Augsburger Merkkiste – Werkstoffeigenschaften

Eigenschaften

Damit Bauteile funktionsgerecht eingesetzt werden können, müssen Werkstoffe den unterschiedlichsten Anforderungen genügen: Das Material soll alle erforderlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften aufweisen, gut bearbeitbar und umweltverträglich sein sowie für die vorgesehene Anwendung eine wirtschaftliche Lösung darstellen.

"Beispielsweise sollte beachtet werden, dass Materialpreise im allgemeinen auf Gewichtsbasis kalkuliert werden. Aus diesem Grunde ist auch die Dichte von Werkstoffen ein wichtiges Auswahlkriterium. Der Tonnenpreis von Aluminium ist sicherlich höher als der von Stahl, die Dichte aber um einen Faktor drei kleiner. Obwohl Bauteile aus Aluminium kompakter ausgelegt sein müssen als vergleichbare aus Stahl, sind sie wegen der geringen Dichte und der geltenden Preisbasis möglicherweise billiger.

In vielen Anwendungsbereichen, so zum Beispiel im Flugzeugbau, ist das Gewicht von Bauteilen von besonderer Bedeutung, da es den Treibstoffverbrauch [...] und Reichweiten [...] Bevorzugt sind infolgedessen leichtgewichtige, aber ausreichend feste Materialien. Aus diesem Grunde werden im modernen Flugzeugbau Verbundwerkstoffe (z.B. kohlefaserverstärkte Epoxide) anstelle von Aluminium eingesetzt. Diese sind zwar im Materialpreis teurer, doch infolge des wesentlich verbesserten Festigkeits-Dichte-Verhältnisses dieser Stoffe werden die höheren Materialkosten durch geringere Betriebskosten (Treibstoffeinsparung) wieder aufgewogen."1

Werkstoffe unterscheiden sich nach ihren Eigenschaften, jedoch reicht es meist nicht aus, einen Werkstoff durch eine einzige Eigenschaft zu definieren. Es ist nötig verschiedene Stoffeigenschaften zu definieren. Je genauer die Werkstoffkennwerte sind, desto besser können Werkstoffe für verschiedene Einsatzbereiche beurteilt und ausgewählt werden.²

Mechanische Eigenschaften

Kurzdefinition: Verhalten eines Werkstoffes bei Einwirkung äußerer Kräfte. Dazu gehören Festigkeit, Steifigkeit, Verhalten bei plötzlichen Stößen (Schlagfestigkeit), bei zyklischer Belastung (Ermüdungsfestigkeit), Formgebung (Duktilität) und gegenüber erhöhter Temperatur (Kriechfestigkeit).

Festigkeit

Physikalische Einflüsse können die Gestalt fester Körper verändern. Wird ein fester Körper zum Beispiel durch äußere Kräfte beansprucht, so ändert er seine Form, er dehnt sich. Die Art dieser Dehnungen hängt von der Form des Körpers, der Angriffsweise der äußeren Kräfte und den Materialeigenschaften des festen Körpers ab. Elastisch ist der Körper, wenn er bei Wegfall der äußeren Kräfte die ursprüngliche Form wieder annimmt.

Stahl ist ein hartes elastisches Material. Wenn eine runde Stahlkugel auf eine Stahlplatte herunterfällt, werden die kleinsten Teilchen der Stahlkugel sowie der Stahlplatte beim Aufprall ein wenig zusammengequetscht. Man sagt auch deformiert.

Bei einem harten Festkörper (starke Bindungskräfte) wollen die Atome besonders schnell wieder in ihre Lage zurück. Daher schubsen sie die aufgetroffene und ihrerseits deformierte Kugel mit großer Heftigkeit zurück. Man kann einen ähnlichen Vorgang auch beim Auftreffen eines Tennisballs auf die elastischen Saiten des Schlägers gut verfolgen. Feste Körper sind elastisch; sie geben bei der Einwirkung von nicht allzu starken Kräften etwas nach (Deformation) und gehen danach wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Die meisten Körper sind nur elastisch, solange die Kräfte (beispielsweise gleich groß einwirkende Kräfte von rechts und links bei einem Metallstab) einen Maximalwert nicht überschreiten. Dieser Maximalwert heißt elastische Grenze oder Elastizitätsgrenze.³

¹ Askeland, Donald R.: Materialwissenschaften. Grundlagen-Übungen-Lösungen. 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, Nachdruck 2010, S. 13.

