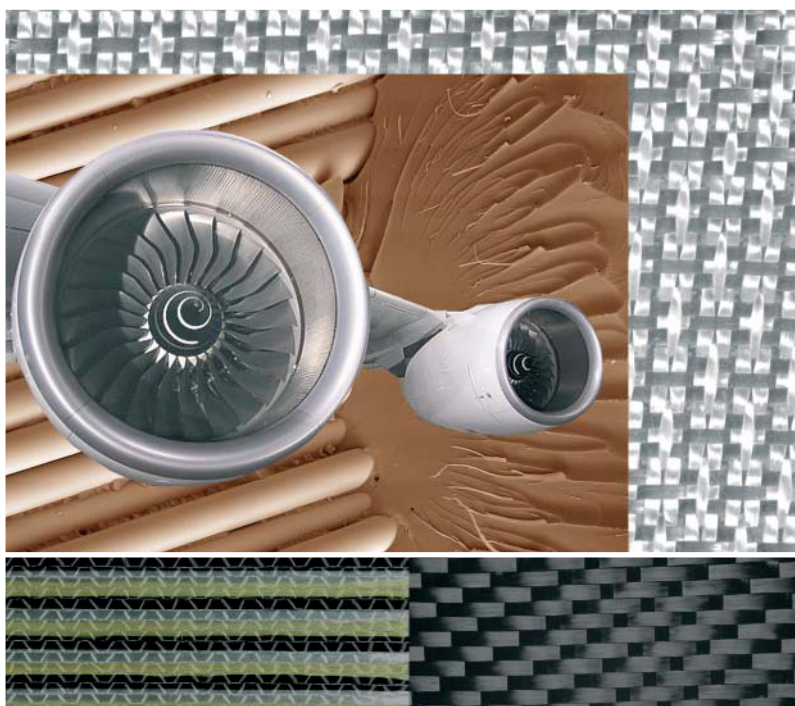


Gottfried W. Ehrenstein

Faserverbund-Kunststoffe

Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften



2., völlig überarbeitete Auflage

HANSER

Gottfried W. Ehrenstein
Faserverbund-Kunststoffe

Die Internet-Plattform für Entscheider!

- **Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!
- **Richtungweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!
- **Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.DE

Immer einen Click voraus!

Gottfried W. Ehrenstein

Faserverbund- Kunststoffe

Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften

2. völlig überarbeitete Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9; D-91058 Erlangen-Tennenlohe
Telefon: +49 (91 31) 85 - 2 97 00; Fax: +49 (91 31) 85 - 2 97 09
E-mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de; Internet: www.lkt.uni-erlangen.de

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN-10: 3-446-22716-4

ISBN-13: 978-3-446-22716-3

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

zum Coverbild:

Hintergrund: Glasgewebe (Fa. Hexcel Deutschland),
Kohlenstoff-Fasergewebe (Fa. C. Cramer, Heek Nienborg)
Hybridgelege (Glas-, Kohlenstoff- und Aramidlege: Fa. Saertex®, Saerbeck)
REM-Bild: Bruchoberfläche von Pf-Harz + GF, Maßstab: 1:500, RE-Detektor
Vordergrund: Turbine Airbus A 380, www.aerospaceweb.org/aircraft/jetliner/a380
Gestaltung: Dipl.-Päd. Yvonne Laschinske, LKT

© 2006 Carl Hanser Verlag München Wien

www.hanser.de

Herstellung: Oswald Immel

Satz: Dipl.-Päd. Yvonne Laschinske, LKT

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, Rebranding, München, Germany

Umschlaggestaltung: MCP • Susanne Kraus GbR, Holzkirchen

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

VORWORT ZUR 2. AUFLAGE

Kaum eine Gruppe im Bereich der Kunststoffe überstreicht ein so breites Anwendungsfeld wie die Faserverbundkunststoffe. Von einfachen technischen Anwendungen bis zu Höchstleistungsstrukturen in der Luft- und Raumfahrt, vom einfachen Handverfahren bis zu hochkomplizierten Fertigungstechniken reichen die Möglichkeiten. Auch wenn die Verstärkungsfasern die eigentlichen Festigkeitsträger sind, sind die Matrices in mindestens gleicher Weise für das Gelingen von Bauteilen von Bedeutung, besonders die Rationalität der Verarbeitungsverfahren wird durch sie bestimmt. Interessanterweise beschäftigen sich die wichtigsten vorliegenden Bücher zu dem Thema entweder mit der Verarbeitung oder der Konstruktion bzw. den mechanischen Eigenschaften. Selbst in der Community überdecken nur wenige Fachleute den ganzen Bereich.

An den Hochschulen wird dieser innovativste Kunststoff-Werkstoff nur selten vertreten, möglicherweise werden schon alleine deswegen viele Anwendungsmöglichkeiten nicht realisiert, weil solide Kenntnisse auf den verschiedenen Detailgebieten unabdingbar sind.

