

Aus Kapitel 15: Werkstoffe

Aufgaben

15.1 Aufgaben zu Abschn. 15.1

15.1a Weshalb werden vom Automobilbau Gewichtserleichterungen gefordert? – geben Sie technische, gesellschaftliche bzw. gesetzliche Gründe an.

15.1b Identifizieren Sie Konstruktionswerkstoffe, die im 20. Jh. in wichtigen Lebensbereichen Innovationen ermöglichen:

- Bauwesen (z. B. für Wolkenkratzer)
- Wasserversorgung (z. B. für Pumpen und Rohrleitungen)
- Nahrungsmittelversorgung (z. B. für moderne Erntegeräte)
- Energieversorgung (z. B. für Windkraftanlagen)
- Medizintechnik (z. B. für Stents als Gefäßstützen)
- Transportwesen (z. B. für Flugzeuge)
- Sicherheit (z. B. kugelsichere Westen, Panzerungen)
- Kommunikation (z. B. Satelliten, Hochleistungskühlkörper)

15.1c Welches war der erste, industriell hergestellte Kunststoff und das erste Großserien-Al-Produkt und in welchem Jahrzehnt kamen diese auf den Markt?

15.1d Nennen Sie eine aktuelle, industriell hergestellte High-Tech-Keramik und einen Verbundwerkstoff.

15.1e Vervollständigen Sie die Entsprechungen in folgender Tabelle:

Gebrauchswert	Werkstoffkennwert
Steifigkeit	Elastizitätsmodul E
Traglast in Zugrichtung	
Witterungsbeständigkeit	
	Schmelztemperatur ($40\% T_s > 400^\circ\text{C}$)
	Ausdehnungskoeffizient (klein)

Ausführliche Lösung:

Zu 15.1a Leichtere Fahrzeuge verbrauchen weniger Treibstoff bzw. elektrischen Strom für gleiche Beschleunigungen; die ökologischen Auswirkungen werden vermindert, die Verbrauchs- und Abgasgrenzwerte bzw. den Strombedarf reduziert.

Zu 15.1b

- Bauwesen – mikrolegierte Stähle, Verbundglas
- Wasserversorgung – Cr-Stähle, Kunststoffe
- Nahrungsmittelversorgung – Hartmetallbeschichtungen
- Energieversorgung – Glasfaserverstärkte Epoxide
- Medizintechnik – Formgedächtnislegierungen
- Transportwesen – Aluminium-, Titanlegierungen
- Sicherheit – Kevlar-Textilien, Schichtverbunde
- Kommunikation – Metallmatrix-Verbundwerkstoffe

Zu 15.1c Elastomer aus vulkanisiertem Kautschuk (Goodyear 1839); Duroplast Bakelit (1905); Al-Teekesseln und Kochtöpfe von ALCOA (USA, um 1900)

Zu 15.1d Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC, polykristalliner Diamant u. a. Glasfaser verstärkte Kunststoffe (GFK, SMC), Kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe (CFK), SiC verstärkte Kontaktwerkstoffe u. a.

Zu 15.1e

Gebrauchswert	Werkstoffkennwert
Steifigkeit	Elastizitätsmodul E
Traglast in Zugrichtung	Dehngrenze $R_{p0,2}$, Streckgrenze R_e
Witterungsbeständigkeit	Korrosionsbeständigkeit ΔM_K in Einsatzumgebung
Temperaturbeständigkeit	Schmelztemperatur ($40\% T_s > 400^\circ\text{C}$)
Formstabilität	Ausdehnungskoeffizient (klein)

15.2 Aufgaben zu Abschn. 15.2

15.2a Was ist der Unterschied zwischen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden? Nennen Sie jeweils 2 Beispiele.

Bezeichnungsweise: Endlosfasern (continuous fibre reinforced polymers = CFRP) oder Kurzfasern in Polymermatrix (SMC = sheet molding compound; short fibre reinforced polymers = SFRP); particle reinforced metal (PRM)... (weitere siehe Abschn. 15.5)

15.2b Identifizieren Sie die Gruppen der Leicht- und Schwermetalle im Periodensystem der Elemente (siehe Abschn. 14.3, Abb. 14.10)

15.2c Wie hoch war 2015 die Jahresproduktionsmenge von rostfreien Stählen (Abb. 15.4)? Reichen Sie diese in die in Tab. 15.2 angeführten Werkstoffgruppen nach der Produktionsmenge und nach dem kg-Preis ein.

15.2d Welche Naturstoffe können als Verbundwerkstoffe bezeichnet werden? Welches sind ihre Bestandteile?

15.2e Nennen Sie Beispiele für Schichtverbunde und deren Herstellung.

15.2f Beschreiben Sie den Unterschied zwischen Duromeren und Thermoplasten.

15.2g Bei den Legierungen gibt es unterschiedliche Kurzbezeichnungen, die historisch entstanden sind und durch Normen geregelt wurden (siehe Tab. 15.3). Wie sind die DIN-Kurzbezeichnungen der Leichtmetalle zu lesen? Geben Sie je ein Beispiel für Aluminium-, Magnesium- und Titanlegierungen.

Al-Knetlegierungen werden nach ISO Norm mit dem Symbol AWxyyy bezeichnet (Leitziffer x gibt das Legierungssystem an: 1 (unlegiert), 2 (Cu legiert), 3 (Mn legiert), 5 (Mg legiert), 6 (Mg+Si legiert), 7 (Zn+Mg legiert), 8 (Sonderlegierung z. B. mit Li))

Al-Gusslegierungen werden mit den Buchstaben ACxyyy (Leitziffer x wie für Knetlegierungen, speziell 4 für Al+Si);

Die weiteren Ziffern yyy(y) sind historisch vergebene Nummern (siehe einschlägige Norm)

Mg-Legierungen verwenden eigene Elementabkürzungen (A = Al, Z = Zn, M = Mn) mit Gew.-%-Angaben in der Reihenfolge der Elemente.

Ti-Legierungen (Elemente mit Gew.-%-Angaben in verschiedenen Reihenfolgen), amerikanische Bezeichnungen sind „grade“

Ti2 = Grade 2 Ti mit 0,25 Gew.-% Fe; C, N, O je ca. 0,1 Gew.-% (höherfest als Reinst-Ti grade 1); TiAl6V4 = Ti Grade 5.

Ausführliche Lösung:

Zu 15.2a Verbundwerkstoffe: mind. eine separat hergestellte Phase ist in mind. eine zweite Phase (Matrix) eingebettet, wodurch sich ein neues Eigenschaftsprofil ergibt: mit geschnittenen Glasfasern verstärkte Polymermatrix (SMC, SFRP), kontinuierliche Kohlenstofffaser verstärkte Polymermatrix (CFRP); Oxidpartikel verstärkte Elektrodenwerkstoffe (PRM) ...

Werkstoffverbunde: mind. zwei separat hergestellte Rohbauteile aus verschiedenen Werkstoffen sind verbunden und ihre Eigenschaften werden zusammengesetzt: Sandwich mit Isolier- oder Versteifungsmaterial verklebt, Kabel aus Kupferlitzen in Kunststoffisolierung zusammengehalten, Zündkerze aus Elektroden in Keramikisolator eingepresst; Verbundbleche aus verschiedenen Blechen zusammengesgeschweißt.

Zu 15.2b Leichtmetalle ($\rho \leq 4,6 \text{ g/cm}^3$): Be, Mg, Al, Sc, Ti und Legierungen dieser Basiselemente

Schwermetalle alle von Co bis Pb (V, Mn, Cr sind Fe-ähnliche Elemente, hauptsächlich Legierungsbestandteile)

Zu 15.2c

$40 \cdot 10^6 \text{ t}$ Jahresproduktion (ca. 2,5 % der Stahlproduktion) zwischen Primär- und Sekundäraluminiumproduktionsmengen.

2010: 4–5 € (4 bis 5-fache Kilopreis von Baustahl, ähnlich Al-Legierungen)

Zu 15.2d Holz (Heteropolymer): Mikrofibrillen in Makrofibrillen aus Zellulose (Biopolymer) in Lignin, Proteinen etc.

Schalen von Krustentieren: Chitin in Proteinen und Calciumcarbonat bilden Exoskelette.

Knochen: Kalk- und Phosphatlamellen mit Kollagenfasern.

Zu 15.2e Schichten aus mehreren Werkstoffen: Sperrholz (verschieden orientierte Holzlamine verklebt), Sandwich-Strukturen (Isolierende Kunststoffe zwischen Blechen geklebt), Beschichtungen (Lackieren, Sprühabscheidungen), Explosionsverbindung von Blechen, chemische und physikalische Beschichtungen.

Zu 15.2f Duromer: stark quervernetzte Polymerketten, spröde, nicht verformbar, zersetzen sich bei erhöhter Temperatur, Einsatz unter der Glasübergangstemperatur.

Thermoplaste: Polymerketten oberhalb der Glasübergangstemperatur viskos und verformbar, amorphe Thermoplaste werden unterhalb der Glasübergangstemperatur eingesetzt, teilkristalline auch etwas darüber.

Zu 15.2g DIN-Kurzbezeichnung AlSi9Cu3(Fe) = EN-AC46000 = 226D: Al-Gusslegierung mit 9 Gew.-% Si, 3 Gew.-% Cu und max. 1 Gew.-% Fe.

AZ91: Mg mit 9 Gew.-% Al = A, 1 Gew.-% Zn = Z; AM30: Mg mit 3 % Al, Mn = M < 1 %.

TiAl6V4 = Ti6Al4V = T64 = Grade 5 Ti mit 6 Gew.-% Al und 4 % V.

15.3 Aufgaben zu Abschn. 15.3

15.3a Berechnen Sie die Jahresproduktionsmengen und die Marktvolumina mit den Angaben in Tab. 15.2 für folgende Produkte (€ als relative Währung zum Stahlpreis pro kg):

Produkt	Werkstoff	Gewicht	Serien- größe pro Jahr	Werkstoff- menge in t pro Jahr	Wirtschafts- vol. pro Jahr in €
PKW-Karosserie	Stahl	700 kg	1 Mio.	?	?
Luxus-Karosserie	Al-Leg.	700 kg	10.000	?	?
Flugzeug-rumpf	Al-Leg.	50 t	100	?	?
Heck-flügel	CFK	8 t	100	100 $\text{€}/\text{kg}$?
Flugzeug-teile	Ti-Leg.	5 t	100	70 $\text{€}/\text{kg}$?
Satellit	Keramik	1 t	10	500 $\text{€}/\text{kg}$?

15.3b Begründen Sie die unterschiedlichen Anforderungen an ein Stadtfahrrad und ein Mountainbike (siehe Verständnisfrage 15.1). Setzen Sie diese mit den in der Datenspinne für Fahrradrahmen (Beispiel „Mehrfache Werkstoffanforderungen“) und den in Tab. 15.5 angeführten Kennwerten in Beziehung. Wie unterscheiden sich die wesentlichen Kennwerte der Werkstoffe für die beiden Rahmenarten (Geben Sie die Kennwertsymbole an und welche größer oder kleiner sind für den Stadtfahrradrahmen aus Stahl gegenüber dem Al-Rahmen des Mountainbikes (konkrete Werte finden Sie in Tab. 15.16), berücksichtigen Sie auch die Biegeeigenschaften nach Kap. 14).

15.3c Erläutern Sie Ihren Werkstoffvorschlag der Verständnisfrage 15.1, indem Sie die eingegangenen Kompromisse bei der Kennwerteverteilung anführen und kommentieren.

15.3d Eine Instrumententafel aus Stahl steht im Wettbewerb mit einer aus einem Mg-Gussteil. Entnehmen Sie die relativen Preise aus Tab. 15.2 und errechnen Sie aus den Angaben die Stückkosten und die relative Gewichteinsparung, sowie die daraus resultierende Treibstoffeinsparung für die Fahrzeuglebensdauer von 300.000 km (100 kg brauchen ca. 0,51 Treibstoff $\cong 1\text{€}$ (Schätzwert für 2020) pro 100 km, entspricht 8 g CO_2 -Einsparung pro 100 km).

