

Teil II

Medizinisch relevante Werkstoffe

Grundlagen der Werkstoffgruppen

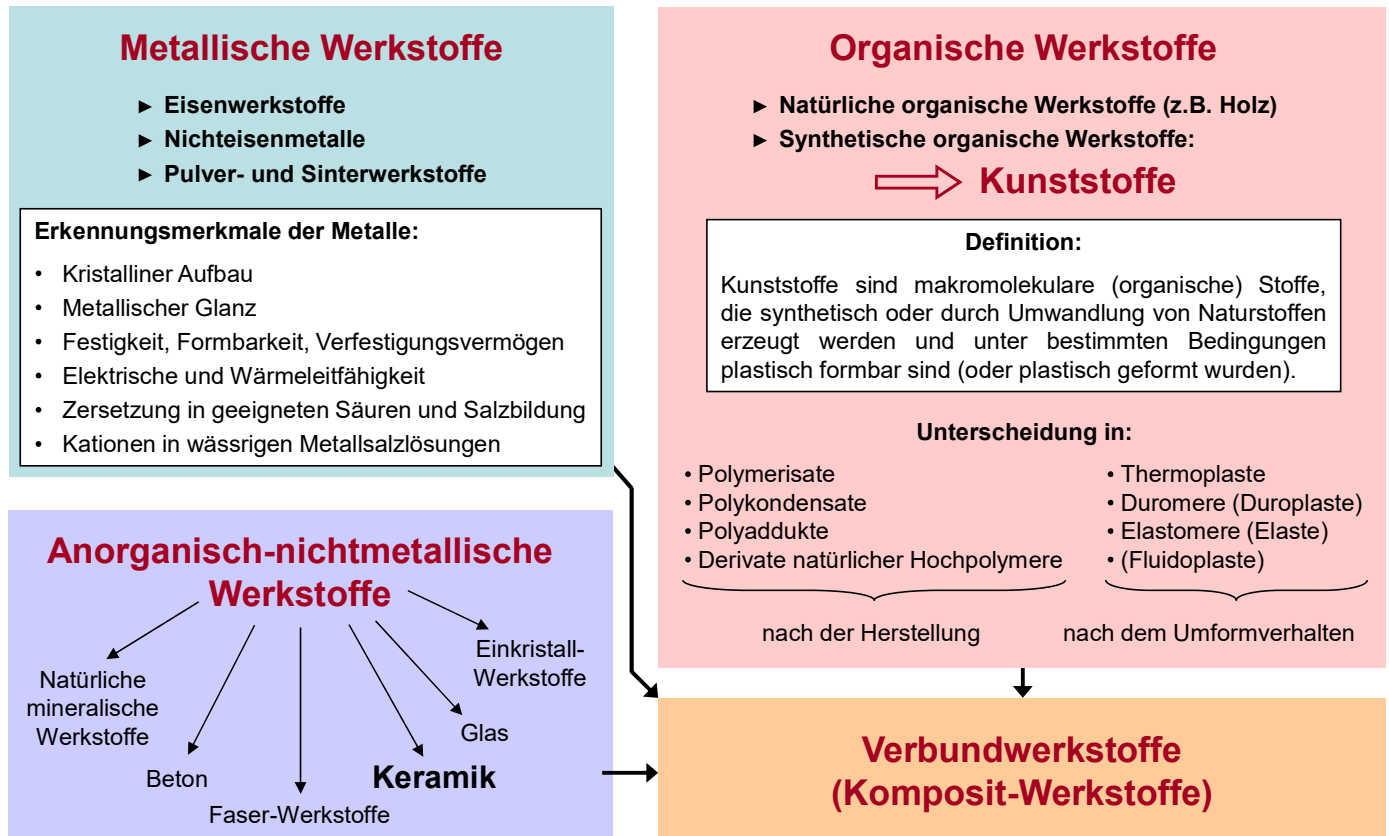
- ⇒ Metalle und deren Legierungen
- ⇒ Keramische Werkstoffe
- ⇒ Polymere
- ⇒ Faserverbundwerkstoffe



Systematik und Eigenschaften der Werkstoffgruppen



Systematik der Werkstoffgruppen

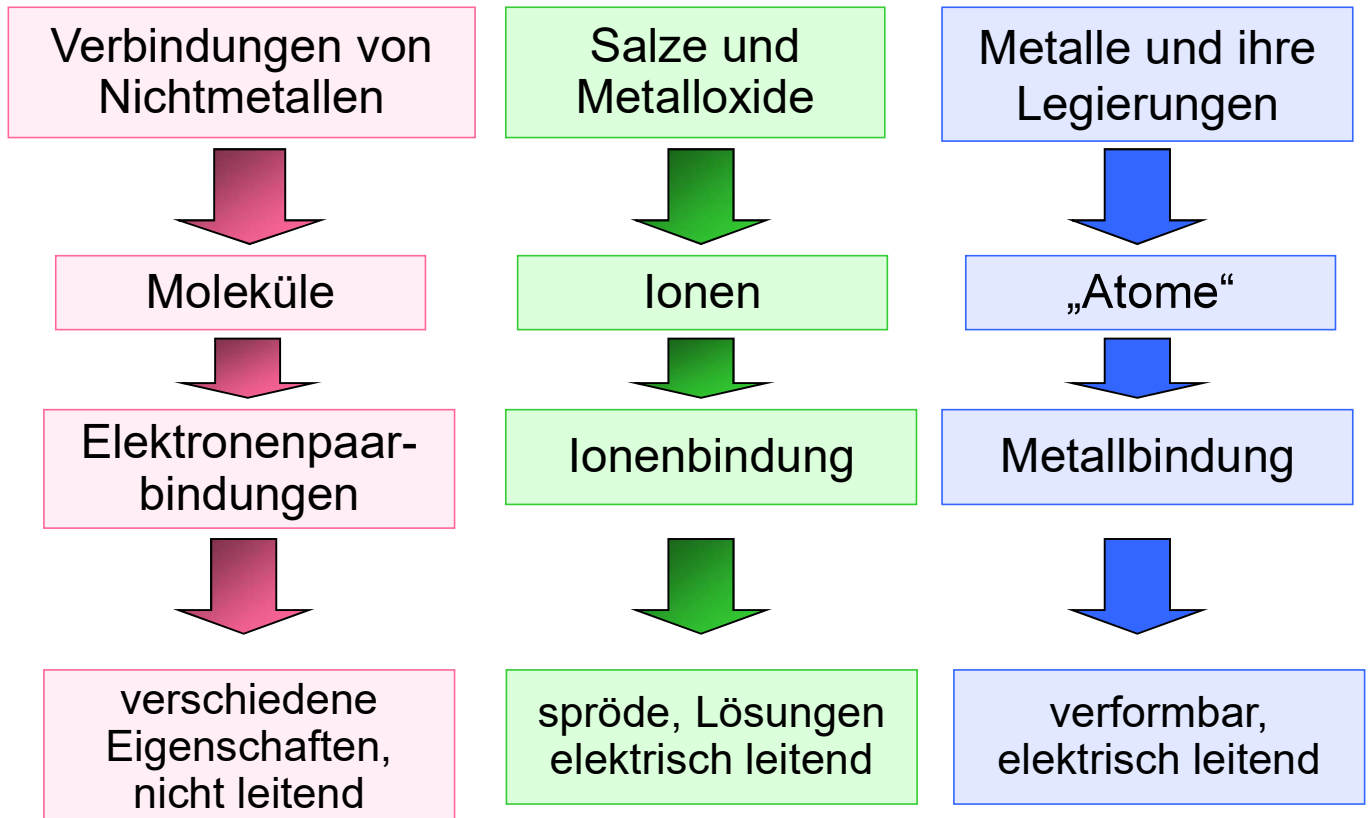


Eigenschaften von Werkstoffen / Festkörpern

Werkstoffeigenschaften werden ursächlich durch das Zusammenwirken elementarer Eigenschaften bestimmt:

- ▶ Art der atomaren Bausteine (chemische Zusammensetzung)
- ▶ Ihre Anordnung in der Feinstruktur (Kristallinität, Phasenzusammensetzung, Konstitution)
- ▶ Art und Anteil der wirkenden Bindungskräfte
- ▶ Gewollte und ungewollte Störungen des Gleichgewichtszustandes (im Gitter, chemisch-thermodynamisch, im Gefüge)

Stoffklassen, Bindungsarten, Eigenschaften



Arten der chemischen Bindung

Allgemeine Unterscheidung in 3 Bindungsarten:

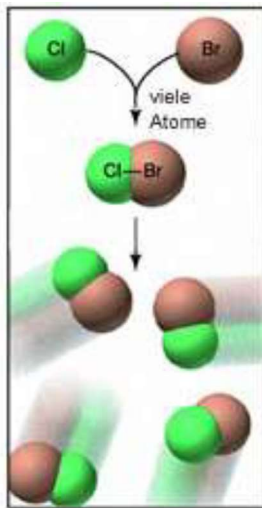
Atombindung

Ionenbindung

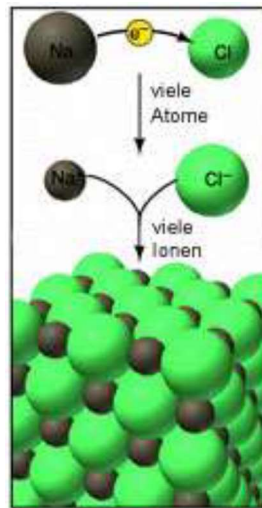
Metallbindung

Bindungsart	Atombindung		Ionenbindung	Metallbindung
	Elektronenpaarbindung, homöopolare Bindung, unpolare Bindung, kovalente Bindung, Kovalenzbindung		Ionenbeziehung, heteropolare Bindung, elektrovalente Bindung	metallischer Zustand
Art der beteiligten Atome	Nichtmetallatome		Metallatom und Nichtmetallatom	Metallatome
Charakter der Atome	elektronegatativ bzw. elektroneutral		elektropositiv (Kation) elektronegatativ (Anion)	elektropositiv
Vorgänge in der Elektronenhülle	Bildung gemeinsamer Elektronenpaare, Besetzung bindender Molekülorbitale		Übergang von Elektronen	Abgabe von Valenzelektronen
Art der entstehenden Teilchen	Moleküle	-	positive und negative Ionen	positive Ionen und Elektronengas
Kristallgitter	Molekülgitter	Atomgitter	Ionengitter	Metallgitter
Charakter der entstehenden Stoffe	flüchtig o. makromolekular (nichtflüchtig)	diamantartig	salzartig	metallisch
Beispiele	Brom (Br ₂), CO ₂ , Benzen (Benzol), Stärke	Diamant, Silizium, SiC, B ₄ C	NaCl, CaO, NaOH	alle Metalle und Legierungen

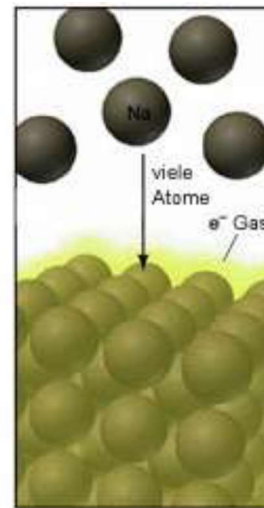
Stoffklassen, Bindungsarten, Eigenschaften



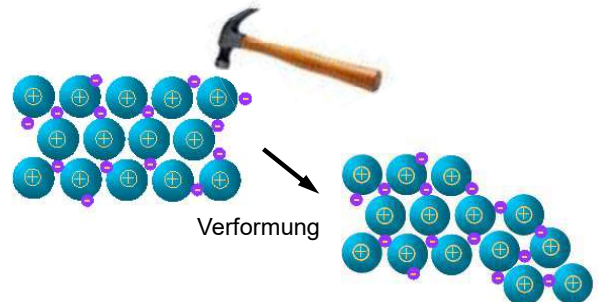
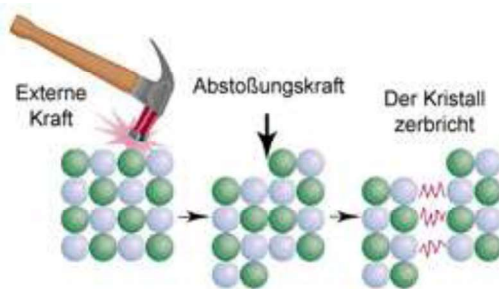
Atombindung



Ionenbindung



Metallbindung



Bindungscharakter ausgewählter Stoffe

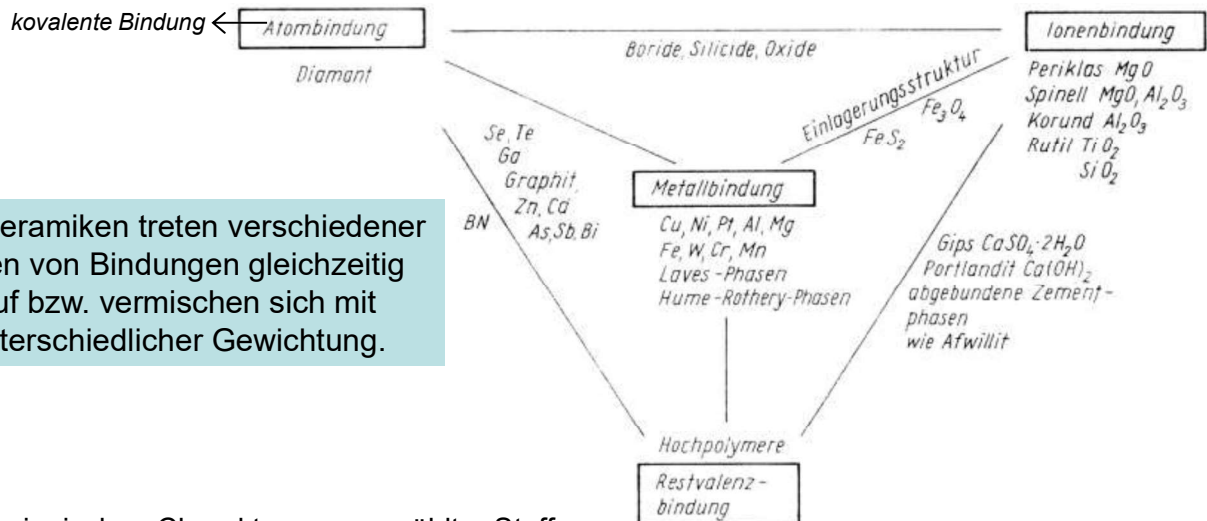


Tabelle:

Grad des ionischen Charakters ausgewählter Stoffe

Kristall	Grad des ionischen Charakters	Kristall	Grad des ionischen Charakters	Kristall	Grad des ionischen Charakters
Si	0,00	InP	0,42	MgO	0,84
SiC	0,18	InAs	0,36	MgS	0,79
Ge	0,00	InSb	0,32	MgSe	0,79
ZnO	0,62	GaAs	0,31	LiF	0,92
ZnS	0,62	GaSb	0,26	NaCl	0,94
ZnSe	0,63	CuCl	0,75	RbF	0,96
ZnTe	0,61	CuBr	0,74	Al ₂ O ₃	0,63
CdO	0,79	AgCl	0,86	SiO ₂	0,51
CdS	0,69	AgBr	0,85	Si ₃ N ₄	0,30
CdSe	0,70	AgI	0,77		
CdTe	0,67				

Der **ionische Bindungsanteil** berechnet sich aus den Elektronegativitäten der Elemente.