Das vorliegende Buch soll eine Einführung und einen Überblick über das ganze Spektrum der Faserverbundkunststoffe sein. Daß es gelungen ist, die 1. Auflage vollständig zu überarbeiten und vor allem inhaltlich geschlossener darzustellen, verdanke ich vielen Fachkollegen, deren Veröffentlichungen wertvolle Hinweise enthielten, aber besonders auch den Fachkollegen, die die Texte kritisch durchgesehen haben und mir viele Anregungen gegeben haben. Besonders hervorheben möchte ich die wohltuend anwendungsorientierten, verständlichen und trotzdem wissenschaftlich systematischen Vorlesungsunterlagen von Prof. Volker Altstädt, Universität Bayreuth, und von Prof. Paolo Ermanni, ETH Zürich, die Unterlagen und Kommentare von Prof. Ralph Cuntze, die ihm zum großen Erfolg bei dem World-Wide-Failure-Exercise-Wettbewerb verholfen haben. Für Fragen, die mehr chemische Probleme betreffen, konnte ich Frau Dr.-Ing. Eva Bittmann gewinnen. Das Gesamtkonzept, aber auch Details, verdankt viele durchdachte Anregungen Herrn Dr.-Ing. Johannes Wolfrum. Wichtige Einzelheiten und Wertungen stammen von Dr. Herbert Blumberg, Dr.-Ing. Ulf Breuer, Dipl.-Ing. Bernd Räckers, Dipl.-Ing. Rolf Liebold, Prof. Berthold Knauer, Prof. Achim Schmie-mann und Prof. Michael Schemme.

Gemeinsam mit Prof. Josef Kabelka, Prag, wurde die Einführung in die Prüfung und die Berechnung von Faserkunststoffverbundstrukturen bearbeitet. So konnten wir auch hier, wie wir hoffen, eine verständliche Einführung in die mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften geben.

Dem Inhalt angemessen hat Frau Dipl.-Päd. Yvonne Laschinske mit großer Sorgfalt die Gestaltung und Formatierung des Buches übernommen und die sauberen Zeichnungen von Frau Ingrid Gaus eingearbeitet.

Aber auch den vielen Helfern im Detail gebührt mein besonderer Dank!

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort

Normen und Richtlinien im Text	XIII
Weitere Normen und Richtlinien	XVII
Liste der verwendeten Formelzeichen	XXI
Liste der verwendeten Abkürzungen	XXV

1 VORBEMERKUNGEN	1
1.1 Besonderheiten	1
1.2 Wirtschaftliche Entwicklung	5
1.3 Besonderheiten der FVK als Konstruktionswerkstoff	7
1.3.1 Allgemeine Hinweise	7
1.3.2 Luftfahrt	10
1.3.3 Maschinenbau	12
1.4 Historische Entwicklung	14
1.5 Bezeichnungen	16
2 VERSTÄRKUNGSFASERN	19
2.1 Glasfasern	19
2.2 Aramidfasern	30
2.3 Kohlenstoff-Fasern	36
2.4 Naturfasern	42
2.5 Fasern im Vergleich	43

3	MATRIX.....	50
3.1	Aufgabe der Matrix und die Matrixarten.....	50
3.2	Reaktionsharze	52
3.2.1	Ungesättigtes Polyesterharz (UP-Harz)	54
3.2.2	Vinylesterharz (VE-Harz)	60
3.2.3	Epoxidharz (EP-Harz)	63
3.2.4	Phenolharze (PF-Harz).....	68
3.3	Merkmale der Härtung von Reaktionsharzen.....	72
3.3.1	Exothermie, Viskositätssteigerung und Volumenveränderung	72
3.3.1.1	Exothermie	72
3.3.1.2	Viskosität	73
3.3.1.3	Volumenveränderung.....	75
3.3.1.4	Gelpunkt, Gelzeit und Topfzeit.....	76
3.3.2	Darstellung des Härtungsvorgangs im TTT-Diagramm	77
3.3.3	Aushärtung und Aushärtungsgrad	80
3.4	Thermoplaste	89
3.4.1	Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	91
3.4.2	Langfaserverstärkte Thermoplaste	92
3.5	Faser-Matrix-Haftung.....	96
3.5.1	Textilglasfasern	96
3.5.1.1	Anbindung des Silans an die Glasfaser	96
3.5.1.2	Anbindung des Silans an den Kunststoff.....	97
3.5.1.3	Schichten	99
3.5.2	Kohlenstoff-Fasern	102
3.5.3	Aramidfasern	102
3.5.4	Naturfasern	102
4	FASERN IM VERBUND	103
4.1	Bedingungen für die Verstärkungswirkung (nach Puck).....	103
4.2	Beanspruchung in Richtung der Fasern	103
4.2.1	Endlose Fasern	103
4.2.1.1	Einzelfaser und Matrix	103
4.2.1.2	UD-Verbund.....	105

