

Grundlagen - Werkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg^{ID}

Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: christian.willberg@h2.de

Teile des Skripts sind von
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Häberle
übernommen

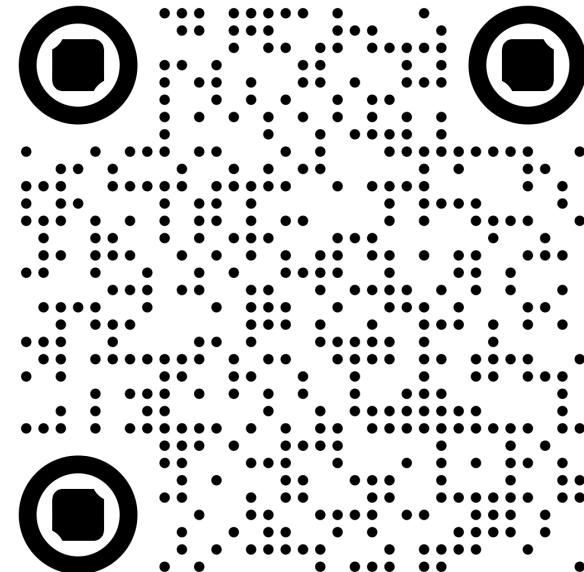
Bildreferenz



Vorlesung

Rahmen

- Essen oder Trinken sind okay,
aber leise
- Probleme bei der
Kinderbetreuung
- Alles verbleibt in Raum!
- Fragen



Inhalte nach Modulhandbuch

- Einteilung von Werkstoffen
- Werkstoffstruktur, Gefüge, Legierungen, Gitterbaufehler
- ideale und reale Zustandsdiagramme, Gleichgewichts- und Ungleichgewichtszustände
- Wärmebehandlung, Härteverfahren
- Labor: Zugversuch, Härteprüfung

Werkstoffe

Was sind Werkstoffe?

Werkstoffe im engeren Sinne nennt man Materialien im festen Aggregatzustand, aus denen Bauteile und Konstruktionen hergestellt werden können.

Anwendungsbereiche

- Metalle
 - Eisen, Stahl, Gusseisen
 - Nicht Eisen
- Kunststoffe
- Keramiken
- Verbundwerkstoffe



Gußeisen - Stahl

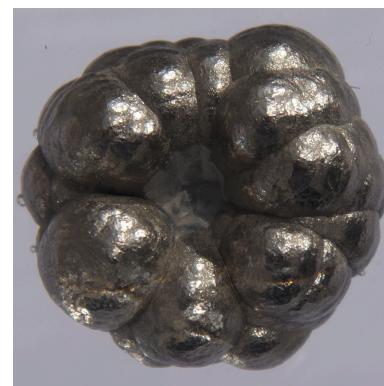


Nicht Eisen Metalle

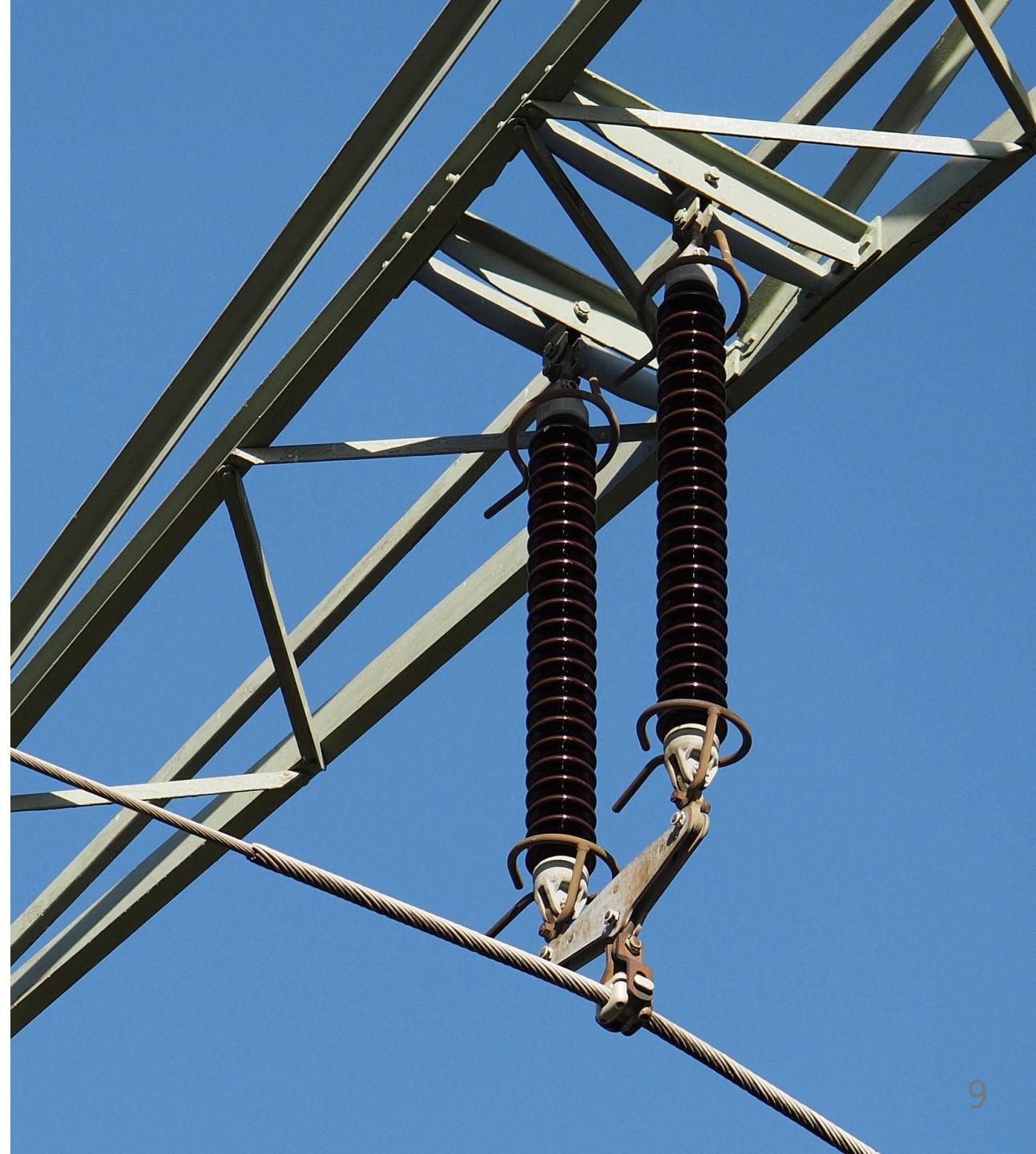
- Kupfer ist ein sehr guter elektrischer und thermischer Leiter



- Magnesium findet im Leichtbau Anwendung
- Titan und Titanlegierungen
 - hohe Festigkeit und Warmfestigkeit
 - Korrosionsbeständig
- Nickel
 - Korrosionsbeständigkeit
 - hohe Warmfestigkeit