²Vgl. Hornbogen, Erhard et al.: Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. 10., neu bearbeitete Auflage, Heidelberg 2012, S. 163.

³ Tipler, Paul, A./ Mosca, Gene/ Wagner, Jenny (Hrsg): Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. deutsche Auflage, Berlin Heidelberg 2015, S. 352.

Wenn von mechanischen Eigenschaften gesprochen wird, kann zwischen plastischer und elastischer Verformung unterschieden werden. Eine mechanische Einwirkung auf einen Werkstoff kann nach Worch et al. (2011) verschiedene Reaktionen zeigen:

- Reversible Verformung, bei der eine Formänderung sofort bzw. eine bestimmt Zeit nach der Krafteinwirkung wieder verschwindet
- Irreversible Verformung, bei der eine Formänderung auch nach der Krafteinwirkung erhalten bleibt
- Bruch infolge des Ausbreitens von Rissen.⁴

Unter Festigkeit versteht man demnach Beanspruchungen (Spannungen), die von Werkstoffen bzw. Bauteilen nicht überschritten dürfen.

Steifigkeit / Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (wird mit E-Modul oder als Formelzeichen mit E abgekürzt) ist ein Maß für die Steifigkeit eines Werkstoffs: Je größer er ist, desto geringer ist die elastische Verformung eines Materials bei der gleichen Belastungshöhe. Der Elastizitätsmodul weist also einen umso größeren Betrag auf, je mehr Widerstand das Material der Verformung entgegenbringt. Besonders häufig wird der Elastizitätsmodul beim Vergleich von Metallen wie Stahl, Eisen, Aluminium usw. herangezogen, aber auch bei anderen Werkstoffen im Maschinenbau. Ein hoher Elastizitätsmodul (Stahl) besitzt damit eine höhere Steifigkeit als ein gleich konstruiertes Bauteil, das einen niedrigen Elastizitätsmodul (Gummi) besitzt. Steife Materialien besitzen einen hohen Elastizitätsmodul.

Zähigkeit / Duktilität (Verformbarkeit)

ist ein Ausdruck Verformbarkeit. Duktilität (aus dem Lateinischen von ducere "ziehen, führen, leiten" abgeleitet) ist die Eigenschaft eines Werkstoffes, sich bei Überbelastung stark plastisch zu verformen, bevor er versagt.

Beispielsweise **bricht Glas im Gegensatz zu Stahl ohne erkennbare Verformungen**; Bei Stahl lässt sich vor dem Riss eine starke plastische Verformbarkeit erkennen (bis zu 25%)⁵. Ob im Bauwesen, Pumpen, Rohrleitungen oder in der Automobilindustrie – eine Eigenschaft, die zu große Spannungen sichtbar ankündigt, kann lebensrettend sein. Nichtduktile (also spröde) Werkstoffe können beim Brechen Verletzungen durch umherfliegende Teile verursachen.

Sprödigkeit

Ein ideal spröder Werkstoff wird keine plastischen Formänderungen zulassen – es kommt zum Bruch, bevor es zur Verformung kommen könnte. Seine **Elastizitätsgrenze** liegt über der Bruchfestigkeit des Materials. Eine hohe Sprödigkeit besitzen meist Materialien großer Härte, wie beispielsweise Diamant, Salze, Keramiken. Duktile Werkstoffe, zumeist Metalle und Kunststoffe, sind hierzu vergleichsweise plastisch verformbar bis sie brechen. Die Sprödigkeit hängt auch von der Temperatur ab, der ein Werkstoff ausgesetzt ist. Plastische Stoffe können durch tiefe Temperaturen spröde werden.

Bruch

Von **Bruch** wird in der Literatur gesprochen, wenn eine Konstruktion versagt. Diese Art des Versagens stellt ein großes Sicherheitsrisiko dar. Deshalb wird der Bruchverhütung in der Konstruktion von Bauteilen bzw. in der Werkstoffwissenschaft besondere Aufmerksamkeit geschenkt.⁶ Worch (2011) definiert den Bruchvorgang als "[...] makroskopisches Trennen eines Festkörpers infolge [des] Aufbrechen[s] der Bindungen. Es kommt dabei zum Ausbreiten von Rissen in mikroskopischen und makroskopischen Dimensionen mit dem Stabilitätsverlust nach Erreichen einer

⁴ Worch, Hartmut / Pompe, Wolfgang / Schatt, Werner (Hrsg.): Werkstoffwissenschaft. 10., vollständig überarbeitete Auflage, Weinheim 2011, S. 379.

