

WERKSTOFFE DER ELEKTROTECHNIK (FÜR KE)

Grundlagen der Werkstofftechnik: Feste Körper

WERKSTOFFE (Definition nach *Ondracek*): Ein Material wird zum Werkstoff, wenn es

- in mindestens einem Aggregatzustand anwendungsrelevante (z.B. technisch verwertbare) Eigenschaften besitzt
- technologisch und wirtschaftlich machbar und umweltverträglich ist.

(Umweltverträglich heißt: keine Abgabe von Schadstoffen während des Gebrauchs, Einfügen in den Ökokreislauf)

WERKSTOFFE - entscheidende Innovationsträger in der Geschichte der Menschheit

Steinzeit: ca. 100.000 v.d.Z.	Bronzezeit: ca. 5.000 v.d.Z.	Eisenzeit: ca. 1.000 v.d.Z.
-------------------------------	------------------------------	-----------------------------

EINTEILUNG DER WERKSTOFFE: meist nach Anwendung (Hauptfunktion) oder Herkunft (Stoff)

Nach **ANWENDUNG** (Hauptfunktion) :

WERKSTOFFE für	Bezeichnung
Kraftaufnahme (Tragkonstruktionen, Grundplatten), Kraft- und Bewegungsübertragung (Maschinenelemente, z.B. Zahnräder, Wellen, Kupplungen), Bewahren und Weiterleiten von Stoffen (Behälter, Rohrleitungen, Tanks, Container, Reaktionsgefäße), Umhüllen und Abgrenzen (Verkleidungen, Wandelemente, Gehäuse), Formung von Stoffen (Werkzeuge)	KONSTRUKTIONSWERKSTOFFE
- Erzeugung, Übertragung und Speicherung von elektrischer Energie (energieorientierte Elektrotechnik) - Gewinnung, Übertragung, Verarbeitung und Speicherung von Informationen (Elektronik, Nachrichtentechnik, Informatik, Gerätetechnik, physikalische Technik, u.a.)	FUNKTIONSWERKSTOFFE
Sonstige Werkstoffe (Verpackung, Bekleidung)	

EINTEILUNG DER WERKSTOFFE NACH WERKSTOFFGRUPPEN: (d.h. nach stofflichen Kriterien)

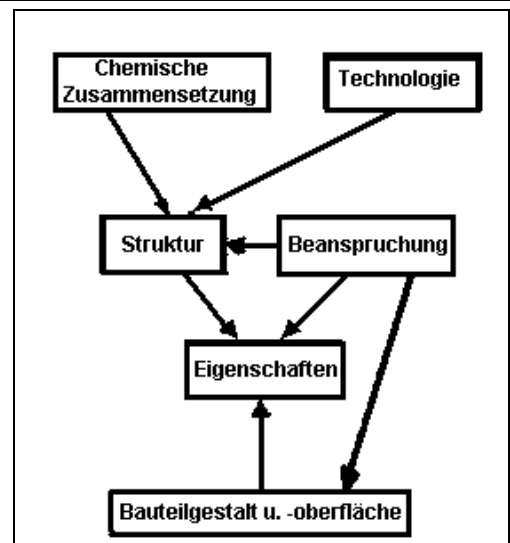
METALLISCHE WERKSTOFFE	KERAMISCHE WERKST.	KUNSTSTOFFE
<ul style="list-style-type: none"> hohe plastische Verformbarkeit hohe elektrische Leitfähigkeit positiver TKR kristalliner Aufbau hohe thermische Leitfähigkeit Reflexion des Lichts („metallischer Glanz“) u.U. besondere magnetische Eigenschaften meist mäßig chemisch beständig (außer Edelmetalle) 	<ul style="list-style-type: none"> kristallin oder amorph (anorganische Gläser) hohe Schmelz-Temperatur Sprödigkeit verschwindende elektrische Leitfähigkeit häufig Transparenz gute chem. Beständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> amorph oder teilkristallin kleines spezif. Gewicht niedrige Verarbeitungs-T. niedrige Verwendungs-T. verschwindende elektrische Leitfähigkeit häufig Transparenz meist gute chemische Beständigkeit
Stahl, Gusseisen, Al, Cu, Zn, Mg, Legierungen	Kunststoffe	Gläser, Keramik
VERBUNDWERKSTOFFE - Kombination von mindestens 2 Werkstoffen		
NATÜRLICHE WERKSTOFFE z.B. Holz, Gesteine		

EINTEILUNG DER FUNKTIONSWERKSTOFFE

- Leiterwerkstoffe, darunter Supraleiter
- Halbleiterwerkstoffe
- Widerstandswerkstoffe
- Kontaktwerkstoffe
- Isolierstoffe - Dielektrika
- Magnetwerkstoffe

Weitere spezielle Werkstoffgruppen :

- Para- und Ferroelektrika
- Werkstoffe der Optoelektronik, darunter LWL
- Kryowerkstoffe
- Bio- und Medizin-Werkstoffe
- Sensorwerkstoffe
- „Smart Materials“ (andere Einteilungen möglich)



Atombau: BOHRsches Atommodell

RUTHERFORD:

Elektronen kreisen um Kern / Anziehungskraft: COULOMB-Kraft.

Aber: beschleunigte Ladung muss Energie abgeben → Elektron stürzt in 10^{-6} s in den Kern → instabil, Widerspruch zur Praxis !

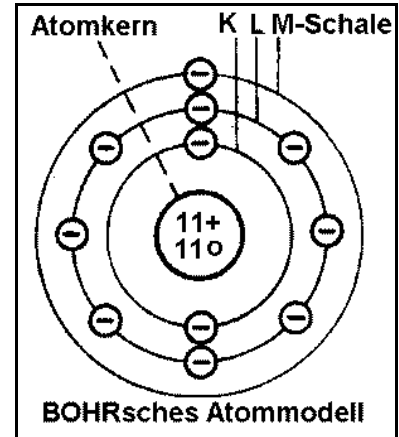
BOHR: behält mechanisches Atommodell bei, 2 Postulate:

1. BOHRsches Postulat: Klassische Bewegungsgleichung ist gültig. Es sind nur diskrete Bahnen erlaubt. Festlegung der diskreten Bahnen erfolgt durch Quantelung des Bahndrehimpulses.

Strahlungslose diskrete Bahnen sind erlaubt, wenn der **Bahndrehimpuls L** ein ganzzahliges Vielfaches von \hbar beträgt:

$$2\pi \cdot L_n = 2\pi \cdot m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot h \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$L_n = m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot \hbar \quad \text{mit} \quad \hbar = h / 2\pi$$



Für jede Bahn kann man die entsprechende **Energie W** berechnen. Diese Bahnen sind stationär, d.h. dort erfolgt keine Abstrahlung. Damit entspricht jeder stationären Bahn ein erlaubtes, diskretes Energieniveau.

2. BOHRsches Postulat: Bewegung auf den erlaubten Bahnen erfolgt strahlungslos. Emission und Absorption von Energie (Licht) erfolgt durch Übergänge zwischen den Bahnen.

Energie des Übergangs von einer Bahn zur anderen: $\Delta W = \{ Z^2 \cdot e_0^4 \cdot m_e / 8 \epsilon_0^2 \cdot h^2 \} \{ (1/n^2) - (1/n'^2) \}$

SOMMERFELDsche Erweiterung des BOHRschen Atommodells

BOHR - zu ungenau, SOMMERFELD - außer Kreisbahnen auch Ellipsen

- **Hauptquantenzahl n:** bestimmt Elektronenschale: K-, L-, M-, N-Schale: $n = 1, 2, 3, \dots$
- **Nebenquantenzahl l:** Unterniveau der Schale, beschreibt Orbitale, d.h. Ellipsenform: Energiezustände sind „entartet“ $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$
- **Magnetquantenzahl m_l:** beschreibt magnetisches Bahnmoment (entsteht bei Bewegung auf der Kreis- oder Ellipsenbahn) - Orientierung der Bahn im Raum $m_l = -l, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, l$
- **Spinquantenzahl m_s:** beschreibt Eigendrehimpuls des Elektrons (um seine eigene Achse) $m_s = +1/2, -1/2$

Besetzung der Energieniveaus im PSE (Periodensystem der Elemente)

1. Alle Z Elektronen eines Atoms befinden sich auf erlaubten Bahnen, auf denen sie eine möglichst niedrige Energie haben.
2. Es gilt das PAULI-Prinzip: In einem gegebenen Quantensystem von Fermionen kann sich nicht mehr als ein Fermion in einem bestimmten Energiezustand befinden, d.h. 2 Elektronen (eines Systems von Elektronen) können nicht in allen 4 Quantenzahlen übereinstimmen !

d.h. auf jeder Schale max. $2n^2$ Elektronen

Schale	n	l	m	je 2 Elektronen	Bezeichnung	Anzahl e
K-Schale	n= 1	l= 0	m= 0	1 Kreisbahn	1s	2
L-Schale	n= 2	l= 0	m= 0	1 Ellipse	2s	2
		l= 1	m= -1, m= 0, m= +1	3 Kreisbahnen	2p	6
M-Schale	n= 3	l= 0	m= 0	1 starke Ellipse	3s	2
		l= 1	m= -1, m= 0, m= +1	3 schwache Ellipsen	3p	6
		l= 2	m= 0, m= ±1, m= ±2	5 Kreisbahnen	3d	10

Nebengruppen: 3d-Niveaus liegen über 4s-Niveaus - werden danach besetzt

ATOMBAU

KERN: Protonen und Neutronen	HÜLLE: Elektronen: (Elektronenzahl= Protonenzahl)
<ul style="list-style-type: none"> • Z-fach positiv geladen, Z = • Zahl der Protonen = Ordnungszahl • klein (Kerndurchmesser: 10^{-15} m) • massereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Masse des e^- = 1/2000 der Protonenmasse • Atomdurchmesser: ca. 10^{-10} m • Quantenmechanik: System erlaubter (und verbotener) Energieniveaus : d.h., 4 Quantenzahlen bestimmen die erlaubten Energieniveaus

Energieniveaus der Atomhülle

H:	$1s^1$
He:	$1s^2$
Li:	$1s^2 2s^1$
Be:	$1s^2 2s^2$
B:	$1s^2 2s^2 2p^1$
C:	$1s^2 2s^2 2p^2$
N:	$1s^2 2s^2 2p^3$
O:	$1s^2 2s^2 2p^4$
F:	$1s^2 2s^2 2p^5$
Ne:	$1s^2 2s^2 2p^6$
Na:	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Mg:	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
Al:	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Si:	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

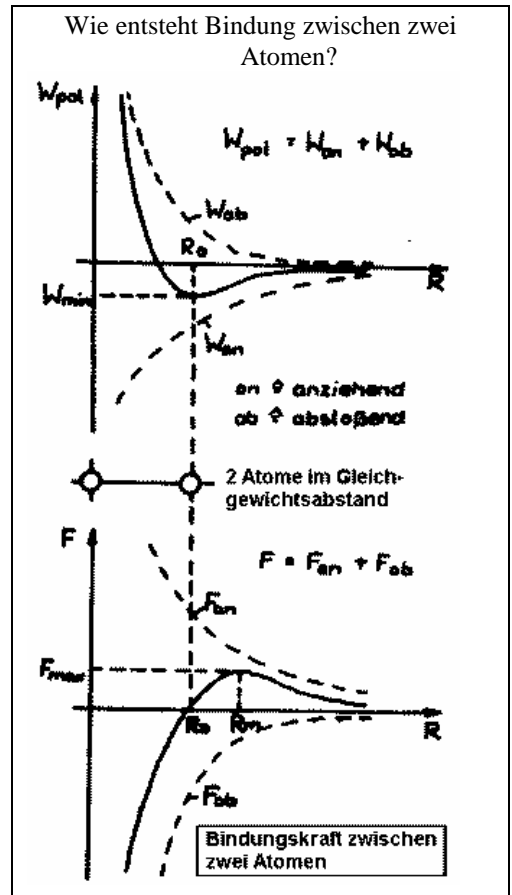
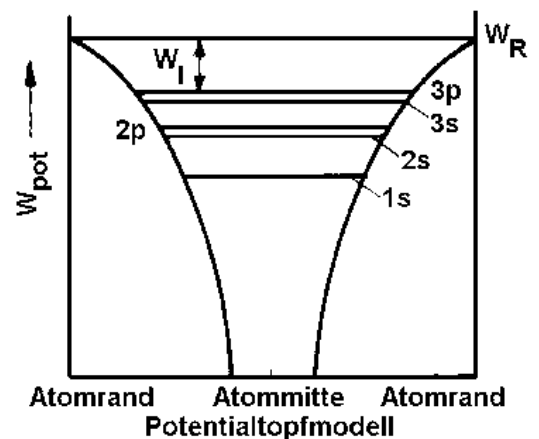
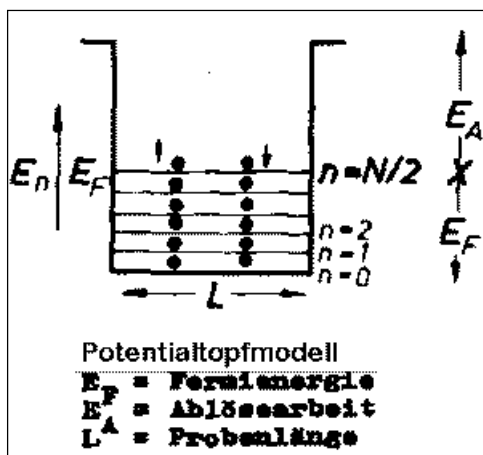
N:	$1s^2$	$2s^2$	$2p^3$
	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\uparrow\uparrow$
O:	$1s^2$	$2s^2$	$2p^4$
	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow\uparrow$

HUNDSche Regel:
Einbau der Elektronen -
erst alle mit parallelem Spin,
dann mit antiparallelem Spin

Dazu gilt die HUNDSche Regel:
(wichtig für magnetische Eigenschaften !)

In einem Unterniveau werden alle Orbitale zunächst mit je einem Elektron mit parallelem Spin besetzt, bevor sie mit einem zweiten Elektron mit antiparallelem Spin besetzt werden.

