

## **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

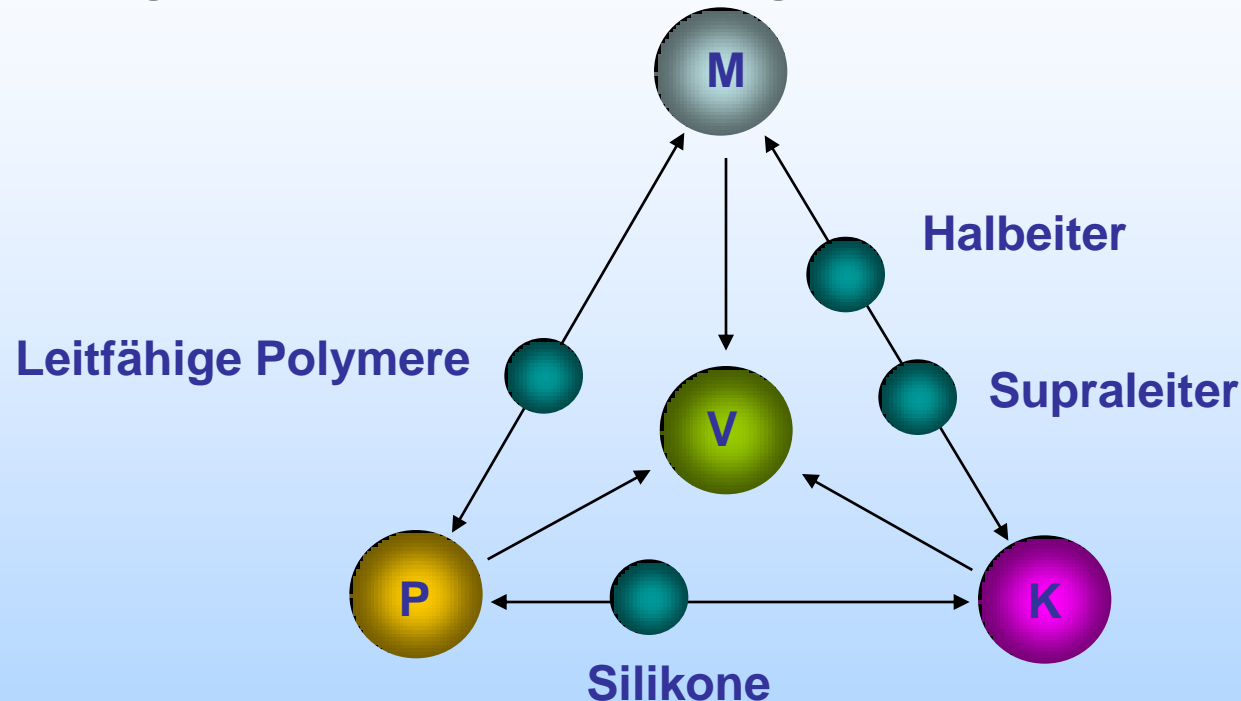
#### 2.2.3 Volumendiffusion – Oberflächendiffusion: Sinterprozess

#### 2.2.4 Morphologie physikalisch idealer Oberflächen

#### 2.2.5 Morphologie technischer Oberflächen

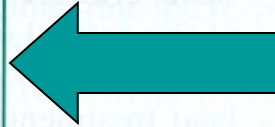
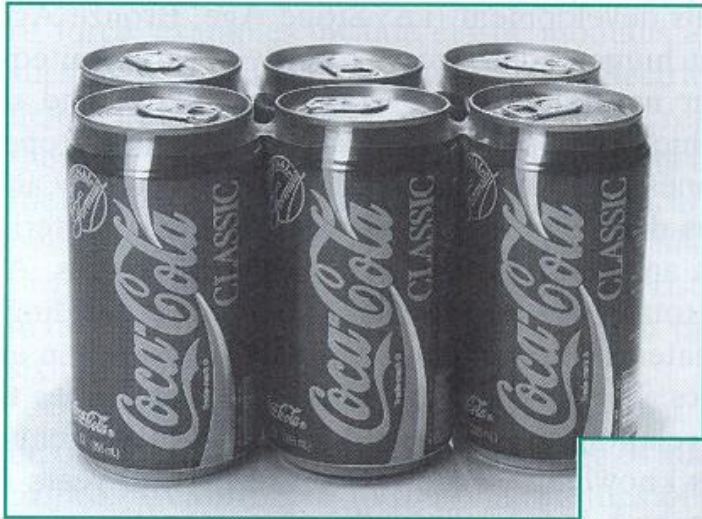
### 2.1.1 Festwerkstoffe