⁵URI: http://www.chemie.de/lexikon/Duktilit%C3%A4t.html (abgerufen am 03.06.15).

⁶ Vgl. ebd., S.436.

kritischen Risslänge."⁷ Allgemein werden Brucherscheinungen in Sprödbruch oder Zähbruch unterschieden. Ein Bruch ist spröde, wenn der Rissausbreitung keine bzw. nur eine auf den unmittelbaren Bereich an der Rissspitze beschränkte irreversible Verformung vorausgeht. Sprödbrüche haben zum Teil schwere Folgen, beispielsweise an Schiffen, Turbinen oder Brücken. Entsteht ein Bruch erst nach starker irreversibler Verformung, dann wird vom Zäh- oder Verformungsbruch gesprochen.

Ermüdungsbruch

Diese Werkstoffschädigung tritt in Bauteilen auf, die wiederkehrenden Wechselbelastungen (Rotation, Biegung, Vibration) jedoch noch unterhalb der Streckgrenze, über einen längeren Zeitraum hinweg ausgesetzt sind. Obwohl diese zyklische Beanspruchung noch im elastischen Bereich erfolgt, kann sie bei längerer Dauer zum Ausfall führen. Dies bezeichnet man dann als Ermüdungsbruch. Der Prozess des Ermüdungsversagens wird durch drei unterschiedliche Schritte charakterisiert⁸:

- Risseinleitung: hierbei bildet sich an einem Punkt hoher Spannungskonzentration ein kleiner Riss;
- Rissausbreitung: der Riss dehnt sich mit jedem Lastzyklus zunehmend aus;
- Vollständiger Bruch, der sehr schnell erfolgt, sobald der sich ausbreitende Riss eine kritische Größe erreicht hat.⁹

Dauerschwingversuch (Ermüdungstest)

Der Schwingversuch gibt Auskunft darüber, wie lange eine Probe einer zyklischen Beanspruchung maximal standhält – also noch kein Bruch eintritt. Kenngrößen dieses Schwingverhaltens sind die Ermüdungslebensdauer, die Dauerschwingfestigkeit (Dauerfestigkeit) und Zeitschwingfestigkeit (Zeitfestigkeit).

Ermüdungslebensdauer

Anzahl der zulässigen Belastungszyklen bei vorgegebener Spannung. Aus der Kenntnis des Risswachstums lassen sich Schlüsse auf die Ermüdungslebensdauer ziehen.

Dauerfestigkeit / Dauerschwingfestigkeit

gibt den **Höchstwert** der von einem Werkstoff ertragenen **wechselnden Belastung** an, die er auf **Dauer** aushält – **maximale Spannung**, bis zu der kein Ausfall stattfindet.

Zeitfestigkeit / Zeitschwingfestigkeit

ist ein Maß für die Beanspruchung, die der Werkstoff über eine definierte **Zeit ohne Bruch** aushält, d. h. maximale Spannung, bis zu der eine bestimmte Zykluszahl nicht zum Ausfall führt.

Härte

⁷ Worch, Hartmut / Pompe, Wolfgang / Schatt, Werner (Hrsg.): Werkstoffwissenschaft. 10., vollständig überarbeitete Auflage, Weinheim 2011, S. 436.

⁸ Vgl. Askeland, Donald R.: Materialwissenschaften. Grundlagen-Übungen-Lösungen. 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, Nachdruck 2010, S. 146ff.

⁹ Callister, William, D. / Rethwisch, David, G.: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. Eine Einführung. Weinheim 2013, S. 235.

