

2 Begriffe und theoretische Grundlagen der Oberflächentechnik

2.1 Werkstoff und deren Oberflächen

2.1.1 Festwerkstoffe

2.1.2 Oberfläche – Grenzfläche – Randschicht

2.2 Eigenschaften von Oberflächen

2.2.1 Oberflächenenergie – Grenzflächenenergie – Benetzung

2.2.2 Adsorption – Desorption

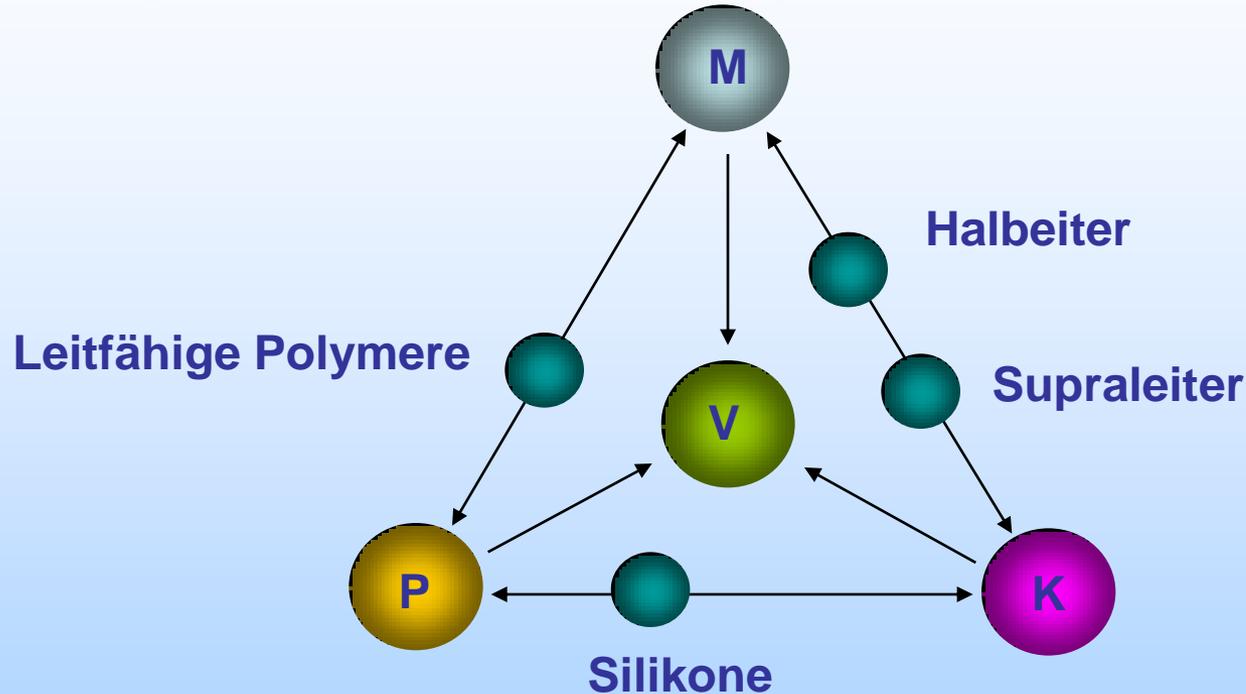
2.2.3 Volumendiffusion – Oberflächendiffusion: Sinterprozess

2.2.4 Morphologie physikalisch idealer Oberflächen

2.2.5 Morphologie technischer Oberflächen

2.1.1 Festwerkstoffe

Einteilung nach den charakteristischen Eigenschaften = vier Hauptgruppen und vier Zwischengruppen

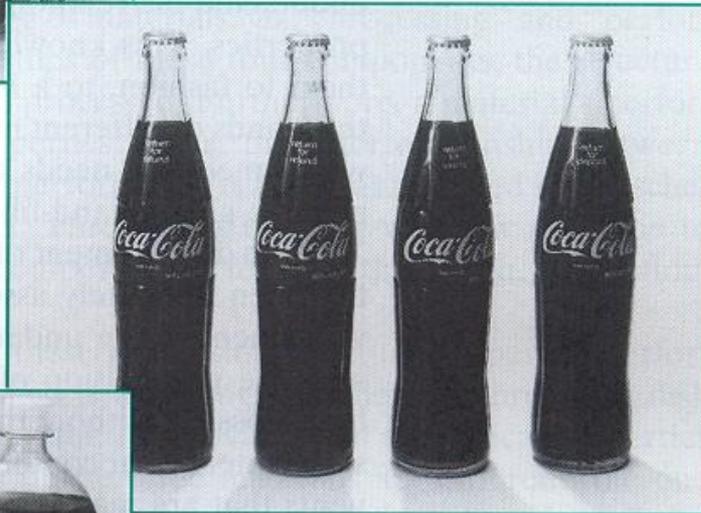


Strukturelle Einteilung: Kristall + Glas

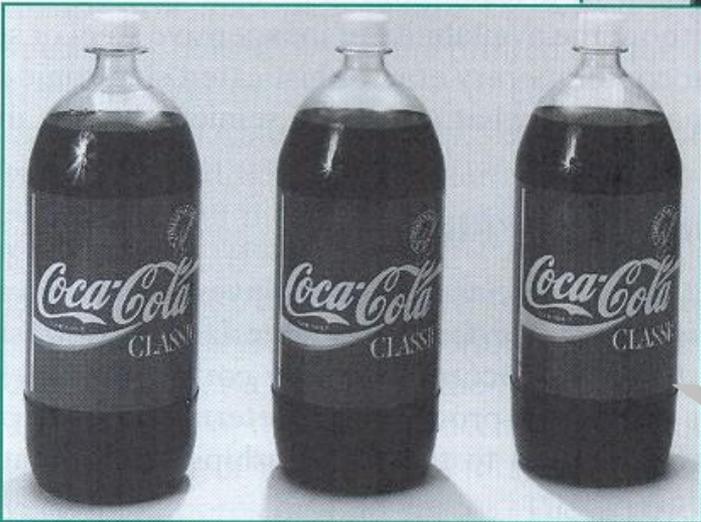
Einteilung nach Anwendungen:
Funktionswerkstoffe + Konstruktionswerkstoffe



Metal



Ceramic



polymer

Metalle: gute elektrische Leitfähigkeit, Reflexion von Licht, chemisch meist wenig beständig, plastisch verformbar,...

gebräuchliche Untergruppen:

- Eisenmetalle - Nichteisenmetalle
- Edelmetalle (Ag, Au, Pt, Ir)
- Leichtmetalle (Dichte $\rho < 4,5 \text{ g/cm}^3$)
- Hochschmelzende Metalle (Refraktäre, $T_m > 2400 \text{ °C}$, Nb, Mo, Ta, W)
- Übergangsmetalle (unvollständige innere Elektronenschalen)

meist Legierungen: Fe + C, Cu + Zn (Messing), ...

Keramische Stoffe: (besser: anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe) schlechte Leitfähigkeit, spröde, chemisch beständig, hochschmelzend

Beispiele: Oxide: Al_2O_3 , ZrO_2 ; Carbide: SiC ; Nitride Si_3N_4 ; Gläser (Basis SiO_2)

Polymere: Kunststoffe sind schlechte elektrische Leiter, tieftemperaturspröde, chemisch beständig, nicht temperaturbeständig

Beispiele: PE, PVC, PMMA, Gummi

Verbundwerkstoffe: Kombination von mindestens zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Daraus resultieren neue (verbesserte) Eigenschaften.

Beispiele: GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff), MMC (metal matrix composite: z.B. Keramikfasern in Al-Legierungen), aber auch Holz, Beton, ...