**Einteilung nach den charakteristischen Eigenschaften =  
vier Hauptgruppen und vier Zwischengruppen**

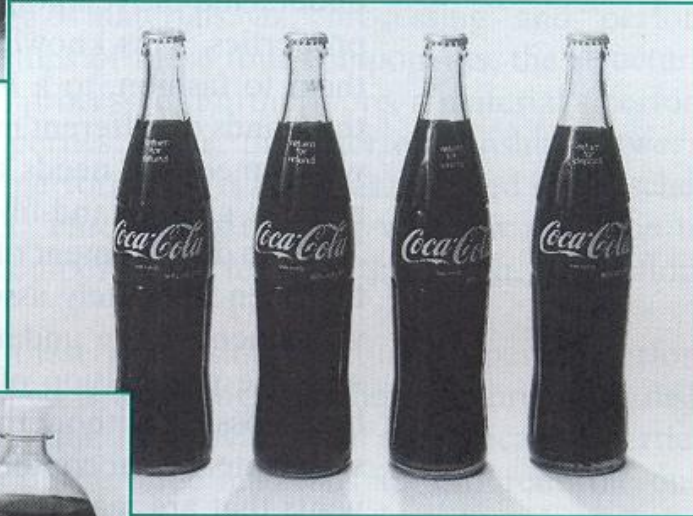


**Strukturelle Einteilung: Kristall + Glas**

**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:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ; Karbide:  $\text{SiC}$ ; Nitride  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; Gläser (Basis  $\text{SiO}_2$ )

