

# Eigenschaftsvergleich verschiedener Materialien

Metalle, Keramiken, Polymere, Faserverbundwerkstoffe

Prof. Dr. Dr. hab. Günther Hartwig

1. Auflage mit 124 Abbildungen  
und 42 Tabellen

Fachverlag für  
• Oberflächentechnik – Galvanotechnik  
• Produktion von Leiterplatten  
und Systemen  
(Baugruppenteknik)

EUGEN G.  
LEUZE  
VERLAG

---

106 JAHRE 1902 – 2008

BAD SAULGAU  
GERMANY

# Vorwort

Die moderne Luftfahrt gibt uns heute eine Vorstellung davon, welche Anforderungen an Werkstoffe gestellt werden. Zur Einsparung von Gewicht ist jedes Bauteil bis auf die maximale Leistungsfähigkeit konzipiert. Hochfeste Stähle, zähe Titanwerkstoffe, leichtes Aluminium oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe mit enormen Zugfestigkeiten gehören zu den üblichen Werkstoffen. Aber auch Kraftfahrzeuge greifen aufgrund von steigenden Treibstoff- und Rohstoffpreisen verstärkt zu den speziell konzipierten Werkstoffen, und die Herstellung von Bauwerken wird durch die hohe Nachfrage nach Rohstoffen seitens der absoluten Wachstumsmärkte China und Indien zunehmend diesem Trend folgen.

Die Voraussetzung für ein dafür erforderliches Werkstoffdesign ist allerdings die Kenntnis der Verhaltensweisen und Eigenschaften von Werkstoffen und Werkstoffgruppen. Für Maschinenbauer gehört dies heute zu den Grundlagen und wird bereits im Studium ausführlich dargelegt und angewandt. Andere technische Berufsgruppen verfügen auf diesem Gebiet in der Regel nur über geringere Kenntnisse.

Mit dem vorliegenden Buch werden die Grundlagen geschaffen, jedem interessierten Techniker die wichtigen Eigenschaften von Metallen, Kunststoffen und Keramiken näher zu bringen. Zu diesen Eigenschaften zählen die Verhaltensweisen unter mechanischer Belastung und die daraus resultierenden Veränderungen bei Werkstoffen: Die Deformation, das Ermüden und bei weiterreichender Belastung der Bruch. Eine andere wichtige Veränderung der Werkstoffe ergibt sich aus der Belastung mit thermischer Energie, unter der in weiteren Kapiteln die resultierenden Veränderungen der verschiedenen Werkstoffe behandelt werden. Die elektrischen Eigenschaften runden die Betrachtung ab.

Der Stoff des Buches wird so dargeboten, dass alle notwendigen Grundlagen vom atomaren Aufbau über die Kristallisation bis hin zu makroskopischen Eigenschaften erläutert werden, ohne zu sehr in die Tiefe zu gehen. Ein besonderer Schwerpunkt des Inhaltes ist der Vergleich der Werkstoffeigenschaften. Dazu ist eine große Anzahl an Messkurven und Tabellen mit Werten enthalten. Besonders interessant ist die Veränderung von Werkstoffeigenschaften mit einer veränderten Zusammensetzung. Moderne Werkstoffe werden aber zunehmend auch durch die Einbringung von Fasern leistungsfähiger gemacht. Deshalb wird ein besonderes Augenmerk auf Faserverbunde in Metallen, Keramiken und Polymeren gelegt.

Das Buch wird jedem Techniker als Grundlage für die tägliche Arbeit gute Dienste leisten. Vor allem auch, weil es die Basis zur Diskussion der Fachleute untereinander fördert. Zudem werden Anregungen für Weiterentwicklungen geliefert und mit einem umfangreichen Literaturverzeichnis weiterführender Stoff angeboten.

Leuze Verlag  
Juli 2008

# 1 Zur Historie der Materialentwicklung

Neben Holz und Stein wurde bereits im 6. Jahrtausend vor Christus gebrannter Ton verwendet. Wahrscheinlich lag die Erkenntnis zu Grunde, dass luftgetrocknete Lehmschalen, die man über Feuer zur Essensbereitung erhitzte, wesentlich fester wurden. Danach stellte man gezielt Keramik in Brennöfen her. Keramikformen und Feueröfen erlaubten auch das Schmelzen von Metallen (zum Beispiel Gold) und Erze.