Weitere wichtige Werkstoffgruppen:

Halbleiter (anorganisch): halbleitend, elektrische Leitfähigkeit nimmt mit der Temperatur stark zu

Beispiele: Si, Ge, Se, Te (+Dotierstoffe), III-V-Halbleiter: GaAs, InSb

Supraleiter (keramisch): zeigen keinen elektrischen Widerstand unterhalb einer (möglichst hohen) Temperatur

Silikone: als Öl, Fett, Harz oder Gummi herstellbar

2.1.2 Oberfläche – Grenzfläche – Randschicht

Grenzfläche = Phasengrenzen

Grenzfläche zwischen Festkörper und Flüssigkeit oder Gase = **Oberfläche des Festkörpers**

Grenzfläche zwischen Korne polykristalliner Werkstoffe = **Korngrenze**

In der Schichttechnik: **Grenzfläche** = Zone zwischen Schicht und Substrat

Topographie und Struktur von metallischen Oberflächen

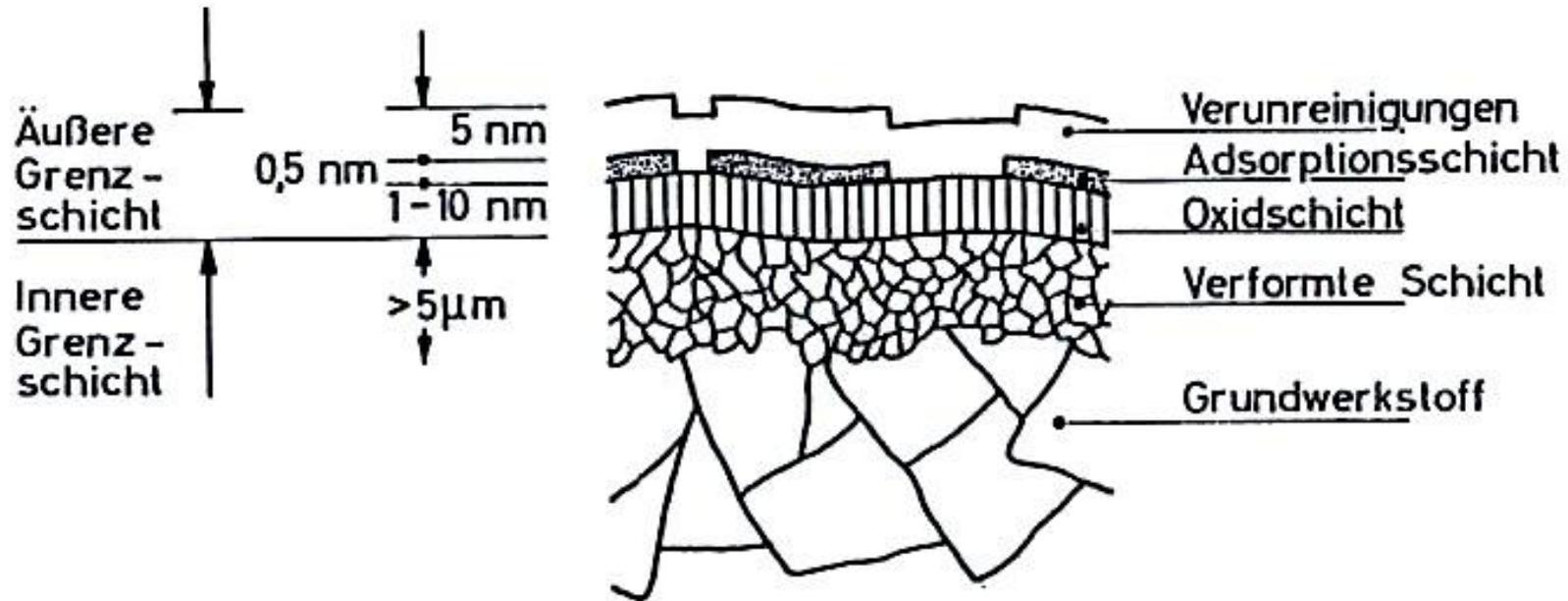
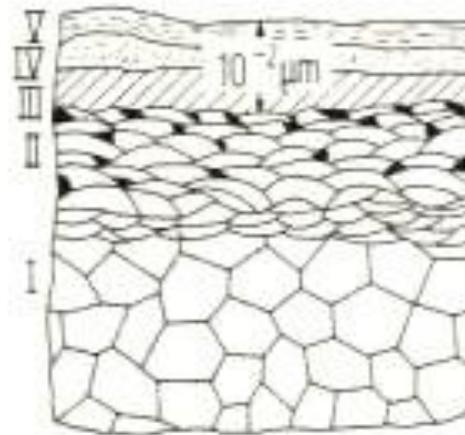
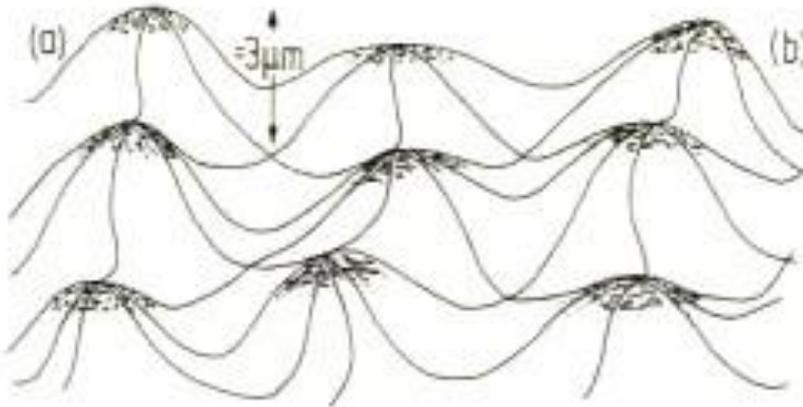
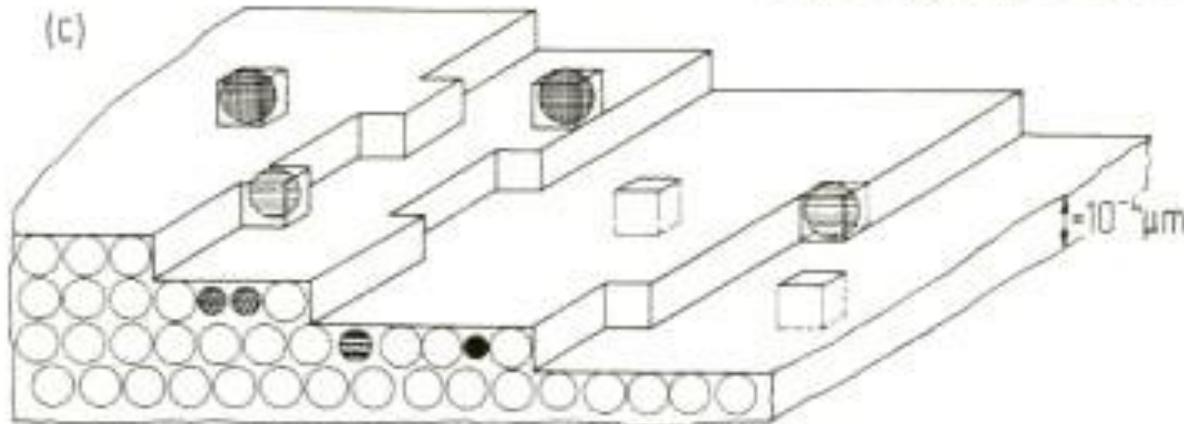


Bild 3.1.1 Aufbau technischer Oberflächen: schematische Darstellung des Querschnitts einer Metall-Oberfläche

Atomare Oberflächentopographie



- (V) Kontaminationsschicht
- (IV) Adsorptionsschicht
- (III) Reaktionsschicht
- (II) Verformungsschicht
- (I) Volumen