4.2.1.3	Faserbruch	107
4.2.1.4	Einfluß der Matrixdehnung	108
4.2.1.5	Besonderheiten der Druckeigenschaften	108
4.2.2	Kurze Fasern	111
4.2.2.1	Einzelne Faser	111
4.2.2.2	Praktische Bedeutung der Orientierung	117
4.2.2.3	Schwindung, Verzug	118
4.2.2.4	Pigmente	121
4.3	Beanspruchung senkrecht zur Faser	123
4.3.1	Dehnungsvergrößerung und Querrißbildung	123
4.3.2	Quer-Elastizitäts-Modul der Faser	127
4.3.3	Schubbeanspruchung parallel und senkrecht zur Faser	128
4.4	Interlaminare Reißfähigkeit	130
4.5	Thermische Eigenschaften	132
4.6	Wirkung der Faserverstärkung	135
4.6.1	Das "Knie" im Spannungs-Dehnungs-Diagramm	135
4.6.2	Festigkeit	137
4.6.3	Steifigkeit (E-Modul)	141
4.6.4	Versagensverhalten	143
5	VERARBEITUNG	148
5.1	Verarbeitung von Halbzeug	148
5.1.1	Halbzeuge mit duroplastischer Matrix	148
5.1.1.1	Prepreg-Herstellung	150
5.1.1.2	SMC-Formmassen (Sheet Moulding Compounds)	151
5.1.2	Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix	160
5.1.2.1	Hybridgarn	160
5.1.2.2	GMT – glasmattenverstärkte Thermoplaste	161
5.2	Verarbeitung von faserverstärkten Reaktions-(Gieß-)harzen	162
5.2.1	Manuelle Verfahren	162
5.2.2	Teilautomatisierte/ -mechanisierte Verfahren	163
5.2.3	Vollautomatisierte Verarbeitungs-Verfahren	167
5.2.3.1	Naßpressen	167
5.2.3.2	Warmpressen von vorimprägnierten Formmassen	168

5.2.3.2.1	Verarbeitung von SMC	170
5.2.3.2.2	Werkzeuge	172
5.2.3.2.3	Lackieren von SMC-Formteilen	172
5.2.3.2.4	Formteilgestaltung	173
5.2.3.2.5	Anwendungen von SMC	173
5.2.3.2.6	Spritzen von UP-GF (BMC/ZMC).....	173
5.2.4	Kontinuierliche Verfahren.....	175
5.2.5	Sonderverfahren	176
5.2.6	Feinschichten	178
5.3	Verarbeiten von Verbunden mit thermoplastischer Matrix	179
5.3.1	GMT-Herstellung	180
5.3.2	LFT	184
5.4	Spezielle Verarbeitungsverfahren für Epoxidharze.....	188
5.4.1	Elektrotechnik	188
5.4.2	Elektronik.....	191
5.4.3	Fertigungsmittelbau	194
5.5	Nachbearbeiten.....	197
5.5.1	Spanende Bearbeitung	197
5.5.2	Lackieren von SMC-Formteilen.....	199
5.6	Recycling.....	201
5.6.1	Stoffliche Wiederverwertung	202
5.6.2	Verbrennung.....	203
5.6.3	Chemische Verwertung.....	204
5.6.4	Organisation	204
5.7	Arbeits- und Gesundheitsschutz	205
5.7.1	Arbeitsplatzgrenzwert (AGW).....	205
5.7.2	Biologischer Grenzwert.....	206
5.7.3	Einzelne Komponenten.....	206
6	MECHANISCHE PRÜFUNG	209
6.1	Besonderheiten des Verformungsverhaltens der UD-Schicht.....	209
6.1.1	Rißbildung	209
6.1.2	Orthotrope Lamine	212

6.2 Statische Belastung des Laminates	213
6.2.1 Zug	215
6.2.2 Zug der UD-Schicht (NOL-Ring)	216
6.2.3 Druck	217
6.2.4 Schub	218
6.2.5 Biegung	222
6.3 Statisches Langzeit-Verhalten	224
6.4 Dynamische Belastung	226
6.4.1 Wöhlerkurven	228
6.4.2 Hysteresis-Meßverfahren	231
6.4.2.1 Meßverfahren	231
6.4.2.2 Ermittlung von Beanspruchungsgrenzen	234
6.5 Prüfung	239
6.5.1 Herstellung und Vorbehandlung der Probekörper	239
6.5.2 Anzahl der Probekörper	240
6.5.3 Bestimmung des Fasergehaltes	243
7 AUSLEGUNG VON MEHRSCHICHTVERBUNDEN	246
7.1 Einzelschicht (ES)	247
7.1.1 Hookesches Gesetz bei ebenem Spannungszustand	248
7.1.2 Unidirektional verstärkte Schicht (UD-Schicht)	250
7.1.3 Wärmeausdehnungskoeffizient der UD-Schicht	253
7.1.4 Richtungsabhängigkeit der UD-Schicht-Kenngrößen	254
7.2 Klassische Laminattheorie	257
7.3 Ausgeglicherer Winkelverbund (AWV)	259
7.3.1 Wärmeausdehnungskoeffizienten des ausgeglichenen	
Winkelverbundes (AWV)	262
7.3.2 Kreuzverbund (KV)	264
7.4 Gewebeschnitt	267
7.5 Wirrfaserschicht	268
7.5.1 Steifigkeit	268
7.5.2 Wärmeausdehnungskoeffizient der Wirrfaserschicht	269

7.6 Festigkeitsprobleme bei Mehrschichtverbunden	270
7.6.1 Festigkeit einer UD-Schicht	270
7.6.2 Schichtenweise Analyse von Mehrschichtverbunden	276
7.6.3 Eigenspannungen in Mehrschichtverbunden	277
 8 TABELLEN	 282
 9 LITERATUR	 285
 10 STICHWORTVERZEICHNIS	 290

