

Mechanische Eigenschaften

Biegefestigkeit

-Biege-

1 Praktikumsziel

Ziel dieses Praktikums ist es, das verschiedenartige Deformationsverhalten von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen bei mechanischer Beanspruchung zu demonstrieren und zu verstehen. Durch *werkstoffmechanische Prüfungen*, in denen u. a. der Biegeversuch angesiedelt ist, werden Kennwerte von Materialien aus technischen Einsatzgebieten ermittelt, die das Verhalten eines mechanisch beanspruchten Werkstoffs beschreiben. Mit Hilfe einer 3-Punkt-Biegevorrichtung der Fa. Zwick/Roell werden die Spannungs-Durchbiegungs-Diagramme von stabförmigen Proben unterschiedlicher Materialien aufgenommen, um das Werkstoffverhalten metallischer, keramischer und polymerer Werkstoffe unter mechanischer Belastung zu charakterisieren.

2 Grundlagen

2.1 Spröde und duktile Werkstoffe

Die Spannungs-Dehnungskurve eines Festkörpers (Abb.1) wird durch den Bruch begrenzt. Der atomare Zusammenhang geht dabei längs einer Fläche verloren, die den belasteten Körper zweiteilt. Nach der Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve, die dem Bruch vorausgeht, wird zwischen Sprödbrech und duktilem Bruch unterschieden. Während dem duktilen Bruch eine ausgedehnte plastische Verformung vorausgeht, bricht ein spröder Körper (nach Durchlaufen einer geringen elastischen Deformation) katastrophal ohne nennenswerte plastische Verformung.

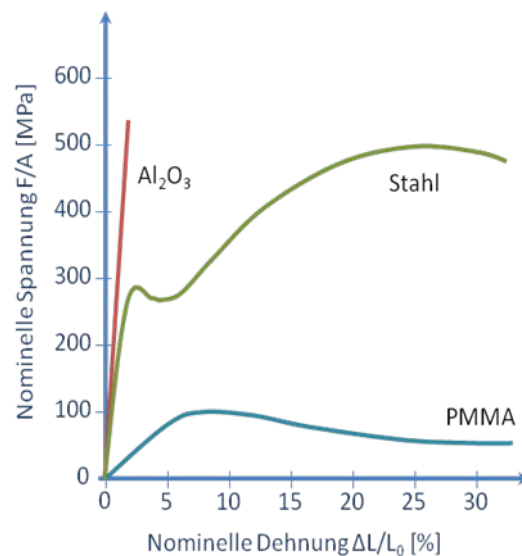


Abb. 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für eine Keramik, ein Metall und einen Kunststoff

Im Gegensatz zu den in der Regel duktilen Metallen verhalten sich Keramiken bei Raumtemperatur spröde. Erst bei relativ hohen Temperaturen kann eine merklich plastische Verformung eintreten. Die Ursache für dieses Verhalten ist auf Unterschiede in der Struktur und Bindung von Metallen und Keramiken zurückzuführen.

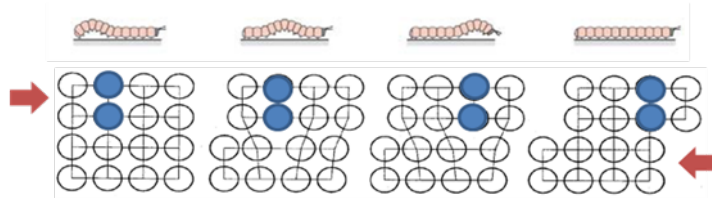


Abb. 2: Bewegung einer Stufenversetzung auf einer Gleitebene unter Einwirkung einer Schubspannung
Oben: Analogie der Raupenfortbewegung

Innerhalb einer modellhaften Betrachtung *einkristalliner* Materialien bewegen sich unter Einwirkung einer Schubspannung Versetzungen durch den Kristall (Abb. 2). Versetzungen sind Gitterdefekte, die in realen Kristallen immer enthalten sind. Im Ergebnis der Versetzungsbewegung gleiten zwei

Kristallteile aufeinander ab, wobei die Bindungen in der Gleitebene nacheinander getrennt werden. Dieses Gleiten ist der Elementarprozess der plastischen Verformung. Widerstand gegen plastische Verformung bedeutet deshalb Einschränkung der Beweglichkeit der Versetzungen. Da die beteiligten Atome neue Gleichgewichtslagen einnehmen, muss die Versetzungsbewegung Bindungskräfte innerhalb der Struktur überwinden. Unterschiede im Verformungsverhalten sind somit zunächst auf Unterschiede in den Bindungsenergien (Abb. 3) zurückzuführen.