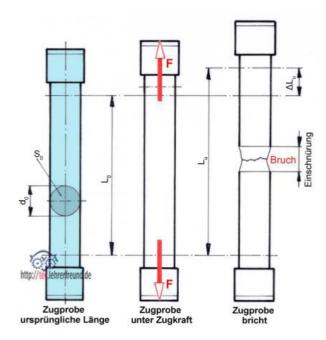
Unter Härte versteht man den Widerstand, den der Werkstoff dem Eindringen (Indenter) eines Körpers entgegensetzt¹⁰ Härte kann daher durch Ermittlung des Werkstoffwiderstandes gegen lokale plastische Verformung gemessen werden. Unter definierten Bedingungen wird ein Indenter in die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstoffs gedrückt und die Tiefe oder die Größe des Eindrucks vermessen. Je größer und tiefer der Eindruck im Werkstoffe, desto geringer ist der ermittelte Härtewert. ¹¹

Zugversuch

beschreibt das Verhalten eines Werkstoffes gegenüber einer allmählich ansteigenden Zugspannung. Daraus ermittelte Kenngrößen sind die Zugfestigkeit, Streckgrenze, der Elastizitätsmodul und die Duktilität.

Zugfestigkeit

ist die Festigkeitskenngröße eines Werkstoffs, die in einem **Zugversuch** für diesen ermittelt wurde. Sie gibt für verformbare Werkstoffe die **maximale Belastbarkeit** an, **bei der kein Bruch eintritt.** Bei spröden Werkstoffen entspricht der Höchstwert dem Belastungswert beim Bruch des Werkstoffes.



Streckgrenze

Wichtige Kenngröße der Materialfestigkeit. Sie teilt das Widerstandsverhalten des Materials in einen elastischen und plastischen Bereich ein. Wenn die Spannungsbeanspruchung die Streckgrenze übersteigt, tritt eine plastische Verformung ein. 12

Schlagprüfung / Schlagfestigkeit

¹⁰ Vgl. Worch, Hartmut / Pompe, Wolfgang / Schatt, Werner (Hrsg.): Werkstoffwissenschaft. 10., vollständig überarbeitete Auflage, Weinheim 2011, S.464.

¹¹ Vgl. Callister, William, D. / Rethwisch, David, G.: Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnik. Eine Einführung. Weinheim 2013, S. 156f.

¹² Vgl. Askeland, Donald R.: Materialwissenschaften. Grundlagen–Übungen–Lösungen. 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, Nachdruck 2010, S. 129ff.

Werkstoffe verhalten sich bei stoßartiger Belastung, die mit extrem großer Verformungsgeschwindigkeit verbunden ist, sehr viel spröder als unter den Bedingungen der quasi statischen Zugfestigkeitsprüfung. Als Kennwert wird die beim Bruch aufgebrachte Energie gemessen. Sie dient als Basis für Werkstoffvergleiche.¹³

Druckfestigkeit

ist eine Kenngröße des Werkstoffverhaltens, die der **Zugfestigkeit entgegengesetzt** ist. Sie ist der Quotient aus der Größe der einwirkenden Kraft **F** und der Ausgangsfläche **A.** Auch die Druckfestigkeit wird in einem Werkstoffprüfverfahren ermittelt, im so genannten **Druckversuch**.

Biegeversuch / Biegefestigkeit

ist der Widerstand eines Stoffes gegenüber den Biegemomenten, d. h. den Kräftepaaren der Biegekräfte. Die beim Biegen von außen wirkenden Kräftepaare rufen im Werkstoff Biegespannungen hervor. Der Biegeversuch wird angewendet, um das Zugverhalten spröder Werkstoffe zu bestimmen. Hieraus können Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit (analog zur Zugfestigkeit) abgeleitet werden.

Thermische Ausdehnung

Bei Erwärmung dehnen sich feste Stoffe aus und ziehen sich bei Abkühlung zusammen. Die relative Längenänderung ist proportional zur Temperaturänderung, die Proportionalitätskonstante ist der thermische Ausdehnungskoeffizient. Hierbei handelt es sich um einen Messkennwert, der das Verhalten eines Stoffes bei Temperaturveränderungen beschreibt. Da die Wärmeausdehnung bei vielen Stoffen nicht gleichmäßig über alle Temperaturbereiche erfolgt, ist auch der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst temperaturabhängig und wird deshalb für eine Bezugstemperatur oder einen Temperaturbereich angegeben. Die Werte des thermischen Ausdehnungskoeffizienten sind für Polymere größer als für Metalle und am niedrigsten für keramische Werkstoffe.¹⁴

Thermische Spannung

kann als Folge von Temperaturänderungen in Körpern auftreten und zum Bruch oder zu unerwünschten plastischen Verformungen führen. Eine Ursache von Wärmespannungen ist die Behinderung der thermischen Ausdehnung (oder Schwindung) eines Körpers. Unter Thermoschick wird der Bruch eines Körpers im Ergebnis von Wärmespannungen, die durch plötzliche starke Temperaturänderungen hervorgerufen werden, verstanden. Aufgrund ihrer Sprödigkeit sind keramische Werkstoffe für derartige Schäden besonders anfällig.