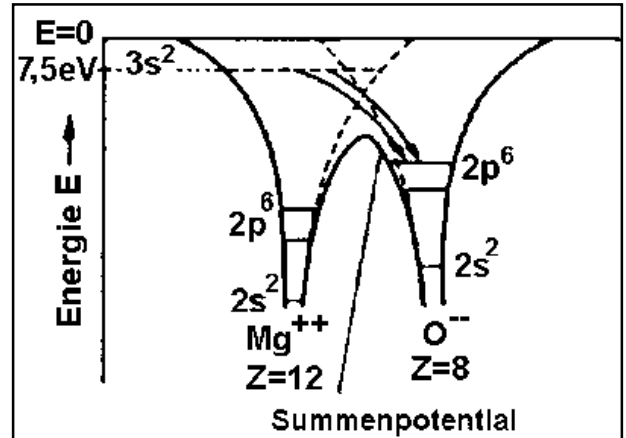
Potentialtopfmodell = energetisches Modell (des Atoms) – nur andere Darstellung als mechanisches Modell



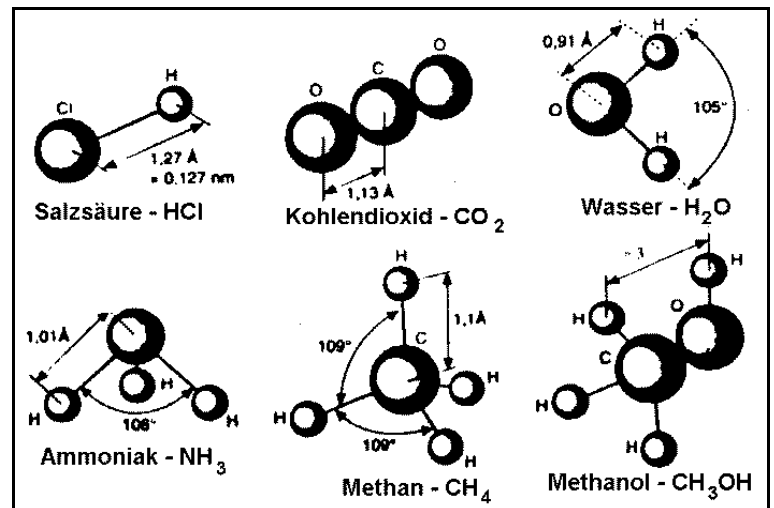
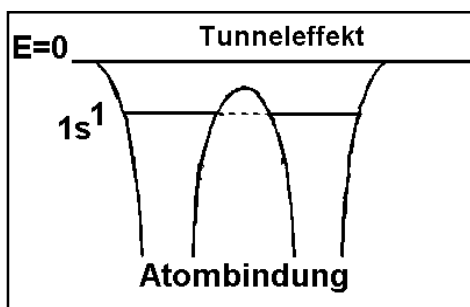
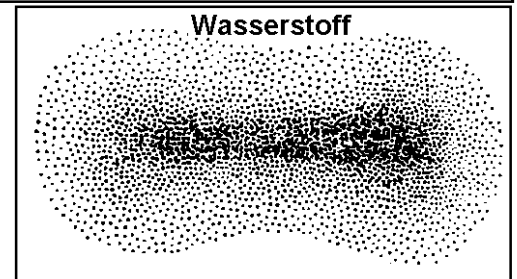
Bindung im Festkörper:

Potentialtopf-Modell:
einheitliches quantenmechanisches Modell
gibt Energieniveaus der Elektronen an

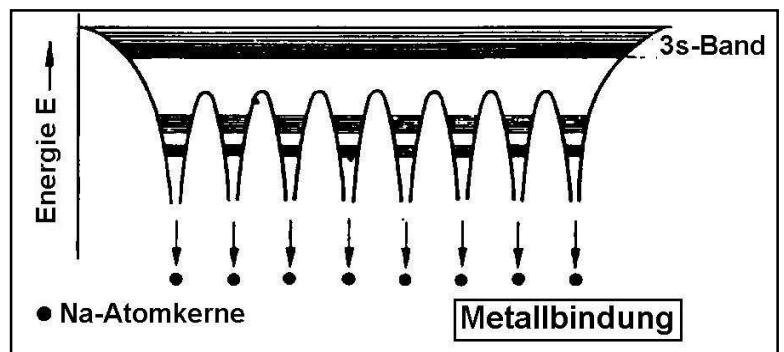
- **IONENBINDUNG** Beispiel: MgO, Salze
 - COULOMBSche Anziehungskraft
 - Elektronenkonfiguration des Neons (Edelgas-Konfiguration)
 - heteropolare (= ungerichtete) Bindung
 - schlecht verformbar
 - keine freien Elektronen, d.h. schlechte Leiter für Wärme und Elektrizität



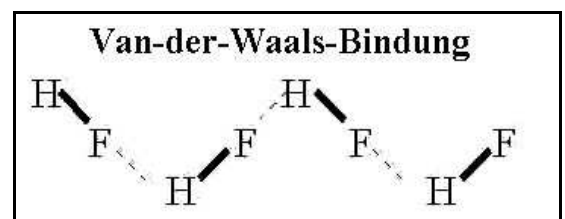
- **KOVALENTE BINDUNG (ATOMBINDUNG)**
 - Beispiel: H₂, Diamant
 - homöopolare (= gerichtete) Bindung
 - Durchdringung der beiden Orbitale
 - hart, schwer verformbar
 - Isolatoren oder Halbleiter
 - zwei benachbarte Atome teilen sich ein Elektronenpaar



- **METALLBINDUNG**
 - Atome geben Valenzelektronen ab
 - quasifreie Elektronen = Elektronengas
 - metallische Bindungskraft: Wechselwirkung Elektronengas - positive Atomrümpfe
 - gute elektrische und thermische Leiter
 - gut verformbar
 - streben nach dichter Raumpackung (Raumerfüllung)



- **VAN-DER-WAALS'SCHE BINDUNG**
 - kein Elektronenaustausch, Nebenvalenzbindung
 - Bindung zwischen Makromolekülen der Kunststoffe
 - es werden Dipole influenziert
 - relativ schwache Bindungsart
 - VAN-DER-WAALS-Kräfte treten immer auf !



- **Mischbindung** - tritt in der Natur sehr häufig auf

Struktur des festen Zustandes

Flüssige Phase	Amorphe Festkörper	Kristalline Festkörper
nicht formbeständig	formbeständig	formbeständig
Nahordnung, zeitlich veränderlich	Nahordnung, zeitlich unverändert	Fernordnung: dreidimensional-periodisch, ca. 10^{23} Atome / cm^3 , energieärmster und stabilster Zustand
		Gitterfehler, Oberflächen, Wärmeschwingungen
Wasser, Metallschmelzen	Gläser, Kunststoffe (meist) amorphe Metalle = metallische Gläser	Metalle, Legierungen

Metalle und Legierungen – kristalline Werkstoffe

Einteilung der KONSTRUKTIONSWERKSTOFFE

Metallische	Organische	Nichtmetallisch- anorganische Konstruktions-WS
Stahl, Gusseisen, Al, Cu, Legierungen	Kunststoffe	technische Gläser, keramische Werkstoffe

Anforderungen	Eigenschaften
mechanische	statische Festigkeit, Härte, Formstabilität (E-Modul), Bruchdehnung, Zähigkeit, Dauerschwingfestigkeit, Dauerstandfestigkeit, Verschleißbeständigkeit
thermische	Formbeständigkeit, max. Anwendungstemperatur, Dauergebrauchstemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturkoeffizient der Länge
chemische	Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit, Säuren, Laugen, gegen atmosphärische Einwirkungen, Korrosionsabtrag und -geschwindigkeit
elektrische	spez. elektrischer Widerstand, Oberflächenwiderstand, Durchschlagfestigkeit, Kriechstromfestigkeit, Dielektrizitätszahl
fertigungstechnische	Gießbarkeit, Umformbarkeit, Zerspanbarkeit, Schweißbarkeit, Härbarkeit, Beschichten
wirtschaftliche	Preis, Lieferbedingungen, Fertigungskosten, Wartungskosten, Wiederverwertbarkeit

METALLISCHE KONSTRUKTIONSWERKSTOFFE

1. Eisenwerkstoffe als Eisenknetwerkstoffe (Stahl) oder Eisengusswerkstoffe (Stahlguss, Gusseisen)
2. NE-Metalle: Al, Cu, Ti, Zn, Sn, Mg usw. und deren Legierungen

STAHLGRUPPEN (nach Anwendung) und Vertreter

unlegierte Baustähle	S 235 (alt: St 37), S 355 (St 52),
wetterfeste Baustähle (etwa 0,6% Cr, 0,4% Cu, 0,3% Ni)	alt: WTSt 37-2, WTSt 52-3
hochfeste schweißbare Baustähle (<0,22% C)	S 275N, S 355N (alt: StE 70, St 70-2)
Einsatzstähle (0,1 bis 0,2% C)	C 10, 16 MnCr 5, 21 CrNiMo 2
Vergütungsstähle (0,3 bis 0,6% C)	C 35, 41 Cr 4, 42 CrMo 4, 50 CrV 4, 36 NiCrMo 4
Nitrierstähle	31 CrMo 12, 34 CrAlMo 5
Nichtrostende Stähle - ferritisch (>12% Cr, wenig C)	X 20 Cr 13, X 10 CrAl 7
Nichtrostende Stähle - austenitisch (> 18% Cr, wenig C)	X 10 CrNiMoTi 18-10, X 15 CrNiSi 25-20
hitzebeständige Stähle	X 10 CrSi 18
Stähle für hohe T = warmfeste und hochwarmfeste Stähle	X 10 CrAl 13, 13 CrMo 4-4, X 22 CrMoV 12-1
Stähle für niedrige Temperaturen = kaltzähe Stähle	TTSt 35 V, 14 Ni 6, X 8 Ni 9
Stähle für Werkzeuge	21 MNCr 5, 45 WCrV 7, 100 Cr 6
unlegierte Kaltarbeitsstähle (0,55..1,3% C)	C 100 W 1, C 75 W 3, C 55 WS
legierte Kaltarbeitsstähle	X 210 Cr 12
Warmarbeitsstähle	40 CrMnMo 7, 56 NiCrMoV 7-4
Schnellarbeitsstähle (0,7..1,4% C, 4% Cr)	HS 6-5-2-5, HS 18-1-2-5
Wälzlagerstähle	105 Cr 4, 100 CrMn 6, X 40 Cr 13

Nichteisenmetalle und deren Legierungen als Konstruktionswerkstoffe

Einteilung nach Dichte, Schmelzpunkt und Häufigkeit des Vorkommens

NE-Metalle	niedrigschmelzende	hochschmelzende	höchstsichmelzende
Leichtmetalle: $\rho < 4,5 \text{ g/cm}^3$	Mg, Al	Be, Ti	
Schwermetalle: $\rho > 4,5 \text{ g/cm}^3$ (Dichte)	Sn, Pb, Bi, Zn, Sb	Cu, Ni, Co, Cr, Mn, Si, Ag, Au, Pt, Ru, Rh, Pd, Os, Ir	W, Mo, Ta, Nb
Seltene Metalle	Cd, Re, Ga, Th, Zr, Ce, Hg		

IDEALKRISTALL

- regelmäßige, räumlich periodische Anordnung kleinster Teile (Atome, Moleküle) zu einem festen Körper
- Elementarzelle: kleinste, periodisch im Kristall wiederkehrende Einheit, die bereits Kristallstruktur aufweist
- isotrope und anisotrope Eigenschaften

Gitterkonstanten: a , b , c und Winkel α , β und γ ergeben: 7 Kristallsysteme:

	SYSTEM	Gitterkonstanten	Winkel
1.	triklin	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma (\neq 90^\circ)$
2.	monoklin	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ$
3.	orthorhombisch (rhombisch)	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4.	rhomboedrisch (trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
5.	hexagonal	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
6.	tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
7.	kubisch	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

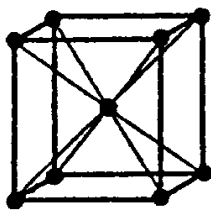
14 Elementarzellen nach BRAVAIS, darunter häufig auftretende Gittertypen wie

krz : kubisch-raumzentriert

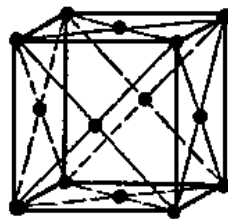
kfz : kubisch-flächenzentriert

hdP : hexagonal dichteste Packung

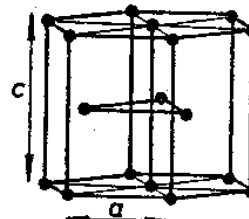
Gittertyp	krz	kfz	hdP
Beispiele	Cr, Mo, Ta, V, α -Fe	Ag, Al, Cu, Au, Ni, γ -Fe	Ti, Mg, Be, Cd, Co, Zn
Zahl der Atome/EZ	2	4	6 (2)
Raumerfüllung	68 %	74 %	74 %
dichtest gepackte Ebene	(110)	(111)	(0001)
dichtest gepackte Richtung	[111]	[110]	[1120]



krz



kfz



hdP

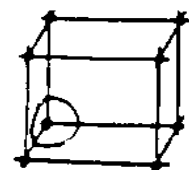
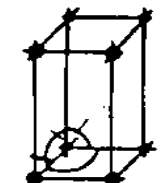
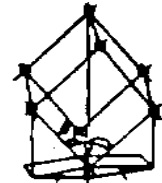
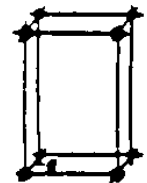
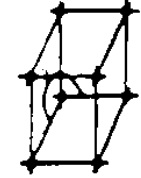
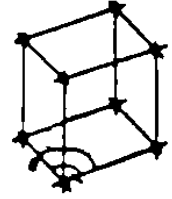
Begriffe:

- Idealkristall – Realkristall, Gitter = Raumgitter, Elementarzelle, Netzebene
- Einkristall (= Monokristall) – Polykristall (= Vielkristall)
- Isotropie – Anisotropie – Quasiisotropie – Textur
- Polymorphie: polymorphe (allotrope) Umwandlung von einem Gittertyp in anderen
- Komponenten = unabhängige Ausgangsstoffe
- Phasen – Gefügebestandteile
- Phasen: mechanisch trennbare, gleichartige und einheitliche Bestandteile eines Systems
- Mischkristall oder feste Lösung: homogene Verteilung einer Fremdschubstanz in der Grundsubstanz
- Substitutions-Mischkristall: Fremdatome auf Gitterplätzen, Cr, Ni, Mn im Stahl oder Si im Al, Be im Cu
- Einlagerungs-Mischkristall: Fremdatome auf Zwischengitterplätzen, C, N, H, O im Stahl oder im Cu
- Zustandsdiagramm oder Phasendiagramm - Phasenumwandlung
- Diffusion: ohne äußere Einwirkung stattfindender Ausgleich bei unterschiedlicher Konzentration

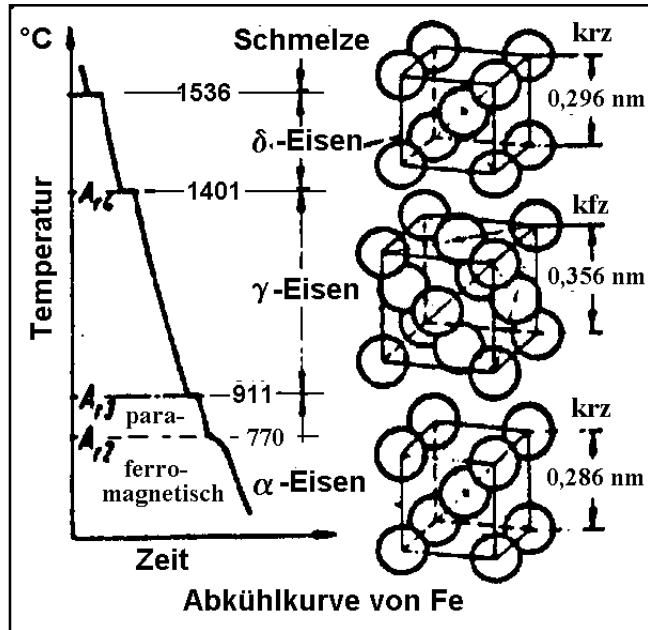
Phasenumwandlung im festen Zustand bei polymorphen Metallen:

- Bildung der Keime der zweiten festen Phase an Störstellen (Korngrenzengwinkel der Kristallite)
- Wachstum der neuen festen Phase bis zur kompletten Neubildung der Kristallstruktur - es entstehen neue Körner (neue Kornstruktur)

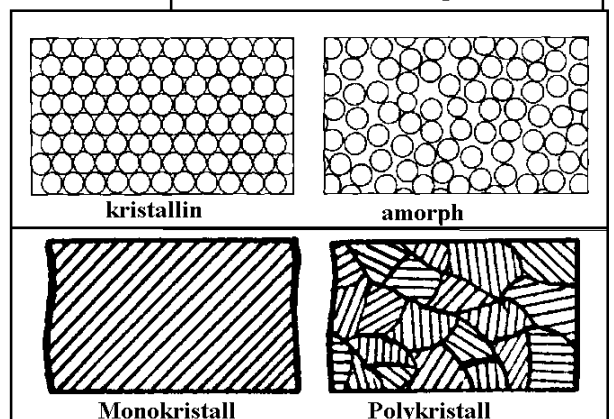
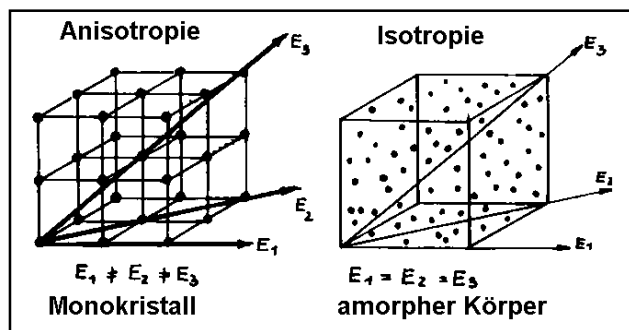
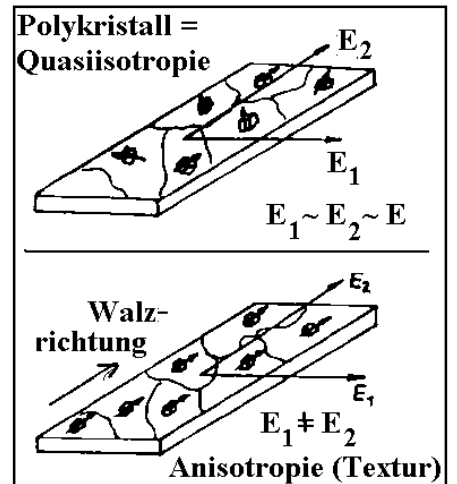
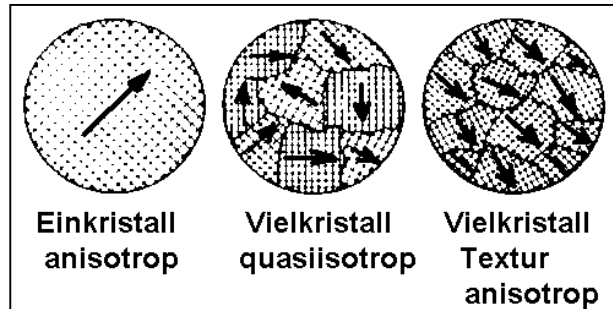
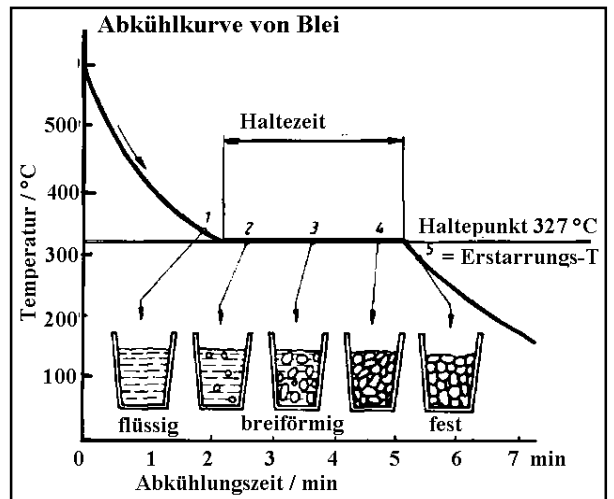
Beispiele für Polymorphie: Be, Ca, Ce, Co, Fe, Gd, Hf, La, Li, Mn, Se, Sm, Sr, Ti, U, Zr