Bereits im 6. Jahrtausend vor Christus stellte man Kupfer her, das allerdings im Reinzustand zu weich ist. Durch Legieren mit Zinn erzeugte man im asiatischen Bereich ab dem 3. Jahrtausend vor Christus die wesentlich festere Bronze.

Eisen gewann man erst in der zweiten Hälfte des 2. Jahrtausends vor Christus, da der Herstellungsprozess durch die Reduktion des Erzes mit Holzkohle schwieriger war. Immerhin stellte man etwa 2000 vor Christus in Armenien bereits Stahl her.

Erst sehr viel später, im 17. und 18. Jahrhundert nach Christus, erkannte man die elektrische Leitfähigkeit von Metallen.

Supraleiter aus bestimmten Metallen oder Legierungen wurden ab 1911 entwickelt. Danach folgte 1970 die Entwicklung von Supraleitern aus Oxid-Keramik.

Der erste Kunststoff war Glas, das man bereits im 4. Jahrtausend vor Christus in Ägypten aus Quarzsand, Kalk und Salzen gewann. Zuerst war es nur eine Glasschmelzglasur auf einem Metallkörper. Ab dem 2. Jahrtausend vor Christus wurden auch massive Glasgefäße hergestellt. In diese Zeit fällt die Erfindung von Faserverbundwerkstoffen.

Die ersten Berichte über Faserverbunde stammen von den Ägyptern, die in der Pharaonenzeit ihre zerbrechlichen Tonkrüge mit vorgeformten Glasschnüren verstärkten. Die ersten Glasfasern kamen etwa 1930 nach Christus auf den Markt. Allerdings gab es damals kommerziell noch keine Polymere als Matrix. Diese wurden im industriellen Maßstab erst ab 1950 erzeugt. Man behalf sich damals mit Bakelite. Jedoch ist es erstaunlich, dass die für Faserverbunde besonders geeigneten Polymere, nämlich Liquid Crystalline Polymers (*LCP*) schon 1870 genau beschrieben wurden, aber erst jetzt eingesetzt werden. Sie bestehen aus relativ steifen Polymerketten, die sich selbst ausrichten können, zum Beispiel in Faserrichtung von unidirektionalen Faserverbunden. In Kettenrichtung besitzen *LCP*'s einen geringen, dem der Fasern ähnlichen Ausdehnungskoeffizienten. Dadurch könnten interne thermische Spannungen stark verkleinert werden. Sie wären ungeachtet der derzeit hohen Kosten für Faserverbunde geeignet.

Daneben wurden vernetzte Epoxidharze und thermoplastische Polymere, zum Beispiel Polycarbonat (PC), Polypropen (PP); Polyoximethylen (POM) oder Polyetheretherketon (PEEK) entwickelt, die ein beachtliches Eigenschaftsprofil abdecken.

Etwas vor 1970 kamen die ersten *PAN*-Carbonfasern auf den Markt. Die *PAN*-Fasern wurden von *Rolls Royce* weiterentwickelt, es wurde bereits ein Modul von 650 GPa erreicht. Fein gesponnene Polymerfasern (Polyacrylonitril *PAN*) wurden durch Temperaturzyklen (bis etwa 2000 °C) pyrolysiert, carbonisiert und durch Streckung orientiert.

Ein neuer Carbonfasertyp mit besonders hohem Modul (bis 800 GPa) wurde durch thermische Behandlung von Pechfasern erreicht.

Etwas zeitgleich wurde die Entwicklung von organischen Fasern vorangetrieben. Als erfolgreich für *De Pont* erwiesen sich gestreckte Aramidmolekülketten, die durch Wasserstoffbrückenbindung stärker gebunden sind als übliche Polymere durch *Van der Waals*-Kräfte. Die Aramidmoleküle bestehen vornehmlich aus aneinander gereihete Benzolringe, die den Ketten eine hohe Steifigkeit und Zugfestigkeit verleihen, aber auch eine höhere Einsatztemperatur (bis etwa 360 °C) erlauben. Diese Fasern sind unter dem Namen *Kevlar* bekannt.