Wärmeleitfähigkeit

Der Transport von Wärme aus wärmeren in kältere Bereiche von Werkstoffen wird als Wärmeleitung bezeichnet. Die Wärmeleitung kann folgendermaßen erklärt werden: wird ein Metall über eine Hitzequelle gehalten, so schwingen die Atome direkt über der Flamme heftiger, als diejenigen, welche sich weiter entfernt befinden. Jedoch übertragen sich diese starke Schwingungen bis zu den Atomen, die schwächer schwingen - dies ist die Wärmeleitung.¹⁵ Die hohe Wärmeleitfähigkeit relativ reiner Metalle hat ihre Ursachen in der großen Anzahl freier Elektronen und der Effizienz, mit der diese Elektronen thermische Energie transportieren. **Keramiken und Polymere sind hingegen schlechte Wärmeleiter, da**

¹³ Vgl. Askeland, Donald R.: Materialwissenschaften. Grundlagen–Übungen–Lösungen. 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, Nachdruck 2010, S. 139ff.

¹⁴ Vgl. Callister, William, D. / Rethwisch, David, G.: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. Eine Einführung. Weinheim 2013, S. 734.

¹⁵ Vgl. Born, Gernot / Hübscher, Heinrich / Lochhaas, Horst / Pradel, Günter/ Vorwerk, Bernd: Querschnitt Physik und Technik. Westermann Schulbuchverlag Braunschweig 1993.

freie Elektronen nur in geringen Konzentrationen vorliegen. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu. $^{16\,17}$

Kriechversuch / Kriechen

Werkstoffe werden häufig bei höheren Temperaturen mechanischen Belastungen (konstanten Lasten) ausgesetzt (z. B. Turbinenräder in Düsentriebwerken). Verformung unter solchen Bedingungen wird als Kriechen bezeichnet. Dieser meist unerwünschte Vorgang begrenzt die Lebensdauer eines Bauteils und tritt besonderes bei Polymeren, vor allem Thermoplasten und Plastomeren, auf. 18 Der Kriechversuch gibt also Auskunft über die Materialbelastbarkeit bei erhöhter Temperatur. Wichtige Kenngrößen sind die Kriechgeschwindigkeit und die Bruchzeit. 19

Die Werkstoffgruppen

Weil manche Eigenschaften der Werkstoffe sich derart ähneln, lassen sie sich charakterisieren. Hierfür hat man fünf große Gruppen von Werkstoffen eingeteilt:

Metalle, Keramik, Polymere, Halbleiter und Verbundwerkstoffe. Letztere bestehen aus einer Kombination von jeweils mindestens zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Durch den Verbund entstehen neue Eigenschaften, welche die Einzelkomponenten übertreffen.²⁰

- 1. Metallische Werkstoffe sind gute elektrische Leiter, sie reflektieren Licht, verfügen über eine relativ hohe Festigkeit und Steifigkeit. Auch bei tiefen Temperaturen sind sie unter Zug und Druck plastisch verformbar, zeichnen sich jedoch durch geringe Stoßempfindlichkeit aus und sind chemisch meist nicht sehr beständig. Reine Metalle kommen selten zum Einsatz, da Legierungen (eine Kombination unterschiedlicher Metalle) besser geeignet sind, um gewünschte Eigenschaften hervorzubringen.
- 2. Keramik / Glas: Keramiken sind Verbindungen von Metallen und Nichtmetallen, zumeist Oxide, Nitride und Karbide. Zu den gebräuchliche Keramiken gehören Aluminiumoxid, Siliziumdioxid, Siliziumkarbid und die oft als traditionelle Keramiken bezeichneten Werkstoffe aus Tonmineralien (z. B. Porzellan) sowie Betone. Keramische Werkstoffe sind nicht plastisch verformbar, chemisch sehr beständig und schmelzen bei hohen Temperaturen. Sie sind schlechte thermische und elektrische Leiter und eignen sich daher gut zur Isolierung und Wärmedämmung. Zudem sind sie hart und fest; durch den Einsatz neuer Technologien kann die Bruchfestigkeit insofern verbessert werden, als dass Keramik für hochbelastete Teile wie beispielsweise für Turbinen eingesetzt werden kann.
- 3. Zu den Polymeren gehören Plaststoffe (Kunststoffe), Gummi und viele Kleber. Polymere sind schlechte elektrische Leiter und besitzen nur eine geringe mechanische Festigkeit, sind bei tiefen Temperaturen spröde, jedoch bei erhöhter Temperatur plastisch verformbar (vor allem Thermoplaste), bei Raumtemperatur an Luft beständig, haben eine geringe Dichte und schmelzen oder zersetzen sich bei verhältnismäßig niedriger Temperatur.