Normen und Richtlinien im Text

ASTM D 695a

Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, Ausgabe: 2002

ASTM D 2290

Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method, Ausgabe: 2004

ASTM D 2471

Bestimmung der Gelzeit und exothermen Spitzentemperatur von härtbaren Harzen, Ausgabe: 1999

ASTM D 2586

Hydrostatic compressive strength of glass-reinforced plastic cylinders, Ausgabe: 1990

ASTM D 3171

Bestimmung des Fasermassenanteils bei Harzbinder- Verbundstoffen durch Matrixersetzung, Ausgabe: 1999

ASTM D 6641/D 6641M

Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture, Ausgabe: 2001

DIN 16945

Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen; Prüfverfahren, Ausgabe: 1989

DIN 29971

Luft- und Raumfahrt; Unidirektionalgelegte-Prepreg aus Kohlenstoffasern und Epoxidharz; Technische Lieferbedingungen, Ausgabe: 1991

DIN 50014

Klimate und ihre technische Anwendung; Normalklimate, Ausgabe: 1985

DIN 52612-1

Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, Durchführung und Auswertung, Ausgabe: 1979

DIN 53457

Prüfung von Kunststoffen – Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch, Ausgabe: 1987

DIN 53483-1

Prüfung von Isolierstoffen – Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften, Begriffe, Allgemeine Angaben, Ausgabe: 1969

DIN 53483-2

Prüfung von Isolierstoffen – Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften, Prüfung bei den festgelegten Frequenzen 50 Hz, 1 kHz, 1 MHz, Ausgabe: 1970

DIN 53483-3

Prüfung von Isolierstoffen – Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften, Meßzellen für Flüssigkeiten für Frequenzen bis 100 MHz, Ausgabe: 1969

DIN 53752

Prüfung von Kunststoffen – Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten, Ausgabe: 1980

DIN 53768

Extrapolationsverfahren für die Bestimmung des Langzeitversagensverhaltens von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), Ausgabe: 1990

DIN 53769, Teil 2

Prüfung von Rohrleitungen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen; Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren, Ausgabe: 1986

DIN 65583

Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung des Glasübergangs von Faserverbundwerkstoffen unter dynamischer Belastung, Ausgabe: 1999

DIN 65583-Entwurf 1999

Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung des Glasübergangs von Faserverbundwerkstoffen unter dynamischer Belastung, Ausgabe: 1999

DIN EN 59

Glasfaserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Härte mit dem Barcol-Härteprüfgerät, Ausgabe: 1977

DIN EN 6038-Entwurf

Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren; Bestimmung der Restdruckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung, Ausgabe: 1996

DIN EN 14022

Strukturklebstoffe – Bestimmung der Topfzeit (Verarbeitungszeit) von Mehrkomponentenklebstoffen; Deutsche Fassung EN 14022: 2003, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 75

Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 75-1

Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur –
Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (ISO 75-1: 2004);
Deutsche Fassung EN ISO 75-1: 2004, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 75-2

Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur –
Teil 2: Kunststoffe und Hartgummi (ISO 75-2:2004);
Deutsche Fassung EN ISO 75-2: 2004, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 75-3

Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur –
Teil 3: Hochbeständige härtbare Schichtstoffe und langfaserverstärkte Kunststoffe
(ISO 75-3:2004); Deutsche Fassung EN ISO 75-3: 2004, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 179-1

Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften –
Teil 1: Nichtinstrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung (ISO 179-1: 2000);
Deutsche Fassung EN ISO 179-1: 2000, Ausgabe: 2001

DIN EN ISO 179-2

Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften –
Teil 2: Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung (ISO 179-2: 1997);
Deutsche Fassung EN ISO 179: 1999, Ausgabe: 2000

DIN EN ISO 604

Kunststoffe – Bestimmung von Druckeigenschaften (ISO 604: 2002);
Deutsche Fassung EN ISO 604: 2003, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 1172

Textilglasverstärkte Kunststoffe – Prepregs, Formmassen und Lamine – Bestimmung des
Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts; Kalzinierungsverfahren (ISO 1172: 1996);
Deutsche Fassung EN ISO 1172: 1998, Ausgabe: 1998

DIN EN ISO 1183

Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen;
Deutsche Fassung EN ISO 1183-1: 2004, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 1183-1

Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen –
Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren
(ISO 1183-1: 2004); Deutsche Fassung EN ISO 1183-1: 2004, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 1183-2

Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 2: Verfahren mit Dichtegradientensäule (ISO 1183-2: 2004); Deutsche Fassung EN ISO 1183-2: 2004, Ausgabe: 2004

DIN EN ISO 1183-3

Kunststoffe – Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 3: Gas-Pyknometer-Verfahren (ISO 1183-3:1999); Deutsche Fassung EN ISO 1183-3: 1999, Ausgabe: 2000

DIN EN ISO 2535

Kunststoffe – Ungesättigte Polyesterharze – Bestimmung der Gelzeit bei Umgebungstemperatur (ISO 2535: 2001); Deutsche Fassung EN ISO 2535: 2002, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 9396

Kunststoffe – Phenolharze – Bestimmung der Gelierzeit mit einem Automaten unter spezifischen Bedingungen (ISO 9396: 1997); Deutsche Fassung EN ISO 9396: 2000, Ausgabe: 2001

