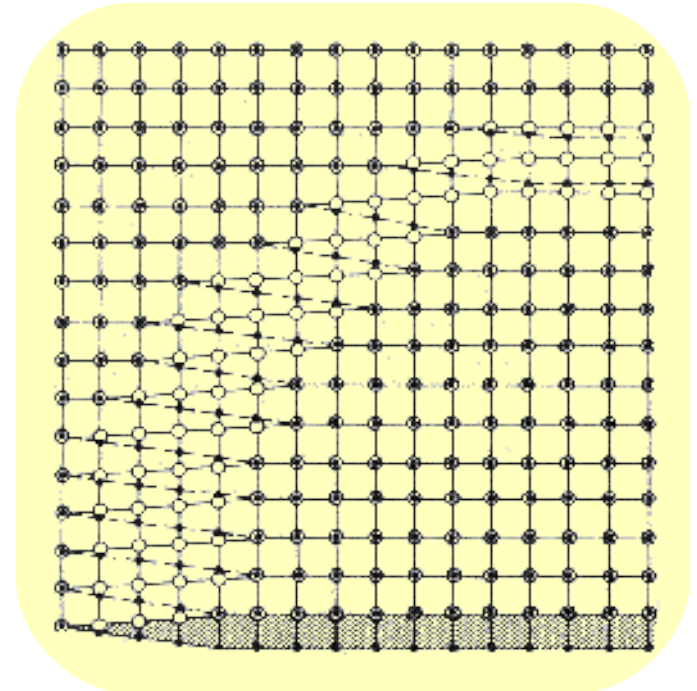
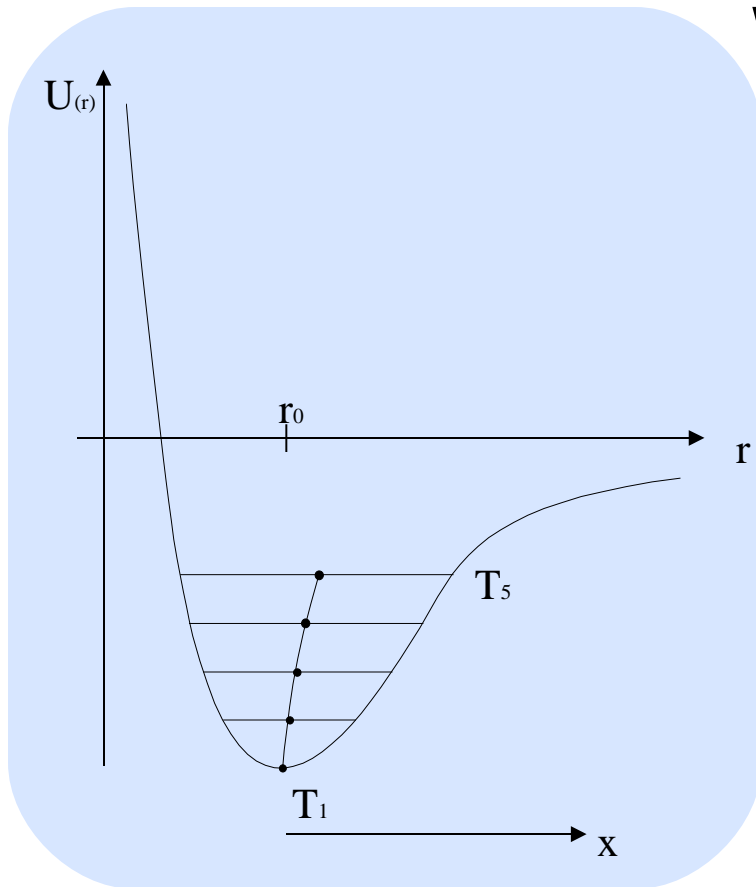


Einführung in die Werkstoffphysik

Vorlesung: Prof. Dr. H. Strunk

WS 2008/2009



© E. Arzt, Universität Stuttgart

Übungen: Werkstoffphysik und Festkörpermechanik

Plan: Übungen Einführung in die Werkstoffphysik + Festkörpermechanik

WS07/08 Vorlesungsbeginn: 13.10.2008
 Vorlesungsende: 13.02.2009

Termin:	Di	14.45-16.15
---------	----	-------------

		Hörsaal 2R4 - Werkstoffphysik		Seminarraum 2P4 - Festkörpermechanik	
Datum	Einheit	14.45-15.30	15.30-16.15	14.45-15.30	15.30-16.15
28.10.2008	Ü1	A	B	B	A
04.11.2008	Ü2	A	B	B	A
11.11.2008	Ü3	A	B	B	A
18.11.2008	Ü4	A	B	B	A
25.11.2008	Ü5	A	B	B	A
02.12.2008	Ü6	A	B	B	A
09.12.2008	Ü7	A	B	B	A
16.12.2008	Ü8	A	B	B	A
13.01.2009	Ü9	A	B	B	A
20.01.2009	Ü10	A	B	B	A
04.02.2009 ?		Klausur			

Achtung: am 28.10.2008 finden die Übungen Festkörpermechanik im Seminarraum 5H7 statt (nicht 2P4!)

Literaturliste

- Gottstein: **Physikalische Grundlagen der Materialkunde**
- Hornbogen: **Werkstoffe** – Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metallen, Polymer- und Verbundwerkstoffen
- Ilchner: **Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik** – Eigenschaften, Vorgänge, Technologien
- Ashby, Jones: **Engineering Materials 1** - An introduction to properties, applications and design
- Askeland: **Materialwissenschaften**
- Schatt: **Einführung in die Werkstoffwissenschaft**
- Vollertsen, Vogler: **Werkstoffeigenschaften und Mikrostruktur**
- Hull, Bacon: **Introduction to dislocations**

Einführung in die Werkstoffphysik

Inhalt

1. Einführung

- 1.1 Materialwissenschaft
- 1.2 Werkstoffklassen,
Eigenschaftsklassen

2. Elastizität: Bindung - Struktur

- 2.1 Bindungstypen: Überblick
- 2.2 Mikroskopische Erklärung des elastischen Verhaltens I:
Energieelastizität
- 2.3 Aufbau von Polymeren
- 2.4 Mikroskopische Erklärung des elastischen Verhaltens II:
Entropieelastizität
- 2.5 Theoretische Grenzen des elastischen Verhaltens

3. Plastizität: Einführung in die Versetzungstheorie

3.1 Gleitung und Gleitsysteme

3.2 Versetzungsbegriff

3.3 Geometrische Eigenschaften der Versetzungen

3.4 Anordnung von Versetzungen, Versetzungsdichte

3.5 Versetzungsbewegung ("Kinematik")

3.6 Statische Eigenschaften von Versetzungen

3.7 Bildung von Versetzungen

3.8 Versetzungen in Kristallgittern

11. Bruch: Grundlagen der Bruchmechanik

4.1 Theoretische Trennfestigkeit

4.2 Brucharten in Metallen

4.3 Rissbildung

4.4 Rissausbreitung: Konzept der Spannungskonzentration

4.5 Bruchmechanik

Umrechnung von Einheiten

Winkel	1 rad	= 57.30°
Dichte	1 g cm ⁻³	= 10 ³ kg m ⁻³
Diffusionskonstante	1 cm ² s ⁻¹	= 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
Viskosität	1 P	= 0.1 N m ⁻² s
Kraft	1 kp (kgf)	= 9.807 N
	1 lbf	= 4.448 N
	1 dyn	= 10 ⁻⁵ N
Länge	1 Meile	= 1.609 km
	1 Fuß	= 304.8·10 ⁻³ m
	1 Zoll	= 25.4·10 ⁻³ m
	1 Å	= 10 ⁻¹⁰ m
Spannungsintensität	ksi·√in	1.10 MN m ^{-3/2}
Oberflächenenergie	1 erg cm ⁻²	= 1 mJ m ⁻²
Temperatur	1° F	= 0.556 K
	32° F entspricht 0 °C	
Volumen	1 UK Gallone	= 4.546 x 10 ⁻³ m ³
	1 US Gallone	= 3.785 x 10 ⁻³ m ³
	1 Liter	= 10 ⁻³ m ³