Wenn sich eine Versetzung in einem reinen Metall bewegt, hat das nur einen geringen Effekt auf die Bindung zwischen den positiv geladenen Atomrümpfen und dem delokalisierten Elektronengas. Daher gibt es in Metallen nur einen schwachen Widerstand gegen die Versetzungsbewegung. Reale metallische Werkstoffe hingegen weisen die unterschiedlichsten Kristallbaufehler auf. Diese lassen sich in 0- (Leerstellen, Zwischengitteratome), 1- (Versetzungen), 2- (Korngrenzen) und 3-dimensionale Kristallbaufehler (Poren, Lunker) unterscheiden.

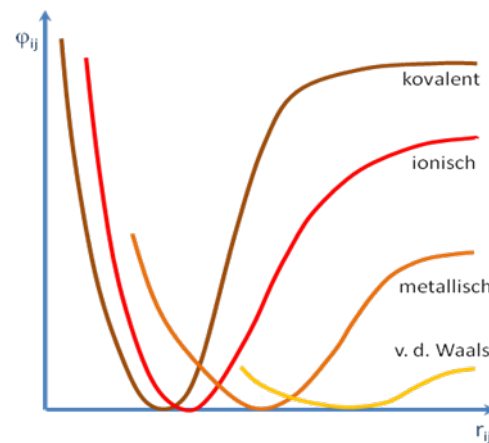


Abb. 3: Wechselwirkungspotential ϕ zweier Atome (Ionen) ij im Abstand r für verschiedene Arten der chemischen Bindung. Je kleiner die Bindungsenergie, desto größer ist der Atomabstand und desto flacher die Potentialkurve zwischen den Nachbaratomen

In einem *polykristallinen* Körper bilden die Korngrenzen Hindernisse für die Versetzungsbewegung, es resultieren Versetzungsstaus und lokale Spannungskonzentrationen. Diese können auf zwei Wegen abgebaut werden: entweder durch Fortsetzung des Gleitens im Nachbarkorn (Abb. 4a) oder durch Rissbildung an der

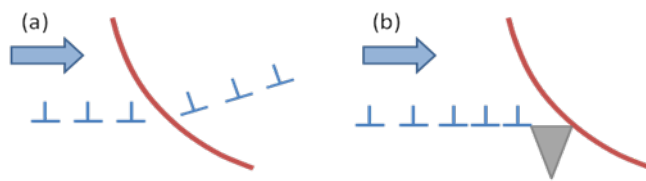


Abb. 4: Versetzungsbewegung im Polykristall
 (a) Fortsetzung der Gleitbewegung im Nachbarkorn
 (b) Aufstauung gleichnamiger Stufenversetzungen an einer Korngrenze (rot), es bildet sich ein Risskeim

Korngrenze (Abb. 4b). Für die plastische Deformation muss der Gleitvorgang Korngrenzen überspringen, d.h. im Nachbarkorn muss ein Gleitsystem möglichst geringer Fehlorientierung verfügbar sein (Abb. 4a). Im Fall kubisch-flächenzentrierter (kfz) Metalle gelingt das am leichtesten, da sie die maximale Zahl unabhängiger

Gleitsysteme aufweisen. Mit abnehmender Symmetrie des Gitters (kfz \rightarrow krz \rightarrow hex) verringert sich die Zahl der Gleitsysteme, die entsprechenden Metalle sind spröder. Duktilität bzw. Sprödigkeit eines Materials hängen auch von seiner *Kristallstruktur* ab. Diese Abhängigkeit kann jedoch nicht losgelöst von den Bindungsverhältnissen betrachtet werden.

Die chemische Bindung in *Keramiken* wird durch den Grenzfall der kovalenten Bindung bestimmt. Die starken lokalisierten kovalenten Bindungen stellen einen enormen Widerstand für die Versetzungsbewegung dar, da die Bindungen zwischen den Atomen aufgebrochen und neu gebildet werden müssen (Abb. 5). Bei der ionischen Bindung ist der zu überwindende Widerstand abhängig vom Gleitsystem (Gleitebene + Gleichrichtung). Wie aus der Abb. ersichtlich wird, bleiben bei einer 45°-Scherung gleich geladene Ionen separiert, der Widerstand ist gering. Dagegen führt beim Gleiten auf der horizontalen Ebene die Annäherung gleich geladener Ionen zu elektrostatischer Abstoßung und damit zu einem höheren Widerstand. Da die Gleitsysteme mit schwieriger Versetzungsbewegung dominieren, sind auch ionische Keramiken in der Regel nicht plastisch verformbar.