DIN EN ISO 9514

Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Verarbeitungszeit von Mehrkomponenten-Beschichtungssystemen – Vorbereitung und Konditionierung von Proben und Leitfaden für die Prüfung (ISO 9514: 2005); Deutsche Fassung EN ISO 9514: 2005, Ausgabe: 2005

DIN IEC 60093

Prüfverfahren für Elektroisolierstoffe – Spezifischer Durchgangswiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, elektrisch isolierenden Werkstoffen (IEC 60093:1980); Deutsche Fassung HD 429 S1: 1983, Ausgabe: 1993

Weitere Normen und Richtlinien

ASTM E 647

Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, Ausgabe: 2005

ASTM D 2344/D 2344M

Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, Ausgabe: 2000

ASTM D 5528

Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, Ausgabe: 2001

DIN 18820-1

Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA); Aufbau, Herstellung und Eigenschaften, Ausgabe: 1991

DIN 18820-2

Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA); Physikalische Kennwerte der Regellamine, Ausgabe: 1991-03

DIN 18820-3

Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA); Schutzmaßnahmen für das tragende Laminat, Ausgabe: 1991

DIN 18820-4

Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA); Prüfung und Güteüberwachung, Ausgabe: 1991

DIN 65375

Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfung von unidirektionalen Laminaten; Druckversuch quer zur Faserrichtung, Ausgabe: 1989

DIN 65561

Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfung von multidirektionalen Laminaten; Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung, Ausgabe: 1991

DIN EN ISO 178

Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 178: 2001); Deutsche Fassung EN ISO 178: 2003, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 527

Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, 1996

DIN EN ISO 527-1

Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften –
Teil 1: Allgemeine Grundsätze
(ISO 527-1: 1993 einschließlich Corr 1: 1994);
Deutsche Fassung EN ISO 527-1:1996, Ausgabe: 1996

DIN EN ISO 527-2

Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften –
Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen
(ISO 527-2: 1993 einschließlich Corr. 1:1994);
Deutsche Fassung EN ISO 527-2: 1996, Ausgabe: 1996

DIN EN ISO 527-3

Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften –
Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln
(ISO 527-3: 1995 + Corr 1: 1998 + Corr 2: 2001) (enthält Berichtigung AC: 1998 + AC: 2002);
Deutsche Fassung EN ISO 527-3: 1995 + AC: 1998 + AC: 2002, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 527-4

Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften –
Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-4: 1997);
Deutsche Fassung EN ISO 527-4: 1997, Ausgabe: 1997

DIN EN ISO 527-5

Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften –
Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5: 1997);
Deutsche Fassung EN ISO 527-5: 1997, Ausgabe: 1997

DIN EN ISO 899-1

Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens –
Teil 1: Zeitstand-Zugversuch (ISO 899-1: 2003);
Deutsche Fassung EN ISO 899-1: 2003, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 899-2

Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens –
Teil 2: Zeitstand-Biegeversuch bei Dreipunkt-Belastung (ISO 899-2: 2003);
Deutsche Fassung EN ISO 899-2: 2003, Ausgabe: 2003

DIN EN ISO 2078

Textilglas – Garne – Bezeichnung (ISO 2078: 1993);
Deutsche Fassung EN ISO 2078: 1994, Ausgabe: 1994

DIN EN ISO 6721-1/2/3

Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften,
Ausgabe 2003-01/1996

DIN EN ISO 11667

Faserverstärkte Kunststoffe – Formmassen und Prepregs – Bestimmung des Gehaltes an Harz, Verstärkungsfaser und Mineralfüllstoff - Auflösungsverfahren (ISO 11667: 1997);
Deutsche Fassung EN ISO 11667: 1999, Ausgabe: 1999

DIN EN ISO 14125

Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 14125: 1998);
Deutsche Fassung EN ISO 14125: 1998, Ausgabe: 1998

DIN EN ISO 14126

Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene (ISO 14126: 1999), Deutsche Fassung EN ISO 14126: 1999, Ausgabe: 1999

DIN EN ISO 14129

Faserverstärkte Kunststoffe – Zugversuch an 45 °-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs-/Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls in der Lagenebene (ISO 14129: 1997), Deutsche Fassung EN ISO 14129: 1997, Ausgabe: 1998

DIN EN ISO 14130

Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken (ISO 14130: 1997);
Deutsche Fassung EN ISO 14130: 1997, Ausgabe: 1998

DIN EN 2563

Luft- und Raumfahrt – Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Unidirektionale Lamine; Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit,
Deutsche Fassung EN 2563: 1997, Ausgabe 1997

DIN EN 6032-Entwurf

Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren; Bestimmung der Glasübergangstemperatur, Ausgabe 1996

DIN EN 14598-1

Verstärkte härtbare Formmassen – Spezifikation für Harzmatten (SMC) und faserverstärkte Preßmatten (BMC) – Teil 1: Bezeichnung; Deutsche Fassung EN 14598-1: 2005, Ausgabe: 2005

DIN EN 14598-2

Verstärkte härtbare Formmassen – Spezifikation für Harzmatten (SMC) und faserverstärkte Preßmatten (BMC) – Teil 2: Prüfverfahren und allgemeine Anforderungen;
Deutsche Fassung EN 14598-2: 2005, Ausgabe: 2005

DIN EN 14598-3

Verstärkte härtbare Formmassen – Spezifikation für Harzmatten (SMC) und faserverstärkte Preßmatten (BMC) – Teil 3: Spezifische Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14598-3: 2005, Ausgabe: 2005