Einheiten: Leistung, Spannung und Druck

Leistung	kW	erg s ⁻¹	PS	ft lbf s ⁻¹
kW (kJ s ⁻¹)	1	10 ¹⁰	1.34	7.38x10 ²
erg s ⁻¹	10 ⁻¹⁰	1	1.34x10 ⁻¹⁰	7.38x10 ⁻⁸
PS	7.46x10 ⁻¹	7.46x10 ⁹	1	5.50x10 ²
ft lbf s ⁻¹	1.36x10 ⁻³	1.36x10 ⁷	1.82x10 ⁻³	1

Druck	MN m ⁻²	dyn cm ⁻²	lbf in ⁻²	kp mm ⁻²	bar
MN m ⁻²	1	10 ⁷	1.45x10 ²	0.102	10
dyn cm ⁻²	10 ⁻⁷	1	1.45x10 ⁻⁵	1.02x10 ⁻⁸	10 ⁻⁶
lbf in ⁻²	6.89x10 ⁻³	6.89x10 ⁴	1	7.03x10 ⁻⁴	6.89x10 ⁻²
kp mm ⁻²	9.81	9.81x10 ⁷	1.42x10 ³	1	98.1
bar	0.10	10 ⁶	14.48	1.02x10 ⁻²	1

Einheiten: Energie

	J	erg	cal	eV	B T h U	ft lb f
J	1	10^7	0.239	6.24×10^{18}	9.48×10^{-4}	0.738
erg	10^{-7}	1	2.39×10^{-8}	6.24×10^{11}	9.48×10^{-11}	7.38×10^{-8}
cal	4.19	4.19×10^7	1	2.61×10^{19}	3.97×10^{-3}	3.09
eV	1.60×10^{-19}	1.60×10^{-12}	3.83×10^{-20}	1	1.52×10^{-22}	1.18×10^{-19}
B T h U	1.06×10^3	1.06×10^{10}	2.52×10^2	6.59×10^{21}	1	7.78×10^2
ft lb f	1.36	1.36×10^7	0.324	8.46×10^{18}	1.29×10^{-3}	1

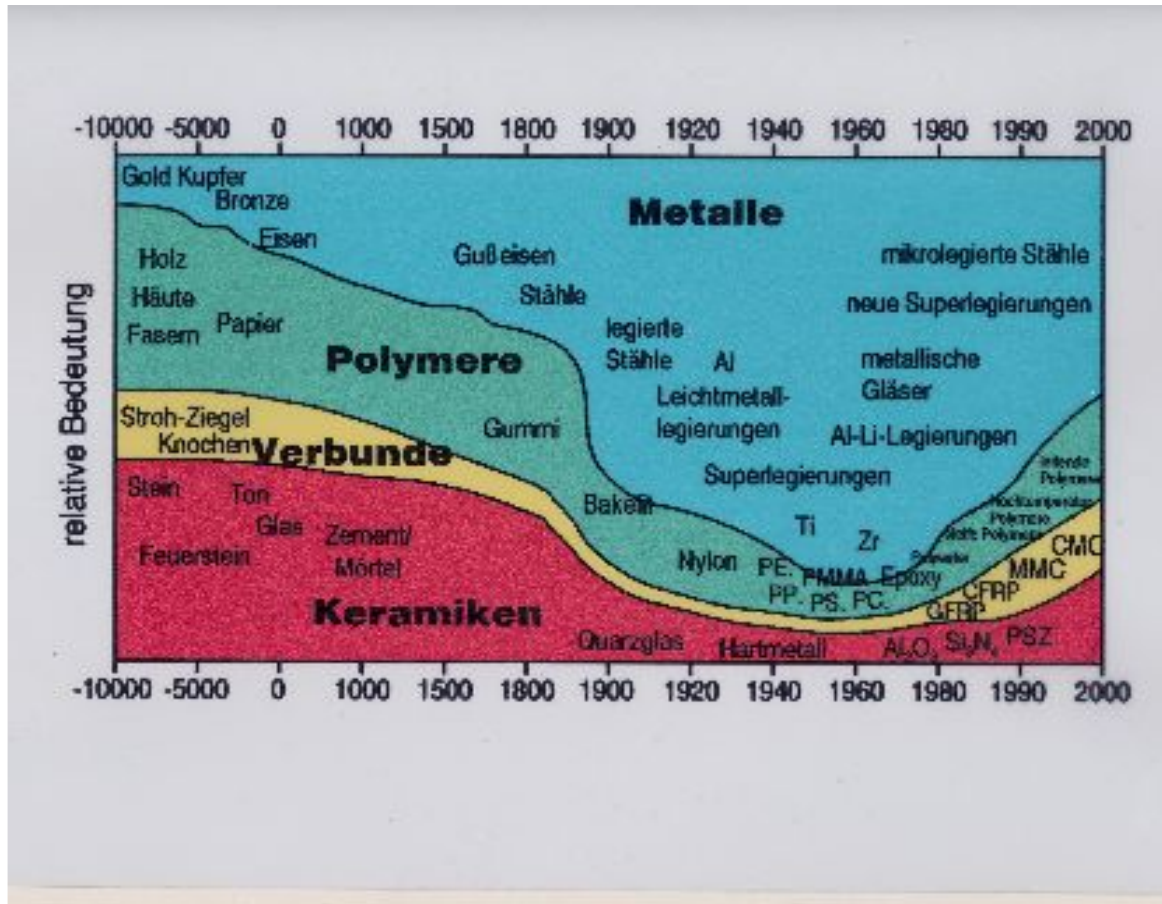
Naturkonstanten

Absoluter Temperaturnullpunkt	-273.2°C
Avogadro-Zahl, N_A	$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante, k	$1.381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Elektronenladung, e	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Faraday-Konstante, F	$9.649 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Gaskonstante, R	$8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Magnetisches Moment des Elektrons	$9.274 \times 10^{-24} \text{ A m}^{-2}$
Influenzkonstante, ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}$
Planck'sches Wirkungsquantum, h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Ruhemasse des Elektrons	$9.110 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Ruhemasse des Neutrons	$1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Ruhemasse des Protons	$1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Atommasseneinheit	$1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Ideales Gasvolumen unter Standardbedingungen (0 °C, 1 atm)	$\approx 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$

SI-Vorsilben

multiplikativer Faktor	Vorsilbe	Symbol
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga	G
10^6	Mega	M
10^3	Kilo	K
10^{-3}	Milli	m
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Piko	p