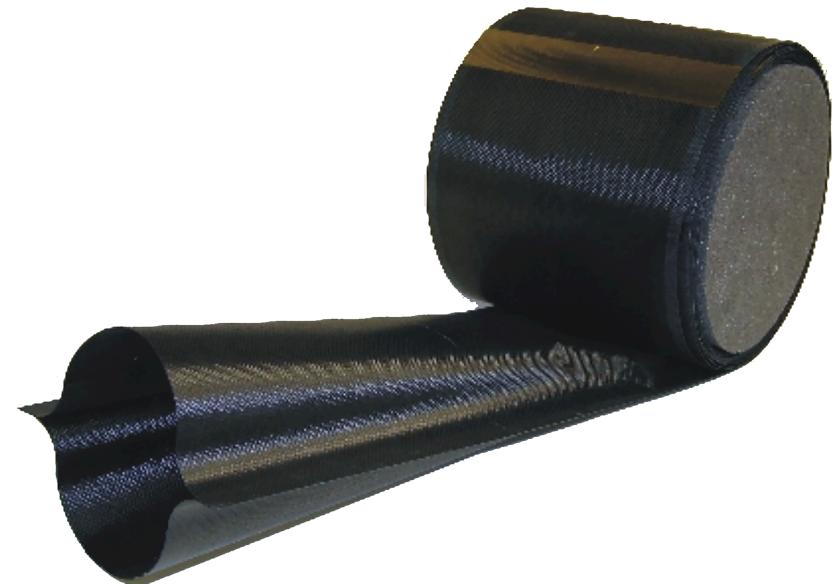
Keramiken



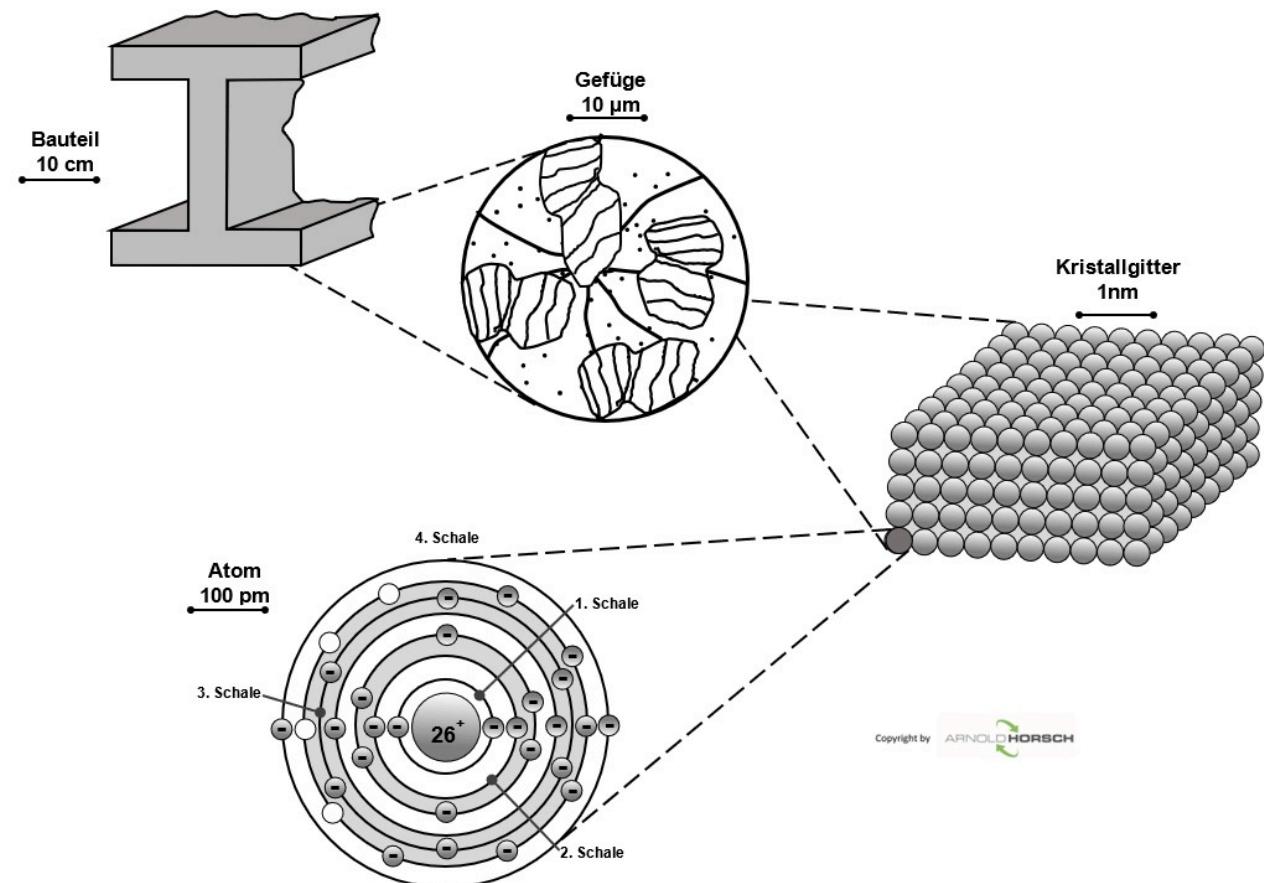
Gläser



Faserverbundwerkstoffe



Struktur von Werkstoffen



- Atomistische Struktur (Art der atomaren Bausteine)
- Feinstruktur (Bindungen zwischen den atomaren Bausteinen und deren geometrische An-ordnung)
- Mikrostruktur (Gefüge – Bereiche geometrischer Anordnung, die im Werkstoffinnern durch Grenzflächen voneinander getrennt sind)
- Makrostruktur (Grobstruktur – Gesamterscheinung eines Werkstoffes bei der Herstellung und dem Einsatz eines Bauteils)

Periode

	1	
1	H Wasserstoff 2,2 1,008 0,09	2
2	Li Lithium 0,98 0,53	Be Beryllium 1,57 9,0122 1,85
11	22,990	12 24,305
3	Na Natrium 0,93 0,97	Mg Magnesium 1,31 1,74
19	39,098	20 40,078
4	K Kalium 0,82 0,86	Ca Calcium 1,0 1,55
37	85,468	38 87,62
5	Rb Rubidium 0,82 1,53	Sr Strontium 0,95 2,63
55	132,91	56 137,33
6	Cs Caesium 0,79 1,90	Ba Barium 0,89 3,59
87	223,03	88 226,03
7	Fr Francium 0,7 ?	Ra Radium 0,9 5,5
89	227,03	Ac Actinium 1,1 10,1

Legende

Ordnungszahl Atomgewicht
 Symbol **Cl**
 Name Chlor
 Elektronegativität Dichte
 Serie

Symbol schwarz = Feststoff
 unterstrichen = radioaktiv
 Serie (Flächenfarbe)

Atomgewicht blau = Flüssigkeit
 grau = unbekannt
 Dichte rot = kg / m³
 schwarz = kg / dm³
 grau = unbestimmt

Metalle
 Erdalkalimetalle
 Übergangsmetalle
 Lanthanoide
 Actinoide
 Halogenen
 Edelgase
 unbekannt