Werkstoff	Gewicht	Materialpreis (€)	Fertigungskosten pro Stück	Stückkosten (€) u. relativ	Gewichtsverhältnis (%)	Treibstoffanteil (€)
Stahl	15 kg	?	Ca. 2 h automat. stanzen, biegen, schweißen, ausrichten ... = 100 €	? € 100 %	Referenz 100 %	?
Mg-Legierung	10 kg	?	Ca. 1/2 h druckgießen, entgraten, nachbearbeiten ... = 30 €	?	?	?

15.3e Ein PKW „Fe“ mit 1500 kg dominant aus Fe-Werkstoffen kostet in der Anschaffung 23.700 € , während ein PKW „Al“ mit wesentlichem Leichtmetallanteil 1200 kg wiegt, aber 31.200 € kostet.

- Berechnen Sie die Treibstoffkosteneinsparung für 100 km Fahrweg mit dem Leichtmetall-PKW (siehe Angaben in Aufgabe 15.3d) und die CO_2 -Verminderung (2,5 kg CO_2 /l Treibstoff).
- Mit welchem km-Stand wird der „break even point“ (Kostengleichheit) erreicht? Wieviel Treibstoff und wieviel CO_2 -Emission würde bis zum „break even point“ gespart?
- Um wie viel verändert sich dieser Punkt, wenn die Entsorgungswerte berücksichtigt werden (durchschnittlicher Ertrag: 0,1 € pro kg „Fe“-PKW, 1 € pro kg „Al“-PKW)?
- Der Einsatz von 100 kg Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff (100 $\text{€}/\text{kg}$) statt 200 kg Leichtmetall im „Al“-PKW würde diesen um wie viel verteuern und den break even point im Vergleich zum „Al“-PKW wie weit verschieben?

15.3f Geben Sie in der Tabelle die wichtigsten Werkstoffkennwerte, die den für die Leitbeispielbauteile angeführten Anforderungen zugeordnet werden können (tragen Sie die Symbole gemäß Tab. 15.5 ein) und kreuzen Sie die Werkstoffgruppen bzw. -untergruppen an, zu denen für die angegebenen Bauteile geeignete Werkstoffbeispiele gehören. Ergänzen Sie die Tabelle der Gebrauchseigenschaften der Leitbeispiele „Antriebsstrang“ in Abschn. 15.3 für Automobilkarosserien.

Bauteil	Wichtige Kennwerte (Symbole)	Naturstoff	Verbundwerkst.	Werkstoffverb.	Fe-Basis	Nicht-Fe	Keramik	Polymer
Turboladerturbine	?							
Kurbelgehäuse	?							
Ölwanne	?							
Getriebezahnrad	?							
Selbsttragende Karosserie und Spaceframe-Struktur	?							

Zu 15.3a

Produkt	Werkstoff	Gewicht	Seriengröße pro Jahr	Werkstoffmenge in t pro Jahr	Wirtschaftsvol in € pro Jahr
PKW-Karosserie	Stahl	700 kg	1 Million	$7 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$
Luxus-Karosserie	Al-Leg.	700 kg	10.000	$7 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^7$
Flugzeugrumpf	Al-Leg.	50 t	100	$5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^7$
Heckflügel	CFK	8 t	100	800 (100 €/kg)	$8 \cdot 10^7$
Flugzeugteile	Ti-Leg.	5 t	100	500 (70 €/kg)	$3,5 \cdot 10^7$
Satellit	Keramik	1 t	10	10 (500 €/kg)	$5 \cdot 10^6$

Zu 15.3b

Eigenschaften	Stahlrahmen für Stadtfahrrad	Al-Rahmen für Mountainbike
Dichte	$\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$
Festigkeit	Dehngrenze $R_e = 400\text{--}600 \text{ MPa}$, spezifische Biegefestigkeit $R_{p0,2}/\rho^2 = 6,5\text{--}9,7 \text{ MPa/(g/cm}^3)^2$, Dauerfestigkeit $\sigma_D \cong 200 \text{ MPa}$	250–350 MPa R_m (Zug, Druck), $\lesssim 40 \text{ MPa/(g/cm}^3)^2$ (Biegung, Torsion), Zeitfestigkeit $\sigma_{NG} = 120 \text{ MPa}$
Zähigkeit	Bruchdehnung $A > 20 \%$, Bruchzähigkeit $K_{Ic} \cong 100 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$	$A \cong 10 \%$, $K_{Ic} \cong 50 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$
Steifigkeit	$E\text{-Modul} = 210 \text{ GPa}$, spezifische Biegesteifigkeit $E/\rho^2 = 3,4 \text{ GPa/(g/cm}^3)^2$	70 GPa, $9,6 \text{ GPa/(g/cm}^3)^2$
Korrosionsbeständigkeit	Masseverlust Δm_K gegenüber Salz, Kontakt	Δm_K (beständiger außer bei Kontaktkorrosion)
Formbarkeit	Gleichmaßdehnung $A_g > 10 \%$	weniger verformbar
Fügbareit, Bearbeitbarkeit	technologische Eigenschaften wegen Großserienproduktion wichtiger	schweißen schwieriger, Speziallösungen einsetzbar
Oberfläche	muss lackiert werden wegen Korrosionsanfälligkeit	lackierbar und anodisierbar
Rezyklierbarkeit	gut	gut (wertvoller)
Preis	1€	5–10-mal € wegen des Materialpreises und höherer Fertigungskosten

Zu 15.3c Stadtfahrrad soll robust und preisgünstig sein, Mountainbike soll besonders leicht, steif und bruchzäh sein, Preis von geringer Bedeutung.

Zu 15.3d

Werkstoff	Gewicht	Materialpreis in €	Fertigungskosten pro Stück	Stückkosten in € u. relativ	Gewichts-verhältnis in %	Treibstoffkosten-anteil für 300.000 km in €
Stahl	15 kg	15	Ca. 2 h automat. stanzen, biegen, schweißen, ausrichten, ... = 100 €	115 € , 100 %	Referenz 100 %	450
Mg-Legierung	10 kg	60	Ca. 1/2 h druckgießen, entgraten, nachbearbeiten, ... = 30 €	90, 78 %	66 %	300 (66 %)

Zu 15.3e $1,51 \cong 3 \text{ €}/100 \text{ km}$; $3,75 \text{ kg CO}_2/100 \text{ km}$

$7500 \text{ €}/3 \text{ €}/100 \text{ km} = 250.000 \text{ km}$;

$-37501 \cong -9375 \text{ kg CO}_2$

Entsorgungswertunterschied = $1050 \text{ €} \cong$ Treibstoff für $35.000 \text{ km} \rightarrow 215.000 \text{ km}$.

Mehrkosten $10.000 - 1000 = 9000 \text{ €} \cong 100 \text{ kg}$ Gewichts-einsparung ($0,51 \cong 1 \text{ €}$)/ $100 \text{ km} \rightarrow 900.000 \text{ km}$

Zu 15.3f

Bauteil	Wichtige Kennwerte (Symbole)	Naturstoff	Verbundwerkst.	Werkstoffverb.	Fe-Basis	Nicht-Fe	Keramik	Polymer
Turboladerturbine	$\rho, E(T), R(T), s_N(T)$					×	×	
Kurbelgehäuse	$\rho, \sigma(250^\circ\text{C}), \lambda, E, s_D, \eta$				×	×		
Ölwanne	$\rho, \eta, \Delta m_K$			×	×	×		×
Getriebezahnrad	$R, s_D, \mu, \rho, \eta, \Delta m_K$				×			
Karosserie(rahmen)	$\rho, E, s_D, \Delta m_K$				×	×		

Karosserie-varianten	Hauptfunktion	Seriengröße	Form	Maßhaltig-keit	Temperatur-belastung	Chem. Beständigkeit	Verschleiß-system	Werkstoff-lösung
Selbst-tragende Karosserie	Passagiere tragen und schützen,	groß	Schalenteile	mäßig	-40 bis $+100^\circ\text{C}$	Salzhaltige Luft und Wasser, Abgase	Sand, Steine, Wind	Stahlbleche
Spaceframe	Antriebsstrang tragen	mittel	Fachwerk-rahmen					Al-Profile, Al-Gussteile (+ Al-Bleche)

15.4 Aufgaben zu Abschn. 15.4

15.4a Der spezifische Elastizitätsmodul eines Werkstoffes ist der E -Modul dividiert durch die spezifische Masse ρ des Materials. Die Maßeinheit für E/ρ ergibt sich aus der direkten Division der Messgrößen zu $\text{GPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$. Rechnen Sie diese Maßeinheit um, indem Sie statt der Dichte das spezifische Gewicht einsetzen und sich eine einfache Längeneinheit ergibt. Wie groß ist der auf das spezifische Gewicht bezogene Elastizitätsmodul für einen hoch legierten Stahl ($E = 210 \text{ GPa}$, $\rho = 8 \text{ g}/\text{cm}^3$) und für Aluminium ($E = 70 \text{ GPa}$, $\rho = 2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$)? Was fällt Ihnen dabei auf?

15.4b Ein Glas mit $\alpha_{-30}^{+70} = 4 \text{ ppm}/\text{K}$ ist in einen quadratischen Aluminiumrahmen ($\alpha_{-30}^{+70} = 23 \text{ ppm}/\text{K}$) mit 1 m Seitenkante so eingespannt, dass die Passung bei -30°C bündig ist. Erhitzen sich die Scheibe und der Rahmen in der Sonne auf 70°C , wie viel Spielraum entsteht zwischen Rahmen und Glasscheibe?

15.4c Leiten Sie die thermische Volumenänderung eines Körpers $\Delta V/\Delta T$ von dem in den 3 Raumrichtungen istropen, linearen Ausdehnungskoeffizienten α ab.

15.4d Bei der Umwandlung des Ferrit in den Austenit verändert sich die Probenlänge um ca. 0,3 %. Um wie viele Prozent verändert sich das Probenvolumen?

15.4e Das gekühlte Kurbelgehäuse eines Motors aus Gusseisen ($\alpha_{90}^{390} = 10 \text{ ppm}/\text{K}$) wird im Inneren des Brennraums lokal auf 390°C erhitzt, bleibt aber in den Wänden der Kühlkanäle auf 90°C . Wie groß ist der dadurch entstehende, lineare Dehnungsunterschied zwischen Innenwand des Brennraums und des Kühlungskanals?

15.4f Ein 1 m langer Bimetallstreifen besteht aus Stahl mit $\alpha = 14 \text{ ppm}/\text{K}$ und einer INVAR Legierung (Ni-Fe) mit $\alpha = 2 \text{ ppm}/\text{K}$. Um wie viele mm verlängern sich die beiden Metallstreifen unabhängig von einander bei einer Temperaturänderung von 100°C ? Wie groß ist dabei der resultierende, relative Längenunterschied zwischen den beiden Metallstreifen? Was folgt daraus, wenn diese beiden Stäbe vor der Temperaturänderung vernietet wurden?

15.4g Ein Reineisenstab mit 100 mm Länge wird von Raumtemperatur (25°C) auf 1000°C aufgeheizt. Im krz Zustand gilt $\alpha_{\text{RT}}^{910}(\alpha) = 14 \text{ ppm}/\text{K}$ und im kfz Zustand $\alpha_{911}^{1000}(\gamma) = 22 \text{ ppm}/\text{K}$. Um wie viel verlängert sich der Stab bis 911°C , um wie viel verkürzt er sich bei der vollständigen Umwandlung in γ (siehe Abb. 15.11), und

um wie viel verlängert sich der umgewandelte Stab bis 1000°C ? Wie groß ist die gesamte, prozentuale Längenänderung des Stabes?