ISO 11359-2

Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature, Ausgabe: 1999

ISO 17281

Kunststoffe – Bestimmung der Reißzähigkeit (G_{Ic} und K_{Ic}) bei mäßig hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten (1 m/s), Ausgabe: 2002

VDI 2014 Blatt 1

Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund; Grundlagen, Ausgabe: 1989

VDI 2014 Blatt 2

Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund; Konzeption und Gestaltung, Ausgabe: 1993

VDI 2014 Blatt 3-Entwurf

Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund; Berechnung, Ausgabe: 2004

Liste der verwendeten Formelzeichen

Allgemeine Größen

A	[mm ²]	Querschnittsfläche
A ₀	[mm ²]	Anfangsquerschnitt
A _{DSC}	[%]	Aushärtegrad mittels DSC
A _{ZSB}		mechanischer Aushärtegrad
F	[N]	Kraft
HDT	[°C]	Formbeständigkeitstemperatur (Heat Deflection [Distortion] Temperature)
ΔH	[J], [J/g]	Reaktionsenthalpie
M	[€/kg]	Preis je Materialgewicht
Q	[W/g]	Wärmefluß
Q	[kg/m ²]	Flächengewicht
R	[mm]	Außenradius
R	[-]	Belastungsverhältnis
S	[%]	Verarbeitungsschwindung
ΔS	[%]	Verarbeitungsschwindungsdifferenz
T _g	[°C]	Glasübergangstemperatur
T _{g∞}	[°C]	Glasübergangstemperatur eines vollständig ausgehärteten Harzes
T _{g0}	[°C]	Glasübergangstemperatur eines unvernetzten Harzsystems
T _{g0}	[°C]	Beginn des Glasübergangs nach der Tangentenmethode
T _{g2%}	[°C]	Beginn des Glasübergangs nach der 2%-Methode
T _{ggel}	[°C]	Glasübergangstemperatur eines gelierenden Harzes
T _z	[°C]	Zersetzungstemperatur
ΔT	[°C]	Temperaturänderung
U	[mm]	Verschiebung
V	[m ³]	Volumen
V _G	[m ³]	Volumenanteil an Fasern in einer Gewebeschicht
W	[%]	Aussagewahrscheinlichkeit
W ₅₀	[Nm]	Schädigungsarbeit
Y	[-]	Korrekturfunktion
Δa _i	[mm]	Rißfortschrittslänge
a	[mm]	Rißlänge
b	[mm]	Probenbreite
d	[mm]	Durchmesser

f_{ϵ}	[-]	Dehnungsvergrößerungsfaktor
h	[mm]	Probendicke
l	[mm]	Länge
l_0	[mm]	ursprüngliche Meßlänge
Δl	[mm]	Dehnungsverlängerung
m	[-]	von der Verteilung der Fasern in der Matrix abhängiger Faktor
m	[kg]	Masse
n	[-]	Stichprobenumfang
p	[-]	Anzahl der Fäden
r	[mm]	Innenradius
s	[mm]	Glasfaserlänge
t	[mm]	Gesamtlaminatdicke
t	[s]	Zeit
tex	[g/km]	Garnfeinheit
v	[1/cm]	Anzahl der Fäden pro cm
α	[10^{-6}K^{-1}]	Wärmeausdehnungskoeffizient
β	[rad], [°]	Belastungswinkel
γ	[rad], [°]	Verschiebungswinkel
ϵ_r	[-]	Dielektrizitätszahl
η	[mPa·s]	Viskosität
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[g/cm ³]	Dichte
ρ	[$\Omega \text{ cm}$]	spezifischer elektrischer Widerstand
σ	[S/m]	elektrische Leitfähigkeit
φ	[Vol.-%]	Volumenanteil
φ_L	[Vol.-%]	Luftblasengehalt
$\Delta\varphi$	[Vol.-%]	Differenz der Volumenanteile
ψ	[Gew.-%]	Gewichtsanteil
ω	[rad], [°]	Belastungswinkel, Verdrehwinkel

Indizes

$\bar{}$	Mittelwert
$\perp$	senkrecht zur Ketten-, Faser- Verarbeitungsrichtung
$\parallel$	in (parallel zur) Ketten-, Faser- Verarbeitungsrichtung
A	Additiv
R	Rest
V	Verbund

f	Faser
iso	isotherm
m	Matrix
c, crit	kritisch
ges	gesamt
k	Kettrichtung
l	längs zur Faserorientierung, Fließrichtung
q	quer zur Faserorientierung, Fließrichtung
s	Schußrichtung
wp	Wendepunkt