7 Kristallsysteme

Polymorphie des Eisens



Kristallisation: Phasenübergang flüssig – fest



Struktur und Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften

Amorph	Monokristall	Polykristall	Texturierte Werkstoffe
Isotrop	Anisotrop	Quasi-Isotrop	Anisotrop

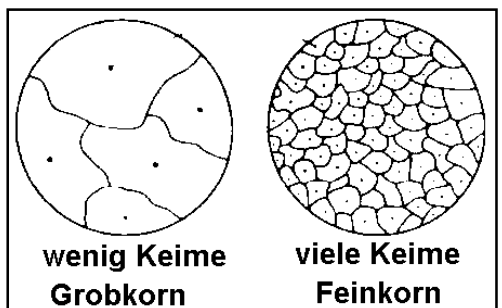
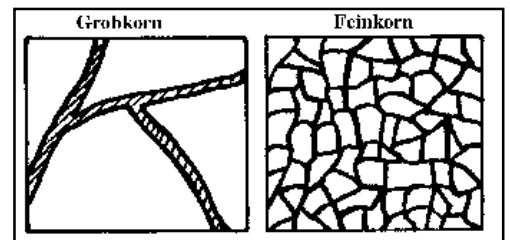
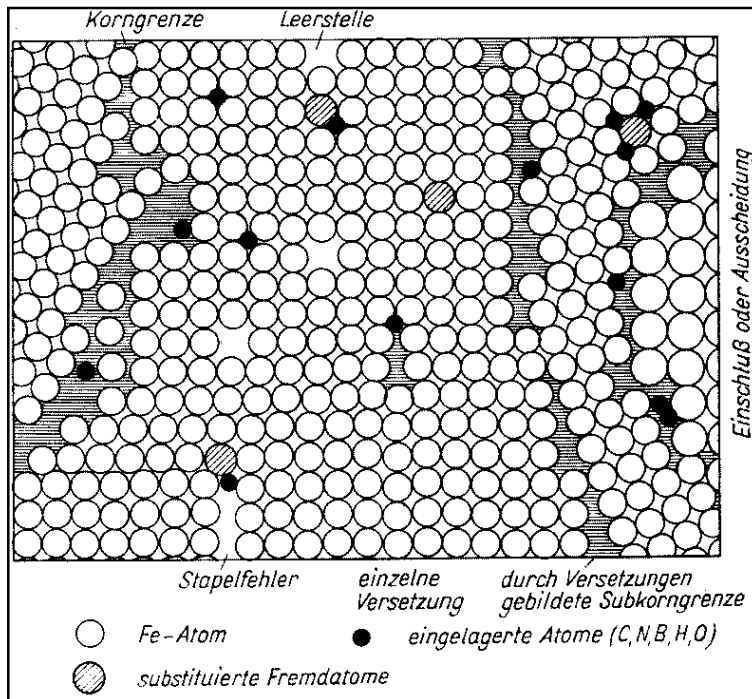
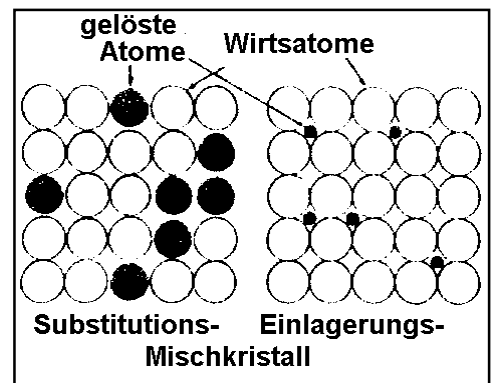
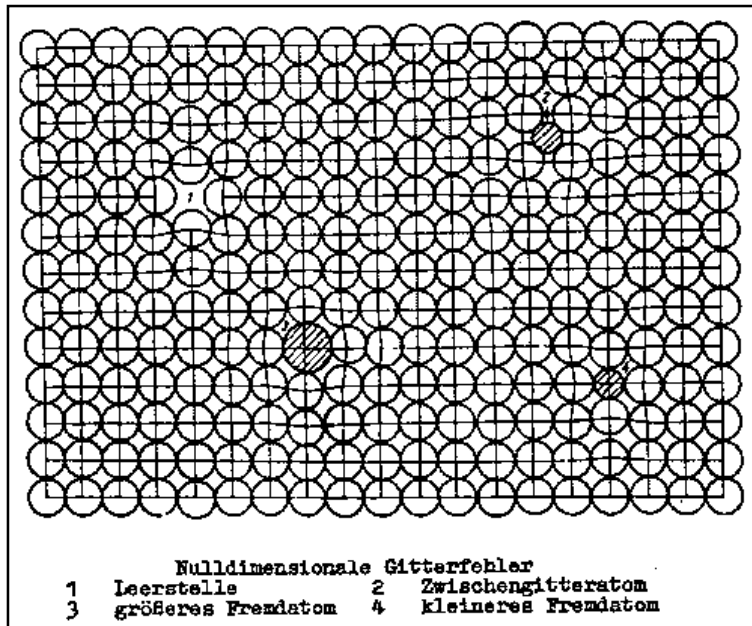
Eigenschaften der (kristallinen) Werkstoffe werden bestimmt durch:

EIGENSCHAFTEN	hängen ab von:
ATOMBAU	Zahl der Valenzelektronen, Elektronen der inneren Schalen
MOLEKÜLBAU	Art und Zahl der Atome im Molekül, Räumliche Anordnung der Atome
BINDUNGSART	Atom-, Metall-, Ionen-, Nebenvalenz-, Mischbindung
GITTERBAU	Gittertyp, Gitterkonstante
GITTERDEFEKTE	Versetzungen, Leerstellen usw. (siehe dort)
GEFÜGEAUFBAU	Kornform und -größe, Korngrenzen, Textur, Art/Anteil der Gefügebestandteile
ELEKTRONENSTRUKTUR	Energiespektrum der Elektronen, Elektronenkonzentration, Energiebändermodell
OBERFLÄCHE	Beschaffenheit, Rauigkeit, Wechselwirkung mit dem Umgebungs-Medium

REALKRISTALL: REALSTRUKTUR DER KRISTALLE -

Einteilung der Gitterfehler

- **Nulldimensionale oder punktförmige Gitterfehler**
 - Leerstellen (SCHOTTKY-Fehlordnung) = fehlendes Atom (vacancy), Konzentration: $c_V = 10^{-4}$ bei T_S
 - Zwischengitteratom $c_{ZG} = 10^{-15}$
 - Fremdatome (in Legierungen)
- **Eindimensionale oder linienförmige Gitterfehler = Versetzungen (dislocation)**
entstehen bei Kristallisation/Verformung, Versetzungsdichte: $10^4 - 10^8 / \text{cm}^2$ (geglüht) - $10^{12} / \text{cm}^2$ (verformt)
- **Zweidimensionale oder flächenhafte Gitterfehler**
 - Stapelfehler
 - Grenzflächen: Oberflächen, Phasengrenzen, Korngrenzen, Zwillingsgrenzen, Ordnungsbereiche
- **Dreidimensionale oder räumliche Gitterfehler**
Anhäufung von Punktfehlern, Ausscheidungen, Risse, Poren



Werkstoffkennzeichnung

WERKSTOFF-KENNZEICHNUNG nach DIN 17 007: Rahmenplan der WERKSTOFFNUMMERN

erfolgt für alle Werkstoffe: Kombination von Ziffern und Zifferngruppen, die durch einen Punkt getrennt sind:

Werkstoff-Hauptgruppe: 0.	Sortennummer: 0000.	Anhängenzahl: 00
3.	3541.	01
3 Aluminium	35 Mg-legiert, 41 Zählnummer	0 unbehandelt, 1 Sandguß

Werkstoff-Hauptgruppe:

0	Gusseisen, Roheisen, Ferrolegierungen	2	NE-Schwermetalle	4 - 8	nichtmetallische Werkstoffe
1	Stahl, Stahlguss	3	NE-Leichtmetalle	9	frei für interne Benutzung

Sortennummer:		Anhängenzahl: wird bei Bedarf angehängt
1. und 2. Ziffer:	3. und 4. Ziffer:	bei Eisenwerkstoffen enthält sie Angaben zu: 1. Ziffer: Erschmelzung, 2. Ziffer: Nachbehandlung bei NE-Metallen: Behandlungszustand
nach chemischer Zusammen- setzung und Verwendung	Zählnummern innerhalb der Sorte	

Nummernsystem für Stähle nach DIN EN 10 027 (vorher DIN 17 007)

1.	00	37 (xx)
1 Stahl	Stahlgruppennummer: 00 Grundstahl	37 Zählnummer: (xx) bei Bedarf erweiterbar

Eisenwerkstoff:	Metalllegierung, bei der Anteil Fe > Anteil jedes anderen Elements							
Stahl:	Eisenwerkstoff mit max. 2 (Masse-) % C							
unlegierter Stahl:	Stahl mit definierten Höchstgehalten bestimmter Elemente laut DIN (<0,00.. bis < 0,..)							
	B	Co	Cr	Cu	La	Mn	Mo	Nb
	0,0008	0,1	0,3	0,4	0,05	1,65	0,08	0,06
	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr
	0,4	0,1	0,5	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05
legierter Stahl:	Stahl mit höheren Gehalten mindestens eines Elements als unlegierter Stahl							
hochlegierter Stahl:	Stahl mit mehr als 5 % mindestens eines Legierungs-Elements							

BEZEICHNUNGSSYSTEM für STÄHLE nach DIN EN 10 027

Benennung erfolgt in zwei Hauptgruppen:

- Einteilung nach Hauptgüteklassen:

Kurznamen mit Hinweisen auf Verwendung und mechanische / physikalische Eigenschaften.

Hauptsymbole:

S	Stähle für den allgemeinen Stahlbau	R	Stähle für oder in Form von Schienen	B	Betonstähle
P	Stähle für den Druckbehälterbau	H	Kaltgewalzte Flacherzeugnisse	Y	Spannstähle
L	Stähle für den Rohrleitungsbau	D	Flacherzeugnisse aus weichen Stählen	E	Maschinenbaustähle
M	Elektroblech und -band	T	Feinst- und Weißblech		

Aufbau der Bezeichnung: Hauptsymbol(e) Eigenschaft Zusatzsymbol(e) [Gruppe 1, Gruppe 2]

Hauptsymbol	Eigenschaft	Zusatzsymbol Gruppe 1	Zusatzsymbol Gruppe 2
S	355	J2	W
Stahl für Stahlbau	Mindeststreckgrenze in N/mm ²	Kerbschlagarbeit	wetterfest

Beispiele:

	<u>Stahlmarke</u>	das bedeutet:
alt.	(St 37)	Stahl mit Zugfestigkeit min. 33 kp/mm ² (= 9,81 x 33 = 320 N/mm ²)
heute:	S235	Stahl mit Streckgrenze min. 235 MPa (= früher St 37)
Fe	C 45	Fe + 0,45 % C
Fe-C	17 Mn Mo V 6-4	Fe + 0,17 % C + 1,5 % Mn + 0,4 % Mo + < 1 % V
Fe-C	X 5 Cr Ni Ti 18-10	Fe + 0,05 % C + 18 % Cr + 10 % Ni + < 1 % Ti
	HS 2-9-1-8	Fe + 2 % W + 9 % Mo + 1 % V + 8 % Co
Aber:		
NE:	Cu Ni 12 Zn 30 Pb 1	Cu + 12 % Ni + 30 % Zn + 1 % Pb = andere Darstellung !

Einteilung nach chemischer Zusammensetzung

4 Untergruppen von Kurznamen mit Hinweis auf chem. Zusammensetzung mit Haupt- und Zusatzsymbolen

1. Untergruppe: Unlegierte Stähle mit Mn-Gehalten < 1% (außer Automatenstählen)

C	35
Kennbuchstabe für Kohlenstoff	Kennzahl = C-Gehalt x 100

2. : Unlegierte Stähle mit Mn > 1%, unlegierte Automatenstähle sowie (niedrig) legierte Stähle (< 5%)

10	CrMoV	9-10
28	Mn	6
Kennzahl für C-Gehalt Kennzahl = %C x 100	Symbole für Legierungselemente	Kennzahl für Gehalt an Elementen, Multiplikationsfaktor beachten !

Hier: **Multiplikationsfaktoren** beachten:

4x: Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	10x: Al, Cu, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	100x: C, N, P, S	1000x: B
---------------------------	------------------------------------	------------------	----------

3. Untergruppe: Legierte Stähle mit > 5% Gehalt (mind. 1 Element)

X	5	CrNi	18-10
X	6	CrNiMoTi	17-12-2
Kennbuchstabe für (hoch)legierte Stähle	Kennzahl für C Kennzahl = %C x 100	Symbole für Legierungs- elemente	Gehalte der Legierungs- elemente in %

4. Untergruppe: Schnellarbeitsstähle

HS	2-9-1-8
Kennbuchstabe	% Gehalt in der Reihenfolge: W - Mo - V - Co

NORMGERECHTE BEZEICHNUNG DER NICHT-EISEN-METALLE nach DIN 1700**1. Kennbuchstabe für Herstellung und Verwendung:**

G = Guß	GD- = Druckguß	GK- = Kokillenguß	GZ- = Schleuder- ("Zentrifugal-") Guß	GC- = Strangguß ("continuous")	GL- = Gleit- lagermetall	L- = Lot	S- = Schweiß- zusatzstoff
------------	-------------------	----------------------	------------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	-------------	------------------------------

2. Chemische Zusammensetzung

unlegierte Metalle:		Legierungen:	
Pb 99,99:	Feinblei	CuCd 1	Cu mit etwa 1% Cd
Pb 98,5	Umschmelzblei	AlMg 3 Si	Al-Legierung mit 3% Mg, etwas Si
		Cu Ni 12 Zn 30 Pb 1	Cu-Legierung mit 12 % Ni + 30 % Zn + 1 % Pb
		L-Sn 60	Zinnlot mit 60 % Sn, bis 3,2 % Sb, Rest Blei

3. Kurzzeichen für Werkstoffzustände:

w = gegläut (weich=100%)	hh = halbhart (=120%)	h = hart (=140%)	fh = federhart (=180%)	a = ausgehärtet
ka = kaltausgehärtet	wa = warmausgehärtet	wh = walzhart	zh = ziehhart	ho = homogenisiert
				p = plattiert

Bezeichnung der Kunststoffe nach DIN 7728 oder ISO 1874 Beispiel: Polyamid

Thermoplast	ISO 1874-PA 12 MHLR 16-060N GF 30
-------------	-----------------------------------

Angaben: ISO 1874 = Norm für PA, danach: „PA 12“ - Polyamid 12

„M“ - Spritzguss, „H“ - Hitzestabilisierung, „L“ - licht- und witterungsstabilisiert, „R“ - Entformungsmittel enthaltend

„16“ - Code für Viskositätszahl, „060“ - Code für E-Modul, „N“ - schnelle Kristallisation

„G“ - Glas, „F“ - Fasern, „30“ - Gewichtsprozent

Codierung von Verstärkungsmitteln und Füllstoffen

1. Position		2. Position		3. Position	
Code Art	B - Bor	Code Form	B - Kugeln	Code Gehalt Gew.-%	5 - 0 bis <7,5
	C - Kohlenstoff		D - Pulver		10 - 7,5 bis <12,5
	G - Glas		F - Fasern		15 - 12,5 bis <17,5
	K - Kreide M - Mineralien		G - Mahlgut		usw. bis: 50 - 47,5 bis <55
	S - Organische Stoffe		H - Whisker		60 - 55 bis <65
	T - Talkum				usw. bis:
	X - nicht spezifiziert				90 - 85 und mehr

Kunststoffe – Molekülstrukturen

(meist) organische Werkstoffe (Ausnahme: Silikone), die aus Makromolekülen (> 1000 Atome) aufgebaut sind
Spezifische Zusatzstoffe stabilisieren, verstärken, modifizieren oder färben den Kunststoff nach Bedarf.