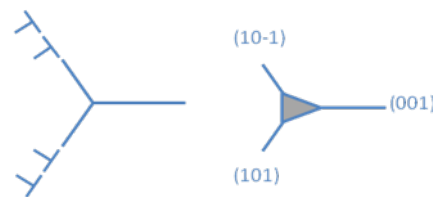


Abb. 5: Bildung eines Risskeims durch Reaktionen von Versetzungen aus verschiedenen Gleitsystemen im krz-Gitter. (001) ist keine Gleitebene, deshalb entsteht ein Riss parallel zur Spaltebene (001).

2.2 Biegeversuch

Der Biegeversuch ist ein einachsiger Verformungsversuch mit inhomogener Spannungs- und Dehnungsverteilung über den Probenquerschnitt. Festigkeit ist eine quantifizierbare Werkstoffeigenschaft, die zum Ausdruck bringt, dass ein Festkörper der Einwirkung äußerer Kräfte und/oder Momente widersteht, ohne dass irreversible (plastische) Verformung oder zum Bruch führende Rissausbreitung ausgelöst wird. Die übliche Versuchsanordnung zur Bestimmung der (Zug-)Festigkeit ist der Zugversuch. Spröde Materialien werden in der Regel nicht in Zugversuchen getestet, da es schwierig ist, Proben der nötigen Geometrie herzustellen und einzuspannen. Eine Alternative ist die Messung der *Biegefestigkeit*. Für den Belastungsfall der *Biegung* eines symmetrischen Materialquerschnitts treten in der einen Randfaser Zug- und in der gegenüberliegenden Druckspannungen auf. Die Spannungen

nehmen auf beiden Seiten mit dem Abstand von der neutralen Faser zu, sodass die höchsten Werte jeweils in den Randfasern auftreten. Ist die Biegung rein elastisch, liegt eine lineare Spannungsverteilung vor. Die Biegefestigkeit ist gegeben durch die Randfaserspannung, bei der der Probekörper bricht. Diese Biegebruchspannung σ_b stellt einen Vergleich zweier mechanischer Momente im Augenblick des Bruchereignisses dar. Das von außen auf den Probekörper aufgebrachte Biegemoment M_b wird verglichen mit dem Widerstandmoment W_b , dass der Probekörper der Durchbiegung entgegensetzt:

$$\sigma_b \text{ [MPa]} = \frac{M_b}{W} \quad (1)$$

Das Biegemoment ergibt sich aus

$$M_b = F_m \cdot l \quad (2)$$

F_m [N] ist die Maximalkraft beim Bruch, l [mm] die Länge des Kraftarms. Das Widerstandmoment berechnet sich zu

$$W_b = \frac{I}{a} \quad (3)$$

I [m⁴] ist das Flächenträgheitsmoment des Probenquerschnittes, a [m] ist der Abstand des Flächenschwerpunktes vom Rand (Abstand der neutralen Phase).

Nach dem Hook'schen Gesetz folgt daraus als Dehnungsverteilung:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_b}{E} = \pm \frac{M_b}{W_b \cdot E} = \pm \left(\frac{M_b \cdot a}{I \cdot E} \right) \quad (4)$$

Zur Bestimmung der Biegebruchfestigkeit sind zwei Belastungsanordnungen gebräuchlich (Abb.): die 3-Punkt-Biegung und die 4-Punkt-Biegung. Für den hier vorliegenden Fall der 3-Punkt-Biegung von Proben mit kreisförmigem Querschnitt gilt:

$$M_b = \frac{F_m}{2} \cdot \frac{l_s}{2} \quad \text{und} \quad W_b = \frac{\pi}{32} d^3 \quad (5)$$

Dabei bezeichnet l_s [mm] den Abstand zwischen den Mittelpunkten der Auflagerrollen und r bzw. d [mm] den Radius bzw. Durchmesser der Stäbe.