Der Einsatz von Keramikfasern kam relativ spät. Anscheinend war man von der hohen Sprödigkeit von Keramikmaterialien abgeschreckt. Es zeigte sich jedoch, dass die Faserform den Materialien eine hohe Zähigkeit verleihen kann; Bruchdehnungen im Prozentbereich sind möglich. Je dünner die Fasern desto höher sind die Zugfestigkeitswerte.

## 1.1 Einführung

Als hauptsächliche Materialklassen sollen Metalle, Keramiken, Polymere und Faserverbunde betrachtet werden, soweit sie als Konstruktions- oder Funktionswerkstoffe eingesetzt werden. Ein fundierter Vergleich mit anderen Materialklassen macht ein separates Studium einer dieser Klassen wesentlich effektiver. Dadurch können Konstruktionsaufgaben flexibler erfolgen und Fehler vermieden werden, wenn man Theorien und Forschungsergebnisse auf andere Materialien übertragen möchte. Leider sind nur wenig materialübergreifende Grundprinzipien erkennbar. Dies liegt im Wesentlichen an den unterschiedlichen Bindungsarten und den daraus resultierenden Materialstrukturen. Trotzdem ist es ein erklärtes Ziel des Buches, die Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten, allerdings mit den notwendigen Abgrenzungen.

Die meisten Gemeinsamkeiten wurden bei sehr tiefen Temperaturen gefunden. Bei höheren Temperaturen treten Phasen- und Glasübergänge hinzu, die die Eigenschaften materialspezifisch verändern. Bei Metallen und Halbleitern verändert sich der Anteil von Gitter- und Elektroneigenschaften in verschiedenen Temperaturbereichen. Manche Eigenschaften versteht man besser aus ihrem Temperaturverhalten. Bei Materialverbunde (zum Beispiel Faserverbunde) versucht man die Eigenschaften aus denen der Einzelkomponenten zu bestimmen. Dies ist allerdings nur in begrenztem Maßstab möglich, da Grenzflächenprobleme und zusätzliche Wechselwirkungen zwischen den Komponenten hinzukommen.

Jede Materialklasse hat ihre besonderen Meriten. In diesem Zusammenhang wird die Frage behandelt, welche mechanischen, thermischen und elektrischen Maximaligenschaften bei einer jeweiligen Materialklasse möglich sind (nicht jede Konstruktionsaufgabe erfordert allerdings Maximalwerte).

Über den ganzen Betrachtungen steht natürlich der Wunsch jede Materialklasse möglichst vielseitig einzusetzen und die nachteiligen Eigenschaften durch entsprechende Maßnahmen zu verringern. Man möchte zum Beispiel spröde Keramik zäher haben und schwache Polymere fester wie beispielsweise durch Fasern; die thermische Leitfähigkeit kann man durch Schäumen (auch von Metallen) verringern, usw. Dazu werden Strategien für Eigenschaftsänderungen behandelt.

Ein weiterer Punkt sind Materialkombinationen, um gewisse Eigenschaftsprofile zu erreichen. Dazu gehört auch der Fragenkomplex von Materialverbindungen.

Es ist nicht die Intention des Buches die Eigenschaften jeder Materialklasse bis in die Tiefe zu betrachten. Es soll jedoch das physikalische Rüstzeug gegeben werden für einen sinnvollen Materialvergleich. Der Stoff zu den Werkstoffen und Werkstoffgruppen wird durch zahlreiche Tabellen und Kurven mit den wichtigsten Materialeigenschaften ergänzt. Sie sollen nur als Richtwerte gebraucht werden, da jeder Materialwert von vielen zum Teil unbekanntem Parametern der Herstellung und Probenbehandlung abhängt. Sie sollen einen Überblick geben und bei Konstruktionsaufgaben helfen.

Ein für den Einsatz wichtiger Punkt wird ausgespart, nämlich die Materialkosten. Es sei jedoch auch an dieser Stelle daran erinnert, dass der Preis nicht auf das Materialgewicht bezogen werden darf, sondern auf die Anforderung (zum Beispiel Preis pro Festigkeit).