15.4h Schätzen Sie mit der in Abb. 15.8 angegebenen Mischungsregel für Gew.-% die Dichte folgender Legierungen ab:

- Intermetallische Phase TiAl und der Legierung Ti6Al4V ($\rho_{\text{Ti}} = 4,5 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{V}} = 6,1 \text{ g}/\text{cm}^3$). Weshalb differiert der berechnete Wert für TiAl von dem an den Legierung gemessenen Wert $\rho_{\text{TiAl}} = 3,8 \text{ g}/\text{cm}^3$ signifikant? Setzen Sie die Atomprozent ein.
- Austenitischer Stahl X6CrNiMo 17-12-2 (0,06 Gew.-% C vernachlässigen, $\rho_{\text{Cr}} = 7,14 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{Mo}} = 10,2 \text{ g}/\text{cm}^3$, ρ_{Fe} und ρ_{Ni} siehe Abb. 15.8). Vergleichen Sie diese Näherung mit dem Dichtewert der Legierung in Abb. 15.8.
- Schnellarbeitsstahl HS10-4-3-10 (Gew.-%-Angaben in der Reihenfolge W-Mo-V-Co mit $\rho_{\text{W}} = 19,3 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{Mo}} = 10,2 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{V}} = 6 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\rho_{\text{Co}} = 8,83 \text{ g}/\text{cm}^3$, Rest Eisen); Vergleichen Sie die Abschätzung mit dem Realwert $8,3 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Ausführliche Lösung:

Zu 15.4a 26,2 km; 25,9 km – fast gleich.

Zu 15.4b 1,9 mm

Zu 15.4c $V(T) = [l_0(1 + \alpha)]^3 \Delta T = |l_0^3 = V_0| \cong V_0(1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3) \Delta T \rightarrow \Delta V/\Delta T \cong 3\alpha$

Zu 15.4d 0,9 Vol.-%

Zu 15.4e $\Delta l = \alpha \Delta T = 0,3 \%$

Zu 15.4f $\Delta \text{Stahl} = 1,4 \text{ mm}$, $\Delta \text{INVAR} = 0,2 \text{ mm}$, Längendifferenz = $1,2 \text{ mm} = 0,12 \%$, Krümmung mit $\Delta r = 0,12 \%$ = Dicke der beiden Streifen.

Zu 15.4g

$l_{\alpha}(911^\circ\text{C}) = 100[1 + 886 \cdot \alpha_{\text{RT}}^{910}(\alpha)] = 101,24 \text{ mm};$

$l_{\gamma}(911^\circ\text{C}) = (1 - 0,3 \%)101,24 = 100,93 \text{ mm};$

$l_{\gamma}(1000^\circ\text{C}) = l_{\gamma}(911^\circ\text{C})[1 + 89\alpha_{911}^{1000}(\gamma)] = 101,13 \text{ mm} : 1,13 \%$

Zu 15.4h

3,6 ($\delta = -5\%$) wegen Phasenänderung zur Überstrukturphase AB (Abschn. 16.4) bzw. 4,46 ($\delta = +17\%$) g/cm^3 ;

7,93 g/cm^3 (real 8 g/cm^3 , $\delta = -1\%$);

9,17 g/cm^3 ($\delta = +10\%$) wegen martensitischem Grundgefüge mit Karbiden (Abschn. 16.6).

15.5 Aufgaben zu Abschn. 15.5

15.5a Ein Zugstab mit zylindrischer Prüflänge von 50 mm und dem Durchmesser von 10 mm wird mit einer Kraft von 78,5 kN gezogen (Werte aus Tab. 15.7; Berechnungen mit max. 3 signifikanten Stellen):

- Wie groß ist die mittlere Zugspannung in diesem Stab?
- Wie groß ist die elastische Dehnung dieses Stabes (absolut (μm) und relativ), wenn er aus Stahl ist, und wenn er aus Aluminium ist?
- Wie groß ist die Kontraktion des Durchmessers bei dieser Dehnung (absolut (μm) und relativ) und um wie viel verändert sich das Probenvolumen für beide Metalle? Hätte das Material dieses Zugstabes die Poisson-Zahl $\nu = 0,5$ bei einem E -Modul von 210 GPa, was bedeutet dies hinsichtlich des Probenvolumens und wie groß wäre die Querkontraktion?
- Wie groß ist die elastische Energiedichte für Stahl und Aluminium bei dieser Spannung?

15.5b Berechnen Sie den Schubmodul für folgende Werkstoffe:

- Silikatglas ($E = 72 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$, $R_m = 300 \text{ MPa}$), Magnesium ($E = 45 \text{ GPa}$, $\nu = 0,35$, $R_p = 100 \text{ MPa}$), Kupfer ($E = 120 \text{ GPa}$, $\nu = 0,34$, $R_p = 31 \text{ MPa}$), Titan ($E = 115 \text{ GPa}$, $\nu = 0,33$, $R_p = 50 \text{ MPa}$).
- Berechne den Scherwinkel (siehe Abb. 15.12b, (15.4)) dieser Werkstoffe bei Einwirkung einer Scherkraft von 10 kN entlang einer Fläche von 1 cm^2 .
- Berechne die elastische Energiedichte dieser Werkstoffe bei dieser Scherspannung (siehe (15.9)).

15.5c Eine Biegeprobe aus Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff mit den Abmessungen $l_s = 50 \text{ mm}$, $B = 5 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$ wird geprüft, um den E -Modul zu bestimmen:

- Im 3-Punktbiegeversuch (15.7) biegt sie sich in der Mitte um 1 mm durch, wenn sie nach einer Vorlast mit zusätzlich 20 N belastet wird.
- Wie groß wäre die Durchbiegung dieser Probe im 4-Punktbiegeversuche mit $l_s/4$ Prüfbedingung (15.6), wenn der Druckstempel mit $2 \times 20 \text{ N}$ belastet wird?

15.5d Berechne die spezifischen E -Moduln und die spezifischen Biegesteifigkeiten für Biegebalken mit rechteckigem Querschnitt ($\sqrt{E/\rho}$, siehe Abschn. 14.4 für die

Werkstoffe in Aufgabe 15.5b), wobei folgende Dichtewerte eingesetzt werden: Silikatglas ($\rho = 2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$), Magnesium ($\rho = 1,7 \text{ g}/\text{cm}^3$), Kupfer ($\rho = 8,9 \text{ g}/\text{cm}^3$), Titan ($\rho = 4,5 \text{ g}/\text{cm}^3$);

Berechne den E -Modul mit Hilfe von (15.12), den spezifischen E -Modul und die spezifische Biegesteifigkeit für einen Polyurethan-Hartschaum mit $\rho = 0,06 \text{ g}/\text{cm}^3$ (Polyurethan $E = 2 \text{ GPa}$, $\rho = 1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$), das entspricht wieviel Porosität?) und für zelluläres Aluminium mit 90 % Porosität ($E = 70 \text{ GPa}$, $\rho = 2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$ des Al der Zellwand).

- Vergleiche die berechneten Werte mit den spezifischen Biegesteifigkeiten für die Werkstoffe der Leitbeispiele in Tab. 15.7 und reihe sie.

15.5e Berechne mit den Angaben in Tab. 15.7 und 15.8 die E -Moduln längs mit (15.10) und quer mit (15.11) folgender Verbundwerkstoffe:

- Endlosfaserverbundwerkstoffe: PA66/Aramid/50f-UD, Epoxy/C-HT/65f-UD, Epoxy/S-Glas/60f-UD, Epoxy/C-HT/60f-0°50%/90°50% (Berechne die E -Moduln der Faserlagen längs und quer separat und kombiniere die beiden Ergebnisse, vergleiche mit Tab. 15.10), Al/C-HM/70f-UD, Al/Al₂O₃-N610/60f-UD, Ti/SiC/30m-UD.
- Teilchenverstärkte Verbundwerkstoffe: Berechne den E -Modul für PA66/Al₂O₃/20p und AW6061/Al₂O₃/20p (Daten gemäß Tab. 15.8).
- Berechne die Massendichten dieser Verbundwerkstoffe.
- Berechnen Sie die spezifischen E -Moduln und die spezifischen Biegesteifigkeiten für Balken aus diesen Werkstoffen. Reihe sie und vergleiche sie mit den monolithischen Werkstoffen der Aufgabe 15.5d.

Ausführliche Lösung:

Zu 15.5a 100 MPa; Stahl: 23,8 μm , 0,048 %; Al: 71,4 μm , 0,143 %;

Stahl: -1,4 μm , -0,014 %, +0,02 %; Al: -4,6 μm , -0,046 %, +0,05 %;

Probenvolumen konstant, -2,4 μm , -0,024 %;

Stahl: 23,8 kJ/m^3 , Al: 71,4 kJ/m^3

Zu 15.5b Silikatglas 30 GPa, Mg 16,7 GPa, Cu 44,7 GPa, Ti 43,2 GPa;

$\tau = 0,1 \text{ GPa}$: Silikatglas 0,003 rad, Mg 0,006 rad, Cu 0,002 rad, Ti 0,002 rad;

Silikatglas 167 kJ/m^3 , Mg 300 kJ/m^3 , Cu 112 kJ/m^3 , Ti 116 kJ/m^3 ;

Zu 15.5c 125 GPa; 0,375 mm.

Zu 15.5d E/ρ : (1) Si_3N_4 , (2) Glas: 28,8; (2) Mg: 26,5 wie Al und Stahl; (3) Ti: 25,6 wie IN718; (4) Cu: 13,5; (5) PA66; (6) PU: 1,7 GPa/g/cm³.

$\sqrt{E/\rho}$: (1) Si_3N_4 , (2) Glas, Mg: 3,4; (3) Al-Legierungen, (4) Ti: 2,4; (5) Stähle, (6) PA66, (7) Cu, PU: 1,2 $\sqrt{\text{kN/mm/g/cm}^3}$;

PU-Hartschaum (95 % Porosität): $E = 5 \text{ MPa}$, $E/\rho = 83 \text{ MPa/g/cm}^3$, $\sqrt{E/\rho} = 37 \sqrt{\text{N/mm/g/cm}^3}$; Zellulares Al: $E = 0,7 \text{ GPa}$, $E/\rho = 2592 \text{ MPa/g/cm}^3$, $\sqrt{E/\rho} = 98 \sqrt{\text{N/mm/g/cm}^3}$;

Zu 15.5e

Verbundwerkstoff	E^{\parallel} in GPa (Reihung)	E^{\perp} in GPa	ρ in g/cm ³	E^{\parallel}/ρ in GPa pro g/cm ³	$\sqrt{E^{\parallel}/\rho}$ in $\sqrt{\text{kN/mm pro g/cm}^3}$
PA66/Aramid/50f-UD	(7) 61	3	1,28	(5) 48	(3) 6,1
Epoxy/C-HT/65f-UD	(4) 150	6	1,61	(2) 93	(1) 7,6
Epoxy/S-Glas/60f-HAT	(8) 49	7	2,0	(8) 25	(6) 3,5
EP/C-HAT/60f-0°/50°/90°50%	(6) 73	73	1,58	(6) 46	(4) 5,4
Al/C-HM/70f-UD	(2) 231	14	2,43	(1) 95	(2) 6,3
Al/Al ₂ O ₃ -N610/60f-UD	(1) 256	120	3,48	(3) 74	(5) 4,6
Ti/SiC/30m-UD	(3) 200	128	4,1	(4) 49	(7) 3,4
PA66/Al ₂ O ₃ /20p	(9) 2,5		1,68	(9) 1,5	(9) 0,9
AW6061/Al ₂ O ₃ /20p	(5) 84		2,96	(7) 28	(8) 3,1

15.6 Aufgaben zu Abschn. 15.6

15.6a Ein Zugstab aus einem warm gewalzten Stahlblech X70 liefert die blaue Spannungs-Dehnungskurve in Abb. 15.33. Lesen Sie aus der Kurve folgende Kennwerte ab:

- die obere Streckgrenze R_{eH} ;
- den Elastizitätsmodul;
- die untere Streckgrenze R_{eL} und die bleibende Lüdersdehnung;
- die Zugfestigkeit R_m und die zugehörigen Gleichmaßdehnungen A_{gt} , A_g (geben Sie einen Fehlerbereich an);

Die rote Kurve in Abb. 15.33 zeigt das Ergebnis eines Zugversuches mit dem gleichen Blech, aber nach einer 2%-igen Vorverformung. Schätzen Sie daraus folgende Kennwerte:

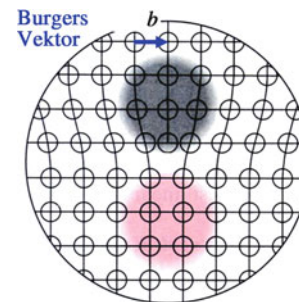
- Wie groß war die Rückfederung bei der Entlastung auf 2%?

