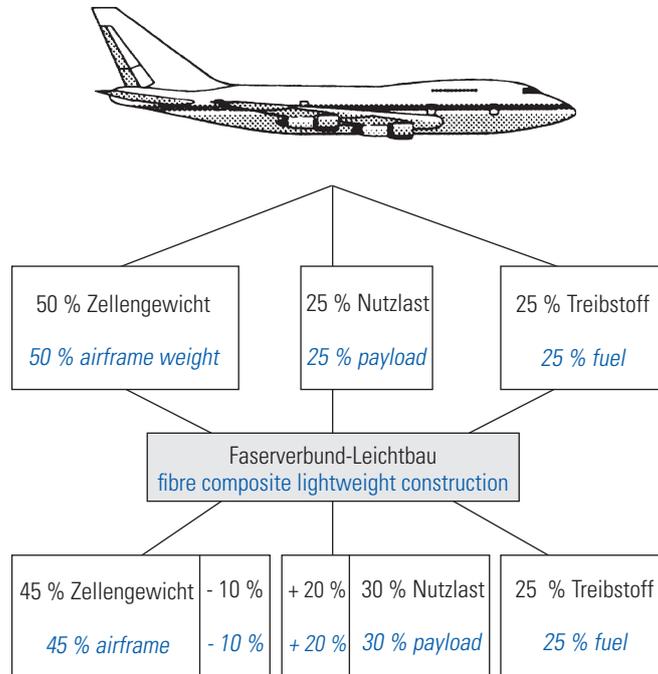
After a large number of wax applications, there may be a build-up of release agent in the mould. The tendency of the coat applied previously to dissolve into the next means that this build-up is suppressed to a large extent, nevertheless thorough cleaning becomes advisable at the latest after several hundred applications. The hardened coats are best ground out with fine steel wool and hot water.

The matt mould surface can finally be polished with R&G high-gloss wax applied with a buffing wheel.

GLAS-, ARAMID- UND KOHLENSTOFFASERN
GLASS, ARAMID- AND CARBON FIBRES

Gewichtsminderungen unter Beibehaltung oder gar Verbesserung der mechanischen Eigenschaften sind die wesentlichen Vorteile des **Leichtbaus** mit Faserverbundwerkstoffen. Dies läßt sich leicht anhand der Rentabilität eines Flugzeuges betrachten, dessen Zellengewicht aus Verbundwerkstoffen um 10 % reduziert wurde.

The essential advantage of **lightweight engineering** with fibre composites is that material weights are reduced without any sacrifice to the mechanical properties. In a number of cases, these properties are even enhanced. This can best be illustrated by the cost-effectiveness of an aircraft whose airframe has been made of fibre composites, with a total weight reduction of 10%.



* Dieser Text enthält Auszüge aus dem Fachbuch „Ökonomischer und Ökologischer Leichtbau mit faserverstärkten Polymeren“, 2., völlig neubearbeitete Auflage, von Prof. Dr. Günter Niederstadt und 6 Mitautoren, erschienen im Expert-Verlag, 71272 Renningen-Malmsheim. Das Buch ist erhältlich bei R&G unter der Bestell-Nr. 380 126-1

* This article contains a number of translated sections taken from Prof. Dr. Günter Niederstadt et al.'s Ökonomischer und Ökologischer Leichtbau mit faserverstärkten Polymeren (2nd completely revised edition published by Expert-Verlag at 71272 Renningen-Malmsheim). This book is available from R&G, order no. 380 126-1.

Geht man davon aus, daß das Zellengewicht etwa 50 % des Abfluggewichts eines Flugzeugs beträgt, so verbleiben nur 25 % für die Nutzlast und 25 % für die erforderlichen Treib- und Betriebsstoffe. Eine 10 %ige Einsparung am Zellengewicht erbringt eine Nutzlasterhöhung von 20 %. Das ist ein großer Vorteil für die Rentabilität des Flugzeugs und der wichtigste Grund für die **Vorreiterrolle des Flugzeugbaus** bei der Anwendung von Faserverbundwerkstoffen. Ähnliche Verbesserungen hinsichtlich der Rentabilität ergeben sich auch für den Schiffbau, den Bus- und Rennwagenbau und in vielen Bereichen des Maschinenbaus.

If we assume that the weight of the airframe is about 50 % of the aircraft's take-off weight, then the remaining 50 % must be shared equally between the payload and the requisite fuels and lubricants. Reducing the airframe weight by 10 % increases the payload by 20 %. This is a considerable advantage for the cost-effectiveness of an aircraft, and the key driving power behind **the pioneering role played by aircraft construction** in the application of fibre composites. Similar improvements to cost-effectiveness can also be obtained for shipbuilding, the construction of buses and racing cars, and many other fields of mechanical engineering.

Fasern

Bei der Auswahl geeigneter Verstärkungsfasern ist nicht nur eine **hohe Festigkeit** wichtig, sondern auch eine **niedrige Materialdichte**. Eigenschaften, die auf die Dichte bezogen werden, nennt man **spezifische Materialeigenschaften**. In einem solchen Kennwert wird der Werkstoff nicht nur nach seinen mechanischen Eigenschaften beurteilt, sondern auch nach seiner geringen Masse. Dieser, als **Reißlänge** gebräuchliche Wert ergibt sich aus der Faserlänge in km, bei der ein Faden durch sein Eigengewicht reißt. Geeignet sind also Fasern mit großer Reiß- und Dehnlänge. Dabei wird der **Vorteil von Kohlenstofffasern** besonders deutlich. Kohlefasern verfügen über eine große Eigenschaftsbreite und können, je nach Type, sowohl große spezifische Festigkeiten als auch große spezifische Steifigkeiten aufweisen.

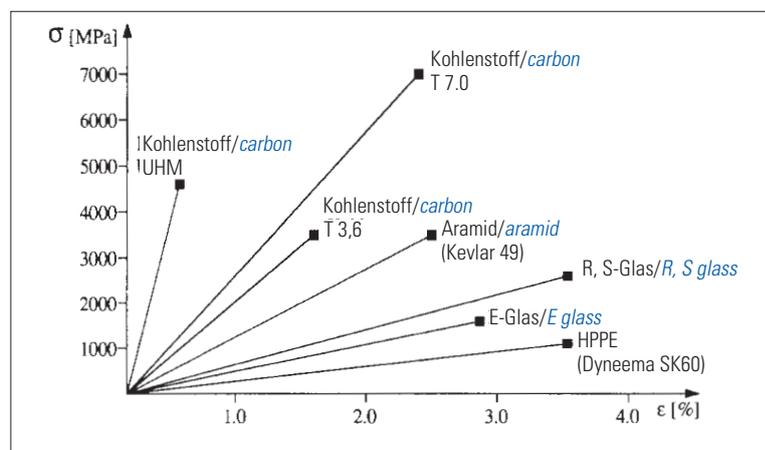
Ein wichtiges Kriterium für den Konstrukteur ist immer das Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Es gibt Antwort auf die Frage nach der **Deformation im Belastungsfall**.

Fibres

The choice of a suitable reinforcing fibre should attach importance not only to **high strength**, but also to a **low material density**. Properties based on the material's density are called **specific material properties**. One of these characteristics usually taken as a measure not only of the material's mechanical properties, but also of its low mass is the so-called **breaking length**, or the minimum length of a fibre in kilometres that breaks under its own weight.

So suitable fibres are those with large breaking and extensile lengths. And here is where the **advantage of carbon fibres** comes to the fore. Carbon fibres exhibit a wide range of properties, including high specific strength and high specific rigidity depending on the type.

One indispensable set of criteria for the designer takes the form of the stress-strain curve. This provides information on how fibres **deform when under load**.

Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Stress-strain curve

Physikalische Eigenschaften verschiedener Fasern
Physical properties of various fibres

Werkstoff Material	Dichte/ Density g/cm ³	Zugfestigkeit GPa Tensile strength GPa	E-Modul GPa Modulus of elasticity GPa	lineare Dehngrenze % Practical elastic limit %	Reißlänge km Breaking length km
Stahl Steel	7,8	1,8 - 2,2	210	1,4 - 1,7	bis/max. 30
Glas Glass	2,6	1,8 - 3,0	72 - 83	2 - 3	70 - 120
Kohlenstoff Carbon	1,7 - 1,9	2,4 - 7,0	230 - 700	0,5 - 2,3	150 - 380
Aramid Aramid	1,4 - 1,5	2,5 - 3,5	60 - 130	2,0 - 4,0	180 - 240
HPPE HPPE	0,97	2,7	89	3,5	295
Flachs Flax	bis/max. 1,5	bis/max. 0,85	bis/max. 25	1,4 - 4	bis/max. 60
Jute Jute	bis/max. 1,5	0,32	27	2,5	bis/max. 25
Ramie Ramie	1,5	bis/max. 0,9	bis/max. 24	2,5	bis/max. 61
Baumwolle Cotton	1,5	bis/max. 0,75	bis/max. 9	bis/max. 10	bis/max. 50

Pflanzenfasern

Verstärkungsmaterialien aus Pflanzenfasern sind als Vliese und teilweise auch als Gewebe erhältlich. Insbesondere der hochwertigen **Ramie-Faser**, die aus dem subtropischen Chinagrass gewonnen wird, kommt wachsende Bedeutung zu. Hinsichtlich ihrer gewichtsbezogenen Festigkeit ist die Ramie-Faser durchaus mit der E-Glasfaser vergleichbar. Natürlich stellt sich bei der Verwendung **biologisch abbaubarer Werkstoffe** die Frage nach der Beständigkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie Temperatur, Feuchte, Chemikalien und Strahlung oder auch Mikroben. Die Entwicklung zielt vor allem auf Anwendungsbereiche, für die heute noch glasfaserverstärkte Polyesterharze verwendet werden. Wesentliche Zielgruppe sind somit z.B. Verkleidungselemente mit tragenden Inserts im Automobil- und Waggonbau sowie der Möbelindustrie.

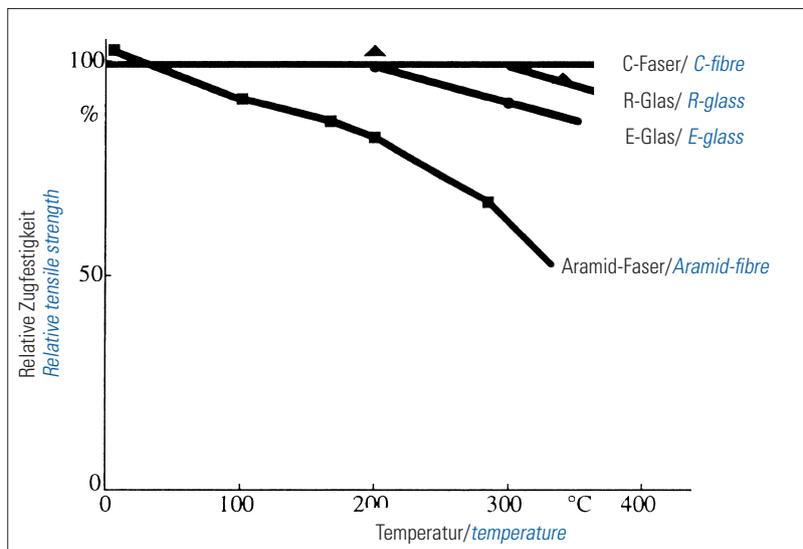
Wärmebeständigkeit

Die Wärmebeständigkeit von Faserverbundwerkstoffen wird allgemein durch die Wärmebeständigkeit der polymeren Matrix (des Harzes) bestimmt und liegt langfristig nicht höher als 230 °C. Kurzfristig kann die Temperaturbeständigkeit jedoch sehr viel höher sein. Man erinnere sich z.B. an die Hitzeschilde für Raumfahrzeuge, wo die Temperaturbeständigkeit eine Folge der **geringen Wärmeleitung** des Harzes ist, die durch geschickte geometrische Anordnung der Fasern (keine Wärmebrücken!) noch weiter verbessert werden kann.

Dennoch haben auch die Fasern unterschiedliche Wärmebeständigkeiten.

Aramidfasern erleiden schon Festigkeitsverluste bei erhöhter Raumtemperatur in inerte Atmosphäre. Ab 200 °C zeigen sich Festigkeitsverluste bei **E-Glasfasern**. Erst ab 1000 °C werden Kohlenstofffasern thermisch beeinflusst.

Einfluß der Temperatur auf die Zugfestigkeit



Feuchtigkeitsaufnahme der Verstärkungsfasern

Viele Untersuchungen haben gezeigt, daß sowohl Glas- wie auch Kohlenstofffasern keine Feuchtigkeit aufnehmen, sondern im Laminat sogar eine Sperrwirkung gegenüber Wasserdampf haben.

Eine Ausnahme bilden die synthetischen Fasern, wie z.B. die **Aramide**. Ihre Feuchtigkeitsaufnahme kann ganz erheblich sein, abhängig vom Trocknungsgrad und der Faserart. Sehr unterschiedlich in Bezug auf die Faserachse sind auch ihre Quellungen. Messungen zeigen eine z.T. sehr hohe Quellung in radialer und eine Kontraktion in Achsrichtung.

In der nachfolgenden Tabelle sind eine Vielzahl von Meßergebnissen, auch für die neueren natürlichen Faserverstärkungen, zusammengefaßt. Die Messungen wurden entweder bei einer relativen Umgebungsfeuchte von 65 % vorgenommen oder auf diese Feuchte umgerechnet, da dieser Wert dem langzeitigen Feuchtgleichgewicht in unseren Breitengraden entspricht.

Vegetable fibres

Reinforcing materials of vegetable fibres are available primarily as non-wovens, but fabrics are also possible. In particular, high-quality **ramie fibre**, obtained from the subtropical Chinese grass plant, is gaining in importance. With respect to its weight-related strength, ramie fibre compares well with E glass fibre. When **biodegradable materials** must be used, the obvious question is how they resist external influences such as temperature, moisture, chemicals, radiation, or even microbes. This development is primarily targeting fields of application in which glass-fibre-reinforced polyester resins are still being used today. So the key target groups include, for example, trim finishers with supporting inserts in automobile manufacture, wagon building, and the furniture industry.

Heat resistance

A fibre composite's resistance to heat is defined in general by the resistance to heat exhibited by the (resin's) polymeric matrix and, over the long term, is no higher than 230 °C. For short periods, however, the temperature resistance can be very much higher. One good example is given by the heat shields for spacecraft, whose temperature resistance is based directly on the resin's **low thermal conduction**, a property that can be enhanced even further when the fibres are skilfully arranged in the optimal geometry (there must be no heat bridges!).

However, also the fibres exhibit different temperature resistances.

Aramid fibres suffer losses in strength at a raised ambient temperature in an inert atmosphere. The strength of **E glass fibres** starts to deteriorate at temperatures greater than 200 °C. Carbon fibres, however, remain immune to thermal effects up to 1000 °C.

Effects of temperature on tensile strength

Moisture absorption by reinforcing fibres

Many investigations have shown that both glass and carbon fibres do not absorb moisture. On the contrary, they even give rise to a barrier effect in the laminate against water vapour.

The exceptions are the synthetic fibres, e.g. the **aramids**. Their moisture absorption can be considerable, depending on the degree of drying and the type of fibre. Their swelling behaviour also differs along each of the fibre alignments. Measurements have shown that there is sometimes very great swelling in the radial and a contraction in the axial directions.

The following table summarises a great number of values measured on reinforcing fibres, including the more recent natural fibre reinforcements. The measurements were either taken in an environment of 65% relative humidity or afterwards modified to this value, which corresponds to the long-term stable humidity values typical of our latitude.

Maximale Feuchtigkeitsaufnahme üblicher Faserverstärkungen bei einer rel. Umgebungsfeuchte von 65 %

Max. moisture absorption by customary fibre reinforcements in an environment of 65% relative humidity

Produkt <i>Product</i>	max. Feuchte % <i>max. humidity %</i>
E-Glas / <i>E glass</i>	nicht messbar / <i>not measureable</i>
Kohlenstoff / <i>Carbon</i>	nicht messbar / <i>not measureable</i>
Kevlar® 49 (Aramid)	4,3
Twaron® T 1000 (Aramid)	7,0
	nicht messbar / <i>not measureable</i>
Dyneema® SK 60	10,0
Flachs / <i>Flax</i>	12,5
Jute	7,5
Ramie	8,0

Diese Werte können sehr viel höher sein, wenn eine **langzeitige** Umgebungsfeuchte von 100 % herrscht.

These values can be very much higher when the environment has a long-term relative humidity of 100%.

Strahlenbelastung

Die Strahlenbelastung von FVW wird bislang hauptsächlich unter gleichzeitiger Freibewitterung untersucht. Der Abbau (Alterung) erfolgt durch Molekülkettenbrüche, die durch Strahlungen vor allem im UV-B-Bereich (280- 315 nm) verursacht werden.

Insbesondere synthetische Fasern wie z.B. Aramid unterliegen, sofern sie nicht durch farbige Deckschichten/Lackierungen geschützt sind, einem rapiden **fotochemischen Abbau**. Die Restfestigkeit von Aramid kann innerhalb eines Jahres, je nach Strahlungsintensität, unter 25 % sinken.

Radiation resistance

The procedure primarily adopted to date for investigating the radiation resistance of fibre composites involves subjecting them to outdoor exposure. Degradation (ageing) sets in when the molecular chains start to break under the action of radiation, above all in the UV B range (280–315 nm). It is particularly the synthetic fibres such as aramid, provided they are not protected with coloured overlays or varnishes, that undergo rapid photochemical degradation. Depending on the radiation intensity, the residual strength of aramid can fall below 25% within a year.

Fasermischungen

Bei vielen Anwendungen kann auch eine Mischung unterschiedlicher Fasern vorteilhaft sein. Eine Fasermischung führt jedoch nicht immer zu besseren mechanischen Eigenschaften. Häufigste Ursache für Mißerfolge ist die Dehnungsunverträglichkeit der meisten Fasern. Werden z.B. Kohlenstoff- und Glasfasern zusammen verwendet, wird der Beginn des Versagens durch die C-Faserbrüche ausgelöst. Der Bruch erfaßt dann nach und nach alle C-Fasern, da nicht alle Fasern in einem Verbund der gleichen Spannung oder Dehnung unterliegen. Bei zunehmendem Übergang der Belastung auf die zweite Komponente (z.B. das E-Glas) wird auch diese überlastet und vorzeitig versagen.

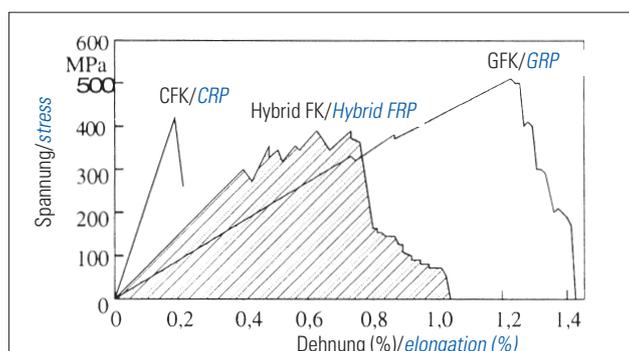
Fibre mixtures

Also a mixture of different fibre types can prove advantageous for many applications. However, a fibre mixture does not always lead to better mechanical properties: the most frequent cause of failure lies in the incompatible extensibility of most fibres. For example, when carbon and glass fibres are used together, mechanical failure will set in as soon as the carbon fibres start to break. Owing to the varying tensions and elongations of the fibres in a composite, mechanical failure gradually spreads to all carbon fibres. This means that an increasing proportion of the load is transferred to the second constituent (e.g. E glass), whereupon this becomes overloaded and also fails prematurely. The rule of mixtures can be used to calculate the overall rigidity for the elastic range only. For example, a glass-fibre-reinforced design can be effectively stiffened when carbon fibres are added. It must be noted at this point that this measure increases the rigidity only, and not the strength. Nevertheless, the hybrid composite's ultimate resilience is clearly higher. Glass or aramid fibres impart to the relatively brittle material carbon a considerably improved impact strength.

Nur im elastischen Bereich ergibt sich die Gesamtsteifigkeit aus der Mischungsregel. So kann z.B. eine Glasfaserkonstruktion durch Zumischung von Kohlenstofffasern wirkungsvoll versteift werden. Man kann aber nicht die **Festigkeit** erhöhen, sondern nur die **Steifigkeit**. Allerdings wird die Brucharbeitsaufnahme des Hybridverbundes deutlich ansteigen. Der relativ spröde Werkstoff Kohlenstoff erhält durch Glas- oder Aramidfasern eine erheblich verbesserte Schlagfestigkeit.

Spannungs-Verformungsverhalten von Hybridverstärkungen

Stress curve of hybrid reinforcements



Ausg./Ed. 06.09 Änderungen vorbehalten / Modifications reserved

	Einheit <i>Unit</i>	E-Glas <i>E glas</i>	Aramid, Hochmodul (HM) <i>Aramid, high modulus (HM)</i>	Kohlenstoff, Hochfeste Faser (HT) <i>Aramid, high tensile (HT) fibre</i>
Dichte <i>Density</i>	g/cm ³	2,6	1,45	1,78
Zugfestigkeit <i>Tensile strength</i>	MPa	3400	2880	3400
Elastizitätsmodul II <i>Modulus of elasticity II</i>	GPa	73	100	235
Elastizitätsmodul ⊥ <i>Modulus of elasticity ⊥</i>	GPa	73	5,4	15
Bruchdehnung <i>Elongation at break</i>	%	3,5	2,8	1,4
Wärmeausdehnungskoeffizient II <i>Coefficient of thermal expansion II</i>	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5	-3,5	-0,1
Wärmeausdehnungskoeffizient ⊥ <i>Coefficient of thermal expansion ⊥</i>	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5	17	10
Wärmeleitfähigkeit <i>Thermal conductivity</i>	W/m-K	1	0.04	17
spez. elektrischer Widerstand <i>Resistivity</i>	Ω·cm	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴
Feuchtigkeitsaufnahme 20 °C/65 % rel. Luftfeuchtigkeit <i>Moisture absorption 20 °C/65 % relative air humidity</i>	%	0,1	3,5	0,1

II Faserlängsrichtung ⊥ Faserquerrichtung
along the fibres transverse to the fibres

Glasfasern

E-Glasfaser ist das gebräuchlichste Verstärkungsmaterial für Faserverbundwerkstoffe; Glasfasern sind preisgünstig und besitzen ausgezeichnete mechanische, thermische, dielektrische und chemische Eigenschaften. Die Festigkeitseigenschaften entsprechen denen von Metallen (z.B. Alu-Legierungen), wobei das spezifische Gewicht niedriger ist, als das der Metalle. Die Steifigkeit (E-Modul) von Glaslaminaten ist gegenüber Metallen relativ niedrig, so daß bei einer steifigkeitsbezogenen Auslegung von Bauteilen durch die benötigte große Wandstärke der Gewichtsvorteil aufgehoben wird, es sei denn, man arbeitet mit einer leichtgewichtigen Sandwich-Kernlage aus Schaumstoff, Schaumvlies oder Aramidwaben. Glasfasern sind unbrennbar, temperaturbeständig bis ca. 400 °C und beständig gegen die meisten Chemikalien und Witterungseinflüsse. Maßgebend für die entsprechenden Eigenschaften des Laminates ist daher meist das Harz. Der Preis der Glasfasern ist verglichen mit anderen Verstärkungsfasern niedrig. Durch Behandlung der Gewebe mit Haftvermittlern (Finish) wird die Haftung besonders unter Feuchtigkeitseinfluß verbessert. Verbundwerkstoffe aus Glasfasern werden als **GFK** (Glasfaser-Kunststoff) bezeichnet.

Glass fibres

E glass fibre is the most commonly used reinforcing material for fibre composites: glass fibres are low-priced and exhibit outstanding mechanical, thermal, dielectric, and chemical properties. The physical properties correspond to those of metals (e.g. aluminium alloys), but the specific gravity is lower than that of metals. The rigidity (modulus of elasticity) of glass laminates is relatively low compared with metals, so that the thicker walls needed for a high-rigidity design negates the advantages gained from the lower weight. This does not apply where a lightweight sandwich core layer of foam, foamed non-woven, or aramid honeycombs is involved. Glass fibres are incombustible, temperature-resistant up to approx. 400 °C, and resistant to most chemicals and weathering. So in most cases it is the resin that is decisive for the design properties of the laminate. Compared with other reinforcing fibres, glass fibres are low-priced. Treating the fabrics with a coupling agent (finish) improves adhesion especially under the influence of moisture. Composites of glass fibres are designated **GRP**'s (glass-fibre-reinforced plastics).

Aramidfasern

Der Einsatz von Aramiden ist dann sinnvoll, wenn Gewichtsersparnis an erster Stelle steht. Weiterhin werden abrieb- und schlagbeanspruchte Teile (z.B. Schutz der Vorderkanten von Flugzeugleitwerken gegen Hagelschlag, Kajaks) aus aramidfaserverstärkten Kunststoffen gefertigt. Festigkeit und Steifigkeit sind etwas besser als bei E-Glas. Weitere Eigenschaften sind das gute Dämpfungsvermögen, die Nichtentflammbarkeit und die hervorragende chemische Beständigkeit.

Die Bearbeitung von Laminaten ist wegen der hohen Zähigkeit der Faser sehr schwierig. Zum Schneiden von Geweben sind Spezialwerkzeuge (Kevlarscheren) erforderlich.

Für technische Laminat, z.B. im Fahrzeug- und Flugzeugbau, wird hauptsächlich die **Hochmodulfaser Kevlar® 49** oder **Twaron® HM** eingesetzt.

Niedermodul-Aramidfasern (Kevlar® 29, Twaron® LM) besitzen ein hohes Arbeitsaufnahmevermögen und werden überwiegend für ballistische Hartlaminat sowie Splitter- und Kugelschutzwesten verwendet. Aramidfaserverbundwerkstoffe werden als **SFK** (Synthesefaserkunststoff) bezeichnet.

Kohlenstoffasern

Kohlenstoffasern weisen eine höhere Festigkeit und bedeutend höhere Steifigkeit auf als Glasfasern, das spezifische Gewicht von Laminaten ist etwas niedriger. Daher werden sie vor allem für steife Konstruktionen eingesetzt. Beispiel: Die Tragfläche eines Segelflugzeugs mit großer Spannweite würde in Glasfaserbauweise die Belastungen zwar aushalten, sich aber sehr stark durchbiegen. Durch Verwendung von Kohlenstoffasern werden die Durchbiegung und das Gewicht verringert.

Die Dauerfestigkeit bei dynamischer Belastung ist hervorragend, die Wärmeausdehnung von Laminaten wegen des negativen Ausdehnungskoeffizienten der Fasern sehr gering.

Wegen der höheren Schlagempfindlichkeit von Kohlefaserlaminaten sollten sie bei erhöhter Schlagbeanspruchung nicht eingesetzt oder durch Kombination mit Aramid geschützt werden (z.B. Hybridgewebe). Kohlefaserlaminat zeigen eine gute Strahlendurchlässigkeit (z.B. Röntgenstrahlen) und sind elektrisch leitend. Kohlefaserbundwerkstoffe werden als **CFK** (Carbonfaserkunststoff) bezeichnet.

Abreibgewebe (Nylon)

Beim Zusammenlaminierten oder Aufbringen weiterer Gewebelagen auf Laminate oder beim Kleben zweier Laminat müssen die Oberflächen fettfrei, sauber und aufgeraut sein. Dies erfolgt vielfach durch arbeits- und zeitaufwendiges Schleifen oder Sandstrahlen der entsprechenden Flächen, wobei die Stäube noch zusätzlich gesundheitliche Risiken mit sich bringen. Um die Laminatoberfläche vor Verschmutzung zu schützen und die Schleifkosten einzusparen, kann als letzte Lage ein Abreibgewebe aufgebracht werden. Abreibgewebe gehen keine Verbindung mit dem eigentlichen Laminat ein. Sie werden vor der Weiterverarbeitung vollständig entfernt. Um leichter zu erkennen, ob die Abreibgewebe entfernt wurden, sind sie mit roten Kennfäden ausgerüstet. Die nach dem Abreißen des Gewebes entstehende raue Oberfläche ist sauber und ohne weitere Behandlung zum Kleben und Laminierten geeignet.

Anwendungsbeispiele

- Schutz vor Verschmutzungen von Teilen und Klebeflächen jeder Art bis zur Weiterverarbeitung während der Lagerung und des Transportes.
- Herstellen von rutschfesten, rauen Standflächen, z.B. bei Surfboards, Segelbooten, Kühlcontainern.
- Im Vakuumverfahren als Abdeckung von tragenden Laminaten, damit die Saugschicht nicht mit dem Laminat verklebt.

Aramid fibres

The use of aramids is especially practical when top priority is given to weight savings. In addition, aramid-fibre-reinforced plastics are used to manufacture high-wearing and high-impact parts, e.g. for kayaks, for protecting the leading edges of tail units from hail, etc. Strength and rigidity are slightly better than E glass. Other properties include good damping capacity, non-flammability, and superior chemical resistance.

Aramid fibres are very tough, so processing the laminates proves highly difficult. Special tools (Kevlar® shears) are needed to cut the fabrics.

The chief materials for engineering laminates, e.g. for automobiles and aircraft, is either the **high modulus fibre Kevlar® 49** or **Twaron® HM**.

Low modulus aramid fibres (Kevlar® 29, Twaron® LM) exhibit a high energy absorption capacity and are used primarily for ballistic laminates as well as for shrapnel-proof and bulletproof vests. Aramid-fibre-reinforced composites are designated **SRPs** (synthetic-fibre-reinforced plastics).

Carbon fibres

Carbon fibres exhibit a higher strength and a significantly greater rigidity than glass fibres, and the specific gravity of the laminates is somewhat lower. For this reason, they are used primarily for rigid structures. For example, a glider with a large wingspan of GRPs is able to withstand the loads acting on it, but there would be severe bending of the wings. Using carbon fibres reduces both this bending and the weight.

Carbon fibres exhibit an outstanding fatigue limit under dynamic loading, and the fibres' negative coefficients of expansion mean that the thermal expansion of the laminates is very low.

Carbon-fibre laminates are more sensitive to impact and so should not be used for high-impact applications if they cannot be protected with an aramid constituent (e.g. hybrid fabric). Carbon-fibre laminates exhibit a good radiolucency (e.g. for X rays) and are electrically conducting. Carbon-fibre-reinforced composites are designated **CRPs** (carbon-fibre-reinforced plastics).

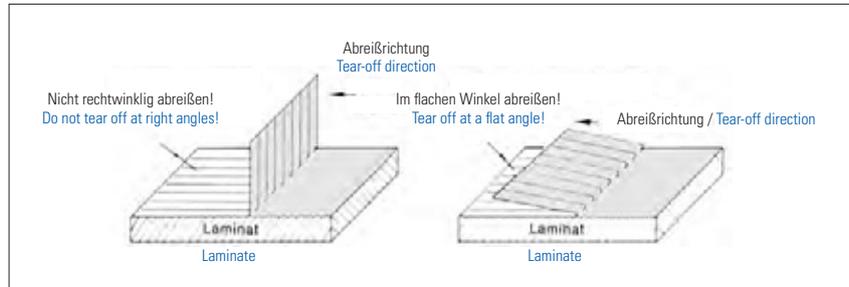
Tear-off fabrics (nylon)

Before several laminates are laid up, further fabric layers are applied to laminates, or two laminates are glued together, the surfaces must first be free of grease, clean, and roughened. In a great many cases, the affected surfaces must be subjected to work-intensive and time-consuming grinding or sandblasting, whereby the dust generated also poses additional risks to health. The surface of the laminate can be protected against soiling and the costs for grinding cut when a so-called tear-off fabric is applied as the last layer. Tear-off fabrics do not undergo bonding in any form with the actual laminate. They are completely removed before the next processing stage. Tear-off fabrics are manufactured with highly visible red marking threads, making it easier to see whether they have been removed. The rough surface exposed after the fabric has been torn off is clean and suitable for gluing and laminating without any further treatment.

Example applications

- Parts and all types of surfaces for gluing are protected from soiling during storage and transport until they are ready for the next processing stage.
- *Manufacture of non-slip, rough bases, e.g. for surfboards, sailing boats, refrigerated containers, etc.*
- *In vacuum moulding, cover for base laminates to prevent the absorbent coat from bonding with the laminate.*

- Schutz der UP-Harz-Oberfläche vor Luftsauerstoff, der die Polymerisation der Oberfläche behindert und klebrig erhält.
- Schutz der EP-Harz-Oberfläche, da bereits nach 24 h Verbundschwierigkeiten beim Kleben oder Aufbringen weiterer Gewebelagen auftreten können.
- Protects the surface of UP resin from atmospheric oxygen that suppresses or retards polymerisation of the surface, leaving it tacky.
- Protects the surface of EP resin because problems with bonding can occur before twenty-four hours have passed when subsequent fabric layers are glued on or otherwise applied.



Polyesterfasern (Diolen®)

Diolen® wird vor allem noch bei der Herstellung von Kajaks oder als Verschleißschicht bei Verbundwerkstoffen verwendet.
Vorteil: hohe Schlagzähigkeit bei niedriger Dichte, gute Chemikalienfestigkeit.
Nachteil: geringe Steifigkeit.

Keramische Fasern

Keramische Fasern wie z.B. **Nextel®** bestehen aus Metalloxiden. Neben sehr hoher Dauer-Temperaturbeständigkeit bis zu 1370 °C weisen diese Fasern einen hohen E-Modul auf.

Polyethylenfasern

Bekannt unter dem Markennamen **Dyneema®**.
Niedrigste Dichte aller Verstärkungsfasern, höchste spezifische Festigkeit (Verhältnis der Festigkeit zum Gewicht). Sehr gute Schlagzähigkeit, hohes Arbeitsaufnahmevermögen und hohe Zugfestigkeit.

Metallfäden

Dünne Fäden aus Stahl, Aluminium, Magnesium, Molybdän, Wolfram etc. haben gute mechanische Eigenschaften, insbesondere verbesserte Schlagzähigkeit und Verschleißfestigkeit und sind gute Strom- und Wärmeleiter. Mischgewebe aus Kohlenstoff bzw. Aramid und Metallfäden sind auf Anfrage lieferbar.

Asbestfasern

Asbest ist krebserregend und hat als Verstärkungsfaser **keine Bedeutung** mehr. Als **Ersatzwerkstoff** dienen z.B. Aramidfasern.

Naturfasern

Ein Faserverbundwerkstoff aus nachwachsenden Rohstoffen wie den Pflanzen-fasern Hanf, Jute, Sisal, Flachs, Ramie und Baumwolle kann nach Gebrauch über die Kompostierung in den Naturkreislauf zurückgeführt werden. Möglich ist dies nur in Verbindung mit **biologisch abbaubaren Matrixwerkstoffen**, die anstelle von Kunstharzen eingesetzt werden. Hier gibt es bereits Produkte auf Basis von Cellulosederivaten und Stärke.

Polyester fibres (Diolen®)

*Diolen® is still used primarily for the manufacture of kayaks or as a wearing surface for composites.
Advantages: high impact strength with low density, good chemical resistance.
Disadvantage: low rigidity.*

Ceramic fibres

*Ceramic fibres such as e.g. **Nextel®** consist of metal oxides. These fibres exhibit an extremely high long-term temperature resistance up to 1370 °C and a high modulus of elasticity.*

Polyethylene fibres

*These also appear under the well-known brand name **Dyneema®**.
They have the lowest density of all reinforcing fibres and the highest specific strength (ratio of strength to weight). Other properties include excellent impact strength, high energy absorption capacity, and high tensile strength.*

Metal threads

Thin threads of steel, aluminium, magnesium, molybdenum, tungsten, etc., exhibit good mechanical properties, in particular better impact strength and wear resistance, and are good conductors of electricity and heat. Hybrid fabrics of carbon or aramid and metal threads are available on request.

Asbestos fibres

*Asbestos is carcinogenic and has **lost all significance** as a reinforcing fibre. An **alternative** can be found, for example, in aramid fibres.*

Natural fibres

*A fibre composite of renewable raw materials such as the vegetable fibres hemp, jute, sisal, flax, ramie, and cotton can be composted after use and so reintroduced to the natural cycle. This is possible only in conjunction with **biodegradable matrix materials** that take the place of synthetic resins. Products based on cellulose derivatives and starch are now available.*



Motorrad mit einem Rahmen aus Faserverbundwerkstoffen aus der Fertigung der Firma CarboTech Composites GmbH, A-Salzburg

Motorcycle with a frame of fibre composites manufactured by the company CarboTech Composites GmbH in Salzburg, Austria

Festigkeitswerte von Gewebe-Laminaten

Mechanical properties of fabric laminates

		Glas ¹⁾ Glass ¹⁾	Kohlenstoff ²⁾ Carbon ²⁾	Aramid ²⁾ Aramid ²⁾
Zugfestigkeit / <i>Tensile strength</i>	³⁾	330 - 400	560 - 650	460 - 540
MPa (DIN EN 61)	⁴⁾	590 - 680	950 - 1100	790 - 900
E-Modul Zugversuch / <i>Tensile modulus</i>	³⁾	19 - 21	52 - 58	22 - 27
GPa (DIN EN 61)	⁴⁾	24 - 35	90 - 100	44 - 47
Druckfestigkeit / <i>Compressive strength</i>	³⁾	310 - 440	450 - 520	130 - 165
MPa (DIN 534554)	⁴⁾	480 - 600	600 - 800	180 - 190

1) Werte bezogen auf Faseranteil 43 Vol.-%

2) Werte bezogen auf Faseranteil 50 Vol.-%

3) Bidirektionale Gewebe (Kette und Schuß sind gleich). Die höheren Werte werden von Köper- und Atlasgeweben bei optimaler Laminatsqualität erreicht.

4) Unidirektionale Gewebe. Werte sind abhängig vom Kette-Schuss-Verhältnis.

1) Values based on 43% fibre volume fraction

2) Values based on 50% fibre volume fraction

3) Bidirectional fabric (warp and weft are equal). The higher values are obtained with twill and sateen at the optimal laminate quality

4) Unidirectional fabric. Values depend on proportion of warp to weft threads

Source: CS-Interglas

Quelle: CS-Interglas

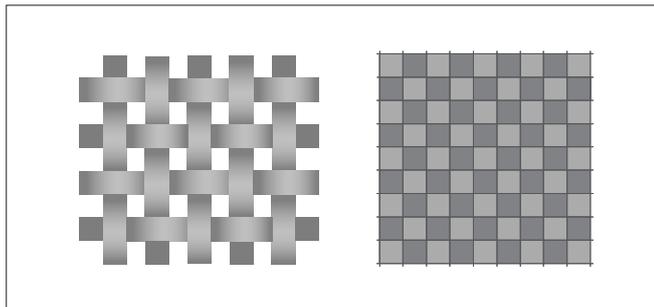
Die angegebenen Werte sind Richtwerte, ermittelt an Laminaten aus Gewebe und Epoxydharz. Sie sind abhängig von der Gewebekonstruktion, dem Harz und den Verarbeitungsbedingungen.

The above table lists recommended values based on laminates of fabric and epoxy resin. These values may vary depending on the fabric construction, the resin, and the processing conditions.

In Verbundwerkstoffen sind die Verstärkungsfasern in eine Kunstharzmatrix eingebettet. Die Verstärkungsfasern liegen häufig in Form von Geweben vor.

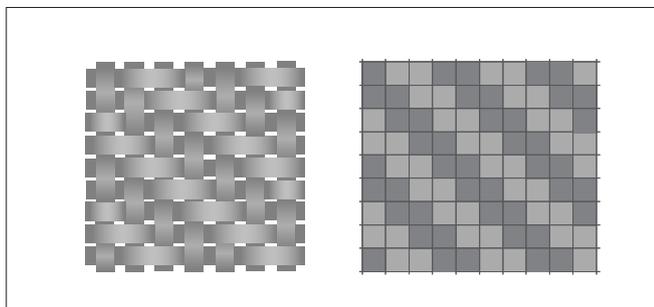
Gewebe sind durch die rechtwinkelige Verkreuzung der beiden Fadensysteme (Kette und Schuß) gekennzeichnet. Die Art und Weise, wie sich diese Fäden kreuzen, wird Bindung genannt. Zusammen mit der Einstellung (Anzahl der Fäden pro cm) und dem eingesetzten Faserstoff bestimmt die Bindung die Eigenschaften der Gewebe. Überwiegend werden die einfachen Grundbindungen wie **Leinwand**, **Köper** und **Atlas** angewandt.

Leinwand



Die einfachste Gewebebindung ist die Leinwandbindung (englisch: plain) mit der engsten Verkreuzung von Kette und Schuß. Durch die gleichmäßige Verkreuzung beider Fadensysteme entstehen zwei identische Warensseiten. Bindungsformel: L 1/1

Köper



Unter den Köperbindungen (englisch: twill) gibt es eine Vielzahl von Variationen.