**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

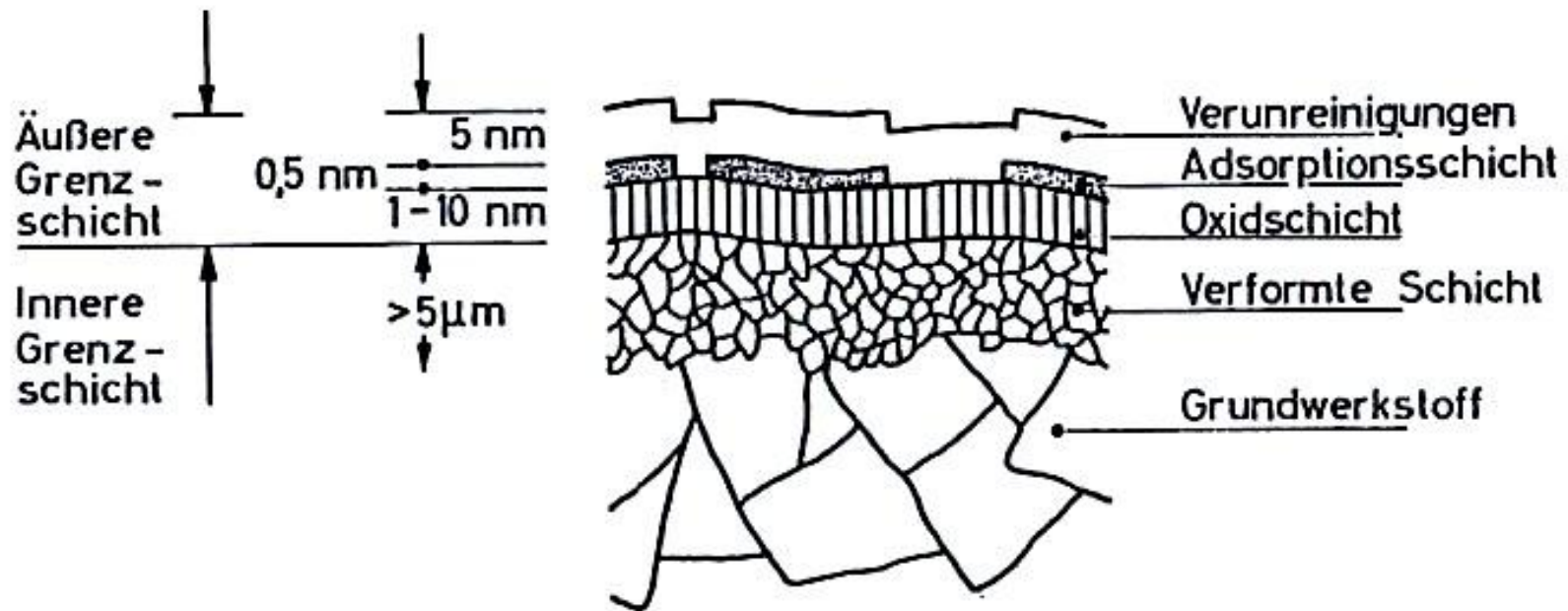
Grenzfläche = Phasengrenzen

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

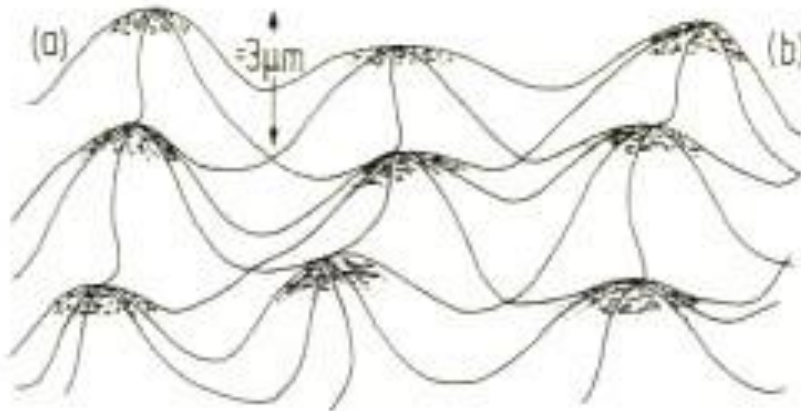
## Topographie und Struktur von metallischen Oberflächen