Verbindungen mit hohem ionischen Anteil kristallisieren bevorzugt in Strukturen mit **hoher Koordinationszahl** (Anzahl der direkt benachbarten, gegensinnigen Ionen).

Bindungscharakter ausgewählter Stoffe

Bei hohem **kovalenten Bindungsanteil** werden Koordinationszahl & Kristallstruktur von der Konfiguration der Valenzelektronen bestimmt !

z.B. tetraedrische Ausrichtung bei der Diamant-
(Zinkblende-, kub) und der Wurzit-Struktur (hex)

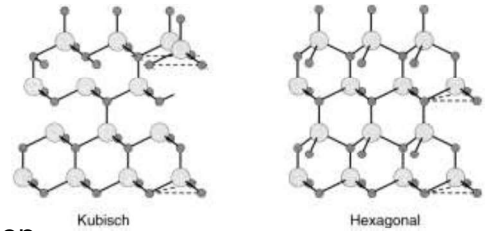


Tabelle:

Schmelz- bzw. Sublimationspunkte keramischer Verbindungen

Stoffklasse	Keramik	ρ (g/cm ³)	T_m (°C)	Stoffklasse	Keramik	ρ (g/cm ³)	T_m (°C)
Elemente	C (Graphit)	2,27	3800*	binäre Stoffe (ff.)	SiO ₂ (Quarz)	2,65	1725
	C (Diamant)	3,51	3800**		TiO ₂	4,23	1860
binäre Stoffe	TiC	4,94	3017	ternäre Stoffe	MgAl ₂ O ₄	3,59	2135
	TiN	5,21	2950*		Y ₃ Al ₅ O ₁₂	4,55	1930
	MgO	3,58	2825		Al ₂ TiO ₅	3,15	1860
	SiC	3,20	2760		Al ₆ Si ₂ O ₁₃	3,16	1840
	ZrO ₂	6,27	2700		BaTiO ₃	5,81	1625
	B ₄ C	2,52	2450				
	AlN	3,26	2400*	quaternäre Stoffe	SiAl ₂ O ₂ N ₂	3,10	1830*
	Al ₂ O ₃	3,97	2050		Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	2,50	1470
	Si ₃ N ₄	3,21	1910*				

* Zersetzung bzw. Sublimation, ** bei einem Druck von ≈ 14 GPa

aus: H. Schaumburg (Hrsg.): Werkstoffe, bzw.: Keramik

Keramiken mit hohem kovalenten Bindungsanteil haben die höchsten Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen !

Periodensystem der Elemente

I																VIII									
1,01 H 1																4,00 He 2									
6,94 Li 3	9,01 Be 4															10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10				
22,99 Na 11	24,31 Mg 12															26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18				
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,87 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,8 Kr 36								
85,47 Rb 37	87,62 Sr 38	88,91 Y 39	91,22 Zr 40	92,91 Nb 41	95,94 Mo 42	97,91 Tc 43	101,0 Ru 44	102,9 Rh 45	106,4 Pd 46	107,9 Ag 47	112,4 Cd 48	114,8 In 49	118,7 Sn 50	121,8 Sb 51	127,6 Te 52	126,9 I 53	131,3 Xe 54								
132,9 Cs 55	137,3 Ba 56	175,0 Lu 71	178,5 Hf 72	180,9 Ta 73	183,8 W 74	186,2 Re 75	190,2 Os 76	192,2 Ir 77	195,1 Pt 78	197,0 Au 79	200,6 Hg 80	204,4 Tl 81	207,2 Pb 82	209,0 Bi 83	209,0 Po 84	210,0 At 85	222,0 Rn 86								
223,0 Fr 87	226,0 Ra 88	262,0 Lr 103	261,1 Rf 104	262,1 Db 105	266,1 Sg 106	264,1 Bh 107	269,1 Hs 108	268,1 Mt 109	273,1 Ds 110	272,1 Rg 111															

Atommasse in u
(molare Masse)

26,98

Al

13

Elementsymbol

Ordnungszahl

Wasserstoff

radioaktiv

Erdalkalimetalle

Metalle

Halbmetalle

Edelgase

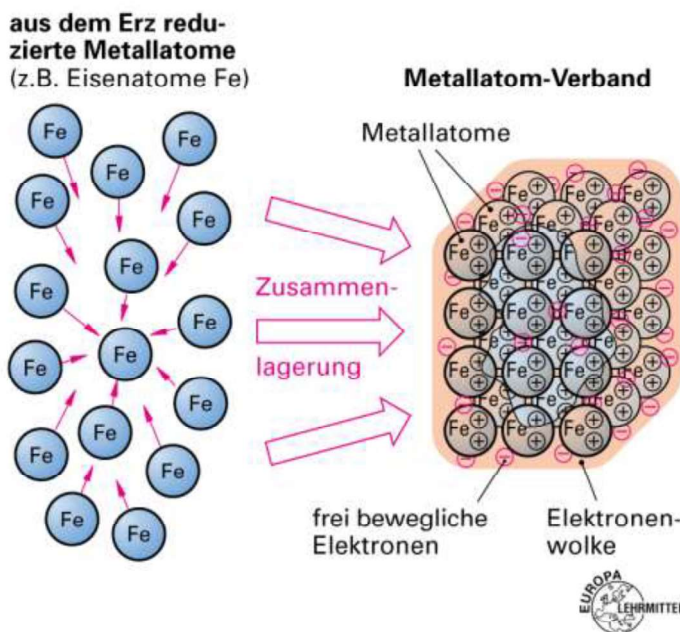
Nichtmetalle

Alkalimetalle

weitere Infos unter: <http://www.pse.merck.de/>

Metalle und deren Legierungen

Grundlagen - Metalle



Metalle haben einen festen Zusammenhalt, eine kristalline Struktur, verbindet man die Mittelpunkte der Atome, so entsteht ein Raum- oder Kristallgitter. Ursache ist die Metallbindung, die nach der Reduktion des Erzes entsteht.

Dabei werden die locker beweglichen Elektronen abgegeben, sie umgeben den Atomverband als Elektronenwolke.

Sie können durch eine angelegte elektrische Spannung in Bewegung gesetzt werden, es fließt ein elektrischer Strom. Sie sind gute elektrische Leiter.

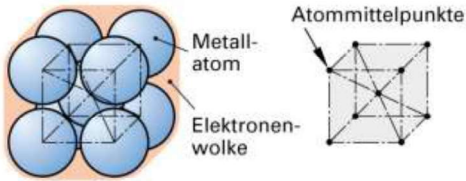
Metalle verformen sich bei geringer Belastung elastisch, bei hoher plastisch.