- Wie groß war dabei die frei werdende, elastische Energiedichte?
- die $R_{p0,2}$ -Dehngrenze (geben Sie auch einen Bereich für den Ablesefehler an);
- die Zugfestigkeit R_m und die zugehörigen Gleichmaßdehnungen A_{gt} , A_g (mit Fehlerbereich); Fassen Sie die wesentlichen Unterschiede dieser beiden Zugversuche zusammen.

15.6b Lesen Sie folgende mechanische Kennwerte der PP-Folie aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm in der Abb. 15.34 ab und schätzen Sie die zugehörigen Messfehler:

- Die Werte der oberen und unteren Streckgrenzen und die zugehörigen totalen Dehnungen.
- Tragen Sie die Hooke'sche Gerade für $E = 1 \text{ GPa}$ in die Detaildarstellung ein und lesen Sie den elastischen und den plastischen Dehnungsanteil bei der oberen Streckgrenze ab.
- Wie groß sind die Reißfestigkeit und die Reißdehnung?

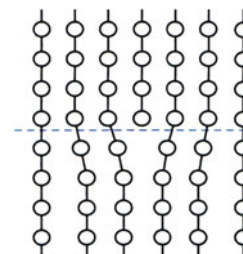
15.6c



Die Skizze zeigt schematisch einen Querschnitt einer Stufenversetzung. Tragen Sie die energetisch günstigen Positionen für Fremdatome ein (siehe Abb. 15.28):

- größeres Substitutionselement,
- kleineres Substitutionselement,
- Zwischengitteratom;
- wo herrschen Druck- und Zugspannungen um die Versetzung?

15.6d Zeichnen Sie entsprechend der Skizze einer Stufenversetzung deren schrittweise Gleitbewegung bis zur plastischen Verformung für die beiden Fälle horizontal wirkender Schubspannungen von links und rechts:



15.6e Vergleichen Sie die Festigkeitssteigerungen durch folgende Verfestigungsmechanismen (siehe Tab. 15.11), indem Sie angeben, um wie viel sich der Abstand l der Gleithindernisse und die kritische Schubspannung dadurch ändern:

- Die Konzentration eines gelösten Legierungselementes wird 4-fache erhöht;
- Die Versetzungsdichte wird durch Kaltverformung um den Faktor 25 erhöht;
- Der Volumenanteil schneidbarer Ausscheidungen wird verdoppelt und deren Durchmesser halbiert;
- Der Volumenanteil von Dispersoiden wird verdoppelt und deren Durchmesser halbiert;
- Die Korngröße wird von einem mittleren Durchmesser von $100\text{ }\mu\text{m}$ (ASTM 4) auf $25\text{ }\mu\text{m}$ (ASTM 8) reduziert und dann weiter auf $1\text{ }\mu\text{m}$.

15.6f Ein polykristalliner Stahl besitzt eine obere Streckgrenze von 525 MPa . Wie groß ist die mittlere kritische Schubspannung?

15.6g Berechnen Sie den Bauschinger-Effekt für 2% Stauchverformung $BE^{2\%}$ aus den Zugversuchskurven der Abb. 15.33 gemäß (15.15).

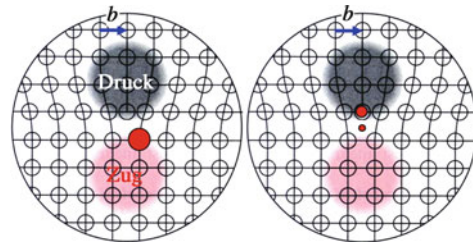
15.6h Vergleichen Sie die spezifischen Festigkeitswerte ($\text{MPa cm}^3/\text{g}$) und Elastizitätsmoduli ($\text{GPa cm}^3/\text{g}$) der Werkstoffe aus Tab. 15.7, indem Sie diese Werte in Abb. 15.36 eintragen.

Ausführliche Lösung:

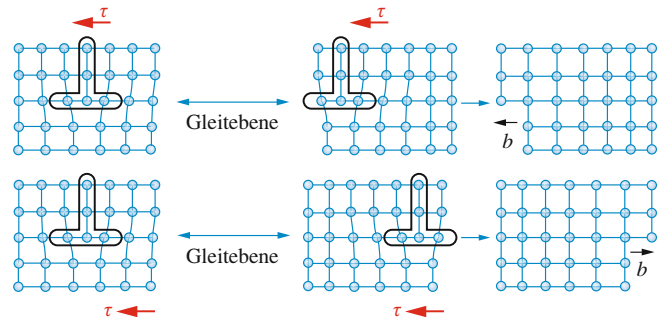
Zu 15.6a 530 MPa , 200 GPa ; 480 MPa , $1,8\%$; 560 MPa , $11 \pm 1\%$, $10,5 \pm 1\%$; $0,2\%$, 500 kJ/m^3 , $300 \pm 20\text{ MPa}$, 550 MPa , $12,5 \pm 1\%$, $12 \pm 1\%$; Nach der Stauchung keine Streckgrenze, daher wesentlich geringere Elastizitätsgrenze, etwas duktiler.

Zu 15.6b $23,5\text{ MPa} \pm 2\%$, $15 \pm 2\%$; $17\text{ MPa} \pm 3\%$, $40 \pm 5\%$; $2,3 \pm 0,1\%$, $12,7 \pm 2\%$; $43 \pm 1\text{ MPa}$, 1250%

Zu 15.6c



Zu 15.6d

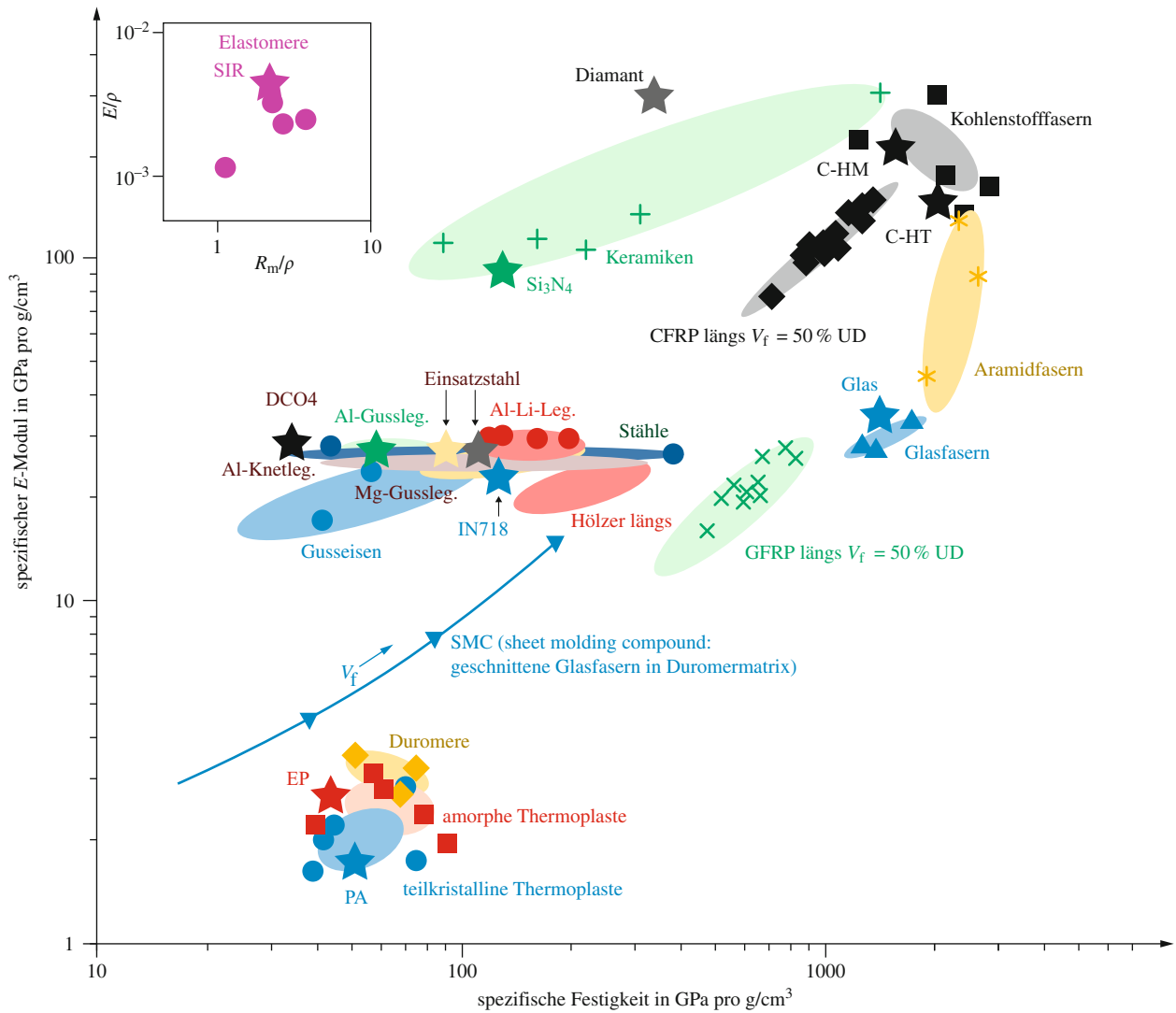


Zu 15.6e $1/2$, $2\Delta\tau_c$; $1/5$, $5\Delta\tau_v$; $1/2$, $\Delta\tau_A$ gleich; $1/2$, $2\Delta\tau_D$; $1/4$, $2\Delta\tau_K$; $1/100$, $10\Delta\tau_K$

Zu 15.6f 175 MPa

Zu 15.6g -35%

Zu 15.6h



15.7 Aufgaben zu Abschn. 15.7

15.7a Was bedeuten die folgenden Härtemessangaben für einige Werkstoffbeispiele aus Tab. 15.3?

Erstellen Sie ein Diagramm der Härtewerte (unabhängig von der Messmethode, ohne die Mikrohärtewerte; analog zum Diagramm für die Werkstoffe für die Leitbeispiele: „Härtewerte der Werkstoffe der ausgewählten Bauteile“ in Abschn. 15.7 in Abhängigkeit der Elastizitätsgrenzen (siehe Tab. 15.7).

Werkstoff	Härte- angabe	Härte- wert	Me- thode	Prüf- kraft in kp	Kraft in MPa	Ein- wirk- dauer
Feinblech	120 HBW2,5/ 187,5	?	?	?	?	?
DC04	130 HV50/ 30	?	?	?	?	?
AW6082T6	95 HRB2,5/ 62,5	?	?	?	?	?
	100 HV5	?	?	?	?	?
Einsatz- stahl	62 HRC	?	?	?	?	?
Messing $R_{p0,2} =$ 120 MPa	75 HRB $\beta:130, \alpha:100$ HV0,05	?	?	?	?	?
Si_3N_4	20 GPa HV10	?	?	?	?	?
X5CrNi18- 10	600 HL	?	?	?	?	?
Epoxy	70 HSD	?	?	?	?	?