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



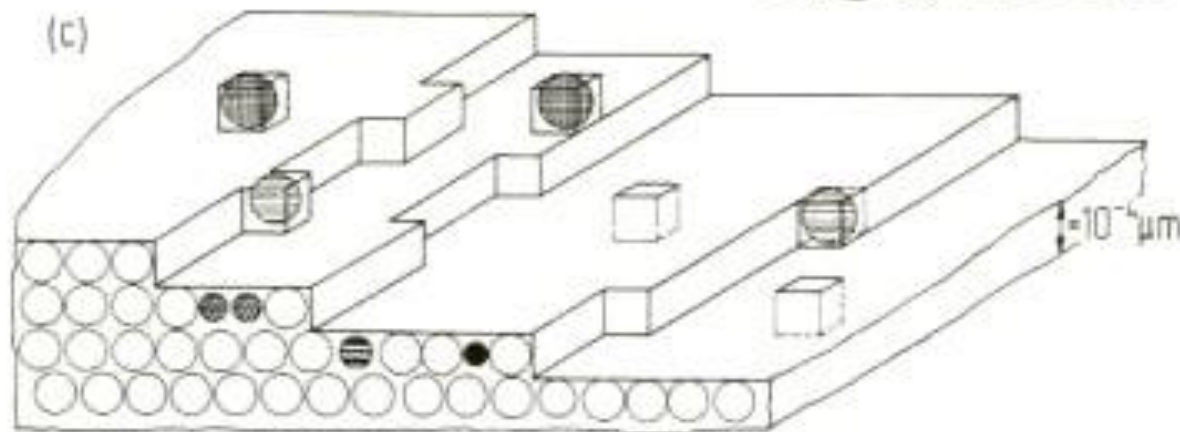
## Atomare Oberflächentopographie



- (V) Kontaminationsschicht
- (IV) Adsorptionsschicht
- (III) Reaktionsschicht

(II) Verformungsschicht

(I) Volumen



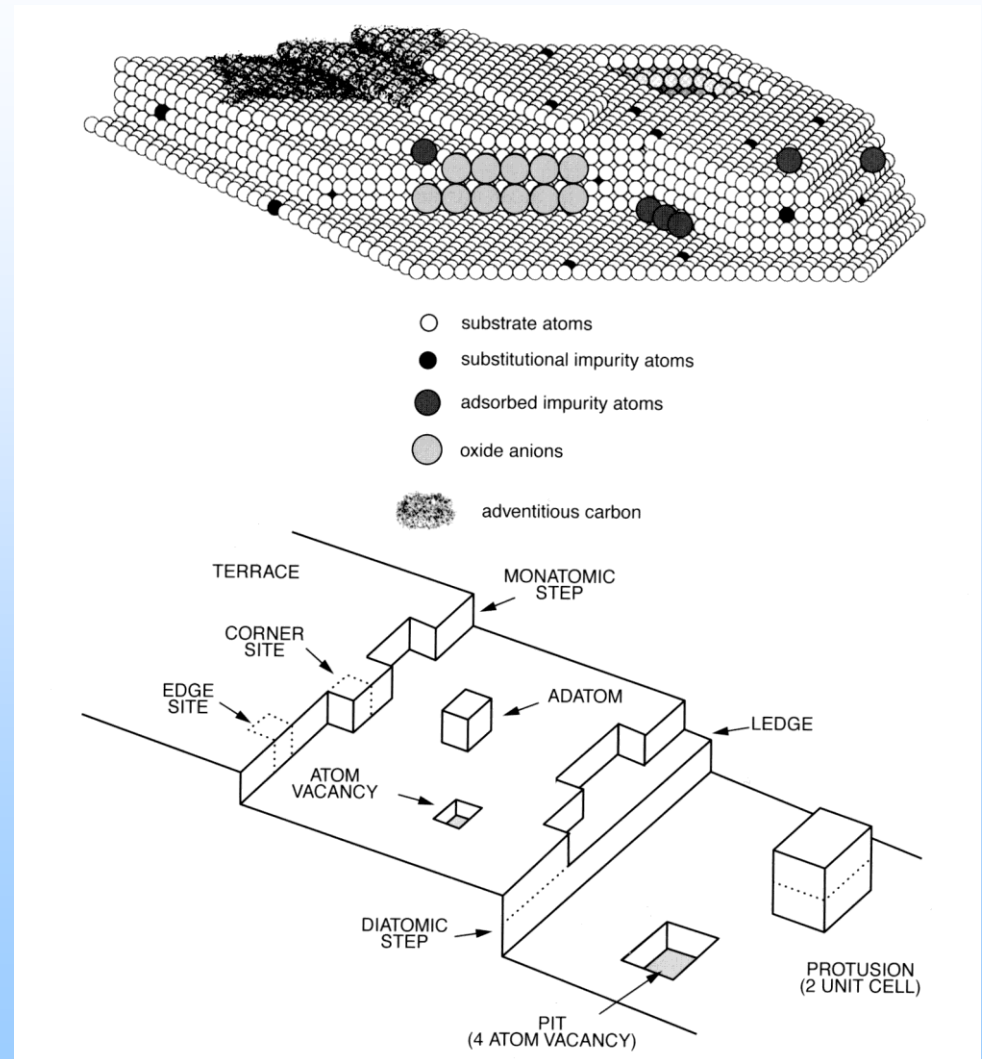