Charakteristisch für die Köperbindungen sind die schrägen, parallel verlaufenden Linien (Köpergrat), die durch die Aneinanderreihung der Bindungspunkte (Kreuzungspunkte von Kette und Schuß) gebildet werden. Köperbindige Gewebe können, wie bei der Leinwandbindung, zwei gleiche Warensseiten aufweisen. Durch die Köperbindung entstehen Kräfte im Gewebe in Köpergratrichtung, die bei nicht ausgewogenem Laminataufbau zu Spannungen bis zum Verbiegen von Laminaten führen können. Um diese Kräfte aufzuheben, wird häufig die Kreuzköperbindung (englisch: crowfoot) verwendet, bei welcher sich die Köpergratrichtung ständig ändert. Bindungsformel: K 1/2, K 2/2, K 1/3.

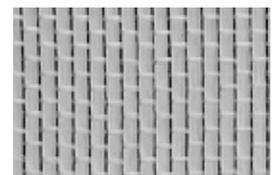
In fibre composites, the reinforcing fibres are embedded in a matrix of synthetic resin. These reinforcing fibres frequently come in the form of fabrics.

*A fabric is produced when two sets of threads (warp and weft) are interlaced at right angles to each other. The manner in which these threads are interlaced is called the weave. The weave, together with the thread count (number of threads per cm) and the material used for the fibres, determines the properties of the fabric. The three basic weaves **plain**, **twill**, and **satin** are the most common methods.*

Plain weave



Leinwand / Plain weave



Leinwand (kettverstärkt)

sog. unidirektionales Gewebe, Verhältnis Kette:Schuß z.B. 10:1
Plain weave (warp-reinforced)
so-called unidirectional fabric, warp-to-weft ratio e.g. 10:1

The simplest weave is the plain weave with the densest uniform interlacing of warp and weft. Both sides of the fabric are therefore identical. The nomenclature used for this weave is L1/1.

Twill weave



Köper / twill weave

Twill weaves come in a number of variations.

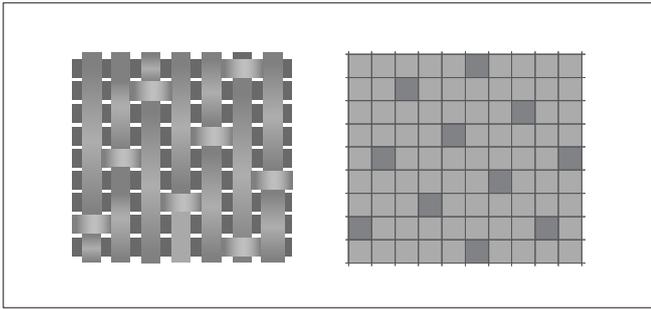
The characteristic features of twill weaves are the parallel diagonals or the twill lines that are formed by the arrangement of interlacing points (where the warp and weft cross).

Like plain weaves, both sides of twill-weave fabrics can be identical.

The twill weave generates forces in the fabric that act along the twill lines. These forces can give rise to tension in the laminates strong enough to bend them when they have not been laid up uniformly. A frequent measure adopted to counteract these forces is the use of the cross twill weave, in which the twill lines constantly change direction.

Nomenclatures for this weave: 1/2, 2/2, 1/3.

Atlas



Für Verbundwerkstoffe werden nur zwei Grundformen des Atlas (englisch: satin) angewandt. Um diese Gewebebindungen herstellen zu können, benötigt der Weber mindestens 5 bzw. 8 Schäfte (englisch: harness). Daher wird im englischen Sprachraum auch von "five" bzw. "eight harness satin" gesprochen. Die Bindungspunkte berühren sich nicht mehr wie bei der Leinwand- und Köperbindung, sondern liegen entsprechend einer bestimmten Ordnung im Bindungsrapport verteilt. Auf der rechten Gewebeseite sind 80 % der Kettfäden und nur 20 % der Schußfäden sichtbar, wohingegen auf der linken Gewebeseite 80 % der Schußfäden und nur 20 % der Kettfäden sichtbar sind (5-bindiger Atlas).

Bei dem 8-bindigen Atlas ist das Verhältnis entsprechend:

87,5 % : 12,5 %. Bindungsformel: A 1/4, A 1/7.

Text nach Focus 1/90 Akzo, Wuppertal

Verformbarkeit

Wie eingangs erwähnt, bestimmt neben der Faserart und der Fadendichte die **Bindung** des Gewebes die wesentlichen Eigenschaften und damit das Anwendungsgebiet des Gewebes.

Aufgrund der häufigen Fadenverkreuzung ist die **Schiebefestigkeit** eines Gewebes allgemein bei einer Leinwandbindung größer als bei Geweben mit Köper oder Atlasbindung. Die Handhabung im nicht imprägnierten Zustand ist daher wesentlich einfacher. Fadenverschiebungen, die zur Leistungsminderung im Verbundwerkstoff führen, treten kaum auf.

Schiebefestigkeit / Handhabung:

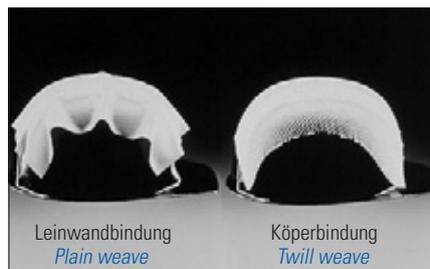
Leinwand → Köper → Atlas

Eine häufige Fadenverkreuzung führt aber zu einer schlechteren Drapierfähigkeit (Verformbarkeit) des Gewebes bzw. des Prepregs. Konturen lassen sich daher besser mit einem 8-bindigen Atlas als mit einem leinwandbindigen Gewebe gestalten. Auch führt die häufige Fadenverkreuzung bei einer Leinwandbindung zu vielen Abweichungen der Kett- und Schußfäden von der geraden Garnachse. Die Garne liegen wellenförmig im Gewebe, was die Ausnutzung der Garnzug- und Druckfestigkeit im Verbundwerkstoff leicht reduziert.

Zusammenfassung

Abschließend kann man sagen, daß die **Leinwandbindung** für **Flachlaminat** oder für unkomplizierte Formteile geeignet ist.

Für **kompliziertere Geometrien** eignen sich die drapierfähigen **Köper- oder Atlasbindungen** meist besser. Zudem weisen sie weniger Fadenverkreuzungen auf und ergeben somit im Laminat höhere Festigkeiten.



Drapierbarkeit von Geweben unterschiedlicher Bindung

Drapability of various weaves

Satin weave



Atlas / Satin weave

Only two basic forms of satin weave are used for composites. A satin weave must have at least five or eight harnesses (hence the designations five or eight harness satin respectively). The interlacing points are no longer in contact as in the plain and twill weaves, but lie distributed over the weave repeat in a predefined pattern. The right side of the fabric exposes 80 % of the warps and only 20 % of the wefts, whereas this is 80 % of the wefts and 20 % of the warps on the left side (five harness satin).

The proportion for eight harness satin is as 87.5 % : 12.5 %. Nomenclatures: A1/4, A1/7.

Based on issue 1/90 of Focus Akzo, Wuppertal

Deformability

*As mentioned earlier, not only the type of fibre and the thread count, but also the **weave** adopted for the fabric define the essential properties and therefore the range of applications for a fabric.*

*Owing to the higher density of thread crossovers, the **slippage resistance** exhibited by a fabric is generally greater with a plain weave than with twill or satin weaves. Handling these fabrics is considerably easier before they have been impregnated: there is scarcely any slippage that can lead to a deterioration in the performance of a composite*

Slippage resistance / handling:

plain → twill → satin

On the other hand, a high density of thread crossovers means that the fabric or prepreg does not drape (deform) well. So an eight harness satin is better suited for forming contours than a plain-weave fabric.

In addition, the high density of thread crossovers in a plain weave forces the wefts and warps to deviate from the straight: the result is waving in the fabric that slightly reduces the thread's utilisable tensile and compressive strengths in the composite.

Summary

*In conclusion we can say that the **plain weave** is suitable for **flat laminates** and for simple moulded parts.*

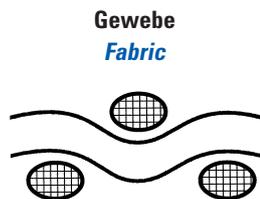
*For **complex geometries**, the drapable **twill or satin weaves** are in most cases the better choice. In addition, they exhibit a low density of thread crossovers and so give rise to higher strengths in the laminate.*

Neue Produkte

Neben textilen Geweben in Leinwand-, Köper- und Atlasbindung haben sich seit einigen Jahren auch **Spezialprodukte** z.B. für den Schiffbau, Windkraftflügel und Sportgerätebau etabliert. Zu ihnen zählen folgende, von R&G angebotene Verstärkungsmaterialien:

- Unidirektionale Gelege
- Biaxiale Gelege

Die Fasern werden in diesen Gelegen nicht miteinander verwebt, sondern durch ein Haftfadengitter oder einen Nähfaden gehalten. Die einzelnen Fasern liegen flach, gerade und parallel und können so exakt in Lastrichtung verlegt werden. Damit ergeben sich saubere Kraftverläufe, die denen keine Knickbrüche auftreten können, wie man sie von gewebten Produkten kennt. Die einzelne Faser erbringt ihre optimale Festigkeit.

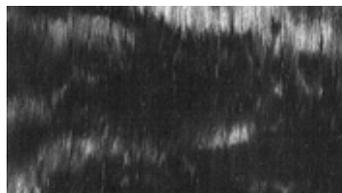
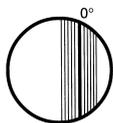


welliger Faserverlauf / *Fabric wavy fibre alignment*
erhöhter Harzanteil an den Fadenverkreuzungen /
higher resin fraction at the thread crossovers

Zusätzlich ergeben sich höhere Faseranteile mit folgenden Vorteilen:

- Mehr Festigkeit und Steifigkeit
- Bessere Schlagfestigkeit
- Weniger Ermüdungsbrüche
- Geringere Härtungsschwindung
- Harzersparnis

Bei den Biaxialgelegen sind zwei Lagen im Winkel von $\pm 45^\circ$ verlegt, so daß es sehr einfach ist, Torsionslagen z.B. für Propeller, Bootsrümpfe etc. zu verarbeiten. Das mühselige und unökonomische Schneiden diagonalen Lagen entfällt.



Vollkommen flach liegendes Kohle-Unidirektional-Gelege
Unidirectional carbon inlay lying perfectly flat.

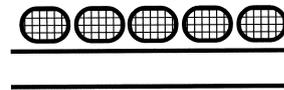
New products

In addition to the plain-, twill-, and satin-weave textiles, also **special products** have become established for some years now, e.g. for shipbuilding, wind turbine blades, and sports equipment. These products include the following reinforcing materials that are also available from R&G:

- Unidirectional inlays
- Biaxial inlays

In these prepregs, the fibres are not woven together, but are secured on an anchoring "grid" or with a sewing thread. Each of the fibres lies flat, straight, and parallel and so can be laid exactly in the direction of the applied loads. Hence forces are transferred without hindrance and without the kinking usually associated with woven products. Each fibre exhibits its optimal strength.

UD-Gelege $0^\circ / 90^\circ$ Unidirectional inlay $0^\circ / 90^\circ$

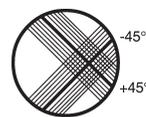


gestreckter Faserverlauf / *straight fibre alignment*
keine Fadenverkreuzungen / *no thread crossovers*
geringerer Harzanteil / *lower resin fraction*

In addition, the fibre volume fractions are higher, resulting in the following advantages:

- Greater strength and rigidity
- Improved impact strength
- Fewer fatigue fractures
- Lower curing shrinkage
- Lower resin consumption

In biaxial inlays, two plies are placed on top of each other at a relative angle of $\pm 45^\circ$. These inlays simplify greatly the processing of torsion plies, e.g. for propellers, hulls, etc.: the laborious and uneconomical cutting of diagonal plies no longer applies.



Vollkommen flach liegendes Kohle-Biaxial-Gelege
Biaxial carbon inlay lying perfectly flat.

Weitere Produkte

Neben den Geweben sind auch Vliese und Matten (überwiegend aus E-Glas), Faserstränge (Rovings), Bänder, Schläuche und Litzen, geschnittene und pulverisierte Fasern erhältlich.

Other products

Also available besides fabrics are non-wovens and mats (primarily of E glass), rovings, tapes, tubes, strands, and chopped and pulverised fibres.

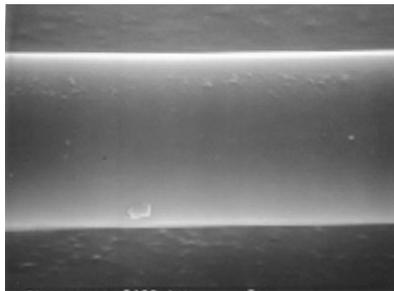
GLASFASERN

Glasfasern aus E-Glas sind der am weitesten verbreitete Verstärkungswerkstoff. Die Festigkeitseigenschaften entsprechen denen von Metallen (z.B. Alu-Legierungen), wobei das **spezifische Gewicht** von **Laminaten** niedriger ist, als das der Metalle. E-Glasfasern sind unbrennbar, hitzefest bis ca. 400 °C und beständig gegen die meisten Chemikalien und Witterungseinflüsse.

Herstellung

Glasfasern werden im Schmelzspinnverfahren (Düsenzieh-, Stabzieh- und Düsenblasverfahren) hergestellt. **Düsenziehverfahren:** unter Ausnutzung der Schwerkraft fließt die heiße Glasmasse durch hunderte Düsenbohrungen einer Platinspinningplatte. Die Elementarfäden können in unbegrenzter Länge mit einer Geschwindigkeit von 3 - 4 km/Minute gezogen werden.

REM-Aufnahme eines Elementarfadens aus E-Glas



SEM photograph showing a continuous fibre of E glass

Das an sich spröde Glas besitzt, zu einem dünnen Faden ausgezogen, eine hohe Flexibilität und Bruchsicherheit. Die Elementarfäden haben einen Titer (Durchmesser) von ca. 9 - 15 µm und ergeben, zu 100 oder mehr gebündelt und mit einer Schutzdrehung versehen, das Filamentgarn, das zu **Glasfilamentgeweben** (früher Glasseidengeweben) weiterverarbeitet wird.

Glassorten

- **E-Glas**, das **meistverwendete** Material mit optimalem Preis-Leistungsverhältnis
- **R, S-Glas**, für erhöhte mechanische Anforderungen
- **D-Glas**, Borsilicatglas für erhöhte elektrische Anforderungen
- **C-Glas**, mit erhöhter chemischer Widerstandsfähigkeit
- **Quarzglas**, mit hoher Temperaturbeständigkeit

Die Sorten R, S, D, C- und Quarzglas sind teils erheblich teurer als E-Glas und nur in größeren Mengen bzw. als Sonderanfertigung erhältlich.

E-Glas

Für die Kunststoffverstärkung haben **E-Glasfasern** die **größte Bedeutung** erlangt. **E** steht für **Elektro-Glas**, da es ursprünglich vor allem in der Elektroindustrie eingesetzt wurde.

Für die Produktion von E-Glas werden Glasschmelzen aus reinem Quarz mit Zusätzen aus Kalkstein, Kaolin und Borsäure hergestellt. Sie enthalten neben SiO₂ (Siliciumdioxid) unterschiedliche Mengen verschiedener Metalloxide. Die Zusammensetzung bestimmt die Eigenschaften der Produkte.

R&G liefert ab Lager nur E-Glas-Produkte. Gewebe aus anderen Glassorten werden auftragsbezogen gefertigt.

GLASS FIBRES

Glass fibres manufactured from E glass are the most common reinforcing material. The physical properties correspond to those of metals (e.g. aluminium alloys), but the **specific gravity** of the **laminates** is lower than that of metals. E glass fibres are incombustible, temperature-resistant up to approx. 400 °C, and resistant to most chemicals and weathering.

Manufacture

Glass fibres are manufactured with the melt spinning method (mechanical drawing, drawn-rod method, and jet process).

Mechanical drawing The hot glass mass flows under the effects of gravity through hundreds of nozzle holes in a platinum spinning plate. These continuous fibres can be drawn indefinitely at a speed of three to four kilometres a minute.

Drawn out to a thin filament, the glass, otherwise a brittle material, exhibits a high degree of flexibility and fracture strength. The continuous fibres have a so-called titre (in this case diameter) of approx. 9 - 15 µm and, when one hundred or more of them are bundled and secured in a twisted state, yield the filament yarn that is processed to make **glass filament fabrics** (formerly called glass silk fabrics).

Glass types

- **E glass**, the **most frequently used** material with the optimal price-performance ratio
- **R, S glass**, for greater demands on mechanical properties
- **D glass**, borosilicate glass for greater demands on electrical properties
- **C glass**, with greater resistance to chemical attack
- **Quartz glass**, with high temperature resistance

In some cases, the types R, S, D, C, and quartz glass are considerably more expensive than E glass and available only in larger quantities or as special batches.

E glass

E glass fibres have gained **the greatest in significance** as a reinforcing material for plastics. The **E** stands for "**e**lectro", a reminder that this glass was originally used primarily by the electrical engineering industries.

For the production of E glass, the glass melt is manufactured from pure quartz to which limestone, kaolin, and boric acid are added. In addition to SiO₂ (silica) it also contains different quantities of various metal oxides. The composition determines the properties of the products.

R&G delivers only E glass products ex warehouse. Fabrics of other glass types are manufactured on a job-oriented basis.

Thermische Eigenschaften

Textilglas ist unbrennbar. Werden jedoch Gewebe mit organischen Mitteln ausgerüstet, so wird das Brandverhalten verändert. Es muß dann die Brennbarkeitsbeurteilung am Endprodukt erfolgen. Textilglasgewebe haben eine hohe Restfestigkeit nach Temperaturbeaufschlagung. Restzugfestigkeit von Geweben aus E-Glas nach 24-stündiger Lagerung bei:

°C	bis / max.200	200	300	400	500	600	700
%	100	98	82	65	46	14	---

Chemische Eigenschaften

Glas ist gegen Öle, Fette und Lösungsmittel beständig und zeigt eine gute Beständigkeit gegen Säuren und Laugen bis zu pH-Werten von 3 - 9. Säuren lösen bestimmte Atome aus der Glasoberfläche heraus, was zu einer Versprödung führt. Laugen tragen die Glasoberfläche langsam ab.

Festigkeitsverlust in % nach 30 Tagen Einwirkzeit:

Loss in strength in % after thirty days' application time:

Medium / <i>Medium</i>	E-Glas / <i>E glass</i>
Essigsäure / <i>Acetic acid</i>	bis 15 % / max 15 %
Salpetersäure / <i>Nitric acid</i>	< 30 %
Salzsäure / <i>Hydrochloric acid</i>	15 - 30 %
Schwefelsäure / <i>Sulphuric acid</i>	< 30 %
Ammoniak / <i>Ammonia</i>	15 - 30 %
Natronlauge / <i>Sodium hydroxide solution</i>	< 30 %
Chlorwasserstoff (nach 30 min.) / <i>Hydrogen chloride (after 30 min)</i>	25 %

Glasfilamentgewebe

Beim Weben sind die in der Textiltechnik üblichen Bindungsarten möglich, meistens Leinwand, Köper und Atlas. Die Eigenschaften werden von der Bindungsart, Garnfeinheit und Einstellung (Fadenzahl/cm) bestimmt.

Alle Gewebe für die Kunststoffverstärkung sind mit speziellen Haftvermittlern imprägniert:

Silangewebe besitzen eine gute Festigkeit; sie eignen sich für Polyester- und Epoxydharze.

Gefinischte Gewebe sind mit modifizierten Silanschichten (z.B. Finish FK 144) ausgerüstet. Sie fühlen sich leicht klebrig an, **tränken** sich schnell mit Harz, sind **sehr anschmiegsam** und fransen beim Schneiden kaum aus.

R&G führt gefinischte Markengewebe von **Interglas-Technologies**. Die meisten Produkte sind nach den Werkstoffleistungsblättern (WLB) für den Bau von Flugzeugen qualifiziert. Als Matrix wird hauptsächlich Epoxydharz verwendet. Gute Festigkeitswerte können jedoch auch mit Polyester-, Vinylester- und Phenolharzen erreicht werden.

Chemical properties

Textile glass is incombustible. However, the organic agents used in finishing fabrics change this burning behaviour. Combustibility must then be assessed on the end product. Glass textiles have a high residual strength after high temperatures have been applied.

The table below lists the residual tensile strengths of E glass fabrics against temperature after twenty-four hours in storage:

Chemical properties

Glass is resistant to oils, greases, and solvents and exhibits good resistance to acids and alkalis with pH values from 3 to 9. Acids dissolve certain atoms out of the glass surface, causing it to embrittle. Alkalis slowly eat away the glass surface.

Glass filament fabrics

Glass filament fabrics can be manufactured with the weave types usual in textile technologies, in most cases plain, twill, and satin.

The properties are determined by the weave type, the yarn number, and the yarn count (number of threads per cm).

All fabrics for reinforcing plastics are impregnated with special coupling agents.

Silane fabrics exhibit a good strength and are suitable for polyester and epoxy resins.

Finished fabrics have been treated with modified silane sizes (e.g. the finish FK 144). They feel slightly tacky, become quickly impregnated with resin, are very **soft and smooth**, and scarcely fray when cut.

R&G stocks finished brand fabrics from **Interglas-Technologies**. Most products have been approved in accordance with the WLB (Werkstoffleistungsblatt, or the German material specifications sheets for the aircraft construction industries). Epoxy resin is the material predominantly used for the matrix. But good mechanical properties can also be obtained with polyester, vinyl ester, and phenolic resins.



Warum gefinishte Glasgewebe?

Glasfilamentgarne werden vom Faserhersteller mit einer Textilschichte versehen, um das Garn während der Verarbeitungsprozesse (Zetteln, Weben) zu schützen. Diese Schichte besteht aus Stärke und Ölen und wirkt einer Haftung zwischen Faser und Harz entgegen.

Um eine gute Haftung zu erreichen, wird die Textilschichte von CS-Interglas-Geweben entfernt und das Gewebe nachfolgend mit einem Haftvermittler (Finish) beschichtet. Bei den Haftvermittlern handelt es sich meist um modifizierte Silane, die an das Matrixmaterial angepaßt wurden. Die Verarbeitungseigenschaften der Gewebe wie Drapierbarkeit und Tränkverhalten werden in einem zweiten Finish-Prozess nochmals deutlich verbessert.

Einen Kompromiß zwischen Textilschichte und Finish stellt die Silanschichte dar. Der Faden ist hierbei mit einer Schichte versehen, die haftvermittelndes Silan sowie Gleit- und Schmiermittel als Verarbeitungshilfe enthält. Die Eigenschaften in den textilen Prozessen sind zwar schlechter als diejenigen der Textilschichte, jedoch erübrigt sich eine Nachbehandlung nach dem Weben.

Verarbeitung

Gefinishte Gewebe sind weicher und geschmeidiger. Beim Laminieren ist die Trängung besser und die Tränggeschwindigkeit bedeutend höher. **Glasklare Lamine** sind daher nur mit gefinigsten Geweben zu erreichen.

Festigkeitseigenschaften

Die Haftung der gefinigsten Gewebe am Harz ist besser als die von Geweben mit Silanschichte und bedeutend besser als die von Geweben mit Textilschichte, besonders nach der Einwirkung von Feuchtigkeit. Eine Trübung von Laminaten aus textilgeschichteten und silangeschichteten Geweben unter Feuchtigkeitseinwirkung verdeutlicht die gestörte Haftung. Ein Maß für die Güte der Haftung ist die interlaminae Scherfestigkeit (ILS). Aber nicht nur die Scherfestigkeit, sondern auch die Zugfestigkeit wird von der Haftung beeinflusst, da die Verteilung einer eingeleiteten Zugkraft auf die Einzelfasern Schubkräfte verursacht. Die Zugfestigkeit von Silangeweben ist etwas besser (ohne Feuchtigkeit) als bei gefinigsten Geweben.

Zusammenfassung

Lamine aus gefinigsten Geweben sind in Zugfestigkeit und interlaminae Scherfestigkeit Laminaten aus Geweben mit Textilschichte deutlich überlegen. Insbesondere zeigt sich die Überlegenheit in der interlaminae Scherfestigkeit, die nicht nur die Haftung der einzelnen Gewebelagen untereinander bewertet, sondern auch eine Kennzahl für die Lebensdauer unter Belastung darstellt. Die etwas bessere Zugfestigkeit von Laminaten aus silangeschichteten Geweben ist in der Praxis meist ohne Bedeutung, da reine Zugbeanspruchung nur selten auftritt und ein Versagen sehr oft durch Delamination und Feuchtigkeitseinflüsse entsteht.

Gefärbte / metallisierte Garne

Durch eine spezielle Oberflächenbehandlung lassen sich Glasfasern „einfärben“. R&G liefert standardmäßig einige schwarz eingefärbte Glasgewebetypen, die sich kostensparend als zweite Schicht für Kohlefaser-Sichtlamine (Carbon-Design) verwenden lassen. Eine weitere Designvariante sind metallisierte Oberflächen.

Rovings

Textilglasrovings bestehen aus einem oder aus einer bestimmten Anzahl fast parallel liegender Glasspinnfäden, die ohne Drehung zu einem Strang zusammengefaßt sind. Rovings werden zu Rovinggeweben, geschnittenem Textilglas (Glasfaserschnitteln), Matten und Kurzfasern weiterverarbeitet. Bei verschiedenen Herstellungsverfahren, z.B. beim Wickeln und Profiliziehen (Strangziehen) werden Rovings direkt als Verstärkung verwendet. Besondere Bedeutung haben die aus Textilglasrovings gefertigten **Rovinggewebe**. Mit ihnen lassen sich dicke Formteile (z.B. im Formenbau) aus wenigen Lagen herstellen. Der Fasergehalt und die Festigkeit ist weitaus höher als bei Mattenlaminaten, jedoch geringer als bei Glasfilamentgeweben.

Why finished glass fabrics?

The manufacturers of fibres treat their glass filament yarns with a textile size that serves to protect the yarn during the manufacturing processes (warping, weaving). This size is a mixture of starch and oils and counteracts adhesion between the fibres and the resin.

So that good adhesion is again made possible, the textile size is removed from the CS-Interglas fabrics, and the fabric subsequently coated with a coupling agent (the finish). In most cases these coupling agents are silanes that have been adapted to the respective matrix materials. The fabric's processing properties such as drapability and impregnating behaviour are given a further boost in a second finishing process.

A compromise between textile size and finish takes the form of silane sizes. Here, the fibre is treated with a size that contains a silane coupling agent as well as various lubricants to aid processing. Although the properties obtained with silane sizes are not as good as those with textile sizes, the fibres do not require post-treatment after weaving.

Processing

*Finished fabrics are softer and smoother and drape more readily. The laminates undergo better impregnation, and the rate of impregnation is considerably higher. **Transparent laminates**, therefore, are possible only with finished fabrics.*

Physical properties

Finished fabrics adhere better to resin than fabrics treated with a silane size and significantly better than fabrics treated with a textile size, in particular after the effects of moisture. Impaired adhesion is clearly indicated by the turbidity that the effects of moisture induce in laminates laid up with textile- or silane-sized fabrics. A measure of adhesive quality is the so-called interlaminar shear strength or ILS. However, the distribution of a tensile force applied to the fibres also gives rise to shear forces, so adhesion directly affects the tensile strength as well. Silane fabrics exhibit a somewhat higher tensile strength (without moisture) than finished fabrics.

Summary

The tensile strength and interlaminar shear strength of laminates laid up with finished fabrics are clearly superior to those of laminates made with textile-sized fabrics. This superiority is particularly evident in the interlaminar shear strength, which not only is an indication of the individual fabric layer's adhesion to each other, but also functions as a characteristic value for the service life under load. In practice, the somewhat higher tensile strength of laminates made with silane-sized fabrics is mostly of very little, if any significance because pure tensile stress occurs but seldom, and failure is often induced by delamination and the effects of moisture.

Coloured / metallised yarns

Glass fibres can be "coloured" in a special surface treatment. R&G supplies as standard a number of glass fibre types that are a cost-cutting alternative as a second ply for carbon designs. A further design variant is obtained with metallised surfaces.

Rovings

Textile glass rovings consist of one or a certain number of glass strands aligned almost parallel and bundled to form a twist-free cable. Rovings are processed to make roving fabrics, chopped textile glass (chopped glass fibre strands), mats, and chopped strands. In a number of manufacturing methods, e.g. winding and pultrusion, rovings are used directly as the reinforcing material.

***Roving fabrics** made from textile glass rovings are of particular importance. With these, thick mould parts (e.g. in mould construction) can be made with few plies. Both the fibre content and the strength are greater by far than those of mat laminates, but lower than those of glass filament fabrics.*

Faserspritzroving zerfallen nach dem Schneiden sofort in Einzelfäden. Rovings zum **Wickeln** und **Handlaminieren** (R&G Glasroving 2400 tex) sind wesentlich feiner und besitzen einen besseren Zusammenhalt.

Textilglasmatten

Textilglasmatten zum Handlaminieren entstehen durch regelloses Schichten von geschnittenen Glasspinnfäden (Schnittmatte). Sie werden durch einen **Binder** verklebt, der sich im **Styrol** des **Polyester-** oder **Vinylesterharzes** löst, so daß die Fasern frei verschiebbar im Harz schwimmen. In anderen Harzen (EP) bleibt die Matte völlig steif.

Geschnittenes Textilglas

Glasrovings werden zur Verarbeitung in Füll- und Preßmassen in verschiedene Längen geschnitten. R&G führt ab Lager die Längen 3 und 6 mm.

Textilglas-Kurzfasern sind auf Längen unter 1 mm zerkleinerte Glasspinnfäden, die in Einzelfasern aufgespalten sind. R&G führt ab Lager eine **gemahlene Glasfaser** mit 0,2 mm Länge.

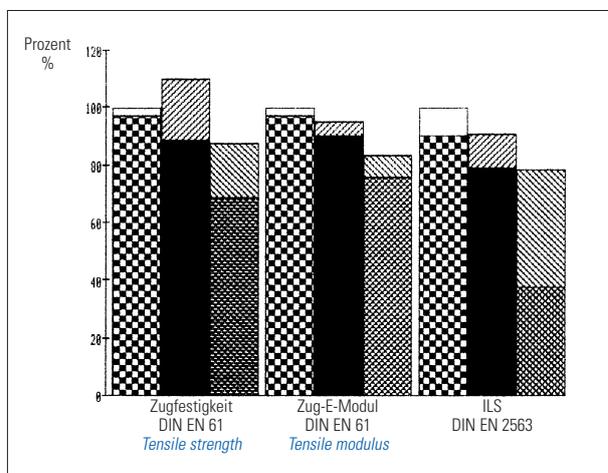
Toxizität und Lagerung

Glasgewebe enthalten keine gesundheitsgefährdenden oder giftigen Stoffe. Aufgrund der Filamentdurchmesser (größer als 4 µm) und der chemischen Struktur des Glases treten nach bisherigen Erkenntnissen keine cancerogenen Wirkungen auf. Die maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration von Glasstaub beträgt 6 mg/m³ (Feinstaub). Bei Transport und Lagerung von Glasgeweben treten keine Gefährdungen auf. Glasgewebe sind gem. Gefahrstoffverordnung nicht kennzeichnungspflichtig, es tritt bei Lagerung und Versand keinerlei Gefährdung von Personen und Umwelt auf. Auch bei höheren Temperaturen zerfällt Glas nicht in toxische Bestandteile und ist daher auch im Brandfall ungefährlich.

Bei der Lagerung von Glasfaserverstärkungen muß bedacht werden, daß die Schlichte feuchtigkeitsempfindlich ist. Trockene, nicht zu kühle Räume sind für eine Aufbewahrung am besten geeignet.

Bei Lagerung in zu kalten Räumen schlägt sich, wenn das Verstärkungsmaterial in warme Arbeitsräume gebracht wird, der in der warmen Luft enthaltene Wasserdampf nieder. In diesem Fall sollte das Glasfasermaterial vorsichtshalber mindestens 8 Stunden vor der Verarbeitung in der Werkstatt gelagert werden.

Festigkeitsverhältnis von Laminaten aus Geweben mit Textilschlichte/Silanschlichte/Finish



Spray-up rovings immediately unravel into their individual fibres after being cut. Rovings for **winding** and **hand lay-up operations** (R&G glass roving 2400 tex) are essentially finer and exhibit better coherence.

Textile glass mats

Textile glass mats for hand lay-up operations are the result when chopped glass strands are layered at random (chopped-strand mat). These strands are then "glued" together with a **binder** that **dissolves in the styrene content** of the polyester or vinyl ester resin: the fibres are suspended in the resin and can be freely displaced. With other resins (EP), the mat remains completely rigid.

Chopped textile glass

Glass rovings are cut to various lengths for processing in filling and moulding compounds. R&G stocks the lengths 4.5 and 6 mm.

Milled glass fibres are glass strands that have been milled to lengths under 1 mm and split into their individual fibres.

R&G stocks **milled glass fibres** with lengths of 0.2 mm.

Toxicity and storage

Glass fabrics do not contain any substances either toxic or otherwise prejudicial to health. According to the latest findings, the filaments' diameter (greater than 4 µm) and the chemical structure of the glass do not have any carcinogenic effects. The maximum permitted workplace concentration of glass dust is 6 mg/m³ (fine dust). There are no risks involved with the transport and storage of glass fabrics. The Gefahrstoffverordnung [toxic chemicals ordinance] specifies that glass fabrics do not need to be labelled: their storage or transport does not give rise to any risks for persons or the environment. Also at higher temperatures, glass does not degrade into toxic constituents and is therefore safe in case of fire.

It must be borne in mind when glass fibre reinforcements are stored that the size is hygroscopic. Dry rooms that are not too cool are the best storage sites.

When the storage room is too cold and the reinforcing material is then brought into warm working areas, the water vapour that the warm air carries will precipitate. As a precaution, the glass fibres should be stored for at least eight hours at the working area before they are processed.

Comparison of strengths between laminates of textile-sized, silane-sized, and finished fabrics

Trockene Laminate

Nach dem Härten 24 Std
Lagerung bei Normaltemperatur
(23 °C, 50% Luftfeuchtigkeit)

Nasse Laminate

Nach dem Härten 2 Std in destilliertem
Wasser kochen

Dry laminates

After curing, store for 24 hr
in standard conditions
(23 °C, 50% r.h.)

Wet laminates

After curing, boil for 2 hr
in distilled water

- Finish I 550 trocken / Finish I 550 dry
- ▣ Finish I 550 nass / Finish I 550 wet
- ▨ Silane trocken / Silane dry
- Silane nass / Silane wet
- ▩ TS trocken / TS dry
- ▧ TS nass / TS wet

Daten der E-Glasfaser

Specifications of E glass fibres

Eigenschaften E-Glas / <i>Properties</i>	Einheit / <i>Unit</i>	E-Glas / <i>E glass</i>
Dichte / <i>Density</i>	g/cm ³ /20 °C	2.6
Zugfestigkeit / <i>Tensile strength</i>	MPa	3400
E-Modul / <i>Modulus of elasticity</i>	GPa	73
Bruchdehnung / <i>Elongation at break</i>	%	3.5 - 4
Querkontraktionszahl / <i>Poisson ratio</i>	—	0.18
Spez. elektrischer Widerstand / <i>Resistivity</i>	Ω·cm / 20 °C	10 ¹⁵
Dielektrizitätskonstante / <i>Dielectric constant</i>	10 ⁶ Hz	5.8 - 6.7
Therm. Ausdehnungskoeffizient / <i>Coefficient of thermal expansion</i>	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5

Chemische Zusammensetzung (Richtwerte) / *Chemical composition (approximate values)*

SiO ₂	%	53 - 55
Al ₂ O ₃	%	14 - 15
B ₂ O ₃	%	6 - 8
CaO	%	17 - 22
MgO	%	< 5
K ₂ O, Na ₂ O	%	< 1
Andere Oxide / <i>Other oxides</i>	%	ca./ <i>approx. 1</i>

Blick in die Weberei der CS-Interglas AG

A look at the weaving mill run by CS-Interglas AG



Schlichtemaschine zur Kettherstellung
Sizing machine for manufacturing warps



Wendewickler - Einlauf in die Finish-Anlage
Rotary winder - infeed into the finishing system

Bezeichnungsbeispiel nach DIN 60 850 und ISO 2078
Some example designations according to DIN 60 850 and ISO 2078

	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)
Glasfilamentgarne <i>Glass filament yarns</i>	E	C	9 -	68	Z 28			
Glasfilamentzwirn <i>Glass filament thread</i>	E	C	9 -	136	Z 28	x 2	S 135	
gefachtes Glasfilamentgarn <i>Multiple wound glass filament yarn</i>	E	C	9 -	136	Z 28	x 5	t 0	
texturiertes Glasfilamentgarn <i>Textured wound glass filament yarn</i>	E	C	9 -	136				T 145
Stapelfasergarn <i>Staple fibre yarn</i>	C	D	9 -	125	Z 110			

- 1) Bezeichnung der Glasart E = E-Glas, C = C-Glas / *Glass type designation: E = E glass, C = C glass*
- 2) Kurzzeichen der Faserform C = Endlosfasern, D = Stapelfasern / *Fibre form abbreviation: C = continuous fibres, D = staple fibres*
- 3) Filamentdurchmesser in µm / *Filament diameter in µm*
- 4) Garnfeinheit in tex / *Yarn number in tex*
- 5) Drehungsrichtung und -anzahl je m des Garns / *Direction and number of twists per yarn metre*
- 6) Anzahl der gezwirnten bzw. gefachten Einzelgarne / *Number of twisted or multiple wound yarns*
- 7) Drehungsrichtung und -anzahl je m der Zwirnung (t 0 = ohne Drehung) / *Direction and number of twists per twisted metre (t 0 = no twisting)*
- 8) Resultierende Garnfeinheit nach dem Texturieren in tex / *Yarn number after texturing in tex*

ARAMIDFASERN

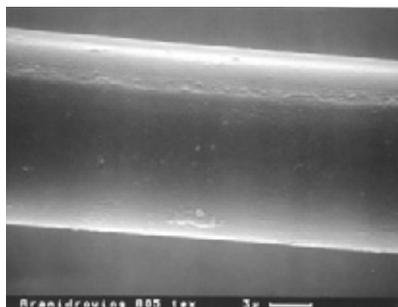
Aromatisches Polyamid (Aramid) wurde 1965 von der Firma DuPont entdeckt und unter dem Namen **Kevlar®** zur Marktreife entwickelt.

Aramidfasern besitzen eine hohe spezifische (gewichtsbezogene) Festigkeit, niedrige Dichte, hohe Schlagzähigkeit, gute Wärmebeständigkeit und Dimensionstabilität, gute Schwingungsdämpfung und ein hohes Arbeitsaufnahmevermögen.

Senkrecht zur Faserlängsachse ist die Festigkeit relativ gering. Demnach sind die Querfestigkeit und die Druckfestigkeit von Aramidfaserkunststoff, verglichen mit GFK oder CFK, wesentlich niedriger (z.B. interlaminae Scherfestigkeit ca. 50 % der Materialfestigkeit).

Herstellung

Aramid-Hochmodulfasern werden aus einer flüssigkristallinen Lösung von polyparaphenylenen Terephthalamiden in konzentrierter Schwefelsäure versponnen. Nach der Oberflächenbehandlung werden HM-Fasern zusätzlich mechanisch gereckt, wobei ein hoher Orientierungsgrad der Einzelfibrillen erreicht wird.



REM-Aufnahme eines Elementarfadens aus Aramid.
SEM photograph of a continuous aramid fibre.

Aramidarten

Hochmodulfasern wie Kevlar® 49 oder Twaron® HM werden hauptsächlich für schlag- und stoßbeanspruchte, verschleißfeste Leichtbauteile eingesetzt

Niedermodulfasern wie Kevlar® 29 oder Twaron® LM werden für die weiche und harte Ballistik (Schußwesten und Panzerungen) verwendet.

Feuchtigkeitsaufnahme

Aramidfasern neigen zur Feuchtigkeitsaufnahme. Nach Werkstoffleistungsblatt dürfen Aramidgewebe für die Luft- und Raumfahrt bis zu 3 % Feuchtigkeit enthalten.

Nach längerer, ungeschützter Lagerung kann die Wasseraufnahme bis zu 7 % betragen, weshalb solche Gewebe vor der Verarbeitung im Ofen bei 120 °C ca. 1 - 10 Stunden zu trocknen sind.

Dimensionsstabilität

Ähnlich wie Kohlenstofffasern weisen Aramidfasern einen **negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten** in Faserlängsrichtung auf. Die Faser verkürzt sich in der Wärme, während sich das Matrixharz dehnt. Durch diese gegenläufigen Kräfte weist SFK bei erhöhten Temperaturen eine **hohe Maßhaltigkeit** auf.

ARAMID FIBRES

Aramid, a portmanteau word formed from "aromatic polyamide", was discovered in 1965 by the DuPont company, which then developed and marketed it under the name Kevlar®.

Aramid fibres exhibit a high specific (or weight-based) strength, low density, high impact strength, good heat resistance and dimensional stability, good vibration damping, and a high energy absorption capacity.

The strength is relatively low transverse to the fibres. Accordingly, the transverse and compressive strengths of aramid-fibre-reinforced plastic, compared with GRP or CRP, are considerably lower (e.g. the interlaminar shear strength is approx. 50% of the material's strength).

Manufacture

High modulus aramid fibres are spun from a liquid-crystalline solution of polyparaphenylene terephthalamides in concentrated sulphuric acid.