Polymere werden unterschieden in:

¹⁶ Vgl. Bargel, Hans-Jürgen / Schulze, Günter (Hrsg.): Werkstoffkunde. 9., bearbeitete Auflage, Berlin 2005, S. 11.

¹⁷Vgl. Worch, Hartmut / Pompe, Wolfgang / Schatt, Werner (Hrsg.): Werkstoffwissenschaft. 10., vollständig überarbeitete Auflage, Weinheim 2011, S. 507ff.

¹⁸ Ebd. S. 433. Siehe auch: Vgl. Callister, William, D. / Rethwisch, David, G.: Magterialwissenschaften und Werkstofftechnik. Eine Einführung. Weinheim 2013, S. 240f.

¹⁹ Vgl. Askeland, Donald R.: Materialwissenschaften. Grundlagen–Übungen–Lösungen. 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, Nachdruck 2010, S. 153ff.

²⁰ Ebd. S. 4ff.

- Plastomere (= Thermoplaste)
- Elastomere (= Gummi)
- Duromere (= Kunstharze) ²¹
- **4. Halbleiter:** Silicium, Germanium etc. Halbleiter zeigen Eigenschaften, die zwischen denen von elektrischen Leitern (Metalle und metallische Legierungen) und Isolatoren (Keramiken, Gläser und Polymere). Ihre Nutzung beruht auf der gut kontrollierbaren Einstellbarkeit der elektrischen Leitfähigkeit in Mikrobereichen zur Erzeugung von Dioden- und Transistorstrukturen und komplexen integrierten Schaltungen.
- **5. Verbundwerkstoffe:** Durch Verbundtechnik lassen sich qualitativ neue je nach Einsatz gewünschte Eigenschaften erzielen. Dazu gehören beispielsweise leichtgewichtige, feste, gut verformbare und temperaturbeständige Erzeugnisse.

Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe

Vorgänger der Faserkunststoffverbundwerkstoffe (FKV) sind den Menschen schon seit Jahrhunderten bekannt. Die Rede ist von Holz oder Knochen, die, ähnlich der modernen FKV, die Vorteile der Faserstruktur aufweisen. Jedoch muss bei Faserverbundwerkstoffen beachtet werden, dass die beiden Komponenten, Fasern und Matrix, unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Während Fasern den Hauptteil der Lasten tragen, dient die Matrix dazu, die Fasern zu fixieren und die einwirkende Kraft auf die Fasern zu übertragen. Ferner besitzt die Faser gute mechanische Eigenschaften, während die der Matrix größtenteils mäßig sind. Deshalb werden die Eigenschaften des Faserverbunds hauptsächlich durch die Eigenschaften der Faser bestimmt - je nach Fasergehaltvolumen können sich die Eigenschaften der FKV stark unterscheiden.²² Vergleicht man beispielsweise Kohlenstoff-, Aramid- und Glasfasern im Hinblick auf ihr Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Faserrichtung, so ist festzustellen, dass der Kohlenstoff die höchsten Festigkeits- und Steifigkeitswerte erreicht.²³ Abbildung 1 zeigt eben dieses Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass die verschiedenen Fasern über unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf ihr Spannungs-Dehnungs-Verhalten verfügen. Kohlenstoff besitzt ein geringes Dehnungsverhalten, schon bei einer Dehnung von ca. 1,7 % reißt eine Kohlenstofffaser. Jedoch muss im Zusammenhang gesehen werden, dass die Faser bei einer Spannung von bis zu ca. 5000 N/mm² reißt. Die anderen beiden Materialien erreichen lediglich eine Spannung von ca. 3500 N/mm² (Glasfaser) oder ca. 2600 N/mm² (Aramid) bevor die Fasern reißen. Allerdings ist bei Aramid festzuhalten, dass die Faser erst bei einer Dehnung von bis zu 4,5 % zerreißt. Diese Eigenschaft von Aramid lässt auch darauf schließen, warum die Faser in der Schutzkleidungsindustrie verwendet wird (z. B. Kevlar oder Schnittschutzhosen).