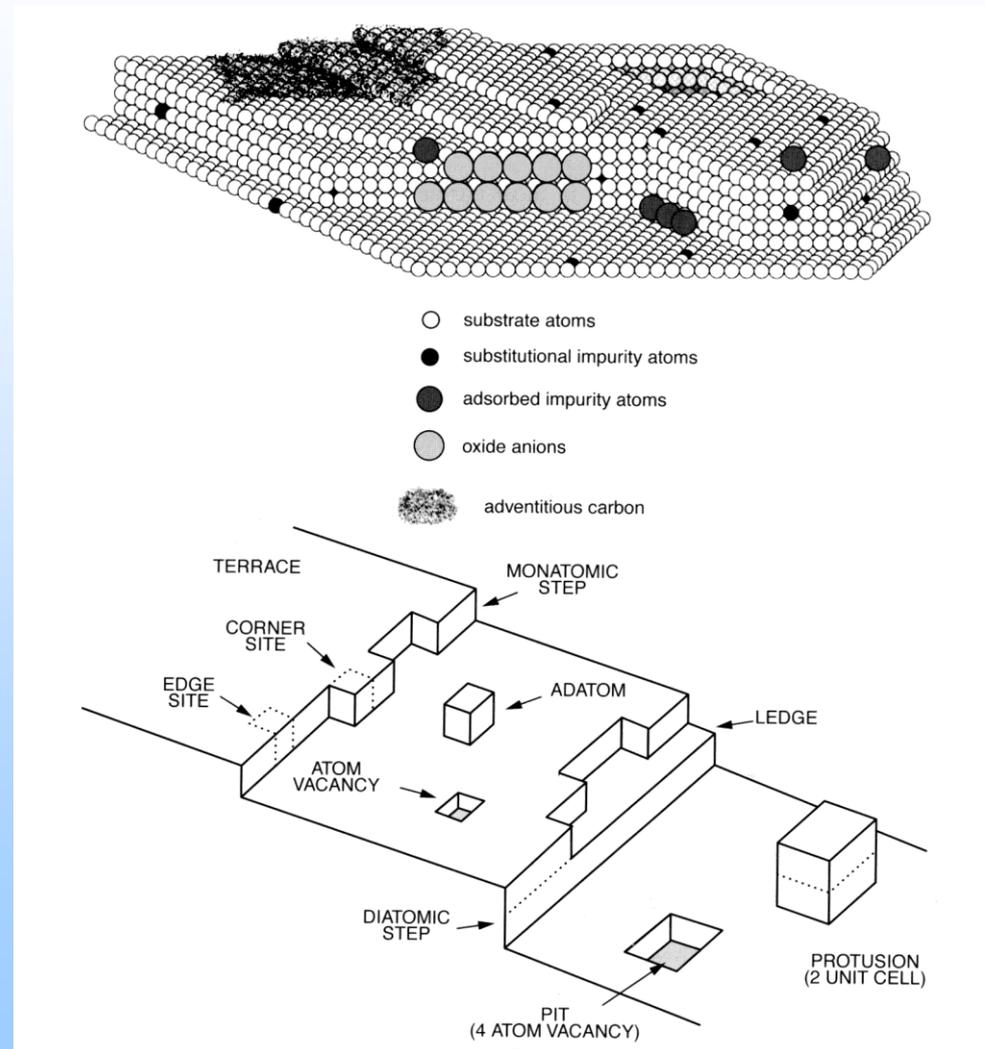


A real surface

- Surface steps (roughness)
- Dislocations
- Adsorbed atoms
- Substitutional atoms

Its obvious that a careful sample preparation is essential as it has a strong influence on all points mentioned above

Schematic sketch of a real surface

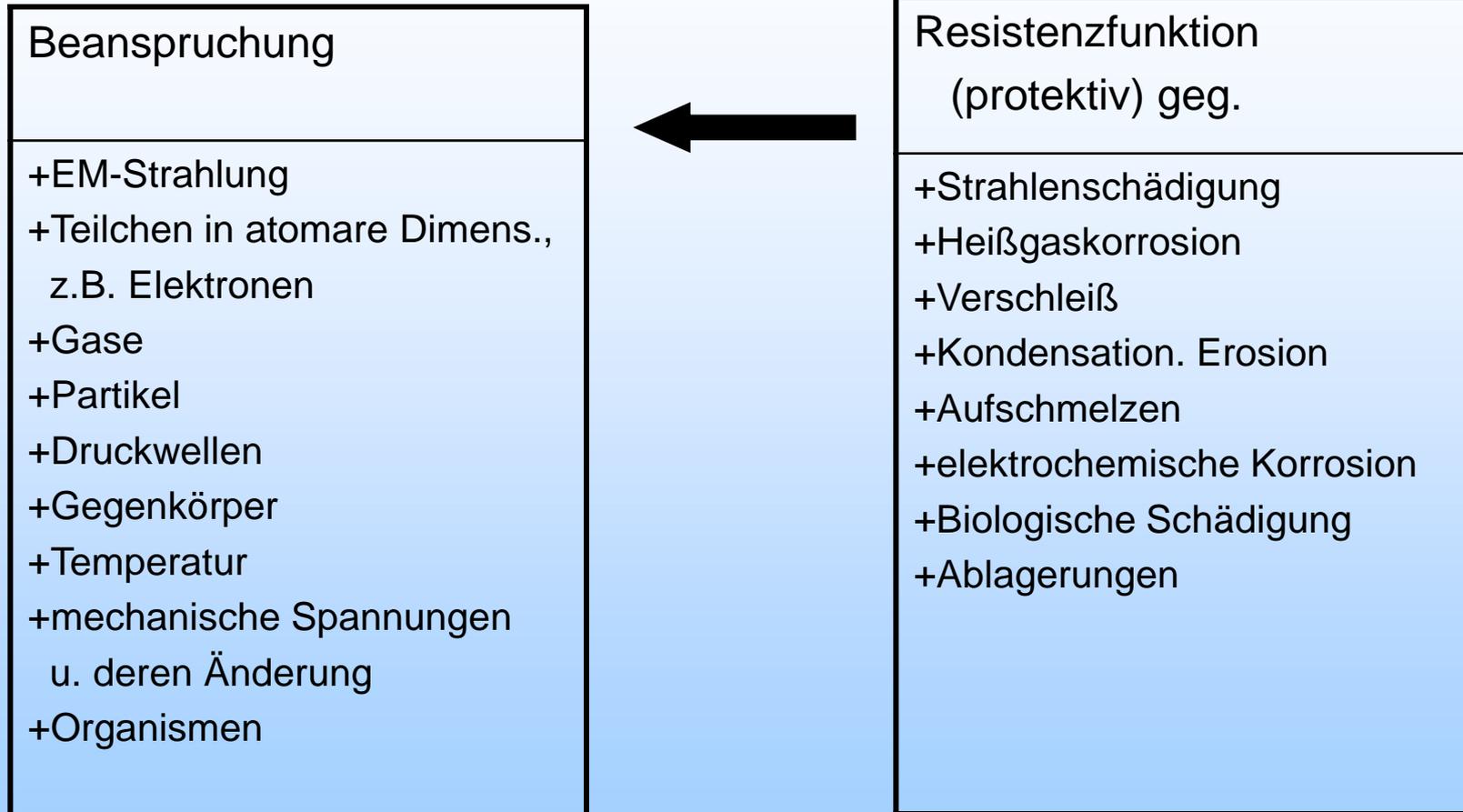


2.2 Eigenschaften von Oberflächen

Eigenschaftsfunktion (positiv)

physikalisch	chemisch	biologisch
<p>+Transmission +Reflexion + Absorption</p> <p>} EM-Strahl</p> <p>Signal Dekor Linsen Spiegel Radar</p> <p>+Tribologie Reibung Schmierstoffhaftung</p> <p>+Thermische Leitfähigkeit Wärmeleitung Wärmedämmung</p> <p>+Elektron. Eigensch. Transistoren Solarzellen Supraleiter</p> <p>+Prägung</p>	<p>+Katalyse +Reaktionen Photoeffekte +Diffusion</p>	<p>+Kompatibilität +Endoprothetik Körpergewebe u. -flüssigkeit Blut (Thromb., Zersetzung) Aktivierung von Zellwachstum</p>