15.7b Rechnen Sie die Brinell- und die Vickers-Härtewerten der Aufgabe 15.7a von kp/mm^2 in N/mm^2 (MPa) um.

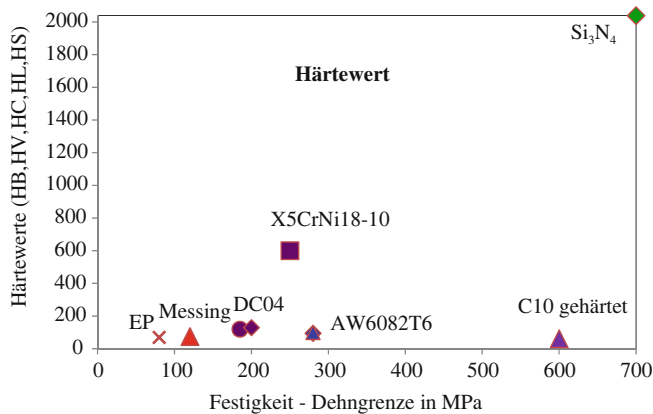
Die Eindringtiefdifferenz der Diamantspitze in dem in Aufgabe 15.7a angeführten Einsatzstahl betrug wie viele μm bei einer Zusatzlast von 140 kp?

Wie groß ist die Eindringtiefe der HRB-Messung in der Messingprobe?

Ausführliche Lösung:

Zu 15.7a

Werkstoff	Härteangabe	Härtewert	Methode	Prüfkraft	Kraft in N	Härte in MPa	Einwirkdauer
Feinblech	120 HBW2,5/187,5	120	Brinell Ø2,5mm	187,5 kp	1839	1177	10–15 s
	130 HV50/30	130	Vickers	50 kp	490	1275	10–15 s
AW6082T6	95 HRB2,5/62,5	95	Brinell Ø2,5mm	62,5 kp	613	931	10–180 s
	100 HV5	100	Vickers	5 kp	49	981	10–15 s
Einsatzstahl	62 HRC	62	Rockwell C: Kegel	150 kp	1470	608	2–3 s
Messing	75 HRB	75	Rockwell B: Kugel	100 kp	980	735	3–6 s
	β : 130, α : 100 HV0,05	130/100	Vickers Kleinkraft	0,05 kp	0,49	1158/981	
Si ₃ N ₄	2039 HV10	2039	Vickers	10 kp	98	20.000	2–3 s
X5CrNi18-10	600 HL	600	Leeb	1000 · v_R/v_0			–
Epoxy	70 HSD	70	Shore D	5,1 kp	50	687	15 s



Zu 15.7b siehe Tabelle der Lösung 15.7a; 76 μm ; 50 μm

15.8 Aufgaben zu Abschn. 15.8

15.8a Lesen Sie aus Abb. 15.33 näherungsweise folgende Werte ab:

- R_{eH} der Zugverformung und der Stauchverformung, bestimmen Sie die Spannungsdifferenz-Effekt $R_{eH}(\text{Druck})/R_{eH}(\text{Zug})$;
- R_m und A_g ,
- σ_w und den zugehörigen ε_w -Wert beim Considère Kriterium.
- Errechnen Sie näherungsweise die spezifische Formänderungsarbeit in Zug und Druck nach (15.19),
- sowie die gesamte Verformungsenergiedichte bis Bruch im Zugversuch nach (15.20).
- Wie groß ist das Streckgrenzenverhältnis?

15.8b Im Bereich der Gleichmaßdehnung beträgt die technische Dehnung einer Al-Knetlegierung 10% bei 270 MPa technischer Spannung. Wie groß sind die entsprechenden wahren Dehnungs- und Spannungswerte nach (15.16) und (15.17)?

Berechnen Sie für die gleichen Beträge der technischen Stauchung und Stauchspannung die wahren Dehnungs- und Spannungswerte.

15.8c Die Rundprobe mit $l_0 = 70 \text{ mm}$ (siehe Abb. 15.55a) erreicht eine Bruchdehnung von 30%. Wie lang ist die Messlänge über die beiden Probenhälften zusammen in mm nach dem Bruch?

Die Messlänge der zusammengefügtten Probenhälften einer anderen gebrochenen Probe der gleichen Ausgangsgeometrie beträgt 84 mm. Wie groß ist die Bruchdehnung?

Wie lang muss die Messlänge einer Probe nach Abb. 15.55b sein, wenn der Probenquerschnitt $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ist?

15.8d Wie groß ist die maximale Kraft bezogen auf den Anfangsquerschnitt ($5 \times 10 \text{ mm}^2$) einer Stahlzugprobe, wenn die Zugfestigkeit 360 MPa beträgt?

- Nach überschreiten der Zugfestigkeit bricht die Zugprobe bei 300 MPa, wobei die Bruchdehnung $z = 50\%$ beträgt. Wie groß ist die wahre Bruchspannung?
- Um wie viel verminderte sich die Breite des Probenquerschnitts, wenn die Dicke auf 4 mm reduziert wurde? Wie groß ist der zugehörige r -Wert (siehe Bonusmaterial: Verformungsanisotropie, Gleichung (30.85))?

15.8e Eine zylindrische Stauchprobe wird gleichförmig verformt. Wie groß ist relative Durchmesseränderung bei 10% technischer Stauchung?

15.8f Für Flachzugproben (Ausgangsquerschnitt $10 \times 4 \text{ mm}$) aus Stahl ($R_{p0,2} = 200 \text{ MPa}$, $n = 0,15$) und einer Al-Legierung ($R_{p0,2} = 200 \text{ MPa}$, $n = 0,2$) kann die Verfestigung ab der 0,2%-Dehngrenze mittels dem Potenzgesetz nach Ludwik simuliert werden. Verwenden Sie die Beziehung für die Fließkurve $\ln k_f \cong n \ln \varphi + \ln R_p$.

Um wie viel verfestigen die beiden Proben bis 20% Dehnung aufgrund der angegebenen Kennwerte?

15.8g Vergleichen Sie die spezifische, elastische Energiedichte (kJ/m^3) nach (15.8) und die Rückfederungsdehnung (%) eines Zugstabes bei Zugfestigkeit (maximale spezifische Rückfederungsenergie bzw. maximale elastische Kontraktion) für folgende Werkstoffe (entnehmen Sie die E -Moduln und Festigkeiten (soweit hier nicht angegeben) der Tab. 15.6 und 15.7):

- Silikonkautschuk;
- Epoxy;
- Al-Knetlegierung AW6082T6 ($R_m = 350 \text{ MPa}$);
- Karosserie-Stahlblech ($R_m = 350 \text{ MPa}$);
- Korrosionsbeständiger, austenitischer Stahl ($R_m = 600 \text{ MPa}$);
- Thermomechanisch gewalzter Stahl-TMS ($R_m = 1100 \text{ MPa}$);
- Dualphasenstahl-DP ($R_m = 660 \text{ MPa}$);
- Messing CuZn30 gewalzt ($R_m = 500 \text{ MPa}$);
- Siliziumnitrid (Festigkeitsmodul $\sigma_0 = 660 \text{ MPa}$, $E = 310 \text{ GPa}$);

Tragen Sie diese Ergebnisse in ein Koordinatensystem elastische Energiedichte über Festigkeit, und in anderes mit der elastischen Kontraktion über dem E -Modul ein.

15.8h Vergleichen Sie die spezifische, plastische Verformungsenergie für den gesamten Dehnungsbereich (Zähigkeit) nach dem Produkt $A_{80} \cdot R_m$ der in Abb. 15.56 eingetragenen Werkstoffe (lesen Sie Mittelwerte ab). Tragen Sie die Ergebnisse in ein Koordinatensystem Zähigkeit über Festigkeit ein.

15.8i Wie groß ist die relative Verfestigung der verformten Messingknetlegierung gegenüber ihrem unverformten (= weich geglühtem) Zustand gemäß Abb. 15.54 (Vergleich der Mittelwerte)?

Wie groß ist die relative Duktilitätsabnahme dabei?

Ausführliche Lösung:

Zu 15.8a 520 MPa, -500 MPa, -96 %; 550 MPa, 11 %; 630 MPa, $n = 0,11$; $0,11 \cdot 1070/2 = 58,9 \text{ kJ/m}^3$, $0,085 \cdot 1200/2 = 51 \text{ kJ/m}^3$; 235 kJ/m^3 ; 0,95

Zu 15.8b 9,5 %, 297 MPa; $\ln 0,9 = -10,5 \%$, 243 MPa

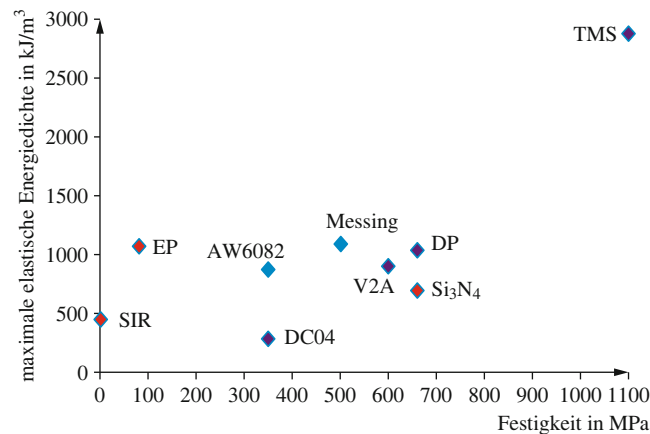
Zu 15.8c 91 mm, 20 %; 40 mm;

Zu 15.8d 18 kN; 400 MPa; 6,25 mm, 1,88.

Zu 15.8e +5,4 %

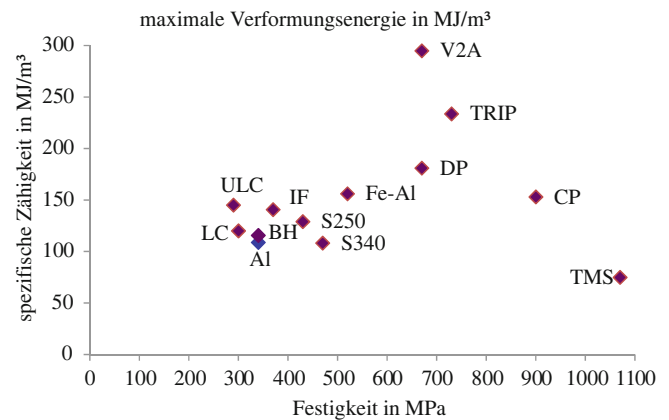
Zu 15.8f Stahl: 205,5 MPa; Al: 207,4 MPa

Zu 15.8g SIR: 450 kJ/m^3 , 30 %; EP: 1070 kJ/m^3 , 1 %; AW6082T6: 875 kJ/m^3 , 0,5 %; DC04: 290 kJ/m^3 , 0,2 %; V2A: 900 kJ/m^2 , 0,3 %; TMS: 2880 kJ/m^3 , 0,5 %; DP: 1040 kJ/m^3 , 0,3 %; CuZn30: 1100 kJ/m^3 , 0,4 %; Si_3N_4 : 700 kJ/m^3 , 0,2 %.



Zu 15.8h

Werkstoffe	Festigkeit in MPa	Bruchdehnung	Verformungsenergie in MJ/m³
AL-Bleche	340	0,32	109
ZStE250	430	0,3	129
ZStE340	470	0,23	108
IF	370	0,38	141
BH	340	0,34	116
LC	300	0,4	120
ULC	300	0,5	120
Fe-Al	520	0,3	156
V2A	670	0,44	295
DP	670	0,27	181
TRIP	730	0,32	234
CP	900	0,17	153
TMS	1070	0,07	75



Zu 15.8i $\Delta R_p = 330 \text{ MPa} \cong +275 \%$, $\Delta A = 0,20 \cong -66 \%$

15.9 Aufgaben zu Abschn. 15.9

15.9a Ein Aluminiumoxideinschluss mit $5 \mu\text{m}$ Ausdehnung in der Belastungsrichtung einer Aluminium-Knetlegierung wird wie die Al-Matrix, in der dieser eingebettet ist, mit 100 MPa gedehnt. Wie groß ist die Differenz der elastischen Dehnung zwischen dem Einschluss und der über die gleiche Länge angrenzenden Al-Legierung (entnehmen Sie die E -Moduln der Tab. 15.6)?