Würde man heute beispielsweise die *Golden Gate*-Brücke mit modernen Carbonfasern bauen, dann würde man bei gleicher Belastung etwa den Faktor 15 an Gewicht sparen. Somit wäre dieses Konzept vertretbar, selbst wenn die Carbonfasern um diesen Faktor teurer wären als Stahl. Hinzu kommt, dass die Montagekosten wegen des viel geringeren Gewichts niedriger wären und weniger Korrosionsprobleme auftreten. Allerdings müssen vollständig andere Konstruktionsprinzipien mit Carbonfaserverbunde angewandt werden. Zum Beispiel würde man bei dieser Hängebrücke keine Carbonfaserverbundseile, sondern Bänder verwenden um den Querdruck an den Auflagern zu verringern. Carbonfasern sind transversal zur Faserrichtung wesentlich schwächer als in Längsrichtung. Materialgerechte Konstruktion unter optimaler Ausnutzung der Eigenschaftspotentiale ist eine generelle und Kosten sparende Notwendigkeit, die allerdings meist eine stärkere Materialforschung voraussetzt.

## 2 Anwendungsprofile und Maximalwerte

### 2.1 Metalle

Eine wichtige Domäne von Metallen ist deren hohe elektrische Leitfähigkeit (Aluminium, Kupfer, Silber). Die höchsten Werte aus der Klasse der Metalle werden von Kupfer und Silber erreicht:  $\sigma$  etwa 0,6 S/m. Der elektrische Widerstand sinkt zu tiefen Temperaturen, bei denen der so genannte Restwiderstand als konstanter Wert übrig bleibt. Dieser ist stark abhängig von der Reinheit der Metalle. Fremdatome erhöhen zumindest den Restwiderstand. Einige Metalle oder Legierungen zeigen bei tiefen Temperaturen Supraleitfähigkeit.

Für mechanische Anwendungen sind reine Metalle nicht geeignet, da sie duktil sind. Erst durch Legieren und Bearbeiten (zum Beispiel Walzen, Sintern, Abschrecken) erhalten sie hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit; sie behalten jedoch eine gewisse Duktilität, was zu gutem Fließverhalten und großer Bruchdehnung führt. Belastet man Metalle bis in den Fließbereich, so zeigen sie zwar große Dehnung, es bleibt aber eine irreversible Verformung zurück. Um eine bleibende Verformung nicht größer als 0,2 % werden zu lassen, wird üblicher Stahl nur bis 0,4 bis 0,5 GPa belastet. Der Wert  $\sigma_{0,2}$  gibt die Spannung an, bei der eine bleibende Dehnung von 0,2 % entsteht (spröde Spezialstähle erreichen eine Festigkeit von etwa 2,5 GPa).

Mit Stahl erreicht man eine Steifigkeit (Zugmodul) von ungefähr 200 GPa. Dies ist der höchste Wert innerhalb metallischer Werkstoffe. Allerdings ist Stahl sehr schwer (Dichte 7,8 g/cm<sup>3</sup>). Für den Fahrzeug- und Flugzeugbau, generell für bewegte Bauteile, geht der Trend zur Leichtbauweise. Titan- und Magnesiumlegierungen sind zwar leicht, jedoch besitzen letztere, ähnlich wie Aluminiumlegierungen, nur einen geringen Elastizitätsmodul (Titanlegierung: E ungefähr 110 GPa; Aluminiumlegierung und Magnesiumlegierung E = 40 bis 60 GPa). Betrachtet man jedoch den Quotienten aus Steifigkeit pro Dichte, so ist dieser für alle drei Legierungen ähnlich dem von Stahl (etwa 30 GPa/gcm<sup>-3</sup>).

Die Festigkeit innerhalb der Strukturmetalle ist am höchsten bei Stahl und Titanlegierungen, wobei Titan die höchste Festigkeit pro Dichte hat (etwa 250 MPa/gcm<sup>-3</sup>).