Schraffur
 durchgehend = natürliches Element
 schraffiert = künstliches Element

Gruppe

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
H Wasserstoff 2,2 1,008 0,09	He Helium — 0,18	Li Lithium 0,98 0,53	Be Beryllium 1,57 9,0122 1,85	Na Natrium 0,93 0,97	Mg Magnesium 1,31 1,74	Sc Scandium 1,36 2,98	Ti Titan 1,54 4,50	V Vanadium 1,63 6,11	Cr Chrom 1,66 7,14	Mn Mangan 1,55 7,43	Fe Eisen 1,83 7,87	Co Cobalt 1,88 8,90	Ni Nickel 1,91 8,91	Cu Kupfer 1,90 8,92	Zn Zink 1,65 7,14	Ga Gallium 1,81 5,90	Ge Germanium 2,01 5,32	As Arsen 2,18 5,73	Se Selen 2,55 4,82	Cl Chlor 3,16 3,21	Ar Argon — 1,78
19 39,098	20 40,078	21 44,956	22 47,867	23 50,942	24 51,996	25 54,938	26 55,845	27 58,933	28 58,693	29 63,546	30 65,380	31 69,723	32 72,630	33 74,922	34 78,971	35 79,904	36 83,798				
Kalium 0,82 0,86	Calcium 1,0 1,55	Scandium 1,36 2,98	Titan 1,54 4,50	Vanadium 1,63 6,11	Chrom 1,66 7,14	Mangan 1,55 7,43	Eisen 1,83 7,87	Cobalt 1,88 8,90	Nickel 1,91 8,91	Kupfer 1,90 8,92	Zink 1,65 7,14	Gallium 1,81 5,90	Germanium 2,01 5,32	Arsen 2,18 5,73	Selen 2,55 4,82	Brom 2,96 3,12	Krypton 3,0 3,75				
37 85,468	38 87,62	39 88,906	40 91,224	41 92,906	42 95,95	43 96,906	44 101,07	45 102,91	46 106,42	47 107,87	48 112,41	49 114,82	50 118,71	51 121,76	52 127,60	53 126,90	54 131,29				
Rubidium 0,82 1,53	Strontium 0,95 2,63	Yttrium 1,22 4,47	Zirconium 1,33 6,50	Niob 1,6 8,57	Molybdän 2,16 10,28	Technetium 1,9 11,50	Ruthenium 2,2 12,37	Rhodium 2,28 12,45	Palladium 2,20 12,02	Silber 1,93 10,49	Cadmium 1,69 8,64	Indium 1,78 7,31	Zinn 1,96 7,26	Antimon 2,05 6,70	Tellur 2,1 6,25	Iod 2,66 4,94	Xenon 2,6 5,90				
55 132,91	56 137,33	57 138,91	58–71	72 178,49	73 180,95	74 183,84	75 186,21	76 190,23	77 192,22	78 195,08	79 196,97	80 200,59	81 204,38	82 207,20	83 208,98	84 209,98	85 209,99	86 222,02			
Caesium 0,79 1,90	Barium 0,89 3,59	Lanthan 1,10 6,15	siehe unten	Hafnium 1,3 13,3	Tantal 1,5 16,65	Wolfram 2,36 19,25	Rhenium 1,9 21,0	Osmium 2,2 22,6	Iridium 2,2 22,56	Platin 2,28 21,45	Gold 2,54 19,32	Quecksilber 2,0 13,55	Thallium 1,62 11,85	Blei 2,33 11,35	Bismut 2,02 9,75	Polonium 2,0 9,20	Astat 2,2 ?	Radon ?	9,73		
87 223,03	88 226,03	89 227,03	90–103	104 267,12	105 270,13	106 269,13	107 270,13	108 269,13	109 278,16	110 281,17	111 281,17	112 285,18	113 286,18	114 289,19	115 289,20	116 293,20	117 293,21	118 294,21			
Fr Francium 0,7 ?	Radium 0,9 5,5	Actinium 1,1 10,1	siehe unten	Rutherfordium ?	Dubnium ?	Seaborgium ?	Bohrium ?	Hassium ?	Meltneiterium ?	Darmstadtium ?	Roentgenium ?	Copernicium ?	Nihonium ?	Flerovium ?	Moscovium ?	Livermorium ?	Tenness ?	Oganesson ?			

Lanthanoide

58 140,12	59 140,91	60 144,24	61 144,91	62 150,36	63 151,96	64 157,25	65 158,93	66 162,50	67 164,93	68 167,26	69 168,93	70 173,05	71 174,97
Ce Cer 1,12 6,77	Pr Praseodym 1,13 6,48	Nd Neodym 1,14 7,01	Pm Promethium — 7,22	Sm Samarium 1,17 7,54	Eu Europium 5,25	Gd Gadolinium 1,2 7,89	Tb Terbium 8,25	Dy Dysprosium 1,22 8,55	Ho Holmium 1,23 8,78	Er Erbium 1,24 9,05	Tm Thulium 1,25 9,32	Yb Ytterbium 6,97	Lu Lutetium 1,27 9,84
90 232,04	91 231,04	92 238,03	93 237,05	94 244,06	95 243,06	96 247,07	97 247,07	98 251,08	99 252,08	100 257,10	101 258,10	102 259,10	103 262,11
Th Thorium 1,3 11,72	Pa Protactinium 1,5 15,4	U Uran 1,38 18,95	Np Neptunium 1,36 20,45	Pu Plutonium 1,28 19,82	Am Americium 1,3 13,67	Cm Curium 1,3 13,51	Bk Berkelium 1,3 14,78	Cf Californium 1,3 15,1	Es Einsteinium 1,3 ?	Fm Fermium 1,3 ?	Md Mendelevium 1,3 ?	No Nobelium 1,3 ?	Lr Lawrencium — ?

Actinoide

Relevante Gößen

Ordnungszahl

Zahl der Protonen im Kern

Atommasse

bestimmt die Masse des Elements

Masse des Werkstoffs ist eine Kombination aus Atommasse und Dichte

Elektronegativität

bestimmt ob Atome abgegeben oder aufgenommen werden in einer Bindung

metallische Bindungen eher links

kovalente Bindungen eher rechts

Bindungen

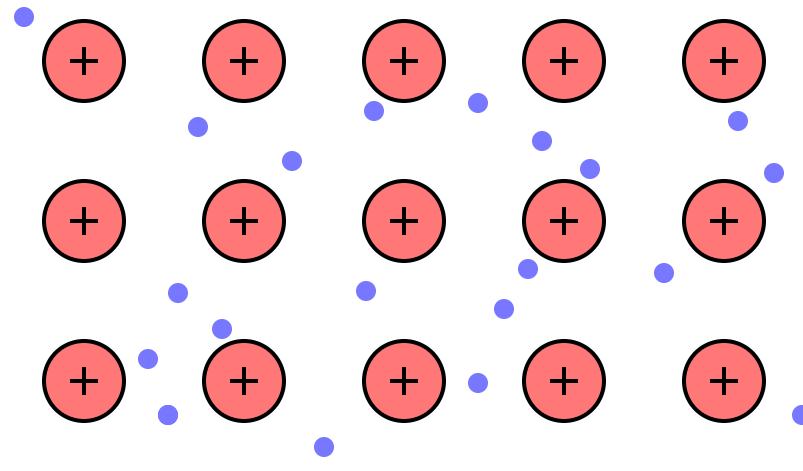
Hauptvalenzbindungen

Primärbindungen - hohe Bindungsenergie, starke Bindung

- Ionen- bzw. heteropolare Bindung
- Atom- bzw. homöopolare (oder kovalente) Bindung: polar (O-H) und unpolär (C-C, C-H)
- Metallische Bindung

Metallische Bindung

- Außenelektronen (Valenzelektronen) sind nur schwach gebunden
- es bildet sich ein Gitter (periodisch angeordneten) positiver geladener Metallionen (Atomrümpfen)
- Außenelektronen können sich innerhalb des Gitters nahezu frei bewegen, sogenanntes **Elektronengas**
- bewirkt: gute elektrische Leitfähigkeit + hohe Wärmeleitfähigkeit



Neben- oder Restvalenzbindungen

Sekundärbindungen - geringe Bindungsenergie, schwache Bindung

- van der Waals-Bindung: zwischenmolekulare Kräfte
- Wasserstoffbrückenbindung: zwei Moleküle oder zwei geeignet weit voneinander getrennte Abschnitte eines Makromoleküls treten über Wasserstoffatome in Wechselwirkung
- die Bindungsenergien sind ein bis zwei Zehnerpotenzen kleiner als die der Atombindungen.