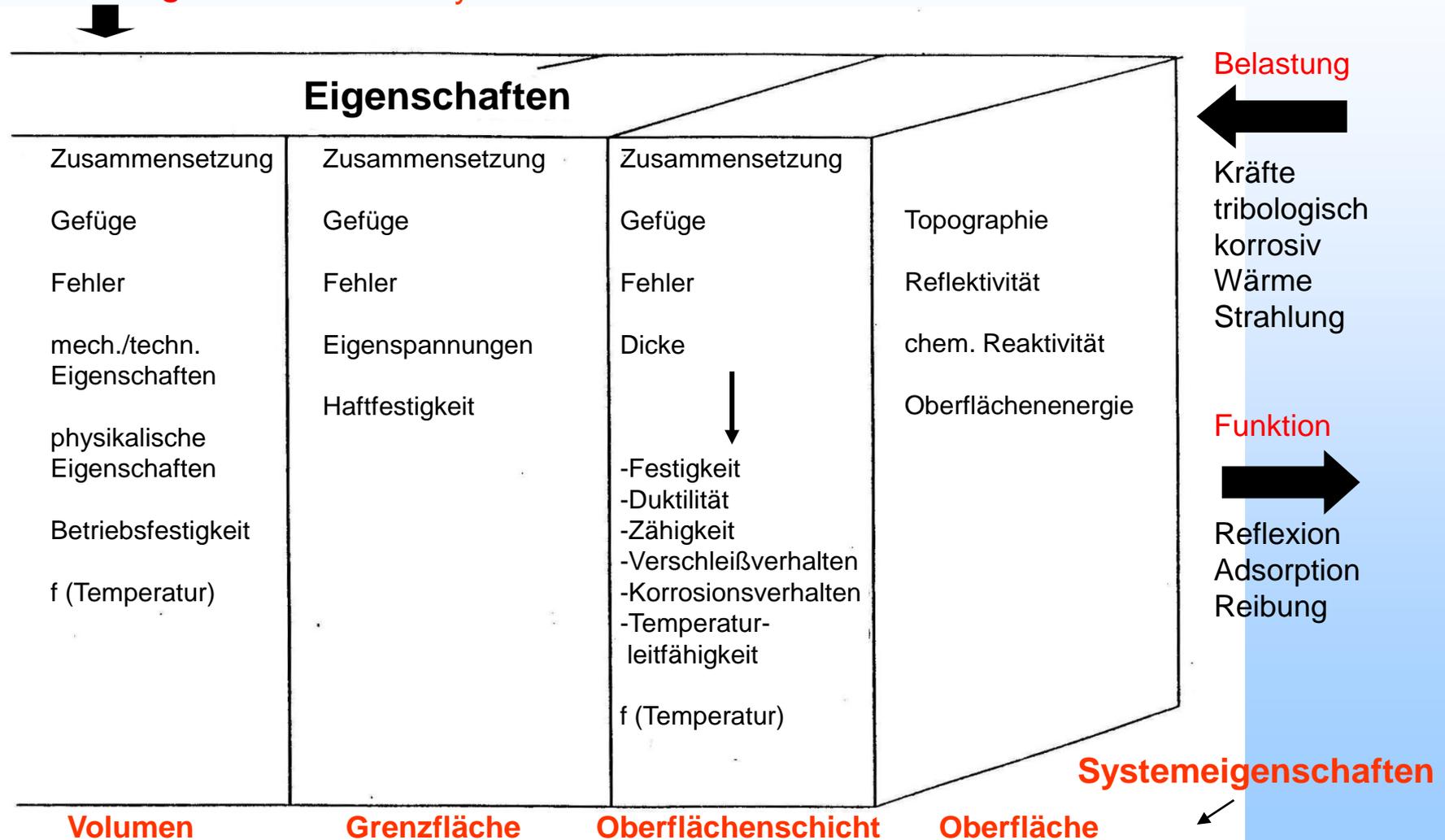
Beanspruchung und Funktion



Wichtig: Kinetische Energie

Bauteileigenschaften als Folge der Eigenschaften von Volumen, Grenzflächen, Oberflächenschichten und Oberflächen

Belastung statischer und dynamischer Kräfte



2.2 Eigenschaften von Oberflächen

2.2.1 Oberflächenenergie – Grenzflächenenergie – Benetzung

2.2.2 Adsorption – Desorption

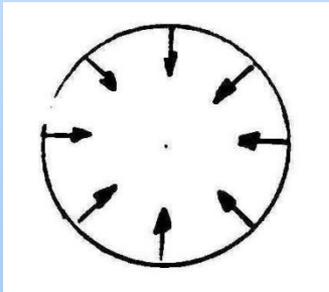
2.2.3 Volumendiffusion – Oberflächendiffusion: Sinterprozess

2.2.4 Morphologie physikalisch idealer Oberflächen

2.2.5 Morphologie technischer Oberflächen

Grenzflächenenergie – Grenzflächenspannung

Flüssigkeitstropfen
“schwerelos“

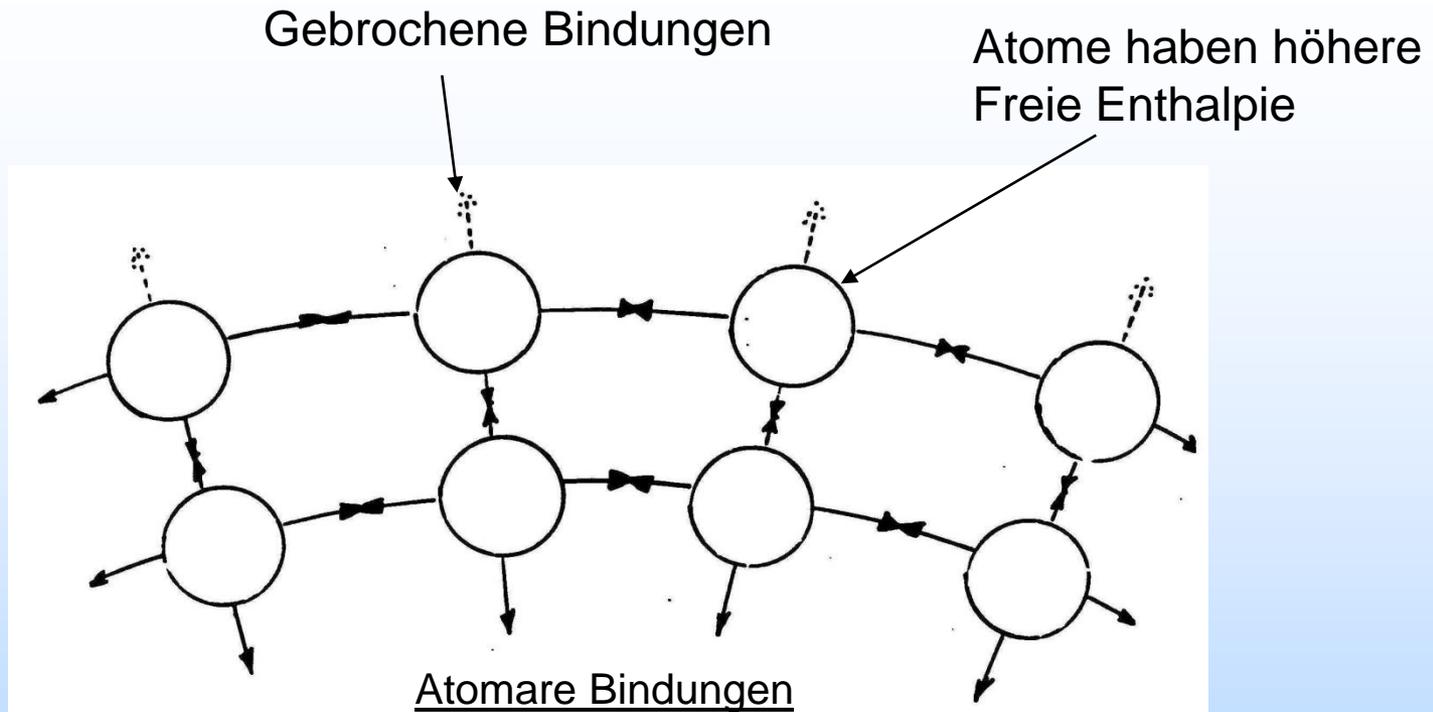


Grenzflächenenergie
(Freie Enthalpie)

Dimension: (J/m²)

$$\frac{\textit{Arbeit}}{\textit{Fläche}}$$

Energie oder Arbeit, die notwendig ist, um die Grenzfläche um 1 Flächeneinheit zu vergrößern (P,T = Konst.)