Werkstoffwissenschaft in der Geschichte

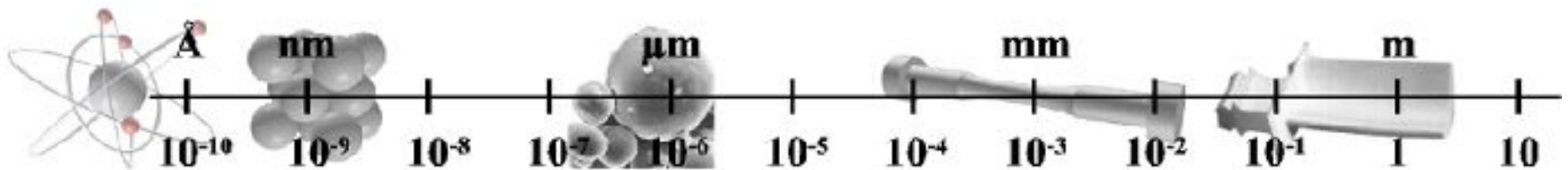


Bronzepferd
 (Cu + 20-30% Sn)
 Hochdorf, 500 BC

nach M.F. Ashby

1. Einführung

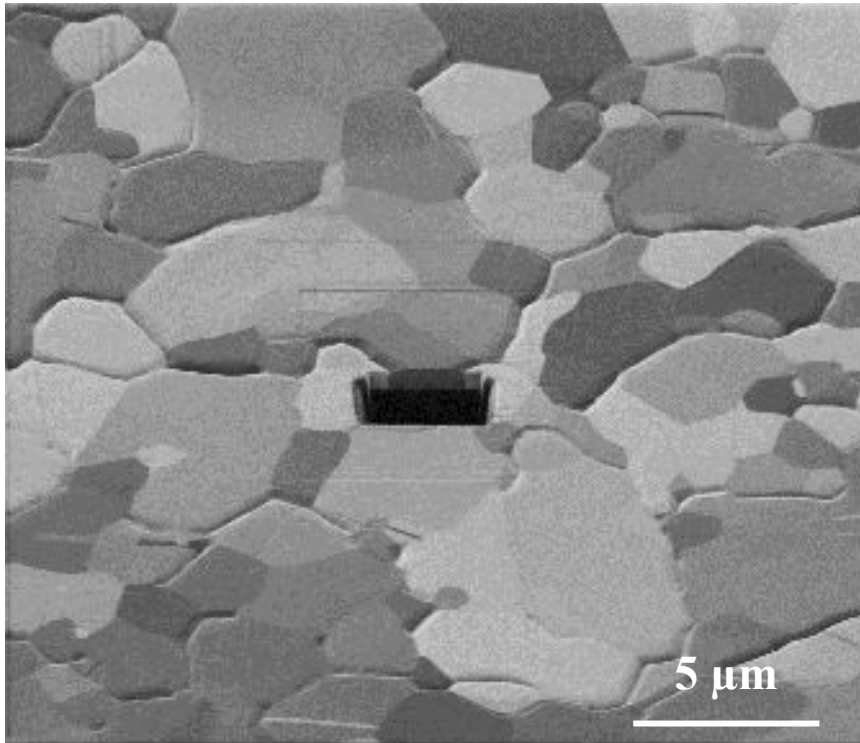
1.1 Werkstoffwissenschaft: Wissenschaft der Skalen und Defekte



Die Eigenschaften von Bauteilen hängen von der atomaren Struktur (z.B. Bindung) und/oder dem Gefüge (Mikrostruktur, z.B. Korngröße) ab. So ist beispielsweise die maximale Einsatztemperatur von Turbinenschaufeln von der Schmelztemperatur der verwendeten Nickelbasislegierungen abhängig. Die Schmelztemperatur eines Materials wird durch die Stärke der atomaren Bindung bestimmt. Dagegen lassen sich die Festigkeit und Kriechbeständigkeit des verwendeten Materials durch die Mikrostruktur stark beeinflussen (bei Metallen durch Zugabe von Legierungselementen: "Mischkristallhärtung", Einbau von Teilchen: "Dispersionshärtung").