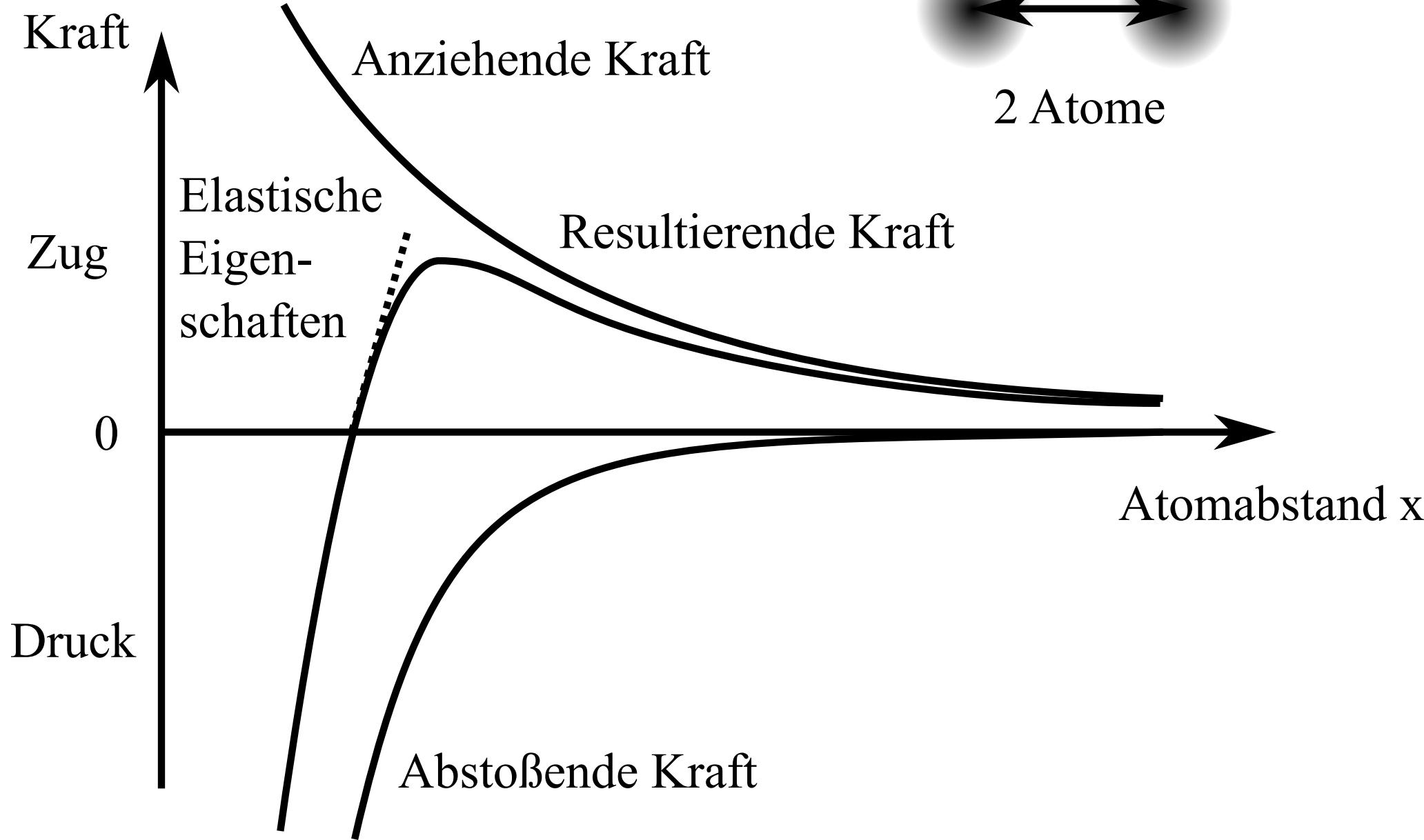
Bezeichnung	Ionenbindung oder heteropolare Bindung	Atombindung homöopolare (kovalente) Bindung	Metallische Bindung
Beteiligte Bausteine	Ionen (Metall + Nichtmetall)	Gleiche Atomart (Nichtmetall + Nichtmetall)	Gleiche Atomart (Metall + Metall)
Beschreibung des elektrischen Lade- zustandes	Positiv geladenes Ion + negativ geladenes Ion (Kation + Anion)	Atome besitzen ein oder mehrere gemeinsame Elektronenpaare, um die Edelgaskonfiguration zu erreichen	Atome geben ihre Außenelektronen an den Gesamtverband ab. Elektronen bewegen sich dort

Bezeichnung	Ionenbindung oder heteropolare Bindung	Atombindung homöopolare (kovalente) Bindung	Metallische Bindung
Von den Bindungskräften abhängige Werkstoff-eigenschaften	Im gelösten Zustand elektrisch leitfähig, kristalline Gefügestruktur	Geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit; hoher Schmelzpunkt	Sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit und Duktilität; eingeschränkte chemische Beständigkeit

Atomistische Struktur

Besteht aus

- Kern (Protonen + Neutronen) der die Masse definiert
- Hülle (Elektronen) mit verschiedenen Schalen, welche chemischen und viele physikalische Eigenschaften definiert
- Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen sorgt für Abstoßung und Anziehung
- als Elastizität oder Wärmedehnung makroskopisch zu erkennen