Abschätzungen der freien Enthalpie für kubische Kristalle (Fe):

$\approx \frac{1}{4}$ der nächsten Nachbaratome fehlen an der Oberfläche

$\rightarrow \frac{1}{4}$ der Bindungsenergie pro Atom

$\rightarrow \approx 1\text{eV}$ für Fe; 10^{15} Atome pro cm^2 ; in OF

$\rightarrow \underline{10^{15}\text{ eV pro cm}^2}$

Grenzflächenspannung

Definition: Kraft, die an 1 Längeneinheit einer gedachten, in der Grenzfläche zwischen 2 Phasen befindlichen Linie wirkt

Grenzflächenenergie = Grenzflächenspannung

(numerisch und dimensionsgleich)

Grenzflächenenergie/-spannung (Fest/Gasförmig oder Flüssig/Gasförmig) wird als **Oberflächenenergie/-spannung** bezeichnet

Oberflächenenergie ist abhängig von Bindungsenergie

Oberflächenenergie \propto Bindungsenergie \propto Schmelztemperatur

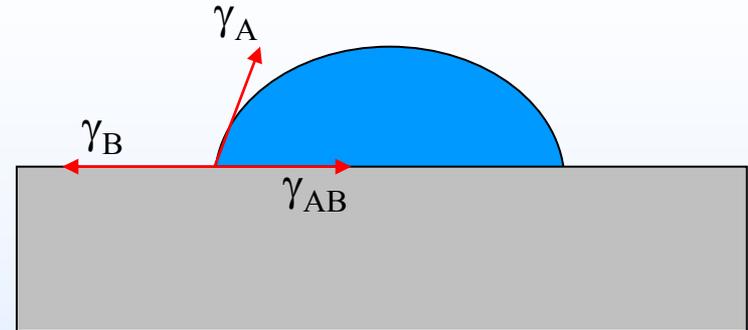
Werden Oberflächen der Stoffe A und B vereinigt

→ Grenzfläche AB

Energiebilanz entweder positiv oder negativ:

$$\gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} = \Delta\gamma < \text{oder} > 0$$

Wichtig für Adhäsion, Reibung, Haftung, Kapillaraktivität



Triebkraft, Oberflächenenergie zu reduzieren

- Adsorption
- Adhäsion/Kaltverschweißen, Fressen)
- Haftung (Kleben etc.)
- Benetzung

Triebkraft, Grenzflächenenergie herabzusetzen

- Gleichgewichtssegregation
- Kornwachstum
- Koagulation
- Oswald – Reifung

Verantwortlich, dass “ideale“ Oberflächen nur in “idealem“ Vakuum existieren können. Bei 10^{-10} mbar \approx 0,5h bis zur Adsorption einer Monolage.

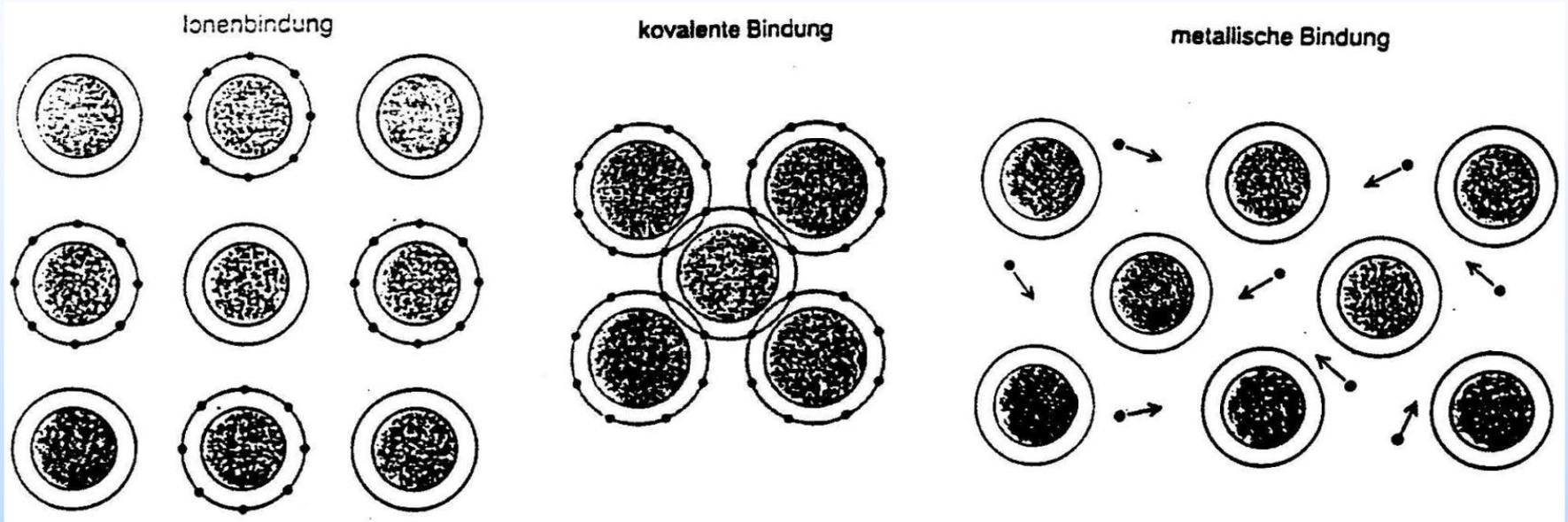
“Ideale“ Oberfläche eines Metalls oder einer Legierung: Defekte → u. a. Oberflächen- und Grenzflächendiffusion um Größenordnungen größer als Volumendiffusion

Chemisorption - Hauptvalenzbindungen

1. $K \approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

2.

3. $K \approx 4 \cdot 10^4 \text{ MPa}$



z.B. NaCl, MgO, Al_2O_3 ,
 ZrO_2 , fest, spröde

z.B. organische Stoffe,
 SiC , CH_4 , H_2 , O_2 ,
Graphit, Diamant

Metalle, duktil

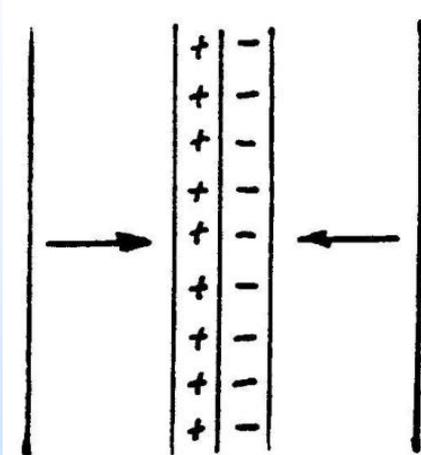
Oft Mischtypen der Bindungsarten z.B. TiN, TiC

Bindungsenergie:

$\approx 0,5 - 10 \text{ eV} \approx 800 - 1,6 \cdot 10^4 \text{ erg/cm}^2 \approx 0,5 - 10^5 \text{ MPa}$

Physisorption - Nebenvalenzbindungen

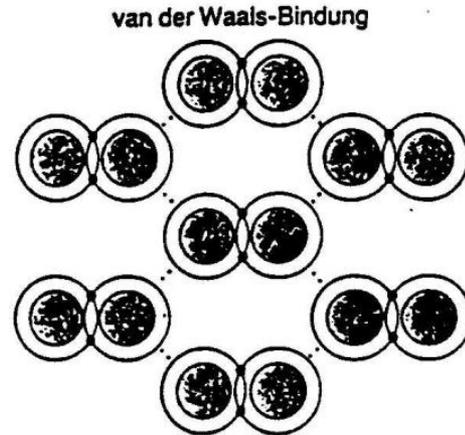
1. Elektrostatische Kräfte



elektrostatische Doppelschicht

$K = \sigma^2 / 2\epsilon_0$
 $\sigma =$ Ladungsübergang
 $\epsilon =$ abs. Dielektrizitätsk.
 Bei Übergang von 10^{12} -
 10^{13}
 Elektronenladungen/cm²
 $\rightarrow K = 10^3 - 10^1$ MPa

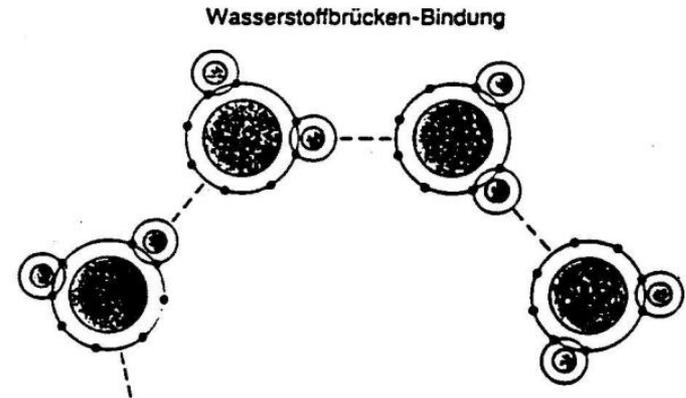
2.