Das Flächenträgheitsmoment I einer kreisrunden Probe berechnet sich zu

$$I = \int_A Y^2 \cdot dA = \frac{\pi}{64} \cdot d^4 \quad (6)$$

Für die Bruchbeanspruchung σ_b ergibt sich aus den Gleichungen:

$$\sigma_b = \frac{8 \cdot F_m \cdot l_S}{\pi \cdot d^3} \quad (7)$$

2.3 Biegefestigkeit

Das durch den Biegeversuch auf die Probe aufgebrachte Biegemoment kann so weit gesteigert werden, dass die Randspannung σ_R die Streckgrenze erreicht oder überschreitet. Es kommt im Randbereich zum Auftreten plastischer Dehnungsanteile. Eine unbehinderte plastische Verformung der Randschichten findet jedoch nicht statt, da die weiter innen gelegenen Bereiche der Biegeprobe die Streckgrenze noch nicht erreicht haben. Um die näher zur Längsachse gelegenen Fasern weiter zu verformen, muss das Biegemoment gesteigert werden. Bei einem überelastisch beanspruchten Biegestab aus einem Material, dass bei Überschreiten der Fließgrenze Verfestigung zeigt, liegt eine markante Spannungsverteilung vor.

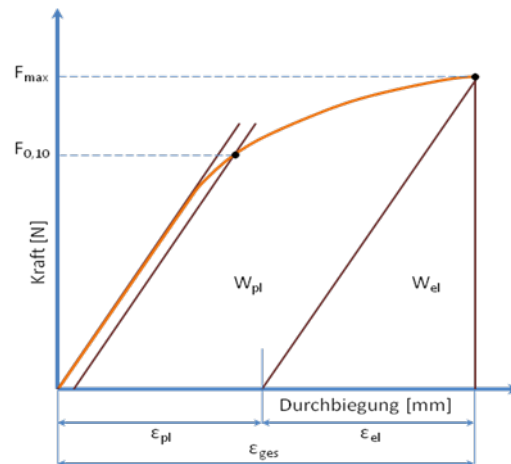


Abb. 6: Kraft-Durchbiegungs-Schaubild

Bei Werkstoffen mit gleicher Verfestigungskurve für die Zug- und Druckbeanspruchung ist die Biegespannungsverteilung symmetrisch zur neutralen Faser. Nur in den Probereichen nahe der neutralen Faser liegt noch eine linear anwachsende Spannung vor. In den Probenrandbereichen stellen sich jeweils die der Gesamtdehnung entsprechende Fließspannungen ein.

Im Allgemeinen bleibt die Gesamtdehnung

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (8)$$

über die Biegehöhe linear verteilt.

Da auch bei überelastischer Biegebeanspruchung ($M_b > M_{b,el}$) das Biegemoment ein Maß für die Beanspruchung der Probe ist, wird in diesem Fall weiterhin mit der Gleichung

$$\sigma_R = \pm \frac{M_b}{W_R} \quad (9)$$

gerechnet. Es wird angenommen, dass bei überelastischer Beanspruchung die Spannungsverteilung weiterhin linear ist. Man ermittelt die fiktiven Randspannungen

$$\sigma_R^* = \pm \frac{M_b}{W_R} \text{ für } M_b > M_{b,el} \quad (10)$$

Die so berechneten Spannungswerte sind größer als die tatsächlich wirksamen Spannungen in der Randfaser. Die Werte der wahren Spannung sind im Randbereich, im Gebiet der plastischen Verformung, zunächst kleiner als die fiktiven Spannungen, wogegen im Probeninneren die wahren Spannungswerte über den fiktiven liegen. Der Zusammenhang zwischen σ_R und σ_R^* und der Randdehnung ε_R wird Biegeverfestigungskurve genannt. Die 0,2%-Biegedehngrenze $\sigma_{b,0,2}^*$ wird als diejenige Spannung definiert, die zu einer plastischen Randdehnung von 0,2% führt.