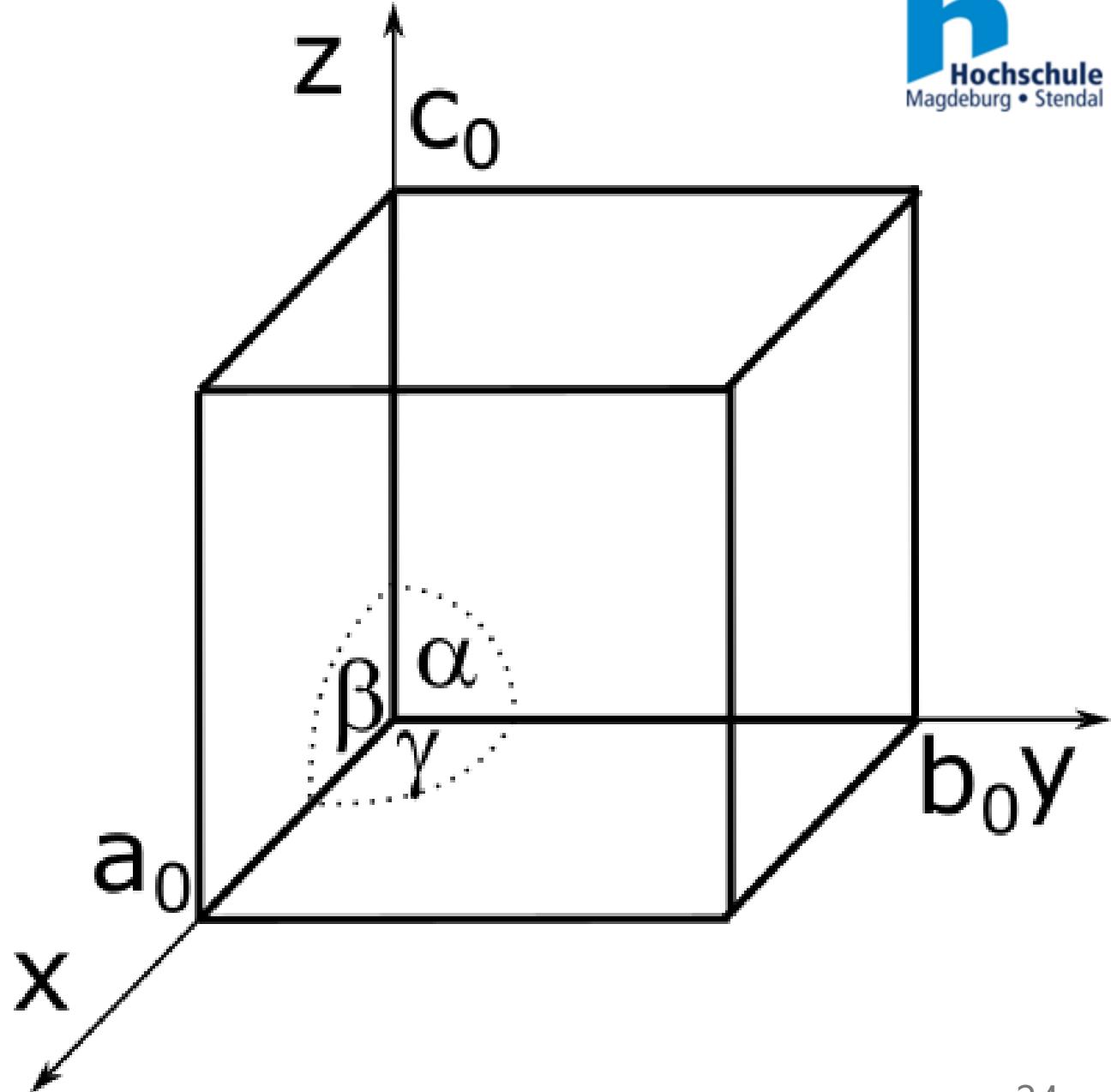


Feinstruktur

- Kristallstrukturen
- Molekülstrukturen
- Glasig-amorphe Strukturen
- Realstruktur

Raumgitter

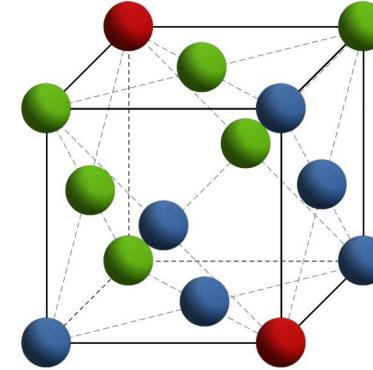
- entsteht durch die dreidimensional-periodische Verschiebung seiner Bausteine
- charakterisiert durch drei Raumachsen x , y und z liegenden Winkel α , β , γ die Abstände auf den Achsen das jeweilige Raumgitter
- a_0 , b_0 und c_0 (Gitterkonstanten)
-> Einheitszelle



Kristallsystem	Gitterkonstanten	Winkel	Beispiele
triklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Silikat-Minerale
monoklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$	Mo_2S_3 ; β -Pu
(ortho)rhombisch	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	U, S, P, Ga, γ -Sn
rhomboedrisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Hg, Sb
hexagonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	α -Ti, Mg, Zn
tetragonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	B, CuTi_3 , Sn ($T > 13,5^\circ$)

Häufigste Gitterformen bei Metallen

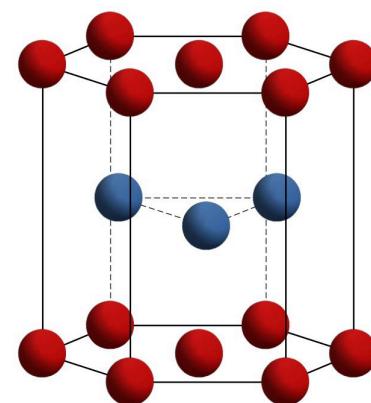
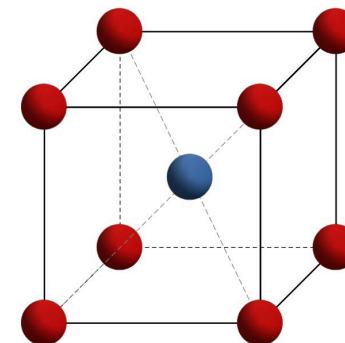
Kristallsystem	Gitterkonstanten	Winkel	Beispiele
kubisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cu, Al, Ni, Au, Ag; γ -Eisen (kfz); α -Eisen, V, Cr, W (krz); Mn, Po (kp)



Kubisch flächenzentriert (kfz)

Kubisch raumzentriert (krz)

Hexagonal dichteste Packung (hpd)



Einflüsse

- Korrosion: Angriff aggressiver Medien erfolgt an bevorzugten Ebenen
- Verformung: Plastische Verformung erfolgt entlang bevorzugter kristallografischer Ebenen und Richtungen → Gleitsysteme
- Ultraschall: Verwendung von Schwingquarzen mit speziellen kristallografischen Begrenzungsflächen
- Leitfähigkeit: Verwendung von Germanium- oder Silizium-Wafern in (1 1 1)- oder (1 0 0) - Orientierung für Halbleiterelemente
- Magnetisierung: leichteste Magnetisierung von Eisen-Silizium-Transformatorenblechen entlang der Würfelkante [1 0 0]

Polymorphie bei Metallen

- Polymorphie: ist die Ausbildung von verschiedenen Gitterstrukturen in Abhängigkeit von der Temperatur
- die verschiedenen Gitterformen sind die allotropen Modifikationen

(auch: Polymorphie des Kohlenstoffs: Graphit, Diamant,...).