Kräfte zwischen polarisierten Molekülen. z.B. Edelgase, Graphit \perp zur Basis

Bindungsenergie
 $\approx 0,1 \text{ eV} \approx 160 \text{ erg/cm}^2$ bei
 10^{15} Bindungen/cm² bei
 Annahme linearer
 Kraftabnahme über
 $0,3 \text{ nm} \approx 10^3 \text{ MPa}$

3.



Schema
 $R^+ - x^- \dots H^+ - y^-$
 (F, O, N)
 z.B. viele organische Moleküle

Bindungsenergie
 bis $0,5 \text{ eV}$
 $\approx 5 \cdot 10^3 \text{ MPa}$

Benetzung

Wechselwirkung Flüssigkeit/Festkörper

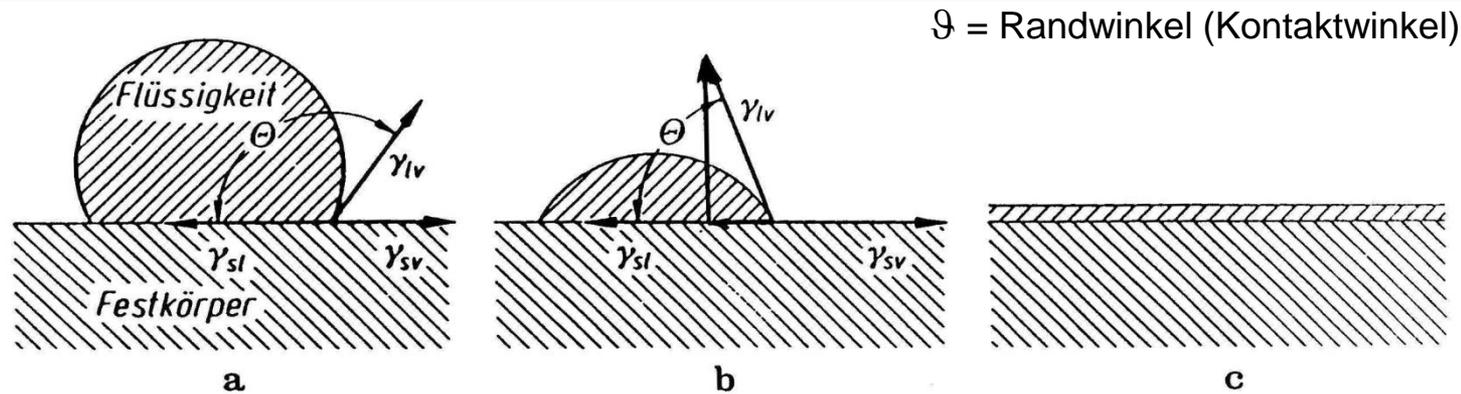


Bild 47. Beispiele für das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf Festkörpern. (a) nicht benetzend ($\theta > 90^\circ$), (b) benetzend ($\theta < 90^\circ$), (c) spreitend

γ_{lv} = Oberflächenenergie der Flüssigkeit gegenüber der eigenen Dampfphase

γ_{sv} = Grenzflächenenergie des Festkörpers gegen die Atmosphäre

γ_{sl} = Grenzflächenenergie des Festkörpers gegen die Flüssigkeit

Youngsche Beziehung für den Zustand minimaler Energie:

$$\gamma_{sl} - \gamma_{sv} - \gamma_{lv} \cdot \cos\theta = 0 ; \quad \cos\theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl})/\gamma_{lv}$$

θ muss gemessen werden, da γ_{sl} unbekannt

Benetzung

$\theta > 90^\circ \rightarrow$ nicht benetzend

$\theta < 90^\circ \rightarrow$ benetzend

$\theta = 0^\circ$ spreitend

Vorraussetzung für Benetzung:

$\gamma_{sv} > \gamma_{sl}$ (Grenzflächenenergie gering --- Bindungsarten verwandt)

$\gamma_{sv} < \gamma_{sl}$; $\theta > 90^\circ$

Wenn $\theta \rightarrow 0$, dann $\cos \theta \rightarrow 1$

Vollständige Benetzung:

$\gamma_{sl} - \gamma_{sv} + \gamma_{lv} = 0$ (Grenzfall der Spreitung)

$\gamma_{sv} > \gamma_{sl} + \gamma_{lv}$

$\gamma_{sv} - (\gamma_{sl} + \gamma_{lv}) \equiv P_{sp} > 0$ Spreitung (P_{sp} = Spreitungsdruck)

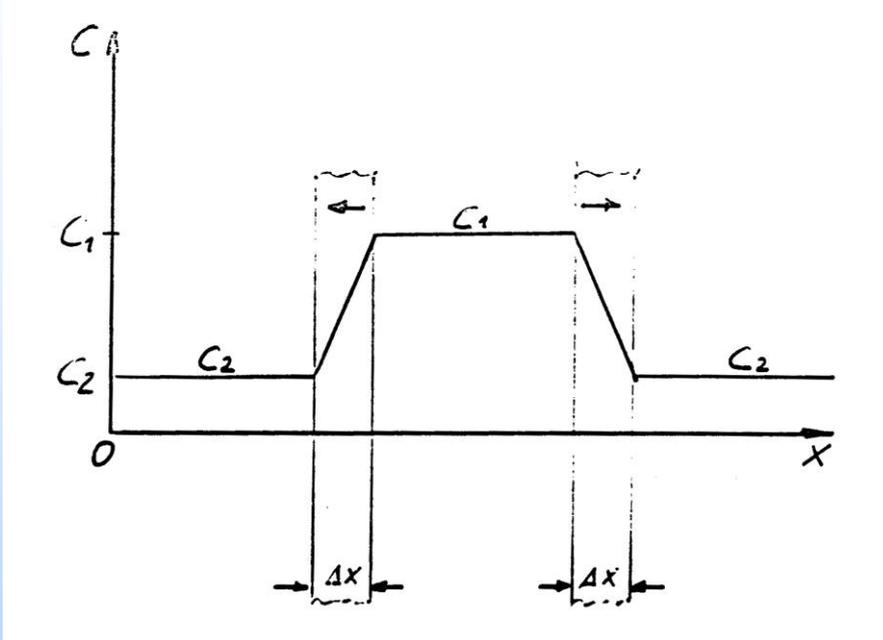
$W = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - \gamma_{sl}$

$W = \gamma_{lv} (\cos \theta + 1)$

$W =$ Adhäsionsarbeit

Diffusion

Diffusion durch die Wände eines Rohres



$$\frac{dn}{dt} = -D \cdot A \frac{C_1 - C_2}{\Delta X}$$

n = Anzahl der Atome
t = Zeit
A = Flächenquerschnitt
D = Diffusionskonstante

$$\frac{dn}{dt} \cdot \frac{1}{A} = -D \text{grad}C$$

Linearer Verlauf der Konzentration

$$\frac{\text{Atome} / \text{m}^2}{s} = \frac{D \cdot \text{Atome} / \text{m}^3}{m} \longrightarrow D \left[\frac{\text{m}^2}{s} \right]$$