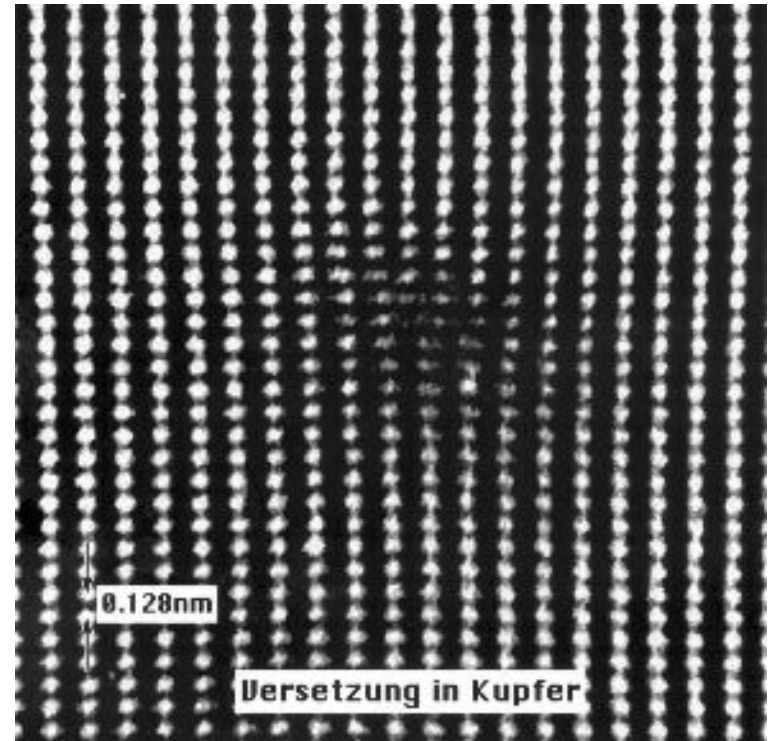
Von Mikro zu Nano: Materialstruktur

Gefüge eines Kupferfilms



Weiss, MPI

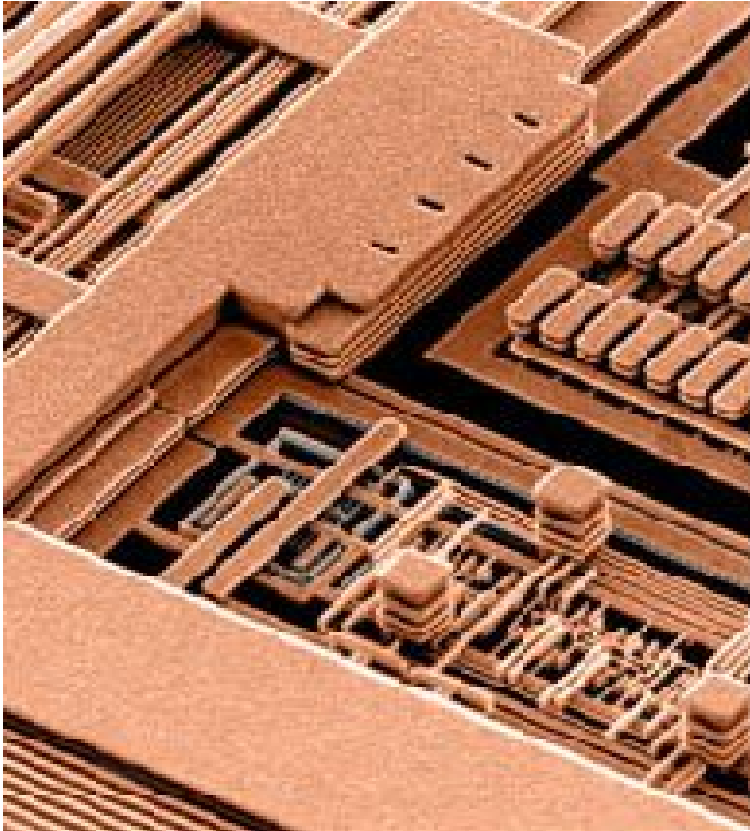
Atomare Defektstruktur
in Kupfer



Sigle, MPI

Materialbearbeitung 1

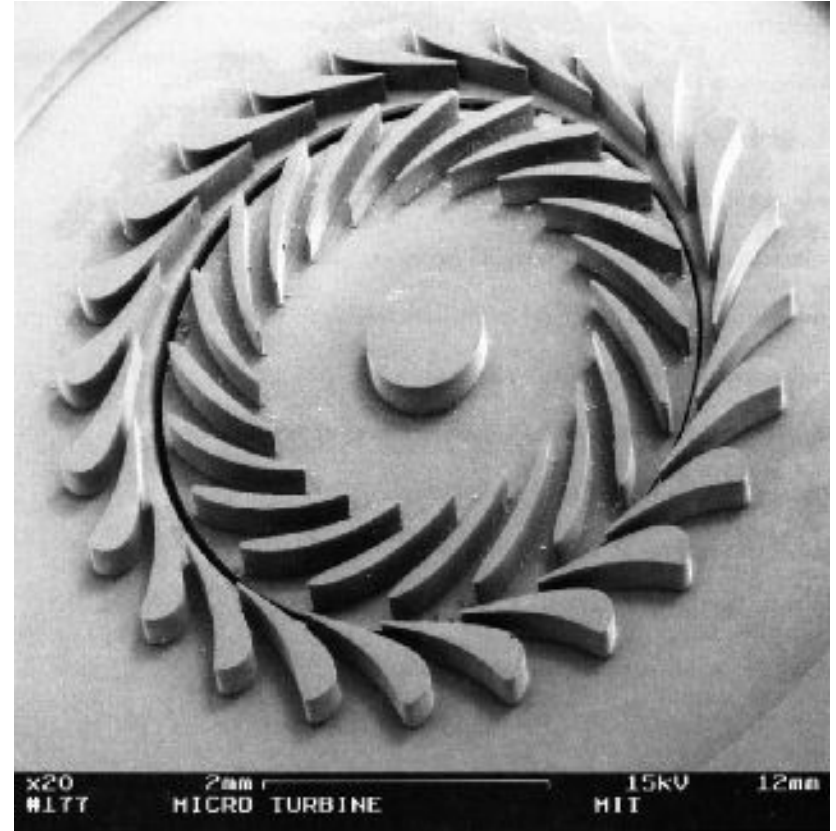
Mikrochip



IBM

Metallisierungsebenen eines Computerchips

Mikroturbine

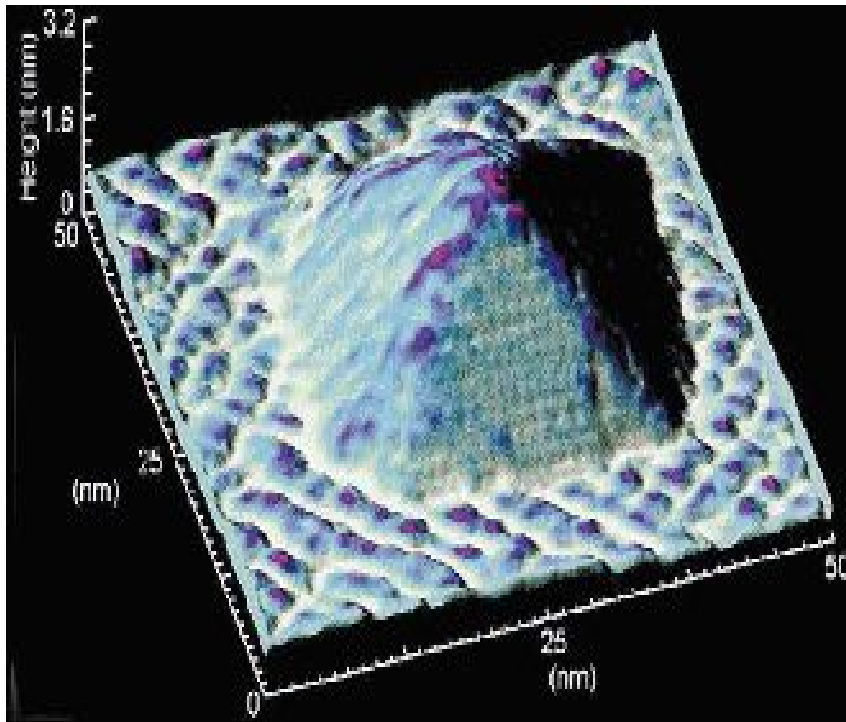


MIT

Mikroturbine aus Silizium

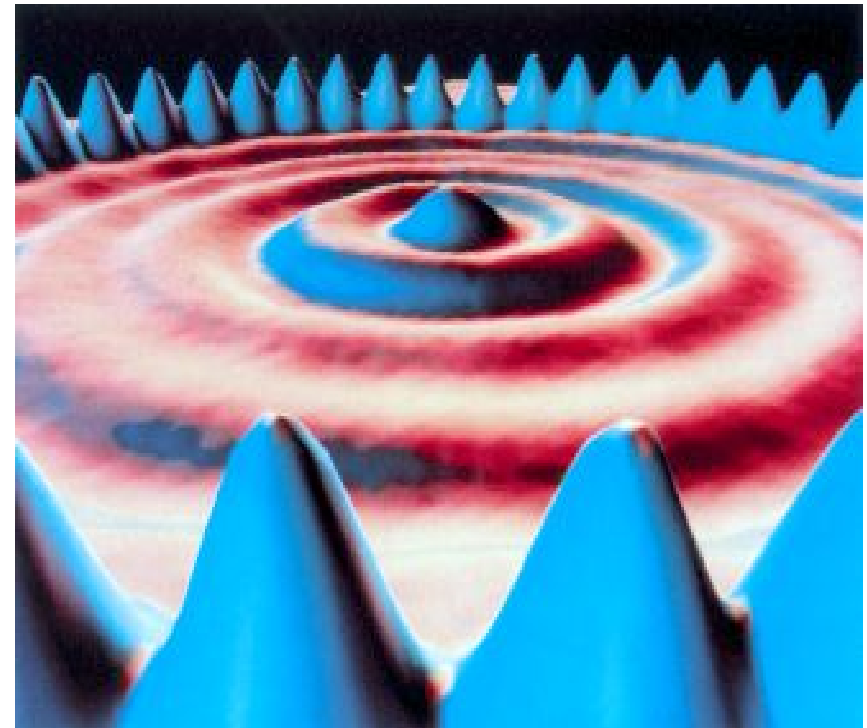
Materialbearbeitung 2

"Quantum dot"



Ge-Atome auf Si

„Quantum Corral“ (STM)