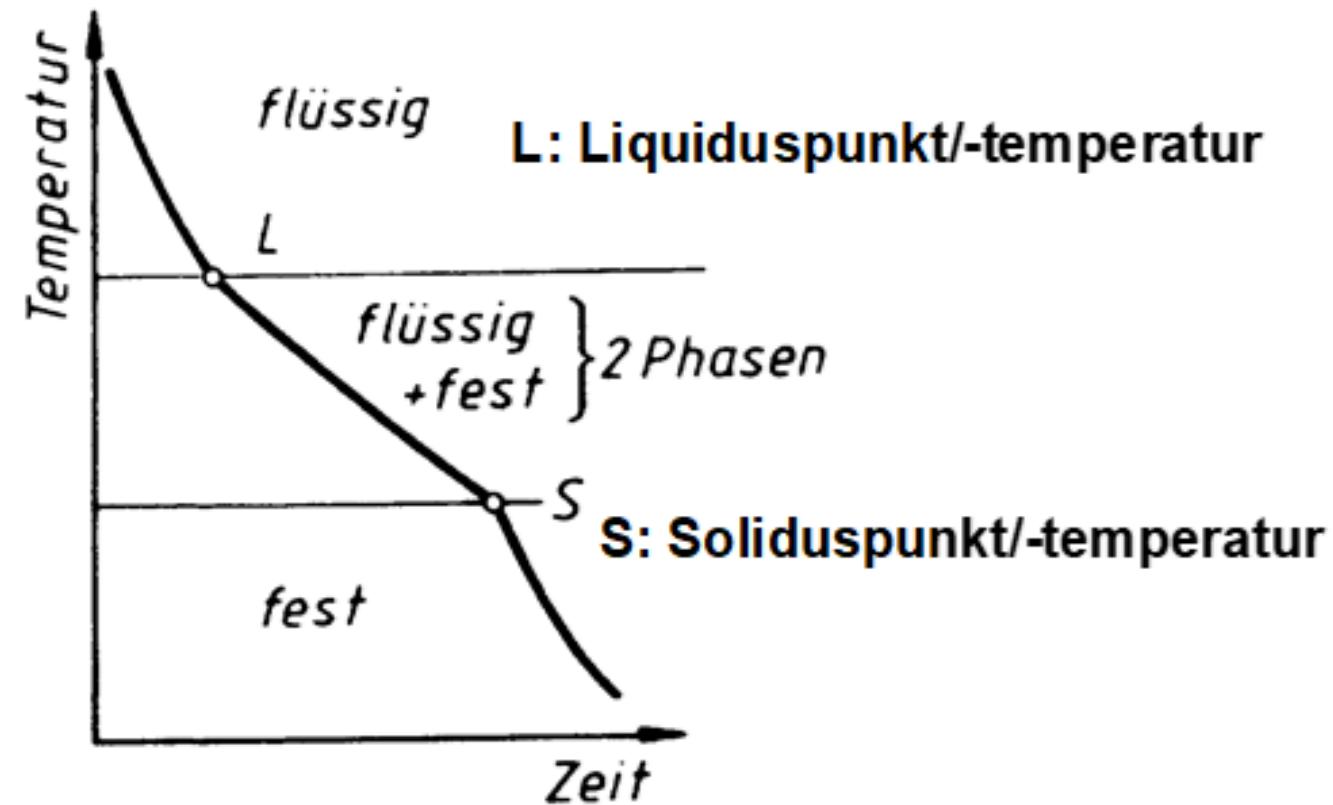
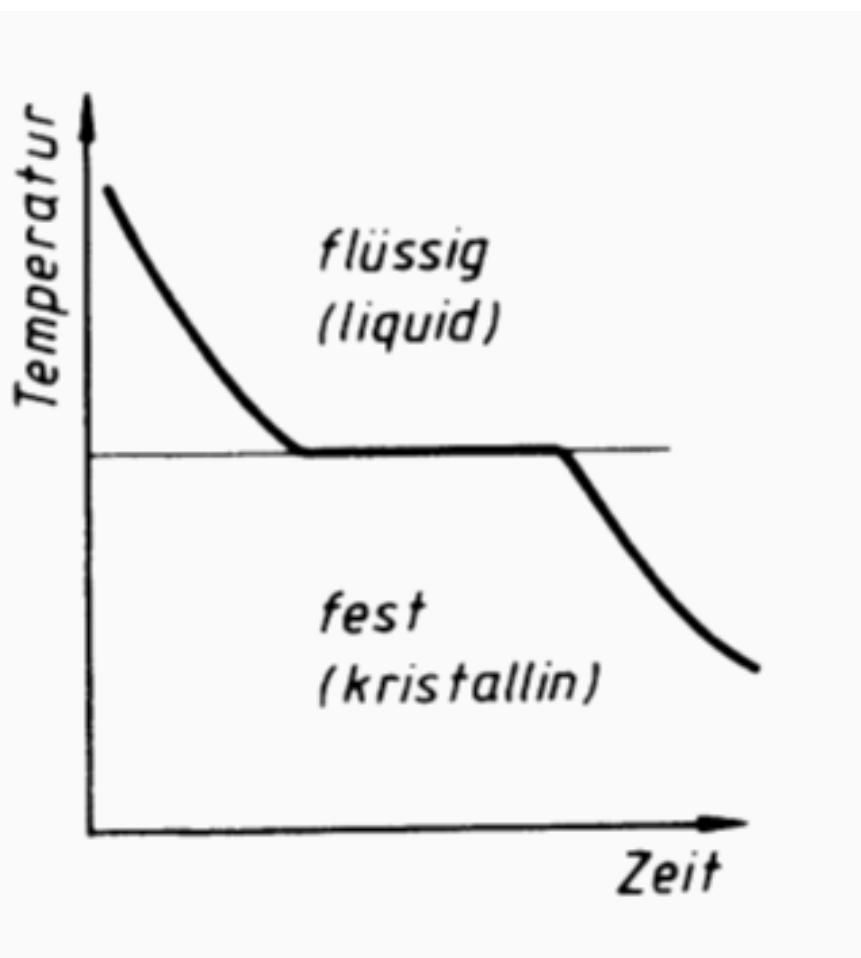
Bestimmung der Umwandlungspunkte

Dilatometrie

- Messung der Längenänderung aufgrund der Gitterumwandlung

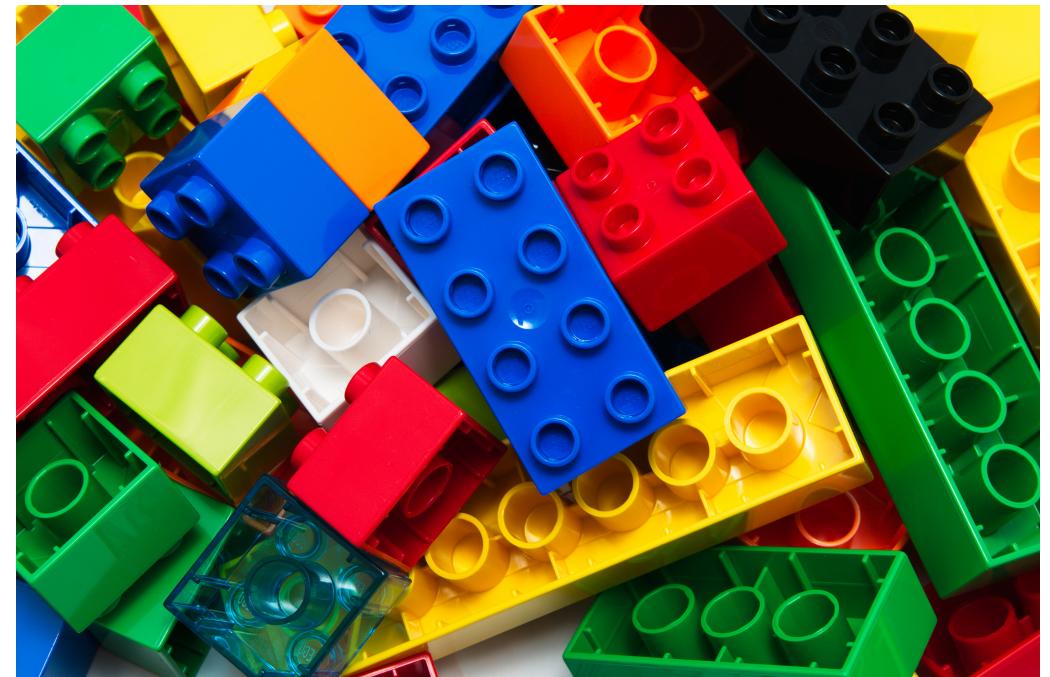
Thermische Analyse

- Aufzeichnung des Temperaturverlaufs
- Gitterwandlerungen (Phasenänderungen) brauchen Wärmeenergie oder geben sie ab
- Halte- bzw. Knickpunkte in den Erwärmungs- oder Abkühlungskurven.
- Haltepunkte: bei reinen Metallen