Grundlagen - Metalle: Kristallgittertypen

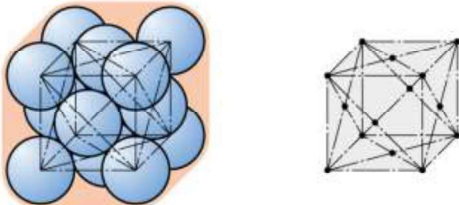
Kugelmodell-Darstellung

Strichmodell-Darstellung

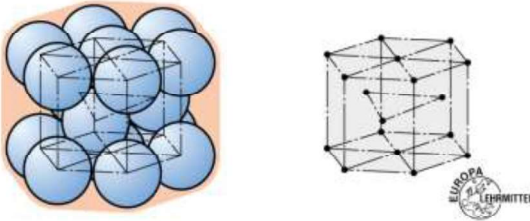
kubisch raumzentriertes Kristallgitter (krz)



kubisch flächenzentriertes Kristallgitter (kfz)



hexagonales Kristallgitter (hex)



Die Atome der Metalle können sich in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen zusammenfügen, je nach Metallart.

krz: kubisch raumzentriert

Die Verbindungslinien der Atommittelpunkte bilden ein Würfel, zusätzlich befindet sich aber noch ein Atom in der Würfelmittle. (Cr, W, V)

kfz: kubisch flächenzentriert

Die Verbindungslinien der Atommittelpunkte bilden auch hier ein Würfel, aber zusätzlich befindet sich ein Atom in der Mitte der Seitenflächen. (Al, Cu, Ni)

hex: hexagonal

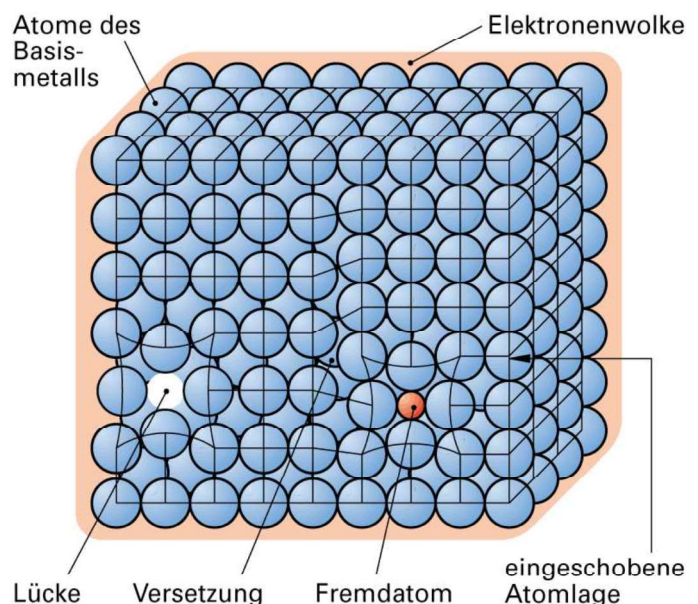
Die Metallatome bilden ein sechseckiges Prisma mit je einem Atom in der Mitte der Grundflächen.

(Mg, Zn, Ti)

	krz	kfz	hex
Nachbaratome	8	12	12
Atome in der Elementarzelle	$1 + 8/8 = 2$	$3 + 8/8 = 4$	4
Packungsdichte	68 %	74 %	74 %
Symmetrieebenen	6	8	2

Grundlagen – Metalle: Baufehler im Kristall

- Die Kristalle eines Metalls sind nicht fehlerfrei, sondern mit Lücken, Versetzungen und Fremdatomen durchsetzt.
- Eine Lücke ist ein nicht besetzter Gitterplatz, bei einer Versetzung ist eine ganze Lage eingeschoben oder sie fehlt.
- Fremdatome sind Atome eines anderen Elementes, die in das Kristallgitter eingebaut sind.
- Baufehler bewirken Verzerrungen im Kristallgitter und führen zur Erhöhung der Festigkeit, entsprechend werden Legierungen erzeugt, also Fremdatome absichtlich eingebracht.



Symmetrieebenen:

- je mehr desto duktiler, formbarer
- $kfz > krz > hex$
- alle duktilen Metalle und Legierungen haben kfz Elementarzellen (Bsp.: Au, Ag, Cu, ...Ni)

Metalle: Biokompatible Metalle

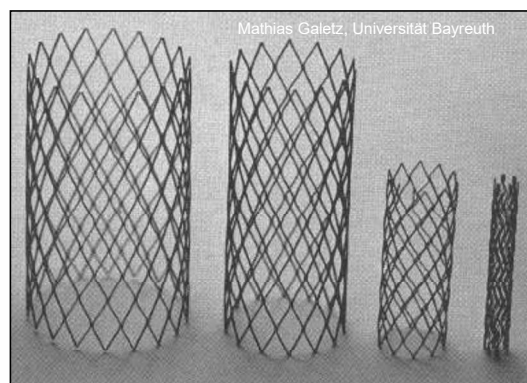
- Implantierte Metalle sind je nach Einsatzgebiet unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt:
 - *Knochengewebe* ⇒ *mechanische Belastungen*
 - *Blutgefäße* ⇒ *chemische Beanspruchungen*
- Die Biokompatibilität eines Werkstoffes ist im wesentlichen von folgenden Größen abhängig:
 - *Oberflächeneigenschaften* (z.B. uneben, glatt oder porig),
 - *chemischen Eigenschaften* (z.B. hydrophil, hydrophob, Korrosionsneigung),
 - *mechanischen Eigenschaften* (z.B. Elastizität, Biegesteifigkeit)
 - und *Geometrie* (z.B. scharfe Kanten).
- Zuerst verwendete man *Gold, Silber* und *Platin*.
- Diese Edelmetalle zeichnen sich dadurch aus, dass sie chemisch inert sind und deshalb mit Gewebe oder Blut nicht reagieren. Andererseits sind diese Metalle sehr weich und können nur geringen mechanischen Belastungen ausgesetzt werden.
 - 20er Jahre: Entwicklung von *VA Stahl*: konnte höhere mechanische Belastungen vertragen.
 - 1936: *molybdänhaltige Gußlegierung auf Kobalt- und Chrombasis*: verhält sich im Körper inert.
 - Seit 1940 : *cp (commercially pure) Titan*.

Metalle: Biokompatible Metalle

- Einsatzbereich:
 - Knie-, Hüft- und Schulterprothesen, als Fixationselemente zur Stabilisierung von Frakturen und als Stents, Schrauben und Drähte.



Künstliches Hüftgelenk



Stents

- Die Eignung eines Metalls zur Implantation ist von folgenden drei Kriterien u.a. abhängig:
 - *mechanische Festigkeit*
 - *Korrosionsbeständigkeit*
 - *Biokompatibilität*

Metalle: Biokompatible Metalle

Mechanische Festigkeit:

- Gewährleistung einer dauerhaften Kraftübertragung zwischen Implantat und Körpergewebe sowie möglichst knochenähnliche Implantatsteifigkeit.

Korrosionsbeständigkeit:

- Vermeidung der korrosiven Implantatschädigung durch die Wahl elektrochemisch stabiler Werkstoffe.

Biokompatibilität:

- Keine Schädigung des Empfängerorgans durch den Implantatwerkstoff oder durch primäre Korrosionsprodukte und Abriebpartikel. Oberflächen- und Strukturkompatibilität.