Besondere thermische Eigenschaften prädestinieren Metalle kaum zu speziellen Anwendungen. Die hohe thermische Leitfähigkeit ist vornehmlich durch die elektronische Komponente geprägt. Sie ist am größten für Kupfer und Silber. Innerhalb der üblichen Metalle besitzt Aluminium bei Raumtemperatur den höchsten thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$  etwa  $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) und die größte spezifische Wärme pro Volumeneinheit (C etwa 2,4 MJ/m<sup>3</sup>K).

## 2.2 Keramiken

Keramische Materialien werden als chemisch inerte Werkstoff und zur thermischen und elektrischen Isolation verwendet. Es existiert eine weite Spanne von Materialwerten über diese Eigenschaften.

Spezielle Funktionskeramiken werden als Elektrolyt für Kondensatoren eingesetzt. Mit Bleizirkonat/Bleititanat oder Bariumtitanat (auch Mischkristalle) kann man eine maximale Dielektrizitätskonstante von  $\epsilon = 1500$  bis 4000 erreichen. Allerdings ist die elektrische Spannungsfestigkeit gering.

Gekoppelt mit den außerordentlich hohen Dielektrizitätskonstanten ist ihr starker piezoelektrischer Effekt. Man kann derartige Funktionskeramiken nicht nur passiv als Sensor (Belastung erzeugt elektrisches Feld), sondern auch als aktives Element einsetzen, mit dem man beachtliche Deformationen durch elektrische Felder initiieren kann. Es ist zum Beispiel damit möglich, Tragflächen von Flugzeugen optimal nach der Luftströmung zu deformieren. Andere Anwendungen liegen in der Ultraschallanwendung und in der Schaltungstechnik. Die Piezokeramiken sind Polykristalle und daher in den Eigenschaften isotrop. Quarz ist hingegen anisotrop und weniger piezoelektrisch. Eine weitere Anwendung obiger Funktionskeramiken ist ihre ferroelektrische Eigenschaft. Eine wichtige Eigenschaft von speziellen oxidischen Keramiken ist die Supraleitfähigkeit bei relativ hohen Temperaturen (Hochtemperatursupraleiter).

Keramiken sind weiterhin ein wichtiges Strukturmaterial für Höchsttemperaturanwendungen. Sie besitzen eine hohe Steifigkeit, die bis zu Temperaturen von 1100 °C ziemlich konstant bleibt (Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Siliziumkarbid  $\text{SiC}$ ;  $E$  etwa 400 GPa).  $\text{SiC}$  besitzt bei 1500 °C noch einen E-Modul von 360 GPa. Der Schermodul ist ebenfalls hoch (zum Beispiel für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  liegt  $G$  bei etwa 120 GPa und für Siliziumnitrid sogar bei etwa 200 GPa bei Raumtemperatur).

Die Festigkeit hängt wesentlich von der Materialart, der Korngröße und dem Herstellungsprozess ab. Die Produktion geschieht unter hohen Temperaturen und teilweise unter Druck (Heißsintern unter Druck von vorgegebenem Pulver zum Beispiel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oder in chemischen Reaktionsprozessen unter Hitze ( $\text{SiC}$ ). Ein wesentlicher Parameter ist die Porendichte.

Die Zugfestigkeit liegt für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei 1,5 bis 2 GPa, und das auch bei hohen Temperaturen. Die Biegefestigkeit liegt zwischen 0,5 und 1 GPa. Hervorzuheben ist die hohe Druckfestigkeit von Keramik (bis zu 4,5 GPa). Keramiken dürften die höchste Druckfestigkeit üblicher Werkstoffe besitzen. Neben Polymeren haben sie auch die höchste spezifische Wärme pro Volumen und Gewicht ( $C$  etwa 2,8 MJ/m<sup>3</sup>K und  $C$  etwa 1 J/gK bei Raumtemperatur).

Der Nachteil von Keramiken ist deren Sprödigkeit und deren nicht asymptotisches Fließverhalten, insbesondere bei höheren Temperaturen. Die Bruchdehnung ist wenige Promille für isotropes Material bei Raumtemperatur. Die Fließgeschwindigkeit beträgt bei kleiner Belastung und 1500 °C für  $\text{SiC}$  bis zu  $\dot{\epsilon}$  etwa  $10^{-5} \text{ h}^{-1}$  (etwa  $\epsilon = 1 \%$  pro Jahr). Es wurde dieses Beispiel wegen des Höchsttemperatureinsatzes von Keramik genommen.