Mechanische Größen

A_i	[J]	Arbeit pro Segment i
E	[N/mm ²], [MPa]	Elastizitätsmodul/E-Modul, Steifigkeit
E_0	[N/mm ²], [MPa]	Zug-Elastizitätsmodul
F^*_ε	[N/mm ²], [MPa]	Fraktilwert
G	[N/mm ²], [MPa]	Schubmodul
G'	[N/mm ²], [MPa]	Speichermodul
G_{lc}	[J/m ²], [N/m]	Energiefreisetzungsrate
K_B	[-]	Versagenskennwert
K_{lc}	[N/mm ^{1,5}], [MPa mm ^{1/2}]	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor
M	[Nm]	Moment
N, n	[-]	Schwingenspielzahl
O	[-]	Symmetrieachsen
Q	[N/mm ²]	Steifigkeitselement
Q	[N]	Querkraft
R	[-]	Belastungsverhältnis
R	[N/mm ²]	Festigkeit
S_B	[N/mm ²], [MPa]	Sekantensteifigkeit
W	[mm ³]	Widerstandsmoment
W_s	[Nm/mm ³]	Speicherarbeit
W_v	[Nm/mm ³]	Verlustarbeit
a, b	[-]	Regressionsparameter
f	[N/mm]	Kraft je Einheitslänge
f	[Hz], [1/s]	Frequenz
f_γ	[-]	Schiebungsvergrößerungsfaktor
Λ	[-]	Mechanische Dämpfung

γ	[mm]	Schubverformung
δ	[rad], [°]	Winkelabschnitt durch Phasenverschiebung von Spannung und Dehnung bei erzwungener Schwingung
ε	[%], [μm], [mm]	Dehnung/Verformung
ε_m	[%]	Kriechen unter dynamischer Last
μ	[-]	Schubkoppelung
ν	[-]	Querkontraktionszahl
σ	[N/mm ²], [MPa]	Spannung, Festigkeit
τ	[N/mm ²], [MPa]	Schubspannung

Indizes

$\bar{}$	Mittelwert
$\perp$	senkrecht zur Ketten-, Faser- Verarbeitungsrichtung
	in (parallel zur) Ketten-, Faser- Verarbeitungsrichtung
B	Bruch
G	Gewebeschicht
L	Laminat
R	Roving
T	Torsion
b	Biegung
d	Druck
dyn	dynamisch
e	Eigen
f	Faser
gr	Grenz
k	Schichtnummer
l	Last
m	Matrix
max	maximal
mk	Mittelkurve
norm	normiert
o	Ober
r	radial
s	Schub
st	Stör
t	tangential
u	Unter
x	x-Richtung

y	y-Richtung
z	Zug
zul	zulässig
1,2	Koordinatenbezugssystem

Liste der verwendeten Abkürzungen

2K	2 Komponenten
ADG-Verfahren	Automatisches Druck-Gelierz-Verfahren
ADS	Ausgeglichene Doppelschicht
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
AWV	Ausgeglichener Winkelverbund
BAT	Biologischer Arbeitsstoff-Toleranz-Wert
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CDS	Characteristic Damage State
CF	Kohlenstoff-Faser
ChemG	Chemikalien-Gesetz
CT-Probe	Compact Tension-Probe
DCB-Probe	Double Cantilever Beam-Probe
DCPD	Dicyclopentadien
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DMA	Dynamisch mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E-Modul	Elastizitätsmodul
ES	Einzelschichten
ESTA	elektrostatische Beschichtung
Fb	Faserbruch
FEM	Finite-Elemente-Methode
GC	Gaschromatographische Analyse
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
Gel	vollständig unlöslicher Formstoff
GF	Glasfaser
ILS	Interlaminare Scherfestigkeit
IMC	In-Mould-Coating
IR	Infrarot
KV	Kreuzverbund

LD ₅₀	Mittlere letale Dosis
LP	Low-Profile
LS	Low-Shrink
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MDSC	Temperaturmodulierte DSC
MSA	Maleinsäureanhydrid
MSV	Mehrschichtverbund
NC	numerica control
NOL-Ring	Naval Ordnance Laboratory-Ring
OEM	Original Equipment Manufacturing
Prepreg	Preimpregnated Fibres
REM	Rasterelektronenmikroskop
RIM	Reaction Injection Moulding
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Moulding
SMD-Technik	Surface Mount Device-Technik
Sol	vollständiges in Lösungsmittel lösliches, nur wenig gehärtetes Produkt
Sol-Gel	Mischung aus unlöslichen und löslichen Anteilen
S-RIM	Structural-RIM
SV	Schichtverbund
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TRK-Werte	Technische Richtlinienkonzentrationen
TTT-Diagramm	Time-Temperature-Transition-Diagramm
UD	Unidirektional
UV	Ultraviolett
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
Zfb	Zwischenfaserbruch
ZMC	Z = Phantasiebezeichnung, MC = Moulding Compound

Glasfasertypen

AR	alkali resistant; resistent gegenüber Basen
C	corrosion; chemisch beständig, korrosionsbeständig
E	electrical; gebräuchlichster Glastyp
ECR	electrical and chemical resistance glas
S, R (japanisch T)	strength, resistance; hochfest

Kohlenstoff-Faser-Typen

HM	high modulus, hochfest
HST	high strength, hochfest
HT	high tenacity; Standard
IM	intermediate modulus, mittelsteif
LM	low modulus, wenig steif
UHM	ultra high modulus, ultrasteif