Den fiktiven Spannungen $\sigma^*(z)$ können unter formaler Zugrundelegung des Hooke'schen Gesetzes fiktive elastische Dehnungen

$$\varepsilon_e^*(z) = \frac{\sigma^*(z)}{E} \quad (11)$$

zugeordnet werden. Bei der Entlastung des Biegestabes von $M_b > M_{ES}$ auf $M_b = 0$ tritt eine elastische Rückverformung auf, die der Belastung des Biegestabes mit dem Moment $-M_b$ entspricht. Nach dem Entlasten ergibt sich die in Abb. aufgezeichnete Spannungsverteilung $\sigma^{ES}(z)$, die sich aus der Differenz von wahrer und fiktiver Biegespannung

$$\sigma^{ES}(z) = \sigma(z) - \sigma^*(z) \quad (12)$$

berechnet. Die Spannungen $\sigma^{ES}(z)$ werden, da sie ohne äußere Krafteinwirkung existieren, Eigenspannungen genannt. Deutlich zu erkennen sind die in den zugbeanspruchten Randfasern des Biegestabes vorherrschenden Zugeigenspannungen und demgegenüber die Druckeigenspannungen in den druckbeanspruchten Randfasern auf der gegenüberliegenden Seite der Probe. Insgesamt entwickelt sich über der Biegehöhe eine Spannungsverteilung, die durch dreimaligen Vorzeichenwechsel charakterisiert ist (Abb. 7).

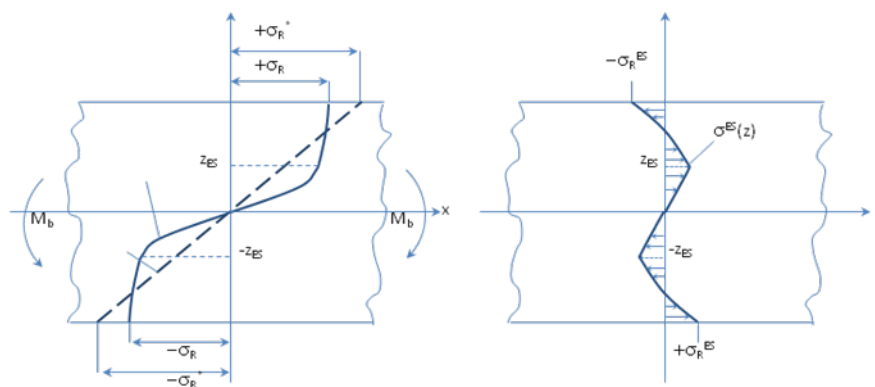


Abb. 7: Verteilung der wahren und fiktiven Biegespannungen bei Belastung mit M_b (links) sowie der Eigenspannungen nach Entlastung auf $M_b = 0$ (rechts) über der Höhe eines Biegestabes

3 Vorbereitungsaufgaben

- 1) Beschreiben Sie stichpunktartig die unterschiedlichen Struktur- und Bindungsarten in Metallen, Keramiken und Polymeren.
- 2) Worin liegen die Ursachen für die Verformbarkeit der Werkstoffe?
- 3) Diskutieren Sie an einem konkreten Beispiel (Werkstoff) das elastische und plastische Verhalten unter mechanischer Belastung.
- 4) Vergleichen Sie die Belastungsarten zwischen Zugversuch und Biegeversuch. Nennen Sie Kriterien, die für die Wahl der jeweiligen Prüfungsart entscheidend sind.
- 5) Welche Voraussetzungen müssen für einen normgerechten Biegeversuch vorliegen?
- 6) Worin liegen die prinzipiellen Unterschiede des 4-Punkt-Biegeversuches im Vergleich zum 3-Punkt-Biegeversuch?
- 7) Zeichnen Sie den Biegemomentenverlauf bei einer 3- und 4-Punkt-Biegebelastung auf und erläutern Sie typische Unterschiede.
- 8) Wie wirkt sich die Temperatur auf die unterschiedlichen Materialien während der mechanischen Belastung aus? Beschreiben Sie die Temperaturabhängigkeit metallischer Werkstoffe bei mechanischer Belastung.

4 Versuchsanordnung

Für diesen Praktikumsversuch steht die Universalprüfmaschine Z010 der Firma Zwick/Roell mit einer 3-Punkt-Biegevorrichtung (Abb. 8) zur Verfügung. Die Biegevorrichtung ist auf eine Stützweite von 40 mm voreingestellt. Innerhalb der Traverse ist eine Kraftmessdose mit einer Maximalkraft von 10 kN angebracht. Die Durchbiegung wird über einen Wegaufnehmer, der bei jeder Messung nach Erreichen einer definierten Vorkraft an die Unterseite der Probe angenähert wird. Während des Praktikums kommt die Software testXpert V9.01 der Fa. Zwick/Roell zum Einsatz.