- Wo können Versetzungsstaus bei plastischer Verformung auftreten?
Nehmen Sie an, dass jede Versetzung am Rande eines Kornes eine Stufe von $0,1 \text{ nm}$ erzeugt. 1000 Versetzungen verformen diese Grenze plastisch. In welcher Größenordnung kann eine Pore daraus entstehen?
- Wie tief kann ein Grübchen in der Bruchfläche obiger Al-Knetlegierung in etwa werden, wenn der Aluminiumoxideinschluss beim Bruch herausgezogen wird?

15.9b Erklären Sie die Unterschiede zwischen den Bruchmechanismen: Spaltbruch, duktiler Bruch mit und ohne Einschnürung, Scherbruch eines polykristallinen Metalls.

15.9c Erklären Sie die Werkstoffeigenschaften: Elastizität, Duktilität, Zähigkeit, Bruchzähigkeit, Kerbschlagarbeit.

Welche Werkstoffgruppen weisen in der Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagarbeit Tieflage, Übergangsreich und Hochlage auf? Welche nur Hochlage?

15.9d Welche Zähigkeitsbedingung müssen die Stähle S235KR und S235J0 erfüllen?

15.9e Wenn die Bruchzähigkeit dieses unverformten Bleches (Abb. 15.33) $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ beträgt, wie groß ist die kritische Risslänge?

In welchem Dickenbereich muss dieses Blech gewählt werden, wenn es für ein mit 10 MPa Druck beaufschlagtes Rohr mit $1,2 \text{ m}$ Durchmesser eingesetzt werden soll, wobei es die Kriterien „Leck vor Bruch“ im elastischen Bereich erfüllen soll?

15.9f Erstellen Sie das Diagramm für maximale statische Zugbelastung σ über Risslänge für den Stahl der Abb. 15.33 ($K_{Ic} = 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) und das Polypropylen der Abb. 15.34 ($K_{Ic} = 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) analog zu Abb. 15.74.

15.9g Welche der in Abb. 15.64 eingetragenen Werkstoffe haben $K_{Ic} > 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$?

Wo befindet sich die Linie $G_c = 10 \text{ kJ/m}^2$? Welche Werkstoffe haben diese kritische Energiefreisetzungsrate in Abb. 15.64?

Was ist der Unterschied in der Zähigkeit von Mg-, Al-Legierungen und Vergütungsstählen?

15.9h Zeichnen Sie in einem Diagramm die Spannung über den Abstand $r > 0,1 \text{ mm}$ von der Spitze eines Risses $a = 5 \text{ mm}$ für eine Riss öffnende, äußere Zugspannung von $\sigma_a = 100 \text{ MPa}$ nach der Beziehung $\sigma(r) = \sigma_a \left(1 + \sqrt{\frac{a}{2r}}\right)$

15.9i Ein unidirektional mit Glasfasern verstärktes Epoxy enthält einen 5 mm großen Riss wie in Aufgabe 15.9h. Die Haftung der Glasfasern in Richtung der angelegten Spannung kann im Riss der Epoxy-Matrix 50 MPa tragen. Um wie viel wird die in Aufgabe 15.9h berechnete Spannung an der Risspitze dadurch reduziert?

Ausführliche Lösung:

Zu 15.9a Al_2O_3 : $(3 - 5) \cdot 10^{-4} \Rightarrow 1,5\text{-}2,5 \text{ nm}$; Al: $17 \cdot 10^{-4} \Rightarrow 8,5 \text{ nm}$; $\Delta = 6 - 7 \text{ nm}$; 100 nm Versetzungen nahe der Phasengrenze; mindestens einige μm .

Zu 15.9b Bei Spaltbruch werden die Bindungen zwischen Atomen/Molekülen durch Spannungskonzentration aufgebrochen, während die globale Spannung unterhalb der Elastizitätsgrenze liegt. Duktiler Bruch erfolgt durch plastische Verformung (Versetzungsbewegung) und ist meist mit Einschnürung verbunden. Mikroduktiler Korngrenzenbruch kann ohne Einschnürung erfolgen, was zu Sprödbbruch führt. Duktiler Bruch kann an inneren Defekten über Porenbildung erfolgen oder ohne Porenbildung durch Abscherung (unzählige Gleitvorgänge) quer durch das Werkstück erfolgen.

Zu 15.9c Elastizität = reversible Verformung, die bei Wegfall der Belastung wieder verschwindet;

Duktilität = (bleibende) plastische Verformung ohne Materialschädigung (-schwächung);

Zähigkeit = Energieaufnahme des Werkstoffes bis zum Bruch;

Bruchzähigkeit = kritische Spannungsintensitätsfaktor, der bei elastischer Belastung an einer kritischen Risslänge zu Spaltbruch führt;

Kerbschlagarbeit = Energieaufnahme einer gekerbten Proben bis zum Bruch durch einen Kerbschlaghammer.

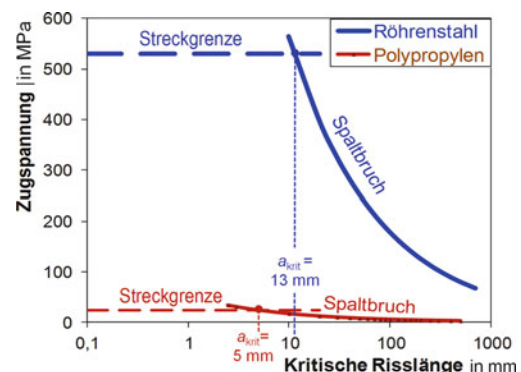
Tief- und Hochlage weisen krz, hdp Metalle, intermetallische Phasen, Thermoplaste und Elastomere auf; immer in Hochlage befinden sich kfz Metalle.

Zu 15.9d ... KR = Kerbschlagarbeit $A_V \geq 40 \text{ J}$ bei Raumtemperatur;

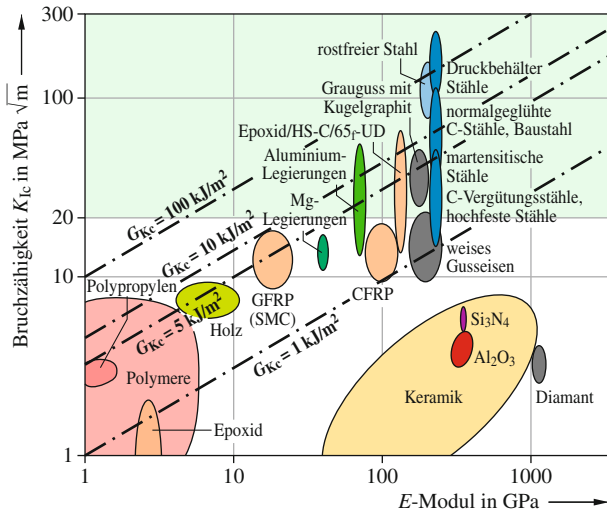
... J0 = Kerbschlagarbeit $A_V \geq 27 \text{ J}$ bei 0°C .

Zu 15.9e $12,5 \text{ mm}$; $12\text{-}12,5 \text{ mm}$

Zu 15.9f



Zu 15.9g

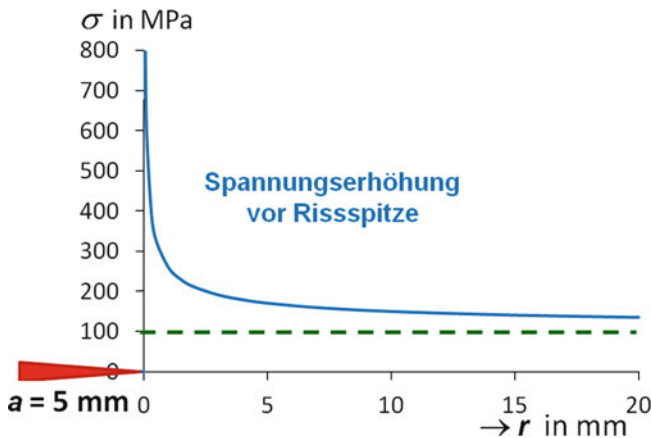


$K_{Ic} > 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$: Al-Legierungen, Epoxy/HS-C/65fUD, Sphäroguss, Stähle ausgenommen einiger hochfester Vergütungsstähle, rostfreie austenitische Stähle;

$G_{Kc} = 10 \text{ kJ/m}^2$ für einige Polymere, Al-Legierungen, einige, defektfreie Epoxy/HS-C/65fUD, normalgeglühte Baustähle.

Die Bruchzähigkeit von hochfesten Vergütungsstählen ist ähnlich der der Al-Legierungen, Mg-Legierungen liegen darunter; G_{Kc} der Mg-Legierungen liegt im unteren Bereich der Al-Legierungen, während nur die zäheren Vergütungsstähle an diese herankommen.

Zu 15.9h



Zu 15.9i –50 %.

15.10 Aufgaben zu Abschn. 15.10

15.10a Ein Würfel von 1 mm Kantenlänge enthält nur einen kritischer Defekt für eine Zugspannung σ , aber seine Position im Würfel ist unbekannt. Aus dem Volumen zweier derartiger Würfel wird eine Faser mit einem Durchmesser von $10 \mu\text{m}$ hergestellt. Wie groß können der minimale und der maximale Abstand zwischen den beiden kritischen Fehlern in der Faser werden? Wie groß sind die fehlerfreien Faserlängen höchster Festigkeit in diesen Fällen?

15.10b Berechnen Sie die kumulativen Überlebenswahrscheinlichkeiten für eine Si_3N_4 -Keramik mit dem Festigkeitsmodul $\sigma_0 = 700 \text{ MPa}$ aus verschiedener Fabrikation gemäß den Angaben in der Tabelle (runden Sie Zahlen mit 0,9... erst auf die Stelle nach der letzten 9, andernfalls auf 2 signifikante Dezimalstellen bzw. eine Stelle mit Zehnerpotenzen).

Weibull-Modul	$m = 5$	$m = 10$			$m = 20$
Zugspannung	$V/V_0 = 1$	$V/V_0 = 1$	$V/V_0 = 10$	$V/V_0 = 100$	$V/V_0 = 1$
350 MPa: P_s	?	?	?	?	?
490 MPa: P_s	?	?	?	?	?
P_{Bruch} in %	?	?	?	?	?
630 MPa: P_s	?	?	?	–	?
700 MPa: P_s	?	?	?	–	?
770 MPa: P_s	?	?	–	–	?

Für hohe Zugspannungen bis 350 MPa ist welche Si_3N_4 Variante eventuell großtechnisch einsetzbar?

Ausführliche Lösung:

Zu 15.10a 0 bis 25,4 m; 12,2 bzw. 25,4 m

Zu 15.10b

Weibull-Modul	$m = 5$	$m = 10$			$m = 20$
Zugspannung	$V/V_0 = 1$	$V/V_0 = 1$	$V/V_0 = 10$	$V/V_0 = 100$	$V/V_0 = 1$
350 MPa: P_s	0,97	0,999	0,99	0,91	0,999999
490 MPa: P_s	0,85	0,97	0,75	0,059	0,9992
P_{Bruch}	15 %	3 %	25 %	94 %	0,08 %
630 MPa: P_s	0,55	0,71	0,031	–	0,89
700 MPa: P_s	0,37	0,37	$5 \cdot 10^{-5}$	–	0,37
770 MPa: P_s	0,20	0,075	–	–	0,001

$m \geq 20$

15.11 Aufgaben zu Abschn. 15.11

15.11a Ein Flugzeugbauteil aus der Al-Legierung Al-Cu4SiMg (AW2014) im T6 Zustand ($R_{p0,2} = 340 \text{ MPa}$, $R_m = 400 \text{ MPa}$) wird mit einer Amplitude von 200 MPa Wechselbelastungen unterworfen.