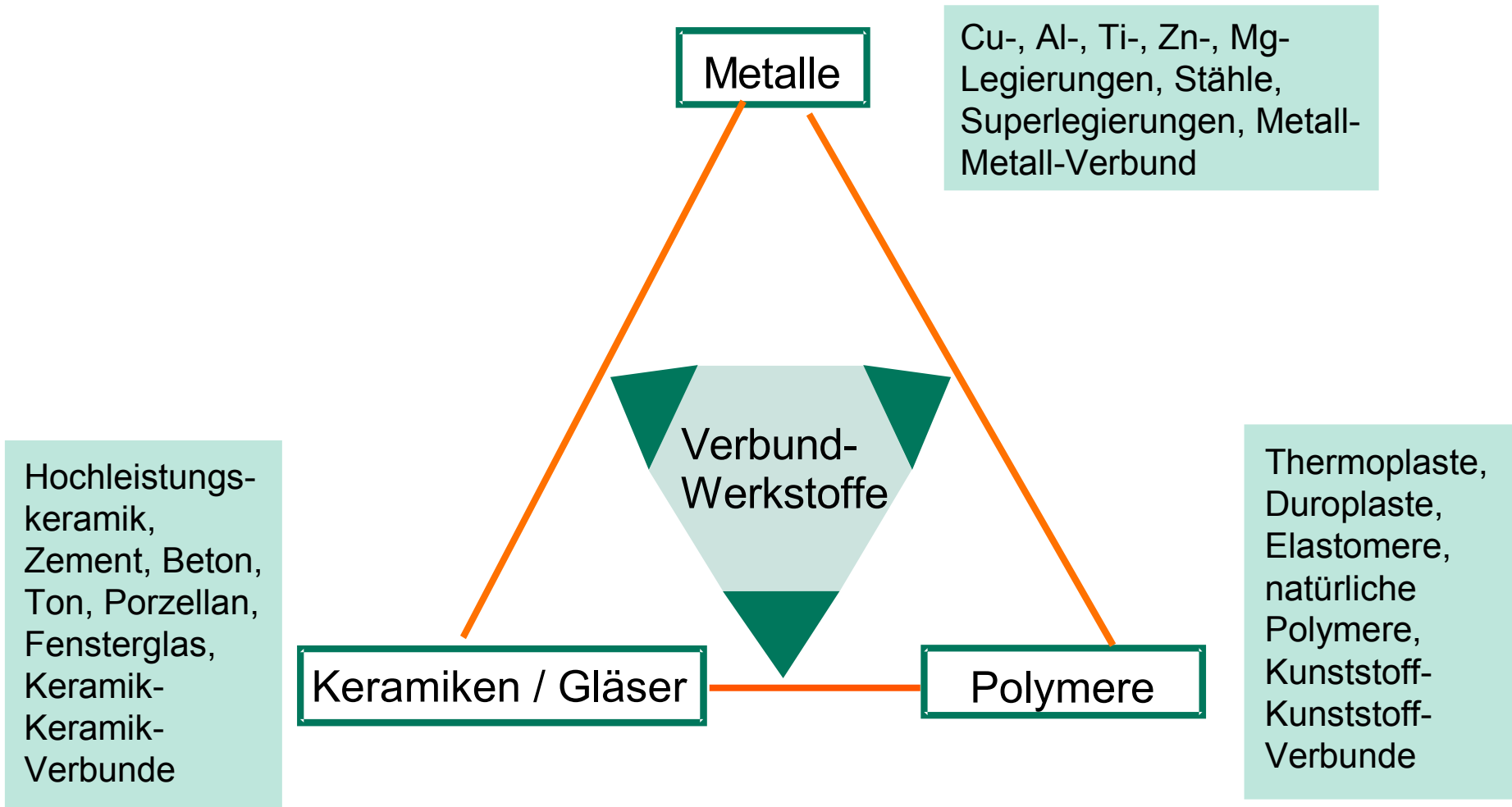


48 Fe-Atome auf Cu

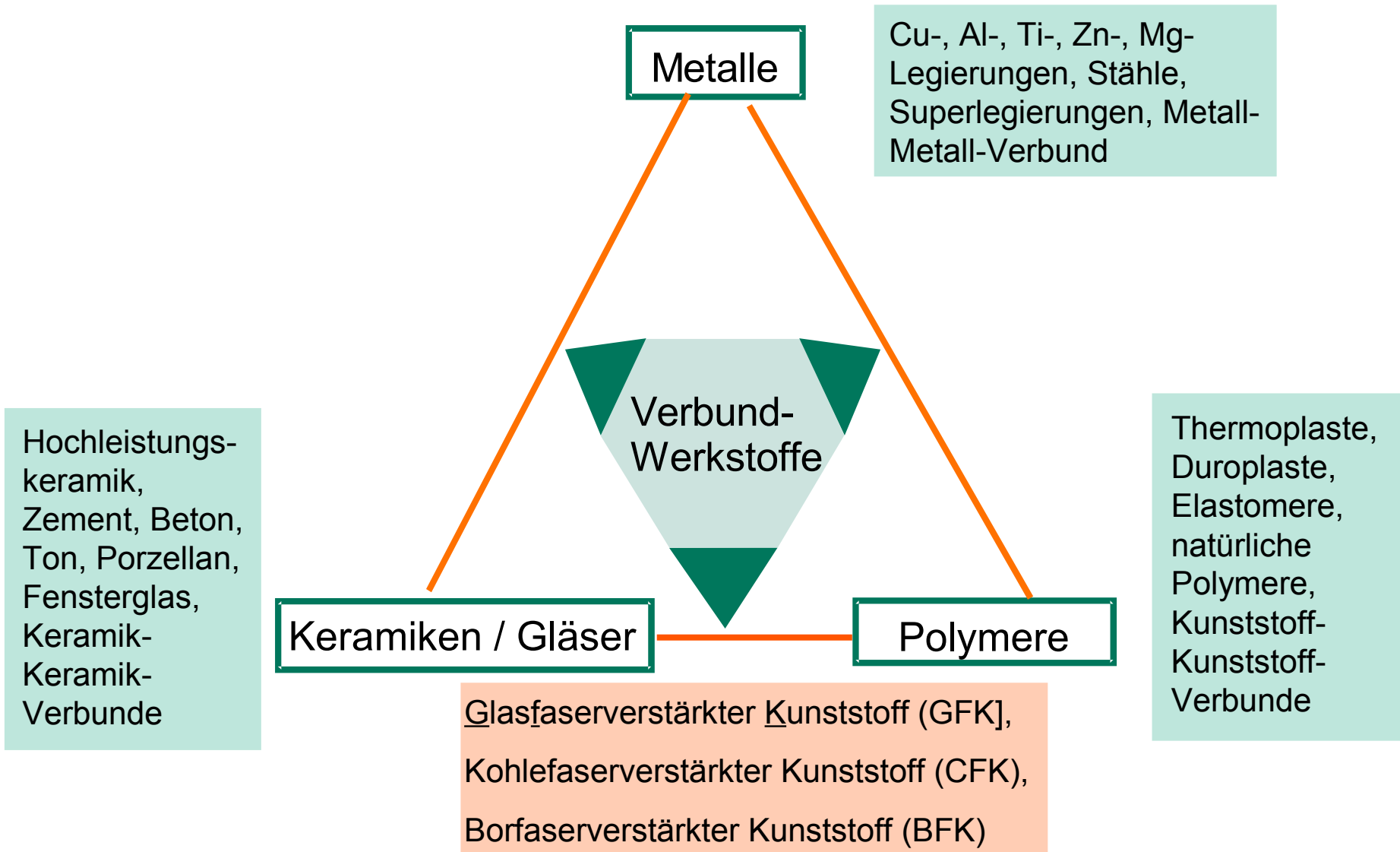
IBM

Beeinflussung der elektronischen Eigenschaften durch Dimensionierungseffekte (size effects).