## 2.3 Faserverbunde mit Polymermatrix

Eine Reihe von Leichtbaukonstruktionen wird mit Faserverbunden durchgeführt, wobei die einzelnen Fasertypen unterschiedliche Anwendungsprofile besitzen.

### 2.3.1 Keramikfaserverbunde

Neuerdings kommen Keramikfasern zum Einsatz, die eine höhere Zugfestigkeit und eine wesentlich höhere Bruchdehnung als übliche Keramikkörper besitzen. Für unidirektionale Polymer/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Faserverbunde mit einem Faseranteil von 60 Vol.-% erreicht man durchwegs eine Bruchdehnung von 1,4 bis 1,6 % und eine Festigkeit von 1,5 bis 2 GPa (dies entspricht einer Faserfestigkeit von 2 bis 3 GPa).

### 2.3.2 Glasfaserverbunde (E-Glas, S-Glas)

Sie werden meist mit einer Matrix aus Epoxid, Polyester oder Polypropen eingesetzt. Der Füllfaktor wird üblicherweise auf einen Wert von 55 bis 65 Vol.-% eingestellt. Ihr Modul ist selbst bei Unidirektionalverbunde gering (E etwa 50 GPa); die Festigkeit ist mäßig gut ( $\sigma_{II}$  etwa 1,7 GPa). Die Weichheit prädestiniert jedoch die Glasfaserverbunde für den Bau von Fahrzeugfederelementen mit Dämpferwirkung. Darüber hinaus sind sie ein Billigwerkstoff für den Bau von Behältern im Einsatzbereich Raumtemperatur und im Kryobereich. Bei tiefen Temperaturen kommt der Vorteil hinzu, dass die Glasfasern um etwa 40 % fester werden. Dies geschieht durch Einfrieren von Spannungsrisskorrosion in Oberflächenrissen von Glasfasern. Bei üblicher Herstellung sind Glasfasern und auch deren Oberflächenrisse mit einigen Atomlagen Wasser  $\text{H}_2\text{O}$  versehen. Die OH-Gruppen diffundieren bei Belastung stärker in die Rissoberfläche was zur Korrosion führt. Bei tiefen Temperaturen ist die Diffusion jedoch eingefroren.

Die Dauerfestigkeit von zyklisch belasteten Glasfaserverbunde ist relativ gering; sie beträgt etwa 40 % der statischen Festigkeit bei Zug-Schwellbelastung. Trotzdem werden sie als Billigmaterial mit Dämpfungswirkung für den Bau von Fahrzeugkarosserien eingesetzt. Wegen ihrer hohen Druckfestigkeit ( $\leq 2,3$  GPa) können sie als Stützelemente eingesetzt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass Glasfasern ein gewisses, nicht asymptotisches Kriechverhalten zeigen. Weiterhin sind Glasfaserverbunde ein wichtiges Material in der Elektrotechnik und Elektronik. Glasfaser/Epoxidbänder sind ein übliches elektrisches Isolationsmaterial für dicke und mechanisch belastete Stromkabel. Leiterplatten aus Glasfaserverbund sind Standard.

### 2.3.3 Kevlarfaserverbunde

Kevlarfasern bestehen aus gestreckten Polymerketten (Aramidmolekülen). Von allen Werkstoffen besitzen Kevlar/Epoxidverbunde den wohl höchsten Dämpfungsfaktor. Wegen der hohen Dämpfungswirkung, der guten Steifigkeit und Festigkeit werden sie für den Bau von Dämpfungselementen (zum Beispiel Federn und Halteschlaufen) und Spezialkarosserien oder Behältern eingesetzt. Ihre Dauerfestigkeit ist relativ gut.