- Wie hoch ist in etwa die Bruchlastspielzahl bei reiner Wechselbelastung gemäß Bonusmaterial Wöhlerkurven, Abb. 15.12?
- Wie groß sind bei dieser Amplitude die Ober- und die Unterspannung bei $\sigma_m = 0$ und bei $\sigma_m = 100 \text{ MPa}$?
- Wie groß sind die Spannungsverhältnisse R dieser beiden Wechselbelastungen?
- Wie groß darf die Amplitude der Wechselbelastung bei $\sigma_m = 100 \text{ MPa}$ sein, um die gleiche Bruchlastspielzahl zu erzielen, wie bei der reinen Wechsellast mit 200 MPa?

15.11b Eine Periode einer Wechselbelastung eines Kranarmes dauert 36 s, wobei dieser $2 \cdot 10^5$ Lastwechseln standhalten soll.

- Wie groß ist die Belastungsfrequenz des Kranarmes?
- Wie lange ist die angestrebte Lebensdauer?

Die Werkstoffprüfung kann mit einer Umlaufbiegeprüfmaschine mit 10 Hz durchgeführt werden.

- Wie lange dauert die Ermüdungsprüfung mindestens?
- In welchem Bereich der Wöhlerkurve des C45E-Stahles in Bonusmaterial Wöhlerkurven, Abb. 15.12, liegt die Spannungsamplitude, die in etwa obige Bruchlastspielzahl erreicht?

15.11c Für den unlegierten Stahl C45E ergibt sich aus Bonusmaterial Wöhlerkurven, Abb. 15.12, die Basquin-Lebensdauerregel mit $\sigma_a \cdot N_B^{0,1} = 900 \text{ MPa}$.

- Wie groß ist die zu erwartende Bruchlastspielzahl bei $\sigma_a = 370 \text{ MPa}$ und bei $\sigma'_a = 340 \text{ MPa}$?
- Ein Kranarm hat bereits $n_1 = 3625$ Schwingungen erlebt, bei denen der Stahl mit 370 MPa belastet wurde. Welcher Anteil der Lebensdauer wurde dadurch verbraucht?
- Wie viele Schwingungen n_2 können diesem Kranarm noch zugetraut werden, wenn die Spannungsamplitude auf 340 MPa gesenkt wird?

15.11d In der Risseinleitungsphase erreicht pro Zyklus ($f = 0,1 \text{ Hz}$) 1 Stufenversetzung mit dem Burgersvektor $b = 0,25 \text{ nm}$ die Oberfläche eines ferritischen Stahles.

- Wie groß wird die Oberflächenstufe nach 10.000 Zyklen?

- Wie groß ist die Risswachstumsgeschwindigkeit in dieser Phase, wenn pro Zyklus zwei Versetzungspaare mit gegensätzlichem Vorzeichen im Abstand weniger Gitterebenen an die Oberfläche kommen und eine Intrusion bilden?
- Der Schwellwert des Spannungsintensitätsfaktors dieses Stahles beträgt $K_{th} = 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Wie groß ist der zugehörige Anriss bei einem Spannungsmaximum von 500 MPa?

15.11e Ein Druckkesselstahl mit $R_{p0,2} = 1000 \text{ MPa}$ und $K_{Ic} = 170 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (siehe Abb. 15.74) verhält sich im Stadium des stabilen Wachstums eines Ermüdungsrisses gemäß dem Paris-Gesetz

$$\frac{da}{dN} (\text{mm}) = 10^{-13} [\Delta K (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})]^3.$$

- Tragen Sie obiges Paris-Gesetz in das Diagramm in Abb. 15.87c) ein und vergleichen Sie dieses mit der Rissfortschrittskurve für Stahl.
- Berechnen Sie die kritische Risslänge für eine Zugspannung von 510 MPa.
- Wie groß ist ΔK (Gesamtschwingbreite der Spannungsintensität) bei der Spannungsamplitude von 510 MPa, wenn ein Riss von 4 mm Länge bei einer Anlagenrevision entdeckt wurde?
- Wie groß ist in etwa das Risswachstum bei diesem Revisionszeitpunkt nach obigem Paris-Gesetz?
- Wie groß soll der Riss gemäß dem Integral des Paris-Gesetzes nach weiteren 500 Zyklen bzw. 1000 Zyklen werden? Wie groß wird bei diesen Zyklenzahlen das Risswachstum?
- Unter Verwendung des Integrals des Paris-Gesetzes sind bei einem Riss von 4 mm noch wie viele Lastzyklen mit der gleichen Spannungsamplitude von 510 MPa bis zum Spaltbruch zu erwarten?
- Nach der Feststellung des 4-mm-Risses würden Sie die nächste Revision nach wie vielen weiteren Zyklen vorschreiben?

15.11f Die Nickelsuperlegierung einer Turbinenschaufel (Leitbeispielbauteil) erfährt bei gelegentlicher Maximalbelastung eine lokale Zugspannung von 1000 MPa bei einer lokalen Gesamtdehnung von 0,59 %. Die Manson-Coffin-Lebensdauerregel für diese Legierung lautet $\Delta \epsilon_{pl} \cdot N_B^{0,5} = 5 \cdot 10^{-3}$.

- Wie groß ist die plastische Dehnungsamplitude in dieser Wechselbelastung (E -Modul siehe Tab. 15.7)?
- Berechnen Sie die zu erwartende Lebensdauer für diese Turbinenschaufel, wenn sie periodisch der angegebenen Maximalspannung ausgesetzt wird.

15.11g Mit den Festigkeitsdaten der Tab. 15.7 und Bruchzähigkeits- und Ermüdungskennwerten der Tab. 15.16

für die Werkstoffe der Turboladerturbine (Si_3N_4 und IN718), des Kurbelgehäuses (AlSi12(Mg), GJV450), des Getriebezahnrads (Einsatzstahl) und der Karosseriebleche (AW6082 und DC04) berechnen Sie die kritischen Risslängen bei der Elastizitätsgrenze und bei der Dauer- oder Grenzlastspielfestigkeit, sowie die zugehörigen maximalen Spannungsintensitätsfaktoren.

Werkstoff	$R_{e, R_{p0,2}, \sigma_o}$ in MPa	K_{Ic} in $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	$a_{krit} (R_p)$ in mm	σ_D, σ_{NG} in MPa	$a_{krit} (\sigma_{NG})$ in mm	$K_{max} (\sigma_{NG})$ in $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
Si_3N_4	700	6	?	500	?	?
IN718	1000	140	?	800	?	?
AlSi12	150	30	?	110	?	?
GJV 450	450	45	?	210	?	?
PA 66	80	5	?	40	?	?
Einsatzstahl	600	50	?	300	?	?
AW6082-T6	280	60	?	130	?	?
Karosserieblech	185	140	?	200	?	?

15.11h Berechnen Sie für den Stahl im Bimetallstreifen der Aufgabe 15.4f mit der Basquin-Lebensdauerregel aus Aufgabe 15.11c die Bruchlastspielzahl für $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ (beziehen Sie die Berechnung auf den Spannungszustand bei $\Delta\alpha = 12 \text{ ppm/K}$).

15.11i Ein Druckbehälterstahl ($R_e = 600 \text{ MPa}$, $E = 210 \text{ GPa}$) eines Wärmetauschers wird innen bei 600°C betrieben und außen periodisch mit Luft- oder Wasserdusche gekühlt (thermische Gefügeveränderungen werden vernachlässigt).

- Berechnen Sie den Unterschied der thermischen Dehnung zwischen Innen- und Außenseite des Wärmetauscherrohres ($\alpha = 14 \text{ ppm/K}$), wenn die Luftkühlung die Außentemperatur auf 360°C reduziert. Dieser Kühlvorgang reduziert die Innentemperatur auf 560°C . Wie groß ist der periodische Dehnungsunterschied zwischen innen und außen? Wie viel davon kann durch elastische Dehnungen kompensiert werden?
- Berechnen Sie die Anzahl der Kühlvorgänge, denen dieser Stahl standhalten kann, wenn die Basquin-Lebensdauerregel aus Aufgabe 15.11c für elastische Dehnungen gilt.
- Wie groß muss das Dauerfestigkeitsverhältnis s_D sein, damit dieser Stahl für diesen Belastungsfall dauerhaft ist?
- Berechnen Sie den Unterschied der thermischen Dehnung zwischen Innen- und Außenseite des Wärmetauscherrohres, wenn die Wasserkühlung die Außentemperatur auf 160°C und die Innentemperatur auf 460°C reduziert. Wie groß ist der Dehnungsunterschied zwischen innen und außen? Wie hoch ist die periodische, plastische Dehnung?

- Berechnen Sie die Anzahl der Kühlvorgänge, denen dieser Stahl standhalten kann, wenn die Manson-Coffin-Lebensdauerregel $\Delta\epsilon_{pl} \cdot N_B^{0,5} = 10^{-3}$ gilt.

Ausführliche Lösung:

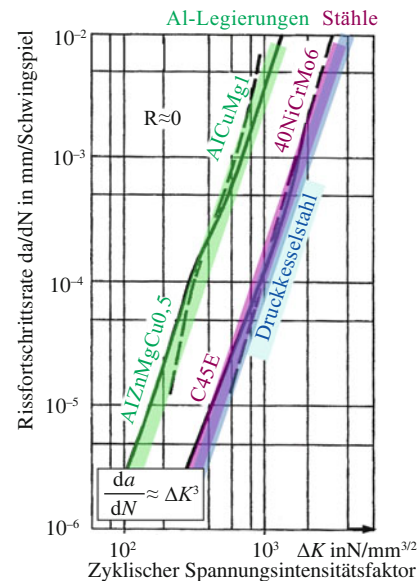
Zu 15.11a $N_B = 8 \cdot 10^4$; $\sigma_o / \sigma_u = \pm 200 \text{ MPa}$, $300 \text{ MPa} / -100 \text{ MPa}$; $R = -1$; $R = -1/3$; $\sigma_a = 150 \text{ MPa}$.

Zu 15.11b $f = 0,028 \text{ Hz}$; $t_B > 2000 \text{ h}$; $t_{\min} = 5,5 \text{ h}$; $\sigma(2 \cdot 10^5) = \text{ca. } 320 \text{ MPa}$, Übergangsfestigkeit.

Zu 15.11c $N_B(370 \text{ MPa}) = 7250$; $N_B(340 \text{ MPa}) = 16.890$; $n_1 \equiv 50\% N_B(370 \text{ MPa})$; $n_2 = 8445$.

Zu 15.11d $a = 2,5 \mu\text{m}$; $da/dN = 0,5 \text{ nm}$; $a_{th} = 32 \mu\text{m}$.

Zu 15.11e Druckkesselstahl wie die anderen Stähle:



$a_{krit}(510 \text{ MPa}) = 35 \text{ mm}$

$\Delta K = 3616 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} = 114 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$

$da/dN = 4,7 \mu\text{m/Zyklus}$

$a_{500} = 8,2 \text{ mm}$ bei $13,9 \mu\text{m/Zyklus}$,

$a_{1000} = 25 \text{ mm}$ bei $73,9 \mu\text{m/Zyklus}$

$n_{\text{Rest}} > 1100$

spätestens nach weiteren 800 Zyklen, wo der Riss bereits $14,4 \text{ mm}$ lang sein wird.