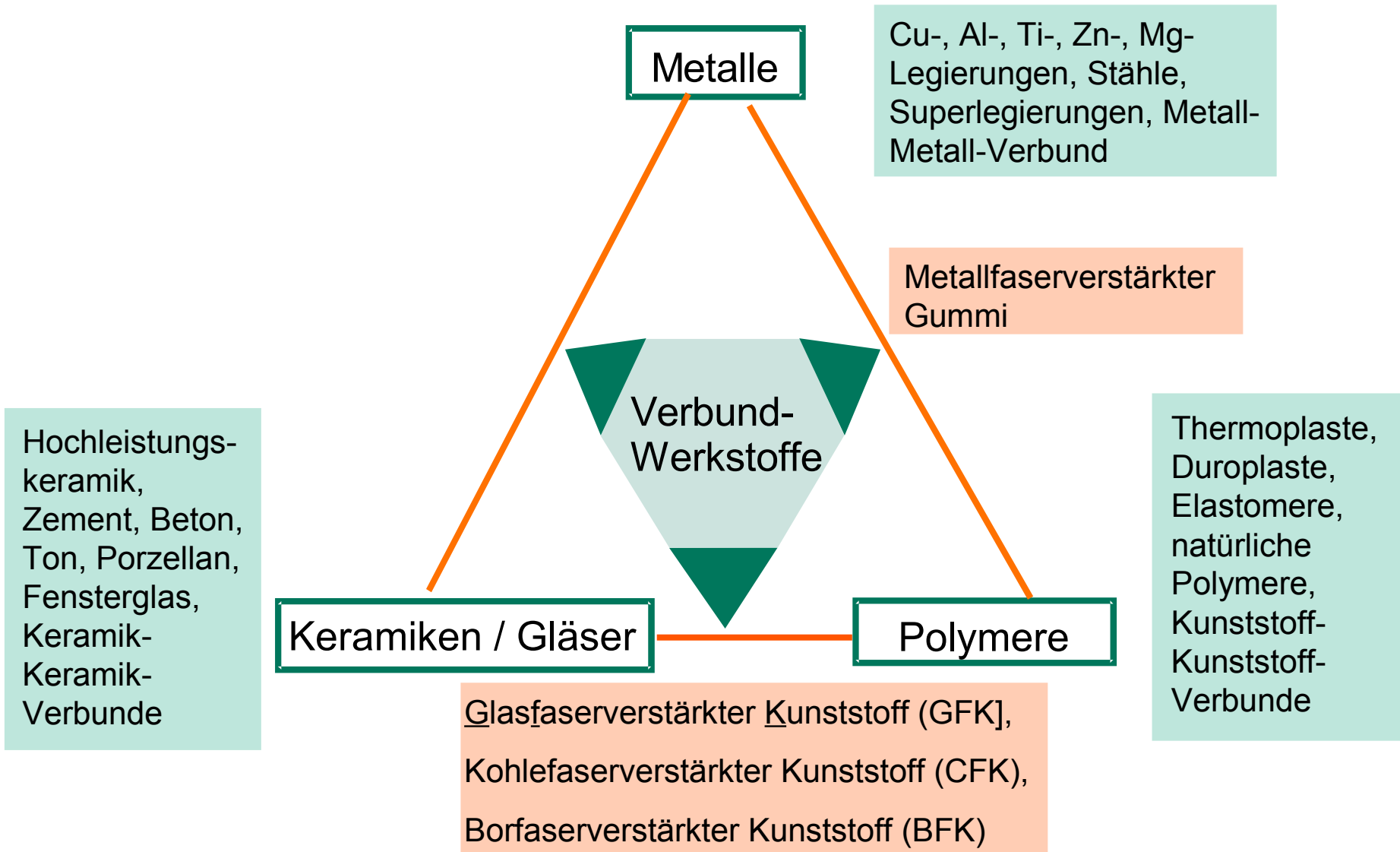
1.2 Werkstoffklassen



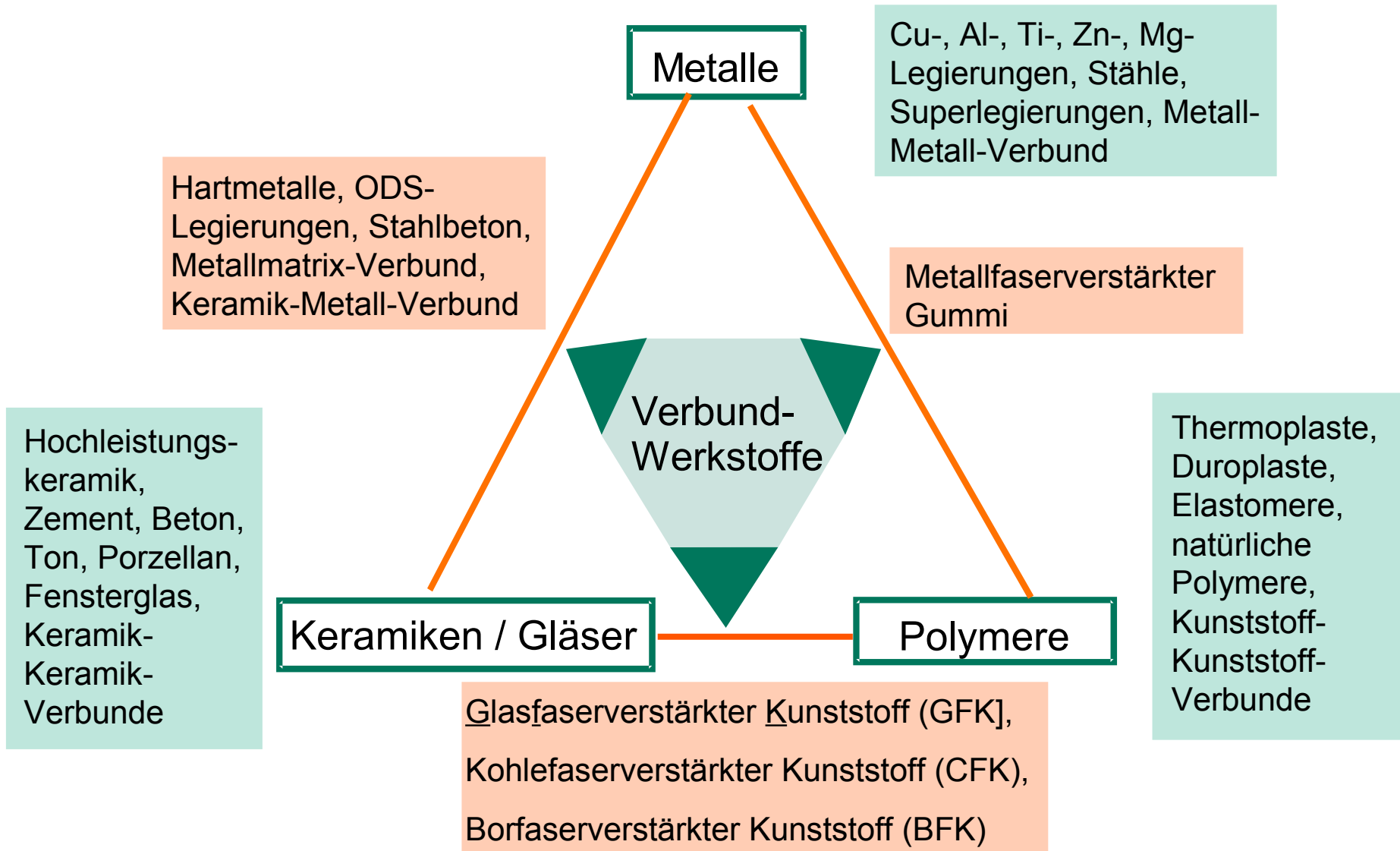
1.2 Werkstoffklassen



1.2 Werkstoffklassen



1.2 Werkstoffklassen



Metall - Keramik - Glas - Polymer: Was ist was?

Material	Bindung	Packung	Chemie
Metall	metallisch	kristallin/(amorph)	anorganisch
Keramik	kovalent/ ionisch	kristallin/amorph	anorganisch
Glas	kovalent/ ionisch metallisch	amorph	anorganisch/ organisch
Polymer	kovalent, van der Waals	amorph/kristallin (Molekülketten)	organisch

Metall - Keramik - Glas - Kunststoff: Was ist was?

Material

Metall

Keramik
Glas

Polymer

Verbundwerkstoff
≥ 2 Materialkomponenten

Eigenschaften

hohe elektr. und therm. Leitfähigkeit, hohe Festigkeit,
hohe Steifigkeit, gute Verformbarkeit

geringe elektr. und therm. Leitfähigkeit, Isolator,
spröde, hart

geringe elektr. und therm. Leitfähigkeit,
geringe Festigkeit, hohe Flexibilität, geringe Dichte

neuwertige Eigenschaften i.V. zu den Ausgangs-
komponenten,
z.B. hohe Festigkeit und hohe Flexibilität in GFK

Eigenschaftsklassen

mechanisch

elast. Steifigkeit,
Streckgrenze,
Zugfestigkeit,
Härte,
Brucharbeit,
Bruchdehnung,
Ermüdung,
Kriechbeständigkeit,
Dämpfung

physikalisch

thermische,
elektrische,
magnetische,
optische
Eigenschaften

Oberflächen-
eigenschaften

Oxidation,
Korrosion,
Reibung,
Abrieb,
Abnutzung

wirtschaftlich

Verfügbarkeit,
Gewinnung,
Bearbeitbarkeit,
Aufbereitung,
Entsorgung,
Kosten,
Akzeptanz,...

Mechanische Eigenschaften

Eigenschaft	Bedeutung	Messgröße
elast. Steifigkeit (stiffness)	Widerstand gegenüber elastischer (reversibler) Verformung	E-Modul E [Pa]
Fließgrenze (yield strength)	Übergang von elastischer in plastische (irreversible) Verformung	nominelle Spannung $\sigma_y = F/A_0$ [Pa]
Zugfestigkeit (tensile strength)	Auftreten von Instabilitäten (Ein- schnürung) während plast. Verformung	nominelle Spannung $\sigma_{TS} = F/A_0$ [Pa]
Härte (hardness)	Widerstand gegenüber Eindringen eines Indenters	Spannung $H = F/A_{\text{Eindruck}}$ [Pa]
Brucharbeit (work of fracture)	Energie, die zur Erzeugung einer Risseinheitsfläche erforderlich ist	G_c [J·m ⁻²]
Bruchdehnung (strain to fracture)	bleibende Dehnung des gebrochenen Bauteils	$\epsilon_f = \Delta L_{\text{gebrochen}}/L_0$ [%]

Mechanische Eigenschaften

Eigenschaft	Bedeutung	Messgröße
Ermüdung (fatigue)	Widerstand gegenüber zyklischer Belastung	Anzahl der Zyklen, N_f , die zum Versagen führt $N_f = N_f(\Delta\sigma)$
Kriechbeständigkeit (creep resistance)	Widerstand gegenüber Kriechen (zeitabhängige Verformung)	Kriechdehnung $\varepsilon = \varepsilon(\sigma, t, T)$
Dämpfung (damping)	Maß für die innere Reibung (Dissipation von Energie)	Verlustwinkel δ [°] (Phasenverschiebung zwischen σ und ε)
Korrosion (corrosion)	elektro-chemische Reaktion einer Flüssigkeit mit einer Oberfläche	elektr. Kontaktpotential [V] (zwischen Kathode und Anode)
Oxidation (oxidation)	chemische Reaktion von O_2 mit einer Oberfläche (Entzug von e^-)	Massenänderung