- Bindungen: - Atombindung innerhalb der Makromoleküle (Hauptvalenzbindung)
- Nebenvalenzbindung zwischen den Molekülen (sekundäre Bindungen elektrostatischer Natur)

PE-HD	Polyethylen	PS	Polystyrol, ataktisch
PP	Polypropylen, isotaktisch	POM	Polyoxymethylen
PVC	Polyvinylchlorid	PBTB	Polybutylenterephthalat
PA-6,6	Polyamid-6,6, Polyhexamethylenadipamid	PETP	Polyethylenterephthalat
PET	Polyethylenterephthalat	PTFE	Polytetrafluorethylen
PMMA	Polymethylmethacrylat, ataktisch	PES	Polyethersulfon
PC	Poly (4,4'-isopropyliden-diphenylencarbonat) Polycarbonat	PPS	Polyphenylensulfid
PEEK	Polyetheretherketon	PI	Polyimid

Kunststoffe - Begriffe:

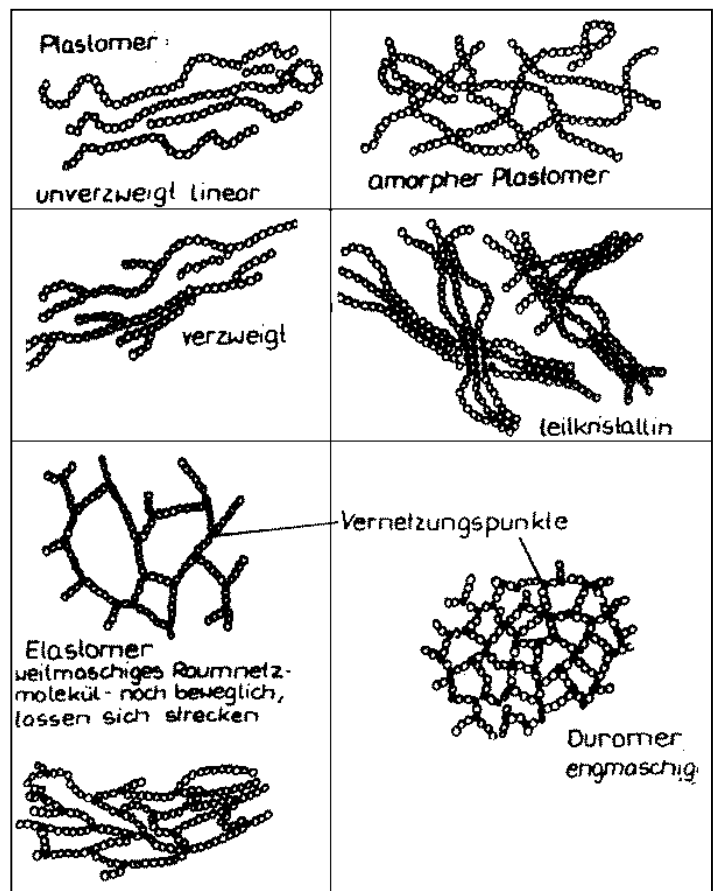
- organische Polymere: C-Gerüst (Kette)
- anorganische Polymere: SiO-Gerüst, z.B. Silikone (mit $[-\text{Si}-\text{O}-]$ -Kette)

Eigenschaften der Kunststoffe:

- leicht: Dichte zwischen 0,8 und 2,2 g/cm³
- flexibel: E-Modul geringer als Metalle,
- niedrige Verarbeitungstemperatur: bis ca. 250°C, max. 400°C, ermöglicht Einsatz von Füllstoffen, Farbstoffen und Verstärkungsmitteln sowie Herstellung von Schaumstoffen
- niedrige Leitfähigkeit (Wärme und Elektrizität): Isolationswerkstoffe, aber auch leitende Kunststoffe
- häufig transparent: Verglasungen (Acrylglas, Polycarbonat)
- hohe chemische Beständigkeit
- spezifisch durchlässig für Gase oder auch Flüssigkeiten: Permeation, Diffusion
- wiederverwertbar: Recycling - stofflich oder thermisch

Typen:

- **Thermoplaste oder Plastomere:** unvernetzt, gehen beim Erwärmen reversibel in plastischen Zustand über, behalten nach dem Erkalten ihre Form bei *Amorphe Thermoplaste:* PVC, PSD, PC, PMMA



Teilkristalline Thermoplaste: PE, PP, PA, PET

- **Elastomere:** hohe Elastizität in breitem Temperaturbereich, partiell dreidimensional vernetzte Makromoleküle (durch Vulkanisation), bleiben elastisch, nicht aufschmelzbar, quellbar in Lösungsmitteln
Natur-Kautschuk, Styrol-Butadien-Kautschuk, Polyurethan-Kautschuk
- **Duroplaste, besser Duromere:** hochvernetzt, nicht aufschmelzbar, thermisch nicht erweichbar, beständig gegen Wärme und Chemikalien, gute mechanische Eigenschaften, enger vernetzt, Vernetzung erfolgt bei der Formgebung: *Melaminharze, Polyesterharze, Epoxidharze*

Amorphe Strukturen - Gläser

- Zustand unterkühlter Schmelzen – Glaszustand, metastabil - Rolle der Diffusion

Amorphe Metalle = Metallische Gläser

- DRPHS - Dense Random Packing of Hard Spheres,
- hohe Abkühlungsgeschwindigkeit, komplexe Zusammensetzung
- seit kurzem: BMG – Bulk Metal Glass (bis ca. 2 mm dick)

Keramische Werkstoffe

Einteilung	Gruppe	Beispiel
Feuerfestkeramik	Ofenbaukeramik	Steine, Brennerdüsen
	Keramik in Luft- und Raumfahrt	Hitzeschilde
Chemokeramik	chemisch beständige Keramik	Tiegel, Filter
	aktive Chemokeramik	Katalysatoren, Chemosensoren
Mechanokeramik	Konstruktionskeramik	Kugellager, Rotoren, Düsen
	Schneidkeramik	Schneidplatten
	Schleifkeramik	Schleifscheiben
Elektrokeramik	passive Elektrokeramik	Isolatoren, Zündkerzen, Chipträger
	aktive Elektrokeramik	Leiter, Varistoren
Optokeramik	passive Optokeramik	Na-Dampflampe, opt. Fenster
	aktive Optokeramik	Laser, Wandler (el./opt.)
Magnetokeramik		Magnete, Spulkerne
Reaktorkeramik		Absorber, Spaltstoffe
Biokeramik	inaktive Biokeramik	Prothesen, Zahnimplantate
	aktive Biokeramik	Ohrenknochenprothesen

Keramische Technologie - Sintertechnik

Herstellung: pulvermetallurgisch, aus Pulver des oder der verwendeten Materialien

1. Prozess-Stufe: Aufbereiten und Mischen der Pulver

2. Stufe: Herstellen der Formteile = Verbindung der Körner durch:

- Trockenpressen
- Schlickerguss: Vergießen der Pulver mit flüssigen Bindemitteln (z.B. Wasser) - Entwässerung durch poröse Formen, Vakuum, Druck, Zentrifugalkraft
- Spritzguss: Keramikteilchen-Suspension in Thermoplast wird vergossen - Vorbrand zum Entfernen des Polymers (für dünnwandige Werkstücke)

3. Stufe: Temperaturbehandlung zur Erhöhung Dichte und Festigkeit =

Sintern: bei hoher Temperatur steigen Dichte und Festigkeit, die Teilchen wachsen zusammen (und schrumpfen dabei)

- häufig: Festphasensintern ($< T_s$ aller Komponenten)
- Flüssigphasensintern ($> T_s$ mindestens einer Komponente)
- Drucksintern (T und $p = \text{const.}$)
- HIP = heißisostatisches Pressen (T -variabel, Gasdruck-const.)

Eigenschaften von keramischen Werkstoffen:

- kristalline und amorphe (glasartige) Bestandteile sowie Poren
- heterogen, spröde, formstabil, große Härte und Verschleißfestigkeit, Warmfestigkeit, korrosionsfest
- spezielle elektrische, magnetische oder dielektrische Eigenschaften

Glaskeramik: Sonderform der Keramik = Gläser, die durch Hochtemperaturbehandlung teilkristallisiert sind (Devitrifikation); meist 95-98% feinste Kristallite in glasartiger Matrix

Eigenschaften: opak, oft brüchig; wenn keine inneren Spannungen - dann hohe mechanische Stabilität + Wärmeleitfähigkeit, lineare Ausdehnung ≈ 0 (z. B. Substrate, Kochfelder, Kochgeschirr)

Amorphe Strukturen: Gläser

- bekannteste Gläser: Silikate mit Tetraederstruktur SiO_4
- Glasbildung: unterhalb Liquidus ist Keimbildung wegen geringer Beweglichkeit erschwert (kaum Diffusion)
- Zustand unterkühlter Schmelzen: $T > T_G$ - im thermodynamischen Gleichgewicht
- Glaszustand: $T < T_G$, nicht im thermodynamischen Gleichgewicht

Metallische Gläser = amorphe Metalle

- hohe Abkühlungsgeschwindigkeit $10^6 \dots 10^{10}$ K/s erforderlich
- mehrere Verfahren: Walzenmethode, rotierende Trommel, Taylorverfahren, Plasmaspritzen
- Strukturmodell: DRPHS - Dense Random Packing of Hard Spheres
Metallische Gläser mit Kristallisationstemperatur: $\text{Ta}_{55,5}\text{Ir}_{44,5}$ ($T_K > 1223\text{K}$), $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ ($T_K = 923\text{K}$), $(\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{60})_{75}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$ ($T_K = 714\text{K}$), $\text{Pd}_{82,4}\text{Si}_{17,6}$ ($T_K = 639\text{K}$), $\text{Mg}_{86}\text{Cu}_{14}$ ($T_K = 380\text{K}$)

Eigenschaften: spez. elektrischer Widerstand 2..3x höher als Kristall, können ferromagnetisch sein (obwohl nicht kristallin), geringe Wirbelstromverluste (nur 30% im Vergleich zu bestem Trafoblech)

Werkstoffe der Elektrotechnik (Funktionswerkstoffe)

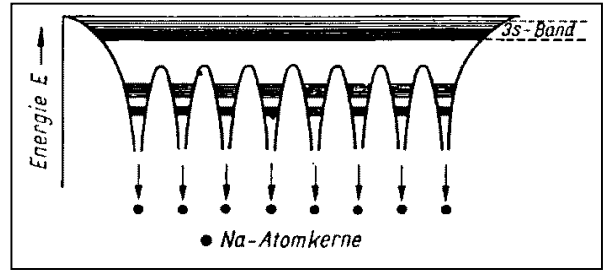
Elektrische Eigenschaften

Elektrische Leitfähigkeit der Metalle:
freie Elektronen - Elektronenleitung

MODELL ELEKTRONENGAS

(klassisches Modell - wie kinetische Gastheorie):

- im Leiter frei bewegliche Elektronen
- Teilchenkonzentration: ca. $10^{22} / \text{cm}^3$
- (MAXWELL) - BOLTZMANN - Statistik
- spezifische Leitfähigkeit = Teilchenkonzentration x deren Beweglichkeit μ x Elementarladung: $\sigma = e \cdot \mu \cdot n$
- Beweglichkeit = Driftgeschwindigkeit / Feldstärke: $\mu = v_D / E$
- Driftgeschwindigkeit: weist in bestimmte Richtung, ist der allgemeinen Teilchenbewegung überlagert



QUANTENMECHANISCHES MODELL:

- FERMI - (DIRAC) - Statistik
- es gilt PAULI - Prinzip
- Potential-Topf-Modell
- FERMI-Energie: $E_F = 7 \text{ eV}$ (Cu), $E_F = 3,1 \text{ eV}$ (Na)
- erlaubte Energiebänder und verbotene Zonen:
da Elektronenwellen gitterperiodisch moduliert
- LEITFÄHIGKEIT von METALLEN, HALBLEITERN und ISOLATOREN
Valenzband - Leitfähigkeitsband - verbotene Zone

Cu, Ag, Au, Alkali-metalle, (H)	Be, Mg, Pb, Sn, W, Cr	Si, Ge	Diamant
Ein-Elektronen-metall	Zwei-Elektronen-metall	Eigen-Halbleiter	Isolator
 Leitungs-Band halb gefüllt	 Überlappen der Bänder	 < 2 eV	 ca. 7 eV

Leiterwerkstoffe

ANFORDERUNGEN an Normalleiter:

- elektrische Anforderungen:
 - hohe elektrische Leitfähigkeit
 - niedriger Temperaturkoeffizient des Widerstandes (TKR)
 - geringer Kontaktwiderstand
- mechanische Anforderungen:
 - ausreichende statische Festigkeit und Härte
 - ausreichende Dauerfestigkeit, gute Dehnbarkeit
- thermische Anforderungen:
 - gute Wärmeleitfähigkeit
 - hohe Entfestigungs- und Schmelz-Temperatur
- chemische Anforderungen:
 - geringe Neigung zur Korrosion
 - Verträglichkeit mit dem Isolierstoff
- fertigungstechnische Anforderungen: Umformbarkeit, Beschichtbarkeit, Lötbarkeit, Schweißbarkeit
- wirtschaftliche Anforderungen: ausreichende Verfügbarkeit, niedrige Fertigungskosten, Recyclbarkeit, niedrige Wartungskosten (hohe Zuverlässigkeit, Lebensdauer)

Metall	Leitfähigkeit gegenüber Silber (=100%)	spezifischer Widerstand $10^{-6} \Omega \text{m}$
Ag	100	0,0163
Cu	96	0,0163
Au	73	0,025
Al	62	0,026
Zn	31	0,059
Ni	25	0,067
Fe	18	0,098
Sn	15	0,115
Pb	8	0,222

KUPFER

- E-Kupfer: elektrolytisch raffiniert
- SE-Kupfer: sauerstofffrei, desoxidiert mit Phosphor, wasserstoffbeständig

Mindestleitwert: $57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ (nach DIN), Reinheit: 99,9%

oder $58 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ (nach IACS), Reinheit: 99,95% (IACS: International Annealed Copper Standard)

Gebrauchliche KUPFER - Legierungen:

Werkstoff	Anwendung	wesentlicher Vorteil
E-Cu	99,90 % Cu, Elektrolytkupfer für elektrische Leiter	min. 58 m/(Ω mm ²)
SE-Cu	99,90 % Cu, sauerstofffreies Kupfer für Elektronik	min. 58 m/(Ω mm ²)
E-Cu Ag	0,1 % Ag, Rest Cu	verbesserte mechanische Eigenschaften

E-Cu und SE-Cu: Sauerstoff liegt in Form von Cu₂O vor - bei Erwärmung in wasserstoffhaltiger Atmosphäre tritt „Wasserstoffkrankheit“ auf: es bildet sich Wasserdampf, der im Cu verbleibt und Risse und Blasen bildet - Werkstoff wird unbrauchbar