Zu 15.11f $\epsilon_{pl} = 0,1\%$; $N_B = 36$

Zu 15.11g

Werkstoff	$R_{e, R_{p0,2}, \sigma_o}$ in MPa	K_{IC} in MPa \sqrt{m}	$a_{krit} (R_p)$ in mm	$\sigma_{D, \sigma_{NG}}$ in MPa	$a_{krit} (\sigma_{NG})$ in mm	$K_{max} (\sigma_{NG})$ in MPa \sqrt{m}
Si ₃ N ₄	700	6	0,02	500	0,05	6,3
IN718	1000	140	6,2	800	9,5	138
AlSi12	150	30	12,7	110	23,7	30
GJV 450	450	45	0,3	210	1,5	45
PA 66	80	5	1,2	40	5	5
Einsatzstahl	600	50	2,2	300	8,8	50
AW6082-T6	280	60	14,6	130	68	60
Karosserieblech	185	140	182	150	277	139

Zu 15.11h $\Delta\alpha \cdot E \cdot \Delta T = 252 \text{ MPa}; N_B = 3,38 \cdot 10^5$.

Zu 15.11i $\varepsilon_{pl} = 0,28 \%$, $\varepsilon_{el} \leq 0,286 \%$, Basquin Regel ist anwendbar; $2\sigma_a = 588 \text{ MPa}$, N_B ca. 60.000, $s_D \geq 0,48$; $\varepsilon_t = 0,42 \%$; $2\varepsilon_{pl} = 0,134 \%$, N_B ca. 3000

15.12 Aufgaben zu Abschn. 15.12

15.12a Die Leerstellenkonzentration in einer Al-Legierung beträgt bei Raumtemperatur (25 °C) im thermischen Gleichgewicht 10^{-13} . Die Bildungsenthalpie $E_{AV} = 1,2 \cdot 10^{-19} \text{ J/Leerstelle}$ ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$). Berechnen Sie gemäß Vertiefung „Leerstellen“ um welchen Faktor sich die Leerstellenkonzentration beim Lösungsglühen bei 460 °C erhöht. Wieviele Leerstellen kommen bei dieser Temperatur auf eine Million Gitterplätze?

15.12b Lesen Sie aus der Abb. 15.100 ab:

- Wievielfach größer ist der Diffusionskoeffizient von C im krz Fe gegenüber dem von C im kfz Fe bei 1000 K?
- Wievielfach größer ist der Diffusionskoeffizient von C im krz Fe gegenüber dem von Fe im krz Fe bei 1000 K?
- Wievielfach größer ist der Diffusionskoeffizient von Fe im krz Fe gegenüber dem von Fe im kfz Fe bei 1000 K?
- Wievielfach größer ist der Diffusionskoeffizient von Ni im kfz Fe bei 600 °C gegenüber 1200 °C?

15.12c Lesen Sie die Diffusionskoeffizienten von C in kfz Fe und von Ni in kfz Fe bei zirka 600 °C und 1000 °C aus Abb. 15.98 ab und berechnen Sie die zugehörigen Diffusionslängen für 10 s und 1000 s.

15.12d Die Temperatur, ab der signifikante Diffusion und somit Kriechverformung beobachtet wird, kann aus der Schmelztemperatur der Werkstoffe abgeschätzt werden: $0,4 T_s$ für Metalle und Thermoplaste, $0,5 T_s$ für Keramiken. Errechnen Sie diese Grenztemperaturen für die Werkstoffe in den Leitbeispielen aus den T_s -Werten in Tab. 15.6: Si₃N₄ ($T_s^{\min} = 1700 \text{ °C}$), IN718, AlSi12, C22 (unlegierter Stahl) und PA66. Vergleichen Sie ihre Ergebnisse mit den Angaben in Tab. 15.16.

15.12e Wie unterscheiden sich die Potenzgesetze für die stationäre Kriechrate, wenn folgende Kriechmechanismen dominieren:

- Korngrenzenkriechen (nach Coble)
- Intrakristallines Kriechen (nach Nabarro-Herring)
- Versetzungskriechen.

15.12f Zeichnen Sie schematisch eine Kriechdehnungs-Zeit-Kurve und die zugehörige Dehnratenkurve. Bezeichnen Sie die charakteristischen Stadien der Kriechverformung.

Ausführliche Lösung:

Zu 15.12a

$$\begin{aligned}
 n_V(T)/n_V(RT) &= \exp \left[\frac{(-E_{AV}/k) \frac{n_V(T)}{n_V(RT)}}{n_V(RT)} \right] \\
 &= \exp \left[\frac{-E_{AV}}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{RT} \right) \right] = \left| \frac{T=700 \text{ K}}{RT=300 \text{ K}} \right| = \\
 &= \exp \left[-8,7 \cdot 10^3 \cdot (-2,07 \cdot 10^{-3}) \right] \\
 &= e^{18} = 6,6 \cdot 10^7 \text{-fache Erhöhung} \\
 &\quad \text{der Leerstellenkonzentration;}
 \end{aligned}$$

$$n_V(T)/n_V(RT) \cdot 10^{-13} = 6,6 \cdot 10^{-6} = n_V(460 \text{ °C}); 6,6 \text{ Leerstellen pro } 10^6 \text{ Gitterplätzen.}$$

Zu 15.12b 100; 10^6 ; > 100 ; fast 10^7

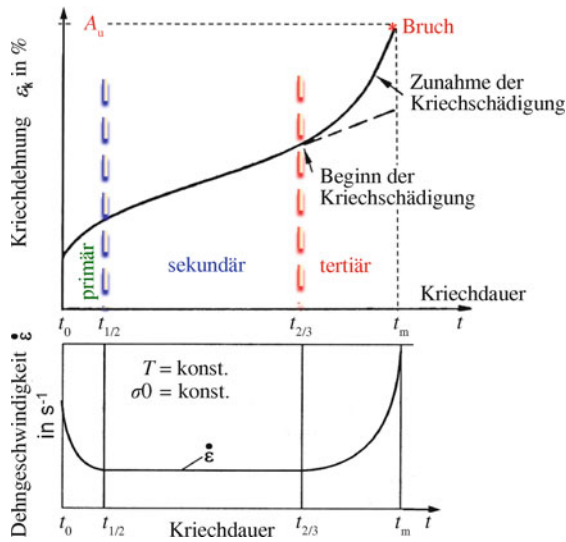
Zu 15.12c

Element in kfz Fe	600 °C D in m ² /s	t = 10 s √Dt	t = 1000 s √Dt	1000 °C D in m ² /s	t = 10 s √Dt in m	t = 1000 s √Dt in m
C	10^{-13}	1 μm	10 μm	$3 \cdot 10^{-11}$	17 μm	170 μm
Ni	10^{-21}	0,01 nm	0,1 nm	$2 \cdot 10^{-16}$	0,45 μm	4,5 μm

Zu 15.12d 714 °C, 386 °C, 66 °C, 404 °C, −60 °C

Zu 15.12e $\varepsilon_s \propto \sigma/d^p$ Diffusionskriechen:
 $p = 2$ (Nabarro-Herring); $p = 3$ (Coble);
 $\varepsilon_s \propto \sigma^n$ Versetzungskriechen:
 $n = 3$ (Mischkristall);
 $n = 3 \div 5$ (Ausscheidungsverfestigung)

Zu 15.12f



15.13 Aufgaben zu Abschn. 15.13

15.13a Der Reibungskoeffizienten zwischen zwei trockenen Stahlteilen betragen ungefähr $\mu_S = 0,15$ bei Haftung und $\mu_G = 0,12$ beim Gleiten. Zwei Stahlkörper werden mit einer Kraft von 1kN aneinander gedrückt. Wie groß sind Reibungskräfte für Haftung und fürs Gleiten?

Haft- und Gleitreibungskoeffizienten für Aluminium auf Aluminium sind etwa gleich groß und betragen $\mu_S = \mu_G = 1,05$. Wie groß ist deren Reibungskraft unter gleicher Normalkraft?

15.13b Aus welchen Bestimmungsstücken besteht das tribologische System eines Zahnrades im Getriebe? Welche Verschleißmechanismen wirken dabei?

15.13c Von der 100 cm² großen Oberfläche eines gleitenden Stahl(gegen)körpers werden bei rotierender Bewegung, die einem Gleitweg von 100 m entspricht, 100 µm abgetragen. Wie groß ist der entsprechende Masseverlust? Wie groß ist die Verschleißrate (Oberflächenabtrag und Massenabtrag) pro m?

Die Verschleißrate bleibt bis etwa 500 m Verschleißweg gleich und steigt dann innerhalb von 10 m auf 1 g/m. Was bedeutet dieser Verschleißanstieg? In welches Verschleißstadium kommt das System?

Ausführliche Lösung:

Zu 15.13a Stahl $F_S = 150 \text{ N}$, $F_G = 120 \text{ N}$; Al: $F_S = F_G = 1050 \text{ N}$.

Zu 15.13b Ein Zahnrad als Grundkörper hat ein anderes als Gegenkörper. Die Antriebskräfte übertragen sich als Normalkräfte auf die glatten Zahnradflanken aus gehärtetem Stahl. Getriebeöl bildet den Zwischenstoff. Die Relativbewegung ist teils gleitend, teils rollend.

Vor allem Oberflächenzerrüttung aber auch abrasiver Gleitverschleiß wirken als Verschleißbeanspruchung, besonders wenn Materialausbrüche oder Sandkörner in den Zwischenstoff kommen.

Zu 15.13c $\Delta h_V/s = 1 \text{ µm/m}$; $\Delta m_V = 100 \text{ cm}^2 \cdot 0,01 \text{ cm} \cdot 7,9 \text{ g/cm}^3 = 7,9 \text{ g}$; $\Delta m_V/s = 79 \text{ mg/m}$;

Die mehr als 10-fache Steigerung der Verschleißrate verursacht eine Zerstörung des Werkstückes im tertiären Stadium des Verschleißes (Verschleißhochlage).

15.14 Aufgaben zu Abschn. 15.14

15.14a Bei einem Salzsprühtest beträgt die Gewichtsabnahme einer Al-Probe mit einer Oberfläche von 200 cm² 0,27 g nach 100 h. Wie groß ist die Korrosionsrate $\Delta m_K/\text{Woche}$? Wie groß ist die entsprechende Dickenabnahme der Probe und die diesbezüglich Korrosionsrate $\Delta h_K/\text{Jahr}$.

15.14b Welcher Partner der folgenden Werkstoffpaarungen (Mg–Cu, Al–Fe, Cu–Ni, CFK–Al) kann galvanischer Korrosion unterliegen?

15.14c Im Bonusmaterial Spannungsrisskorrosion wird das Beispiel von Stahlkrallen angeführt. Wie unterscheiden sich die maximalen Spannungen im Stahl S235 gegenüber S380?

15.14d Vergleichen Sie das Wachstum einer Korrosionsschicht Δm_K bei Trockenkorrosion für den theoretischen Fall, dass für ein lineares und ein parabolisches Schichtwachstum die Wachstumskoeffizienten zahlenmäßig gleich wären: $k^l = 50 \text{ mg/h}$, $k^p = 50 \text{ mg}^2/\text{h}$ (siehe Abb. 15.149b). Wie groß ist bei linearem und parabolischem Korrosionsfortschritt der Masseverlust einer Probe nach 100 h und 1000 h Exponierdauer?

Ausführliche Lösung:

Zu 15.14a $\Delta m_K/\text{Woche} = 0,45 \text{ g}$; $5 \text{ µm}/100 \text{ h} = 438 \text{ µm/Jahr}$.

Zu 15.14b Folgende Elemente werden durch galvanische Korrosion angegriffen: Mg, Al, Ni, Al.

Zu 15.14c Die elastische Randspannung in S380 kann den 1,6-fachen Wert gegenüber einem S235-Stahl annehmen.

Zu 15.14d linear: 5 g, 50 g; parabolisch: 71 mg, 0,22 g.