1.2.1 Metalle und Legierungen (Überblick)

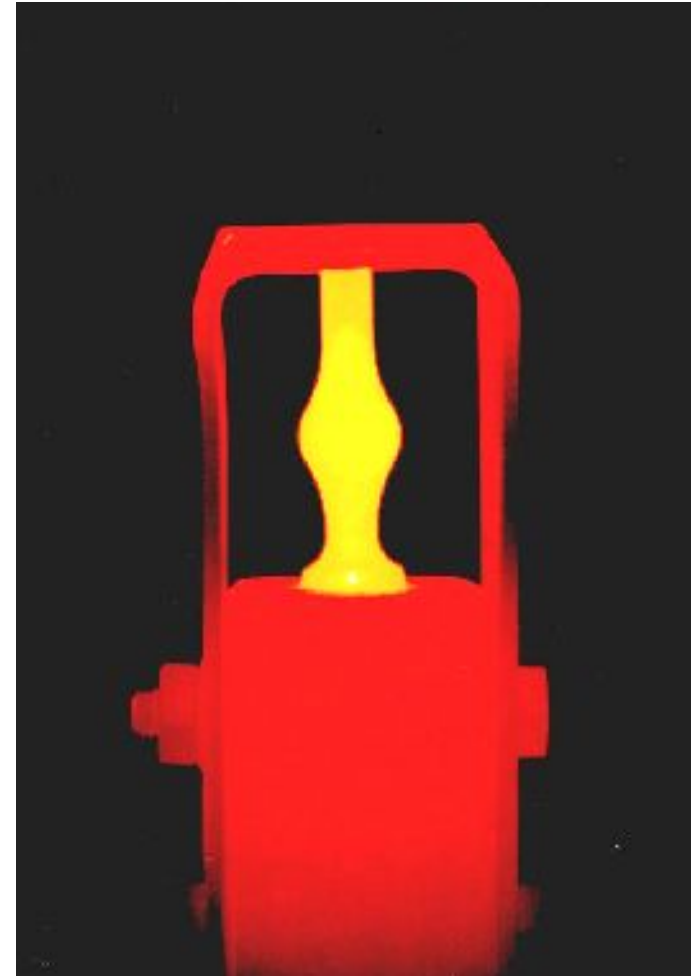
Eisenwerkstoffe

Reineisen	Fe	Weichmagnet
Tiefziehbleche	< 0.1 % C	Automobilbau
Einsatzstähle	0.2 % C	
Vergütungsstähle	0.3 % C	
Werkzeugstähle	> 0.5 % C	Messer, Schneiden, Kugellager
Rostfreie Stähle	18 Cr, 8 Ni	chemische Apparate, Besteck
Gusseisen	Fe-3C	Zylinderblock

Nomenklatur: Eisen > 99.8 Gew% Fe
Stahl \leq 2 Gew% C
Gusseisen > 2 Gew% C

Durch Zugabe von C steigt Zugfestigkeit an, aber die Bruchdehnung sinkt (Material wird spröder)

Eisenwerkstoffe zeichnen sich durch ihre Vielseitigkeit aus: durch Einstellung verschiedener Mikrostrukturen mit Hilfe von Wärmebehandlungen ergeben sich große Variationsmöglichkeiten der mechanischen Eigenschaften. So besitzen Stähle oft eine hohe Bruchdehnung, während Gusseisen spröde ist.



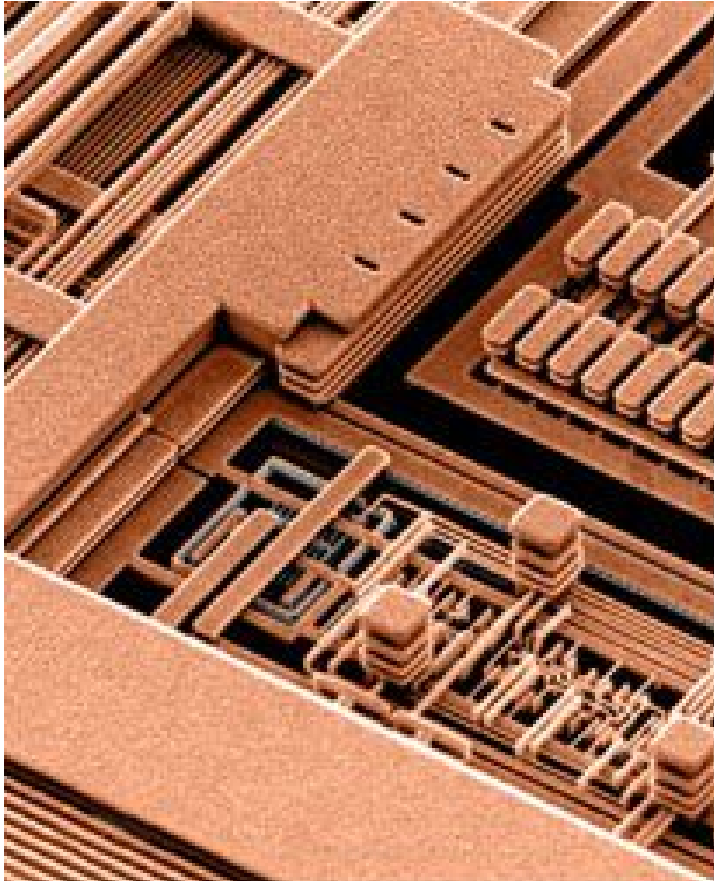
DaimlerChrysler

Dieselmotor: Glühstift (1100 °C) aus Eisenbasis-Superlegierung

Kupferwerkstoffe

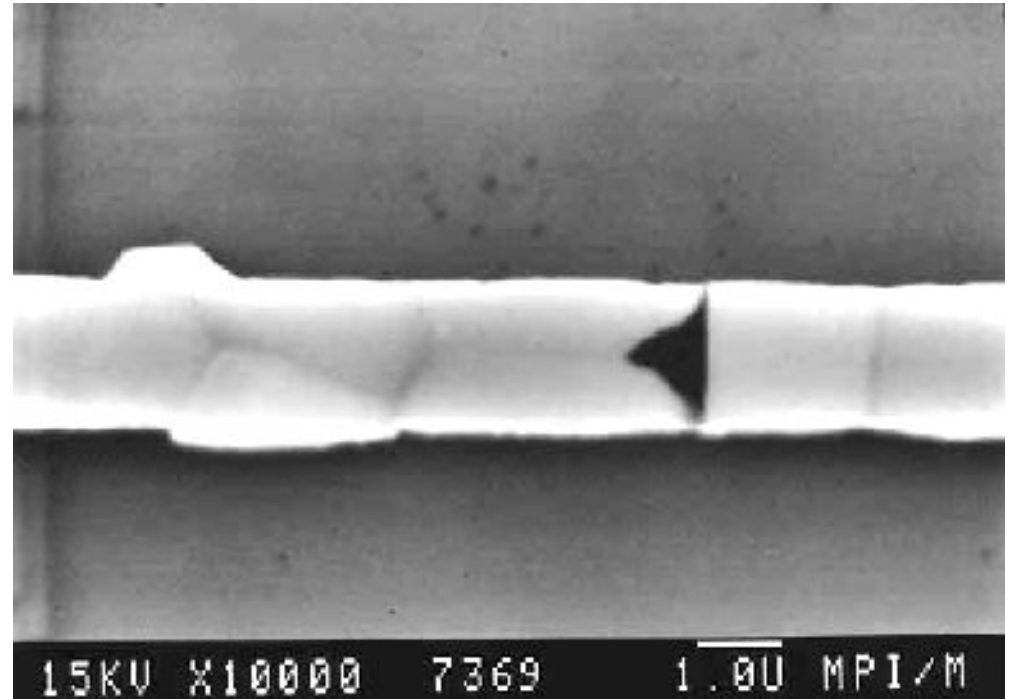
Reinkupfer	100 Cu	Draht, Wasserleitungen, Dichtungsringe
Messing	Cu + Zn	Schrauben, Wasserdichtungen Munitionspatronen
Bronze	Cu + 10 Sn	Lager, Schiffspropeller, Glocken
Cupronickel	Cu + 30 Ni	Münzen

Kupfer zeichnet sich durch gute Formbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrische sowie thermische Leitfähigkeit aus.



Mikroprozessor:
Leiterbahnen aus Cu

IBM



Leiterbahnen als Hochleistungswerkstoffe:
Schädigungsprozesse
(„Elektromigration“) gefährden Computer-
Schaltkreise

Kraft, MPI

Aluminiumwerkstoffe

Aluminium besitzt eine gute elektrische Leitfähigkeit und eine sehr geringe Dichte.

Reinaluminium	100 Al	Elektrokabel, Kochfolie
Al-Cu		Luftfahrt
Al-Mn		Kochpfannen
Al-Si		Automobilkolben (+Mg)
Al-Mg		Getränkedosen
Al-Mg-Si		Strangpreßprodukte (Fensterrahmen)
Al-Zn-Mg		Luftfahrt
Al-Li		Luftfahrt
Al-Al ₄ C ₃		Hochtemperatur- anwendungen

Titanwerkstoffe

Titan tritt in zwei allotropen Modifikationen auf: α -Ti ist hdp, β -Ti krz. Titan ist biokompatibel. Im Vergleich zu Stahl ist es korrosionsbeständiger und leichter (geringere Dichte).