Aufgrund der oben genannten Anforderungen haben sich für den klinischen Einsatz folgende Metalle durchgesetzt:

- Rostfreie Stähle (VA-Stahl)
- Kobalt-Basislegierungen
- cp (commercially pure) Titan und Titanlegierungen



Keramische Werkstoffe



Keramische Werkstoffe - Grundlagen: Definition

Als Minimaldefinition keramischer Werkstoffe kann gelten:

„Keramische Werkstoffe sind anorganisch und nichtmetallisch. In der Regel werden sie bei Raumtemperatur aus einer Rohmasse geformt und erhalten ihre typischen Werkstoffeigenschaften durch einen Sintervorgang bei hohen Temperaturen.“ (DIN V ENV 12212)

Die offizielle Definition der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG) lautet:

„Keramik ist ein Zweig der chemischen Technologie oder Hüttenkunde, der sich mit der Herstellung keramischer Werkstoffe und Weiterverarbeitung bis zum keramischen Erzeugnis befasst. Keramische Werkstoffe sind anorganisch, nichtmetallisch (dabei sind aber durchaus auch metallische Bindungsanteile zulässig), in Wasser schwer löslich und zu wenigstens 30% kristallin. In der Regel werden sie bei Raumtemperatur aus einer Rohmasse geformt und erhalten ihre typischen Gebrauchseigenschaften durch eine Temperaturbehandlung, meist über 300°C. Gelegentlich geschieht die Formgebung auch bei erhöhter Temperatur oder gar über den Schmelzfluss mit anschließender Kristallisation.“

Dagegen umfasst im angelsächsischen Sprachgebrauch der Begriff „ceramics“ zusätzlich auch Glas, Email, Glaskeramik und anorganische Bindemittel (Zement, Kalk, Gips), also alle Festkörperwerkstoffe, die aus anorganischen, nichtmetallischen Stoffen aufgebaut sind. Zusätzlich gehören nach dieser Definition also auch Werkstoffe, die bevorzugt in einkristalliner Form verwendet werden, wie die Edel- und Halbedelsteine (Diamant, Rubin, Saphir u.a.) sowie die Halbleiter (Silizium, Galliumarsenid u.a.) zu den Keramiken. Das führt z.B. dazu, dass die wichtigsten der heute in der Elektrotechnik verwendeten Werkstoffe zu den Keramiken gezählt werden.



aus: Verband der Keramischen Industrie e.V.: Brevier Technische Keramik; H. Schaumburg: Keramik

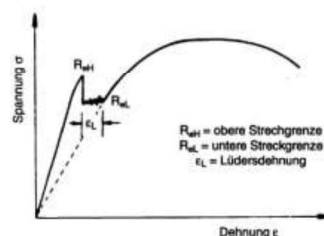
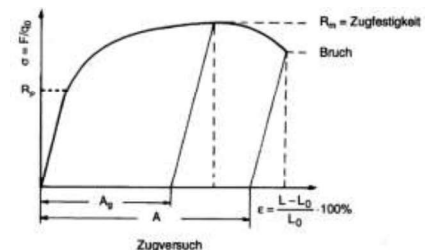
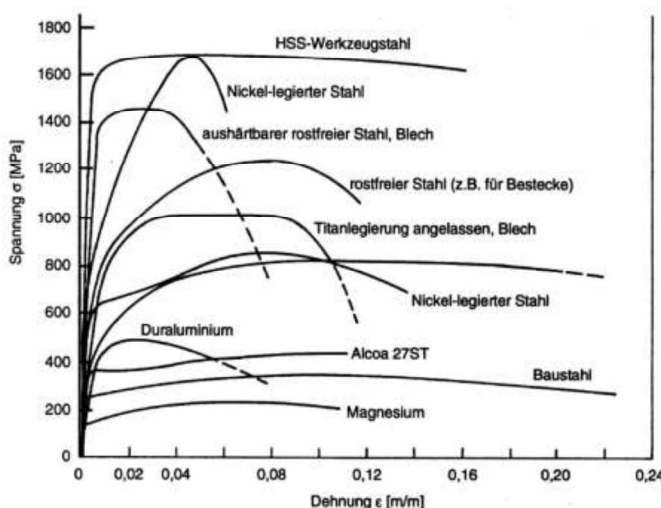
3.3 Materialien für Implantate WS-17/18

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile, Universität Stuttgart

Einführung

Seite 19 / 38

Verformungsverhalten realer Werkstoffe: Metalle



entscheidende Faktoren

- m Kristallstruktur (gleiche Größe der Gitterbausteine, Fehlstellen(Versetzen), Packungsdichte Gleitebenen), ...)
- m Bindungscharakter (ungerichtet, Gitterbausteine keine Ionen)
- m Korngrenzen, Fremdatome, ...



plastische Verformung durch Versetzungsgleiten möglich



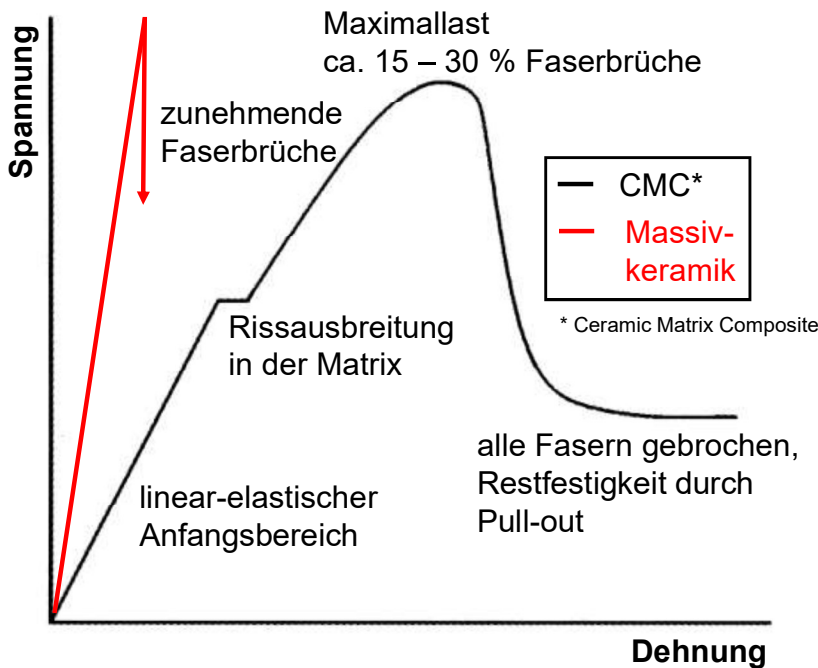
3.3 Materialien für Implantate WS-17/18

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile, Universität Stuttgart

Einführung

Seite 20 / 38

Verformungsverhalten realer Werkstoffe: Keramiken



idealisiertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines faserverstärkten keramischen Verbundwerkstoffes

Versagensverhalten von Massivkeramiken:

- m Kristallstruktur (unterschiedliche Größe der Gitterbausteine)
- m Bindungscharakter (kovalent, d.h. gerichtet oder ionisch, d.h. unterschiedliche Ladung und Größe der Gitterbausteine)



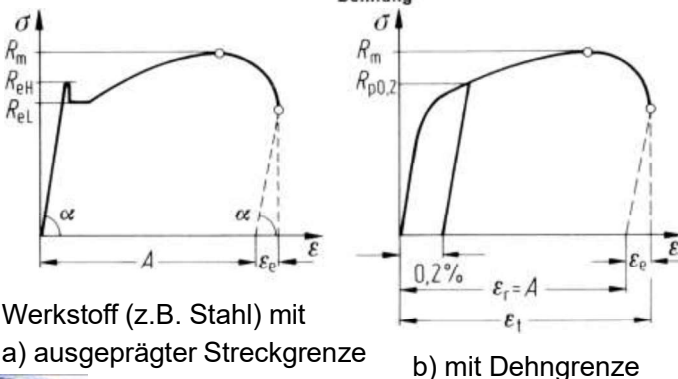
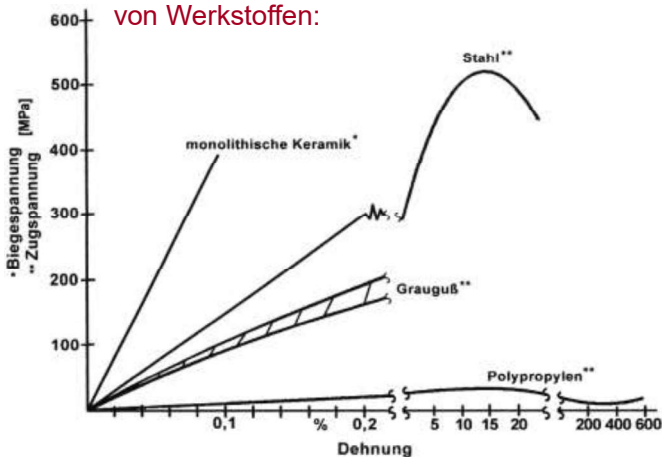
keine plastische Verformung möglich