Niedrig legiertes Leitkupfer

Cu Ag 0,2	Kollektorlamellen , Spulenwicklungen	erhöhte Erweichungs-Temperatur
Cu Te 0,5	maßhaltige Teile	bessere Spanbarkeit
Cu Cd 1	Fahrdrähte , Fernmeldeleitungen	höhere Festigkeit
Cu Cr 0,6	Schweißelektroden , stromführende Federn	aushärtbar
Cu Zr 0,2 Cu Zr Cr	Reaktoren, Raketen	hoch wärmebeanspruchbar
Cu Be 1,7	Kontaktfedern , abriebfeste Buchsen	aushärtbar

ALUMINIUM

- E-Al : Leitaluminium
Mindestleitwert: 36 MS/m (nach DIN) ,
bei: (Ti + Cr + V + Mn) < 0,03 %
- AL – LEGIERUNGEN
E-Al Mg Si ("Aldrey"): Freileitungen,
Stromschienen, Starkstromkabel (häufig mit
Stahlverstärkung)
Al + 0,6 Si + 0,4 Mg : aushärtbar

LEITER-WS in der ELEKTRONIK

- Herstellung:
 - Schichttechnik (Dickschicht oder Dünnschicht)
 - monolithische Festkörpertechnik
 - Hybridtechnik
- ANFORDERUNGEN:
 - hohe elektrische Leitfähigkeit
 - gute Haftfestigkeit, gute Kontaktierbarkeit, geringe Übergangswiderstände, rauscharme Kontakte
 - Beständigkeit und reproduzierbares Verhalten
- Leitbahnpasten für die Dickschichttechnik:
(80% pulverförmige Metalle + 10% Glasfritten + Trägersubstanz + Lösungsmittel)
auf der Basis von: Ag, Au, Pd, Pt, Ag - Pt, Ag - Pd - Pt, Au - Pd, Au - Pt oder
edelmetallfreie Pasten: Cu
- Schichtwerkstoffe für Dünnschichttechnik: edel: Au, Cu, Al, Ag oder unedel: Fe Ni, Cr Ni/Ni, Cr Au, Cr/Ni/Pd
- Monolithische Technik - Aufdampfen von Leiterbahnen auf die Oberfläche des dotierten Si-Einkristalls:
Al oder Silicide (MoSi₂, WSi₂, TaSi₂, TiSi₂) - Tempern bei 570°C führt zur Legierungsbildung mit dem Si

Vergleich Cu – Al bei Freileitungen, Kabel, Stromschienen, Wicklungen – keine eindeutige Aussage möglich, welches der bessere Werkstoff ist		Cu : Al
querschnitts- gleich	Gewicht Leitwert Stromstärke bei gleicher Erwärmung	1:0,37 1:0,63 1:0,8
leitwert- gleich	Querschnitt Durchmesser Gewicht thermische Grenzstromdichte	1:1,6 1:1,27 1:0,49 1:1,06
erwärmungs- gleich	Querschnitt Durchmesser Gewicht thermische Grenzstromdichte	1:1,37 1:1,17 1:0,42 1:0,93

Leiterwerkstoffe für Leiterplatten

Werkstoff	Kurzform	ρ (Ω mm ² /m)	α bei 20°C /10 ⁻³ /K
Rein-Kupfer	E-Cu57	0,017	4,3
A-Kupfer	Cu 99,8	0,025	3,0
Rein-Nickel	Ni 99,6	0,09	5,0

Leiterwerkstoffe in der Dickschichttechnik

Dickschichtpasten		ρ in m Ω für 25 μ m Schichtdicke
Edelmetallpasten	Silberpasten	2- 3
	Ag/Pt-Pasten	10-30
	Goldpasten	2- 5
Unedle Pasten	Kupferpasten	2- 4
	Nickelpasten	40-60

Leiter-WS für integrierte Schaltungen

Silizid	Sinter-T	ρ , 10 ⁻⁸ Ω m
CoSi ₂	900	18...20
Hf Si ₂	900	45...50
Mo Si ₂	1000	100
Ni Si ₂	900	50
Pd ₂ Si	400	30...50
PtSi	600...800	28...35
Ta Si ₂	1000	35...45
Ti Si ₂	900	13...18
W Si ₂	1000	70
Zr Si ₂	900	35...40

Widerstandswerkstoffe

ANFORDERUNGEN: Anforderungsvielfalt entsprechend Verwendungszweck, oft:

- hoher spezifischer elektrischer Widerstand, kleiner TKR-Wert, geringe Thermospannung gegen Cu
- hohe zeitliche Konstanz, d.h. gute chemische Beständigkeit und Alterungsbeständigkeit
- hohe Absolut- und Relativgenauigkeit der R-Werte, mechanische Festigkeit, thermische Beständigkeit, usw.

Werkstoffgruppen:	Metalle, z.B. Tantal	Metalllegierungen, z.B. Ni/Cr	Halbleiter, v.a. Graphit	Verbundwerkstoffe, z.B. Cr/SiO, "Cermet"-Widerstände
-------------------	-------------------------	----------------------------------	-----------------------------	---------------------------------------------------------

Werkstoffe für Präzisionswiderstände				
Werkstoff	Mn	Ni	Al	Bezeichnung
Cu Mn 12 Ni	12	2	-	
Cu Ni 20 Mn 10	10	20	-	
Cu Ni 44	1	44	-	Konstantan
Cu Mn 2 Al	2	-	0,8	
Cu Ni 30 Mn	3	30	-	
Cu Mn 12 Ni Al	12	5	1,2	

Werkstoffe für Schichtwiderstände	
Bezeichnung (Werkstoff)	T _{max} , °C
Kohleschicht (kristalline Kohle)	155
Kolloidschicht (Ruß in Lack)	125
Edelmetall (Au80 Pt20)	300
Metallschicht Nickel	150
Metallschicht Cr Ni	175
Metalloxid (Zinnoxid)	250
Metallglasur (Edelmetall, Glasstaub)	250

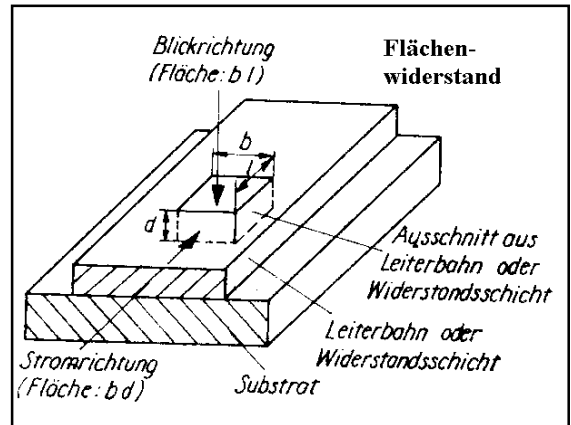
Schichtwiderstände:

- Dickschichtwiderstände: ca. 25 µm (Siebdruck)
- Dünnschichtwiderstände: 10 - 50 nm, geringeres Rauschen, kleiner TKR

Meist angegeben als

Flächenwiderstand oder Widerstand „im Quadrat“

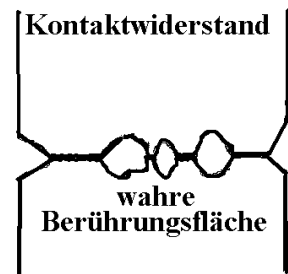
- ANFORDERUNGEN an Schichtwiderstände:
 - geeignete Verarbeitungseigenschaften
 - ausreichende Haftfestigkeit und Verträglichkeit zwischen Widerstands-WS und Isolierung
 - gute Kontaktierbarkeit (z.B. Lötbarkeit)



Kontaktwerkstoffe

ANFORDERUNGEN: $R \rightarrow \infty$ bei offenem Kontakt (Sperrwiderstand) / geringer Übergangswiderstand, d.h. $R \rightarrow 0$ bei geschlossenem Kontakt / Kontakt soll schnell ansprechen / hohe Zuverlässigkeit / Vermeidung des "Klebens" und "Schweißens" / Beständigkeit gegen Materialwanderung / Beständigkeit gegen "Abbrand" beim Schalten unter Last / niedrige Schaltleistung / kleines Einbauvolumen

Kontaktwiderstand $R_K = R_E + R_H$ (Engwiderstand + Hautwiderstand)



Kontakte für	Beispiele	Werkstoffe
1. Schwachstrom	Meßgeräte, Relais, elektronische Geräte	Ag, Au, AuAg, AgCu, Ag Ni
2. Niederspannung	Steuerschalter, Lichtschalter, Leistungsschalter	AgNi, AgW, AgW C,
3. Hochspannung	Hochleistungsschalter	Cu, CuW, AgNi, W, WCu
4. Gleit - Kontakt	Schleifkontakte, Drehschalter, Stromabnehmer	Au, Rh, C, CuAg, CuC, CuCd

Lote, Lotwerkstoffe

Wichtige Weichlote (häufig eutektische Legierungen)

Art	Bezeichnung	Zusammensetzung in %	Schmelzbereich, °C
Zinn-Blei	LSn50Pb	50Pb; 50Sn	183...215
Zinn-Antimon	LSnSb5	5Sb; 0..1Ag	230...240
Silber-Blei	LPbAg3	0..1Sn; 1,5..3,5Ag	305...315

Zur Beachtung (EU, Japan, USA): Blei soll ab 2006 fast völlig aus Elektronikgeräten verbannt werden.

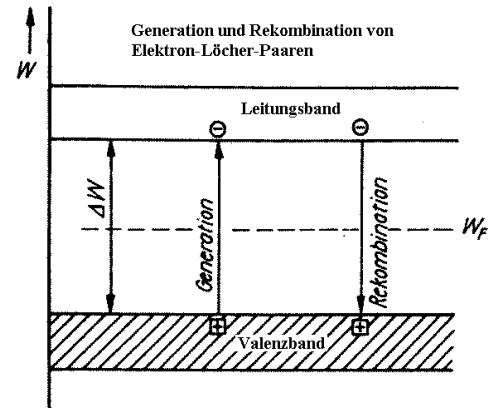
Ablösung: Silberhaltige oder wismuthaltige Lote: erfordert Steigerung der Ag-Produktion um ca. 15 % (von ca. 10.000 t jährlich um 1.300 t) oder bei Wismut um 17 %

höhere Löttemperatur nötig (um ca. 40 K, d.h. Löten bei > 220°C)

Elektrische Eigenschaften von Halbleitern

	n in m^{-3}	Leitfähigkeit in S/m
Metalle	$10^{28} \dots 10^{29}$	$10^7 \dots 10^8$
Halbleiter	$10^{19} \dots 10^{23}$	$10^{-7} \dots 10^4$

- geringer Bandabstand = Aktivierungsenergie $< 2 \text{ eV}$, FERMI-Niveau liegt in der verbotenen Zone
- 2 Arten von Ladungsträgern: a) Elektron im Leitungsband
b) Elektronenlücke = Defektelektron im Valenzband, wirkt wie "positives Loch"
- Elektronen und Löcher können wandern:
Bildung von Elektronen-Löcher-Paaren: Generation
umgekehrter Prozess: Rekombination
- temperaturabhängig veränderte Bandbesetzung möglich:
- Halbleiter haben negativen TKR !
- thermische Anregung (z.B. bei Raum-Temperatur): Einige Elektronen können die Aktivierungsenergie aufbringen und werden ins Leitfähigkeitsband gehoben. Damit sind 2 Bänder teilweise besetzt: elektrische Leitung möglich
- **Elektronenleitung ist nur in teilweise besetzten Bändern möglich !**
- Dotieren: Herstellen definierter Störungen durch Fremdatome im Halbleiterkristall (der 4. Hauptgruppe)
- Bandstruktur - Dotierung - Zustandsdichte - Intrinsicladungsträgerdichte



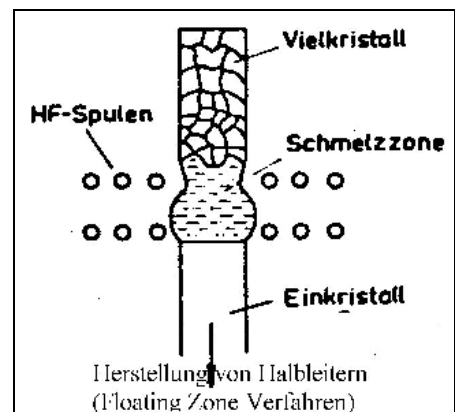
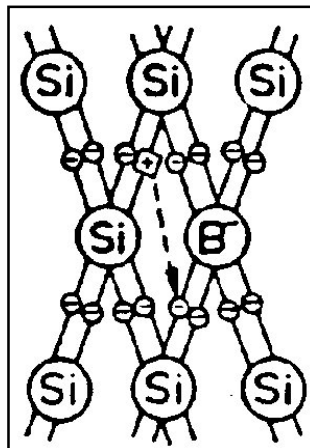
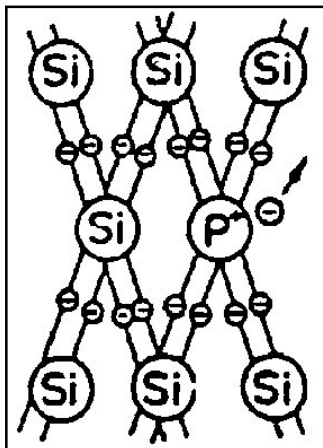
HERSTELLUNG DER EINKRISTALLE: Zonenschmelzen oder Kristallziehen, z.B. CZOCHRALSKI-Verfahren

- hohe Reinheit: 99,99999%, (d.h. weniger als $10^{-3} \%$ Fremdatome)
- fehlerfreie Einkristalle: Versetzungsdichte $< 10^2 \text{ cm}^{-2}$, keine Korngrenzen)

EIGENHALBLEITER = i-Leitung (intrinsic): Bei $T = 0 \text{ K}$: Isolatoren, bei T : $\alpha = e n_i (\mu_- + \mu_+)$, da $n = p = n_i$

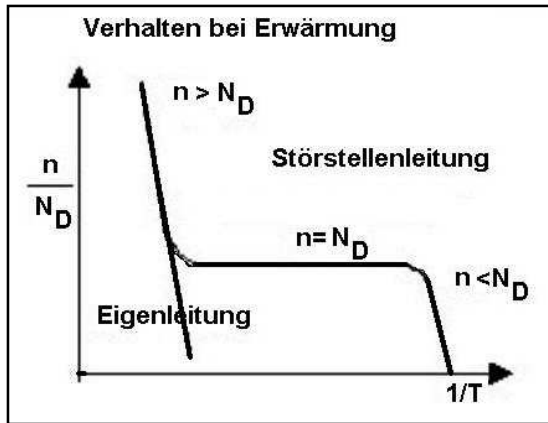
STÖRSTELLENHALBLEITER = häufigste Form der Halbleiter, erzeugt durch Dotieren

Dotieren des Ausgangsmaterial (Si, Ge) durch Elemente der	
V. Hauptgruppe : P, As, Sb: 1 Elektron mehr	III. Hauptgruppe: B, Al, Ga, In: 1 Elektron weniger
d.h. es sind im Si- oder Ge-Gitter vorhanden	
Elektronen im Überschuss	ungesättigte Bindungen
es erfolgt überwiegend	
Elektronenleitung	Löcherleitung
Man nennt die Störstellen (Fremdatome)	
Elektronenspender, Donatoren	Elektronenfänger, Akzeptoren
und den resultierenden Halbleiter	
Überschuss-HL = n-Halbleiter (n =negativ)	Defekt-HL = p-Halbleiter (p =positiv)
Die Leitung erfolgt vorwiegend durch	
Elektronen im Leitungsband	Löcher im Valenzband
Die Energieniveaus der Fremdatom-Elektronen sind aufgrund ihrer geringen Anzahl nicht in Bänder aufgespalten, sondern lokalisiert und liegen in der verbotenen Zone.	