Der Nachteil ist eine sehr geringe transversale Festigkeit und eine schwache Faser/Polymerbindung. Kevlarfasern werden daher meist als Kreuzverbunde eingesetzt. Stützelemente



sollten wegen der geringen Druckfestigkeit nicht mit Kevlarverbunden gebaut werden. Dafür sind Glas- und Carbonverbunde wesentlich geeigneter.

Kevlarfasern besitzen in Faserrichtung einen schwach negativen Ausdehnungskoeffizienten. Diese Eigenschaft kann zur Kompensation von unerwünschter (positiver) Ausdehnung eingesetzt werden. Es wird später gezeigt, dass dieser Effekt durch eine  $\pm 30^\circ$  Faseranordnung wesentlich verstärkt werden kann. Der damit erreichte Ausdehnungskoeffizient ist ähnlich dem von Stahl, nur negativ.

### 2.3.4 Carbonfaserverbunde

Carbonfasern bestehen aus kleinen Graphitflächen, die in Faserrichtung orientiert sind. Im Querschnitt ist die Anordnung zirkular für PAN-Fasern und radial für Pechfasern. Für extreme mechanische Belastungen sind Carbonfaserverbunde unabdingbar.

Mit Ultrahochmodulfasern (Pechfasern) kann man einen Zugmodul bis zu 850 GPa erreichen. Dies ist fast der theoretische Wert von Graphitebenen.

Bei 65 % Faseranteil bedeutet das einen Modul von 550 GPa für Unidirektionalverbunde. Dies dürfte der Maximalwert für alle Faserverbunde und aller Werkstoffklassen sein. Der Nachteil liegt in der geringen Bruchdehnung von einigen Promillen.

Für Hochleistungsfasern erreicht man eine Zugfestigkeit bis zu 7 GPa (im UD-Verbund mit 65 % Faseranteil etwa 4,5 GPa). Dies dürfte der Maximalwert von allen Materialklassen sein. Wegen ihrer geringen Dichte (etwa  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ) sind die Steifigkeit und die Festigkeit pro Dichte darüber hinaus noch wesentlich größer, als bei allen anderen Materialien. Ein wichtiger Vorteil ist, dass Carbonfasern das wohl geringste Fließverhalten aufweisen. Auch bei zyklischer Belastung zeigen unidirektionale Carbonfaserverbunde die höchste Dauerfestigkeit (bis 80 % der statischen Festigkeit). Carbonfasern zeigen in Faserrichtung einen sehr kleinen, je nach Art auch negativen Ausdehnungskoeffizienten. Man kann sie zum Bau von ausdehnungsfreien Strukturen verwenden (*Abschnitt: Antiausdehnungselemente*).

## 2.4 Faserverbunde mit Kohlenstoff-, Keramik- oder Metallmatrix

Carbonfaserverbunde mit amorpher Kohlenstoffmatrix erlauben den Einsatz bei bisher höchsten Temperaturen (bis zu  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ), soweit man Oxidationswirkung vermeidet. Je nach Faserart und Anordnung kann man damit sehr hohe Steifigkeit und Festigkeit bei Hochtemperaturwerkstoffen, zum Beispiel für den Turbinenbau, erreichen. Die Oxidationsprobleme sind durch Oberflächenschichten lösbar, allerdings bisher kaum für den großtechnischen Einsatz. Ein wichtiges Anwendungsgebiet für Carbonfaser/Carbonverbunde sind Bremsbeläge.

Keramikfaser/Keramikverbunde besitzen eine höhere Festigkeit und eine wesentlich höhere Bruchdehnung als isotrope Keramik. Die Fasern sind nicht fest mit der Matrix fixiert. An

Rissen ziehen sich die Fasern teilweise aus der Matrix heraus, wobei Reibung entsteht, die die Reißenergie verringert und die Zähigkeit erhöht.

Keramikfaser/Keramikverbunde sind ebenfalls als Höchsttemperaturmaterialien einsetzbar (bis etwa 1500 °C). Sie haben den Vorteil, dass keine Oxidationsprobleme auftreten. Man kann Hochleistungsfasern zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in eine Metallmatrix einbetten. Dies ist dann erforderlich, wenn man eine Polymermatrix wegen Korrosions- oder Temperaturproblemen nicht einsetzen kann. Mit Aluminium und Stahl wurden derartige Verbunde hergestellt.