Maßnahmen zur Duktilisierung

- m Einlagerung von Verstärkungskomponenten, die überkritisches Risswachstum durch energiedissipierende Prozesse vermeiden
- m „quasi-Duktilität“ und Schadenstoleranz durch Verstärkungsphasen (Fasern, Teilchen, Whisker, ...)

Keramiken vs. Metalle

Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Werkstoffen:



	Keramik	Metall
Härte	↑	↓
Hochtemperaturfestigkeit	↑	↓
Thermische Ausdehnung	↓	↑
Duktilität	↓	↑
Korrosionsbeständigkeit	↑	↓
Verschleißfestigkeit	↑	↓
elektrische Leitfähigkeit	↑ ↓	↑
Dichte	↓	↑
Wärmeleitfähigkeit	↑ ↓	↑

aus: Breiter Technische Keramik, Verband der Keramischen Industrie e.V.

Metalle: Spannungsminderung an Defektstellen durch plastische Verformung.

Keramik: Festigkeit nach dem „weakest-link-Modell“ (Abhängigkeit vom kritischen Defekt und der Defektverteilung).

Keramiken weisen statistische Streuung der Festigkeit auf in Abhängigkeit von: Werkstoffzusammensetzung, Korngröße der Ausgangs- und Zusatzmaterialien, Fertigungsbedingungen und Herstellverfahren.

Eigenschaften gebräuchlicher Werkstoffe der technischen Keramik

	Dichte ρ [g/cm ³]	Schmelztemp. / Zersetzung T_s, T_m [°C]	Max. Einsatz- temperatur T_{max} an Luft [°C]	Wärmeleit- fähigkeit λ_{30-100} [W/mK]	Wärmeaus- dehnungs- koeff. $\alpha_{20-1000}$ [10 ⁻⁶ 1/K]	Elastizitäts- modul E [GPa]	Härte nach Vickers HV ohne Angabe [kp/mm ²]	Biegebruch- festigkeit $\sigma_B, \sigma_{f,m}$ [MPa]	Bruch- zähigkeit K_{IC} [MNm ^{-3/2}]
Al ₂ O ₃	3,7 - 3,97	2050	1400 - 1700	30 ₂₀ - 15 ₁₀₀₀	7,0 - 8,8	300 - 380	1700 - 2370	300 - 520	3 - 5
TiO ₂	4,23	1860	1000	11,7 ₂₅	9	230	880 HV 0,5	140	3,2
ZrO ₂ PSZ	5,0 - 6,27	2700	900 - 1600	1,5 - 3	5,0 - 10,0	200 - 210	1100 - 1250	500 - 1000	bis 12
SiO ₂	1,92 - 2,65	1725 - 1830	1000	ca. 1,4	0,5 _{amorph} - 12,3	30 - 70	741 HV5 - 1120	30 - 40	amorph: 0,79
C Graphit	2,1 - 2,3	3800	450	1000-1500 (a,b); 4 - 6 (c)	-1,5 (a,b); 28,3 (c)	1000 (a,b); 36 (c)		120 (a,b)	
C Diamant	3,51	3800*	400	400 - 2000	1,1	1050	4500-10000	850	3,5
SiC SSIC	3,08 - 3,20	2760	1400 - 1750	120 ₂₀ - 40 ₁₀₀₀	4 - 4,8	370 - 450	2500 - 3300	300 - 800	3 - 4 (8)
Si ₃ N ₄	3,11 - 3,21	1910*	1100 - 1650	(15 - 43) ₂₀	3,3	180 - 800	1500 - 2200	600 - 1500	4 - 5 (10)
TiC	4,94	3017	600 - 800*	17,2	7,4 - 7,8	300 - 450	ca.3000 HV 0,5	225 - 450	1,7 - 3,8
TiN	5,21	2950*	600 - 700*	28,9	9,4	ca. 260	ca.2400 HV 0,5	493	3,4 - 5,5
B ₄ C	2,52	2445	600 - 1447	(30 - 42) ₂₅	4,5 - 5,6	450 - 470	4980	310 - 350	2,9 - 3,7
AlN	3,0 - 3,26	2400-2800*	1000 - 1900	140 - 320	2,7 - 5,6	310 - 375	1230	300 - 350	3,35
1 C 60	7,85	1460	< 500	(48 - 58) ₂₀	11,5 ₀₋₁₀₀	206	490-550 HV 10	Zug: ca. 800	140
GG-20	7,15	1120 - 2000	< 500	45 - 52	10,5-12 ₀₋₁₀₀	90 - 115	160-240 HV 10	Zug: bis 200	< 20

- Anmerkungen:
- Viele wichtige Eigenschaften technischer Keramik, z.B. funktionelle Eigenschaften der Elektrokeramiken, sind hier nicht aufgeführt. Diese Liste soll lediglich wichtige Werte für die gängigsten Keramiken veranschaulichen.
 - Werkstoffkenndaten für Keramiken streuen in der Regel sehr stark, abhängig vom Herstellungsverfahren, Dichte und Porosität, Reinheit und Korngrößenverteilung der Rohstoffe, dem Gefüge, etc. Die hier wiedergegebenen Werte sind Beispiele aus der Literatur.
 - Die Werte sind i.d.R. für Raumtemperatur und Normaldruck angegeben. Thermophysikalischen Werte werden i.d.R. über Temperaturbereiche angegeben. Die Temperaturen sind daher als Index in °C beigestellt.
 - Die mit * markierten Temperaturen sind Zersetzungs- bzw. Sublimationstemperaturen.

Quellen: Brevier Technische Keramik; H. Schaumburg: Keramik; D.W. Richerson: Modern Ceramic Engineering; AZoM.com; weitere Quellen

3.3 Materialien für Implantate WS-17/18

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile, Universität Stuttgart

Einführung

Seite 23 / 38

Anwendungsbeispiele für Keramische Werkstoffe

Keramik im allgemeinen Maschinenbau



INCERAMICS S.A., Polen



Semback GmbH & Co. KG, Deutschland

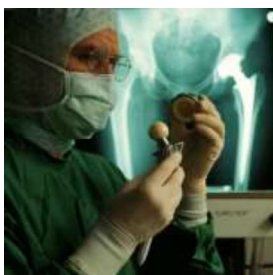


Rauscher Steinbach GmbH, Deutschland



Rauscher Steinbach GmbH, Deutschland

Keramik in der Medizintechnik



CERAMTEC, Deutschland



creamed GmbH & Co., Deutschland



creamed GmbH & Co., Deutschland

3.3 Materialien für Implantate WS-17/18

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile, Universität Stuttgart

Einführung

Seite 24 / 38

Polymere

Polymere: Geschichte

19. Jahrhundert

- natürliche Polymere wie Bernstein, Schildpatt und Horn gab es schon immer
- **1862:** Erster semi-synthetische Kunststoff: Cellulose Nitrat
- Verwendung als Messergriffe, Manschetten und Kragen