α - β -Titanlegierungen Ti-6Al-4V Luftfahrt, chemische Apparate, Implantate



Leichtbau in Luft- und Raumfahrt: eine Herausforderung für die Werkstoffforschung



Weingart, KH Stuttgart



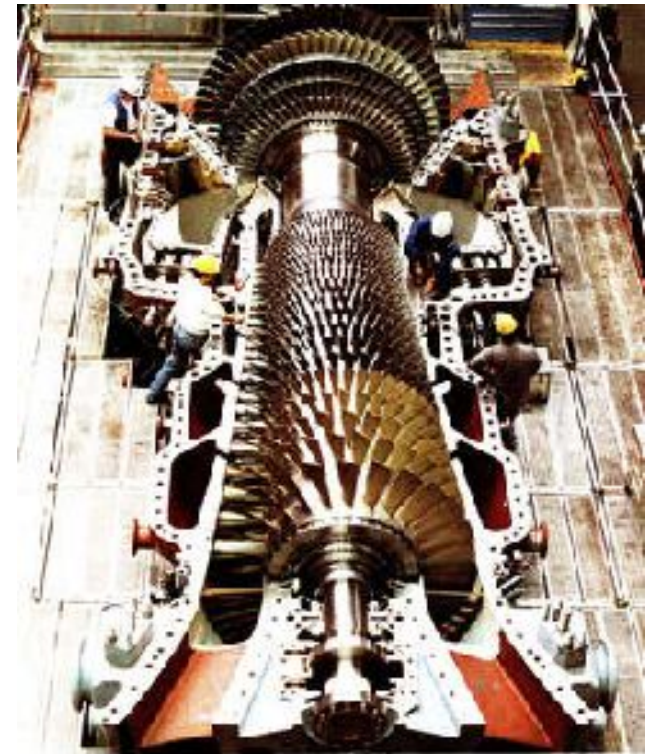
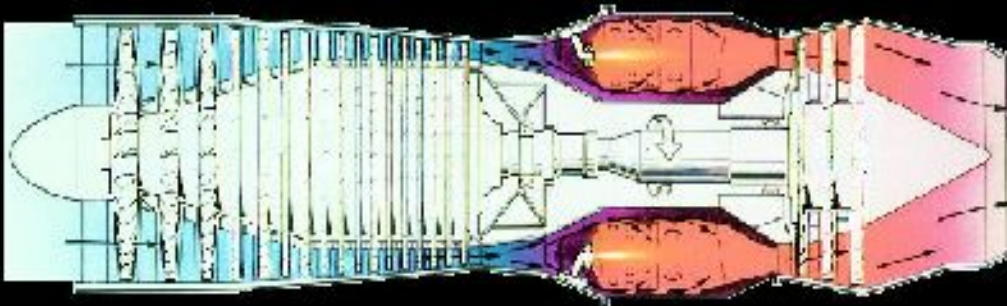
Hüftgelenkimplantat aus Titanlegierung (Schaft) und Keramik (Kugel und Gegengelenk)

Nickelwerkstoffe

Nimonic	Ni-20Cr-4(Al,Ti)	Hochtemperatur- anwendungen
Monel	Ni-30Cu-1Fe-1Mn	Wärmetauscher
Superlegierungen	Ni-20Cr-6(Al,Ti)-5(W,Mo) Fe-38Ni-14Cr-15Co+(Al,Ti) Co-10Ni-20Cr-10W	Turbinen,
ODS- Superlegierungen	Ni-20Cr-6(Al,Ti)-5(W,Mo)+Y ₂ O ₃	Triebwerke

Ni-Basislegierungen sind besonders hochtemperaturstabil und kriechbeständig.

Düsentriebwerke:
Turbinenrad aus Keramik
im Testbetrieb



Stationäre Gasturbine mit
Schaufeln aus einer Nickel-
Basis-Superlegierung

Schnitt durch Triebwerk mit
Kompressor,
Brennkammern und Turbinenteil

1.2.2 Keramiken und Gläser (Überblick)

Hochleistungskeramik, Feink Keramik

Oxide	Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , ZrO_2
Carbide	SiC , WC , ZrC , TiC , VC
Nitride	Si_3N_4 , BN , TiN , Sialone
Diamant	C

Anwendung: Schneidwerkzeug, verschleißfeste Teile, Lager, medizinische Implantate, Motor- und Turbinenteile,

Gläser

Quarzglas ("Kieselglas")		SiO_2
Natrium-Silikat-Glas	z.B.	70SiO_2 , 10CaO , $15\text{Na}_2\text{O}$
Bor-Silikat-Glas	z.B.	80SiO_2 , $15\text{B}_2\text{O}_3$, $5\text{Na}_2\text{O}$
Glaskeramik	z.B.	$\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Anwendung: Fensterglas, Flaschen, Laborgeräte (Pyrex), Kochtöpfe, Herdplatten (Glaskeramik)

Porzellan

Kaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

+

Feldspat KAlSi_3O_8

+

Quarz SiO_2

Natürliche Keramiken

Kalkstein

CaCO_3 -Basis

Sandstein

SiO_2 -Basis

Granit

Feldspat + Quarz +
Glimmer

Eis

H_2O

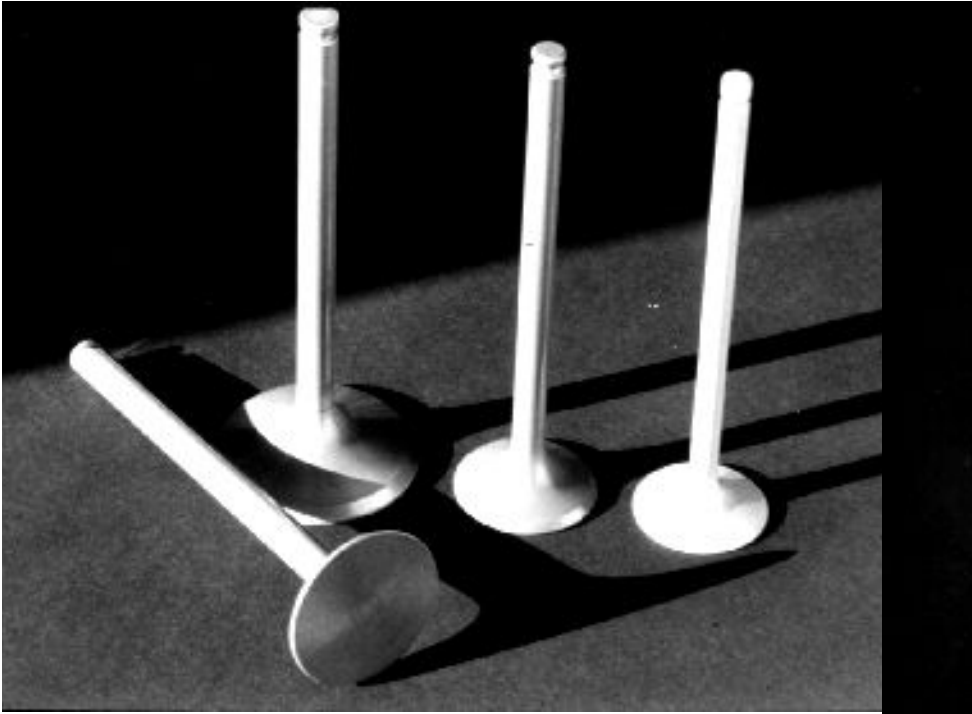
Kochsalz

NaCl

Zement und Beton

Zement $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$

Beton Gemisch aus Kies,
Sand und Zement



Motorventile aus Siliziumnitrid



Schneidkeramik:
Zirkondioxid

1.2. Werkstoffklassen (Anwendung/ Eigenschaften)

Material

Biomaterialien

„Intelligente“ Werkstoffe

Nanotechnologie-
Werkstoffe

Charakteristika

Implantate

äußerer Stimulus (ΔT , ΔE , ΔH)

erzeugt bestimmte Änderung
(Antwort) des Materials
(Form, mech. Eigenschaften)

Dimensionen ≤ 100 nm

Eigenschaften

nicht toxisch, bio-kompatibel,
optimiert i.B. auf Funktion

für „Sensoren“ und „Aktuatoren“

z.B. Kohlenstoff-Nanoröhrchen:
hohe Festigkeit und Steifigkeit,
geringe Dichte, elektr. Leiter
oder Isolator