After surface treatment, the HM fibres are subjected to additional mechanical drawing so that the single fibrils are all oriented to a high degree.

Aramid types

High modulus fibres such as Kevlar® 49 or Twaron® HM are used predominantly for high-impact, wear-resistant lightweight components.

Low modulus fibres such as Kevlar® 29 or Twaron® LM are used for hard and soft ballistic materials (bulletproof vests and armouring).

Moisture absorption

Aramid fibres tend to absorb moisture. According to the WLB (material specifications sheet), aramid fabrics intended for aerospace applications must not contain more than 3% by weight of moisture.

After a longer period of unprotected storage the water content can be as high as 7%, a reason why these fabrics must be dried in an oven at 120 °C for about one to ten hours before they are processed.

Dimensional stability

*Similar to carbon fibres, aramid fibres exhibit a **negative coefficient of thermal expansion** along the fibres. The fibres contract at high temperatures whereas the matrix resin expands.*

*Owing to these opposed forces, SRPs exhibit **high dimensional stability** at raised temperatures.*

Thermische Eigenschaften

Aramide sind entflammbar, jedoch bei Entfernen der Feuerquelle selbstverlöschend. Die Fasern schmelzen nicht und weisen eine gute flammhemmende Wirkung auf. Die Wärmeleitfähigkeit ist gering. Bei höheren Temperaturen beginnen Aramide zu verkohlen, aber sie weisen auch nach mehrtägiger Belastung mit Temperaturen um 250 °C noch eine Restzugfestigkeit von 50 % auf.

Chemische Eigenschaften

Gute Beständigkeit gegen Lösemittel, Kraftstoffe, Schmiermittel, Salzwasser etc.; von einigen starken Säuren und Laugen werden Aramidfasern angegriffen. Sie sind widerstandsfähig gegen den Angriff von Pilzen und Bakterien.

UV-Stabilität

Aramidfasern sind empfindlich gegen UV-Strahlung. Zunächst erfolgt eine sichtbare Verfärbung vom ursprünglichen hellen Gelb in einen bronzebraunen Farbton. Nach längerer Einwirkung verliert die Faser bis zu 75 % an Festigkeit. Aramidlaminat sollten möglichst mit einer UV-absorbierenden Deckschicht versehen werden. Dazu eignet sich praktisch jedes kräftig eingefärbte Deckschichtharz.

Schichten

Für Aramidfasern stehen noch keine chemisch wirkenden Haftvermittler zur Verfügung. Die zum Schutz der Faser aufgetragene Webschicht vermindert zunächst die Haftung Harz : Faser.

Gewebe für die Luft- und Raumfahrt werden daher nach der Herstellung gewaschen. Die Gewebe sind somit entschlichtet, das Harz haftet direkt auf der Faser. Ungewaschene, etwas preisgünstigere Gewebe sind nur für weniger anspruchsvolle Anwendungen zu empfehlen.

Aramidgewebe unter 35 g/m² werden aus qualitativen Überlegungen heraus nicht gewaschen, da sich das Webbild ändern kann.

Matrixharze

Aufgrund der relativ guten Harz/Faserhaftung werden Epoxydharze bevorzugt. Aminverbindungen, die in praktisch allen Härterssystemen von R&G enthalten sind, weisen eine besondere Affinität zur Faseroberfläche auf.

Verarbeitung

Aramidfasern sind relativ unempfindlich gegenüber Beschädigungen während der Verarbeitung. Es kommen daher alle gängigen Verarbeitungsverfahren in Betracht (Handlaminat, Wickeln, Pressen, Strangziehen etc.).

Aufgrund der hohen Faserzähigkeit werden zum Bearbeiten von Aramidgeweben **microverzahnte Spezialscheren** benötigt.

Zum Bearbeiten fertiger Laminat kommen ebenfalls nur hochwertige Metallbearbeitungswerkzeuge in Frage. Neben feingezahnten Sägen hat sich das Hochdruck-Wasserstrahlschneidverfahren (Water-Jet-Verfahren) zum Besäumen fertiger Bauteile am besten bewährt.

Beim Bohren und Fräsen weist die Oberfläche einen „Flaum“ aus Aramidfasern auf. Für optimale Ergebnisse werden Spezialwerkzeuge benötigt.

Sofern die Oberfläche von Aramidlaminaten später geschliffen werden soll, kann als Schleifschicht zuvor ein Glasgewebe einlaminiert werden.

Kevlar® = DuPont; Twaron® = Teijin Twaron

Thermal properties

Aramids are flammable, but self-extinguishing as soon as the source of the fire is removed. The fibres do not melt and exhibit good flame-retardant effects. The thermal conductivity is low. At higher temperatures aramids start to carbonise, but still exhibit a residual tensile strength of 50% even after several days at temperatures of 250 °C.

Chemical properties

Good resistance to solvents, fuels, lubricants, salt water, etc., but a number of strong acids and alkalis attack aramid fibres. They are resistant to attack by fungi and bacteria.

UV resistance

Aramid fibres are sensitive to UV radiation. First of all, the original light yellow undergoes visible discolouration and becomes a brownish bronze. After longer exposure times, the fibres lose up to 75% of their strength. Whenever possible, a UV-absorbing overlay should be applied to aramid laminates. Virtually any full-coloured overlay resin is suitable.

Sizing

At present there are still no chemical coupling agents available for aramid fibres. The weaving size applied as a protective coat to the fibres first prevents adhesion between the resin and the fibres.

So fabrics intended for aerospace applications are washed after their manufacture, i.e. the fabrics are desized, and the resin adheres directly to the fibres.

Unwashed fabrics are available at lower prices and are recommended for less demanding applications only.

For reasons of quality assurance, aramid fabrics under 35 g/m² are not washed: otherwise the weave may undergo change.

Matrix resins

Owing to the relatively good adhesion between the resin and the fibres, preference is given to epoxy resins. Amine compounds, which are constituents of virtually all of the hardener systems available from R&G, exhibit a particular affinity to the surface of these fibres.

Processing

Aramid fibres are relatively insensitive to damage during processing. Consequently, all of the conventional processing methods can be applied (hand lay-up operations, winding, press moulding, pultrusion, etc.).

*Owing to the high toughness of their fibres, aramid fabrics must be cut with **special micro-toothed shears**.*

Consequently, high-quality metalworking tools are the only adequate tools for cutting the ready-made laminates as well. Besides fine-tooth saws, also high-pressure water jet cutting (water-jet machining) has proved the best method for trimming ready-made components.

Drilling or milling the surface causes the aramid fibres to fluff. Special tools must be used if the optimal results are to be obtained.

When the surfaces of aramid laminates have to be ground in a subsequent process, a glass fabric can be added to the laminations to serve as the grinding coat.

Kevlar® = DuPont; Twaron® = Teijin Twaron

Daten der Aramidfasern
Specifications of aramid fibres

Aramid Aramid	Einheit Unit	Niedermodul (LM) Low modulus (LM)	Hochmodul High modulus (HM)
Dichte / <i>Density</i>	g/cm ³ /20 °C	1,44	1.45
Zugfestigkeit / <i>Tensile strength</i>	MPa	2800	2880
Zug E-Modul / <i>Tensile modulus</i>	GPa	59	100
Bruchdehnung / <i>Elongation at break</i>	%	4	2,8
spez. elektrischer Widerstand / <i>Resistivity</i>	Ω/cm/20 °C	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Therm. Ausdehnungskoeffizient / <i>Coefficient of thermal expansion</i>	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-2,3	-3,5
Wärmeleitfähigkeit / <i>Thermal conductivity</i>	W/mK	0,04	0,04
Zersetzungstemperatur / <i>Degradation temperature</i>	°C	550	550
Feuchtigkeitsaufnahme (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) <i>Moisture absorption (20 °C, 65 % relative humidity)</i>	%	7	3,5
Herstellerbezeichnung / <i>Manufacturer's designation</i>	DuPont, Teijin Twaron	Kevlar® 29, Twaron®	Kevlar® 49 / Twaron® HM

Werkstoffvergleich
Materials compared
Verbundwerkstoffe aus Aramid HM im Vergleich zu GFK
Composites of HM aramid compared with GRP

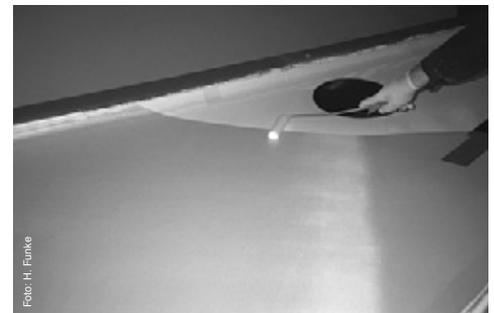
Gewichtersparnis <i>Weight saving</i>	25 - 40 %	25 - 40 %
Steifigkeitsgewinn <i>Increase in rigidity</i>	Bis zu 60 %, da aufgrund niedriger Dichte bei gleichem Gewebegewicht 80 % höhere Laminatdicke.	<i>Up to 60 %: lower density increases laminate thickness by 80 % for the same fabric weight</i>
Sicherheitsgewinn <i>Increase in safety</i>	Metallähnliches Ermüdungsverhalten, begrenzte Rißausbildung, ermüdungsbeständig, gute Schwingungsdämpfung	<i>Fatigue behaviour similar to metals, restricted crack development, resistant to fatigue, good vibration damping</i>



Im Sportgerätebau wird Aramid für schlagzähe Laminat eingesetzt
Aramid is used for high-impact resistant laminates in the design of sports equipment



Ballistischer Weichschutz (Kevlar® 29)
Soft ballistic protection (Kevlar® 29)



Aramidlaminat in der Tragfläche eines UL-Nurflüglers
Aramid laminate in the structure of an ultralight flying wing



KOHLENSTOFFASERN (CARBON)

Kohlenstoffasern wurden (als Glühlampendraht) erstmals im 19. Jahrhundert durch Verkokung von Kunstseide erzeugt.

Erst viel später, gegen Ende der 60er Jahre, kamen **Kohlenstoff-Verstärkungsfasern** in geringen Mengen und zu hohen Preisen (um 1500,- EUR / kg) auf den Markt. Zunächst waren lediglich Rovings (endlose Faserstränge) verfügbar, die in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wurden. Seit etwa 1975 werden Kohlenstoffasern weltweit in industriellem Maßstab gefertigt und zu vielfältigen **textilen Verstärkungsmaterialien** verarbeitet.

Tenax®

Tenax® ist eine aus Polyacrylnitril (PAN) Precursor hergestellte Hochleistungs-kohlenstoffaser, die sich durch hohe Festigkeit, hohen Elastizitätsmodul und niedrige Dichte auszeichnet.

Seit 10 - 15 Jahren wird die Kohlenstoffaser in wachsendem Umfang in Hochleistungsverbundwerkstoffen eingesetzt. Dieser moderne Werkstoff wird mittlerweile in vielen Industriezweigen, wie z.B. der Luftfahrtindustrie, dem Maschinenbau, der Automobilindustrie, dem Schiffbau, der Medizintechnik, der Windenergie, der Off-Shore- und nicht zuletzt der Sportartikelindustrie eingesetzt.

Die Tenax® Kohlenstoffaser hat durch ihre bewährten Eigenschaften im Verbundwerkstoff in Verbindung mit einem äußerst kundenorientierten kommerziellen und technischen Service eine führende Marktposition in Europa erobert. In Kombination mit einem ausgereiften Massenproduktionsprozess kann Tenax Fibers immer neue Anwendungen für die Kohlenstoffaser erschließen. Daher stehen Tenax® Kohlenstoffasern an vorderster Stelle, wenn eine kosteneffiziente Anwendung von Carbon verlangt wird.

Eigenschaften

Mechanische und dynamische Eigenschaften

- Hohe Festigkeit
- Hoher Elastizitätsmodul
- Niedrige Dichte
- Geringe Kriechneigung
- Gute Schwingungsdämpfung
- Geringe Materialermüdung

Die Festigkeiten übertreffen die der meisten Metalle und anderer Faserverbundwerkstoffe. Die Dehnung von CFK ist **vollelastisch**, **Ermüdungsbeständigkeit** und **Vibrationsdämpfung** sind hervorragend.

Chemische Eigenschaften

- Chemisch inert
- Nicht korrosiv
- Hohe Beständigkeit gegen Säuren, Alkalien und organische Lösungsmittel

Chemisch sehr inert, hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber den meisten Säuren, Alkalien und Lösungsmitteln. Kohlenstoffasern nehmen praktisch kein Wasser auf.

CARBON FIBRES

The first carbon fibres were manufactured in the nineteenth century when artificial silk (today called rayon) was carbonised to produce filaments for incandescent lamps. Not until much later, towards the close of the sixties, did **reinforcing carbon fibres** make an entry on the market – in small quantities and at staggeringly high prices (about EUR 1,500 per kilogram).

The first of these carbon fibres were available solely in the form of continuous rovings that were used in the aerospace industries. Since about 1975 carbon fibres are being produced throughout the world on an industrial scale and processed to serve as flexible **textile reinforcing materials**.

Tenax®

Tenax® is a high-performance carbon fibre that is produced from a polyacrylonitrile (PAN) precursor and whose characteristic features are high strength, high modulus of elasticity, and low density. Over the last ten to fifteen years, the proportion of carbon fibres in high-performance composites has been experiencing a steady growth. This new material is now being used in many branches of industry, e.g. aviation, machine construction, car manufacture, shipbuilding, medical engineering, wind energy, offshore installations, and - not least of all - sports articles.

With its tried-and-tested properties in the composite in conjunction with highly customer-oriented commercial and technical services, Tenax® carbon fibres have succeeded in adopting a leading market position in Europe.

In combination with a matured mass production process, the Tenax Fibers company is constantly developing new applications for carbon fibres. So Tenax® carbon fibres are at the top of the list whenever applications demand carbon for cost-effectiveness.

Properties

Mechanical and dynamic properties

- High strength
- High modulus of elasticity
- Low density
- Low tendency to creep
- Good vibration damping
- Low material fatigue

The strength values exceed those of most metals and other fibre composites.

CRP exhibits **fully elastic** elongation as well as outstanding **fatigue strength** and **vibration damping**.

Chemical properties

- Chemically inert
- Non-corrosive
- Highly resistant to acids, alkalis, and organic solvents

Highly inert with respect to chemicals and highly resistant to most acids, alkalis, and solvents, carbon fibres absorb practically no water.

Thermische Eigenschaften

- Geringe Wärmeausdehnung
- Geringe Wärmeleitfähigkeit

Sehr niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient, der CFK eine hohe Maßstabilität verleiht.

Kohlenstoffasern sind unbrennbar. Sie sind unter Sauerstoffabschluß stabil bis 3000 °C, mit Sauerstoff erfolgt ab ca 400 °C eine Oxidation, die zu Festigkeitsverlusten führt.

Elektromagnetische Eigenschaften

- Geringe Röntgenstrahlenabsorption
- Nicht magnetisch

Elektrische Eigenschaften

- Gute elektrische Leitfähigkeit

Werkstoffvergleich

Eine Tabelle mit den Festigkeiten gebräuchlicher Werkstoffe finden Sie auf **Seite 8.29**.

Bei Leichtbauteilen entscheidet eine mit herkömmlichen Werkstoffen vergleichbare Festigkeit bei **geringerem Gewicht** über die Verwendung. Bei gleichem Gewicht hat CFK die fünffache Zugfestigkeit und Steifigkeit von Stahl. **1 kg CFK kann 5 kg Stahl ersetzen.**

Herstellung

C-Fasern bestehen zu über 95 % aus reinem Kohlenstoff.

Elementarer, reiner Kohlenstoff, kommt in der Natur in Form von Graphit oder Diamant vor, ist unlöslich und unschmelzbar und scheidet daher als Rohstoff zur Kohlefaserproduktion aus.

Kohlenstoffasern entstehen durch Pyrolyse (Verkokung) nicht schmelzbarer Kohlenstoff-Polymerfäden. Das technisch bedeutsamste Verfahren ist das Verkoken von Polyacrylnitril. Die Ausgangsfäden (Precursor genannt) enthalten eine durchgehende Kohlenstoffkette (-C-C-C-C-C-).

Nach dem Spinnen der PAN-Faser werden die verknäuelten Polymerketten durch Verstrecken zur Faserrichtung ausgerichtet.

Die **Umwandlung** zur Kohlenstofffaser erfolgt in drei Stufen:

- Die Voroxidation findet in O₂-haltiger Atmosphäre bei 200 - 300 °C statt, wobei die Faser unter Vorspannung gehalten wird;
- Die Pyrolyse (Carbonisierung) erfolgt bei 800 - 1500 °C unter Inertgasatmosphäre;
- Anschließend ist noch eine Hochtemperaturbehandlung bei 2000 - 3000 °C möglich.

Temperaturhöhe und Vorspannung bestimmen die Eigenschaften, da hiervon ein maßgeblicher Einfluß auf den Orientierungsgrad der C-Ketten ausgeht.

Thermal properties

- Low thermal expansion
- Low thermal conductivity

As a result of its very low coefficient of thermal expansion, CRP exhibits a high dimensional stability.

Carbon fibres are incombustible. With the exclusion of oxygen they are stable at temperatures up to 3000 °C; on exposure to oxygen they suffer losses in strength from approx. 400 °C owing to the effects of oxidation.

Electromagnetic properties

- Low X-ray absorption
- Non-magnetic

Electrical properties

- Good conductivity

Materials compared

*A table listing the strength values of the conventional materials can be found on **page 8.29**.*

*The decisive factor affecting the use of these materials in lightweight components is the **lower weight** exhibiting a strength comparable to the conventional materials. The same weight of CRP has five times the tensile strength and rigidity of steel: **1 kg of CRP can replace 5 kg of steel.***

Manufacture

Ninety-five per cent of carbon fibres is made up of pure carbon.

Elementary, pure carbon is found in nature in the form of graphite or diamond, is insoluble and infusible, and is therefore unsuitable as a raw material for the production of carbon fibres.

Carbon fibres are the result when infusible carbon polymer fibres pyrolyse (carbonise). The most important method used for this technology involves the carbonisation of polyacrylonitrile. The initial, or precursor fibres contain a long unbroken chain of carbon atoms (-C-C-C-C-C-).

After the PAN fibres have been spun, the coils of polymer chains are drawn to align them in the direction of the fibres.

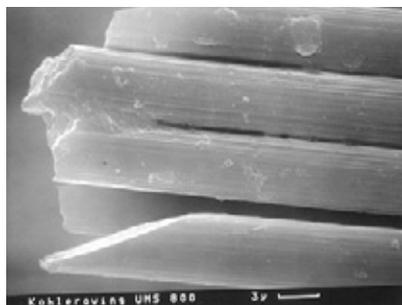
The **conversion** to carbon fibres takes place over three stages:

- *The fibres are kept under tension and pre-oxidised at 200 - 300 °C in an atmosphere containing O₂.*
- *The fibres are then pyrolysed (carbonised) at 800 -1500 °C in an inert gas atmosphere.*
- *The third and final stage involves an optional high-temperature treatment at 2000 - 3000 °C.*

The temperature level and the initial tension exercise a decisive effect on the carbon chains' degree of orientation and therefore the end product's final properties.

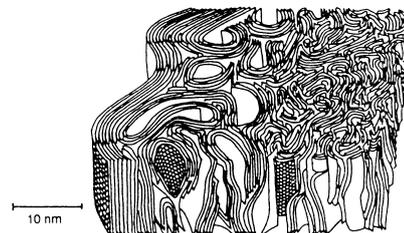
Die Faseroberfläche ist sehr groß: bei einem Faserdurchmesser von 7 µm und einem Faservolumenanteil von 50 % ergibt sich für 1 cm³ Laminat eine **rechnerische Faseroberfläche** von 2800 cm².

The surface of the fibres is very large: a fibre diameter of 7 µm and a fibre volume fraction of 50% yield a **theoretical fibre surface** of 2800 cm² for every 1 cm³ of laminate.



REM-Aufnahme der Bruchstücke von Elementarfäden aus Kohlefaser UMS

SEM photograph showing the broken ends of continuous UMS carbon fibres



Microstruktur der Kohlefaser auf Basis von Polyacrylnitril (PAN)

The microstructure of polyacrylonitrile-based (PAN-based) carbon fibres

Gängige Tenax®-Fasertypen

Conventional Tenax® fibre types

Filamentgarn HTA und HTS

HTA and HTS filament yarn

Dies ist die klassische Tenax® Hochleistungskohlenstofffaser-Type. Seit Anfang der achtziger Jahre hat sich die HTA Faser einen Namen in einer Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen in der Luftfahrt- und Freizeitindustrie gemacht. Diese „High Tenacity“ (HT) Faser liefert exzellente und ausgewogene mechanische Lamineigenschaften unter Zug- und Druckbeanspruchung.

These are the classical types of Tenax® high-performance carbon fibres. Since the beginning of the eighties, the HTA fibre has been making a name for itself in a large number of different applications in the aviation and leisure industries. This so-called high-tenacity fibre yields a laminate with excellent and well-balanced mechanical properties under both tensile and compressive stress.

Nicht umsonst war die **Tenax® HTA** Kohlenstofffasertyp eine der ersten Kohlenstofffasern, die in der zivilen Luftfahrt eingesetzt wurde. Wie zum Beispiel für das Höhen- und Seitenleitwerk, Fußboden, Ruder und Klappen, Triebwerksabdeckungen und anderen Bauteile im Airbus. Weitere bedeutende Anwendungen der HTA Faser sind in der Herstellung von Bauteilen für Helikopter und modernen Segelflugzeugen.

Owing to these outstanding properties, the **Tenax® HTA** carbon fibre type was one of the first carbon fibres to find application in the aviation industries, for example in the elevator assembly, vertical tailplane, floor, rudder and flaps, engine covers, and other components for the airbus. Some further important applications for HTA fibres can be found in the manufacture of components for helicopters and modern gliders.

Die **Tenax® HTS** Faser ist eine weiterentwickelte HT-Faser Variante mit erhöhten mechanischen Eigenschaften und erhöhter Anzahl an Filamenten (12K und 24K). Ansonsten bietet die Tenax® HTS Faser ein ebenso gutes Eigenschaftsprofil wie die guteingeführte HTA Faser.

The **Tenax® HTS** fibre is an advanced development of the HT fibre and exhibits greater mechanical properties and a higher number of filaments (12 K and 24 K). In all other aspects the Tenax® HTS fibre offers a range of properties as equally good as the well-established HTA fibre.

Eigenschaften (Richtwerte)

Properties (approximate values)

Dichte (g/cm ³)	1,77
Zugfestigkeit (MPa)	3950 (HTS: 4300)
Zug-E-Modul (GPa)	238
Bruchdehnung (%)	1,5
Spezifische Wärmekapazität (J/kg·K)	710
Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)	17
Wärmeausdehnungskoeffizient (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	-0,1
Spez. elektrischer Widerstand (Ω·cm)	1,6 x 10 ⁻³

Density (g/cm ³)	1.77
Tensile strength (MPa)	3950 (HTS: 4300)
Tensile modulus (GPa)	238
Elongation at break (%)	1.5
Specific heat capacity (J/kg·K)	710
Thermal conductivity coefficient (W/m·K)	17
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	-0.1
Resistivity (Ω·cm)	1.6 x 10 ⁻³

Filamentgarn UMS

Die Tenax® UMS, „Ultra High Modulus“ (UM) Faser ist für Anwendungen geeignet, wo eine überlegene Steifigkeit erforderlich für die Leistungsfähigkeit des Bauteils ist. Vor allem Konstruktionen wie Satellitenstrukturen, Antennen oder Wellen und Walzen erfordern die außergewöhnlichen Eigenschaften der Tenax® UMS Fasern. Aber auch Sportgeräte wie Angelruten und Bootsmasten können erst mit Hilfe der Tenax® UMS Faser ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten.

Eigenschaften (Richtwerte)

Dichte (g/cm ³)	1,78
Zugfestigkeit (MPa)	4560
Zug-E-Modul (GPa)	395
Bruchdehnung (%)	1,1

Gängige Torayca®-Fasertypen

Filamentgarn T 300 / T300J

Dies ist die klassische Torayca® Hochleistungskohlenstofffaser Type.

Eigenschaften (Richtwerte)

Dichte (g/cm ³)	1,76/1,78
Zugfestigkeit (MPa)	3530/4210
Zug-E-Modul (GPa)	230
Bruchdehnung (%)	1,5/1,8

Andere Fasertypen

Sumitomo Dialead K63712

Diese Fasertypen werden momentan nur bei den UD-Gelegen verwendet (R&G Bestell-Nr. 190 254-X Kohlegelege UHM 250 g/m²).

Eigenschaften (Richtwerte)

Dichte (g/cm ³)	2,12
Zugfestigkeit (MPa)	2600
Zug-E-Modul (GPa)	640
Bruchdehnung (%)	0,4 %

Fadenkonstruktion bei Kohlefasern

1 K = 1000 Filamente pro Faden

3 K = 3000 Filamente pro Faden

6 K = 6000 Filamente pro Faden

1 K wird z.B. verarbeitet für Kohlegelege 93 g/m², 3 K für Kohlegelege 160, 204, 245 g/m².

Die Verarbeitung

In der Verarbeitung zu Laminaten sind Kohlenstofffasern mit Textilglasprodukten vergleichbar. Schichtweise wird das zugeschnittene Gewebe z.B. mit Epoxydharz getränkt, und so ein Laminat hergestellt.

Im Gegensatz zu Glasgewebe, das bei richtiger Benetzung transparent wird, bleibt die Kohlefaser gleichmäßig schwarz. Luftblasen und ungetränkte Stellen lassen sich nicht erkennen. Fehlstellen müssen durch **sorgfältiges Arbeiten** mit Pinsel und Mohairwalze vermieden werden.

Das Laminierharz sollte auf Raumtemperatur (20 °C) erwärmt sein, damit es dünnflüssig genug ist, die Fasern vollständig zu benetzen. Eine gute Benetzung, **ohne Lufteinschlüsse**, ist für die Endfestigkeit entscheidend.

UMS filament yarn

Tenax® UMS is an ultra-high modulus (UM) fibre and is suitable for applications that demand superior rigidity for the performance of a component. Above all, constructions such as satellite structures, aeriels, shafts, and rollers are today unthinkable without the exceptional properties imparted by Tenax® UMS fibres. Yet also sports equipment such as fishing rods and boat masts cannot develop their full potential without the assistance of Tenax® UMS fibres.

Properties (approximate values)

Density (g/cm ³)	1.78
Tensile strength (MPa)	4560
Tensile modulus (GPa)	395
Elongation at break (%)	1.1

Conventional Torayca® fibre types

T 300 / T 300J filament yarn

These are the classical types of Torayca® high-performance carbon fibres.

Properties (approximate values)

Density (g/cm ³)	1.76 / 1.78
Tensile strength (MPa)	3530 / 4210
Tensile modulus (GPa)	230
Elongation at break (%)	1.5 / 1.8

Other fibre types

Sumitomo Dialead K63712

At present, this fibre type is used only in unidirectional inlays (R&G order no. 190 254-X, UHM carbon inlay, 250 g/m²).

Properties (approximate values)

Density (g/cm ³)	2.12
Tensile strength (MPa)	2600
Tensile modulus (GPa)	640
Elongation at break (%)	0,4 %

Thread construction with carbon fibres

1 K = 1,000 filaments per thread

3 K = 3,000 filaments per thread

6 K = 6,000 filaments per thread

For example, 1 K is used for 93 g/m² carbon fabrics, 3 K for 160, 204, and 245 g/m² carbon fabrics.

Processing

When processed to make laminates, carbon fibres can be compared with textile glass products. Each layer of cut fabric is impregnated e.g. with epoxy resin to produce a laminate.

In contrast to glass fabrics, which become transparent when properly wetted, carbon fibres remain a uniform black. Air bubbles and inadequately impregnated sites cannot be detected visually. **The work must be performed carefully** with a brush and mohair roller to prevent such voids.

The laminating resin should be heated to room temperature (20 °C) if its viscosity is to be low enough to wet the fibres completely. Thorough wetting without air inclusions is decisive for the final strength.



Spezifikation

R&G liefert Gewebe und Rovings hauptsächlich aus Tenax Kohlenstofffasern. Die meisten Breitgewebe sind nach DIN 65 147 T1 und T2 (Luftfahrtnorm) und den QSF-B-Richtlinien (Qualitätssicherungs-System der Luftfahrt) hergestellt.

Hybridgewebe / Designgewebe

Mischfasergewebe können sich in ihren Eigenschaften ergänzen und sind für bestimmte hochbelastete Bauteile (z.B. Motorrad-Rennverkleidung, Schiffmodellrümpfe, Surfboards etc.) besonders zu empfehlen. Ein Kohle/Aramid-Laminat erhält durch die Kohlefaser eine hohe Steifigkeit und eine gute Druckfestigkeit, durch die Aramidfaser wird eine erhöhte Schlagzähigkeit erzielt (siehe Tabelle Seite 8.29). Üblich sind die Kombinationen Kohlenstoff/Aramid, Kohlenstoff/Glas und Kohlenstoff/Dyneema®.

Auch als Designgewebe werden diese Mischgewebe verarbeitet. Kohle/Aramid ist gelb/schwarz, Kohle Dyneema weiß/schwarz. Lediglich Kohle/Glas wirkt meist nicht besonders attraktiv, da die Glasfaser im Laminat transparent ist.

Spezielle **Designgewebe** wie das R&G Kohlegewebe 245 g/m² sind mit blauen und roten Schußfäden lieferbar. Insbesondere im hochwertigen Fahrzeugbau werden diese Gewebetypen für sichtbare Carbonteile verwendet.

Haftvermittler

Um eine möglichst gute Haftung des Harzes auf der Faser zu erreichen, sind alle R&G Kohlegewebe mit einer **epoxydhaltigen Präparation** imprägniert. Der Anteil liegt bei 1,3 % des Gewebegewichtes. Als Matrix empfehlen wir Epoxydharze, eine Verarbeitung mit Polyesterharzen ist jedoch auch möglich.

Schiebeverfestigung

Um das Auslösen von Fäden beim Schneiden zu verhindern, kann das Gewebe bei der Herstellung mit einem zusätzlich aufgetragenen, harzfreundlichen Binder schiebeverfestigt werden. Die **Drapierfähigkeit** bleibt dabei **weitestgehend erhalten!** R&G liefert das Kohlegewebe 245 g/m² optional auch mit dieser Schiebeverfestigung. Vorteile bietet dieses Material vor allem bei der Herstellung von Sicht-Carbonteilen und beim Zuschneiden von Torsionslagen ($\pm 45^\circ$). Ab ca. 100 m² kann jedes Kohlegewebe ab Werk schiebeverfestigt werden. Das Gewebe ist wegen seines Binders mit heißer Luft **thermoplastisch verform- und verklebbar**. Dieser Prozeß ist beliebig of reversibel. Die Lagenausrichtung bei Mehrlagenaufbauten erfolgt ohne Fadenverschiebung. Die **Benetzungsfähigkeit** bei Epoxydharzen sowie der Harzfluß werden nicht negativ beeinflusst. Während der **Aushärtung** schmilzt der EP-Binder und vernetzt oberhalb seiner Schmelztemperatur homogen mit der Matrix (Schmelzbereich 103 - 115 °C). Sollte ein Aushärten unter der Schmelztemperatur des Binders erfolgen, vernetzt dieser zwar nicht, behindert aber auch nicht die Faser-Matrix-Haftung.

Besonderheiten

Kohlenstoffilamentgewebe dürfen keinesfalls geknickt oder mit scharfkantigen Werkzeugen wie Metallscheibenrollern verarbeitet werden. Bei einer Beschädigung der Filamente ergeben sich zwangsläufig Sollbruchstellen. Auf gefaltete Kohlenstoffgewebe sollte beim Kauf zugunsten aufgerollter Stücke verzichtet werden.

Lagerung

Nach DIN 65147 sind Kohlenstoffilamentgewebe für die Luft- und Raumfahrt liegend, in trockenen, möglichst temperierten Räumen lichtgeschützt so zu lagern, daß von außen keine Druckbelastung einwirkt.

Specifications

R&G provides fabrics and rovings manufactured primarily from Tenax® carbon fibres. Most fabrics in open width are manufactured in accordance with DIN 65 147 T1 and T2 (aircraft standard) and the QSF-B guidelines (quality assurance system for aviation).

Hybrid fabrics / designer fabrics

Hybrid fabrics allow an individual constellation of properties and are particularly recommended for certain highly loaded components (e.g. cowls for racing motorcycles, hulls for model ships, surfboards, etc.). The carbon fibres in a carbon-aramid laminate serve to enhance its rigidity and its compressive strength, the aramid fibres its impact strength (see the table on page 8.29). The usual combinations are carbon and aramid, carbon and glass, and carbon and Dyneema®. These hybrid fabrics are also processed to make designer fabrics. The carbon-aramid combination yields yellow and black, carbon-Dyneema® white and black. Solely the combination with carbon and glass produces in most cases a less attractive result owing to the glass fibres' transparency in the laminate. Specific **designer fabrics** such as R&G 245 g/cm² carbon fabrics are available with blue and red wefts. These fabric types find application particularly in upmarket automotive engineering for decorative carbon parts.

Coupling agents

So that the best possible adhesion is obtained between the resin and the fibre, all R&G carbon fabrics are impregnated with a **preparation containing epoxy**. The content is 1.3% of the fabric weight. We recommend epoxy resins as the matrix, but polyester resins are also possible.

Slippage resistance

So that the fibres do not fray when cut, the fabric can be imparted so-called slippage resistance from an additional application of resin-compatible binder. This has only a **negligible** effect on the **drapability**. R&G provides 245 g/cm² carbon fabric, also with optional slippage resistance. The advantages offered by this material are utilised above all in the manufacture of decorative carbon parts and when torsion layers ($\pm 45^\circ$) have to be cut to size. Every carbon fabric greater than approx. 100 m² can be provided ex works with slippage resistance.

Owing to its binder component, the fabric can be **deformed and bonded thermoplastically** with hot air. This process can be reversed any number of times. The individual plies of multiple-ply structures can be aligned without the occurrence of slippage. There are no negative effects on the wetting capacity with respect to epoxy resins or the flow of resin. During the **curing** process, the EP binder melts and, above its melting temperature, cross-links homogeneously with the matrix (melting range 103 - 115 °C). Should the compound cure below the binder's melting temperature, the binder will not cross-link. On the other hand, this does not suppress the adhesion between the fibres and the matrix.

Salient features

Under no circumstances whatsoever may carbon filament fabrics be folded or cut with sharp-edged tools such as metal disc rollers. Damage to the filaments invariably gives rise to "pre-programmed" breaking points. So folded carbon fabrics should be avoided when the initial materials are purchased. Instead, preference should be given to carbon fabrics delivered in the rolled state.

Storage

DIN 65 147 stipulates that carbon filament fabrics approved for aerospace applications must be stored in dry, temperature-controlled rooms in such a manner that they lie flat, are screened from the light, and are not subjected to any external pressure loads.

Sicherheitshinweise

Kohlenstoffasern, Faserbruchstücke und Faserabrieb haben einige besondere Eigenschaften:

Aufgrund der **elektrischen Leitfähigkeit** ist die Einwirkung auf elektrische Anlagen zu vermeiden. Bei Einwirkung auf die Haut kann eine Reizung erfolgen. Aus Vorsorge ist geeignete Schutzkleidung zu tragen. Abrieb in Form atembarer Stäube hat keine faserförmige Struktur und ist daher als **Inertstaub** einzustufen.

Notes on safety

Carbon fibres, fibre fragments, and fibre dust exhibit a number of particular properties listed in the following. Owing to their **conductivity**, they must be prevented from coming into contact with electrical equipment. Contact with the skin can cause irritation. One prophylactic measure is suitable protective clothing. Respirable fibre dust does not exhibit a fibrous structure and is therefore categorised as **inert**.

Vergleichswerte
Reference values

Typische Kennwerte <i>Typical characteristics</i>	Einheit <i>Unit</i>	Kiefernholz <i>Pine wood</i>	Dural-Alu <i>Duralumin</i>	Titan <i>Titanium</i>	Stahl <i>Steel</i>	GFK ¹⁾ <i>GRP ¹⁾</i>	CFK ¹⁾ <i>CRP ¹⁾</i>
Dichte <i>Density</i>	g/cm ³ /20 °C <i>g/cm³ at 20 °C</i>	0,5	2,8	4,5	7,8	2,1	1,5
Zugfestigkeit <i>Tensile strength</i>	MPa	100	350	800	1100	720	900
E-Modul <i>Modulus of elasticity</i>	MPa	12 000	75 000	110 000	210 000	30 000	88 000
Spez. Festigkeit Reißlänge <i>Spec. strength (breaking length)</i>	km	20	13	18	14	34	60
Spez. E-Modul <i>Spec. modulus of elasticity</i>	km	2400	2700	2400	2700	1400	5900

¹⁾ Quasiisotrope Laminates, nahezu gleiche Festigkeit in jede Richtung

¹⁾ Quasi-isotropic laminates, almost equal strengths in every direction.

Eigenschaften von Mischfasergeweben
Properties of hybrid fabrics

Hybridwerkstoffe <i>Hybrid materials</i>	gegenüber CFK allein <i>Compared with pure CRP</i>	gegenüber SFK allein <i>Compared with pure SRP</i>	gegenüber GFK allein <i>Compared with pure GRP</i>
CFK/SFK <i>CRP/SRP</i>	verbesserte Schlagzähigkeit <i>enhanced impact strength</i>	höhere Druckfestigkeit <i>higher compressive strength</i>	—
CFK/GFK <i>CRP/GRP</i>	verbesserte Schlagzähigkeit <i>enhanced impact strength</i>	—	geringeres Gewicht, höhere Steifigkeit <i>lower weight, higher rigidity</i>
SFK/GFK <i>SRP/GRP</i>	—	höhere Druckfestigkeit <i>higher compressive strength</i>	geringeres Gewicht, höhere Steifigkeit <i>lower weight, higher rigidity</i>

CFK = Kohlenfaserkunststoff, GFK = Glasfaserkunststoff, SFK = Aramidfaserkunststoff

CRP = carbon-fibre-reinforced plastic; GRP = glass-fibre-reinforced plastic; SRP = aramid-fibre-reinforced plastic

Ökologie

Ecological data

Werkstoffe <i>Material</i>	Dichte <i>Density</i>	Öltonnenäquivalent für Rohmaterial <i>Tonnes of oil equivalent for raw material</i>	Öltonnenäquivalent für Umwandlung <i>Tonnes of oil equivalent for conversion</i>	Öltonnenäquivalent für den Werkstoff <i>Tonnes of oil equivalent for the engineering material</i>	Energiepreis KJ pro cm ³ Werkstoff <i>Energy price, kJ per cm³ of material</i>
Aluminium <i>Aluminium</i>	2.7	—	5.6	5.6	665
Stahl <i>Steel</i>	7.8	—	1.0	1.0	385
Kunstharz/Polymere <i>Synthetic resin/polymers</i>	1.1	1.3	1.88	3.18	150
Glasfaser <i>Glass fibre</i>	2.6	—	0.45	0.45	50
Kohlefaser (PAN) <i>Carbon fibre (PAN)</i>	1.8	3.0	3.6	6.6	525
GFK (60 Vol.-%Faser) <i>GRP (60% vol of fibres)</i>	2.0	0.52	1.02	1.54	134
CFK (60 Vol.-%Faser) <i>CRP (60% vol of fibres)</i>	1.6	2.32	2.55	4.87	365



Manche Höchstleistungen werden erst durch den Einsatz von Kohlefasern möglich.

Some examples of maximum performance are only possible with the use of carbon fibres.



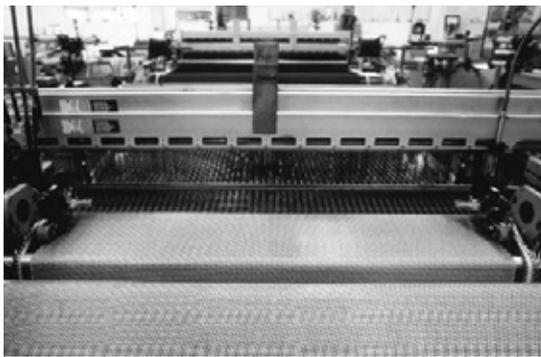
Die Kettfäden passieren an der Webmaschine den Streichbaum, die Lamellen und das Webgeschirr.

On the power loom the warps pass the back beam, the droppers, and the loom harness.



Blick in eine moderne Weberei. Die Fertigung läuft in drei Schichten, also rund um die Uhr.

An insight into a modern weaving mill. Production runs in three shifts, i.e. twenty-four hours a day.



Durch Verkreuzung der Kettfäden mit dem Schußfaden entsteht das Gewebe.

The warps interlace with the weft to produce the fabric.



Zuführung einer Aramid-Kette in die Webmaschine.

Aramid warp being fed into the power loom.