20. Jahrhundert

- Erhöhter Bedarf an Billardkugeln -> Bedarf an Elfenbein steigt
- John Wesley Hyatt entwickelt Celluloid aus Kollodium und Kampfer
- Spätere Verwendung bei Film und Fotografie



Polymere: Geschichte

- 1883: J.W. Swan produziert Fäden aus Nitrocellulose
- M. Fremery und J. Urban stellen **Kupferseide** her
- 10 Jahre später: Cellulose wird durch günstigeren Zellstoff ersetzt, Beginn der **Viskose**-Produktion
- 1885: A. Spitteler entwickelt das **Kunsthorn**

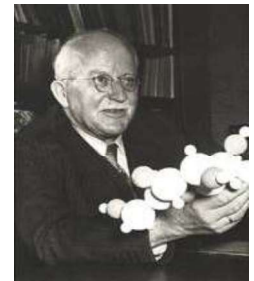


- 1907: Herstellung von Phenol- und Resorcinharzen durch L.H. Baekeland → **Bakelit**



- 1909: Stobbe stellt **Polystyrol** her

- 1912: F. Klatte (1880-1934) entdeckt das **Polyvinylchlorid** (PVC)



- 1922: H. Staudinger, befasst sich mit der Struktur von Makromolekülen



Polymere: Geschichte

- 30er Jahre: O. Röhm und W. Bauer entdecken den ersten vollsynthetischen Glasersatzstoff → **Plexiglas**
- 1930 - 1940: Entwicklung von **Perlon** und **Nylon** durch Schlack (I.G. Farben) bzw. W.H. Carothers (DuPont)
- 1935: O. Bayer (1902-1982) stellt **Polyurethane** her (I.G. Leverkusen)
- 1933: Entwicklung von Hochdruck-**Polyethylen**-Darstellung bei ICI
- 1955: K. Ziegler und G. Natta entdecken Verfahren zur **Polyethylen**-Darstellung bei Normaldruck (1957: Darstellung von **Polypropylen**)



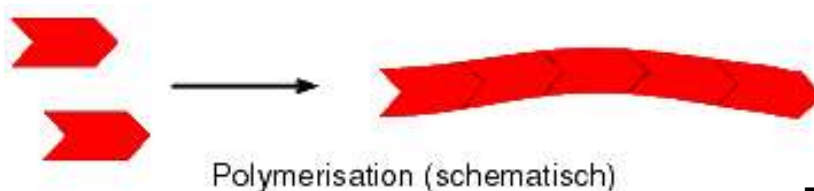
Polymere: Polymerisation

Die Polymerisation ist eine chemische Reaktion, bei der Monomere, meist ungesättigte organische Verbindungen, unter Auflösung der Mehrfachbindung zu Polymeren (Moleküle mit langen Ketten, bestehend aus miteinander verbundenen Monomeren) reagieren. Zum Teil werden dabei Katalysatoren verwendet. Dabei unterscheidet man zwischen **Homo-Polymerisation**, bei der nur eine Monomerart umgesetzt wird, und **Co-Polymerisation**, bei der zwei oder mehr verschiedene Monomere zur Reaktion gebracht werden. Die Produkte der Polymerisation nennt man Polymerisate.

Bei den Polyreaktionen werden zwei Klassen unterschieden:

- **Stufenwachstumsreaktionen:** bereits vorhandene Kettensegmente können zu größeren Ketten zusammenwachsen; z.B. durch
 - Polyaddition
 - Polykondensation
- **Kettenwachstumsreaktionen:** ein Molekül nach dem anderen lagert sich an das sogenannte reaktive Kettenende an; z.B. durch
 - radikalische Polymerisation
 - ionische Polymerisation und
 - Koordinationspolymerisation

Polymere: Polymerisation

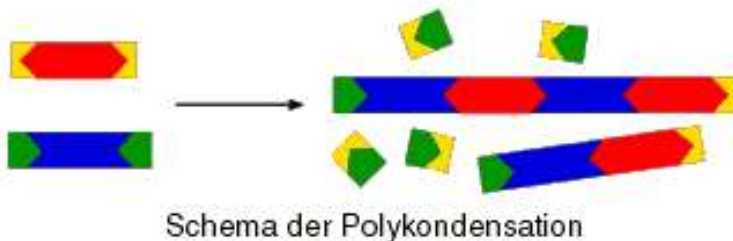


Rohstoffe: - Zellulose

- Kohle

- Erdöl

- Erdgas



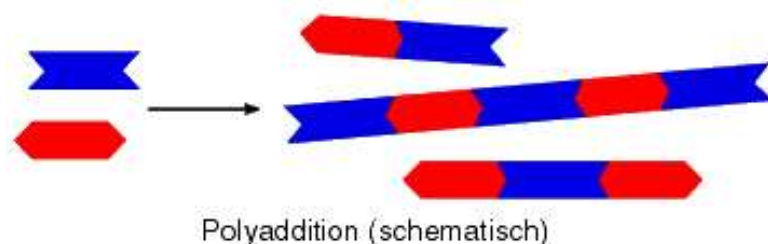
Grundbausteine: - Kohlenstoff (C)

- Wasserstoff (H)

- ev. Sauerstoff (O₂)

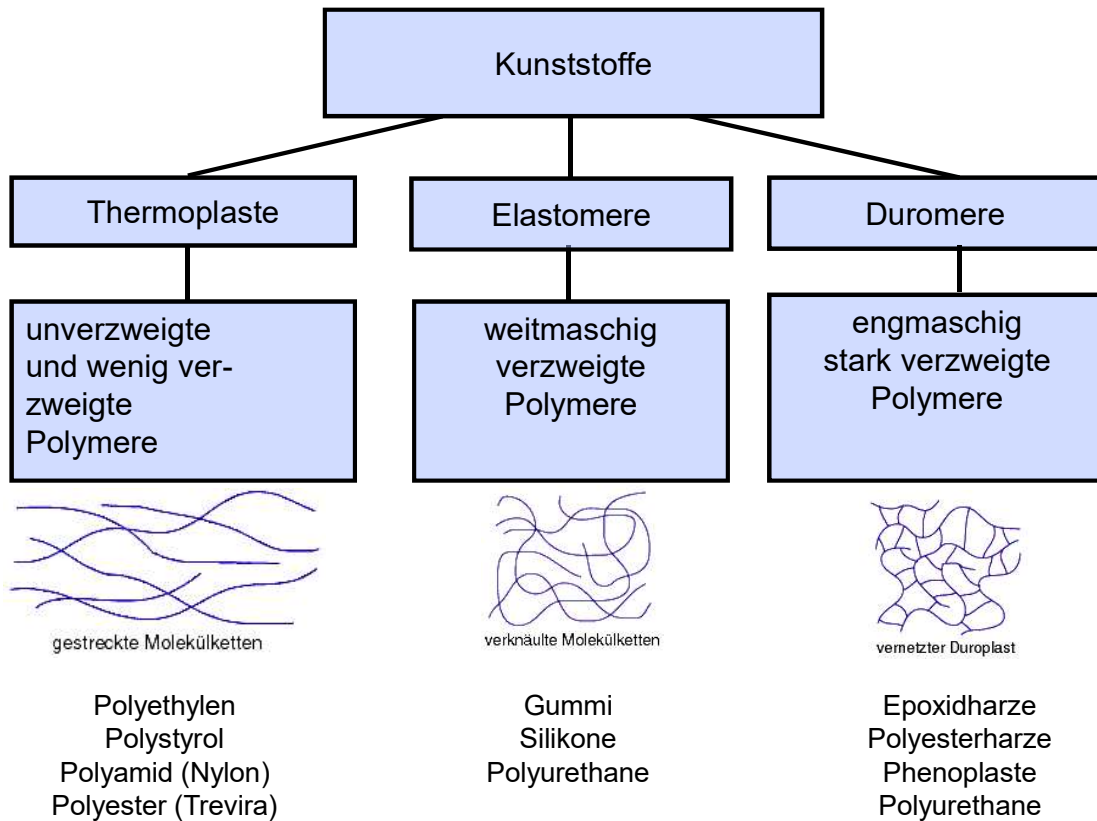
- ev. Stickstoff (N₂)