Chemische Formeln

Al_2O_3	Aluminiumoxid
$(\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8)$	Kaolin (Schichtsilicat)
$\text{B}(\text{OH})_3$, H_3BO_3	Borsäure
B_2O_3	Bortrioxid
CaCO_3	Calciumcarbonat (Kalkstein)
CaF_2	Calciumfluorid (Flußspat)
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Calcium-Magnesium-Carbonat (Dolomit)
CaO	Caliumoxid
$\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$	cis-Butendisäure (Maleinsäure)
CH_3COOH	Ethansäure (Essigsäure)
FeCl_2	Eisen(II)chlorid
Fe_2O_3	Eisenoxid (Eisen(III)oxid)
HCl	Salzsäure
HF	Fluorwasserstoff
HNO_3	Salpetersäure
H_2O	Wasser
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
H_2SO_4	Schwefelsäure
K_2O	Kaliumoxid
MgO	Magnesiumoxid (Eindickungsmittel)
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Magnesiumhydroxid
Na_2O	Natriumoxid
NaCl	Natriumchlorid
NaOH	Natriumhydroxid
NH_3	Ammoniak
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	Ammoniumcarbonat
-NCO	Isocyanatgruppe
-OH	Hydroxylgruppe
-OR	Alkoxygruppe
SiO_2	Siliziumdioxid (Quarzsand)

Abkürzungen der verwendeten Werkstoffe

AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
BMC	Bulk Moulding Compound
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter (Carbon fiber) Kunststoff
D-LFT	Langglasfaserverstärkter Thermoplast, Direktverfahren
EP-Harz	Epoxidharz
FVK	Faserverbund-Kunststoff
FVW	Faserverbund-Werkstoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
G-LFT	Langglasfaserverstärkter Thermoplast, Granulatform
GM-PP	Glasmattenverstärktes Polypropylen
GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast
LFT	Langglasfaserverstärkter Thermoplast
LP-SMC	Low-Profile SMC
LS-SMC	Low-Shrink SMC
MA-Harz	Methacrylatharz
MEKP	Methylethylketonperoxid
PA 6	Polyamid 6
PA 66	Polyamid 66
PAN	Polyacrylnitril
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PES	Polyethersulfid
PET	Polyethylenterephthalat
PF-Harz	Phenolharz
PHA-Harz	Phenacrylatharz
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPO	Polyphenylenoxid
PPS	Polyphenylensulfid
PPTA	Poly-m-Phenylen/Terephthalamid, Aramid
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan

PVA	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styrol-Acrylnitril
SMC	Sheet Moulding Compound
SMC-C	Continuous SMC
SMC-D	Directed SMC
SMC-R	Random SMC
UP-Harz	Ungesättigtes Polyesterharz
VE-Harz	Vinylesterharz
VEUH-Harz	Vinylester-Urethan-Hybridharz

1 VORBEMERKUNGEN

1.1 Besonderheiten

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 unidirektional kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzes (EP-Harz) zeigen ähnliche Strukturen, allerdings in anderer Größenordnung, Bild 1.1. Ebenso vergleichbar ist der schichtweise Aufbau eines kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzes und eines Bambusstabes, Bild 1.2. Nicht nur bei der Mikrostruktur kann die Natur als Analogon für Faserverbundkunststoffe (FVK) angesehen werden, sondern auch bei der Anwendung von Prinzipien des Leichtbaus.

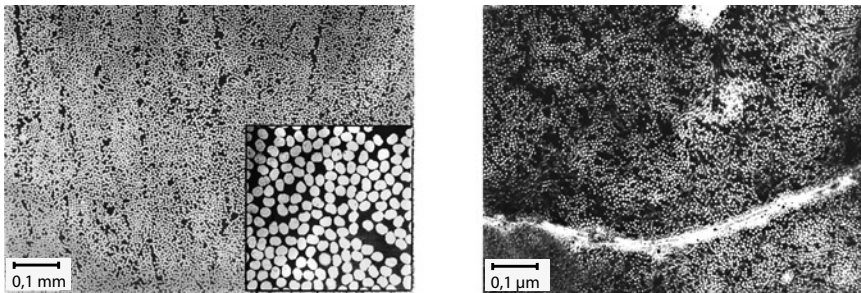


Bild 1.1: Querschnitt durch unidirektional kohlenstoffaserverstärktes EP-Harz (links) und einer Paracortex-Zelle von Merinowolle (rechts)
unterschiedliche Maßstäbe beachten! [1]

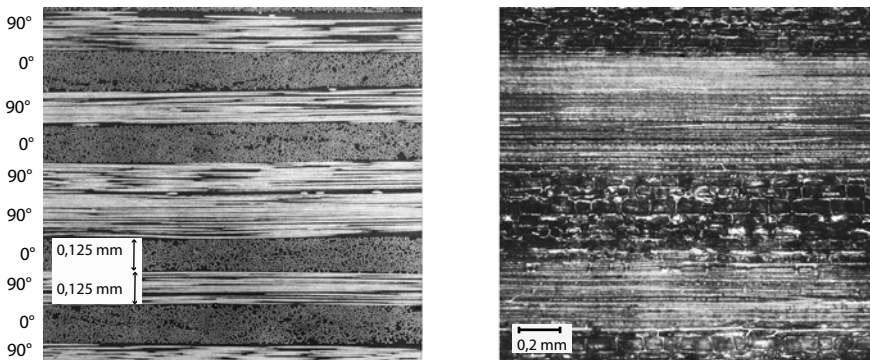


Bild 1.2: Schnitt durch kohlenstoffaserverstärktes EP-Harz-Laminat (links) und einen Bambusstab (rechts) [1]