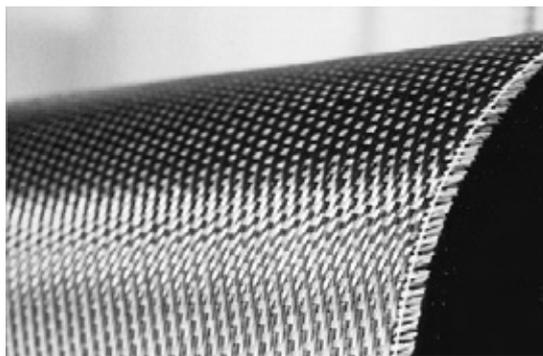
Noch an der Webmaschine wird ein Teil der Webkante abgeschnitten.

Part of the selvedge is cut off when still on the power loom.



Führung der Kettfäden in die Webmaschine.

Warps being fed into the power loom.



Das fertige Gewebe, im Bild ein Kohlenstoffgewebe in Atlasbindung.

The ready-made fabric, shown here is a satin-weave carbon fabric.



Der Weber kontrolliert die Fertigung. Die Herstellung von Verstärkungsgeweben für die Luft- und Raumfahrt erfordert hochqualifizierte Mitarbeiter.

The weaver inspects the production. The manufacture of reinforcing fabrics for aerospace applications requires highly skilled personnel.



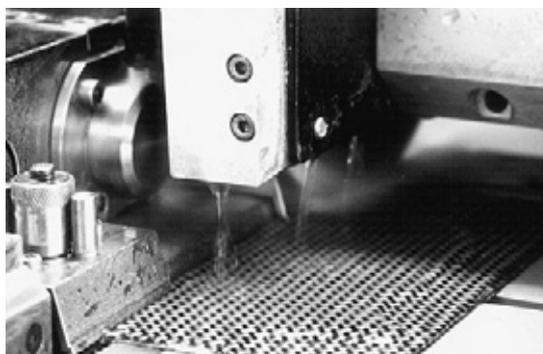
In der Endkontrolle werden die Gewebe kontrolliert, „geputzt“ und gemessen. Abschluß ist das Fehlerprotokoll. Danach erfolgt die Freigabe.

The final inspection first examines, "deburrs", and measures the fabrics, draws up a defects report, and finally passes its approval.



Ein Filamentbruchstück wird mit der Pinzette entfernt. Die Endkontrolle erfordert viel Feingefühl und Erfahrung. Keine Fehlstelle darf übersehen werden.

A filament fragment being removed with a pair of tweezers. The final inspection demands great sensitivity and experience. The inspector must detect all voids.



Auch das gehört zu einer modernen Weberei: das Kunststofflabor. Hier werden im Rahmen der Qualitätssicherung Prüflamine hergestellt und die Festigkeit gemessen.

This too has its place in a modern weaving mill: the plastics testing laboratory. As part of our quality assurance system, the laboratory creates test laminates and measures their strengths.



Alle Ergebnisse werden genauestens dokumentiert. Das Labor erteilt als letzte Prüfungsinstanz die Freigabe zur Auslieferung der Verstärkungsgewebe.

All the results are meticulously documented. The laboratory is the final inspection authority to issue its approval before the reinforcing fabrics can be delivered.

GEWEBE FÜR DIE LUFT- UND RAUMFAHRT FABRICS FOR AEROSPACE APPLICATIONS

Die Angaben zu den Aramid- und Kohlenstoff-Filamentgeweben entsprechen den **Mindestwerten** nach Werkstoff-Leistungsblatt. In den Werkstoff-Leistungsblättern (WLB) ist jeder Werkstoff genauestens spezifiziert.

Die Angaben entbinden den Verarbeiter nicht von eigenen Prüfungen. In Abhängigkeit von Matrix, Fasergehalt und Faserorientierung sind erhebliche Abweichungen nach oben oder unten möglich.

Die Gewebefertigung erfolgt nach DIN 65 147 Teil 1 und 2 (Gewebe aus Kohlenstoffilamentgarn), DIN 65 427 Teil 1 und 2 (Gewebe aus Aramid-Hochmodulfilamentgarn) und den QSF-B-Richtlinien.

Verwendet werden:

Kohlenstoffilamentgarne nach DIN 65 184, Faserstoffklasse F
Glasfilamentgewebe nach DIN 60 850;

Hochfeste Aramidfilamentgarne nach DIN 65 356 Teil 1, Faserstoffklasse A und B.

*The specifications given here for both the aramid and the carbon filament fabrics correspond to the **minimum values** in accordance with the WLB (material specifications sheet for aerospace applications).*

The WLB lists the exact specifications for each engineering material. These specifications do not exempt processors from conducting their own tests. The actual values may vary greatly either way, depending on the matrix, fibre content, and fibre orientation.

Fabrics are manufactured in accordance with DIN 65 147 T1 and T2 (fabrics of carbon filament yarn), DIN 65 427 T1 and T2 (fabrics of high modulus aramid filament yarn), and the QSF-B guidelines.

The materials used are:

*Carbon filament yarns as per DIN 65 184, fibre class F;
glass filament fabrics as per DIN 60850;*

*High-tensile aramid filament yarns as per DIN 65 356 T1,
fibre class A and B.*





Fehlerart <i>Type of defect</i>	Beschreibung <i>Description</i>	Hauptfehler <i>Major defect</i>	Nebenfehler <i>Minor defect</i>
Schräg- oder Bogenschüsse <i>Bias or bowed wefts</i>	Abweichung mehr als 50 mm von der Waagerechten bei 1000 mm Gewebebreite <i>Deviation greater than 50 mm from the horizontal over 1000 mm of fabric width</i>		X
Aufgewölbttes, welliges Gewebe <i>Bulging, wavy fabric</i>	Deutlich sichtbar, nicht planliegendes Gewebe <i>Clearly visible, fabric not lying flat</i>	X	
Löcher, Schnitte, Risse <i>Holes, cuts, tears</i>	Drei oder mehr gebrochene Garne an nebeneinanderliegende Stellen <i>Three or more broken yarns at adjacent points</i>	X	
Schmutzstellen und Flecken <i>Spots or stains</i>	Breite und Länge kleiner 50 mm Breite und Länge größer 50 mm <i>Width and length less than 50 mm Width and length greater than 50 mm</i>	X X	X X
Nester (nicht abgerundete Stellen) <i>Skips (non-interlaced points)</i>	Breite und Länge kleiner 50 mm Breite und Länge größer 50 mm <i>Width and length less than 50 mm Width and length greater than 50 mm</i>	X X	X X
Gebrochene oder fehlende Kett- und Schlußfäden <i>Broken or missing warps and wefts</i>	Drei oder mehr angrenzende Fäden unabhängig von der Länge oder zwei angrenzende Fäden über mehr als 50mm Zwei angrenzende Fäden über weniger als 50 mm <i>Three or more adjacent threads independently of the length, or two adjacent threads over more than 50 mm wo adjacent threads over less than 50 mm</i>	X X	X X
Zu dichte oder lichte Stellen <i>Too tight or loose points</i>	Über 13 mm breit <i>Wider than 13 mm</i>		X
Kantenfehler <i>Flawed selvedge</i>	Stark eingedrückte oder überlappte Webkanten <i>Strongly indented or overlapped selvedges</i>		X
Falten <i>Creasing</i>	Kräuselung oder Falten <i>Curling or folding</i>	X	
Breitenabweichung <i>Deviations in width</i>	Überschreitung der zulässigen Abweichung <i>The max permitted deviation exceeded</i>		X

Fehlerklassifizierung nach DIN 65 247 Teil 2
Fehler im Gewebe sind in der Regel an der Kante mit roten Kennfäden markiert.

Die Gewebe dürfen keine über nachfolgende Tabellen hinausgehende Fehler aufweisen. Bei der Fehlerklassifizierung darf die Gesamtpunktzahl 20 je 100 m² betragen, wobei max. 3 Hauptfehler auftreten dürfen. Hauptfehler zählen 2 Punkte, Nebenfehler 1 Punkt. Je m² werden maximal 2 Fehlerpunkte gezählt, auch wenn mehrere Fehler gleichzeitig auftreten.

*Classification of defects as per DIN 65 247 T2.
The positions of defects in the fabric are generally marked at the edge with red marking threads.
The fabrics must not exhibit any defects other than those listed in the above table. For the classification of defects the total defect points must not exceed twenty per 100 m², whereby the max number of major defects is three. Major defects count two points, minor defects one. Max two defect points are counted for every square metre, even when more defects occur in the same area.*

GLASGEWEBE
HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT


Dr.-Ing. Herbert Funke
 Laboratorium für Konstruktionslehre
 Leiter Prof. Dr.-Ing. W. Jorden



Universität-GH Paderborn

GLASS FABRICS
RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT
Vorgaben:

ρ_{Faser} = 2,6 g/cm³ (spez. Fasergewicht)
 ρ_{Harz} = 1,1 g/cm³ (spez. Gewicht der Harz/Härter-Mischung)

Specifications:

ρ_{fibre} = 2,6 g/cm³ (specific gravity of fibres)
 ρ_{resin} = 1,1 g/cm³ (specific gravity of the resin and hardener mixture)

Die Tabellen enthalten die theoretisch ermittelten Werte für Harzverbrauch, Laminatdicke und Laminatgewicht bei der Verarbeitung der von R&G lieferbaren Glasgewebe.

Bei **ungepreßten Handlaminaten** kann ein **Faseranteil von 35 bis 40 %** erreicht werden. Je nach Fadenzahl und Garnfeinheit des Gewebes und Sorgfalt bei der Verarbeitung können diese Werte aber deutlich variieren. Für Laminatberechnungen liegen von der IDAFLIEG Werkstoffkennwerte vor, die sich bei Geweben mit bidirektional gleicher Fasermenge auf einen Faservolumenanteil von 35 % beziehen.

The tables present theoretical values for the resin consumption, laminate thickness, and laminate weight for the glass fabrics available from R&G.

Uncompressed hand lay-up laminates can exhibit a **fibre volume fraction of 35–40 %**, yet this can vary widely depending on the number of threads, the fabric's yarn number, and the care taken in processing.

Laminate properties can be calculated on the basis of material characteristics obtained from IDAFLIEG. These characteristics apply to fabrics with an equal quantity of fibres along both axes and a fibre volume fraction of 35 %.

Glasgewebe 25 g/m² Bestell-Nr. 190 100-X
Glass fabric 25 g/m² Order no. 190 100-X

Glasgewebe 49 g/m² Bestell-Nr. 190 105-X
Glass fabric 49 g/m² Order no. 190 105-X

Faservolumenanteil <i>Fiber volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i>	25	20	16	13	11	9	7	48	39	31	25	21	17	14
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i>	0,032	0,027	0,024	0,021	0,019	0,017	0,016	0,063	0,054	0,047	0,042	0,038	0,034	0,031
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i>	50	45	41	38	36	34	32	97	88	80	74	70	66	63

Glasgewebe 80 g/m² Bestell-Nr. 190 110-X
Glass fabric 80 g/m² Order no. 190 110-X

Glasgewebe 105 g/m² Bestell-Nr. 190 113-X
Glass fabric 105 g/m² Order no. 190 113-X

Faservolumenanteil <i>Fiber volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i>	79	63	51	41	34	28	23	104	83	67	54	44	36	30
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i>	0,103	0,088	0,077	0,068	0,062	0,056	0,051	0,135	0,115	0,101	0,090	0,081	0,073	0,067
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i>	159	143	131	121	114	108	103	209	188	172	159	149	141	135

8.40



Glasgewebe 110 g/m² Bestell-Nr. 190 114-X
Glass fabric 110 g/m² Order no. 190 114-X

Glasgewebe 163 g/m² Bestell-Nr. 190 115-X / 120-X
Glass fabric 163 g/m² Order no. 190 115-X / 120-X

Faservolumenanteil <i>Fiber volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i> g/m ²	112	89	72	59	48	39	32	161	128	103	84	69	56	46
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i> mm	0,129	0,111	0,097	0,087	0,078	0,070	0,064	0,209	0,179	0,157	0,139	0,125	0,114	0,104
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i> g/m ²	217	194	177	164	153	145	137	324	291	266	247	232	219	209

Glasgewebe 280 g/m² Bestell-Nr. 190 137-X / 138-X
Glass fabric 280 g/m² Order no. 190 137-X / 138-X

Glasgewebe 296 g/m² Bestell-Nr. 190 140-X
Glass fabric 296 g/m² Order no. 190 140-X

Faservolumenanteil <i>Fiber volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i> g/m ²	276	220	178	145	118	97	79	292	233	188	153	125	102	83
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i> mm	0,359	0,308	0,269	0,239	0,215	0,196	0,179	0,379	0,325	0,285	0,253	0,228	0,207	0,190
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i> g/m ²	556	500	458	425	398	377	359	588	529	484	449	421	398	379

Glasgewebe 390 g/m² Bestell-Nr. 190 148-X
Glass fabric 390 g/m² Order no. 190 148-X

Glasrovinggewebe 580 g/m² Bestell-Nr. 190 155-X
Glass roving fabric 580 g/m² Order no. 190 155-X

Faservolumenanteil <i>Fiber volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i> g/m ²	385	306	248	202	165	135	110	573	456	368	300	245	201	164
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i> mm	0,500	0,429	0,375	0,333	0,300	0,273	0,250	0,744	0,637	0,558	0,496	0,446	0,406	0,372
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i> g/m ²	775	696	638	592	555	525	500	1153	1036	948	880	825	781	744

GLASGELEGE

HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT

Glasgewebe 220 g/m² Bestell-Nr. 190 157-X
Glas fabric 220 g/m² Order no. 190 157-X

Faservolumenanteil Fiber volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	217	173	140	114	93	79	62	306	244	197	160	131	107	87
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,282	0,242	0,212	0,188	0,169	0,157	0,141	0,397	0,341	0,298	0,265	0,238	0,217	0,199
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	437	393	360	334	313	299	282	616	554	507	470	441	417	397
Berechnungsdicke Calcul. thickness mm	0,240	0,205	0,180	0,160	0,144	0,133	0,120							

GLASS NON-CRIMP FABRICS

RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT

Glasgelege 310 g/m² biaxial Bestell-Nr. 190 159-X
Glass non-crimp fabric 310 g/m² biaxial Order no. 190 159-X

Bei der Dimensionierung von UD-verstärkten Laminaten werden nur die Fasern in UD-Richtung berücksichtigt. Dieses kommt in der Berechnungsdicke zum Ausdruck, die um den Schußfaseranteil geringer ist als die tatsächliche Laminatstärke.

Only the fibres along the unidirectional axis were considered in the dimensioning of unidirectionally reinforced laminates. This finds expression in the calculated thickness, which is the proportion of wefts less than the actual laminate thickness.

Glasgelege 430g/m² biaxial Bestell-Nr. 190 158-X
Glass non-crimp fabric 430 g/m² biaxial Order no. 190 158-X

Faservolumenanteil Fiber volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	403	321	259	211	173	141	115
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,523	0,448	0,392	0,349	0,314	0,285	0,262
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	811	729	667	619	581	549	523



Foto: Bakelite

Flugzeug-Verkleidungssegmente aus einem GFK-Waben-Sandwich

GRP honeycomb sandwiches as aircraft cowling segments

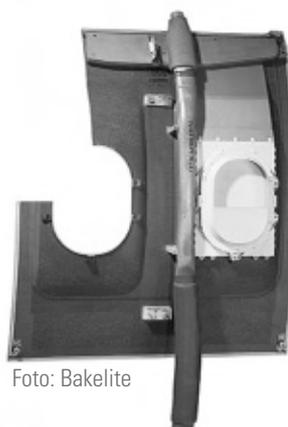


Foto: Bakelite

8.42

GLASMATTEN

HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT

GLASS MATS

RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT

Glasmatte 225 g/m² Bestell-Nr. 190 165-X
Glass mat 225 g/m² Order no. 190 165-X

Glasmatte 450 g/m² Bestell-Nr. 190 170-X
Glass mat 450 g/m² Order no. 190 170-X

Faservolumenanteil <i>Fiber volume fraction</i>	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
Harzverbrauch g/m ² <i>Resin consumpt.</i>	381	286	222	177	143	116	95	762	571	444	354	286	233	190
Laminatdicke mm <i>Lam. thickn.</i>	0,433	0,346	0,288	0,247	0,216	0,192	0,173	0,865	0,692	0,577	0,495	0,433	0,385	0,346
Laminatgewicht g/m ² <i>Lam. weight</i>	606	511	447	402	368	341	320	1212	1021	894	804	736	683	640

Künstlicher Felsen für eine Saunalandschaft aus Glasmatte 450 + 225 g/m² sowie R&G Polyesterharz U 569



Artificial rock for a sauna of a 450 + 225 g/m² glass mat and R&G polyester resin U 569

Innenseite des GFK-UP-Felsens



The inside of the GRP UP rock



GFK-Teich

GRP pond

ARAMIDGEWEBE

HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT



Dr.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter/Supervisor: Prof. Dr.-Ing. W. Jordan

Universität-GH Paderborn

ARAMID FABRICS

RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT

Vorgaben:

ρ_{Faser} = 1,45 g/cm³ (spez. Fasergewicht)
 ρ_{Harz} = 1,1 g/cm³ (spez. Gewicht der Harz/Härter-Mischung)

Specifications:

ρ_{fibre} = 1,45 g/cm³ (specific gravity of the fibres)
 ρ_{resin} = 1,1 g/cm³ (specific gravity of the resin/hardener mixture)

Die Tabellen enthalten die theoretisch ermittelten Werte für Harzverbrauch, Laminatdicke und Laminatgewicht bei der Verarbeitung der von R&G lieferbaren Hochmodul-Aramidgewebe. Bei **ungepreßten Handlaminaten** kann ein **Faseranteil von 35 bis 40 %** erreicht werden. Je nach Fadenzahl und Garnfeinheit des Gewebes und Sorgfalt bei der Verarbeitung können diese Werte aber deutlich variieren.

The tables present theoretical values for the resin consumption, laminate thickness, and laminate weight for the high modulus aramid fabrics available from R&G.

Uncompressed hand lay-up laminates can exhibit a **fibre volume fraction of 35–40 %**, yet this can vary widely depending on the number of threads, the fabric's yarn number, and the care taken in processing.

Aramidgewebe 27 g/m² Bestell-Nr. 190 198-X Aramid fabric 27 g/m² Order no. 190 198-X

Aramidgewebe 36 g/m² Bestell-Nr. 190 199-X Aramid fabric 36 g/m² Order no. 190 199-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	49	39	32	26	21	17	14	64	51	41	33	27	22	18
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,062	0,053	0,046	0,041	0,037	0,033	0,030	0,083	0,071	0,062	0,055	0,050	0,045	0,041
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	76	66	58	52	48	44	40	100	87	77	69	63	58	54

Aramidgewebe 61 g/m² Bestell-Nr. 190 200-X Aramid fabric 61 g/m² Order no. 190 200-X

Aramidgewebe 110 g/m² Bestell-Nr. 190 203-X Aramid fabric 110 g/m² Order no. 190 203-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	108	86	69	57	46	38	31	195	155	125	102	83	68	56
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,140	0,120	0,105	0,093	0,084	0,076	0,070	0,253	0,217	0,190	0,169	0,152	0,138	0,126
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	169	147	130	118	107	99	92	305	265	235	212	193	178	166

8.44

Aramidgewebe 158 g/m² Bestell-Nr. 190 204-X
Aramid fabric 158 g/m² Order no. 190 204-X

Aramidgewebe 170 g/m² Bestell-Nr. 190 205-X
Aramid fabric 170 g/m² Order no. 190 205-X

Faservolumenanteil <i>Fibre volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i> g/m ²	288	229	185	151	123	101	82	301	240	193	158	129	106	86
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i> mm	0,365	0,313	0,273	0,243	0,218	0,199	0,182	0,391	0,335	0,293	0,261	0,234	0,213	0,195
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i> g/m ²	442	384	339	305	278	255	237	471	410	363	328	299	276	256

KOHLEGEWEBE
HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT
CARBON FABRICS
RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT


Dr.-Ing. Herbert Funke
 Laboratorium für Konstruktionslehre
 Leiter/Supervisor: Prof. Dr.-Ing. W. Jorden



Universität-GH Paderborn

Vorgaben:

ρ_{Faser} = 1,78 g/cm³ (spez. Fasergewicht)
 ρ_{Harz} = 1,1 g/cm³ (spez. Gewicht der Harz/Härter- Mischung)

Specifications:

ρ_{fibre} = 1,78 g/cm³ (specific gravity of the fibres)
 ρ_{resin} = 1,1 g/cm³ (specific gravity of the resin/hardener mixture)

Die Tabellen enthalten die theoretisch ermittelten Werte für Harzverbrauch, Laminatdicke und Laminatgewicht bei der Verarbeitung der von R&G lieferbaren Kohlegewebe. Bei **ungepreßten Handlaminaten** kann ein **Faseranteil von 35 bis 40 %** erreicht werden. Je nach Fadenzahl und Garnfeinheit des Gewebes und Sorgfalt bei der Verarbeitung können diese Werte aber deutlich variieren. Für Laminatberechnungen liegen von der IDAFLIEG Werkstoffkennwerte vor, die sich bei Geweben mit bidirektional gleicher Fasermenge auf einen Faservolumenanteil von 35 % beziehen.

The tables present theoretical values for the resin consumption, laminate thickness, and laminate weight for the carbon fabrics available from R&G. **Uncompressed hand lay-up laminates** can exhibit a **fibre volume fraction of 35–40 %**, yet this can vary widely depending on the number of threads, the fabric's yarn number, and the care taken in processing. Laminate properties can be calculated on the basis of material characteristics obtained from IDAFLIEG. These characteristics apply to fabrics with an equal quantity of fibres along both axes and a fibre volume fraction of 35 %.

Kohlegewebe 65 g/m² Bestell-Nr. 190 220-X
Carbon fabric 65 g/m² Order no. 190 220-X

Kohlegewebe 93 g/m² Bestell-Nr. 190 223-X
Carbon fabric 93 g/m² Order no. 190 223-X

Faservolumenanteil <i>Fibre volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch <i>Resin consumpt.</i> g/m ²	98	78	63	51	42	34	28	134	107	86	70	57	47	38
Laminatdicke <i>Lam. thickn.</i> mm	0,127	0,109	0,096	0,085	0,076	0,069	0,064	0,174	0,149	0,131	0,116	0,104	0,095	0,087
Laminatgewicht <i>Lam. weight</i> g/m ²	166	146	131	119	110	102	96	227	200	179	163	150	140	131

7 ARAMID- UND KOHLEGEWEBE ARAMID AND CARBON FABRICS

Kohlegewebe 160 g/m² Bestell-Nr. 190 225-X Carbon fabric 160 g/m² Order no. 190 225-X

Kohlegewebe 200 g/m² Bestell-Nr. 190 229-X Carbon fabric 200 g/m² Order no. 190 229X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	231	184	148	121	99	81	66	294	234	189	154	126	103	84
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,300	0,257	0,225	0,200	0,180	0,163	0,150	0,382	0,327	0,287	0,255	0,229	0,208	0,191
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	391	344	308	281	259	241	226	498	438	393	358	330	307	288

Kohlegewebe 204 g/m² Bestell-Nr. 190 230-X Carbon fabric 204 g/m² Order no. 190 230-X

Kohlegewebe 210 g/m² Bestell-Nr. 190 231-X Carbon fabric 210 g/m² Order no. 190 231-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	294	234	189	154	126	103	84	294	234	189	154	126	103	84
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,382	0,327	0,287	0,255	0,229	0,208	0,191	0,382	0,327	0,287	0,255	0,229	0,208	0,191
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	498	438	393	358	330	307	288	498	438	393	358	330	307	288

Kohlegewebe 245 g/m² Bestell-Nr. 190 235-X Carbon fabric 245 g/m² Order no. 190 235-X

Kohlegewebe 400 g/m² Bestell-Nr. 190 239-X Carbon fabric 400 g/m² Order no. 190 239-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	353	281	227	185	151	124	101	608	484	391	319	261	213	174
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,459	0,393	0,344	0,306	0,275	0,250	0,229	0,745	0,639	0,559	0,497	0,448	0,407	0,373
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	598	526	472	430	396	369	346	1008	884	791	719	661	613	574

Kohlegewebe 140 g/m² unidirektional Bestell-Nr. 190 250-X Carbon fabric 140 g/m² unidirectional Order no. 190 250-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	193	154	124	101	83	70	55
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,251	0,215	0,188	0,167	0,150	0,139	0,125
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	333	294	264	241	223	210	195
Berechnungsdicke Calcul. thickn. mm	0,233	0,200	0,175	0,156	0,140	0,130	0,117



KOHLEGELEGE

HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT

CARBON NON-CRIMP FABRICS

RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT

Kohle/Glas-Gewebe				Carbon-glass fabric			
Vorgaben:				Specifications:			
ρFaser = 1,78 g/cm ³	(spez. Gewicht der Kohlefaser)			ρ _{fiber} = 1,78 g/cm ³	(specific gravity of the carbon fibres)		
ρFaser = 2,60 g/cm ³	(spez. Gewicht der Glasfaser)			ρ _{fiber} = 2,60 g/cm ³	(specific gravity of the glass fibres)		
ρHarz = 1,10 g/cm ³	(spez. Gewicht der Harz/Härter-Mischung)			ρ _{resin} = 1,10 g/cm ³	(specific gravity of the resin/hardener)		

Kohlegelege 80 g/m² unidirektional Bestell-Nr. 190 247-X
Carbon non-crimp fabric 80 g/m² UD Order no. 190 247-X

Kohlegelege 100 g/m² unidirektional Bestell-Nr. 190 251-X
Carbon non-crimp fabric 100 g/m² UD Order no. 190 251-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	115	92	74	70	49	40	33	152	121	98	80	65	53	43
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,150	0,128	0,112	0,109	0,090	0,082	0,075	0,187	0,161	0,141	0,125	0,112	0,102	0,094
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	195	172	154	150	129	120	113	252	221	198	180	165	153	143

Kohlegelege 100 g/m² biaxial Bestell-Nr. 190 252-X
Carbon non-crimp fabric 100 g/m² biaxial Order no. 190 252-X

Kohlegelege 100 g/m² HM Bestell-Nr. 190 248-X
Carbon non-crimp fabric 100 g/m² HM Order no. 190 248-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	152	121	98	80	65	53	43	152	121	98	80	65	53	43
Laminatdicke Lam. thickn. mm	0,187	0,161	0,141	0,125	0,112	0,102	0,094	0,187	0,161	0,141	0,125	0,112	0,102	0,094
Laminatgewicht Lam. weight g/m ²	252	221	198	180	165	153	143	252	221	198	180	165	153	143

Kohlegelege 125 g/m² unidirektional Bestell-Nr. 190 249-X
Carbon non-crimp fabric 125 g/m² UD Order no. 190 249-X

Kohlegelege 160 g/m² biaxial Bestell-Nr. 190 253-X
Carbon non-crimp fabric 160 g/m² biaxial Order no. 190 253-X

Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt. g/m ²	180	143	116	94	77	63	51	231	184	148	121	99	81	66
Laminatdicke Laminate thickn. mm	0,234	0,201	0,176	0,156	0,140	0,128	0,117	0,300	0,257	0,225	0,200	0,180	0,163	0,150
Laminatgewicht Laminate weight g/m ²	305	268	241	219	202	188	176	391	344	308	281	259	241	226

Ausg./Ed. 06.09 Änderungen vorbehalten / Modifications reserved

ARAMID- UND KOHLEGEWEBE

ARAMID AND CARBON FABRICS

Kohlegelege 250 g/m² biaxial Bestell-Nr. 190 256-X
Carbon non-crimp fabric 250 g/m² biaxial Order no. 190 256-X

Kohlegelege 250 g/m² UHM Bestell-Nr. 190 254-X
Carbon non-crimp fabric 250 g/m² UHM Order no. 190 254-X

Faservolumenanteil <i>Fibre volume</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch g/m ² <i>Resin consumpt.</i>	377	300	242	198	162	132	08	316,4	251,9	203,4	165,7	135,6	111,0	90,4
Laminatdicke mm <i>Laminate thickn.</i>	0,468	0,402	0,352	0,312	0,280	0,256	0,234	0,39	0,34	0,29	0,26	0,24	0,21	0,20
Laminatgewicht g/m ² <i>Laminate weight</i>	625	550	490	446	410	380	356	566,4	501,9	453,4	415,7	385,6	361,0	340,4

Kohlegelege 411 g/m² biaxial Bestell-Nr. 190 260-X
Carbon non-crimp fabric 411g/m² biaxial Order no. 190 260-X

Faservolumenanteil <i>Fibre volume fraction</i>	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch g/m ² <i>Resin consumpt.</i>	606	482	398	317	260	212	173
Laminatdicke mm <i>Laminate thickn.</i>	0,787	0,674	0,590	0,524	0,472	0,429	0,393
Laminatgewicht g/m ² <i>Laminate weight</i>	1026	902	809	737	680	632	593



HYBRIDGEWEBE

HARZVERBRAUCH, LAMINATDICKEN UND LAMINAT-GEWICHT

HYBRID FABRICS

RESIN CONSUMPTION, LAMINATE THICKNESS AND LAMINATE WEIGHT



Dr.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Jorden

Universität-GH Paderborn

Die Tabellen enthalten die theoretisch ermittelten Werte für Harzverbrauch, Laminatdicke und Laminatgewicht bei der Verarbeitung der von R&G lieferbaren Hybridgewebe. Bei **ungepreßten Handlaminaten** kann ein **Faseranteil von 35 bis 40 %** erreicht werden. Je nach Fadenzahl und Garnfeinheit des Gewebes und Sorgfalt bei der Verarbeitung können diese Werte aber deutlich variieren.

The tables present theoretical values for the resin consumption, laminate thickness, and laminate weight for the hybrid fabrics available from R&G. **Uncompressed hand lay-up laminates** can exhibit a **fibre volume fraction of 35–40 %**, yet this can vary widely depending on the number of threads, the fabric's yarn number, and the care taken in processing.

Kohle/Aramid-Gewebe				Carbon/Aramid fabric			
Vorgaben:				Specifications:			
ρFaser	= 1,78 g/cm ³	(spez. Gewicht der Kohlefaser)		ρfibre	= 1,78 g/cm ³	(specific gravity of the carbon fibres)	
ρFaser	= 1,45 g/cm ³	(spez. Gewicht der Aramidfaser)		ρfibre	= 1,45 g/cm ³	(specific gravity of the aramid fibres)	
ρHarz	= 1,1 g/cm ³	(spez. Gewicht der Harz/Härter-Mischung)		ρresin	= 1,1 g/cm ³	(specific gravity of the resin/hardener mixture)	

Kohle-/Aramidgewebe 68 g/m² Bestell-Nr. 190 208-X
Carbon/Aramid 68 g/m² Order no. 190 208-X

Kohle-/Aramidgewebe 188 g/m² Bestell-Nr. 190 210-X
Carbon/Aramid 188 g/m² Order no. 190 210-X

	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %		30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %		30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt.	106	84	68	55	45	37	30		295	235	190	155	126	103	84
Laminatdicke Laminate thickn.	0,138	0,118	0,103	0,092	0,083	0,075	0,069		0,383	0,329	0,287	0,256	0,230	0,209	0,192
Laminatgewicht Laminate weight	174	152	136	123	113	105	98		483	423	378	343	314	291	272

C-Faseranteil: 60 %, A-Faseranteil: 40 %, mittl. spez. Fasergewicht: 1,65 g/cm³
Carbon fibre fraction: 60 %, aramid fibre fraction: 40 %, fibres' mean specific gravity: 1,65 g/cm³

C-Faseranteil: 56 %, A-Faseranteil: 44 %, mittl. spez. Fasergewicht: 1,65 g/cm³
Carbon fibre fraction: 56 %, aramid fibre fraction: 44 %, fibres' specific mean gravity: 1,65 g/cm³

Kohle-/Aramidgewebe 210 g/m² Bestell-Nr. 190 212-X
Carbon/aramid fabric 210 g/m² Order no. 190 212-X

	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Faservolumenanteil Fibre volume fraction	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Harzverbrauch Resin consumpt.	326	260	210	171	140	114	93
Laminatdicke Laminate thickn.	0,424	0,364	0,318	0,283	0,255	0,231	0,212
Laminatgewicht Laminate weight	536	470	420	381	350	324	303

C-Faseranteil: 61 %, A-Faseranteil: 39 %, mittl. spez. Fasergewicht: 1,65 g/cm³
Carbon fibre fraction: 61 %, aramid fibre fraction: 39 %, fibres' mean specific gravity: 1,65 g/cm³

Die Verarbeitung mit Hilfe einfacher Tränkvorrichtungen

Rovings sind unidirektionale, endlose Faserstränge, die auf Spulen geliefert werden. Aus Rovings lassen sich Profile ziehen, Rohre und Behälter wickeln und Verstärkungen, z.B. zur Krafteinleitung laminieren.

Zum Wickeln und Strangziehen werden die **Rovingstränge** durch ein **Harzbad** gezogen. Kleinere Mengen lassen sich auch mittels Pinsel auf einer PE-Folie vortränken. Für größere Bauteile ist eine **Rovingtränkvorrichtung** erforderlich.

Die Qualität der Anlagen reicht von einfachsten Abzugvorrichtungen, die sich z.B. aus kleinen Kunststoffflaschen herstellen lassen bis zu aufwendigen, beheizbaren Tränkbädern.

Für eine hohe **Güte der Bauteile** sollte auf folgende Punkte geachtet werden:

- Gleichmäßige, harzarme Tränkung des Rovings
- Gestrecktes Einlegen, evtl. unter Vorspannung

Processing with the aid of simple impregnating systems

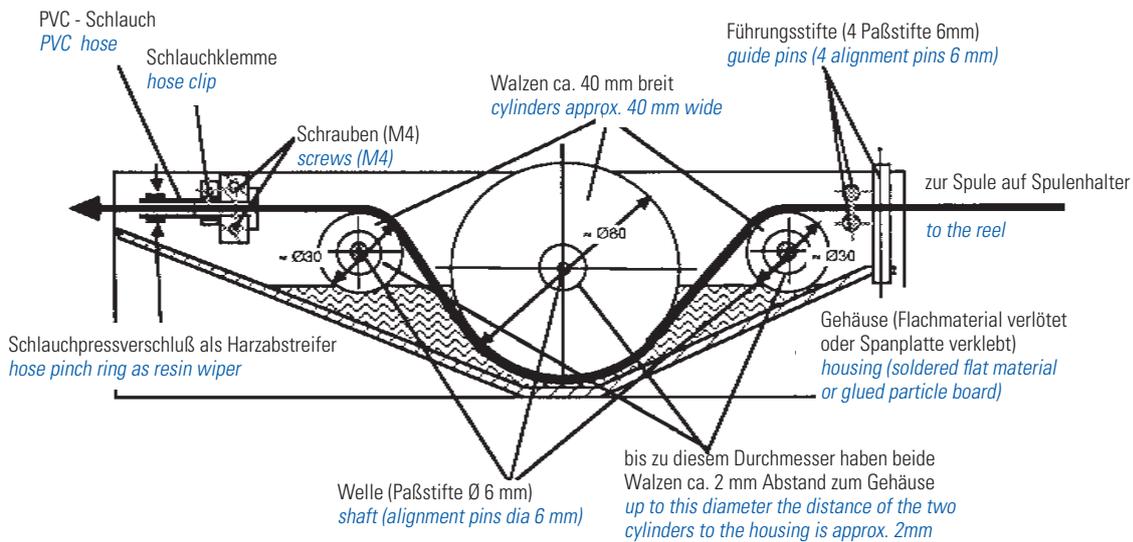
Rovings are unidirectional, continuous fibres that are delivered on reels. Rovings are used to draw sections, wind pipes and receptacles, and laminate reinforcements, e.g. force transfer points.

When **rovings** are used for winding and pultrusion, they are first drawn through a **resin bath**. Smaller quantities can also be pre-impregnated with a brush on a PE film. Larger components require a **roving impregnating system**.

The quality of these systems extends from the simplest dipping device that can be made, for example, from small plastic bottles, to complex, heated impregnating baths.

A high **quality** can be obtained for the **component** only when the following points are observed.

- The roving must be impregnated uniformly in a low resin content.
- The roving must be stretched during impregnation, if necessary under tension.



Dreiblatt Luftschaube, mit Kohlerovings verstärkt
Three-bladed propeller reinforced with carbon rovings



Foto: Bakelite

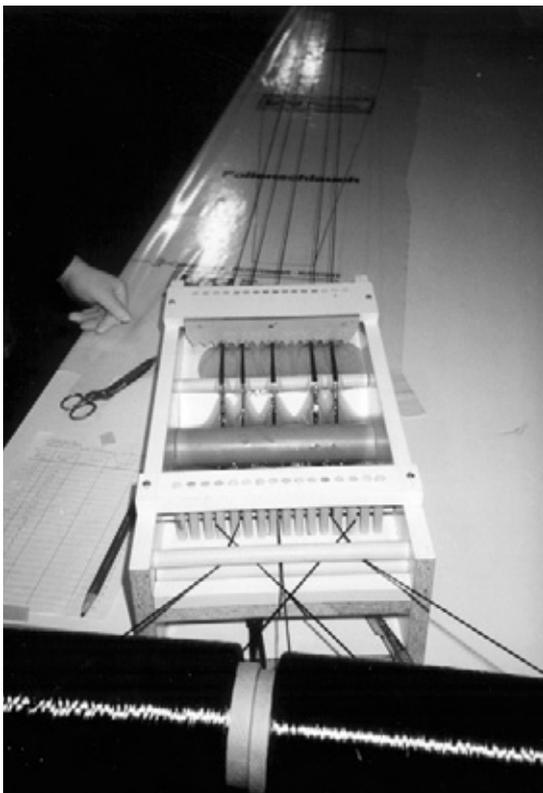
Wickelautomat

Automatic winding machine

Wickelteile



Winding parts



Einfache preiswerte Eigenkonstruktion einer Rovingtränkvorrichtung für den Flugzeugbau

Simple, low-priced personal invention of a roving impregnating system for the construction of a light plane

FÜLLSTOFFARTEN UND ANWENDUNGEN

Füllstoffe sind Zusatzstoffe, die bestimmte Eigenschaften der Harze verändern, beispielsweise die Härte und Abriebfestigkeit, die chemischen, mechanischen, thermischen und elektrischen Werte. Die Vernetzung des Bindemittels (Harz) sollte durch die Zugabe von Füllstoffen nicht behindert werden. Es ist deshalb besonders darauf zu achten, daß die Zusätze keine Feuchtigkeit enthalten. Dies gilt vor allem für Naturprodukte wie Holzmehl oder Baumwollflocken. Füllstoffe unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung, Struktur und Dichte.

Zusammensetzung

Organische Füllstoffe sind z.B. die Naturfasern Baumwolle, Jute, Hanf und Sisal. Häufig verwendete anorganische Produkte sind Glasfasern, Glashohlkugeln (Glass-Bubbles) oder Metallpulver. Die **Struktur der Füllstoffe** bestimmt neben den spezifischen Füllstofffestigkeiten die Eigenschaften der Formstoffe.

Faserförmige Füllstoffe

... sind z.B. Glasfaserschnitzel und Baumwollflocken. Sie verbessern die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit und das Bruchverhalten. Das Gewicht der gefüllten Harzmassen erhöht sich, die Fließfähigkeit wird verringert.

Pulverförmige Füllstoffe

... sind z.B. Quarzmehl, Talkum und Kreide. Je nach Härte ergeben sie sehr abrieb- und verschleißfeste Harzmassen (Quarzmehl) oder aber leicht schleifbare Endprodukte (Talkum, Kreide).

Kugelförmige Füllstoffe

... wie Glass Bubbles erhöhen die Schlagzähigkeit und Druckfestigkeit, jedoch nicht die Zugfestigkeit. Durch den Kugellagereffekt verbessern sie in geringen Zusatzmengen die Fließfähigkeit der Harze.

Thixotropiermittel

... werden zum Eindicken von Harzen benötigt. Es handelt sich um hochdisperse Kieselsäuren mit hoher spezifischer Oberfläche. Praktisch alle Deckschichtharze (Gelcoats) auf Epoxyd- und Polyesterharzbasis enthalten Thixotropiermittel, um ein Abfließen an senkrechten und geneigten Flächen zu verhindern.

Farbpigmente

Auch Farben sind Füllstoffe. Das Einmischen ist sehr einfach, da im Regelfall fertige Pigmentpasten verfügbar sind. Das qualitativ oft schlechtere Selbstanreiben trockener Pigmente entfällt.

Flammschutzmittel

Alle Füllstoffe beeinflussen das Brandverhalten mehr oder weniger. Als ausgesprochene Brandschutzausrüstung gelten Zusätze von Antimontrioxid, Aluminiumhydroxid und halogenierten Verbindungen.



Aufbringen gefüllter Harze mit Pinsel/Spritztüte

FILLER TYPES AND APPLICATIONS

Fillers are additives that modify certain properties of resins, for example the hardness and abrasion resistance or the chemical, mechanical, thermal, and electrical properties. The addition of fillers should not inhibit the cross-linking of the binder (resin). So it is especially important to make sure that the additives do not contain any moisture. This applies above all to natural products such as wood flour or cotton flock. Fillers differ according to their composition, structure, and density.