- ev. Schwefel (S)



Polymere: Verarbeitung

Klassifizierung von Kunststoffen



Faserverbundwerkstoffe

Warum Verbundwerkstoffe?

immer komplexere Lastenhefte für hochbelastete **Strukturbauteile**:

niedrige Dichte

Leichtbaustrukturen (*Einsparung primärer Energieträger, Emissionsreduzierung - Schadstoffnormen, verbesserte Ökobilanz*)

technische Leistungsfähigkeit

mechanische Eigenschaften

(*hohe Festigkeit, E-Modul, schadenstolerantes Versagensverhalten*)

thermische und chemische Beständigkeit

tribologische Eigenschaften (*Reibungskoeffizient, Verschleiß*)



komplexe Anforderungsprofile begrenzen
den Einsatz konventioneller
monolithischer Bauteile

Verbundwerkstoffe – Einteilung nach Matrices

Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix (Polymer Matrix Composites – PMC)

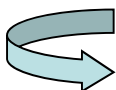
Einlagerung von **Partikeln** hauptsächlich zur **Erhöhung der Funktionalität**
(*thermo-/elektro-physikalisch, chemische Beständigkeit*)
aber auch aus fertigungstechnischen Gründen (*Verarbeitbarkeit*);
Faserverstärkung zur **Erhöhung der Festigkeit und des E-Moduls**

Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix (Metal Matrix Composites – MMC)

Einlagerung von **Partikeln und Fasern** vor allem in Leichtmetallmatrices zur
Erhöhung der Festigkeit und des E-Moduls besonders bei erhöhten Temperaturen

Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (Ceramic Matrix Composites – CMC)

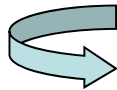
Einlagerung von **Partikeln und Fasern** zur **Erhöhung der Schadenstoleranz**
(*Quasi-duktilen Bruchverhalten*)



je nach Matrix unterschiedliche Motivation
für die Einbringung einer Verstärkungsphase

Verbundwerkstoffe – Einteilung nach Matrices

Beispiele			Einsatztemperatur [°C]										
PMC	Matrix	Verstärkungsphase	RT	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	
	Epoxy	Glasfasern											
	Phenole	Kohlenstofffasern											
	Polyimide	Aramidfasern											
MMC	Aluminium	Kohlenstofffasern											
	Titan	SiC-Partikel											
	Magnesium	Al2O3-Fasern											
CMC	(Si)SiC	Kohlenstofffasern											
	Al2O3	Al2O3-Fasern											
	Si3N4	SiC-Fasern											



**maßgeschneiderte Verbundwerkstoffe
für jeden Temperaturbereich**

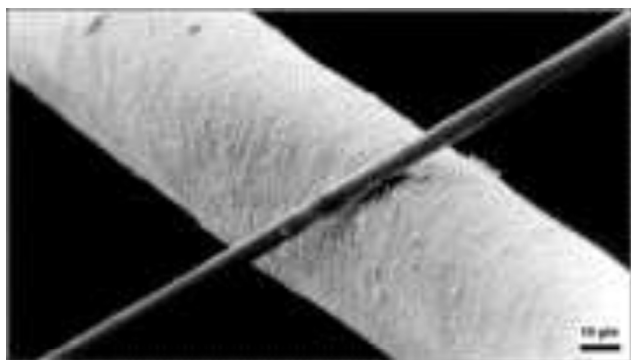
Verbundwerkstoffe

Durch Einbettung von z.B. Kohlenstofffasern in eine thermoplastische Matrix wird eine räumliche Variation der makroskopischen mechanischen Eigenschaften induziert (Anisotropie).

Faserverbundwerkstoffe zeigen weitere positive Eigenschaften:

- Allergierisiko: keine allergischen Reaktionen durch freigesetzte Metallionen zu erwarten.
- Röntgentransparenz: gegebenenfalls Beimengung von Kontrastmitteln
- Artefaktfreiheit in modernen diagnostischen Verfahren, wie z.B. CT oder NMR

6 µm dicke Kohlenstoff-Faser
im Vergleich zu einem 50 µm
dicken Menschenhaar



de.wikipedia.org/ wiki/Kohlenstofffaser

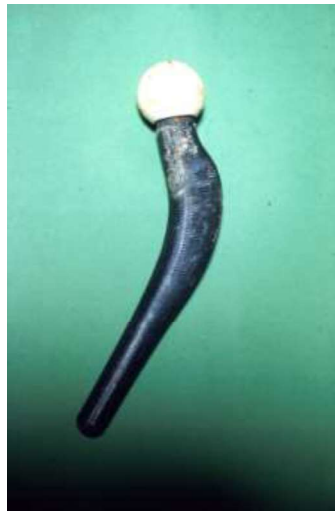
Verbundwerkstoffe

Röntgenliege hergestellt aus einem Kohlenstofffaser-UD-Prepreg mit Epoxidharz



www.krempel.com/krempel_2002_de/faser7.htm

Kohlenstofffaser-verstärkter Kunststoff



A. Bernstein, Universitätsklinik Freiburg

Funktion der Matrix

(Epoxidharze, Polysulfon, Polyamide, PEEK):

- mechanisches Stützen der Faser
- Kraftübertragung von Faser zu Faser
- Festigkeit bei Beanspruchung senkrecht zur Faserrichtung
- Schutz vor aggressiven Medien
- Schutz des Gewebes vor Faserpartikeln
- Interphasen (Übergangsphasen) und Interfaces (Grenzflächen)

Verbundwerkstoffe

Dieser thermoplastische Verbundwerkstoff ist ein biokompatibler, mit Kohlenstofffasern verstärkter Hochleistungswerkstoff für implantierbare Medizinanwendungen. Er wurde speziell für die Verwendung in lasttragenden Implantaten mit dauerhaftem Blut-, Knochen- oder Gewebekontakt entwickelt. Die nicht-metallischen Biomaterialien kombinieren die für Metalle typischen Eigenschaften mit den Vorteilen von Polymeren.

Bei der Herstellung des Materials nach ISO 9001 werden überdurchschnittlich lange Kohlefasern zusammen mit Peek-Optima Polymer zu vorimprägnierten Bändern verarbeitet. Diese Bänder können zu Rundstangen oder zu anderen Halbzeugformen weiter verarbeitet werden.

Die mechanischen Eigenschaften dieses High-Tech Werkstoffes sind laut Invibio nahezu vergleichbar mit den in der Medizintechnik verwendeten metallischen Materialien wie Kobalt-Chrom Stählen, Titan-Legierungen oder Edelstählen, ermöglichen jedoch zusätzlich eine störungsfreie Abbildung in den zur Diagnose wichtigen bildgebenden Verfahren.



www.invibio.com

Fixationssysteme aus Endolign Verbundwerkstoff