TemperaturabhängigkeitFür $H_W > R^*T$ $H_W =$ Aktivierungsenergie

$$\frac{nH_W}{N} \sim \exp\left(-\frac{H_W}{RT}\right) \sim \left(-\frac{\text{Aktivierungsenergie}}{\text{therm.Energie}}\right)$$

$$D = D_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

 $Q = H_W$ bei Interstitieller Diffusion

Bei Leerstellenmechanismus:

$$D = D_o \exp\left(-\frac{H_W}{RT}\right) \cdot X_L$$

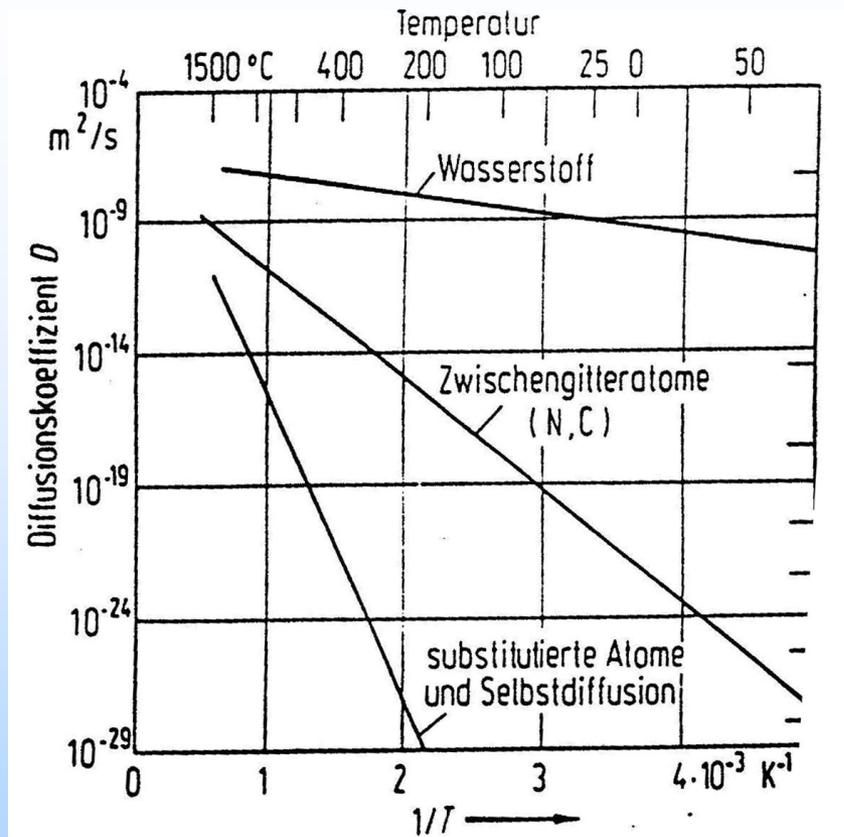
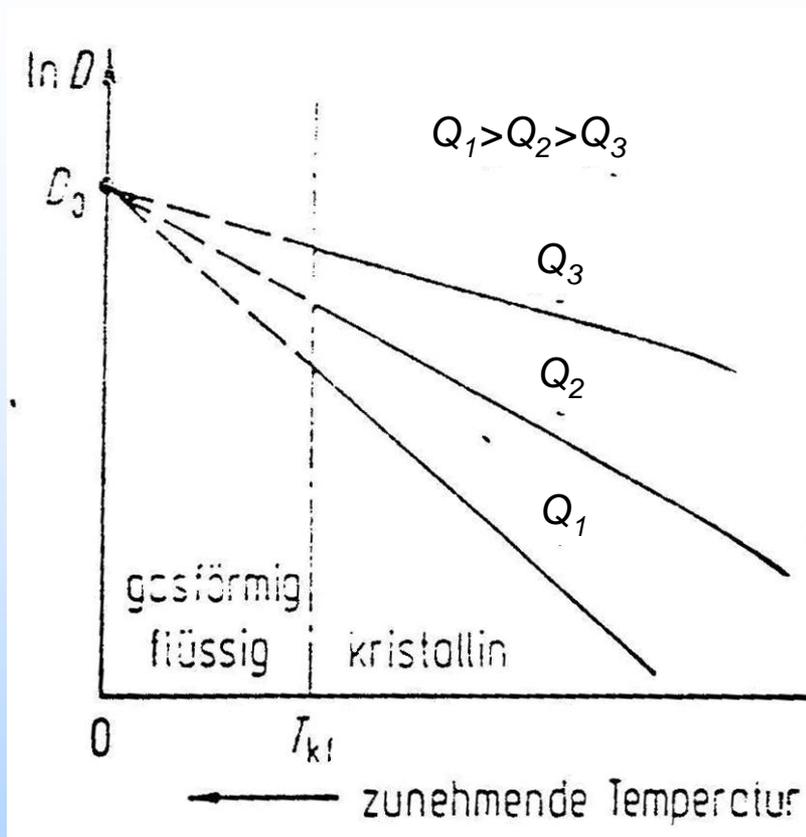
$$D = D_o \exp\left(-\frac{H_W}{RT}\right) \exp\left(-\frac{H_B}{RT}\right) = D_o \exp\left(-\frac{H_W + H_B}{RT}\right)$$

 $Q = H_W + H_B$ $H_B =$ Aktivierungsenergie für Leerstellenbildung

Interstitielle Atome: große Diffusionsgeschwindigkeit

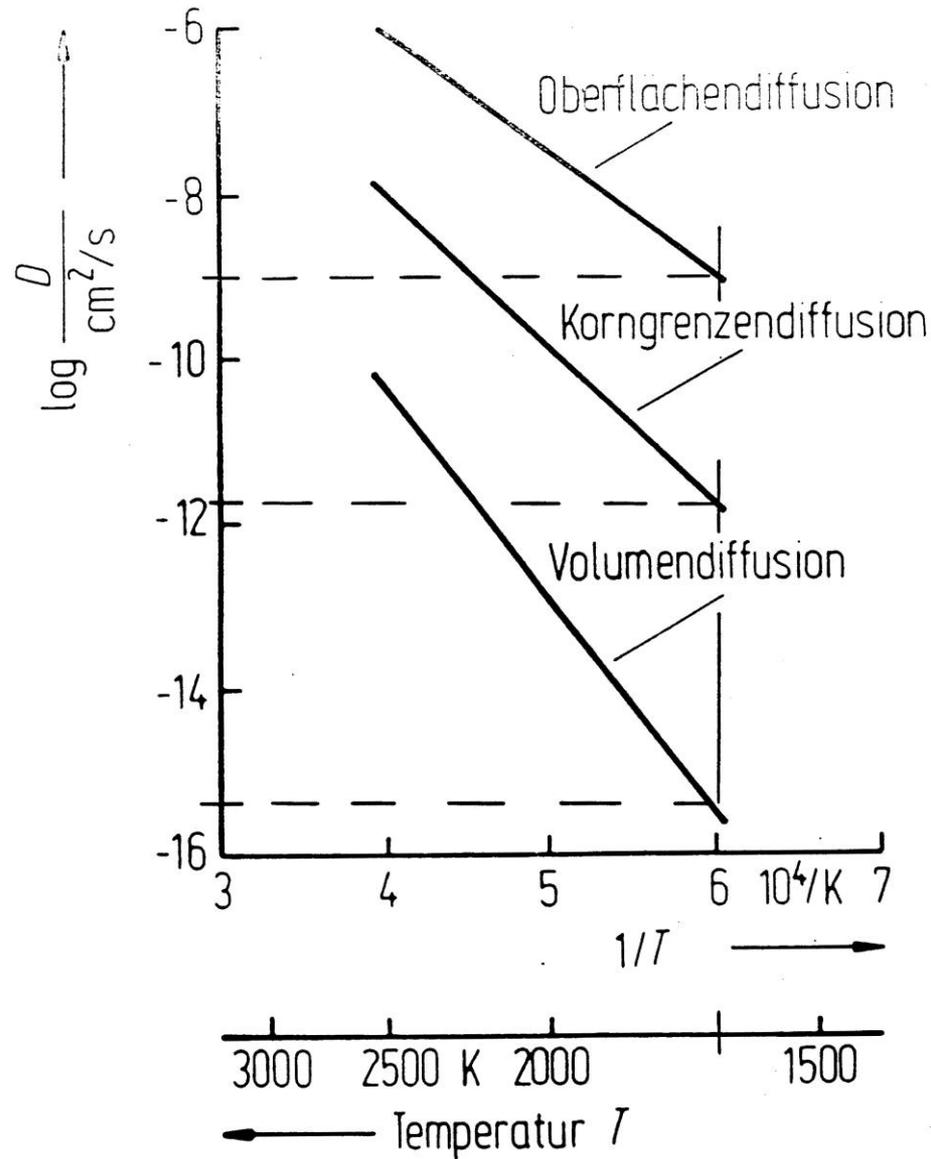
Längs Korngrenzen: größere Diffusionsgeschwindigkeit als Gitter.