Composition

*Organic fillers are, for example, the natural fibres cotton, jute, hemp, and sisal. Frequently used inorganic products are glass fibres, glass bubbles, and metal powder. The **filler's structure** determines not only the specific strength of the filler, but the properties of the moulded materials.*

Fibrous fillers

(chopped glass fibre strands, cotton flock, etc.) These enhance the tensile, compressive, and flexural strengths as well as the fracture behaviour. The weight of filled resin compounds is increased, the flowability reduced.

Powdery fillers

(quartz powder, talc, chalk, etc.) Depending on their hardness, these fillers yield resin compounds with high abrasion and wear resistance (quartz powder) or end products with good grinding properties (talc, chalk).

Spherical fillers

(glass bubbles, etc.) These enhance the impact and compressive strength, but not the tensile strength. Owing to their ball-bearing effect they improve the flowability of resins when added in low quantities.

Thixotropy-enhancing agents

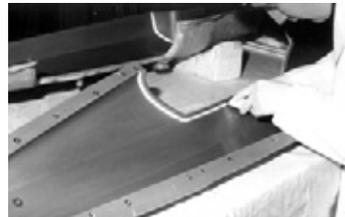
These are highly disperse silicic acids with a high specific surface area and are needed to inspissate resins. Virtually all overlay resins (gel coats) based on epoxy or polyester resins contain thixotropy-enhancing agents which prevent the compound from running off vertical and inclined surfaces.

Pigments

Also colouring agents are fillers. In general, pigment pastes are available as ready-made mixtures, so it's just a case of simply adding them to the resin compound. As a result, there is no longer any risk of the inferior quality often obtained with the manual application of dry pigments.

Flame retardants

All fillers more or less affect the burning behaviour. Exceptional flame retardants are given by additives of antimony trioxide, aluminium hydroxide, and halogenated compounds.



Filled resins being applied with brush and piping bag

Vergleich der Dichte typischer Harzfüllstoffe

Densities of typical resin fillers compared

Dichtevergleich	Einheit	Wert	Density comparison	Unit	Value
Glas-Bubbles	g/cm ³ /20 °C	0,21 / 0,12	Glass bubbles	g/cm ³ /20 °C	0,21 / 0,12
Talkum	g/cm ³ /20 °C	2,7	Talc	g/cm ³ /20 °C	2,7
Holzmehl	g/cm ³ /20 °C	1,2	Wood flour	g/cm ³ /20 °C	1,2
Glasfasern	g/cm ³ /20 °C	2,4	Glass fibres	g/cm ³ /20 °C	2,4
Baumwollflocken	g/cm ³ /20 °C	1,54	Cotton flock	g/cm ³ /20 °C	1,54
Alupulver	g/cm ³ /20 °C	2,7	Aluminium powder	g/cm ³ /20 °C	2,7

Anwendungen

Deckschichtharze (Gelcoats)

Thixotropiermittel und evtl. Farbpaste

Formenharze

Thixotropiermittel und Farbpaste, je nach gewünschter Härte und Wärmeleitfähigkeit Titandioxid, Quarzmehl, Stahl- und Alupulver.

Faserspachtel

Glasfasern mit Thixotropiermittel

Feinspachtel

Thixotropiermittel mit Kreide/Talkum

Leichtspachtel

Micro-Ballons und Thixotropiermittel

Metallspachtel

Thixotropiermittel mit Metallpulver, meist Aluminium

Kupplungsschichten im Formenbau

Glasfaser schnitzel mit Baumwollflocken (1:1)

Kleber

Thixotropiermittel, für dickere Klebefugen Baumwollflocken

Rieselfähige Preßmassen

Baumwollflocken

Wärmeleitfähige Gießmassen

Thixotropiermittel und Alu-Pulver

syntaktische Schäume

leichte, hohle Füllstoffe wie z.B. Microhohlkugeln (Glas-Bubbles)

Applications

Overlay resins (gel coats)

Thixotropy-enhancing agent and possibly colour paste

Mould resins

Thixotropy-enhancing agent and colour paste, for a specific hardness and thermal conductivity, titanium dioxide, quartz powder, steel or aluminium powder.

Fibre pastes

glass fibres with thixotropy-enhancing agent

Fine pastes

Thixotropy-enhancing agent with chalk or talc

Light pastes

Microbubbles and thixotropy-enhancing agent

Metal pastes

Thixotropy-enhancing agent with metal powder, mostly aluminium

Coupling layers in mould construction

Chopped glass fibre strands with cotton flock (1:1)

Adhesives

Thixotropy-enhancing agent, cotton flock for thicker glued bonds

Free-flowing moulding compounds

Cotton flock

Heat-conductive pouring compounds

Thixotropy-enhancing agent and aluminium powder

Syntactic foams

Lightweight, hollow fillers such as microbubbles (glass bubbles)

STÜTZSTOFFE, HALBZEUGE

SANDWICH MATERIALS, SEMI-FINISHED PRODUCTS

HÖCHSTLEISTUNGEN

DURCH WABENSANDWICHBAUWEISE



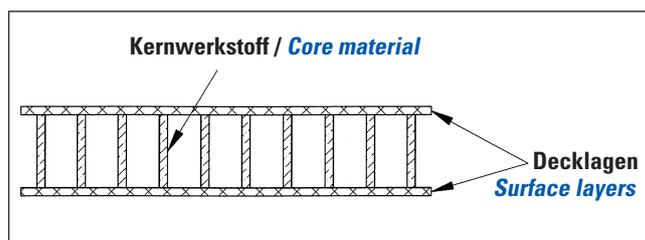
Dr.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter/Supervisor: Prof. Dr.-Ing. W. Jordan



Universität-GH Paderborn

Immer weiter steigende Anforderungen an technische Produkte erfordern den Einsatz neuer, leistungsfähigerer Werkstoffe. Überall dort, wo hohe Leistung, d.h. **hohe mechanische Festigkeit** und **Steifigkeit bei geringem Gewicht** gefordert wird, stößt man mit den traditionellen Werkstoffen häufig an unüberwindbare Leistungsgrenzen. Erst neue Werkstoffe, hier, insbesondere Faserverbundwerkstoffe erweitern Leistungshorizonte in vielen Anwendungsbereichen. So haben Faserverbundwerkstoffe in den letzten Jahren gerade in der Luft- und Raumfahrt, aber auch in manchen Bereichen des Spitzensportes einen triumphalen Siegeszug vollziehen können. Ob Space-Shuttle oder Rundfunksatellit, ob Formel 1-Rennwagen oder Abfahrtski, immer öfter sind Höchstleistungen ohne Faserverbundwerkstoffe kaum noch vorstellbar. Dabei müssen diese Werkstoffe nicht nur ein Privileg für Ausnahmeanwendungen sein, denn auch viele scheinbar ganz alltägliche Anforderungen sind nur durch Höchstleistungen zu erfüllen. Ein Beispiel hierfür sind die steigenden Anforderungen, wenn es darum geht, die **Umwelt zu schonen** und Ressourcen zu sparen. Nahezu im gesamten Bereich des Transportwesens ist Gewichtseinsparung gleichzusetzen mit **Energieeinsparung**. Die konsequente Umsetzung des Leichtbaus kann hier die Umwelt gleich zweifach entlasten: Weniger Materialeinsatz in den Transportmitteln schont Ressourcen und senkt den Energieverbrauch während der gesamten Einsatzdauer. Die einfachste Art, Gewicht zu sparen ist, die **Wandstärke** von Bauteilen auf das Mindestmaß zu reduzieren, welches zur Kraftübertragung erforderlich ist. Gerade bei großflächigen Schalenstrukturen wie Karosseriebauteilen, Verkleidungen, Abdeckungen u.ä. ist ein sehr großes Einsparpotential vorhanden, da die ebenen Belastungen hier im allgemeinen gering sind. Um eine ausreichende **räumliche Steifigkeit** (Beulsteifigkeit) zu erhalten, werden solche Schalenelemente dennoch unter zumeist viel zu hohem Materialeinsatz mit wesentlich dickerer Wandstärke ausgeführt. Die Leichtbaulösung zu diesem Dimensionierungsproblem lautet schlicht und einfach: **Sandwichbauweise**. Das Prinzip einer **Sandwichbauweise** beruht darauf, daß zwischen zwei dünnen Decklagen ein **leichtes, druckfestes Kernmaterial** eingebracht wird. Dadurch kann bei geringem Materialeinsatz und minimalem Gewicht eine große Wandstärke realisiert werden.

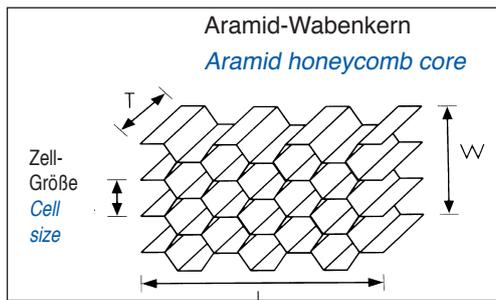
Der leichte, druckfeste Kernwerkstoff hat die Aufgabe, die beiden dünnen Decklagen auf Abstand zu halten. Dadurch wird eine große effektive Wandstärke bei geringem Gewicht erreicht.



The lightweight, compression-resistant core material acts as a spacer between the two thin surface layers. The result is a large effective wall thickness of low weight.

HEAVY-DUTY APPLICATIONS

WITH HONEYCOMB SANDWICH CONSTRUCTIONS



Ever increasing demands placed on engineering products can be fulfilled only by new, more efficient materials. Wherever the demand is for high efficiency, i.e. **high mechanical strength and rigidity coupled with low weight**, the traditional materials often come up against their maximum performance limits. Only the new materials, in particular fibre composites, have succeeded in expanding the performance limits in many fields of application. For example, fibre composites have made triumphant progress over the last few years not only in exclusive

aerospace applications, but also in some areas of top-level sports. Whether space shuttles or broadcasting satellites, Formula 1 racing cars or downhill racing skis - without fibre composites the maximum attainable performance will be virtually impossible in an increasing number of cases.

However, these materials do not have to be the privilege of exceptional applications - also apparently everyday requirements can be fulfilled only with maximum-performance materials. One example concerns the increasing demands placed on the **protection of the environment** and the economic utilisation of resources. In virtually all areas of transportation, savings in weight are equated with **savings in energy**. The consistent integration of lightweight structures affords a twofold contribution towards the protection of the environment: less use of material in means of transport minimises the consumption of both resources and energy over the whole service life.

The simplest method of saving weight is to reduce the **wall thickness** of components to the absolute minimum still able to transfer the applied forces. In particular, one extremely high savings potential is found in large-area shell structures such as body parts, panelling, covers, etc., whose surface loading is generally very low. Nevertheless, these shell elements must be designed with adequate **rigidity along all three axes** (dent resistance) - in most cases with too much material in considerably thicker walls. The solution offered by lightweight engineering to this design problem is simple: **sandwich constructions**. The principle of sandwich constructions involves a **lightweight, compression-resistant core material** placed, or sandwiched, between two thin surface layers. The result is a large wall thickness of little material and minimised weight.

Als Deckschichtmaterialien für eine solche Wabenbauweise sind besonders dünne GFK-Laminat geeignet. Je nach Anforderungsprofil können natürlich auch SFK- oder CFK-Laminat verwendet werden. Beim Kernwerkstoff werden die besten Ergebnisse mit **Aramid-Wabenkernen** erzielt. Sie sind anderen Stützstoffen wie Balsaholz und Schaumstoffen aufgrund des geringeren Gewichtes, der höheren mechanischen Festigkeit und der guten Verklebbarkeit deutlich **überlegen**. Außerdem sind Aramid-Wabenkerne mit unterschiedlichen Zelloberdurchmessern und in unterschiedlichen Raumgewichten erhältlich, so daß durch eine gezielte Auswahl ein maßgeschneiderter Kernwerkstoff für jede Anwendung bereitsteht. Lagermäßig ist von R&G der Wabenkern mit einem **Zelloberdurchmesser von 3,2 mm** lieferbar. Die besonderen Eigenschaften dieses Aramid-Wabenkernes sind:

- **Geringe Dichte** ab 29 g/dm³
- **Hohe Druckfestigkeit** von mindestens 0,54 N/mm²
- **Hohe Schubfestigkeit** von mindestens 0,56 N/mm² (L-Richtung)
- **Sehr gute Verklebbarkeit** mit faserverstärkten Kunststoffen
- **Hohe Drapierfähigkeit**

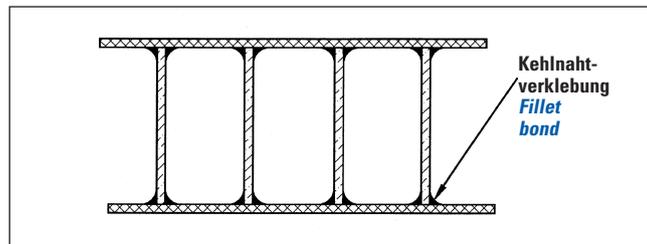
Aufgrund ihrer Bienenwabenstruktur werden diese Wabenkerne auch als **Honeycomb** bezeichnet. Grundstoff für die Herstellung ist **Nomex®-Papier**, in dem Aramidfasern mit Phenolharz gebunden sind. Aramid-Wabenkerne können besonders gut zur Versteifung großflächiger faserverstärkter Kunststoffbauteile eingesetzt werden. Wichtig ist hierbei insbesondere eine gute Verklebung mit den Decklaminaten. Gerade wegen ihrer papierartigen Struktur des Grundstoffes lassen sich die Aramid-Wabenkerne besonders gut mit faserverstärkten Kunststoffen verkleben. Beim Verkleben mit dünnflüssigen Laminierharzen saugt der Wabenkern das Harz an, und es bildet sich eine **Kehlhaftverklebung** aus, die für eine sehr gute Verbindung zwischen Wabenkern und Decklaminate sorgt.

For these honeycomb designs, thin GRP laminates are a particularly suitable material for the surface layers. Of course, SRP or CRP laminates can also be used, depending on the requirements.

*In the case of the core material, the best results are obtained with **aramid honeycomb cores**. Their lower weight, greater mechanical strength, and good bonding properties render them clearly **superior** to other support materials such as balsa wood or foams. Moreover, aramid honeycomb cores are available in a range of cell diameters and densities, facilitating the design of the optimal sandwich construction for every application. R&G stocks a honeycomb core with a **cell diameter of 3.2 mm**. The particular properties of this aramid honeycomb core are:*

- **Low density** from 29 g/dm³
- **High compressive strength** from min 0.54 N/mm²
- **High shear strength** from min 0.56 N/mm² (longitudinal direction)
- **Very good bonding properties** with fibre-reinforced plastics
- **High drapability**

*Honeycomb cores get their name from the hexagonal structure of their cells. The parent substance for their manufacture is **Nomex® paper**, in which aramid fibres are embedded in phenolic resin. Aramid honeycomb cores are ideal as stiffening materials on large-area fibre-reinforced plastic components. Particularly important here is a good bonding affinity to the surface laminates. It is especially the paper-like structure of the parent substance that promotes bonding between aramid honeycomb cores and fibre-reinforced plastics. Low-viscosity laminating resins penetrate the honeycomb core where they form a highly effective **fillet bond** between the honeycomb core and surface laminate.*



Erst durch Ausbildung einer Kehlhaftverklebung wird eine optimale Verbindung zwischen Wabenkern und Deckschicht erreicht.

Resin fillets effect the optimal bonding between the honeycomb core and the surface layer.

■ **Welche Bauteile lassen sich in Wabensandwichbauweise herstellen?**

Die Vorteile der Wabensandwichbauweise kommen besonders bei **großflächigen Bauteilen**, die eine räumliche Versteifung erfordern, zur Geltung. Große Schalenelemente können hierbei ganzflächig eine glatte Außenfläche aufweisen. Eine zusätzliche räumliche Versteifung durch Kanten und Sicken, wie bei GFK-Bauteilen sonst üblich, ist hier nicht erforderlich. Allerdings sollten Bauteile in Wabensandwichbauweise über möglichst große **Rundungs- und Wölbungsradien** verfügen, da das Verpressen des Wabenkernes in Ecken und Kanten recht schwierig ist.

■ **What components can be manufactured as honeycomb sandwich structures?**

*The benefits of honeycomb sandwich construction are particularly effective on large-area components that must be stiffened along all three axes. These large shell elements can exhibit a smooth surface over the whole of their exposed side. Additional stiffening in the form of edges and beads, the usual practice with GRP components, is unnecessary here. Nevertheless, honeycomb sandwich components should exhibit the largest possible **positive and negative radii** so that the honeycomb core can be pressed into corners and edges without difficulty.*

Welche Materialkombinationen sind für welche Bauteile geeignet?

Für die Decklamine sind unterschiedliche Materialkombinationen möglich, die mit dem entsprechenden Wabenkern abgestimmt werden sollten. Für jedes Bauteil ist deshalb eine individuelle Gewebeauswahl erforderlich, wenn man optimale Ergebnisse erzielen möchte. Zur Erleichterung dieser Auswahl dienen die folgenden Kriterien:

- Bei **Hohlkörpern**, die keine glatten Innenflächen erfordern (z.B. Rumpfe, Tragflächen, Abdeckungen etc.), hat es sich als günstig erwiesen, das **innere Decklaminat** schwächer als das äußere Decklaminat auszuführen. Dies gilt insbesondere dann, wenn diese Innenflächen keiner Stoß- oder Kratzbeanspruchung ausgesetzt sind.
- In den meisten Fällen sind **GFK-Decklamine** völlig ausreichend. Eine höhere Beulsteifigkeit läßt sich einfacher und preiswerter durch die Wahl eines dickeren Wabenkernes als durch die höhere Steifigkeit eines **CFK-Decklaminates** erzielen.
- Bei **extremen Anforderungen** an die **Steifigkeit** in Sandwichebene, an die Wechselfestigkeit bei schwingender Beanspruchung oder an die Dimensionsstabilität bei unterschiedlichen Temperaturen, werden mit **CFK-Deckschichten** die besten Resultate erzielt. Außerdem bietet CFK gegenüber den GFK-Deckschichten einen geringen Gewichtsvorteil.
- Die **größte Gewichtseinsparung** wird mit Aramid-Deckschichten erreicht. Zudem hat Aramid eine sehr hohe Schlagzähigkeit, so daß mit Aramid-Deckschichten die ohnehin schon sehr hohe Energieaufnahme des Sandwiches im Crashfall nochmals deutlich gesteigert werden kann. Zu berücksichtigen sind hier jedoch die Delaminationsgefahr bei Aramidlaminaten sowie die Schwierigkeiten, die bei der Verarbeitung von Aramid auftreten können.

Wie dick sollten Decklamine und Wabenkern sein?

Die Decklamine müssen alle Belastungen in Ebenenrichtung aufnehmen können. Diese Belastungen sind bei Schalenbauteilen im allgemeinen gering, so daß häufig nur **sehr dünne Decklamine** erforderlich sind. Damit sich bei sehr dünnen Decklaminaten die Wabenstruktur nicht auf der Außenseite abzeichnet, ist hier jedoch eine Laminatmindeststärke erforderlich. Erfahrungsgemäß sollte das Verhältnis von Laminatstärke zu Wabenzelldurchmesser von 1/30 nicht deutlich unterschritten werden.

Das bedeutet:

Bei dem Standardwabenkern mit einem Zelldurchmesser von 3,2 mm ist eine Laminatstärke für das äußere Decklaminat von mindestens **0,1 mm** erforderlich. Diese wird beispielsweise mit zwei Lagen 49 g/m² oder mit einer Lage 105 g/m² Glasgewebe erreicht. Diese Lamine haben sich bei kleineren Bauteilen wie Modellflugzeugrümpfen und Tragflächen bestens bewährt. Für das innere Decklaminat reichte in diesen Fällen sogar ein einlagiges Laminat aus 49 g/m² Glasgewebe aus.

Als Faustregel gilt: Je flacher eine Form ist, desto einfacher lassen sich darin Wabensandwichbauteile herstellen.



A general rule of thumb is the flatter the component, the easier its manufacture from honeycomb structures

Which material combinations are suitable for which components?

For the surface laminates, there are various material combinations possible that should be matched to the respective honeycomb core. Consequently, every component requires a specific fabric if the optimal results are to be obtained. The following criteria simplify the correct choice of fabric.

- If **hollow bodies** do not require a smooth inner surface (e.g. hulls, wings, covers, etc.), an economical procedure applies a thinner **inner surface laminate** than the outer surface laminate. This is particularly beneficial when the inner surfaces are not subjected to impacts or scratches.
- In most cases, **GRP surface layers** are completely adequate. Greater dent resistance can be obtained more easily and more economically with a thicker honeycomb core than with the higher rigidity of a **CRP surface laminate**.
- If **extreme demands** are placed on the **rigidity** in the sandwich plane, on the cycling strength under dynamic loading, or on the dimensional stability at varying temperatures, the best results are obtained with **CRP surface layers**. In addition, CRP has the advantage of a lower weight than GRP surface layers.
- The **largest savings in weight** are obtained with aramid surface layers. In addition, aramid exhibits a very high impact strength, which it imparts to the sandwich structure, enhancing even further its energy absorption properties in collision situations. The drawbacks to be considered here, though, are aramid's tendency to delaminate and the potential difficulties involved when aramid is processed.

How thick should the surface laminates and honeycomb core be?

The surface laminates must be able to absorb all the loads applied parallel to their surfaces. In the case of shell structures, these loads are generally low, so that in most cases only **very thin surface layers** are sufficient. The honeycomb structure, however, can show through very thin surface laminates, so these laminates must have a certain minimum thickness. Experience has shown that the ratio of laminate thickness to honeycomb cell diameter should not be less than 1:30.

Or:

The standard honeycomb core with a cell diameter of 3.2 mm requires a minimum outer surface laminate thickness of **0.1 mm**. This is obtained, for example, with two layers of 49 g/m² or with one layer of 105 g/m² glass fabric. These laminates have proved highly successful in smaller components such as model fuselages and wings. In these cases, only a single laminate of 49 g/m² glass fabric is sufficient for the inner surface.

Mit einer Wabenkernstärke von 2 mm sind selbst Rumpfe von größeren Flugmodellen noch um ein Vielfaches druck- und beulsteifer gegenüber jeder anderen Bauweise. Die nachstehende Tabelle zeigt einige Beispiele für die Werkstoffauswahl bei Wabensandwichbauteilen. Die Angaben sind als grobe Anhaltswerte für die Dimensionierung von Decklaminaten und Wabenkernen zu verstehen. Ausgangsbasis sei hier immer ein Wabenkern mit einem Zelldurchmesser von 3,2 mm.

Wie können Kräfteinleitungen gestaltet werden?

Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Gestaltung von **Kräfteinleitungen** erforderlich. Belastungen müssen auf direktem Wege in die Decklaminat eingeleitet werden. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Kräfte sollten möglichst als **Schubbelastung in Ebenenrichtung** in das Sandwich eingeleitet werden. Im Bereich der Kräfteinleitung wird der Wabenkern mit einem Harz-Microballons-Gemisch aufgefüllt. Je nach Höhe der Belastung werden die Decklaminat ggf. lokal mit zusätzlichen Gewebelagen verstärkt.
- Zur Einleitung von **Momenten** oder **Kräften** senkrecht zur Sandwichebene ist in den meisten Fällen eine geeignete Anordnung von Spanten, Rippen oder ähnlichen Einbauten erforderlich. Bei Stoßbelastungen mit unterschiedlichen Belastungsrichtungen hat es sich zudem als günstig erwiesen, das Wabensandwich im Bereich der Kräfteinleitung durch ein verstärktes Volllaminat zu ersetzen. Durch die bessere Verformbarkeit ist hier eine höhere Energieaufnahme des Volllaminates möglich.

When the honeycomb core is 2 mm thick, even the fuselages of larger model aircraft exhibit a far greater compression and dent resistance than those constructed with other methods. The following table gives a number of examples of the correct choice of materials for honeycomb sandwich components. The listed values are intended as approximate values for the dimensioning of surface laminates and honeycomb cores. All values are based on a honeycomb core with a cell diameter of 3.2 mm.

How can the transfer of forces be designed?

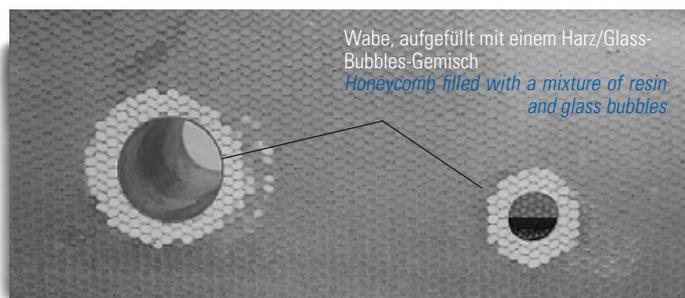
*Special attention must be paid to how the **structure transfers forces**. If all loads are to be transferred directly into the surface laminates, the following points must be noted.*

- *Forces should be transferred as far as possible as **shear forces parallel to the sandwich plane**. Near the force transfer point the honeycomb core is filled with a mixture of resin and microbubbles. Depending on the intensity of loading, additional fabric layers may have to be applied to stiffen the surface laminates or the force transfer points.*
- *The transfer of **bending moments** or **forces** perpendicular to the sandwich plane requires in most cases a suitable arrangement of frames, ribs, or similar structures. In addition, should the honeycomb sandwich be subjected to impacts from varying directions, it has proved practical to replace the honeycomb structure at the force transfer point with a reinforced solid laminate. Owing to the better deformability at this point, the solid laminate exhibits a far higher energy absorption capacity.*



Das F3A-X Kunstflugmodell ist komplett in Wabensandwichbauweise aufgebaut. Mit Deckschichten aus 49 g/m²-Glasgewebe und einem 2 mm Wabenkern wird eine hohe Steifigkeit bei geringstem Gewicht erzielt.

The F3A-X aerobatic model is built completely of honeycomb sandwich structures. The surface layers of 49 g/m² glass fabric and a 2 mm honeycomb core yield high rigidity with the minimum weight.



Kräfteinleitung als ebene Schubbelastung bei der Tragflügelsteckung eines Modellflugzeuggruppfes

Forces are transferred as shear loads across the two wing connectors on a model fuselage

ÜBERSICHT STÜTZSTOFFE

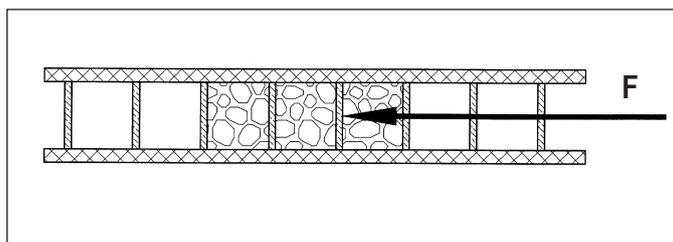
OVERVIEW SANDWICH MATERIALS

Fläche einer Halbschale <i>Surface area of a semi-monocoque</i>	Bauteil-Beispiel <i>Example component</i>	Art der Anforderung <i>Requirements</i>	Äußeres Decklaminat <i>Outer surface laminate</i>	Wabenkernstärke <i>Honeycomb core thickness</i>	Inneres Decklaminat <i>Inner surface laminate</i>	ca. Sandwichgewicht* <i>approx. sandwich weight*</i>
< 0,4 m ²	Modellflugzeugrumpf <i>model fuselage</i>	geringe Belastung <i>low loading</i>	2x 49 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i>	2 mm	1 x 49 g/m ² Glasgewebe <i>glass fabric</i>	350 g/m ²
< 0,8 m ²	sehr großer Modellflugzeugrumpf <i>very large model fuselage</i>	mäßige Belastung <i>moderate loading</i>	1 x 105 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i> 1 x 49 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i>	2 mm	1 x 49 g/m ² Glasgewebe <i>glass fabric</i>	440 g/m ²
< 1,5 m ²	Motorhaube eines UL-Flugzeugs <i>engine cowling for an ultralight aircraft</i>	hohe Schlagfestigkeit <i>high impact strength</i>	2 x 105 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i> 1 x 80 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i>	2 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe <i>glass fabric</i>	870 g/m ²
< 1,5 m ²	sehr großer Modelltragflügel <i>very large model wing</i>	hohe Beulsteifigkeit <i>high dent strength</i>	1 x 105 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i> 1 x 49 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i>	5 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe <i>glass fabric</i>	580 g/m ²
< 4,0 m ²	nicht tragende Abdeckhaube <i>non-bearing cowl</i>	mäßige Beanspruchung <i>moderate loading</i>	2 x 105 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i> 1 x 80 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i>	5 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe <i>glass fabric</i>	1000 g/m ²
< 4,0 m ²	Tragflügel eines UL-Flugzeugs <i>wing of an ultralight aircraft</i>	hohe Beul- und Zugfestigkeit <i>high dent resistance and tensile strength</i>	2 x 93 g/m ² Kohlegewebe/ <i>carbon fabric</i> 1 x 49 g/m ² Glasgewebe/ <i>glass fabric</i>	8 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe <i>glass fabric</i>	900 g/m ²

* errechnetes Gewicht eines entsprechenden Sandwiches bei einem Decklagen-Faservolumengehalt von 40 % sowie 2 x 30 g/m² Klebeharz zum Verkleben des Wabenkerns.

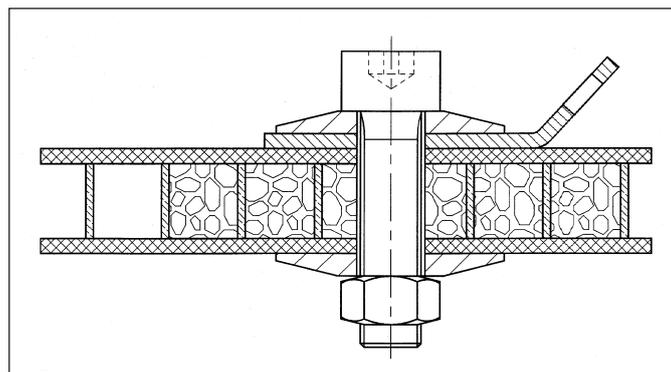
* *theoretical sandwich weight based on a 40% fibre volume content of the surface layer and 2 x 30 g/m² adhesive resin for bonding to the honeycomb core.*

Günstig ist die Krafteinleitung als Schubbelastung in Ebenenrichtung

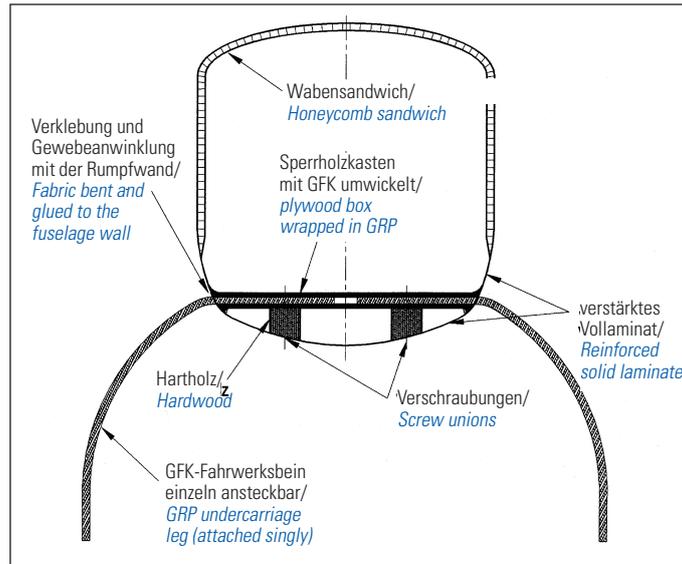


A good design transfers forces as shear loads parallel to the sandwich plane

Bei Verschraubungen sorgen Unterlegscheiben für eine großflächige Krafteinleitung.



Washers beneath the screw unions present a large area for the transfer of forces



Fahrwerkseinbau bei einem Modellflugzeuggruppe in Wabensandwichbauweise. Das Fahrwerk ist einfach abnehmbar, die Kräfteinleitung ermöglicht eine hohe Energieaufnahme bei geringem Gewicht.

Landing gear and model fuselage as a honeycomb sandwich design. The landing gear can be easily removed, the force transfer points enhance the energy absorption with minimised weight.



Besondere Sorgfalt erfordert das Verkleben des inneren Decklaminates, das auf einer Folie vorgetränkt wurde.

Special care must be taken in bonding the inner surface laminate, which has been pre-impregnated on a film



Zum Verpressen im Vakuumsack können kleinere Formen komplett „eingetütet“ werden.

Smaller moulds can be placed completely in the vacuum bag for pressure moulding.

Wie wird ein Wabensandwich hergestellt?

Wabensandwichbauteile werden, wie andere faserverstärkte Bauteile auch, zumeist in entsprechenden Negativformen hergestellt. Dabei wird zunächst das äußere Decklaminat wie bei Volllaminatbauteilen, nur in wesentlich geringerer Wandstärke laminiert. Bei sehr dünnen Deckschichten muß das äußere Decklaminat vollständig aushärten, bevor der Wabenkern verklebt werden kann, damit sich die Wabenstruktur später nicht auf der Bauteilaußenseite abzeichnet. Die Verklebung erfolgt mit sehr dünnflüssigem Laminierharz, das zuvor mit der Moltoprenwalze auf das **angeschlossene** Laminat gerollt wurde. Eine gute Verbindung kann dabei nur erzielt werden, wenn der Harzauftrag sehr gleichmäßig erfolgt. Nicht die Menge, sondern die Gleichmäßigkeit des Harzauftrags stellt sicher, daß hier keine Fehlstellen entstehen. Solange das Harz aushärtet, muß der Wabenkern fest auf das Decklaminat gepreßt werden. Dieses geschieht in den meisten Fällen im **Vakuumverfahren** (ein Verpressen mit Gegenformen ist eher selten, bei bestimmter Bauteilgeometrie aber durchaus auch möglich.) Nach dem Aushärten wird der Wabenkern an Kräfteeinleitungsstellen bzw. späteren Bauteildurchbrüchen lokal mit einem Microballons-Harzgemisch gefüllt. Wo erforderlich, ist ein mechanisches Nacharbeiten des Wabenkernes mit Fräsern oder grobem Schleifpapier möglich. Das innere Decklaminat wird, bevor es nun ebenfalls im Vakuum mit dem Wabenkern verklebt wird, auf einer Folie vorgetränkt. Dadurch wird verhindert, daß die Waben-hohlräume mit Harz volllaufen.

Halbschalenelemente werden unter Nutzung der offengelegten Waben-hohlräume, die sich beim Beschneiden der Kanten ergeben, verklebt. Damit steht als Klebefläche die gesamte Wabenkernstärke zur Verfügung. Bei der Verklebung mit angedicktem Harz erübrigt sich dadurch zumindest bei nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen eine zusätzliche Verstärkung.

Halbschalenelemente werden unter Nutzung der offengelegten Waben-hohlräume, die sich beim Beschneiden der Kanten ergeben, verklebt. Damit steht als Klebefläche die gesamte Wabenkernstärke zur Verfügung. Bei der Verklebung mit angedicktem Harz erübrigt sich dadurch zumindest bei nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen eine zusätzliche Verstärkung.

Wie funktioniert das Verpressen im Vakuum ?

Beim Vakuumverpressen wird die Form in eine luftdichte „Tüte“ verpackt, aus der anschließend die Luft abgesaugt und mit einer Vakuum-pumpe ein möglichst hoher Unterdruck erzeugt wird. Dabei werden dann alle Teile in dieser „Tüte“ vom Umgebungsdruck zusammengepreßt. Der von der Vakuumpumpe erzeugte Unterdruck sollte dabei möglichst hoch sein, damit ein maximaler Anpreßdruck zwischen Decklaminat und Waben-kern erzeugt wird. So wird bei einem Unterdruck von 0,9 bar ein Anpreßdruck von 0,9 N/mm² erzeugt. Das entspricht einer **Gewichtskraft von 9 Tonnen** pro Quadratmeter!

How is a honeycomb sandwich manufactured?

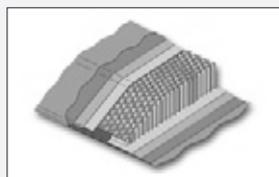
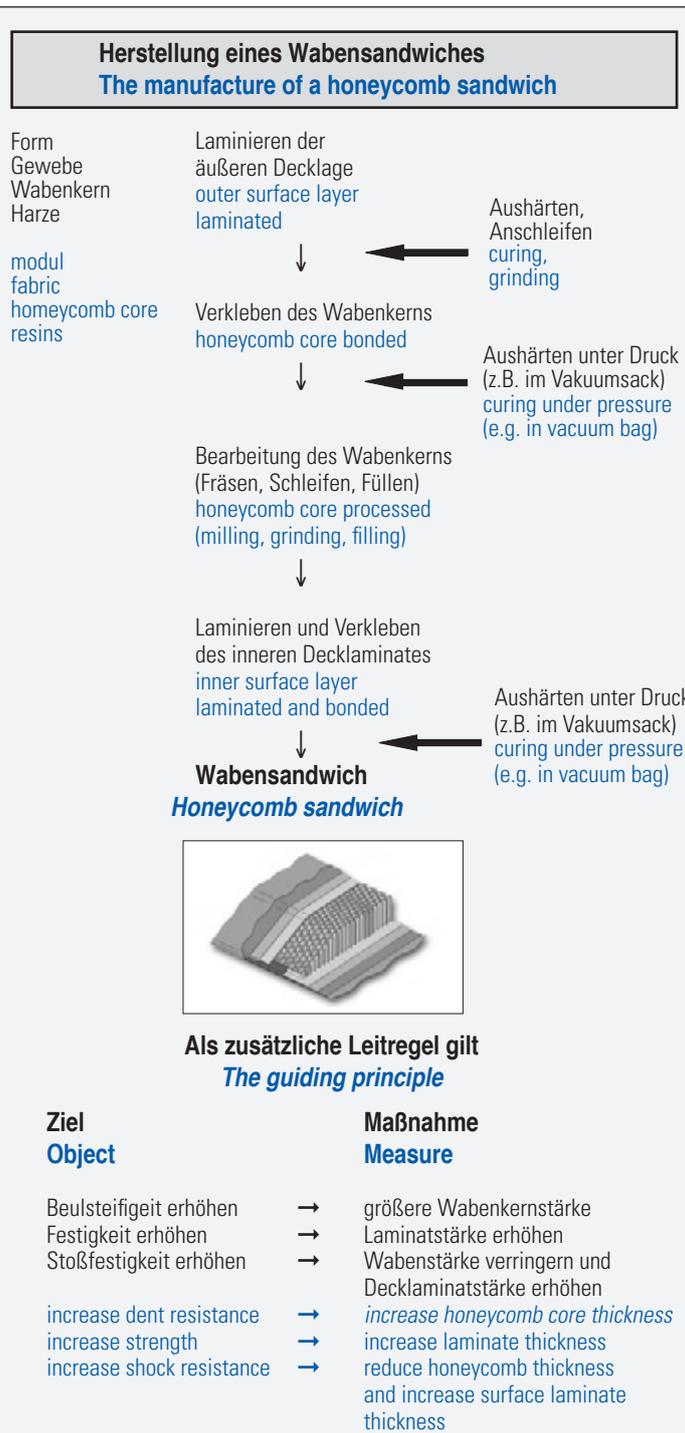
Like other fibre-reinforced components as well, honeycomb sandwich components are mostly manufactured in the corresponding female moulds. This process first involves laying up the outer surface laminate, just like solid laminate components, but with an essentially smaller wall thickness. If the surface layers are very thin, there is a risk that the underlying honeycomb structure can show through, so the outer surface laminate must first cure completely before the honeycomb core can be bonded. The core is bonded to the laminates with a laminating resin of very low viscosity that a Moltopren® roller has applied beforehand to the **surface-ground** laminate. A good bond can be obtained only when the resin has been applied with good uniformity. It is not the quantity, but the uniformity of the applied resin that ensures that no voids can arise. For as long as the resin takes to cure completely, the honeycomb core must be pressed firmly to the surface laminate. In most cases, the method adopted is **vacuum moulding** (the use of a countermould is rare, but certain component geometries may require this). Once the resin has cured, the force transfer points and any openings for subsequent components on the honeycomb core are filled with a mixture of microbubbles and resin. If necessary, the honeycomb core can be dressed mechanically with a milling cutter or coarse abrasive paper. Before it is also bonded in vacuum to the honeycomb core, the inner surface laminate is first pre-impregnated on a film. This measure prevents the honeycomb's cavities from filling with resin. Semi-monocoque elements are bonded along the cavities exposed by the honeycomb when its edges are cut. In other words, the whole thickness of the honeycomb core presents itself as a surface for bonding. So bonding with inspissated resin no longer necessitates additional reinforcements, at least for non-safety components.

Once the resin has cured, the force transfer points and any openings for subsequent components on the honeycomb core are filled with a mixture of microbubbles and resin. If necessary, the honeycomb core can be dressed mechanically with a milling cutter or coarse abrasive paper. Before it is also bonded in vacuum to the honeycomb core, the inner surface laminate is first pre-impregnated on a film. This measure prevents the honeycomb's cavities from filling with resin.

Semi-monocoque elements are bonded along the cavities exposed by the honeycomb when its edges are cut. In other words, the whole thickness of the honeycomb core presents itself as a surface for bonding. So bonding with inspissated resin no longer necessitates additional reinforcements, at least for non-safety components.

How does vacuum press moulding work?