Beachten Sie unbedingt die angebrachten Warn- und Sicherheitshinweise.



Abb. 8: Versuchsaufbau
3-Punkt-Biegung

5 Versuchsdurchführung

Das Praktikum findet im Arrheniusbau Raum 117 statt. Melden Sie sich vorab beim Praktikumsbetreuer. In Vorbereitung des Praktikums steht die Kenntnis über die theoretischen Grundlagen bei mechanischer Belastung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen. Nach dem Studium der vorliegenden Praktikumsanleitung, der Inbetriebnahme der Prüfanlage und einer Einweisung in die Prüfmaschine Zwick/Roell Z010 durch den Versuchsleiter wird eine Prüfvorschrift für einen 3-Punkt-Biegeversuch erstellt. Bereiten Sie die Prüfanweisung mit Hilfe der am Versuchsplatz ausliegenden Bedienvorschriften vor. Während des Versuches sind die Anweisungen des Versuchsleiters unbedingt einzuhalten!

Für die Durchführung der Biegefestigkeitsuntersuchung sind die Proben entsprechend der am Platz ausliegenden Anleitung in der Prüfmaschine zu positionieren. Für die einzelnen Werkstoffe kommt die vorab erstellte Prüfvorschrift zur Anwendung.

6 Praktikumsaufgaben und -auswertung

- 1) Indizieren Sie die vorliegenden Proben und dokumentieren Sie deren geometrische Abmessung.
- 2) Nehmen Sie die Kraft-Durchbiegungs-Kurven der vorliegenden Materialproben auf.
- 3) Beobachten und dokumentieren Sie die ablaufende Deformation der einzelnen Werkstoffe während des Biegeversuches.
- 4) Charakterisieren Sie den Verlauf der einzelnen Kraft-Durchbiegungs-Verläufe, worin bestehen mögliche Fehlerquellen?
- 5) Beschreiben Sie die Vorgänge in den unterschiedlichen Materialien bei Entlastung.
- 6) Fassen Sie Durchmesser, E-Modul, 0,1%- und 0,2%-Dehngrenze, Maximalspannung, Maximalkraft, Maximaldehnung der vorliegenden Proben in einer Tabelle zusammen und diskutieren Sie die Ergebnisse.
- 7) Vergleichen Sie die materialspezifischen Kenngrößen mit zugehörigen Literaturwerten.

Zur Nachbereitung des Praktikums sind die Vorbereitungsaufgaben, die Messprotokolle, sowie die Praktikumsaufgaben und –auswertungen schriftlich in Form eines Protokolls beim zuständigen Betreuer abzugeben.

LITERATUR

1. Schaaf, P.: *Vorlesung „Werkstoffe“*; Institut für Werkstofftechnik, TU Ilmenau, WS 2009/10
2. Schatt, Worch: *Werkstoffwissenschaft*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Dresden, 9. Auflage, 2003
3. Hornbogen, E.: *Werkstoffe – Aufbau und Eigenschaften*, Springer-Verlag, Berlin, 9. Auflage, 2008
4. Weißbach, W.: *Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften und Prüfung*, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 16. Auflage, 2007
5. Schumann, H.: *Metallographie*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 14. Auflage, 2005
6. Blumenauer, H.: *Werkstoffprüfung*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 6. Auflage, 1994
7. Macherauch, E.: *Praktikum in Werkstoffkunde*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 9. Auflage, 1990
8. Bleck, W.: *Werkstoffprüfung in Studium und Praxis*, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen, 12. Auflage, 1999
9. DIN EN ISO 7438: *Metallische Werkstoffe: Biegeversuch*
10. DIN EN 2002-6: *Luft- und Raumfahrt, Metallische Werkstoffe – Teil 6: Biegeversuch*
11. DIN EN 658-3: *Hochleistungskeramik: Mechanische Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur – Teil 3: Bestimmung der Biegefestigkeit*
12. DIN EN ISO 178: *Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*
13. DIN EN ISO 3327: *Hartmetalle – Bestimmung der Biegebruchfestigkeit*

ANSPRECHPARTNER / PRAKTIKUMSBETREUER

M. Sc. R. Albrecht
FG Metallische Werkstoffe und Verbundwerkstoffe
Tel.: 03677 – 69 1980
robert.albrecht@tu-ilmenau.de
Arrheniusbau – Raum 215