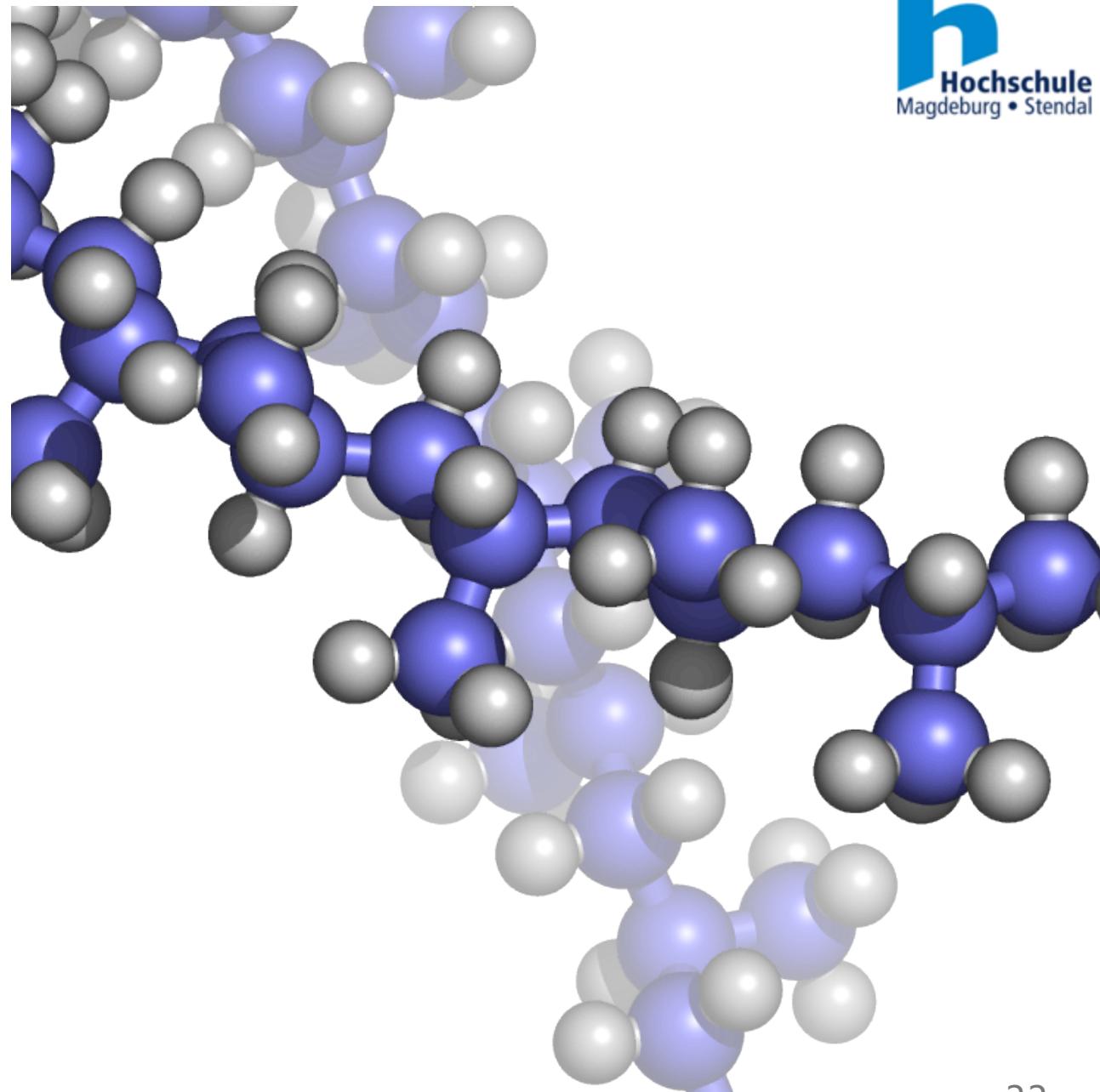


Molekülstrukturen

- typisch für nichtmetallisch-organische Werkstoffe
 - natürliche Materialien: Holz, Kautschuk, Leder, Fasern usw.
 - synthetische Kunststoffe: PMMA, Epoxid, usw.



- entsteht durch Aufbaureaktionen von monomeren Grundbausteine zu Kettenmolekülen
- innerhalb der Ketten treten Atombindungen auf
- zwischen den Ketten existieren Nebenvalenzbindungen und Molekülverhakungen

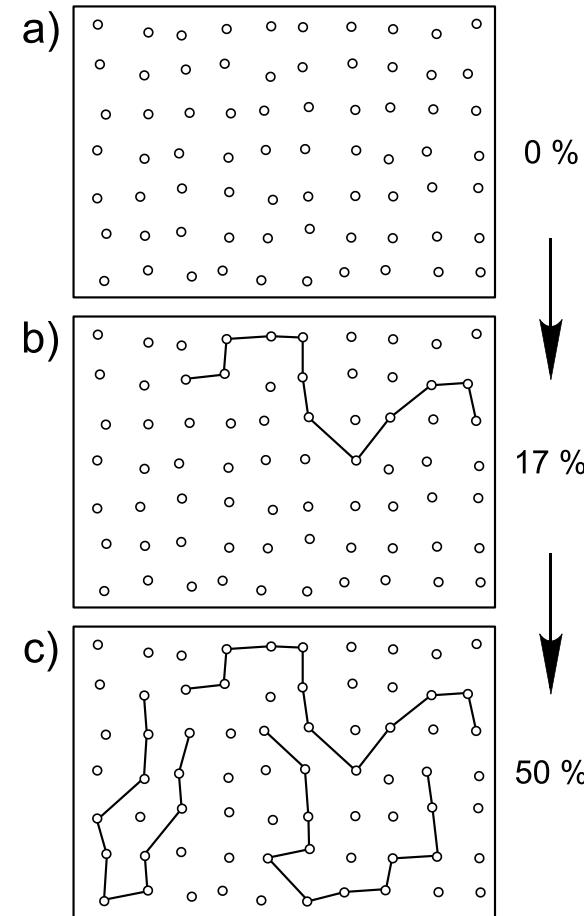


Aufbaureaktion (Polymerisation)

- Es müssen freie Bindungen in den Monomeren erzeugt werden
- die Monomere "brauchen" neue Partner, um wieder energetisches Minimum zu erreichen

Kettenpolymerisationen

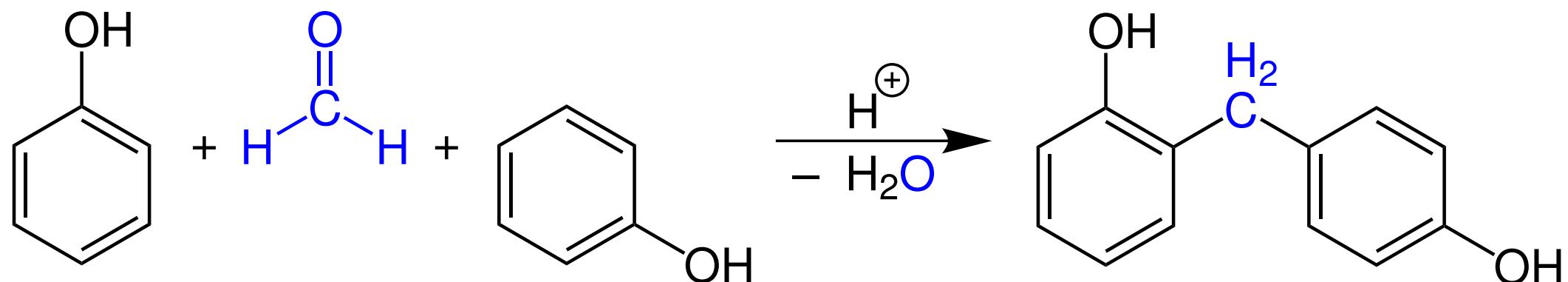
- Aufspalten von C=C-Doppelbindungen im Monomer (katalytischer Prozess durch Druck, Temperatur, Katalysator)
- Verbindung der aufgespaltenen Monomere zu Makromolekülen