Vacuum press moulding involves placing the mould in an airtight bag out of which the air is evacuated with a pump for the purpose of generating as hard a vacuum as possible. In the process, the ambient pressure acts on all the parts in the bag. The vacuum generated by the pump should be as hard as possible - the harder the vacuum, the greater the contact pressure between the surface laminate and the honeycomb core. A vacuum of -0.9 bar induces a contact pressure of 0.9 N/mm², equivalent to a **weight of nine tons** per square metre!



Was ist zum Verpressen im Vakuum erforderlich?

Der Aufbau einer Vakuumeinrichtung ist denkbar einfach: Foliensäcke können aus PE-Folie hergestellt werden, die zusammengefaltet und ringsherum mit Acryl-Dichtmasse aus der Kartusche abgedichtet wird. Für kleine Formen eignet sich auch besonders gut der R&G-Folienschlauch (550 mm und 1200 mm Breite).

Der Anschluß des Luftschlauches erfolgt mit einem Vakuumschluß. Zur Kontrolle des Unterdruckes ist ein Manometer erforderlich. R&G bietet drei unterschiedliche Vakuumpumpen an. Die preiswerte **Vakuumpumpe P1** ist besonders für kleine Formen geeignet. Sie erzeugt ein Vakuum von 75 % und hat zudem einen sehr geringen Stromverbrauch. Die Pumpenförderleistung ist allerdings gering, so daß bei größerem abzusaugendem Luftvolumen zunächst mit einem Staubsauger abgesaugt werden sollte.

Die **Vakuumpumpen P2 und P3** sind für den professionellen Einsatz geeignet. Sie haben ein großes Fördervolumen und erreichen ein Endvakuum von > 900 mbar.

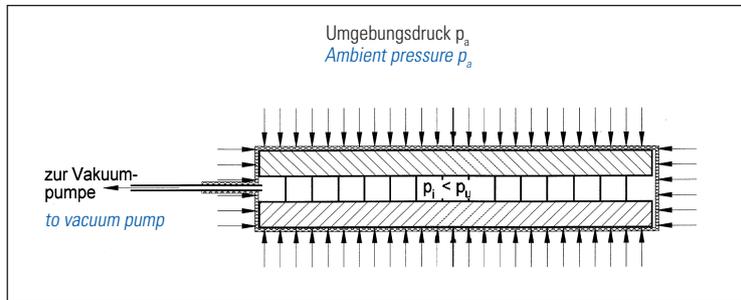
What is needed for vacuum press moulding?

The layout of a vacuum device couldn't be easier: Vacuum bags can be made of PE film folded together and sealed around the edges with an acrylic sealing compound from a cartridge. R&G film hose (550 mm wide) is also highly suitable for small moulds.

*The air hose is attached to a vacuum connection. A pressure gauge is required to monitor the vacuum. R&G provides three different vacuum pumps. The low-priced **vacuum pump P1** is particularly suitable for small moulds. This model generates a 75% vacuum and in addition has a very low power consumption. The pump delivery, however, is low so that larger quantities of air should first be evacuated with a vacuum cleaner.*

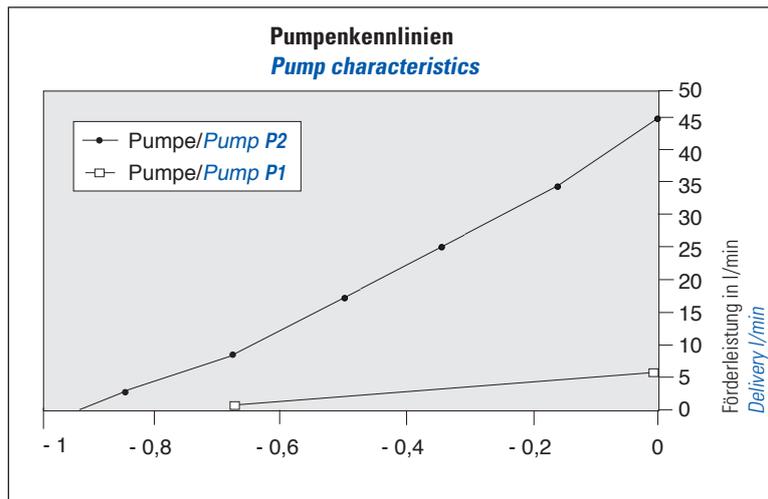
*The **vacuum pumps P2 and P3** are suitable for professional applications. They have a large delivery and can generate a final vacuum of > 900 mbar.*

Beim Verpressen im Vakuumsackverfahren wird der Umgebungsdruck ausgenutzt.



The vacuum bag moulding method utilises the ambient pressure

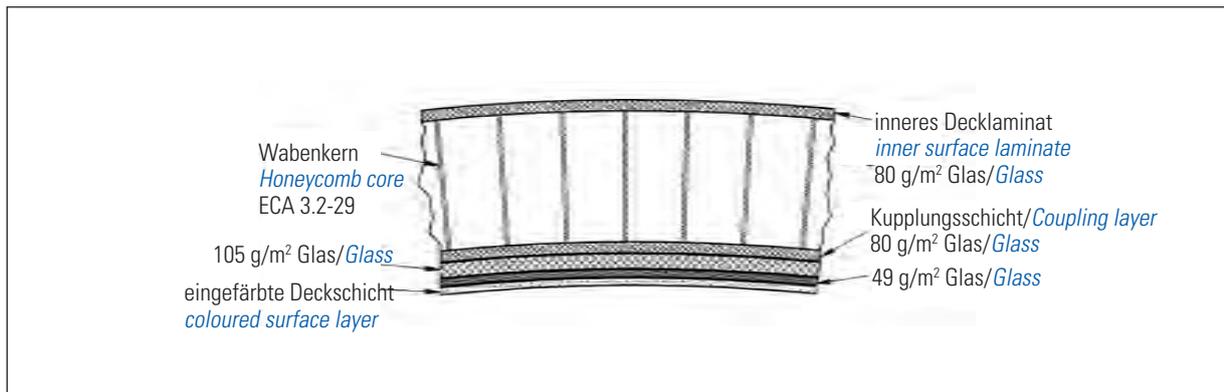
Pumpenkennlinien
Pump characteristics





Flugzeugrumpf in Waben-Sandwichbauweise

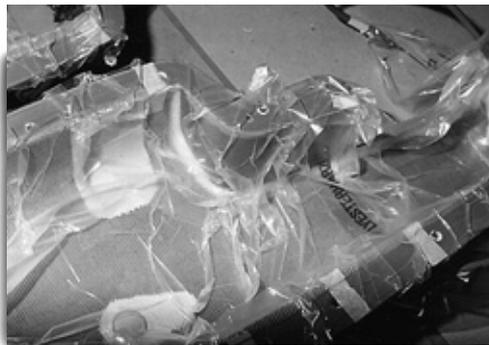
Fuselage as a honeycomb sandwich construction



Mit einem 80 g/m²-Glasgewebe als Kupplungsschicht läßt sich bei nur geringem Gewichtszuwachs die Klebefestigkeit zwischen Wabenkern und Decklaminat deutlich erhöhen.

A coupling layer of 80 g/m² glass fabric considerably increases the bond strength between the honeycomb core and the surface laminate with only a low increase in weight.

Damit überall ein gleichmäßiger Druck anliegt und keine Vertiefungen überspannt werden, muß die Folie großzügig in Falten gelegt werden.



The film must be laid in generous folds if the pressure is to be applied equally at all points and there are no voids over depressions.



Auch im **Formenbau** werden mittlere Waben eingesetzt. Gerade große Formen, wie hier am Beispiel eines Motorflugzeugs, werden sehr leicht und steif.

Honeycombs are also being used now in **mould construction**. Particularly large moulded parts, such as the powered aircraft given here in this example, are then very light and rigid.

Wie können Ecken und Kanten gestaltet werden?

Eine Versteifung durch die stark vergrößerte Wandstärke beim Wabensandwich ist nur auf größeren Flächen erforderlich. Ecken und Kanten bewirken zumeist schon eine ausreichende räumliche Versteifung. Zudem lassen sich Wabekern und inneres Decklaminat nur schwierig in scharfe, tiefe Kanten hineinpressen, so daß hier die Gefahr einer Fehlverklebung besonders hoch ist. Aus diesen Gründen sollte in Ecken und Kanten, soweit sie denn überhaupt am Sandwichbauteil erforderlich sind, der Wabekern ausgespart werden. Einige wenige zusätzliche Gewebestreifen im äußeren Decklaminat reichen hier für eine ausreichende Versteifung meistens aus. Bei höheren Beanspruchungen können zusätzlich auch noch Rovings entlang der Kante verlegt werden.

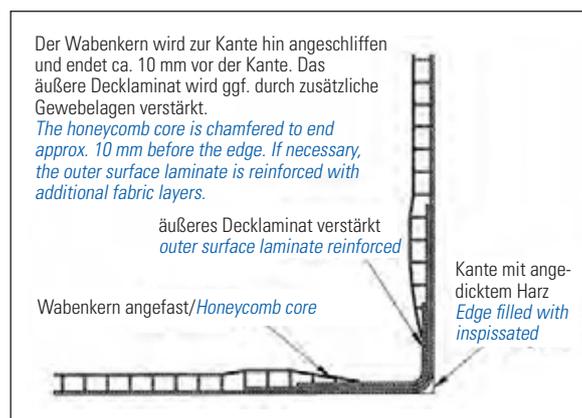
How can corners and edges be designed?

Increasing the wall thickness as a measure of stiffening a honeycomb sandwich is necessary over larger areas only. In most cases, edges and corners themselves exert stiffening effects owing to their design. In addition, the honeycomb core and inner surface laminate can be pressed into sharp, deep corners only with difficulty, and so there is a much greater risk of weakened bonding. For this reason, the honeycomb core should be cut at edges and corners, if they are at all necessary for the sandwich component. A small number of additional fabric strips in the outer surface laminate usually provides adequate stiffening. If the component is subjected to higher loading, also rovings can be laid in addition along the edges.

Wie gestaltet man Formen, damit man sie Vakuum ziehen kann?

Kleine Formen werden vorzugsweise komplett in einem Vakuumsack verpreßt. Hierbei dürfen die Formen über keinen versteifenden Hinterbau aus Rippen oder Spanten verfügen. Andererseits müssen die Formen steif genug sein, damit sie sich auch ohne Hinterbau nicht verziehen. Für kleinere Formen bis ca. 0,5 m² ist dabei eine Formenwandstärke von ca. 5 mm erforderlich. Bei GFK-Formen müssen dazu schon bis zu 10 Gewebelagen 390 g/m²-Gewebe laminiert werden. Hier hat sich aber auch die Bauweise von Formen mit Laminierkeramik bestens bewährt. Wichtig ist, daß die Form auf der Vorder- und Rückseite keine scharfen Ecken aufweist, an denen der Folienschlauch einreißen könnte.

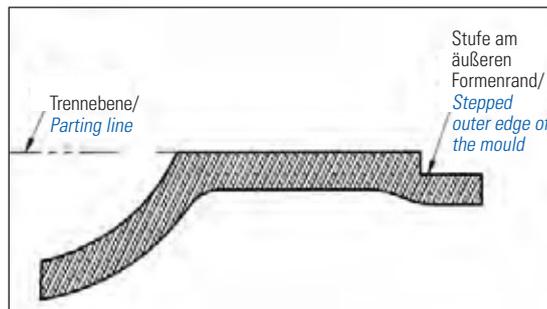
How are moulds designed for vacuum forming?



The preferred method for small moulds is to pressurise them in a vacuum bag. In this case, the moulds may not be designed with a base structure of ribs or frames. On the other hand, the moulds must be rigid enough to withstand warping without a base structure. Smaller moulds up to approx. 0.5 m² must have a wall thickness of about 5 mm. GFR moulds in addition must be laminated with up to ten layers of 390 g/m² fabric. The best results in practice are obtained with moulds made up of laminating ceramics. What is important is that the mould does not exhibit any sharp edges on the front or rear sides which could puncture the film hose.

Steile Vertiefungen sind ebenso ungünstig, da dort recht schwierig zu gewährleisten ist, daß der Folienschlauch überall anliegt. Generell gilt: Je flacher eine Form ist, desto einfacher kann sie vakuumgezogen werden. Große Formen lassen sich oft nur schwierig komplett in einen Folienschlauch einsetzen. Hier empfiehlt es sich, die Folie auf dem Formenrand abzudichten. Dazu muß die Form selber luftdicht sein. Bohrungen für Paßstifte oder Formverschraubungen dürfen nicht innerhalb des abzudichtenden Bereiches liegen. Eine Zentrierung von Formenhälften aufeinander kann einfach mit den herausnehmbaren dreiteiligen Paßstiften von R&G geschehen. Damit die elastische Dichtmasse beim Vakuumziehen nicht in die Form hineinläuft, hat es sich bewährt, den Formenrand entsprechend stufig zu gestalten.

Also detrimental are abrupt depressions, which prevent the film hose from lying in contact at all points. A general rule is the flatter a mould, the easier it is to vacuum-form. Large moulds are often difficult to place completely in a film hose. The recommended procedure in this case is to seal the film along the edges of the mould. At the same time, the mould itself must be airtight. Bores for alignment pins or screw unions must not lie within the sealed area. The mould halves can be easily centred over each other with the removable three-part alignment pins from R&G. An established practice is to design the mould with a stepped edge so that vacuum forming does not force the elastic sealing compound into the mould.



Wenn bei größeren Formen die Folie auf dem Formenrand abgedichtet werden soll, erleichtert eine Stufe am äußeren Rand das Abdichten.

A stepped outer edge facilitates sealing the film over the edge of larger moulds

Generell ist vor der Herstellung eines vakuumgezogenen Bauteils zu empfehlen, die Form einmal probeweise vakuum zu ziehen. Hierbei zeigt sich schnell, wo sich eventuell Schwierigkeiten beim Absaugen und einer gleichmäßigen Druckverteilung ergeben könnten. Bei größeren Formen wird man weiterhin ein luftdurchlässiges grobes Gewebe bzw. Polyestervlies zwischen die Vakuumfolie und die weiteren Lagen legen, damit sich der Unterdruck schnell und gleichmäßig aufbauen kann.

In general it is recommended before a component is vacuum-formed to test its suitability in a trial run. This is a fast method of identifying any difficulties encountered during evacuation or the uniform distribution of pressure. In the case of larger moulds, the vacuum can be generated quickly and uniformly when a coarse air-permeable fabric or polyester non-woven is placed as usual between the vacuum film and the other layers.



Vakuumgezogene Form eines UL-Tragflügels. Auf der 9 m² großen Form wirkt eine Anpreßkraft von insgesamt 45 Tonnen.

Vacuum-formed mould of an ultralight wing. The total pressure applied to the 9 m² mould is equivalent to 45 tonnes.

WABEN IM MODELLBAU

HERSTELLUNG EINER PIK 20 E

Die PIK 20 E ist ein Hochleistungs-Segelflugzeug. J. Eichstetter konstruierte und baute dieses Großmodell in mehrjähriger Arbeit aus modernsten Leichtbauwerkstoffen.

Um das bei einem Modell dieser Größe hohe Strukturgewicht zu reduzieren, wurden Rumpf, Tragflächen und Leitwerk konsequent in Schalenbauweise mit leichten und druckfesten R&G-Aramidwaben als Stützstoff ausgeführt.

Die nachfolgende Baubeschreibung zeigt anhand von Baustufenfotos die Komplexität der Arbeiten. Auch wenn Sie kein „Großprojekt“ planen, können Ihnen die gezeigten Arbeitsschritte beim Verwirklichen eigener Leichtbaukonstruktionen hilfreich sein. Bei sorgfältiger Vorplanung und mit der notwendigen Ausstattung an Werkzeugen und Material können Sie auf Anhieb gute Resultate erzielen.

Noch ein Hinweis: die Formensätze für Rumpf, Flächen und Leitwerk wurden komplett aus Formenharz und Laminierkeramik von R&G hergestellt.

HONEYCOMBS IN MODEL CONSTRUCTION

MANUFACTURE OF A PIK 20 E

The PIK 20 is a high-performance glider. Working for many years, J Eichstetter designed and built this large-scale model from state-of-the-art lightweight engineering materials.

In order to reduce the high structural weight of a model in this size category, Eichstetter designed the fuselage, wings, and tail unit consistently as shell structures supported on lightweight and compression-resistant R&G aramid honeycombs.

Photos documenting the stages of the work are reproduced here to show the complexity of the work. Even if you are not planning a large-scale project, the steps given below can be of help to you in building your own lightweight constructions. After some careful preliminary planning and with the right tools and materials you can obtain good results straight away.

And in case you didn't know - the mould sets for fuselage, wings, and tail unit were made completely of mould resin and laminating ceramic from R&G.



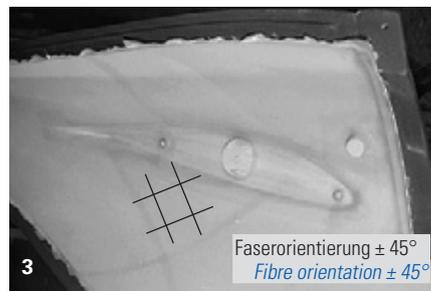
Gründliches Wachsen der Formen und Abdecken des Formenrandes mit Folie bis ca. 2 mm an die Kante. Anschließend Einspritzen der Deckschicht (UP-Vorgelat weiß) oder 2-K-Lack. Gewicht ca. 300 g/m².

The moulds are thoroughly waxed and covered with film reaching to about 2 mm from the edges. The overlay (white UP pre-gel) or two-component varnish is now injected. Weight approx. 300 g/m².



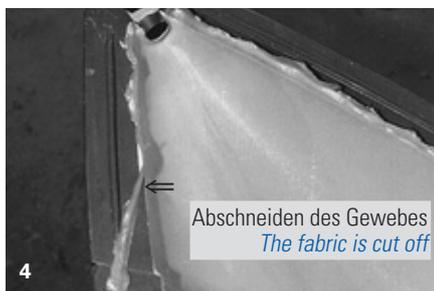
Abziehen der Folienabdeckung im noch nassen Zustand. Danach Auhärten der Deckschicht über Nacht. Die Kanten im Kabinenhaubenbereich werden mit einem Harz/Baumwollflocken/Glasfaserschnitzel-Gemisch aufgefüllt.

The film cover is drawn off when still wet. The overlay is then left to cure overnight. The edges around the cockpit hood are filled with a mixture of chopped glass fibre strands, resin, and cotton flock.



Durchgehend werden 2 Lagen 80 g/m² Glasgewebe diagonal eingelegt, im Bereich der Rumpfnase wird bis auf 5 Lagen verstärkt.

Two layers of 80 g/m² glass fabric are laid consistently at 45°. Near the fuselage nose reinforcement is up to five layers.



Nach dem Anhärten des Harzes (ca. 8 h Härtezeit) wird das überstehende Gewebe mit einer scharfen Klinge abgeschnitten.

After the resin has undergone preliminary curing (approx. eight hours), the projecting fabric is cut off with a sharp blade.



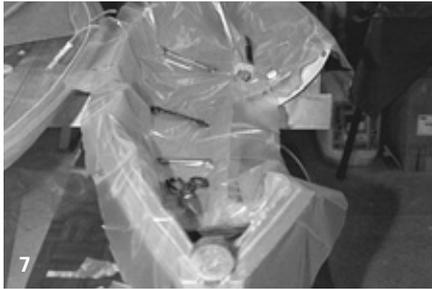
Einpassen der 3 mm-Wabe mit 2-3 cm Übermaß.

The 3 mm honeycomb is fitted with an excess edge of 2-3 cm.



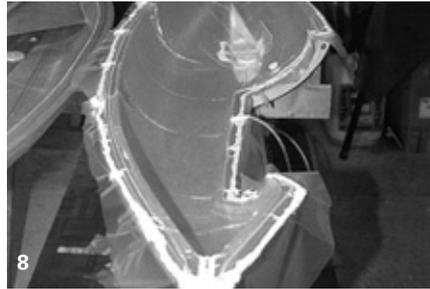
Die zugeschnittene Wabenplatte wird entnommen und eine weitere Lage 80 g-Glasgewebe einlamiert. In das noch nasse Gewebe wird die Wabe eingelegt, mit Gewichten beschwert und an den Stößen mit Tesa fixiert.

The honeycomb, here cut to size, is removed, and a further layer of 80 g glass fabric is laminated. The honeycomb is laid in the fabric when still wet, loaded with weights, and fixed along the joints with adhesive tape.



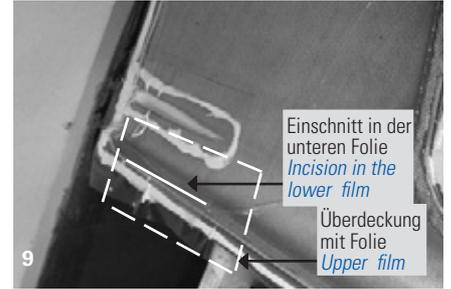
Auflegen einer PVC -Folie (0,03 mm Dicke), dann wieder beschweren.
 Falls die Beschaffung von PVC-Folien Probleme bereitet, kann alternativ auch eine „Baufolie“ aus PE verwendet werden. Diese ist meist in einer Stärke von 0,2 mm erhältlich. Noch besser geeignet: R&G Latex-Tuch (Gummituch).

*A PVC film is applied (0.03 mm thick), and the whole loaded again.
 If there is difficulty in obtaining PVC films, construction sheeting of PE can be used instead. In most cases this is available in a thickness of 0.2 mm. A far better alternative is R&G latex sheet (rubber sheet).*



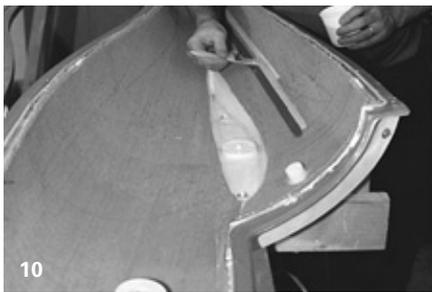
Während die Vakuumpumpe läuft, wird am Rand mit Silikon abgedichtet und die Folie angedrückt. Ist alles dicht, reichen zwei Vakuumanschlüsse (1x Kabinenhaube, 1x Rumpfnase) vollkommen aus.

With the vacuum pump running, the edges are sealed with silicone and the film pressed into place. Once everything is airtight, all that is now needed are two vacuum connections (one each for the cockpit hood and fuselage nose).



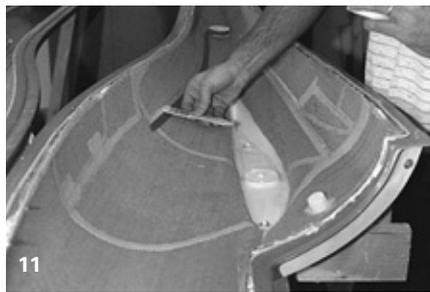
Sehr tiefe Stellen werden mit Silikon umspritzt, dann mit einem Messer aufgeschnitten und sofort mit einem Stück Folie überdeckt, welches sich dann in die Vertiefung einsaugt.

The procedure with very deep depressions is to apply silicone around them on the film, to cut open the film with a knife, and then to cover the cuts with a second piece of film. This second film is then forced by the vacuum into the depression.



Nach dem Anhängen des Harzes, also nach etwa 12 Stunden, wird die Wabe überall dort, wo Spanten, Einziehfahrwerk und Klapptriebwerksschacht verklebt werden, mit einem Epoxydharz Baumwollflockengemisch aufgefüllt. Als sehr leichter Füllstoff sind auch Glas-Bubbles gut geeignet.

Once the resin has undergone preliminary curing after about twelve hours, a mixture of epoxy resin and cotton flock is applied everywhere the frames, retractable landing gear, and flap well are attached. Also glass bubbles are ideal as a very light filler.



Auffüllen der Wabe mit eingedicktem Epoxydharz.

The honeycomb is filled with inspissated epoxy resin.



Zuschneiden der Übertragungsfolie (PVC, PE 0,03 - 0,2 mm) für das innere Decklaminat.

The transfer film (0.03 mm PVC or 0.2 mm PE) is cut to size for the inner surface laminate.



Auf einem Stück Schaumstoff wird die Übertragungsfolie mit einer Nadel alle 3 cm durchlöchert. Besser geeignet, wenngleich auch teurer, ist die R&G Lochfolie (Bestell-Nr. 390 185-X).

Placed on a piece of foam, the transfer film is punctured every 3 cm with a pin. More suitable, if also more expensive, is R&G perforated film (order no. 390 185-X).



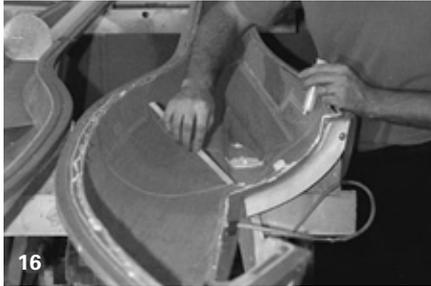
Vortränken des Glasgewebes auf Zeitungspapier.

The glass fabric is pre-impregnated on newspaper.



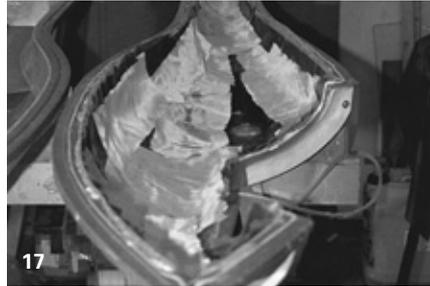
Abziehen des nassen Glasgewebes **zusammen** mit der Übertragungsfolie.

*The wet glass fabric is drawn off **together** with the transfer film.*



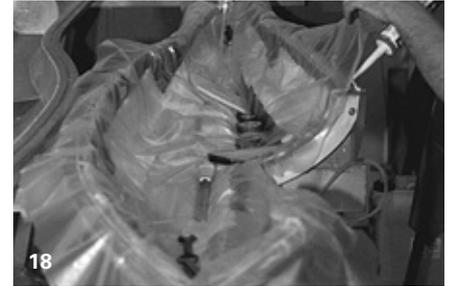
Auftragen von Harz und Einlegen der noch fehlenden Wabenstücke.

The resin is applied, and the missing pieces of honeycomb laid.



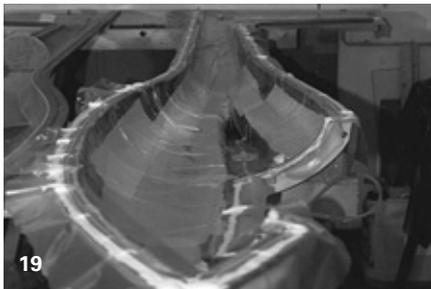
Das eingelegte Gewebe wird nun mit Abreißgewebe abgedeckt.

The laid fabric is now covered with tear-off fabric.



Zuletzt wird eine mit reichlich Übermaß zuge-schnittene Vakuumfolie aufgelegt, mit Gewichten fixiert und mit Silikon am Formenrand verklebt und abgedichtet.

Last of all, a vacuum film with excess edge lengths is laid, fixed in place with weights, and sealed along the edges of the mould with silicone.



Nach dem Einschalten der Vakuumpumpe preßt sich die Folie gegen die Form und verklebt das nasse Innenlaminat kraftschlüssig mit der Wabe.

When the vacuum pump is activated, the film presses against the mould, effecting a non-positive bond between the inner laminate and the honeycomb.



Nach ausreichender Härtezeit (je nach Harz 8-12 h) werden alle Folien entfernt und die Schale mit der Formkante bündig geschnitten.

After an adequate curing time (eight to twelve hours depending on the resin) all films are removed, and the shell cut to the edge.



Die Kante im Bereich des Kabinenhauben-Ausschnitts wird mit einem Harz-Baumwollflocken-Gemisch geschlossen.

The edge around the cut-out for the cockpit hood is sealed with a mixture of resin and cotton flock.



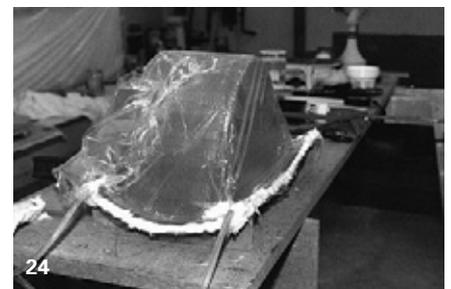
Laminieren des Fahrwerksschachts über ein aus Holz erstelltes Positiv. Zwei Lagen 80 g-Gewebe reichen aus.

The wheel well is laminated over a male mould made of wood. Two layers of 80 g fabric are sufficient.



Unter Einblasen von Luft wird diese dünne Schale entformt, der Positivkern erneut gewachst und die GFK-Schale wieder aufgeschoben (reine Vorsichtsmaßnahme bei schwierig zu entformenden Teilen).

This thin shell is demoulded with compressed air, the male core again waxed, and the GFK-shell replaced (a purely precautionary measure when parts are difficult to demould).



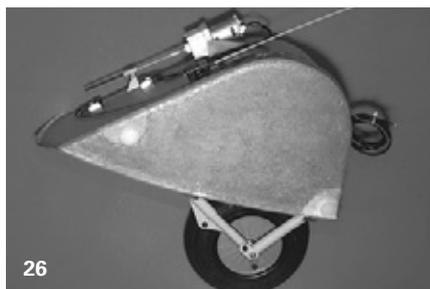
Auflaminieren der Waben-Seitenteile und des Mittelstücks.

Laminates are laid over the honeycomb's side parts and centre.



Der fertige Fahrwerkskasten lässt sich leicht entformen.

The finished wheel well can be easily demoulded.



Das einbaufertige Einziehfahrwerk. Die Mechanik und alle Maße sind vom Original maßstabsgetreu übernommen.

The retractable landing gear is ready for installation. All mechanisms and scale dimensions are faithful to the original.



Nach Papierschablonen werden Leisten für den Klapptriebwerksschacht, bestehend aus Spant und Trennwand, auf eine Spanplatte geklebt und mit Vakuum eine Folie darüber gezogen.

Based on paper templates, strips for the flap well, consisting of a frame and dividing wall, are glued on a particle board. A film is then pressed against the structure under a vacuum.



Im nächsten Arbeitsschritt werden die Einbauten in die Rumpfhälbschalen eingeklebt.

In the next step the attachments are glued to the fuselage shells.



Einziehfahrwerk, Hauptspant und Klapptriebwerk nach dem Einbau.

The retractable landing gear, main bulkhead, and flap extender after installation.



Zum Verkleben der Rumpfhälften wird eine Raupe aus einem Harz/Glas-Bubbles-Gemisch beidseitig auf die Klebestellen aufgetragen.

A strand of adhesive, here a mixture of resin and glass bubbles, is applied to both surfaces for joining the fuselage halves.



Die beiden Formhälften werden aufgestellt und vorsichtig zusammengeschoben.

The two mould halves are aligned and carefully pushed together.



Klammern pressen die geschlossene Form zusammen.

Clamps press together the closed mould.



Nach 24h Härtung wird der Rumpf entformt. Das Gesamtgewicht beträgt 8,5 kg davon abzuziehen sind 4,5 kg für das Klapptriebwerk und 1,5 kg für Einziehfahrwerk und Spant. Es bleibt ein Schalengewicht von 2,5 kg für einen Rumpf mit ca. 2,5 m² Fläche.

After 24 hours of curing the fuselage is demoulded. The total weight is 8.5 kg, of which 4.5 kg is the flap extender and 1.5 kg the retractable landing gear and frame. So the shell itself weighs 2.5 kg - for 2.5 m² of fuselage

Literaturhinweis

Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges.

Dissertation von Herbert Funke

Immer weiter steigende Anforderungen an technische Produkte erfordern den Einsatz neuer, leistungsfähigerer Werkstoffe. Faserverbundwerkstoffe bieten im Bereich des Leichtbaus neue Möglichkeiten, hochbelastete Strukturen mit geringem Gewicht aufzubauen.

Durch die Vielfalt der Kombinationen von Faser-Matrix-Verbunden und die besonderen Möglichkeiten der Bauteilgestaltung kann für den einzelnen Anwendungsfall ein Werkstoff "maßgeschneidert" werden.

Unterschiedliche Fertigungsmethoden erlauben es außerdem, zusätzlichen Werkstoff gezielt dort anzuordnen, wo dieser strukturell erforderlich ist, oder auch wegzulassen, wo er nicht erforderlich ist. Neben den gewichtsspezifischen Vorteilen eröffnen sich dem Anwender von Faserverbundwerkstoffen damit noch zusätzliche konstruktive Möglichkeiten zur Gewichtsersparnis. In Wabensandwichbauweise können großflächige Strukturen mit geringem Gewicht aufgebaut werden.

Die erforderliche Biege- und Beulsteifigkeit großer Platten- und Schalenstrukturen wird über die Gesamtdicke der Sandwichstruktur erreicht, die sich im Wesentlichen aus dem leichten, drucksteifen Wabenkern ergibt. Es ist bekannt und durch einzelne Anwendungen belegt, dass extremer Leichtbau in Faserverbund-Wabensandwichbauweise möglich ist. Das spezifische Wissen um diese Bauweise ist bislang jedoch kaum verbreitet. Insbesondere fehlt es an Werkstoffkennwerten sowie an einer Systematik, die den Prozeß zur Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichkonstruktionen in systematischer Weise aufbereitet und dem Konstrukteur Hilfestellung bei der Anwendung dieser Bauweise gibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst ein Prüfverfahren mit zugehörigem Prüfaufbau entwickelt, das die Ermittlung von Plattensteifigkeiten anhand von Testplatten ermöglicht. Im experimentellen Teil der Arbeit wurden dabei umfangreiche Steifigkeitsanalysen durchgeführt, die wichtige Erkenntnisse für die Auslegung von Sandwichkonstruktionen liefern. Darüber hinaus wurde eine Systematik für die Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichstrukturen erarbeitet. Sie soll den mit Leichtbauaufgaben betrauten Konstrukteur unterstützen, Leichtbaukonstruktionen Werkstoff- und Fertigungsgerecht in dieser Bauweise umzusetzen.

Im abschließenden Teil der Arbeit erfolgt eine Erläuterung der Entwicklungssystematik anhand eines Ultraleichtflugzeuges in FVK-Wabensandwichbauweise. Besonderheiten, die sich durch die spezielle Bauweise ergaben, werden herausgestellt und eingehend erläutert. Auf diese Weise werden Erfahrungen bei der Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichkonstruktionen auf wissenschaftlich gesicherter Basis in systematisch aufbereiteter Form weitervermittelt.

Kostenloser Download in deutscher Sprache
www.r-g.de

Further reading

Systematic development of ultra lightweight structures of fibre composite honeycomb sandwiches for a light plane.

Doctoral thesis by Herbert Funke

Ever increasing demands placed on engineering products can be fulfilled only by new, more efficient materials. In the field of lightweight engineering, fibre composites open up new possibilities for building highly loaded structures of low weight.

The numerous combinations of fibre and matrix materials and particularly the possibilities afforded by component design mean that a material can be tailored to the respective application case. Moreover, various production methods allow the designer to position additional material specifically where the structure requires it, or to omit material where it is not needed.

This means that besides the intrinsic advantages of weight savings, users of fibre composites can now profit from this additional potential for minimising weight in the design stages. Honeycomb sandwiches facilitate the design of large-area structures of low weight. The flexural strength and dent resistance needed for large

plate and shell structures are imparted by the total thickness of the sandwich structure, essentially from the lightweight, compression-resistant honeycomb core. It is generally known and has been verified in a number of applications that ultra lightweight structures are possible with fibre composite honeycomb sandwiches. Yet the know-how needed specifically for this method of construction has still to be propagated on a broad front. Particular deficits are material characteristics and a procedure that systematically analyses the process for developing fibre composite honeycomb sandwiches and assists the designer in the application of the analysed method.

The work described in this thesis first involved the development of a test method and the corresponding test methodology for determining panel rigidities on the basis of test panels. The experimental part of the work involved conducting extensive analyses of rigidity whose results provided important data for the design of sandwich constructions. In addition, a procedure was drawn up for the systematic development of fibre composite honeycomb sandwich structures. This procedure is intended to assist designers assigned with lightweight engineering jobs in integrating this construction method in the given material and production plant specifications.

The concluding part of the work explains the procedure adopted in the systematic development of an ultralight aircraft as a fibre-reinforced plastic sandwich construction. The particular features arising out of this special design method are set out and amplified. In this manner, the experience gained from the development of fibre composite honeycomb sandwich structures can be translated systematically into a presentable form based on scientific verification.

Free download in german language
www.r-g.de



Waben in unterschiedlichen Ausführungen



Various honeycomb types

LANTOR COREMAT® XM

WABENVLIES

- Leicht verformbares Kernmaterial für Sandwichbauteile
- Definierte Schichtstärke
- Kein Vakuum erforderlich

Lantor Coremat® XM ist ein leichtes und äußerst flexibles, mit **Micro-Hohlkugeln** versetztes, weißes **Polyestervlies** für Sandwichbauteile.



Beschreibung

Die für die Steifigkeit eines Bauteils mit entscheidende Wandstärke wird in einem Arbeitsgang erzielt.

Neben der **Gewichtsreduktion** ergibt sich zudem eine erhebliche **Zeit- und Materialersparnis**.

Die Microhohlkugeln sind als **Wabenmodell** angeordnet. Dadurch ergibt sich eine **äußerst flexible Matte**, sobald die Microhohlkugeln zu 55 % mit Harz getränkt sind. Die unverwechselbare Wabenstruktur (Wabendurchmesser ca. 4 mm) ermöglicht ein schnelles und müheloses Laminieren auch komplizierter Formteile.

Zulassungen

Lloyd's, Registro Italiano Navale, Det Norske Veritas und American Bureau of Shipping.

Harze

Geeignet zum **Tränken von Coremat® XM** sind **Polyester-, Vinylester- und Epoxydharze**.

Polyesterharze

Wie Glasmatten wird Coremat® XM mit einem styrollöslichen Binder hergestellt. Etwa 30 Sekunden nach dem Auftragen von Polyesterharz löst sich dieser Binder, wodurch das Sandwichmaterial weicher wird und sich auch in sphärische Formen ausrollen lässt.

Komplizierte Bauteile mit sehr kleinen Radien lassen sich nur herstellen, indem Einschnitte vorgenommen oder die geraden Flächen mit passenden Stücken belegt werden. Ideal sind auch möglichst große Radien (> 5 mm bei 2 mm dickem Coremat®) und geschwungene Formen. Scharfe Kanten und Ecken sollten vermieden werden.

Epoxydharze

Für eine gute Formbarkeit ist ein Radius von > 10 mm erforderlich (bei 2 mm dickem Coremat®).

Komplizierte, sphärisch geformte Teile lassen sich nur herstellen, indem Einschnitte vorgenommen oder die geraden Flächen mit passenden Stücken aus Coremat® belegt werden.

Anwendungsgebiet

Kfz (Chassis, Karosserie, Skiboxen), UL-Flugzeugbau (Versteifungen), Modellbau (Versteifungen), Bootsbau (Rümpfe, Aufbauten), Behälter- und Formenbau.

LANTOR COREMAT® XM

NON-WOVEN HONEYCOMB LINER

- Easily mouldable core material for sandwich components
- Predefined coat thickness
- No vacuum needed

Lantor Coremat® XM is a lightweight and ultra flexible white **polyester non-woven filled** with **micro-bubbles** for sandwich constructions.

Description

The wall thickness, one of the decisive factors for the rigidity of a component, is obtained in the one working cycle.

The benefits are not only a **reduction in weight**, but also considerable **savings in time and materials**.

The microbubbles are arranged in a **honeycomb structure**, yielding an **ultra flexible mat** when 55% of the microbubbles are impregnated with resin. The distinctive honeycomb structure (honeycomb diameter approx. 4 mm) facilitates fast and effortless laminations on even complex mould parts.

Approved by

Lloyd's, Registro Italiano Navale, Det Norske Veritas, American Bureau of Shipping.

Resins

Suitable for **impregnating Coremat® XM** are **polyester, vinyl ester, and epoxy resins**.

Polyester resins

Like glass mats, Coremat® XM is manufactured with a binder soluble in styrene. Approx. thirty seconds after polyester resin has been applied this binder dissolves, in turn softening the sandwich material so that it can also be rolled out over spherical moulds.

Complex components exhibiting very small radii can be manufactured only when incisions are made or flat surfaces are covered with the matching pieces. The ideal contours are large radii (> 5 mm for 2 mm Coremat®) and gently curved moulds. Sharp edges and corners should be avoided.

Epoxy resins

Good mouldability requires a radius greater than 10 mm (for 2 mm Coremat®).

Complex, spherical components can be manufactured only when incisions are made or flat surfaces are covered with the matching pieces of Coremat®.

Range of applications

Automotive engineering (chassis, body, ski racks), ultralight aircraft construction (stiffeners), model construction (stiffeners), boat building (hulls, superstructure), vessel and mould construction.

Verarbeitung

Die Verarbeitung unterscheidet sich nur wenig von normalen Glasgeweben. Sie erfordert kein spezielles Werkzeug und auch kein besonderes Geschick, sondern einfach das übliche Know-how.