²¹Vgl. Hornbogen, Erhard et al.: Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. 10., neu bearbeitete Auflage, Heidelberg 2012, S. 163.

²² Vgl. AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung. 3., vollständig überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2010, S. 296.

²³ Vgl. Ehrenstein, Gottfried Wilhelm: Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften. 2., völlig überarbeitete Auflage, München 2006, S. 43.

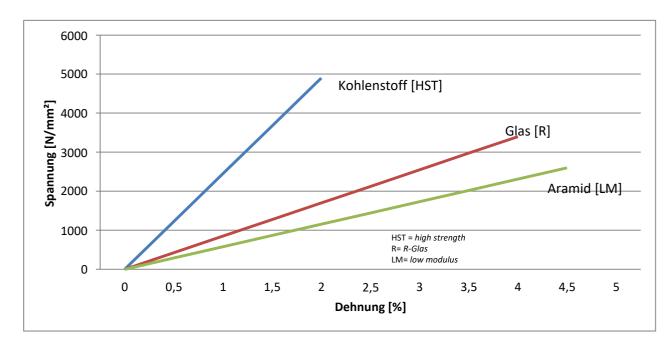


Abbildung 1: Spannungs-Dehungs-Diagramm, Quelle: Eigene Darstellung, nach: Ehrenstein (2006), S. 43

Ziel jedes FKV ist es dessen Potential vollständig auszuschöpfen. Faserverbundwerkstoffe kommen dann zum Einsatz, wenn konventionelle Werkstoffe den gestellten Anforderungen nicht mehr bzw. nur noch zum Teil entsprechen. Zum Beispiel wurde in den 1970er Jahren borfaserverstärktes Aluminium für Leichtbaukonstruktionen verwendet. Durch dessen hohe Festigkeit, Steifigkeit und vergleichsweise niedrige Dichte gingen die Konstrukteure davon aus, dass borfaserverstärktes Aluminium der geeignetste Werkstoff für Leichtbaukonstruktionen sei. Jedoch veränderte sich das Bild mit der Entwicklung von CFK-Bauteilen²⁴. Tabelle 1 zeigt die gewichtsbezogenen Steifigkeiten und Festigkeiten von verschiedenen Werkstoffen. Auffallend ist, dass sämtliche Fasern insbesondere bei den gewichtsbezogenen Festigkeitswerten den konventionellen Werkstoffen überlegen sind. Vor allem Aramid- und Kohlenstofffasern überzeugen hier mit Werten von 1,03 bzw. 0,95. Auch die Steifigkeit überwiegt bei den Faserverbundwerkstoffen deutlich. So weist der Kohlenstoff beispielsweise einen gewichtsbezogenen E-Modul von 114,63 auf. Hochfester Stahl hat hingegen nur ein E-Modul von 27,63.²⁵

	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg/m³]	E-Modul bezogen auf Dichte	Zugfestigkeit bezogen auf Dichte
Stahl (vergütet)	≈ 21000	≈ 650	≈ 7600	27,63	0,09
Stahl (hochfest)	≈ 21000	≈ 2000	≈ 7600	27,63	0,26
Aluminium (hochfest)	≈ 70000	≈ 450	≈ 2700	25,93	0,17
Glasfaserverbund (E-Glas)	38600	1062	1824	21,16	0,58
Glasfaserverbund (S-Glas)	58800	1749	2050	28,68	0,85
Kohlefaserverbund (C-T300)	181000	1500	1579	114,63	0,95
Aramidfaserver- bund (KEV49)	76000	1400	1362	55,80	1,03

Tabelle 1: Gewichtsbezogene Steifigkeit und Festigkeit einiger Werkstoffe, Quelle: Ledermann (2003), S.29

²⁴ Vgl. Schulte, Karl: Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix. Aufbau und mechanische Eigenschaften, Köln 1992 (zugl. Habil. Univ. Bochum 1991), S. 32.