 Q (selbstdiffusion) \sim Schmelztemperatur

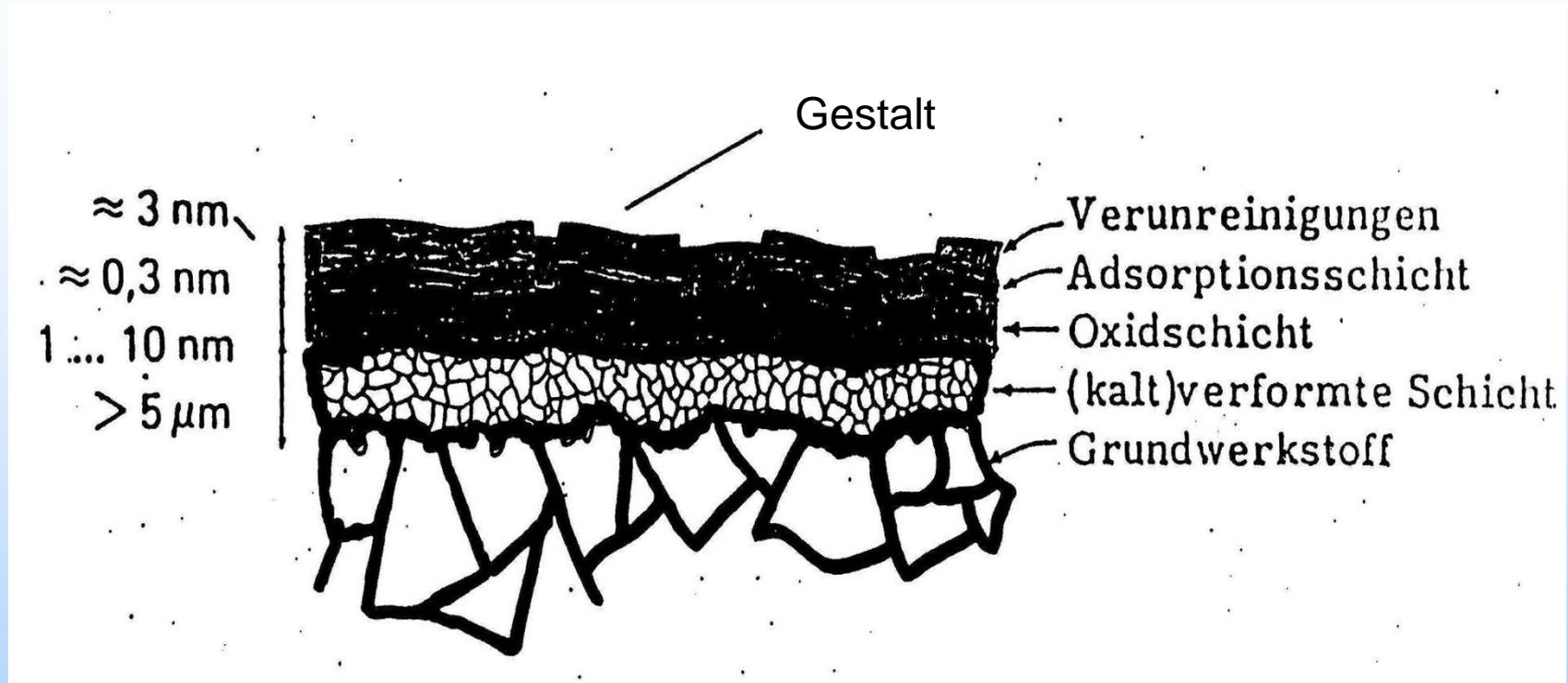


Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten wird bestimmt durch die Aktivierungsenergie Q , die etwa proportional der Schmelztemperatur ist.

Diffusionskoeffizienten verschiedener Elemente im α -Eisen. Im γ -Eisen sind die Werte hundertmal kleiner.



Technische Oberfläche (Randschicht)



- Gestalt (Rauheit, Welligkeit, Form, Porosität)
- chemische Zusammensetzung, Bindungsverhältnisse
- Eigenspannungen
- Eigenschaften (chemische Reaktivität, physikalisch / technologisch)

Oberflächengestalt

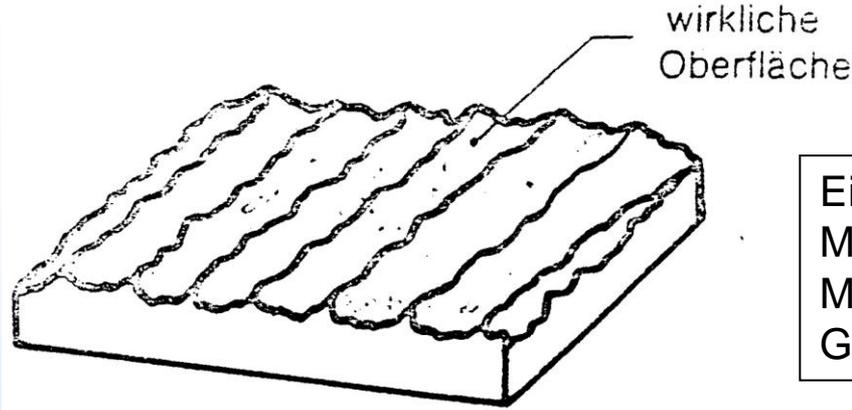
Beispiele für Gestaltabweichungen

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Unebenheit Unrundheit	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen	Außermittige Entspannung oder Formfehler eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung: 	Rillen	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: 		
} <b style="color: red;">Rauheit		Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Sandstrahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes	Physikalische und chemische Vorgänge im Aufbau der Materie, Spannungen und Gleitungen im Kristallgitter

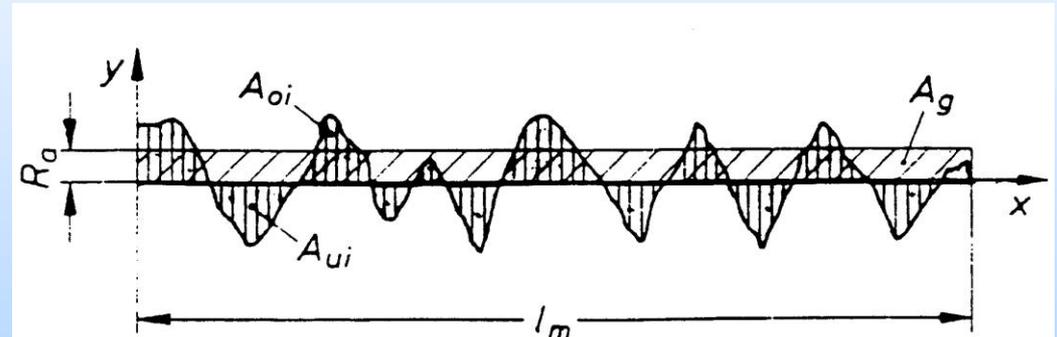
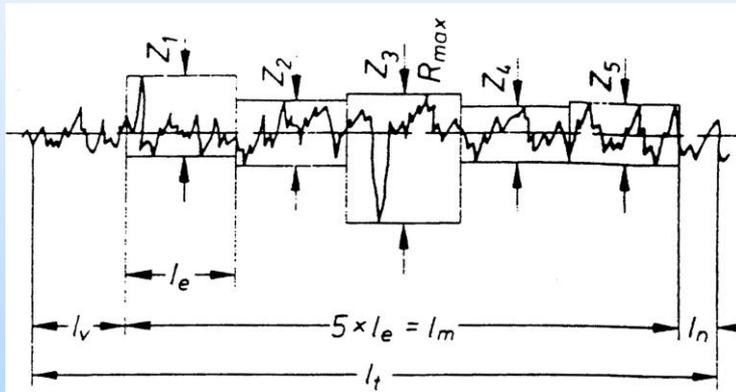


Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. Bis 4. Ordnung

Vorlaufstrecke l_v
Gesamtstrecke l_m
Einzelmessstrecke l_e
Nachlaufstrecke l_n
Taststrecke l_t



Einzelrauhtiefe Z_i
Maximale Rauhtiefe R_m
Mittenrauhwert R_a
Gemittelte Rauhtiefe R_z



Bilden der gemittelten Rauhtiefe R_z aus dem Rauheitsprofil

Mittenrauhwert R_a

$$R_z = (Z_1 + Z_2 \dots + Z_5) / 5$$

$$\begin{aligned} \sum A_{oi} &= \sum A_{ui} \\ A_g &= \sum A_{oi} + \sum A_{ui} \end{aligned}$$

$$R_a = 1 / l_m \int_{x=0}^{x=l_m} |y| \cdot dl$$

Ermittlung der Rauheitsgrößen R_a , R_z , R_{max} mit Tastschnittgeräten (DIN 4768)