Die erste Schicht Coremat® XM wird auf die nasse Glasfaserlage aufgelegt und in jede beliebige Form laminiert. Grundsätzlich verformt sich das Material beim Anrollen von selbst. Danach werden die restlichen Glasfaserlagen aufgelegt und bis hin zum fertigen Laminat mit einem Teflon-Rillenroller ausgerollt. Für die Abschlusslagen wird nur wenig zusätzliches Harz benötigt, da leichte Überschüsse aus dem Kernmaterial zur Tränkung ausreichen. Das Laminieren wird dadurch schneller, wobei sich sowohl Harzverbrauch als auch Gewicht reduzieren.

2 mm, Packungsgrößen von 1 - 80 lfm

Bestell-Nr. 190 400-X

4 mm, Packungsgrößen von 1 - 40 lfm

Bestell-Nr. 190 405-X

Processing

The procedure adopted for processing this material differs only little from normal glass fabrics. It does not need any special tools nor any particular skills, just the usual know-how.

The first layer of Coremat® XM is laid on the wet glass-fibre ply and laminated to any shape. In principle, the material deforms by itself when it is rolled over the surface. Afterwards, the remaining glass-fibre plies are laid and a grooved Teflon roller used to produce the finished laminate. Only little additional resin is needed for the finishing plies: slight excess resin from the core material provides for adequate impregnation. Laminating is accelerated as a result, and both resin consumption and weight are reduced.

2 mm, packaged quantities from 1-80 lin. m

order no. 190 400-X

4 mm, packaged quantities from 1-40 lin. m,

order no. 190 405-X

Lantor Coremat® XM Wabenviles Lantor Coremat® XM non-woven honeycomb liner	Einheit Unit	Wert Value
Lieferbare Dicken Available thicknesses	mm	2 + 4
Zur Verarbeitung geeignete Harze Suitable resins	---	Epoxyd, Polyester, Vinylester epoxy, polyester, vinyl ester
Farbe Colour	---	weiß (indikator frei) white (indicator-free)
Breite Width	cm	100
Flächengewicht 2 mm Weight per unit area 2 mm	g/m ²	ca. 120 approx. 120
Harzaufnahme 2 mm Resin absorption 2 mm	g/m ²	1000
Flächengewicht 4 mm Weight per unit area 4 mm	g/m ²	ca. 240 approx. 240
Harzaufnahme 4 mm Resin absorption 4 mm	g/m ²	2000
Biegefestigkeit EN ISO 178 Flexural strength EN ISO 178	MPa	7,5
Biegemodul EN ISO 178 Flexural modulus EN ISO 178	MPa	1000
Zugfestigkeit längs ISO 527 Tensile strength, longitudinal ISO 527	MPa	4
Druckfestigkeit (10 % Dehnung) ISO 844 Compressive strength (10 % elongation) ISO 844	MPa	10
Scherfestigkeit ISO 1922 Shear strength ISO 1922	MPa	5
Schermodul ISO 1922 Shear modulus ISO 1922	MPa	10



Zur Verarbeitung von Coremat® genügen einfache Werkzeuge wie Pinsel, Velourwalzen (zum Harzauftrag) und Teflonroller (zum Durchtränken und Entlüften).

All you need to process Coremat® are simple tools such as a brush, a non-woven roller (for applying the resin), and a Teflon roller (for impregnating and de-airing the laminate).



Benötigte Anzahl Glasmatten/Gewebe auftragen und darauf achten, daß vor dem Auflegen von Coremat® eine harzreiche Schicht aufgetragen wird.

Apply the requisite number of glass mats and fabric plies, making sure that the ply taking the Coremat® has a high resin content.



Coremat® auf das nasse Laminat auflegen...

Place the Coremat® on the wet laminate ...



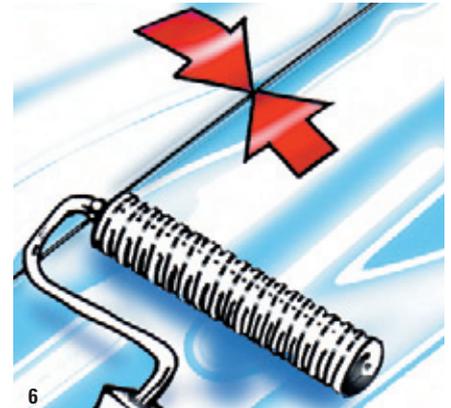
... und mit Harz tränken.

... and impregnate with resin.



Coremat® XM ist aufgrund seiner Wabenstruktur sehr flexibel und läßt sich leicht ausrollen. Bei sehr komplizierten Formen sind aber eventuell Einschnitte erforderlich.

Owing to its honeycomb structure Coremat® XM is very flexible and can be easily rolled out. Highly complex moulds, however, may necessitate incisions.



Einzelne Coremat® XM-Segmente müssen Stoß auf Stoß und nicht überlappend verlegt werden. Damit vermeidet man Luft einschüsse.

Coremat® XM segments applied singly must be placed edge to edge and not overlap. This helps to avoid air inclusions.



Benötigte Anzahl Glasmatten/Gewebe auftragen...

Apply the requisite number of glass mats and fabric layers ...



... und mit Harz tränken.

... and impregnate with resin.



Coremat® eignet sich besonders für großflächige Bauteile im Fahrzeug- und Sportgerätebau.

Coremat® is ideal for manufacturing large-area components for automobiles and sports equipment.

DIMENSIONIERUNG

VON FLÄCHENSTECKUNGEN MIT CFK-STÄBEN

Dr.-Ing. Herbert Funke

Kohlefaserstäbe, kurz CFK-Stäbe, eignen sich in besonderer Weise zur Verbindung von Tragflügelsteckungen von Flugmodellen. Im Vergleich zu Flächensteckungen aus Stahl sind CFK-Stäbe um den Faktor 5 leichter. Im Vergleich zu Aluohrsteckungen weisen Flächensteckungen mit CFK-Vollstäben bei gleicher Biegefestigkeit einen geringeren Durchmesser auf und eignen sich somit insbesondere für leichte Steckungen in dünnen Tragflügeln. Eine häufig gestellte Frage ist dabei jedoch die richtige Auswahl und Dimensionierung der Stäbe für den einzelnen Anwendungsfall. Die folgenden Tabellen und Diagramme liefern hier Anhaltswerte für eine Vielzahl praxisrelevanter Anwendungsfälle.

Grundlagen der Berechnung

Die hier beschriebene Dimensionierung erfolgt anhand von vereinfachten, mechanischen Zusammenhängen. So wurde davon ausgegangen, dass die Flächensteckung nur die Rumpfmasse zu tragen hat. Dieses ist dann der Fall, wenn die Auftriebsverteilung des Flügels in Spannweitenrichtung proportional zur Massenverteilung des Flügels ist. Bei hohen Einzelmassen (z. B. Ballastmassen) sind hier ggf. Korrekturen vorzunehmen. Ferner wird der Tragflügel als Rechteckflügel mit flächenkonstantem Auftrieb angenommen. Gegenüber der tatsächlichen Auftriebsverteilung ergibt sich dabei in der Regel eine Überdimensionierung, die hier als zusätzliche Sicherheit verstanden werden kann.

Formeln

Unter Annahme der oben genannten Vereinfachungen kommen folgende Formeln zur Anwendung:

Biegemoment der Flächen-Steckung:

$$M_B = \text{Auftriebskraft} \times \text{Hebelarm}$$

Maximale Auftriebskraft:

$$F_A = \text{Lastvielfaches} \times \text{Erdbeschleunigung} \times \text{Rumpfgewicht}$$

Hebelarm:

$$l = 1/4 \times \text{Gesamtspannweite}$$

Biegespannung im Rundstab:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_Y}$$

Die Widerstandsmomente W_Y für den Rundstab ergeben sich nach nebenstehender Tabelle:

Ferner wurde für die Rundstäbe eine Biegefestigkeit von 600 N/mm² angenommen. In Versuchen wurden Biegefestigkeiten weit über diesem Wert erzielt, so dass hier ebenfalls zusätzliche Sicherheiten vorhanden sind.

DIMENSIONING

CRP RODS AS SURFACE CONNECTORS

Dr.-Ing. Herbert Funke

Carbon-fibre rods, or CRP rods for short, are particularly suitable as connecting elements in model aircraft construction, for example for the wings. Compared with surface connectors of steel, CRP rods are lighter by the factor 5. Compared with aluminium tube connectors, solid CRP rods exhibit a smaller diameter for the same flexural strength and are therefore particularly ideal for lightweight connectors in thin wings. One frequently asked question, however, concerns the right choice of rods and their dimensions for each respective application case. The tables and graphs presented in the following provide approximate values for a great many practical applications.

Design basis

The dimensions described in the following are based on simplified mechanical relationships. For example, it is assumed that the surface connection is borne by the mass of the fuselage alone. This is the case when the lift distribution along the wingspan is proportional to the mass distribution of the wing. In the event of concentrated masses (e.g. ballast masses), corrections may have to be made here. Also assumed is a rectangular wing and equal lift at all points on the surface. With respect to the actual lift distribution, these assumptions generally lead to overdimensioning, which can be taken here as an additional safety feature.

Formulae

Having assumed the simplifications given above, we can use the following formulae:

Bending moment on the surface connector:

$$M_B = \text{lift} \times \text{moment arm}$$

Max lift:

$$F_A = \text{load factor} \times \text{gravitational acceleration} \times \text{fuselage weight}$$

Moment arm:

$$l = 1/4 \times \text{total wingspan}$$

Bending stress in the rod:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_Y}$$

W_Y , the section modulus of the rod, can be taken from the following table.

Also assumed for the rods is a flexural strength of 600 N/mm². Trials obtained flexural strengths far higher than this value, which can also be taken as an additional safety feature.



Stab-Ø mm <i>Rod. dia mm</i>	W_y mm ³
2	0,79
3	2,65
4	6,28
5	12,30
6	21,20
8	50,30
10	98,20
12	170,00
14	269,00
16	402,00
18	573,00
20	785,00
24	1375,00

Orientierung für die Belastungshöhe

Da nicht nur die Tragflügelgeometrie und die Auftriebsverteilung sondern auch die Belastungshöhe entscheidend für die Tragfähigkeit einer Flächensteckung sind, wurden hier drei Modellkategorien unterschieden. Die dabei festgelegten maximalen Lastvielfachen dienen als Orientierungshilfe:

Assistance with loading levels

Not only the wing geometry and lift distribution, also the loading levels are decisive for the load-bearing capacity of a surface connector. Maximum load factors intended to assist the designer were determined for three model categories.

Modellkategorie <i>Model category</i>	Maximale Lastvielfache <i>Max load factor</i>
Leichte Segelflugmodelle, langsame Elektroflugmodelle <i>Light model gliders, slow battery-powered model aircraft</i>	n = 6 g
Schnelle Segelflugmodelle Motorflugmodelle Motorflugmodelle <i>Fast model gliders, motorised model aircraft</i>	n = 12 g
Hotliner, Speemodelle, Kunstflugmodelle <i>Hotliner, high-speed models, aerobatic models</i>	n = 20 g

Gebrauch der Tabellen

Die Werte in den Tabellen der nächsten Seiten zeigen Rumpfmassen in kg. Die Tabellen geben an, welche Rumpfmasse von einer Steckung mit vorgegebenem \emptyset in Abhängigkeit von der Spannweite getragen werden kann.

Ablesebeispiel

Bei einem maximalen Lastvielfachen von 12 g kann ein CFK-Stab, mit \emptyset 16 mm bei einer Spannweite von 3,00 m eine Rumpfmasse bis 2,7 kg tragen.

Gebrauch der Diagramme

Die Diagramme zeigen, welcher CFK-Stab- \emptyset bei einer bestimmten Kombination von Spannweite und Rumpfmasse erforderlich ist.

Ablesebeispiel

Bei einer Spannweite von 2,35 m und einem Rumpfgewicht von 6.200 g liegt der Schnittpunkt für Lastvielfache von 12 g oberhalb der Linie für CFK-Stäbe mit 18 mm \emptyset . Es ist also der nächst dickere Stab mit 20 mm \emptyset erforderlich.

Wichtiger Hinweis

Die angegebenen Werte liefern ungefähre Anhaltswerte für den Gebrauch und die Auswahl von CFK-Stäben als Flügelsteckungen. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Lastfälle im genannten Anwendungsbereich kann keine Gewährleistung für eine genügende Biegefestigkeit in Einzelfällen übernommen werden. Festigkeitsversuche werden in Einzelfällen empfohlen. Irrtümer, Druckfehler und Änderungen vorbehalten.

How to use the tables

The tables presented on the following pages list the values for the fuselage mass in kilograms. They are the maximum values that a connection of specific diameter can bear for a specific wingspan.

Example

With a max load factor of 12 g, a CRP rod of 16 mm diameter can bear a max fuselage mass of 2.7 kg for a wingspan of 3.00 m.

How to use the graphs

The graphs are used to determine the diameter a CRP rod must have for a specific combination of wingspan and fuselage mass.

Example

For a load factor of 12 g, the point of intersection between a wingspan of 2.35 m and a fuselage mass of 6,200 g lies above the line for CRP rods of 18 mm diameter. The thicker rod, here with a diameter of 20 mm, should then be taken.

Important information

The listed values are approximate values for the selection and use of CRP rods as wing connectors. Owing to the diversity of loading conditions in the described range of applications, there can be no guarantee given for the adequacy of flexural strength from case to case. Experimental stress analyses are recommended in these cases. No liability accepted for errors or misprints. Subject to change without notice.

Ablesebeispiel

Schnelle Segelflugmodelle, Motorflugmodelle

max. Rumpfgewichte in kg für $n_{max} = 12$, abhängig vom Ø des CFK-Stabes und der Flügelspannweite

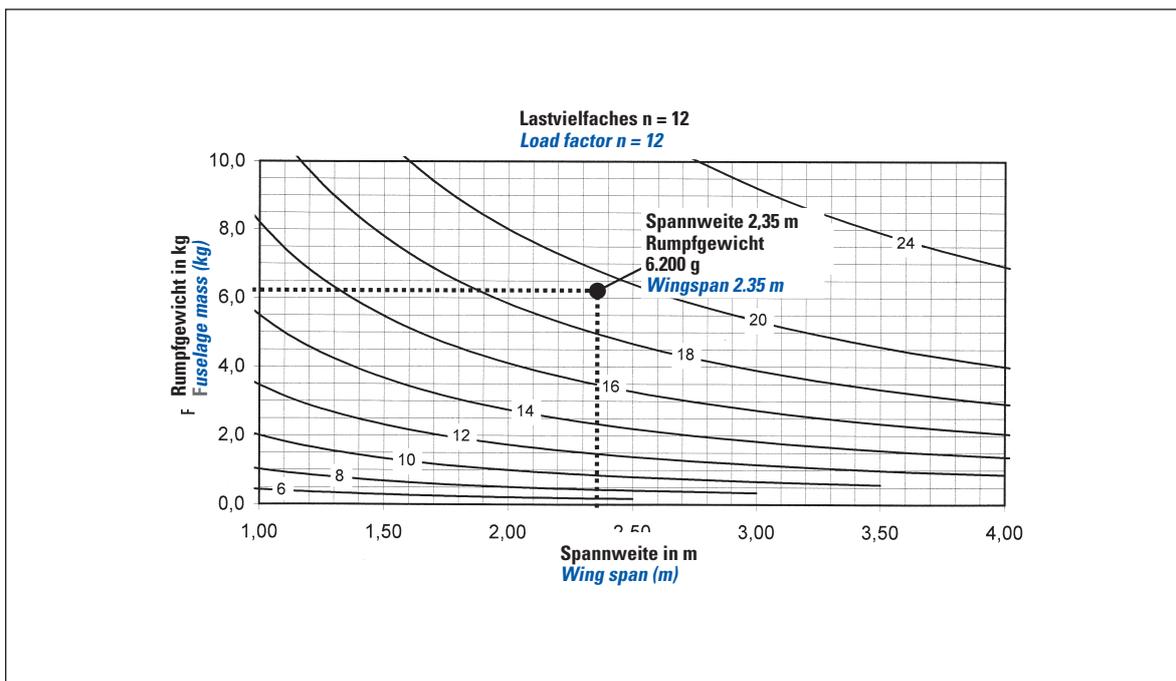
Example

Fast model gliders, motorised model aircraft

max fuselage mass in kg für $n_{max} = 12$ as a function of CRP rod diameter and wingspan

CFK-stab-Ø mm CRP rod dia.	Flügelspannweite in m / Wingspan in m											
	0,80	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00
6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2						
8	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4						
10	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8		0,6				
12	4,3	3,5	2,8	2,2	1,7	1,4		1,0	0,9			
14	6,9	5,5	4,4	3,4	2,7	2,2		1,6	1,4	1,2		
16							2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	
18	14,6	11,7	9,3	7,3	5,8		max. Rumpfgewicht max fuselage mass	2,9	2,6	2,3	1,9	
20	20,0	16,0	12,8	10,0	8,0			4,0	3,6	3,2	2,7	
24			22,1	17,3	13,8	11,1	9,2	7,9	6,9	6,1	5,5	4,6

211



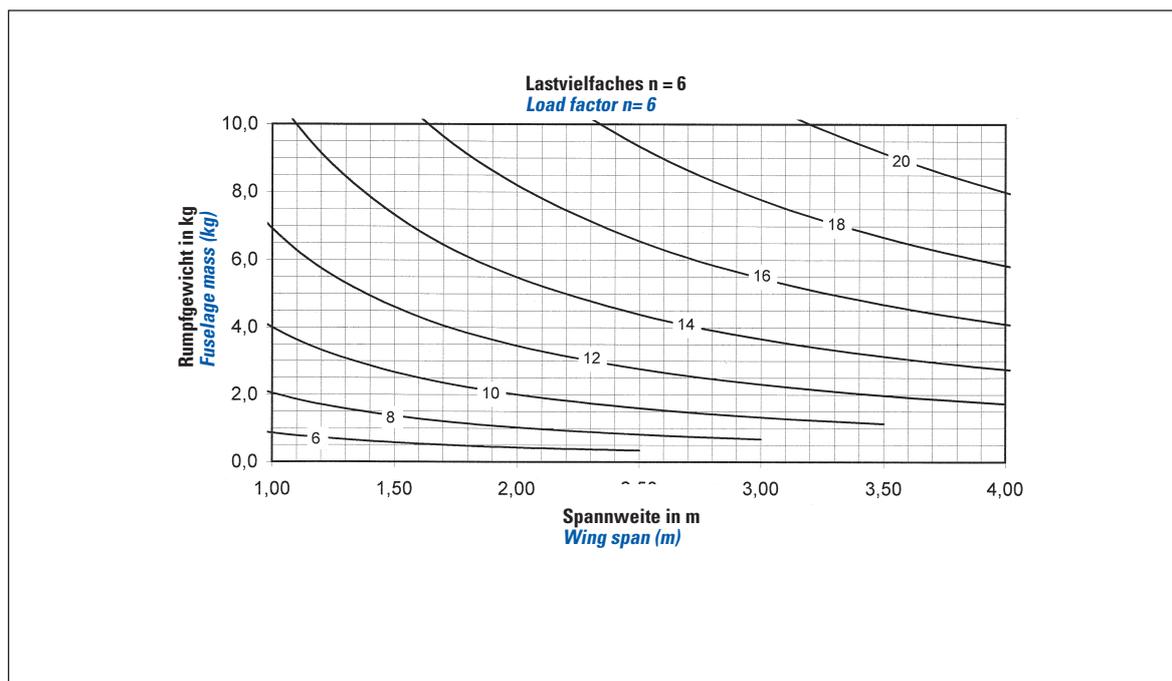
Leichte Segelflugmodelle, langsame Elektroflug-modelle

Light model gliders, slow battery-powered model aircraft

max. Rumpfgewichte in kg für $n_{max} = 6$, abhängig vom \varnothing des CFK-Stabes und der Flügelspannweite

max fuselage mass in kg für $n_{max} = 6$ as a function of CRP rod diameter and wingspan

CFK-stab- \varnothing mm CRP rod dia.	Flügelspannweite in m / Wingspan in m											
	0,80	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00
6	1,1	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3						
8	2,6	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,7					
10	5,0	4,0	3,2	2,5	2,0	1,6	1,3	1,1				
12	8,6	6,9	5,5	4,3	3,5	2,8	2,3	2,0	1,7			
14	13,7	11,0	8,8	6,9	5,5	4,4	3,7	3,1	2,7	2,4		
16	20,5	16,4	13,1	10,2	8,2	6,6	5,5	4,7	4,1	3,6	3,3	
18			18,7	14,6	11,7	9,3	7,8	6,7	5,8	5,2	4,7	3,9
20				20,0	16,0	12,8	10,7	9,1	8,0	7,1	6,4	5,3
24						22,1	18,4	15,8	13,8	12,3	11,1	9,2



Schnelle Segelflugmodelle, Motorflugmodelle

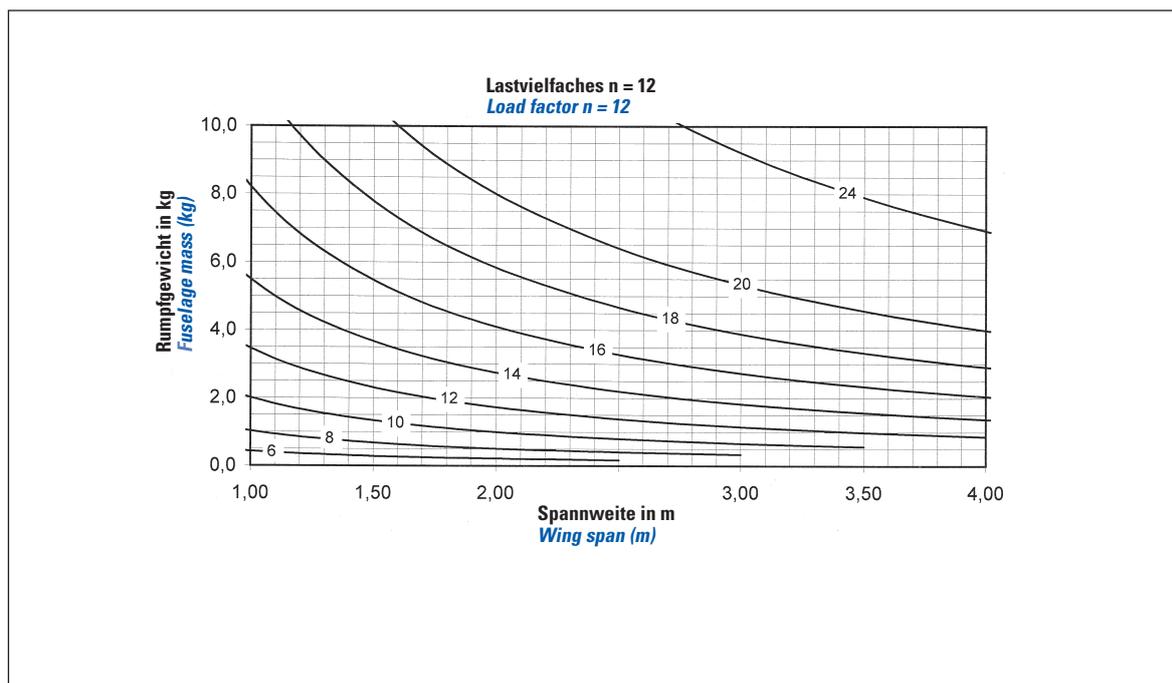
Fast model gliders, motorised model aircraft

max. Rumpfgewichte in kg für $n_{max} = 12$, abhängig vom Ø des CFK-Stabes und der Flügelspannweite

max fuselage mass in kg für $n_{max} = 12$ as a function of CRP rod diameter and wingspan

CFK-Stab Ø mm CRP rod dia.	Flügelspannweite in m / Wingspan in m											
	0,80	1,00	1,25	1,6	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00
6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2						
8	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3					
10	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6				
12	4,3	3,5	2,8	2,2	1,7	1,4	1,2	1,0	0,9			
14	6,9	5,5	4,4	3,4	2,7	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2		
16	10,2	8,2	6,6	5,1	4,1	3,3	2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	
18	14,6	11,7	9,3	7,3	5,8	4,7	3,9	3,3	2,9	2,6	2,3	1,9
20	20,0	16,0	12,8	10,0	8,0	6,4	5,3	4,6	4,0	3,6	3,2	2,7
24			22,1	17,3	13,8	11,1	9,2	7,9	6,9	6,1	5,5	4,6

213



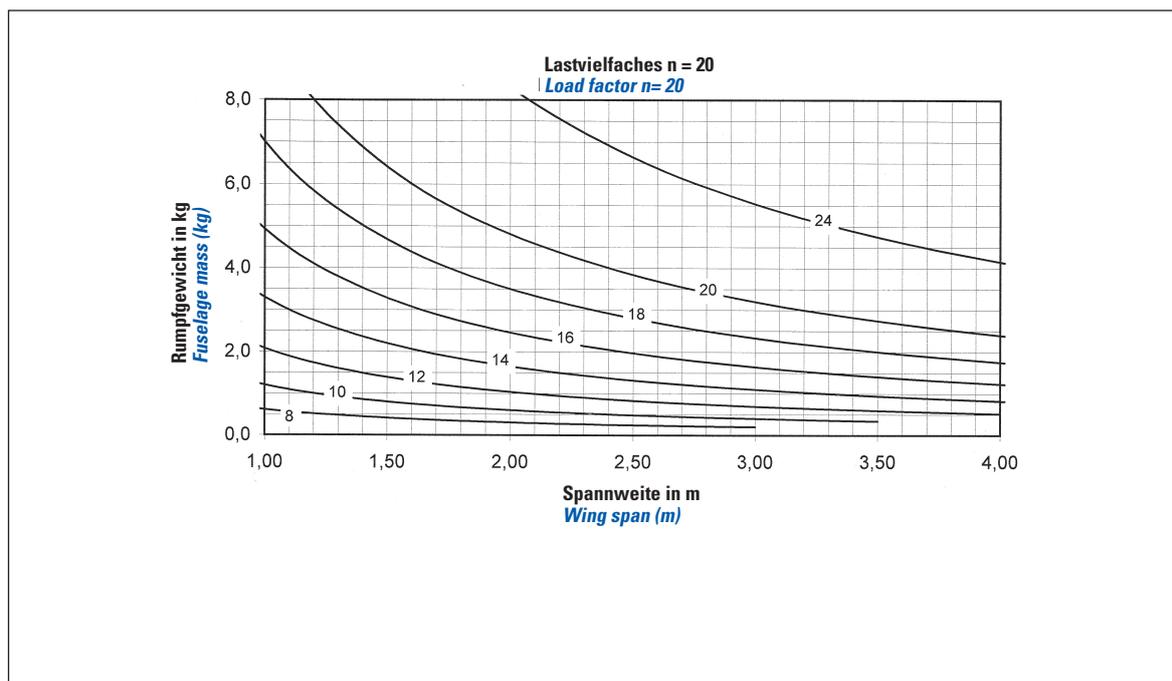
Hotliner, Speedmodelle, Kunstflugmodelle

Hotliner, high speed models, aerobatic models

max. Rumpfgewichte in kg für $n_{max} = 20$, abhängig vom \varnothing des CFK-Stabes und der Flügelspannweite

max fuselage mass in kg für $n_{max} = 20$ as a function of CRP rod diameter and wingspan

CFK-Stab- \varnothing mm CRP rod dia.	Flügelspannweite in m / Wingspan in m											
	0,80	1,00	1,25	1,6	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00
8	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2					
10	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3				
12	2,6	2,1	1,7	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5			
14	4,1	3,3	2,6	2,1	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7		
16	6,1	4,9	3,9	3,1	2,5	2,0	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	
18	8,8	7,0	5,6	4,4	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2
20	12,0	9,6	7,7	6,0	4,8	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9	1,6
24	20,8	16,6	13,3	10,4	8,3	6,6	5,5	4,7	4,2	3,7	3,3	2,8





Ausg./Ed. 06.09 Änderungen vorbehalten / Modifications reserved

GFK-WERKZEUGE, HILFSMITTEL
GRP TOOLS, AIDS

OBERFLÄCHENBEARBEITUNG

Zur Politur matter bzw. mattgeschliffener GFK-Oberflächen werden Polierpasten unterschiedlicher Feinheit verwendet.

Die Verarbeitung erfolgt bei Hartwachsen maschinell mittels Schwabbel-scheiben, bei Pasten von Hand oder mittels Polierpad.

Silicon

Produkte für den Flugzeugbau dürfen kein Silicon enthalten, da dieses Öl eine besonders glatte Oberfläche erzeugt, die zum Strömungsabriß führen kann.

Poliermittel von R&G sind aus diesem Grunde siliconfrei, enthalten jedoch als Bindemittel Paraffine und Stearat. Beim Schwabbeln von Formen ist zu bedenken, daß sich diese Bestandteile auf die Formoberfläche übertragen. Darauf aufgetragene Trennmittel (Wachse) können nur schlecht haften und werden unter Umständen beim Polieren vollständig ausgerieben.

Als Abhilfe empfiehlt sich in diesem Fall ein vorheriges Ausreiben der Form mit einem geeigneten Lösemittel (z.B. Reinigungsbenzin, Aceton etc.).

Alternativ kann mit der Kombination Grundierwachs/Folientrennmittel gearbeitet werden, die auch auf schlecht benetzbaren Untergründen einwandfrei funktioniert (siehe Seite 140).

Lackierungen

Geschliffene Oberflächen sollten zunächst lackiert und erst nach guter Durchhärtung der Farbe poliert werden.

Verwitterte Lacke und Deckschichten (Gelcoats) können erneut glänzend aufpoliert werden. Im Gegensatz zu vielen anderen Pflegeprodukten, vor allem aus dem Kfz-Bereich, ist der Glanz dauerhaft, da er auf einer Verminderung der Oberflächenrauigkeit beruht. Das Prinzip ist vergleichbar mit dem Hochglanzpolieren von Metallen (Goldschmuck, Bestecke etc.).

Schwabbeltypen

Weitgehend ebene Flächen werden mit dem Winkelschleifer und einer **Schaumstoffscheibe** (Polierpad) und flüssigen Poliermitteln (Polierpaste, Polieremulsion) poliert. Große Flächen können sehr zügig bearbeitet werden.

Schwabbel-scheiben eignen sich für kleinere Flächen und kompliziertere Bauteile. Das Hartwachs (Schleif-, Polier- und Glanzkomposition) wird gegen die rotierende Scheibe gedrückt, bis diese genügend Wachs aufgenommen hat. Dann wird die Schwabbel frei über das Werkstück geführt. Da beim Polieren Reibungswärme entsteht, sollte nicht zu lang auf einer Stelle poliert werden.

Kleine Teile lassen sich bearbeiten, indem Bohrmaschine und Schwabbel stationär in einem Stativ befestigt werden. Das Werkstück wird gegen die Schwabbel gedrückt.

Handpolitur mittels Schwabbel-scheibe und Hartwachs



Polishing by hand with a buffing wheel and hard wax

SURFACE FINISHING

Polishing matt or matt-ground GRP surfaces requires polishing pastes with various degrees of fineness.

Hard waxes are applied with machine-powered buffing wheels, pastes by hand or with polishing pads.

Silicone

Products for aircraft construction must not contain silicone because this oil generates a particularly smooth surface that can cause stalling.

For this reason, all polishing agents from R&G are free of silicone, but they do contain paraffins and stearate as binders. When moulds are buffed, it must be borne in mind that these constituents are transferred to the surface. Release agents (waxes) that are then applied on top adhere only poorly and may detach completely when polished.

One remedy recommended for this case is to rub out the mould beforehand with a suitable solvent (e.g. cleaner's naphtha, acetone, etc.).

An alternative is the combination of priming wax and film release agent, which works without problems even on base surfaces with low wetting (reference page 140).

Varnishes

Ground surfaces should first be varnished and then, after the varnish has fully hardened, polished.

Corroded varnishes and overlays (gel coats) can be polished to renewed lustre. In contrast to many other care products, above all for use on automobiles, the lustre is long-lasting because it is based on the reduction of surface roughness. The principle is comparable to the mirror-finishing of metals (gold jewellery, cutlery, etc.).

Buffing methods

*Surfaces that are mostly flat are polished with liquid polishing agents (polishing paste, polishing emulsion) applied with an angle grinder and a **foam wheel** (polishing pad). This method can treat large areas in very short times.*

Buffing wheels are suitable for smaller surfaces and more complex components. The rotating wheel is pressed against the hard wax (grinding, polishing, and high-gloss composite) until enough wax has been taken up. Then the buffing wheel is applied to the work piece and moved over the surface in no particular pattern. However, polishing should not take too long at any one point owing to the heat caused by friction.

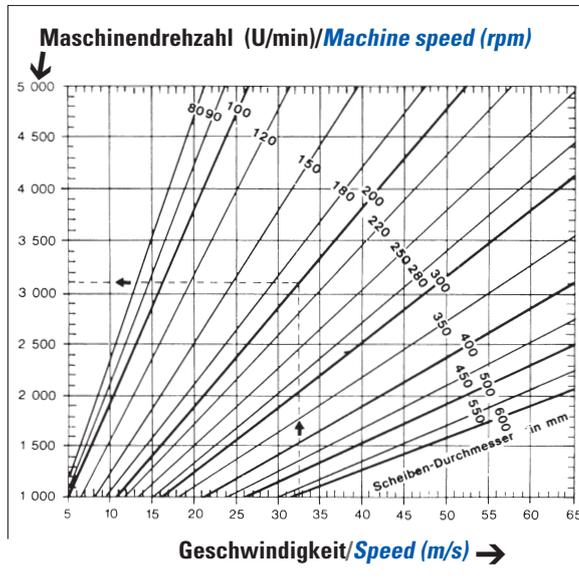
Small parts can best be treated when the drilling machine and the buffing wheel are clamped in a support stand. The work piece is pressed against the buffing wheel.

Dieses Diagramm hilft:

1. den richtigen Durchmesser der Scheibe zu wählen,
2. mit der richtigen Drehzahl zu arbeiten,
3. mit der wirtschaftlichsten Umfangsgeschwindigkeit zu fahren.

This diagram is to help you to choose

1. the right diameter for the wheel,
2. the right spindle speed for the work,
3. the most economical peripheral speed.



Schleifen <i>Grinding</i>	Meter/Sekunde <i>Speed (m/s)</i>
Metalle allgemein <i>Metals, general</i>	30 - 40
Edelstahl <i>Stainless steel</i>	20 - 30
Hartmetalle <i>Hard metals</i>	10 - 15
Thermoplaste <i>Thermoplastics</i>	8 - 15
Duroplaste <i>Thermosets</i>	10 - 25
Acrylglas <i>Acrylic glass</i>	3 - 8
Polieren <i>Polishing</i>	Meter/Sekunde <i>Speed (m/s)</i>
Stahl <i>Steel</i>	30 - 35
Bunt - und NE- Metalle <i>Non-ferrous metals</i>	30 - 50
Leichtmetalle <i>Light metals</i>	40 - 45
Thermoplaste <i>Thermoplastics</i>	5 - 15
Duroplaste <i>Thermosets</i>	25 - 30
Polyesterlacke <i>Polyester varnishes</i>	15 - 30

DOSIEREN - MISCHEN - PINSEL

Dosieren

Der Erfolg beim Arbeiten mit Reaktionsharzen ist von sorgfältigem Dosieren und Mischen der Komponenten abhängig. Ein falsches Mischungsverhältnis und eine unzureichende Durchmischung führt fast immer zu irreversiblen Fehlhärtungen.

Die Erfahrung lehrt, daß die meisten Fehler sehr einfache Ursachen haben:

Kleinste Harzmengen (10 g) können nur noch mit genauen und sehr teuren Laborwaagen exakt dosiert werden; daher empfehlen wir das Mischen nach Volumenteilen, z.B. durch Aufziehen der Komponenten mit Einwegspritzen. Dabei muß beachtet werden, daß das angegebene Mischungsverhältnis nach **Gewicht** nicht unbedingt auch dem Mischungsverhältnis nach **Volumen** entspricht. Meist ergibt sich durch die unterschiedliche Dichte von Harz und Härter eine Abweichung. Das Volumen-Mischungsverhältnis muß also zunächst über die Dichte der Komponenten bestimmt werden.

Größere Ansätze ab ca. 50 g sollten vorzugsweise mit einer Digital- oder Briefwaage dosiert werden.

Ist ein Abwiegen auch größerer Ansatzmengen nicht möglich, sollten Volumen-Meßgefäße wie Meßbecher, Meßzylinder oder Einwegspritzen verwendet werden.

Speziell sehr dünnflüssige Komponenten wie Peroxide (MEKP-Härter bei der Polyesterharzverarbeitung) lassen sich nach Volumen genau dosieren. Für Peroxid-Kleinpackungen sind bei R&G Kunststoffpipetten erhältlich.

Mischen

Wer Reaktionsharze nur hin und wieder verarbeitet, kann zum Anmischen auf leere Joghurtbecher o.ä. zurückgreifen. Dies gilt zumindest für die lösemittelfreien Epoxydharze.

Becher, die Sicken im Boden aufweisen, sind jedoch nicht geeignet. In den Vertiefungen läßt sich das Harz nicht sorgfältig mit dem Härter mischen. Wird dann noch der letzte Rest mittels Pinsel entnommen, kommt es aufgrund des Mischfehlers zu stellenweisen Fehlhärtungen im Laminat, eben da, wo praktisch reines Harz aufgetragen wurde. Vermeiden kann man dies durch Verwendung von **Bechern mit glatter Wand und ebenem Boden**.

Prinzipiell ist auch die Benutzung von Mehrweggefäßen aus PE möglich (Gefrierdosern). Ausgehärtete Harzreste lassen sich einigermaßen gut entfernen.

Aus arbeitshygienischer Sicht sind Mehrweggefäße nicht zu empfehlen, da Sie meist noch klebrige Reste, z.B. am Rand aufweisen und gereinigt werden müssen.

Die Berufsgenossenschaft Chemie empfiehlt in ihren Hinweisen zum Umgang mit Epoxyd- und Polyesterharzen die Verwendung von Einweggefäßen und Rührstäbchen.



DOSING - MIXING - BRUSHING

Dosing

The meticulous dosing and mixing of the constituents is essential if work with reactive resins is to be successful.

The wrong mixing ratio or inadequate thoroughness in mixing the constituents almost always leads to irreversible defects in the curing process.

Experience has shown that most mistakes have very simple causes.

*The **smallest quantities of resin** (10 g) can be exactly dosed with precise and very expensive laboratory balances only. For this reason we recommend mixing based on parts by volume, e.g. as measured in disposable injectors. It must be borne in mind here that the specified mixing ratio based on **weight** does not necessarily correspond to the mixing ratio based on **volume**. In most cases this discrepancy is caused by the differing densities of the resin and hardener. In other words, the volume mixing ratio must first be determined as a function of the constituents' densities.*

***Greater quantities** from about 50 g should be dosed preferably with digital or letter scales.*

Should it not be possible to weigh larger quantities, volumetric vessels such as measuring cups, measuring cylinders, or disposable injectors should be used.

Specifically constituents of very low viscosity such as peroxides (MEKP hardeners for processing polyester resins) can be dosed precisely by volume. R&G provides plastic pipettes for small quantities of packaged peroxide.

Mixing

When reactive resins are processed only occasionally, they can be mixed in empty yogurt pots or similar. This applies at least to solvent-free epoxy resins.

*However, pots or other receptacles exhibiting beads in their bases are unsuitable. Resin in indentations cannot be carefully mixed with the hardener. Removing the rest with a brush introduces a mixing error that in turn proves detrimental to curing in the laminate, in particular where virtually pure resin has been applied. This can be prevented when **receptacles with smooth sides and a flat base** are used.*

In principle, reusable receptacles of PE (freezer boxes) can also be used. Cured resin residue can be removed fairly easily.

From the viewpoint of industrial hygiene, reusable receptacles are not recommended: in most cases they still have a tacky residue, e.g. along the edge, and must be cleaned.

In its publications on handling epoxy and polyester resins, the professional association of chemical workers recommend the use of disposable receptacles and stirring rods.



Pinsel

Pinsel benötigt man zum Auftragen und Verteilen von Reaktionsharzen und natürlich zum Stupfen der Lamine, dem sogenannten **Entlüften**.

Borstenpinsel leisten hier bessere Dienste als die weichen Haarpinsel. Auch Deckschichten sollten beim Auftragen gründlich durchkämmt werden, um Luft- einschlüsse zu vermeiden.

Die Pinselborsten müssen lösemittelfest gebunden sein (nicht selbstverständlich!), vor allem bei der Polyesterharzverarbeitung. Auch das Reinigen mit Lösemittel ist dann möglich.

Die Stiele sollten nicht lackiert sein, da sich der Lack während des Gebrauchs in Polyesterharz oder beim Reinigen anlösen würde.

Wir empfehlen die Produkte **R&G Laminierpinsel** und **Modler**, die diese Anforderungen erfüllen.



Brushing

*Brushes are needed to apply and spread reactive resins and, of course, to **de-air** the laminates through dabbing.*

Bristle brushes perform better service here than the soft hair brushes. Overlays too should be thoroughly "combed" when being applied. This helps to prevent air inclusions.

The materials used to bind the brush's bristles must be resistant to solvents (this is not always the case!), especially when polyester resins are processed. Solvents can then be used to clean the brushes.