Stufenwachstumsreaktionen

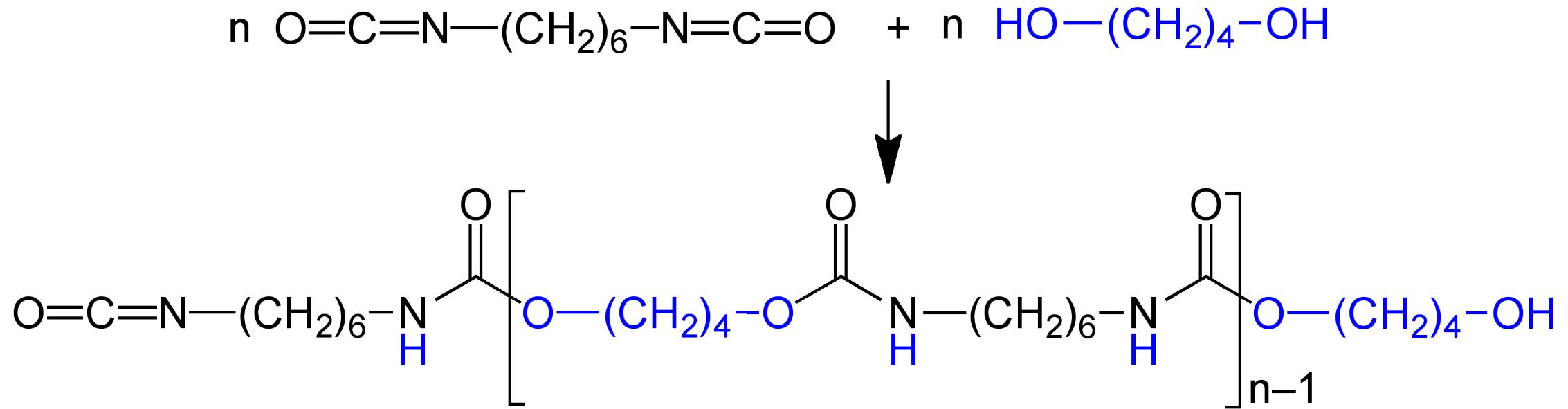
Polykondensation

- Abspaltung niedermolekulare (z.B. H₂O) Reaktionsprodukte durch eine chemische Reaktion schafft frei Bindungen
- schrittweise Reaktion oder Unterbrechung führen zur Bildung von linearen, verzweigten oder vernetzten Polymeren (Thermoplaste, Elastomere oder Duromere)



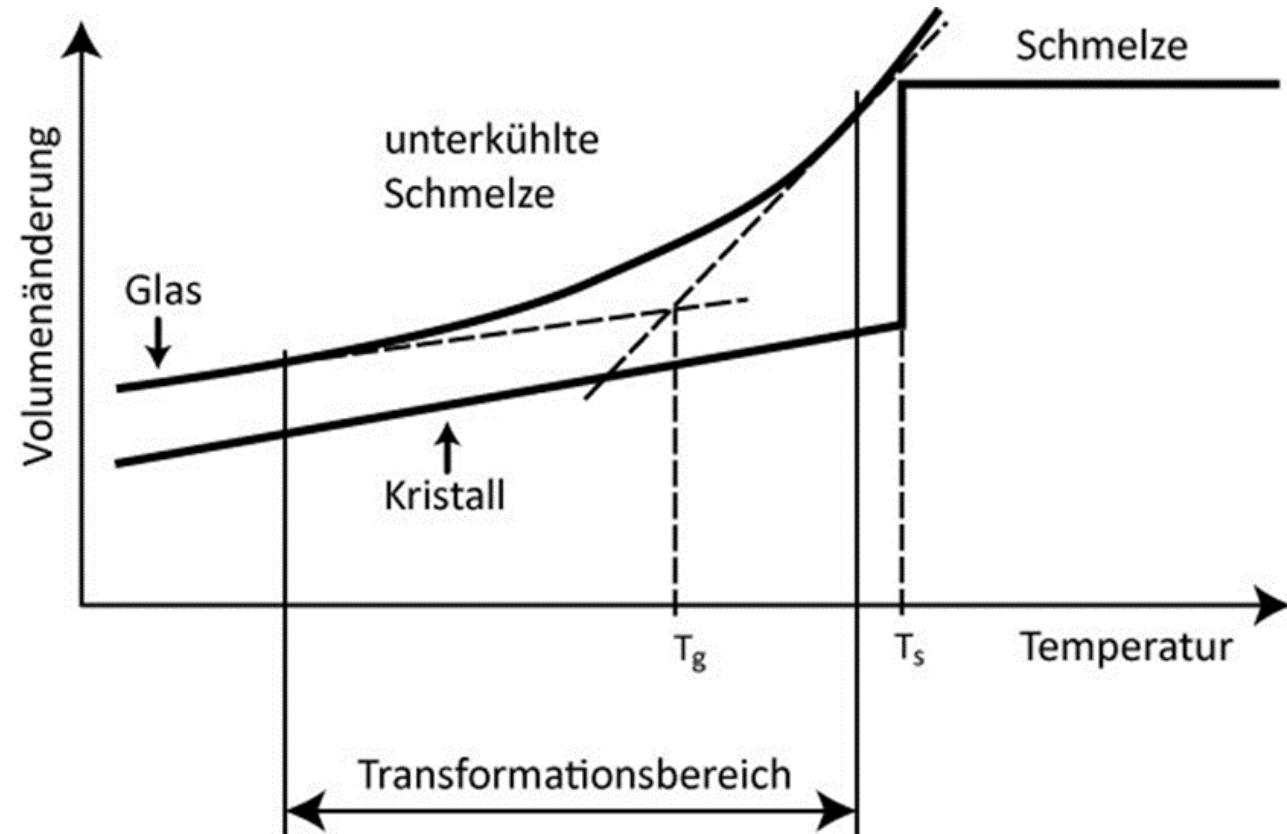
Polyaddition

- freie Bindungen entstehen durch Umlagerungen von Doppelbindungen zweier unterschiedlicher Monomermoleküle
- diese bilden dann Molekülketten



Glasig-amorphe Strukturen

- Gläser sind ein nichtmetallisch-anorganisches, vorzugsweise silikatisches Schmelzprodukte
- nichtkristallinen, also amorphen Zustand
- bei Glas, wird die Schmelze zunächst unterkühlt und dann unterhalb der Transformations-temperatur T_g „eingefroren“.



Materialeigenschaften

- Eigenschaften werden maßgeblich durch die Mikrostruktur und Elektronen (äußere Schale) beeinflusst

Eigenarbeit

- Wärmedehnung
- elektrische Leitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit

Referenzen

Rainer Schwab: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für Dummies, 2019; ISBN-10 352771538X