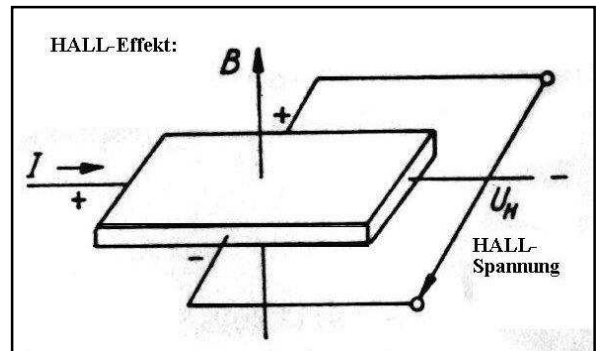


Volumeneffektgesteuerte Halbleiterbauelemente

- **Verhalten im elektrischen Strom:** $\sigma = e \mu_n n + e \mu_p p$, i-Leitung: $\sigma = e n_i (\mu_n + \mu_p)$
- **Elektrischer Durchbruch** - durch Lawineneffekt (hohe E – Vervielfachung Zahl Ladungsträger)
- **GUNN-Effekt:** tritt in einigen Halbleitern bei hoher Feldstärke auf - es bilden sich Feldinhomogenitäten (Domänen mit hoher Elektronenzahl) → Stromoszillation., z.B. GaAs, InP, CdTe, InAs, ZnSe, GUNN-Diode
- **Temperaturabhängigkeit:**
 Eigenhalbleiter: $T \uparrow \rightarrow n_i \uparrow, \mu \downarrow$ (schwach) → Leitfähigkeit $\sigma \uparrow$, d.h. bei hohen T - Eigenleitung
 Störstellenhalbleiter: Störstellenreserve - Störstellenerschöpfung $n=N_D$ oder $p=N_A$ - Eigenleitung
 Anwendung: Thermistoren, Heißleiter, Kaltleiter



- **Innerer Fotoeffekt:** Eigenfotoleitung - Störfotoleitung, Bauelement: Fotowiderstand
- **Verhalten bei Dotierung:** Dotierungsgrad $\uparrow \rightarrow n \uparrow$ (oder $p \uparrow$) → $\mu \downarrow$ (aber weniger) → $\sigma \uparrow$
 bei starker Dotierung: Verschiebung FERMI-Niveau ins Leitungsband / Valenzband = „entartete“ Halbleiter“



- **HALL-Effekt:** Magnetfeld (senkrecht zur Stromrichtung) ruft in einem plattenförmigen Halbleiter eine HALL-Spannung (quer zur Stromrichtung) hervor.
 $U_H = (R_H \cdot I \cdot B) / d$ mit $R_H = -1/(e \cdot n)$

Sperrschichtgesteuerte Halbleiterbauelemente

- **Homoübergänge**, z.B. p-Si / n-Si **Heteroübergänge**, z.B. n-Si / p-GaAs
- **S** - semiconductor, **M** - metal, **O** - oxide, **I** - insulator
- **pn-Übergang:** Begriffe: Diffusionsstrom - Feldstrom - Raumladungszone (ladungsträgerarme Übergangszone) - Injektion - Minorität - Majorität
- **Durchbrucheffekte:** Tunneleffekt, Lawineneffekt, Wärmedurchschlag
- **Sperrschichtfotoeffekt:** innerer Fotoeffekt in der Sperrschicht
 Anwendung: Fotodiode, Fototransistor, Fotoelement (=Solarzelle) (ohne äußere U)
- **Elektrolumineszenzeffekt:** Umkehrung des Sperrschichtfotoeffekts - Rekombination von Ladungsträgern in der Sperrschicht eines in Flußrichtung gepolten p-n-Übergangs bewirkt Emission von Licht
 Anwendung: LED - light emitting diode, LD - Laserdiode (stimulierte Emission)

Unbelasteter pn-Übergang

	p	n
Diffusionsstrom	$\leftarrow I_{Dn}$	$\Rightarrow I_{Dp}$
Feldstrom	$\Rightarrow I_{Fn}$	$\leftarrow I_{Fp}$
$I_{Dn} + I_{Dp} + I_{Fn} + I_{Fp} = 0$		
Raumladungszone		
Feldrichtung E:	$\leftarrow \leftarrow \leftarrow$	

Halbleiter-Werkstoffe

1. ELEMENTHALBLEITER: z.B. Si, Ge, Se, Te, B, C

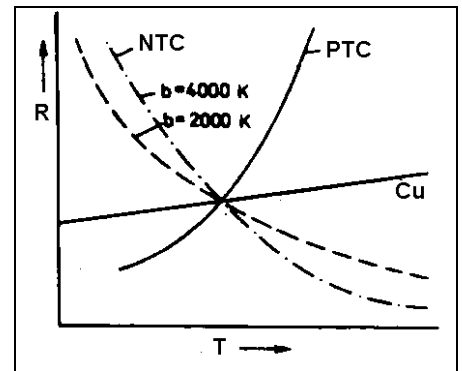
2. VERBINDUNGSHALBLEITER: steuerbare Bandabstände, Wirkungen im Lichtbereich (innerer Fotoeffekt)

III-V-Verbindungen	II-VI-Verbindungen
AlP, AlAs, GaP, AlSb, GaAs, InP, GaSb, InAs, InSb	ZnS, ZnSe, CdS, ZnTe, CdSe, HgS, CdTe, HgSe, HgTe

Bauelement	Werkstoffbeispiel	Anwendung
<i>Volumeneffektgesteuerte Halbleiter-Bauelemente</i>		
NTC (Heißeiter)	Fe ₂ O ₃ -TiO ₂	T.-Messung u. Regelung
PTC (Kaltleiter)	BaTiO ₃ -SrO/PbO	T.-Messung u. Regelung
Varistor	SiC, ZnO	Spannungsstabilisation, Funkenlöschung
GUNN-Effekt	GaAs	Mikrowellenverstärker
Fotowiderstand	CdS, CdSe	Lichtschranke, Flammwächter
HALL-Generator	InSb, InAs	Messung an Halbleitern
Piezowiderstand	Si, Ge	Dehnungsmessstreifen
<i>Sperrschichteffektgesteuerte Halbleiter-Bauelemente</i>		
Diode	Si	Gleichrichter, Schalter
Transistor	Si	Verstärker, Schalter
Fotoelement	PbS, PbSe, Si, GaAs	Belichtungsmesser, Solarzellen
Lumineszenzdiode	GaAs, GaP	Optische Anzeigen
Laserdiode	GaAs	Optische Sender

Materialien für LEUCHTDIODEN

Material	Dotierung	Strahlung	Wellenlänge
Ga As	Zn	infrarot	900 nm
Ga As	Si	infrarot	930 nm
Ga As P	-	rot	655 nm
Ga As P	N	orange	625 nm
Ga As P	N	gelb	590 nm
SrS	C	blau	
Ga P	N	grün	555 nm



HALBLEITER - WERKSTOFFE - HERSTELLUNG (Beispiel: Si)

- Herstellen hochreinen Halbleitermaterials: - pyrometallurgisch aus Quarzsand bzw. Ferrosilizium
- Endprodukt: 99,9999% Si, d.h. 1 ppm Verunreinigungen
- weitere Reinigung durch Zonenschmelzen: es entsteht polykristallines Si (Stäbe)
- Züchten von Einkristallen, mehrere Kristall-Ziehverfahren mit Hilfe von Impfkristallen (Einkristall)
 - Tiegel-Ziehverfahren nach CZOCHRALSKI: es können einkristalline, versetzungsfreie Stäbe $l=1\text{ m}$, $d=150\text{ mm}$ hergestellt werden, geringer Aufwand, Nachteil: sauerstoff-haltig
 - Zonenzieh-Verfahren (tiegelfrei): sauerstofffrei, aufwendiger, universeller verwendbar, höhere Reinheit
- Bearbeitung der Einkristallstäbe: - Zerschneiden in Scheiben $100\ldots 200\text{ }\mu\text{m}$ Dicke - Längen mit Diamantpaste
- Polieren, Ergebnis: homogene n- oder p-dotierte Einkristalle = Wafer
80er Jahre: 6"-Technik, 90er Jahre: 8"-Technik, Heute: 12"-Technik (Waferdurchmesser)
- Herstellung aktiver Bauelemente mit Hilfe der Planartechnik:
 - Maskieren
 - Lithographie
 - Strukturätzen
 - Dotieren
 - Metallisieren

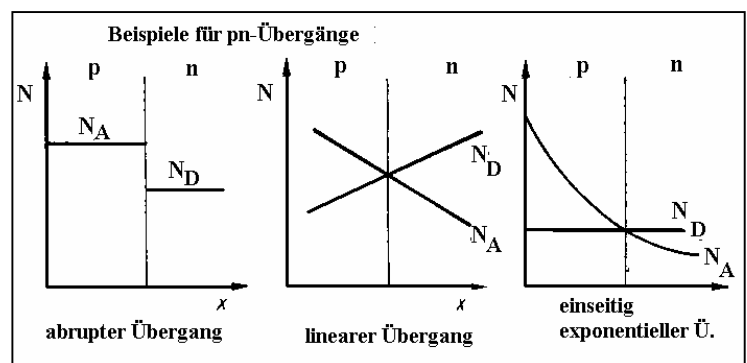
Häufig: Herstellung dünner Halbleiter-Schichten auf dem Einkristall durch

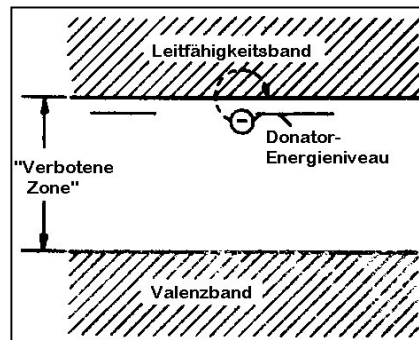
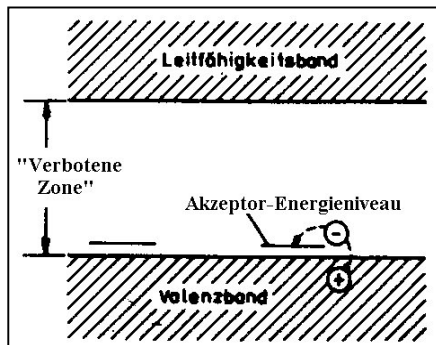
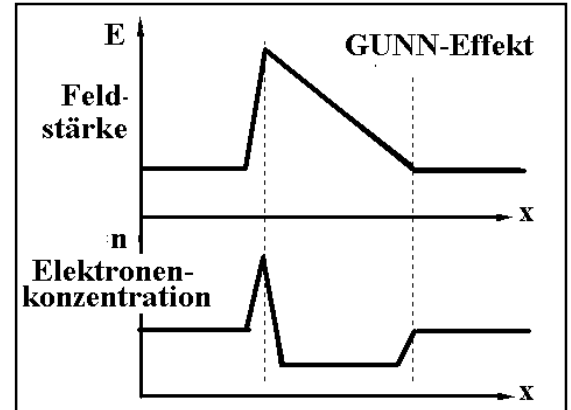
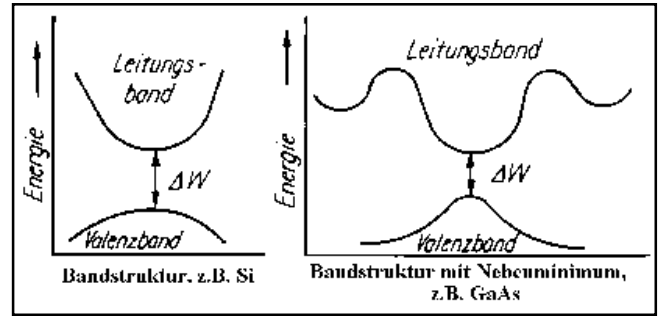
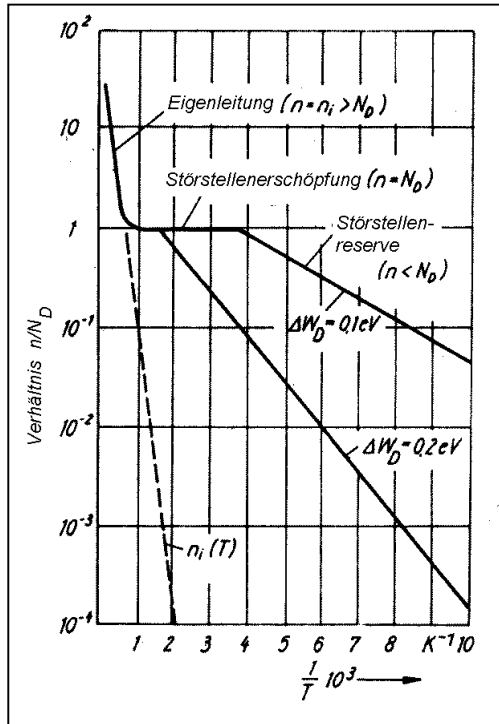
Epitaxie:

- höhere Qualität und beliebige Dotierung

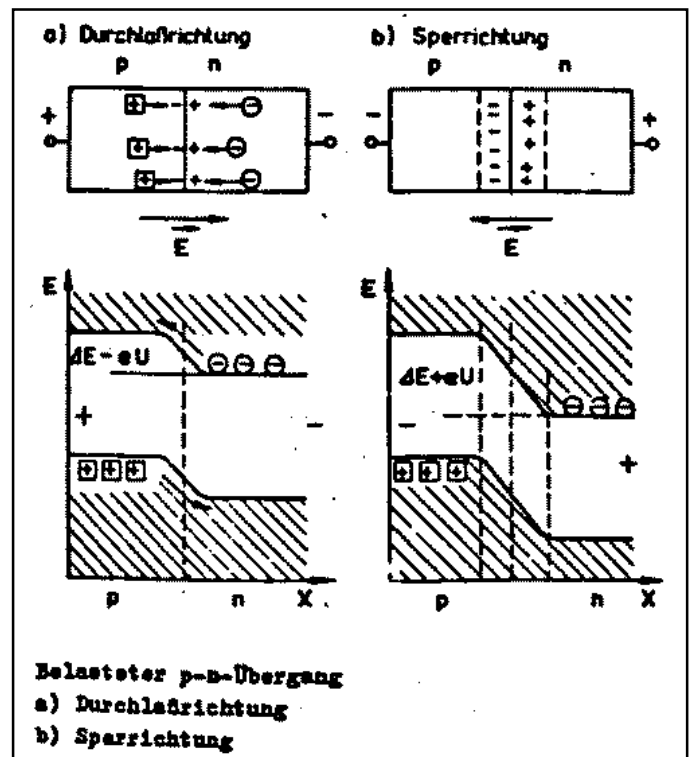
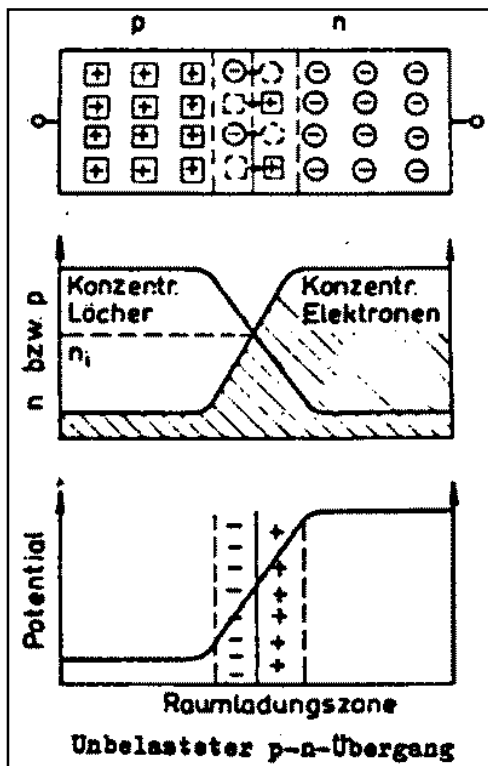
5. Herstellung der Chips aus den Wafern

6. Bonden, Verkapselung





p-Halbleiter
n-Halbleiter
p-n-Übergang:

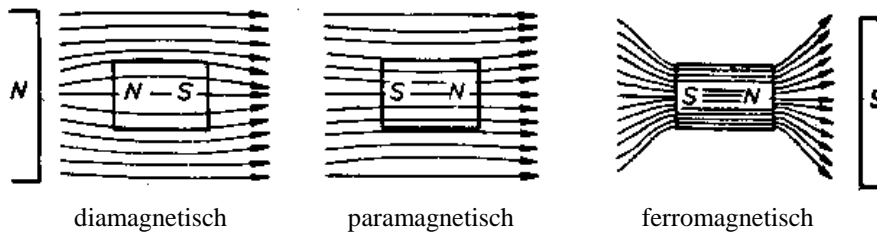


Magnetische Eigenschaften

- magnetische Feldstärke H (in A/m), magnet. Flussdichte B (in Tesla, $1\text{T}=1\text{Vs/m}^2$), Permeabilität μ (in H/m)
- $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}$ (multiplikative Darstellung) oder $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J}$ (additive Darstellung)
- mit \mathbf{J} - Polarisation (Anteil der Flussdichte zusätzlich zum Vakuum)
- dann ist: $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J}$ und $\mu_r = (\mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J}) / \mu_0 \cdot \mathbf{H} = 1 + \mathbf{J} / \mu_0 \cdot \mathbf{H} = 1 + \mathbf{k}$
- mit \mathbf{k} - magnetische Suszeptibilität
- relative Permeabilitätszahl μ_r : gibt das Vielfache der Flussdichte im stoffgefüllten Raum gegenüber Vakuum an
- Magnetfelder entstehen durch bewegte elektrische Ladungen, es bilden sich magnetische Dipole (N und S)