The handles should not be varnished: the varnish may detach when it is cleaned or comes into contact with polyester resin.

*We recommend the products **R&G laminating brush** and **modelling brush**, both meeting with these requirements.*

Liegefahrrad aus CFK



Recumbent bicycle of CRP

Fünf Kohlefaser-Bauteile bilden die 55 kg leichte Zender Fact-4 Karosserie.



A lightweight at 55 kg, the Zender Fact 4 body shell consists of only five carbon-fibre components

SCHEREN

Einsatz und Pflegehinweise

Scheren von R&G sind Spezialwerkzeuge für starke und dauerhafte Beanspruchung, qualitätsgeschützt durch Solingen-Gesetz und DIN-Vorschriften. Technische Fasern, speziell Aramidfasern, stellen eine ernsthafte Herausforderung für den Scherenhersteller dar. Der Schnitt einer normalen Schere reicht für diese Gewebe nicht aus.

Härte des Stahls

Verstärkungsfasern sind meist härter als normaler Stahl. Die Schneiden werden schnell stumpf. Es wird daher nur der beste verfügbare Scherenstahl mit einem Kohlenstoffgehalt von über 0,6 % verarbeitet.

Microverzahnung

Die meisten Verstärkungsfasern sind überaus glatt. Sie rutschen über die Schneide. Der negative Effekt zeigt sich doppelt:

- Das Rutschen der Fasern wirkt abrasiv und stumpft die Schneiden schnell
- Ein feinfühliges, exacter Zuschnitt ist kaum möglich.

Daher wird eine Schneide mit einer **Microverzahnung** versehen.

Faserabrieb

Faserabrieb entsteht beim Schneiden und haftet durch elektrostatische Aufladung auf dem magnetischen Stahl. Die Faserpartikel wirken stark abrasiv und führen zur Abstumpfung.

Der Verschleiß richtet sich nach der Beanspruchung. Abhilfe ist hier nur möglich durch die Pflege der Schere.

Pflege tips

Die Schere sollte zwischendurch mit einem Lappen gesäubert werden. Geben Sie öfters einen Tropfen Öl an die Schneiden, an die Drehstelle der Blätter und die Schraube.

Als Faustregel gilt:

- Wenn die Schneiden rau gehen, säubern und einölen, nicht schleifen
- Drehstelle der Blätter geölt halten
- Nicht an der Verschraubung drehen

Handhabung

Die Schere muß allein durch ihre Konstruktion schneiden und nicht etwa durch kräftigen, meist seitlichen Druck der Finger. Die angebotenen Modelle sind im allgemeinen für Gewebelagen bis ca. 1 mm Dicke geeignet.

Nachschleifen

Eine Schere, die alles schneidet und nie stumpf wird, gibt es nicht. Eine professionelle Aufbereitung der Stahlscheren kann gegen einen Pauschalpreis ausgeführt werden (siehe Preisliste). Dazu werden die Scheren im Werk auseinandergenommen, die Innenseiten der Blätter geschliffen, die Scherenteile wieder montiert und neu auf Gang gesetzt. Die Schneiden werden geschärft und abgezogen, sowie eine neue Microverzahnung angebracht. Eine fachgerechte Endkontrolle gewährleistet den Gebrauchswert einer neuen Schere.

SHEARS

Instructions on use and care

The shears from R&G are special tools which are designed for constant, heavy-duty applications and whose quality is certified under the Solingen-Gesetz (Solingen Act) and the DIN specifications. Engineering fibres, in particular aramid fibres, pose a serious challenge to the manufacturer of shears. The conventional shears do not have the cutting power for these fabrics.

Hardness of steel

In most cases, reinforcing fibres are harder than normal steel. The shears quickly blunt. Consequently, only the best available steel with a carbon content greater than 0.6% is used in the manufacture of shears.

Micro-teeth

Most reinforcing fibres are extremely smooth and so slip over the cutting edge. The negative effects are twofold:

- Slipping fibres have an abrasive effect on the cutting edge that quickly blunts
- Sensitive, precise cutting is almost impossible.

To counteract these, the cutting edge is provided with **micro-teeth**.

Fibre dust

Cutting fibres gives rise to dust that adheres to the magnetic steel through electrostatic build-up. These fibre particles are highly abrasive and cause blunting.

Wearing depends on the stresses induced. The only possible remedy in this case is to take care of the shears properly.

Tips on care

The shears should be cleaned from time to time with a cloth. Every now and then, slightly oil the cutting edges, the pivot, and the screw.

The general procedure is as follows:

- When the cutting edges become rough, clean and oil them. Do not grind.
- Keep the pivot between the blades oiled.
- Do not loosen or tighten the screw.

Handling

The shears must cut solely on the strength of their design. There must be no great, mostly lateral exertion by the fingers. The models presented are generally suitable for fabric layers up to 1 mm thick.

Regrinding

There is no such thing as shears that can cut everything and never go blunt. We can provide professional work on blunt steel shears for a flat rate (see price list). This work involves dismantling the shears at our plant, grinding the inner sides of the blades, reassembling the parts of the shears, and adjusting them to specifications. The cutting edges are sharpened and honed and provided with new micro-teeth. A professionally conducted final inspection ensures that the shears exhibit the utility value as new. This work takes on average about three to four weeks.

ARBEITSSCHUTZ UND HAUTSCHUTZ

Seit vielen Jahren stehen die berufsbedingten Hauterkrankungen mit an der Spitze aller Berufskrankheiten. Neue, chemisch sehr reaktionsfähige Stoffe werden in der Industrie zunehmend verarbeitet. Naturgemäß ist die Haut der Hände am meisten gefährdet:

- Durch direkte toxische Schädigung
- Nach Abnutzung und Erschöpfung der Widerstandskraft
- Durch zunehmende Empfindlichkeit der Haut (Sensibilisierung bis zur Allergie)
- Nach Alterung der Haut

Gefahrstoffe

Allen Stoffen, die den natürlichen Säure-, Fett- und Hornmantel der Haut zerstören, sollte der direkte Kontakt mit der Haut verwehrt werden. Man kann sie in drei große Gruppen einteilen:

- Wasserlösliche Stoffe
- Wasserunlösliche Stoffe
- Stoffe, die in Verbindung mit Licht zu Schaden führen

Hautschutz

Geschützt werden muß die gesunde Haut, die abgenutzte, alternde und die empfindliche Haut.

Um Berufskrankheiten zu vermeiden, gibt es nur eine Forderung: „Vorbeugen ist besser als heilen!“ Daher steht an erster Stelle der **gezielte prophylaktische Hautschutz**.

Dieser wird durch Hautschutzpräparate erreicht, deren Salbengrundlage in den vorgenannten Stoffgruppen unlöslich ist. Sie müssen eine gute Haftfähigkeit besitzen und sich mit dem Hautfett und Schweiß verbinden, ohne den Hautstoffwechsel zu stören. Außerdem sollen sie die Hautreinigung nach der Arbeit erleichtern.

Hautreinigung

Schmutz und unsichtbare Schadstoffe müssen durch gründliches Händewaschen und reichliches Abspülen von der Haut entfernt werden. Dabei soll die Belastung der Haut möglichst niedrig gehalten werden, denn das Entfernen des natürlichen und notwendigen Hautfetts beeinträchtigt die normale Hautfunktion.

Hautpflege

Der Hautpflege kommt eine große Bedeutung zu, die leider oft vernachlässigt wird. Durch geeignete Präparate werden an der Haut entstandene Schäden nach der Arbeit wieder ausgeglichen. Die erforderliche Pflege hängt vom Hauttyp, vom Arbeitsprozeß, von der Jahreszeit, von Kälte, Wind und Luftfeuchtigkeit ab.

INDUSTRIAL SAFETY AND SKIN PROTECTION

For many years, occupational dermatoses have been the joint number one of all occupational diseases. The industries are processing new, highly reactive substances on an ever greater scale. It is inevitably the skin on the hands that is most at risk:

- *Through direct toxic effects,*
- *When the skin has lost most or all of its resistance,*
- *When the skin has become increasingly sensitive (from sensitisation to allergy),*
- *When the skin has aged.*

Hazardous substances

All substances that destroy the skin's natural acid-resisting, fatty, and horny layers must be prevented from coming into direct contact with the skin. These substances can be divided into three major groups:

- *Water-soluble substances,*
- *Water-insoluble substances, and*
- *Phototoxic substances, or substances that do harm under the effects of light.*

Skin protection

Protection must be provided for skin, no matter its condition.

*There is only the one procedure for effectively counteracting occupational diseases, namely "prevention is better than cure". In other words, **targeted, prophylactic skin protection** must be given top priority.*

This is achieved with skin protection preparations whose ointment base does not dissolve in the substance groups listed above. They must exhibit good adhesiveness and bond with cutaneous fat and sweat without disrupting the skin's metabolism. Furthermore, the preparation should facilitate cleaning of the skin after the work.

Cleaning the skin

Dirt and invisible harmful substances must be removed: the hands are thoroughly washed and the skin is rinsed with copious amounts of water. At the same time, the stress placed on the skin must be minimised to the greatest possible extent. After all, the skin's proper functioning is also impaired when the natural and necessary layer of cutaneous fat is removed.

Skin care

Great importance must be attached to skin care, which is otherwise neglected all too often.

Suitable preparations serve to balance out the harm done to the skin after work. The care needed depends on the skin type, the work process, the season, the cold, the wind, and the air humidity.

VAKUUMTECHNIK
VACUUM TECHNOLOGY

ATMOSPÄRENDRUCK

Die Erde ist von einer Lufthülle umgeben, deren Gewicht auf die Erdoberfläche drückt und den Atmosphärendruck erzeugt. Dieser Druck beträgt auf Meereshöhe 1013 mbar, dies entspricht einem Druck von ca. 1 kg/cm² oder 10.000 kg/m². Diesen hohen Druck nutzt man für das Pressen hochwertiger Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen. Dazu wird zunächst ein normales Laminat in der Form hergestellt, eine Vakuumfolie am Formenrand aufgeklebt und die Luft mittels Vakuumpumpe abgesaugt.

Je höher das Vakuum, umso höher der Druck der Atmosphäre auf das Laminat. Bei einem -theoretisch- **hundertprozentigen Vakuum** würde das Bauteil mit einer Kraft von **10.000 kg/m²** gepreßt werden.

Erreichbar sind mit dem Pumpen **P 2** und **P 3** ein Vakuum von ca. 90 % (= ca. 9 t/m²), mit der **P 1** ca. 55 % (= ca. 5,5 t/m²).

Bilder aus dem Flugzeugbau-Projekt von Dr.-Ing. Herbert Funke, Thomas und Mathias Strieker

Näheres im Internet <http://www.wabensandwich.de>

ATMOSPHERIC PRESSURE

The earth is enveloped in a layer of air whose weight presses against the earth's surface, giving rise to atmospheric pressure. At sea level this pressure measures 1013 mbar, which corresponds to approx. 1 kg/cm² – or 10,000 kg/m².

This high pressure is utilised in the press moulding of high-quality components of fibre composites. Here, a normal laminate is first laid up in the mould, a vacuum film glued along the edges of the mould, and the air extracted by means of a vacuum pump.

*The harder the vacuum, the higher the pressure the atmosphere exerts on the laminate. In the case of a (theoretical) **100 % vacuum**, the pressure acting on the component would be **10,000 kg/m²**.*

*The pumps **P 2** and **P 3** achieve vacuums up to approx. 90% (= approx. 9 t/m²), the pump **P 1** approx. 55% (= approx. 5.5 t/m²).*

Photos documenting the Silence aircraft construction project conducted by Dr.-Ing. Herbert Funke, Thomas and Mathias Strieker

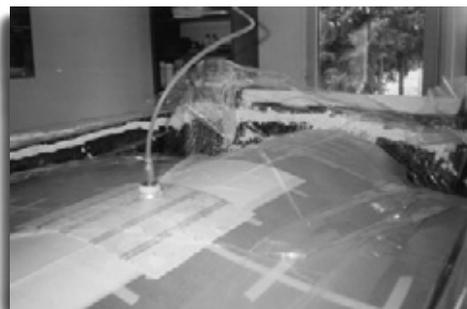
More information at <http://www.wabensandwich.de>

Abdichten der PE-Vakuumfolie mittels Silikonkautschuk (Dichtsilicon) am Formenrand



Silicone rubber (sealing silicone) is applied to the edges of the PE vacuum film on the mould

Im Bereich des Vakuumschlusses wird zusätzliches Saugvlies unterlegt, um ein Eindringen zu verhindern.

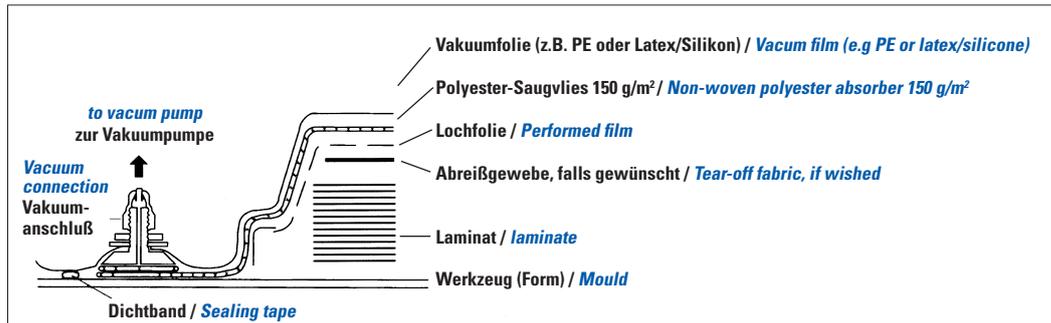
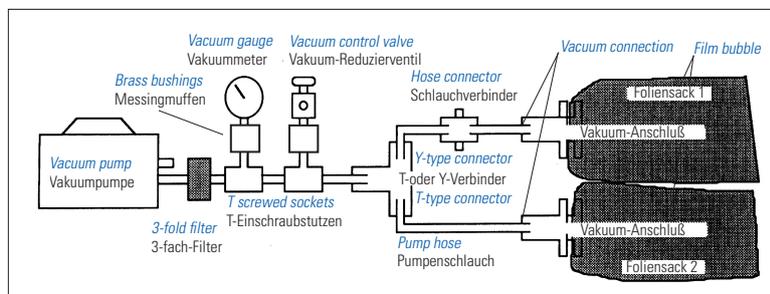
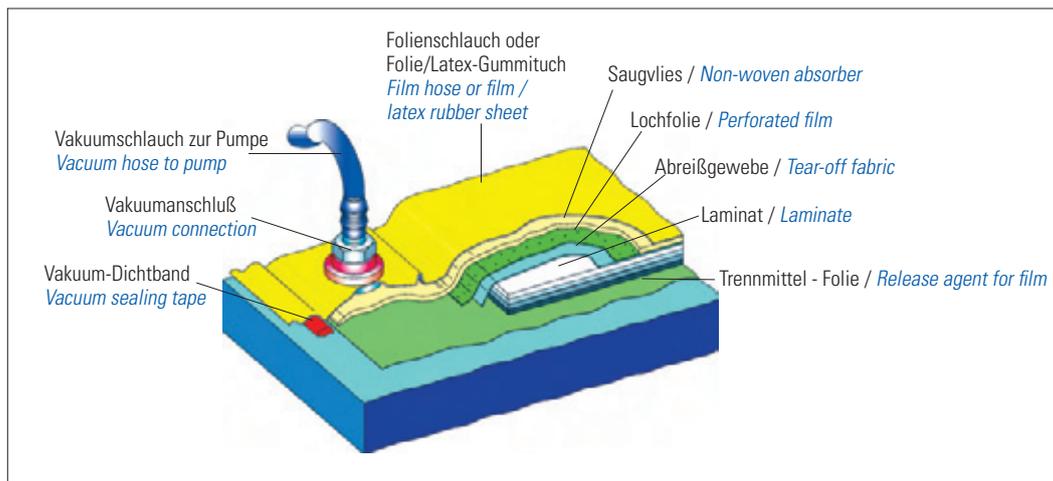


An additional non-woven absorber placed beneath the vacuum connection prevents it from being pressed into the mould surface

Auflegen der Folie und Abdichten am Formenrand. Da PE-Folie nur begrenzt dehnfähig ist, wird sie großzügig in Falten gelegt.



The film is placed and sealed on the edge of the mould. The PE film exhibits only limited extensibility, so it must be applied in generous folds.

Schema für den Laminataufbau im Vakuum
Laminate lay-up in vacuum

Aufbau einer Vakuumeinrichtung zum gleichzeitigen Absaugen zweier Foliensäcke
A vacuum device evacuating two film bubbles

Notwendige Komponenten beim Vakuumpressen hochwertiger Laminat
Components needed for the vacuum press moulding of high-quality laminates


ANHANG
APPENDIX

Copyright

© bei R&G. Überarbeitet 6/2009

Der Nachdruck ist, soweit keine fremden Rechte verletzt werden, mit Quellenangabe und gegen Belegexemplar gestattet.

Für eventuelle Fehler oder Irrtümer kann keine Haftung übernommen werden.

Änderungen bei den Produkten sind ohne Vorankündigung möglich.

Wir danken den folgenden Personen, Firmen und Verlagen für Ihre freundliche Unterstützung:

Dr.-Ing. Herbert Funke, Uni-GH Paderborn	Akzo Nobel AG
Dr. Markus Milwich, ITV Denkendorf	Hexion AG
Karl Bodenhöfer, Waltenhofen	BASF AG
Rolf Suter, R&G-Schweiz	ECC
CarboTech Composites GmbH, A-Salzburg	DuPont
Fachhochschule für Technik, Esslingen	PD-Interglas
Ingo Laue Werbeobjekte, Buggingen	Wacker-Chemie/Drawin
Carbotech U. Dix, Aachen	Zender Exklusiv-Auto
Josef Eichstetter	DLR
Peter Schakow	Verseidag
Jörg Golombek	Dornier
Siegfried Panek	Neckar-Verlag
G. Fehlau	Beuth-Verlag
Silence Aircraft	Carl Hanser-Verlag
	Expert-Verlag
	Vogel-Verlag
	Zechner & Hüthig Verlag
	VDI-Verlag
	Vieweg-Verlag

Copyright

Redacted 6/2009. © by R&G

Provided that there is no violation of rights, reproductions of this publication are permitted when details of the source are included and a specimen copy is submitted to R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH.

No liability is accepted for any errors of any kind.

The products listed herein are subject to change without prior notice.

Our thanks go to the following persons, firms, and publishers for their kind support:

Besuchen Sie uns im Internet:

www.r-g.de

Sie finden:

- **e-shop**
- **Preisreduzierte** Rest- und Sonderposten
- **Downloads** von Anleitungen
- **Links** zu Firmen und Institutionen
- Info's zu **Bauprojekten**
- **DIN-Sicherheitsdatenblätter** für R&G-Produkte



Visit our web site at:

www.r-g.de

Here you'll find:

- **e-shop**
- Remaining stock and special offers **at bargain prices**
- Instruction manuals for **downloading**
- **Links** to firms and institutions
- Info on **building projects**
- **DIN safety data sheets** for R&G products

Einheiten
Units of measurement

Einheit <i>Unit for</i>	Name <i>Full name</i>	Zeichen <i>Abbreviation</i>	Beziehung/Definition bzw. alte Einheiten <i>Definition, former units</i>
Mechanische Spannung, Druck <i>Sress, pressure</i>	Pascal Megapascal Gigapascal	Pa MPa GPa	1 Pa = 1 N/m ² 1 MPa = 1 N/mm ² (= 0,102 kp) 1 GPa = 1000 MPa = 1 kN/mm ²
Temperatur <i>Temperature</i>	Celsius	°C	1 °C = 1 K (Kelvin)
Dynamische Viskosität <i>Dynamic viscosity</i>	Pascal · Sekunden	Pa · s	1 mPa · s
Arbeit <i>Work</i>	Joule	J	1 W · h = 3,6 kJ
Schlag-,Kerbschlagzähigkeit <i>Impact strength, notch impact strength</i>	Kilojoule	kJ/m ²	1 Nmm/mm ² = kJ/m ² 1 kpcm/cm ² = 0,981 kJ/m ²
Druck (von Fluiden) <i>Pressure (from fluids)</i>	bar	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa 1 at = 1 kp/cm ² = 0,981 bar 1 atm = 1,0193 bar

Vielfache von Einheiten
Unit prefixes

Name <i>Name</i>	Zeichen <i>Abbreviation</i>	Wert <i>Value</i>
Atto	a	10 ⁻¹⁸
Femto	f	10 ⁻¹⁵
Piko	p	10 ⁻¹²
Nano	n	10 ⁻⁹
Mikro	μ	10 ⁻⁶
Milli	m	10 ⁻³
Zenti	c	10 ⁻²
Dezi	d	10 ⁻¹
Deka	da	10 ¹
Hekto	h	10 ²
Kilo	k	10 ³
Mega	M	10 ⁶
Giga	G	10 ⁹
Tera	T	10 ¹²
Peta	P	10 ¹⁵
Exa	E	10 ¹⁸



Fachtermini

(in alphabetischer Reihenfolge)

Häufig verwendete Begriffe**Adhäsionskräfte** bewirken den Zusammenhalt zwischen Kleber und Füge teil**amorph**

glasartige, nicht kristalline Struktur

Anisotropie

die Eigenschaften sind vollkommen richtungsabhängig (in allen Richtungen unterschiedlich)

Arbeitsaufnahmevermögen

siehe auch Energieaufnahmevermögen

Aushärtung

siehe Vernetzung

Aushärtungsprozess

Reaktion des Harzes und des Härters während der Herstellung eines FVV

Autoklav

Vorrichtung, in der gleichzeitig hohe Temperaturen und hohe Drücke erzeugt werden können

Avivage

auch Präparation oder Schlichte (Sizing) genannt, dient der Verarbeitbarkeit von Garnen z.B. zu Geweben. Sie wird teilweise nach dem Weben durch Waschen (Aramid) oder thermische Entschlichtung (Glas) wieder entfernt. Sie kann aber auch als Haftvermittler zur Matrix (Carbon, Glas, Keramik) dienen

Ballistischer Schutz

Schutz gegen schnell fliegende Teile wie z.B. Projektile oder Metallsplitter

Beschleuniger

setzt die zur Vernetzungsreaktion notwendige Zeit bzw. Temperatur herunter

CFK

Verbundstoff aus Kohlenstoffasern mit einer polymeren Matrix („C“ - Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff)

Corona-Behandlung

Verfahren zur Erzeugung von elektrischen Entladungen auf der Oberfläche; erzeugt dort Sauerstoffanlagerungen

Delamination

Ablösung der Faser von der Matrix oder Matrixriss parallel zu einer Laminat- schicht

Duromer

Polymer, bei dem die Molekülketten über kovalente Bindungen dreidimensional verknüpft sind

Energieaufnahmevermögen

Speicherfähigkeit der Energie einer Faser. Entspricht der Fläche unterhalb der Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Materials

Epoxydharz (EP)

zulässige oder gebräuchliche Schreibweisen: Epoxydharz, Epoxydharz, Epoxy

exotherme Reaktion

Reaktion, bei der Wärme frei wird

Technical terms

(in alphabetical listing)

in frequent use**accelerator***reduces the time or temperature needed for the cross-linking reaction to initiate***adhesive forces** *effect the cohesion between the adhesive and the part to be joined***air voids***air inclusions trapped in the material during processing***amorphous***glass-like, non-crystalline structure***anisotropy***the properties differ completely depending on the direction taken through the material***autoclave***device that can generate high temperatures and high pressures at the same time***ballistic protection***protection against bodies travelling at high speed, e.g. projectiles or shrapnel***braidings***two- or three-dimensional textile fabric with regular thread count and self-contained appearance whose braiding threads cross the edge of the fabric at an angle***carbon filament fabric***or carbon fabric for short***chopped strands***typical lengths of fibres (in mm) used in fibre-reinforced moulding compounds***corona etching***technique that generates electric discharges on the surface for the adsorption of oxygen***crazing***the smallest-scale damage in the laminate (e.g. air voids, separation of fibres and matrix, cracks in the matrix)***creep***increase in elongation with time when under a constant load; owing to the viscoelastic properties of plastics, creep is high in thermoplastics, lower in thermosets***cross-linking***chemical reaction whereby the polymer chains interlink to form a three-dimensional network of covalent bonds***CRP***(carbon-fibre-reinforced plastic), composite of carbon fibres and a polymer matrix***crystallisation***at low temperatures epoxy resins and hardeners can form crystals, and the compound becomes clouded or solidifies: created by a physical process, these crystals can be dissolved without any sacrifice to quality when the products are heated e.g. in a 60 °C water bath for two to three hours*

Faserfinish bei Kohlefasern

Epoxydhaltiger Haftmittelüberzug zur Verbesserung der Haftung zwischen Faser und Matrix sowie zum Schutz der Faser

Fibre-pull-out-Effect

Herausziehen der Faser aus der Matrix

Filament

Endlos-Einzelfaser

Finish bei Glasfilamentgeweben

Haftmittelüberzug zur besseren Verbindung der anorganischen Glasfaser mit dem organischen Matrixharz. Unterschiedliche Qualitäten verfügbar (z.B. Silanschlichte, Finish I 550)

FKV

Faserkunststoffverbund

Flammfest

Wird nicht durch eine offene Flamme in Brand gesteckt

Fremdeinschlüsse

Bei der Verarbeitung eingeschlossene Fremdpartikel, wie z.B. Staub- oder Schmutzteilchen

FVW

Faserverbundwerkstoff

Geflechte

textile Flächen- oder Körpergebilde mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flecht-Fäden sich in schräger Richtung zu den Warenkanten kreuzen

Gelcoatschicht

Harzschicht, die zum Schutz der Oberfläche auf Faser-Kunststoff-Verbundteile aufgebracht wird

Gelege

textile Flächengebilde, die durch Aufeinanderlegen von Fadensystemen mit oder ohne Fixierung der Kreuzungspunkte entstehen

Gestricke

siehe Gewirke

Gewebe

textile Flächengebilde, die mittels Fachbildung aus sich rechtwinklig kreuzenden Fäden zweier Fadensysteme, Kette und Schuß, hergestellt sind

Gewirke

textile Flächengebilde, die aus einem oder mehreren Fäden oder aus einem oder mehreren Fadensystemen durch Maschenbildung hergestellt sind

GFK

Verbundwerkstoff aus Glasfasern und einer polymeren Matrix (**G**lasfaser verstärkter **K**unststoff)

Glasübergangstemperatur

(T_g) Temperatur, bei der die amorphen Bereiche eines Thermoplasten erweichen.

Bei Duroplasten beschreibt der T_g den Temperaturwert, bei dem ein Übergang vom harten in einen glasartigen Zustand erfolgt. Bei Erreichen des T_g fällt die Matrixfestigkeit erheblich ab

Härter

ist die zweite notwendige chemische Komponente zur Auslösung der Vernetzungsreaktion der Prepolymere zur Herstellung von Duroplasten oder Elastomeren; siehe Radikalbildner

Harz

gleichbedeutend mit duromerer Matrix

curing process

the reaction between the resin and hardener to yield an FC

delamination

fibres become detached from the matrix, or a crack in the matrix runs parallel to a laminate ply

energy absorption capacity

a fibre's capacity to absorb energy, this corresponds to the area under the material's stress-strain curve

epoxy resin (EP)

also called epoxy

exothermal reaction

reaction that releases heat

fabric

flat textile structure manufactured from interlaces of two sets of threads, the warp and the weft, crossing at right angles to each other

FC

fibre composite

fibre fracture

failure in an FC caused by the fracture of fibres

fibre pull-out

failure caused by fibres being pulled out of the matrix

filament

single continuous fibre

finish for carbon fibres

coupling agent containing epoxy that protects the fibres and enhances their adhesion to the matrix

finish for glass filament fabrics

coupling agent that enhances bonding between the inorganic glass fibres and the organic matrix resin; available in various qualities (e.g. silane size, finish I 550)

flame-proof

does not burn when held in a naked flame

free-radical generator

chemical compound that decomposes into radicals when supplied with an initiating energy (heat, irradiation, etc.) and so triggers a radical polymerisation

FRP

fibre-reinforced plastic

gel coat

resin layer applied as a protective coat to the surface of fibre-reinforced plastic parts

glass transition temperature

T_g, the temperature at which the amorphous zones of a thermoplastic soften; for thermosets, T_g is the temperature at which the material undergoes a transition from a hard to a glass-like state; the strength of the matrix drops considerably when T_g is reached

GRP

composite of glass fibres and a polymer matrix (glass-fibre-reinforced plastic)

hardener

is the second chemical constituent needed to initiate the cross-linking reaction in prepolymers to yield thermosets or elastomers (see free-radical generator)

Harzansatz

Rezeptur zum Anmischen der verschiedenen Harzkomponenten (Harz, Härter, Beschleuniger und Sonstiges)

Harzinjektionsverfahren

Verfahren zur Herstellung von Formteilen aus Harz mit geschlossenen Werkzeugen, in die Verstärkungsmaterialien eingelegt werden

HF-Fasern

Kohlenstofffasern (hochfest) mit hoher Zugfestigkeit (identisch mit HT-Faser)

HM-Fasern

Hochmodulige Kohlenstofffasern (High Modulus)

Hobbock

Verpackungseimer aus Weißblech

HST-Fasern

Hochfeste Kohlenstofffaser mit hoher (high) Bruchdehnung (Strain) und hoher Festigkeit (Tenacity)

HT-Fasern

Kohlenstofffasern (High Tenacity) mit hoher Zugfestigkeit (identisch mit HF-Faser)

Hybridwerkstoff

hier: FWW, der zur Optimierung der Werkstoffeigenschaften mit mehreren Faserarten verstärkt ist

IM-Fasern

Kohlenstofffasern mit gleichzeitig hohen Festigkeiten und Elastizitätsmoduln (Intermediate Modulus)

Impact

englisch für Stoß

Inert

Inaktiv

Inhibitoren

chemische Verbindungen, die neu gebildete Radikale vernichten und somit den Start einer radikalischen Polymerisation verhindert, bis sie aufgebraucht sind

Isotropie

Die Eigenschaften sind vollkommen richtungsunabhängig (in allen Richtungen gleich)

Kohlenstoff-Filamentgewebe

kurz auch Kohlegewebe, Kohlenstoffgewebe, Carbonfaser-gewebe oder Carbon genannt

Kriechen

Anwachsen der Dehnung mit der Zeit bei gleichzeitiger konstanter Last. Bei Kunststoffen, durch die viskoelastischen Eigenschaften bedingt hohe Kriechneigung bei Thermoplasten, geringe bei Duroplasten.

Kristallisation

Bei niedrigen Temperaturen können Epoxydharze und Härter auskristallisieren. Dies wird erkennbar durch eine Eintrübung oder Verfestigung des Behälterinhalts. Es handelt sich hierbei um einen physikalischen Prozess. Durch Erwärmen der Produkte z.B. im Wasserbad über 2 - 3 h bei 60 °C löst sich die Kristallisation. Dieser Prozess ist ohne Qualitätseinbußen.

Kurzfasern

typische Faserlänge von faserverstärkten Formmassen (mm-Bereich)

HM fibres

high modulus carbon fibres

hobbock

packaging pail of tinplate

HST fibres

high-tensile carbon fibres of high strain and tenacity

HT fibres

carbon fibres of high tensile strength

hybrid material

here, an FC reinforced with several fibre types for optimising the material properties

IM fibres

intermediate modulus carbon fibres of high strength and modulus of elasticity

inclusions

foreign particles, such as dust or dirt particles, trapped during processing

inert

inactive

inhibitors

chemical compounds that annihilate newly formed radicals and so suppress the initiation of a radical polymerisation until they are consumed

inlay

flat textile fabrics of stacked sets of threads with or without anchored crossover points

interlaminar shear strength (ILS)

quotient of the force leading to fracture failure in the shearing area and the shearing area (DIN 65 148)

isotropy

the properties are identical irrespective of the direction taken through the material

knitted fabric

flat textile fabric manufactured from loops of one or more threads or sets of threads

laminat

cured thermosetting matrix

laminat lay-up

order and arrangement of each laminate in an FC

laminat yield strength

yield strength after which the first indications of microcracking (crazing) appear in the laminate

liner

a filament-wound element for various functions (e.g. as packing) in components

long fibre

typical lengths of fibres (in cm) used e.g. in press moulding

lubrication

also called preparation or sizing, this facilitates the processing of yarns to produce e.g. fabrics, is sometimes removed after weaving by washing (aramid) or thermal desizing (glass), and can also serve as a coupling agent for the matrix (carbon, glass, ceramic)

Lagenaufbau

schichtweiser Aufbau eines FVW, z.B. indem Verstärkungsgewebe mit Harz getränkt und ausgehärtet wird.

Laminat

ausgehärtete duromere Matrix

Laminataufbau

Aufbau und Anordnung der einzelnen Schichten eines FVW

Langfaser

typische Faserlänge, wie sie z.B. beim Pressen verwendet wird (cm-Bereich)

Liner

Ein Wickelkern, der Funktionen (z.B. Dichtung) in Bauteilen übernimmt

Luftporen

Bei der Verarbeitung entstandene Luft einschlüsse im Material

Matrixbruch

Versagen in einem FVW durch Risse in der Matrix

Matrixwerkstoff

der die Faser verbindende Werkstoff (z.B. Epoxydharz)

Mikrorißgrenze

Dehngrenze, ab der erste Mikroschädigungen (Mikrorisse) im Laminat auftreten

Mikroschädigungen

kleinste Schäden im Laminat (z.B. Luftporen, Faser-Matrix-Ablösung, Matrixriß)

Monomer

wiederkehrende chemische Grundeinheit eines Polymeren, z.B. das Monomer Ethylen beim polymeren Polyethylen

Nullausdehnung

keine Ausdehnung bei Erwärmung

Peroxide

Härter für Polyesterharze. Setzen durch ihren Zerfall die Aushärtungsreaktion in Gang. Ihr Zerfall wird durch Wärme und Initiatoren beschleunigt.

Polyaddition

Chemische Reaktion, bei der die reaktionsfähigen Gruppen bzw. Enden der Monomere miteinander zu Polymeren reagieren (Epoxydharz).

Polykondensation

wie Polyaddition, nur Abspaltung von Wasser bei der Reaktion

Polymer

langes Kettenmolekül mit Monomeren als wiederkehrende Einheit

Polymerisation

Chemische Reaktion, bei der unter Auflösung von Doppelbindungen (-C=C) aus monomeren Polymere entstehen.

Prepreg

vorgetränktes Fasergebilde, ein zum Verarbeiten fertiges, mit einem vorvernetzten Harzsystem getränktes textiles Halbzeug, das unter Druck und Hitze ausgehärtet wird.

Pyrolyse

Thermische Zersetzung chemischer Verbindungen

matrix material

the material bonding the fibres (e.g. epoxy resin)

monomer

basic repeating unit in a polymer, e.g. the monomer ethylene in the polymer polyethylene

non-wovens

flat textiles whose cohesion is generally given by the fibres' own adhesion to one another or by chemical binders

overageing

premature curing of a reactive resin compound that has been stored too long or at too high a temperature

peroxides

hardeners for polyester resins, their decomposition, accelerated under the effects of heat and initiators, initiates the curing reaction

ply lay-up

ply-by-ply arrangement of an FC, e.g. when reinforcing fabric is impregnated with resin and cured

polyaddition

chemical process whereby the reactive groups or ends of monomers react with one another to form polymers (epoxy resin)

polycondensation

as polyaddition, however the reaction releases water only

polymer

long chain molecule with monomers as the repeating unit

polymerisation

chemical reaction whereby polymers are formed from the break-up of the double bonds (-C=C) in monomers

prepreg

pre-impregnated fibre fabric, a semi-finished, ready-to-process textile product impregnated with a partially cross-linked resin system and cured completely under the application of heat and pressure

pyrolysis

the decomposition of chemical compounds at high temperatures

quasi-isotropic

almost identical properties in all directions, this can be obtained in fibre composites with equally thick plies whose reinforcements are aligned in at least three directions (0°, ±60°)

radical

atom or group of atoms with one or more free and unpaired electrons

radical polymerisation

polymerisation whereby the double bonds are broken up by the formation of radicals

resin

synonymous with thermosetting matrix

resin formulation

recipe specifying the ratios of the mixed compound's various constituents (resin, hardener, accelerator, etc.)

resin transfer moulding (RTM)

method of manufacturing moulded parts of resin in closed moulds containing reinforcing materials

quasiisotrop

nahezu gleiche Eigenschaften in alle Richtungen. Bei Faserverbundwerkstoffen kann dies durch mindestens 3 Verstärkungsrichtungen ($0^\circ, \pm 60^\circ$) mit gleichen Schichtdicken erreicht werden

Radikal

Atom bzw. Atomgruppe mit einem oder mehreren freien und ungepaarten Elektronen

Radikalbildner

chemische Verbindungen, die durch energetische Initiierung (Wärme, Strahlung usw.) in Radikale zerfallen und eine radikalische Polymerisation starten

radikalische Polymerisation

Polymerisation, bei der durch Radikalbildung die Doppelbindungen aufgespalten werden

Roving

Ein Roving besteht aus mehreren Filamenten

Sandwich

flächige Mehrschichtverbundkonstruktion, bestehend aus zwei hochfesten Außenschichten und einer leichten, dicken Innenschicht, um ein hohes Flächenträgheitsmoment bzw. eine hohe Biegesteifigkeit zu erreichen

Scherfestigkeit, interlaminae

Quotient aus der Kraft, die zum Bruchversagen innerhalb der Scherfläche führt und der Scherfläche (DIN 65 148)

Schlichte

Bei der Herstellung der Glasfasern mitaufgebrachter Verarbeitungstoff. Sie ermöglicht aufgrund ihrer Schutzwirkung eine bessere Weiterverarbeitung (z.B. durch Weben). Webschichten werden meist nach der textilen Verarbeitung entfernt.

selbstverlöschend

ohne äußere Energiezufuhr erstickt das Feuer

SFK

Verbundwerkstoff aus synthetischen Fasern (Aramid) und einer polymeren Matrix (**S**ynthesefaser verstärkter **K**unststoff)

Silane

Organische Siliziumverbindungen, Verwendung insbesondere zur Verbesserung der Haftungseigenschaften von Oberflächen

Silicone

Elastische Formmassen, deren Grundgerüst auf -Si-O- Bindungen beruht. Sie werden als 1- und 2-Komponenten-Systeme angeboten (RTV-1 und RTV-2).

Thermoplast-Prepreg

Prepreg mit thermoplastischer Matrix

Überalterung

Vorzeitige Aushärtung einer reagierenden Harzmasse infolge zu langer Lagerung bzw. Lagerung bei zu hoher Temperatur

unidirektional

in eine Richtung ausgerichtete unidirektionale Schicht; Schicht aus in einer Richtung parallel abgelegten Fasern

UP

ungesättigtes Polyesterharz

Vernetzung

chemische Reaktion, bei der Polymerketten über kovalente Bindungen zu einem dreidimensionalen Netz verknüpft werden

roving

a roving is made up of several filaments

sandwich

flat multi-ply composite structure made up of two high-strength outer layers and a lightweight, thick inner layer for a high geometrical moment of inertia and flexural strength

self-extinguishing

any fire is smothered if it is not promoted by an external source

silanes

organic silicon compounds, used in particular to enhance the adhesive properties of surfaces

silicones

elastic moulding compounds with a backbone chain of -Si-O- bonds, they are provided as one-component and two-component systems (RTV-1 and RTV-2)

size

applied to the surface of glass fibres during manufacture, this processing material has a protective function that facilitates further processing of the fibres, e.g. weaving; in most cases, weaving sizes are removed after the fibres are processed as textiles

SRP

synthetic-fibre-reinforced plastic, a composite of synthetic fibres (aramid) and a polymer matrix

thermoplastic prepreg

prepreg with thermoplastic matrix

thermoset

polymer whose molecular chains form a three-dimensional cross-linked structure of covalent bonds

unidirectional

aligned in the one direction, e.g. a ply or fibres

UP

unsaturated polyester resin

viscosity

the higher the value, the more sluggishly the material flows

WLB

the Werkstoff-Leistungsblätter, or the German materials specifications sheets, are standards that list specifications for engineering materials, e.g. reinforcing fabrics; fulfilling the requirements in the WLB automatically qualifies, and therefore approves the fabric for use e.g. in aircraft construction

zero elongation

no elongation under the effects of heat

Viskosität

je höher der Wert, desto zähflüssiger das Material

Vliese

textile Flächengebilde, deren Zusammenhalt im allgemeinen durch die den Fasern eigene Haftung bzw. durch chemische Binder gegeben ist

WLB

(**W**erkstoff-**L**eistungs**b**latt) in diesen Normen sind Werkstoffe wie z.B. Verstärkungsgewebe genau spezifiziert. Erfüllt ein Gewebe die Anforderungen des WLB, ist es automatisch qualifiziert, also z.B. für den Flugzeugbau zugelassen.



Die Definitionen wurden teilweise dem Buch „Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe“ (R&G Bestell-Nr. 380 109-1) entnommen.
Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung des Carl Hanser Verlags, München

*Some of the definitions given above are translated extracts from the book “Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe” (R&G order no. 380 109-1).
Reproduction of these passages courtesy of Carl Hanser Verlag, Munich*