## 2.5 Polymerwerkstoffe

Das Einsatzprofil von Polymeren reicht von elektrischer und thermischer Isolation bis zum Bau von Strukturen oder Behältern, oder als Verpackungsmaterial. Grundvoraussetzung dabei ist, dass nur geringe mechanische und thermische Belastungen auftreten. Mit Spezialpolymeren, zum Beispiel Polyimid (PI) oder Flüssigkeitskristallen (*LCP*) erreicht man Arbeitstemperaturen von mindestens 350 °C. Bei tiefen Temperaturen werden die mechanischen Eigenschaften von Polymeren stark erhöht, es tritt jedoch gleichzeitig eine Versprödung ein. Ein wichtiger Anwendungszweig ist der Einsatz von Polymeren als Matrix in Faserverbunde. Dazu kommen vornehmlich vernetzte Epoxide oder Phenolharze und thermoplastische Polymere wie Polypropen (PP) und Polyetheretherketon (PEEK) in Frage. Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Polymere in Faserverbunde andere Eigenschaften aufweisen, als man sie in reiner Form gemessen hat.

## 2.6 Zusammenfassung

### *Typische Eigenschaften bei Raumtemperatur*

#### Metalle

- |                      |   |
|----------------------|---|
| – Stahl              | hohe Bruchdehnung, starkes Fließen, hoher Modul |
| – Aluminium          | geringer Modul, hohe thermische Ausdehnung      |
| – Kupfer             | hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit   |
| – Titan              | mittlere mechanische Kennwerte                  |
| – Magnesiumlegierung | geringer Modul, hohe spezifische Zugfestigkeit  |

#### Strukturkeramik

- |  |  |
|--|--|
| – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; SiC | hohe Sprödigkeit, hoher Modul, hohe Druckfestigkeit, hochtemperaturfest, nicht sehr kriechfest |
|--|--|

#### Funktionskeramik

- |   |   |
|---|---|
| – Bleizirkonat/Bleititanat, Bariumtitanat | stark piezoelektrisch, sehr hohe Dielektrizitätskonstante |
|---|---|

## Unidirektionalverbunde mit Polymermatrix

- Glasfaser verstärkt      geringer Modul, gute Druckfestigkeit, nicht kriechfest
- Carbonfaser verstärkt    sehr hoher Modul (Pechfasern), sehr hohe Zugfestigkeit (PAN-Fasern), sehr hohe Dauerfestigkeit; kein Kriechen, fast Nullausdehnung
- Kevlarfaser verstärkt    hohe mechanische Dämpfung, gute mechanische Kennwerte, kleine, negative thermische Ausdehnung
- Keramikfaser verstärkt   gute Wärmeisolation, wenig spröde, gutes mechanisches Verhalten, guter elektrischer Isolator

## Unidirektionalverbunde mit Keramikmatrix und Keramikfasern

gute Festigkeit in Faserrichtung, weniger spröde als Bulk-Keramik, gutes mechanisches Verhalten, gute Wärmeisolation, guter elektrischer Isolator

## Polymere

geringe mechanische Kennwerte, starkes Kriechen, hohe Dämpfung, hohe thermische und elektrische Isolation, hohe thermische Ausdehnung

*Maximalwerte von Eigenschaften bei Raumtemperatur*

Zugmodul	Unidirektionalverbunde mit Pech-Carbonfasern (bis 550 GPa)
Zugfestigkeit	Unidirektionalverbunde mit Carbonfasern (PAN) (bis 5 GPa)
Bruchdehnung	Polymere (200 bis 300 %)
Druckfestigkeit	Strukturkeramik (bis 4,5 GPa)
Dauerfestigkeit	Carbonfaserverbunde (ca. 80 % der stat. Festigkeit)
Spezifische Wärme	Keramik und Polymere (ca. 2 J/gK)
Negativer Ausdehnungskoeffizient	Unidirektionalverbund mit Kevlarfasern ( $\alpha$ ca. $-2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )
Piezoelekt. Effekt	Bleizirkonat, Bleititanat