STOFF IM MAGNETFELD:

Art	μ_r	\mathbf{k}	Wirkung	Beispiele	Ursache
Diamagnetismus	<1	<0	äußeres Magnetfeld wird geschwächt	Cu, Au, Ag, Bi, H_2	entsteht bei abgeschlossener Elektronenbahn
Paramagnetismus	>1	>0	äußeres Magnetfeld wird verstärkt	Luft, Al	bei unaufgefüllten Elektronenschalen
Ferromagnetismus (besser: struktureller Magnetismus)	$\gg 1$	$\gg 0$	äußeres Magnetfeld wird stark verstärkt	Fe, Co, Ni	es entstehen spontan (unterhalb Curie-T) WEISSsche Bezirke, die sich im Magnetfeld ausrichten



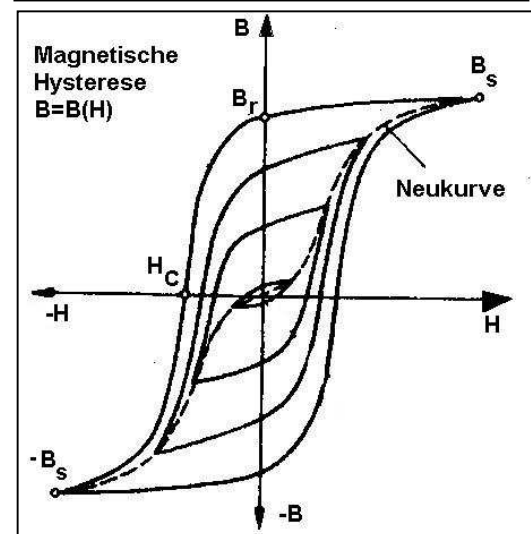
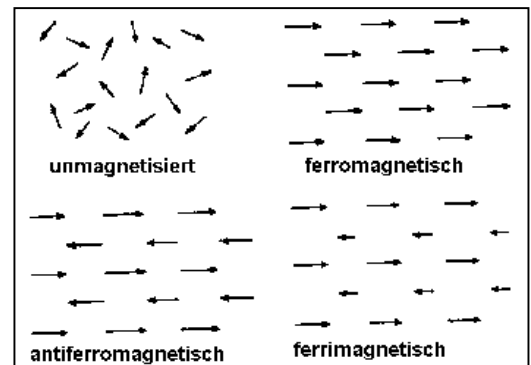
STRUKTURELLER MAGNETISMUS

- Ferromagnetismus:
 - magnetische Momente parallel orientiert
 - CURIE-Temp.: Übergang ferromagnetisch - paramagnetisch
 - Bedingungen:
 1. unvollständige innere Elektronenschale
 2. unkompensierte Spins in dieser Schale (HUNDSche Regel)
 3. Atomabstand = mindestens 3 x Radius dieser Schale
- Antiferromagnetismus:
 - magnetische Momente paarweise antiparallel orientiert
 - NEEL-Temperatur: CURIE-T. antiferromagn. Stoffe
- Ferrimagnetismus:
 - unvollständig kompensierter Antiferromagnetismus

Begriffe:

- WEISSsche Bezirke = Domänen: spontan gleich aufmagnetisierte Bereiche
- Magnetisierungskurve (Hysteresekurve):
 - Remanenz(induktion) B_r : nach dem Verschwinden des erregenden Magnetfeldes verbleibende Flussdichte
 - Koerzitivfeldstärke H_C : die zur Aufhebung der Remanenz notwendige (Gegen-) Feldstärke

Ferromagnetische Metalle	Fe	Ni	Co
Kristallstruktur	krz	kfz	hdP
Schmelzpunkt (°C)	1536	1453	1495
CURIE-Temp. (°C)	770	358	1130
Richtungen leicht. Magn.	[100]	[111]	[0001]

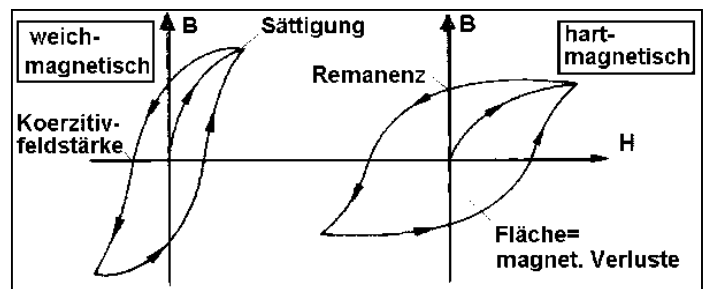
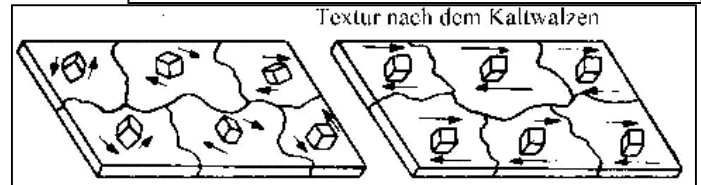
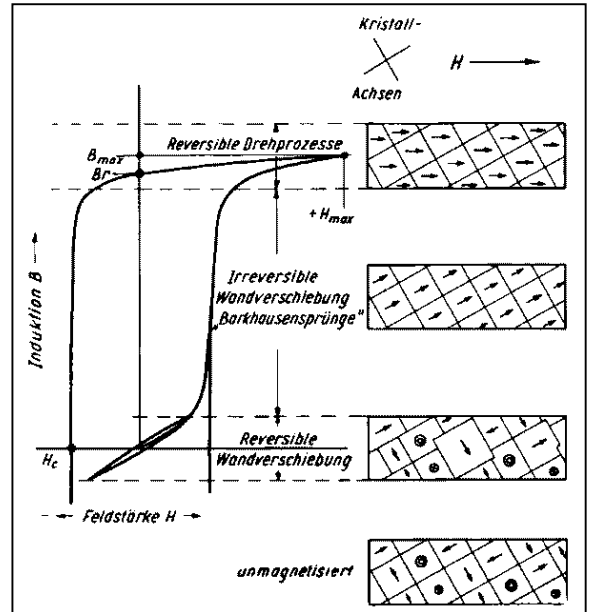
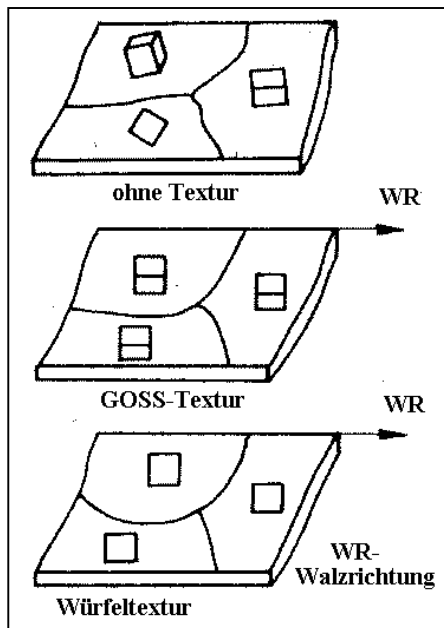


Magnetwerkstoffe

Einteilung nach	Einteilung
Art des Magnetismus	ferro- oder ferrimagnetisch
Stoffart	metallisch, oxidisch oder Pulvermagnete
Struktur	kristallin oder amorph
magnetische Eigenschaften	weichmagnetisch, (magnetisch halbhart) oder hartmagnetisch
Werkstoffzusammensetzung	Rein-Fe, Fe-Si-Legierungen...

Weichmagnetische Werkstoffe:

- leichte, aber hohe Magnetisierbarkeit, d.h. geringe Koerzitivfeldstärke $H_C < 1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1}$
- Gefüge: weitgehend einphasig und rein, große, homogene Körner, häufig: Textur erwünscht
- leichte Ummagnetisierbarkeit ohne große irreversible Anteile
- geringe Wirbelstromverluste
- häufig bestimmte Schleifenform erwünscht
- Verhalten frequenzabhängig
- Anisotropieerscheinungen:
 - Kristallanisotropie
 - Spannungsanisotropie: Magnetostraktion
 - Form- bzw. Gestaltanisotropie



Hartmagnetische Werkstoffe

- hohe Koerzitivfeldstärke, hohe Sättigungsinduktion bzw. Remanenzinduktion
- Entmagnetisierung soll behindert werden, d.h. Energieprodukt: $(H_C \cdot B_r) = \max$.
- geringe Korngröße und heterogenes Gefüge (Behinderung von Wandverschiebungen)
- oder kleine ferromagnetische Teilchen, umgeben von nichtferromagnetischer Matrix (z.B. in Magnetbändern)

Übersicht

	Weichmagnetika	Hartmagnetika
Metalle	Fe, Ni, Co	
Legierungen	Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Al, Cu-Mn-Al	Fe-Al-Ni, Fe-Al-Ni-Co, Fe-Ni-Cu, Pt-Co, Fe-Co-V
Metalloxide (Ferrite)	Mn-Zn-O, Ni-Zn-O, Mg-Mn-O	Ba-O, Sr-O
Amorphe Metalle	$\text{Fe}_{78}\text{Si}_{19}\text{B}_{13}$, $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Mo}_1\text{Si}_{16}\text{B}_{11}$, $\text{Co}_{75}\text{Mn}_4\text{Fe}_1\text{Si}_{11}\text{B}_9$	feinkristalline Fe-Nd-B-Legierungen, die durch gesteuerte Kristallisation aus dem amorphen Zustand hergestellt werden

Weichmagnetika		Hartmagnetika	
Werkstoff	Anwendung	Werkstoff	Anwendung
Fe 99,98	Relais, Ankerkörper	Al Ni Co	Magnete für Meßgeräte, Motoren, Generatoren
Fe Si 3	Dynamo-, Trafoblech, Übertrager	Ba-Ferrite	Lautsprecher, Haftmagnete
Fe Ni 36	Relais, Übertrager, Drosseln, Filter,	Sm ₂ Co	Kleinstmagnete für Motoren, Tasten, Hörhilfen, Mikrofone
Fe Ni 50	Abschirmungen, Meßwandler		
Fe Ni 75	- " -		
FeCo50 V2	max. Flußdichte (Luft-/Raumfahrt)		
Ferrite	Spulen, Filter, Übertrager		

ANWENDUNG AMORPHER METALLE

1. Weichmagnetische, amorphe Legierungen - technisch bedeutendste Gruppe
 - bestehen aus 1 oder mehr Grundkomponenten (Fe, Co, Ni) oder glasbildenden Komponenten (B, Si und C) + Zusätze, die die thermische Stabilität erhöhen oder die magnetischen Eigenschaften genau einstellen (Mn)
 - Typisch: Fe₇₈Si₁₉B₁₃, Co₆₈Fe₄Mo₁Si₁₆B₁₁, Co₇₅Mn₄Fe₁Si₁₁B₉
 - meist als Band bis 300 mm breit und 25-30 µm dick gegossen
 - ideale weichmagnetische Eigenschaften: H_C und Wirbelstromverluste - klein, p - 3x so hoch wie vergleichbare kristalline Legierung, geringere Leerlaufverluste bzw. geringere Erwärmung in Transformatoren
 - Anwendung in Transformatoren, als Magnetköpfe, magnetoelastische Sensoren, Markierungselemente in Warensicherungssystemen (aufgrund der höheren Streckgrenze)
2. Amorphe Lotfolien, die bei der Anwendung kristallisieren: eingesetzt, da besser handhabbar, Foliendicke = Dicke der notwendigen Lotschicht: Aktivlot (Cu-Ti- oder Cu-Zr-Legierungen), ohne Flussmittel
3. Hartmagnetische, feinkristalline Fe-Nd-B-Legierungen, (werden durch gesteuerte Kristallisation aus dem amorphen Zustand hergestellt)
4. Feinkristalline, hochkarbidhaltige Hartmetalle, die bei der Herstellung den amorphen Zustand durchlaufen
 - in diesen beiden Gruppen dient der amorphe Zustand als Zwischenstufe zur gesteuerten Kristallisation
 - Herstellung wie Folien - Zerkleinern zu Flocken – pulvermetallurg. Verarbeitung durch Mahlen und Sintern
 - Korngröße 20-50 nm führt zu höherer H_C als bei üblichen Sintermagneten mit Korngröße von 5-30 µm

Elektro- und magneto-keramische Werkstoffe

Eigenschaft	Werkstoff	Anwendung
Isolatoren		
Dielektrizität	SiO ₂ , SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , SiC, AlN	Diffusionsmasken, Oberflächenpassivierung
Ferroelektrizität	BaTiO ₃	Kondensatoren
Piezoelektrizität	Pb(Zr,Ti)O ₃ [PZT]	Generatoren, Drucker, Sensoren
Elektrooptik	(Pb,Ln)(Zr,TiO)O ₃	Unterbrecher, Farbfilter, Lichtleiter, Bildspeicher
Pyroelektrizität	PZT, PbTiO ₃ , LiTaO ₃ , SrNbO ₃	T-Sensoren, Infrarot-Detektoren
Magnetische Eigenschaften (Ferrite)	Spinelle (Fe ₂ O ₃ :MeO; Me=Übergangsmetall) Granate (5·Fe ₂ O ₃ :3·Me ₂ O ₃) Me=Seltenerdmetall)	Induktoren, Transformatoren, Aufnahmeköpfe, magn. Verstärker, Magnetkerne (Keramiken)
Elektrische Leiter		
<i>Volumeneigenschaften</i>		
Ionenleiter	ZrO ₂ , NASICON	Festelektrolyte, Gassensoren
Halbleiter	TiO ₂ , SnO ₂ , ZnO, Perowskite (BaTiO ₃ , SrTiO ₃ , SrSnO ₃)	Gassensoren
Supraleiter	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} Bi-Sr-Ca-Cu-Oxide	Magnetfeldsensoren, Antennen, Magnete, Drosseln, Leiterbahnen
NTC	NiO-TiO ₂ (Halbleiter), ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ (Ionenleiter)	Temperatursensoren, Temperaturkompensation
<i>Korngrenzeneigenschaften</i>		
PTC	Dotiertes BaTiO ₃	Heizelemente. T-Kompensation
Varistorverhalten	ZnO	Überspannungsschutz
<i>Oberflächeneigenschaften</i>		
Varistorverhalten	BaTiO ₃	Elektronische Sensoren
Oberflächenionen-leitfähigkeit	SiO ₂ , ZnCr ₂ O ₄	Feuchtigkeitssensoren

Dielektrische Eigenschaften

- elektrische Feldstärke E (in V/m)
- elektrische Verschiebung(sichte) (Flußdichte) $D=D(E)$ (in As/m²)
im Stoff: $D = \epsilon_r \epsilon_0 E$ (multiplikative Darstellung) bzw.
 $D = \epsilon_0 E + P$ (additive Darstellung)
- relative Dielektrizitätszahl = Permittivität $\epsilon_r =$ gibt Menge der im Stoff gebundenen Ladungen im Vergleich zum Vakuum an: $\epsilon_r = \epsilon_r$ (Werkstoff, Temperatur, Frequenz)
- Polarisation P : beschreibt Bildung elektrischer Dipole,
 $P = D - \epsilon_0 E = \epsilon_0 E (\epsilon_r - 1) = \chi_e \epsilon_0 E$
mit $\chi_e = (\epsilon_r - 1)$ - dielektrische Suszeptibilität

		feldfreier Raum	Polarisation im elektro-statischen Feld
Verschiebungspolarisation	Elektronen- oder Atom-polarisation		
	Ionen-polarisation		
Orientierungs-polarisation			

Effekte in Dielektrika:

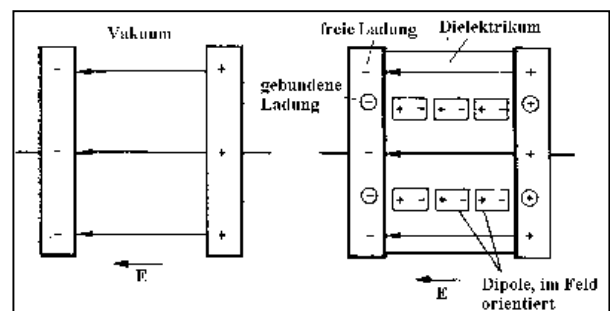
- Elektrostriktion: Effekt der Längenänderung (Verformung) beim Anlegen eines elektrischen Feldes.
- Piezoelektrizität: Piezoelektrische Kristalle laden sich bei Druck- oder Zugbeanspruchung in Richtung einer ihrer polaren Achsen elektrisch auf.
- Pyroelektrizität: polare piezoelektrische Kristalle, die ohne Druck nur durch Temperaturänderung polarisiert werden können - es entsteht Spannung
- Elektrischer Durchschlag