²⁵ Vgl. Ledermann, Markus: Beiträge zur Optimierung von Faserverbunden nach dem Vorbild der Natur, Karlsruhe 2003 (zugl. Diss. Univ. Karlsruhe (TH) 2002), S. 29.

Die thermischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen sind durchaus je nach Faser- und Matrixtyp unterschiedlich. Die Glasfaser und Matrix dehnen sich bei Temperaturerhöhung aus – die C-Faser und Aramidfaser hingegen ziehen sich zusammen. Diese Eigenschaften müssen bei der Konstruktion von Bauteilen beachtet werden. Jedoch wird die eigentliche thermische Grenze von der Matrix bestimmt. Die Eigenschaften der Fasern ändern sich kaum, jedoch beginnen die verschiedenen Matrizen zu erweichen. Der Grund hierfür ist bei den Thermoplasten die reversible Erweichung der physikalischen Bindung. Bei den Duroplasten bleibt hingegen die chemische Bindung erhalten. Eine Belastungsart der Faser ist die Belastung in Faserrichtung. Jene soll anhand eines Beispiels erklärt werden. Wird ein FKV in Faserrichtung unter Zug belastet, so versucht sich die Matrix zu dehnen. Die Faser jedoch dehnt sich durch ihren geringeren E-Modul weniger aus. Dies führt dazu, dass sich die Verschiebung zwischen Faser und Matrix zum Ende des FKV erhöht - Faser und Matrix driften immer weiter auseinander. Daher ist die Spannung an den Grenzflächen des Faserverbundwerkstoffes um ein Vielfaches höher als innerhalb der Mitte des FKV. Um ein Auflösen des Verbundes zu verhindern, muss ein fester Verbund aus Matrix und Faser gewährleistet werden. Die physikalischen Eigenschaften verschiedener Fasern und Metalle sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Die Einheit GPa (= 1000 MPa) bzw. kN/mm² wird dann verwendet, wenn höhere Werte erreicht werden. 28

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
Glass 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
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

Abbildung 2: Physikalische Eigenschaften verschiedener Fasern und Metalle, Quelle: R & G (2009), S. 143

Abbildung 2 zeigt, dass gerade technische Fasern bzgl. der Reißlänge Stahl überlegen sind. Stahl hat eine Reißlänge²⁹ von maximal 30 km - wohingegen Kohlenstoff bei einer Länge von maximal 380 km reißt. Weiter ist zu erkennen, dass die Naturfasern (Flachs, Jute, Baumwolle und Ramie) ähnliche Werte wie Stahl erreichen. Wohingegen deren E-Modul um einiges geringer ist. Wird der E-Modul von Stahl und technischen Fasern verglichen, so ist Stahl gegenüber den Glas- und Aramidfasern deutlich überlegen. Ein Vorteil der technischen Faser ist es, dass dessen E-Modul variabel einstellbar ist. Diese Variabilität wird durch verschiedene Verfahren bei der Herstellung erzeugt. Wird die Zugfestigkeit der einzelnen Werkstoffe verglichen mit dem Ergebnis, dass die technischen Fasern dem Werkstoff Stahl überlegen sind, dann kann die Kohlenstofffaser sogar eine Zugfestigkeit von bis zu 7,0 GPa erreichen. Die Naturfasern hingegen weisen eine deutlich geringere Zugfestigkeit auf (0,32 bis max. 0,9). Allerdings haben alle Fasern eine geringere Dichte als Stahl.

²⁶ Vgl. Ehrenstein, Gottfried Wilhelm: Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften. 2., völlig überarbeitete Auflage, München 2006, S. 132ff.

²⁷ Vgl. Ehrenstein, Gottfried Wilhelm: Polymer - Werkstoffe. Struktur – Eigenschaften – Anwendung. 3., Auflage, München 2011, S. 158ff.

²⁸ Vgl. Neroth, Günther et al.: Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz. 27., vollst. überarb. Aufl., 2., vollst. überarb. Aufl. [im Verl. Vieweg + Teubner], Wiesbaden 2011, S. 15.

²⁹ Definition Reißlänge: "ein Maß für die festigkeitsmäßige Ausnutzbarkeit unter reiner Zugbeanspruchung." Klein, Bernd: Leichtbau – Konstruktion. Berechnungsgrundlage und Gestaltung. 8., überarbeitete und erweiterte Aufl., Wiesbaden 2009, S. 31.