Stoff im elektrischen Feld - Dielektrika		
Dielektrika	Par(a)elektrika	Ferroelektrika
a) Elektronenpolarisation = unpolare Moleküle werden im Feld zu elektrischen Dipolen b) Ionenpolarisation = elektrisches Feld verschiebt Ionen im Gitter a) + b): Deformations-Polarisation Luft, Al ₂ O ₃ , Papier, Kunststoffe, Lackfilme	Ordnungs- oder Orientierungspolarisation = permanente Dipole werden im Feld ausgerichtet Wasser, Glas-Keramik	permanente Dipole bereits ohne Feld in Domänen, Hysteresis D - E, remanente Polarisation, CURIE-Temperatur, große Dielektrizitätszahl bis zu 10 ⁴ BaTiO ₂ -CaSn O ₃

Dielektrische Werkstoffe

- Einteilung:

Dielektrika	natürliche	künstliche
anorganische	Glimmer, Quarz, Glas	Keramik, Porzellan
organische	Holz, Seide, Papier, Baumwolle	Polystyrol, PVC, Silicone



- Einteilung nach Anwendung:

Passive Dielektrika - dienen der Isolation		Aktive Dielektrika - nutzen Polarisation aus	
ohne tragende Eigenschaften	Transformatoröl, Isolierlacke	Dielektrika zur Erhöhung der Kapazität	Kondensatoren
mit tragenden Eigenschaften	Isolatoren von Freileitungen, Substrate	Ferroelektrische Werkstoffe mit remanenter Polarisation	Informations-Speicher
		Piezoelektrische Werkstoffe zur Signal-Wandlung	Phonogeräte, Filter, Zündgeräte

Wichtige Eigenschaften: Dielektrizitätszahl, Wasseraufnahme, Durchschlagverhalten, Durchschlagfestigkeit, Durchgangswiderstand, Oberflächenwiderstand

- **Polymere Dielektrika** (oft bezeichnet als organische Dielektrika, aber Ausnahme: Silikone)

1. Polymerisate

Chemische Bezeichnung	Handelsname (Auswahl)	Beispiele
Polyethylen	Lupolen, Hostalen	Kabelisolierung, Folien, Korrosionsschutz
Polystyrol	Trolitul, Styroflex, Styropor	HF-Isolierungen, Spritzguss-Teile, Kondensatoren
Polyvinylchlorid	Igelit, Vestolit, Hostalit, Vinoflex	Platten, Rohre, Folien, Pasten, Pressmassen
Polyisobutylen	Oppanol B	Kabelisolierungen, Dichtungen
Polytetrafluorethylen	Teflon	Platten, Folien, Formteile

2. Polykondensate

Chemische Bezeichnung	Handelsname (Auswahl)	Beispiele
Phenoplaste	Bakelit, Resinol, Novotex	Hartpapier, Hartgewebe, Schichtstoffe
Aminoplaste	Ultrapas, Melopas, Maprenal	Leime, Lacke, Preßmassen
Polyamide	Nylon, Ultramid A, Supronyl	Fasern, Folien, Gehäuse, Lager, Zahnräder
Silikone	Silicone, Silastic	Silikon-Öle, -Fette, -Kautschuk, -Harze

3. Polyaddukte

Chemische Bezeichnung	Handelsname (Auswahl)	Beispiele
Polyätherester	Devron, Epon, Epikote, Scurol, Araldit	Gießharze, Klebstoffe, Vergußmassen

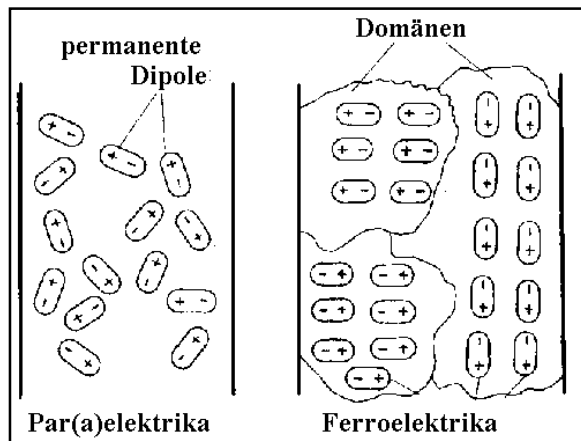
- **Anorganische Dielektrika:**

Anorganische Dielektrika		
kristallin		amorph (Glas)
einkristallin	polykristallin (Keramik)	Glaskeramik

einkristalline Dielektrika			
SiO ₂ (Quarz)	Al ₂ O ₃ Saphir	Al ₂ O ₃ :Cr Rubin	3Y ₂ O ₃ ·5Al ₂ O ₃
piezoelekt. Wandler	Substratmaterial	Festkörperlaser	Yttrium-Aluminium-Granat

polykristalline Keramik				
BeO, Al ₂ O ₃ : hohe Wärmeleitfähigkeit		BeO, Al ₂ O ₃ , MgO, TiO ₂ hohe Temp.-Beständigkeit		Al ₂ O ₃ , TiO ₂ günstige elektr.Eigenschaften
BeO	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ , MgO, ZrO ₂	Al ₂ O ₃ , Ta ₂ O ₅	TiO ₂
Sockel für Transistoren	Substrate, HF-Bauteile	Isolierstoffe für Hoch-Temp.-Öfen	Elektrolyt-kondensator	Keramik-kondensator

Gäser: 1. Oxidische Gläser					
a) Be ₂ O ₃ -haltig	b) SiO ₂ -haltig: Silikatglas				c) P ₂ O ₅ -haltig
Boratglas	SiO ₂	SiO ₂ + Me _x O _y			Phosphatglas
	Quarzglas	Kalk-Alkali-Glas	Bleiglas	Bor-Aluminium-Silikatglas	
		(CaO, Na ₂ O, K ₂ O)	(PbO)	(B ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃)	
2. S-, Se-, As-haltige Gläser					
Anwendung: Leiterplatten („E-Glas“), Röhrentechnik, Lichttechnik, Isolatoren, Licht-Wellen-Leiter (LWL)					



Lichtwellenleiter

- optische Energie- und Informationsübertragung in dünnen Glas- oder Kunststoff-Fasern
- Kerns- \varnothing : 10...100 μm , Mantel- \varnothing : 125...200 μm
- dielektrischer Wellenleiter aus hochreinem Werkstoff
- mehrere km Länge
- Wirkungsprinzip: Totalreflexion: unterschiedliche Brechungszahl Kern/Mantel
- Wellenlänge: VIS (meist 860 nm), IR, UV
- Bandbreite: 15...40 MHz
- nicht störanfällig (Felder)
- Bauformen:
 - Stufenindexfaser bzw. Gradientenfaser, Monomoden-LWL (single mode) bzw. Multimoden-LWL
- Moden: eigenständige, voneinander unabhängige elektromagnetische Felder, deren Form bestimmt wird durch die LWL-Kennwerte: Kernradius, numerische Apertur A_N , Profilparameter g und Wellenlänge λ

Anforderungen an LWL - WERKSTOFFE

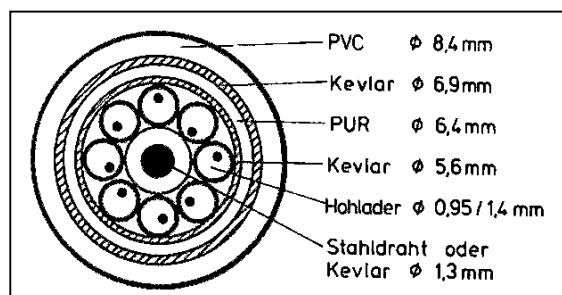
- Transparenz
- geringe Dämpfung,
- meist 3 optische Fenster 850 nm, 1300 nm, 1550 nm
- geringe Dispersion
- mechanische Eigenschaften:
 - Zugfestigkeit, Stoßfestigkeit, Druckfestigkeit, Mikrokrümmungsstabilität (micro bending), Torsionsfestigkeit, Wasserfestigkeit
- chemische Beständigkeit (Rissfreiheit und Abwesenheit von OH⁻-Ionen)
- Temperaturbeständigkeit

Anwendung im Vergleich:

LWL-Kabel für Ortsnetze: 6 oder 12 LWL-Fasern,
LWL-Kabel für Fernnetze: 60 oder 120 LWL-Fasern

LWL-*Transatlantik*-Kabel (TAT-Kabel):

kann 40.000 Gespräche (digital) aufnehmen, braucht nur alle 50 km verstärkt werden, (TAT-Cu-Kabel: 4.200 Gespräche bei 53 mm \varnothing , Verstärkung alle 9,5 km)



LWL - WERKSTOFFE

KIESELGLAS SiO_2

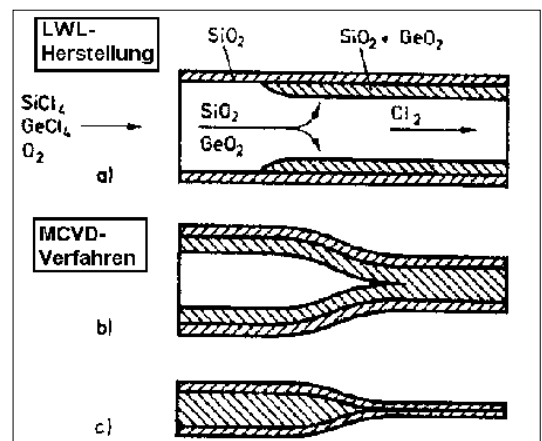
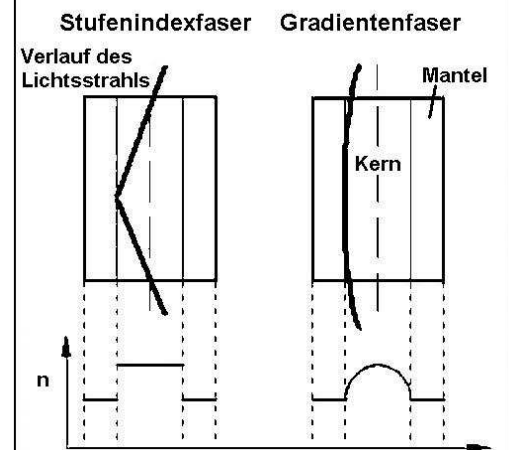
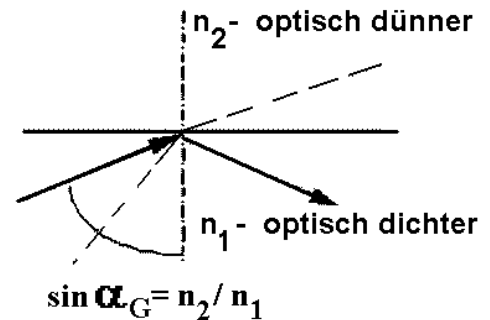
(auch, aber seltener, Mehrkomponentengläser wie: Natriumcalciumsilicat- ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$)- Glas

Natriumborsilikat- ($\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$)- Glas

$$30 \text{ dB} = 3 \text{ Bel} \rightarrow 1/1000 = 0,1 \%$$

	Dämpfung dB/km	Eindringtiefe bei 30dB in m
Fensterglas	50.000	0,6
Optisches Glas	3.000	10
Dichter Nebel	500	60
Atmosphäre über Stadt	10	3.300
LWL (0,85 μm)	3	10.000
LWL (1,55 μm)	0,3	100.000

Grenzwinkel der Totalreflexion



Eigenschaften	Brechungsindex $n =$	Reinheit	Herstellung
- extrem niedrige thermische Ausdehnung - hervorragende Elastizität - hohe T.-Wechselbeständigkeit - hohe Transformations- und Erweichungs-Temperatur - geringe Wärmeleitfähigkeit - niedrige dielektrische Verluste - gute optische Durchlässigkeit (VIS, IR, UV)	1,4518 (0,9 μ m) 1,4496 (1,3 μ m) 1,4435 (1,6 μ m) Änderung von n durch Dotierung: GeO ₂ bzw. P ₂ O ₅ - $n \uparrow$ B ₂ O ₃ bzw. F - $n \downarrow$	Metallionen: 1ppm OH ⁻ -Ionen: 10 ⁻⁸ ...10 ⁻⁹	meist synthetische Herstellung: Tetraeder-Aufbau (Netzwerkbildner) Schichtaufbau durch MCVD (modified chemical vapor deposition) oder VAD (vapor phase axial deposition): - Preform kollabiert zu Vollstab - Ziehvorgang, Beschichtung (Primärschicht) (auch Doppeltiegelverfahren)

KUNSTSTOFFE als LWL: weit über 100 im Einsatz, aber nur einige gut geeignet

Eigenschaften:	Vorteile:	Nachteile:
- hohe Lichtdurchlässigkeit, geringe Trübung - amorphe Struktur - geringe n -Schwankungen über große Längen - höchste Geometrie Genauigkeit (Kern- und Manteldurchmesser) - gut mechanisch bearbeitbar	- leicht handhabbar - große Zug- und Biegefestigkeit - hohe Flexibilität (Biegeradius: 0,6...5 mm) - gute Koppelbedingungen (Kern-Ø: 100...400 μ m) - einfache Endflächenbearbeitung - geeignet für VIS und IR - gute Langzeitstabilität - einfache Herstellung, - geringer Preis	- hohe Dämpfung (150...6000 dB/km) - spektrale Dämpfungsminima bei geringeren Wellenlängen
geeignet für 10m...1km, vorrangig EDV, Kfz, Automatisierung, schnelle Entwicklung der LWL-Technik		

Laser

KOHÄRENZLÄNGE DES LICHTS

Lichtquelle	Frequenz-bandbreite	Kohärenzlänge
weißes Licht	rd.200THz	rd.1,5 μ m
Spektrallampe bei RT	1,5GHz	20cm
Kr-Spektrallampe 77K	375MHz	80cm
Halbleiterlaser GaAlAs	2MHz	150m
HeNe-Laser	159kHz	2km

Im Unterschied zum Licht herkömmlicher Lampen:

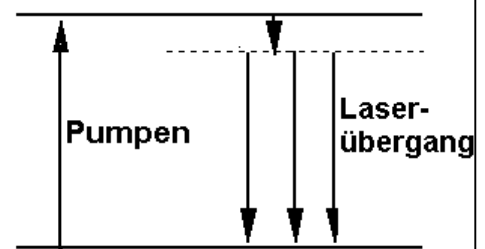
LASER = light amplification by stimulated emission of radiation

- erster Laser: T. H. MAIMAN 1960 - Rubinlaser
- synchronisierte Ausstrahlung angeregter Atome
- Laserbedingungen:
 - 1) Besetzungsinversion
 - 2) Rückkopplung mit einem Resonator
 - 3) Schwellenbedingung: Verstärkung größer als Verluste
- Eigenschaften: große räumliche und zeitliche Kohärenz, hohe Monochromasie, hohe Amplitudenstabilität
- Prozeß: 3 oder 4 Energieniveaus
 - 1) Pumpen: optisch oder Stoßanregung oder chemisch oder Strom durch pn-Übergang - dann strahlungsloser Übergang in metastabiles Niveau danach: induzierte Emission
- Rückkopplung: Spiegel, Halbleiterlaser: saubere Spaltflächen, meist {110}
- Halbleiterlaser:
 - Injektionslaser, pn-Übergang: Epitaxieverfahren
 - verschiedene Typen, z.B. AlGaAs-Einfach-Hetero-Struktur oder InGaAsP-Laserdiode

Eigenschaften:

Wellenlänge: VIS: meist 780 nm, 890 nm, aber auch UV, IR	Impuls- oder Dauerstrichbetrieb	direkte Modulation bis GHz-Bereich
geringe Emissionsbreite: 2...4 nm	mechanisch robust	hohe Lebensdauer (10 ⁷ h)
geringe Abmessungen (0,5 x 0,4 x 0,1 mm)	hoher Leistungswirkungsgrad	geringe Anregungsspannung

Laserprinzip: 3 Energieniveaus



Halbleiterlaser