# A real surface

- 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*

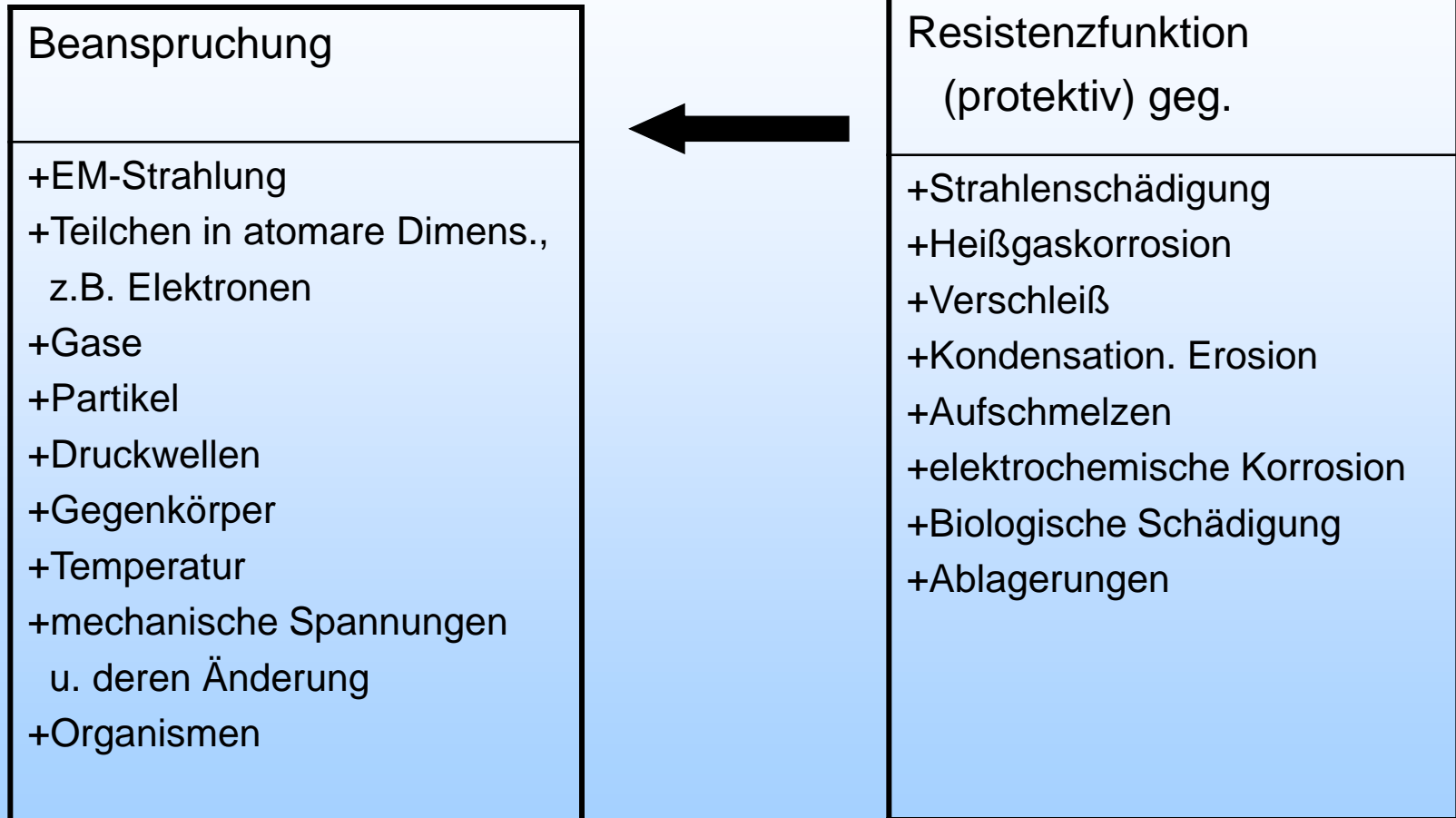


## 2.2 Eigenschaften von Oberflächen

### Eigenschaftsfunktion (positiv)

physikalisch	chemisch	biologisch
<ul style="list-style-type: none"> <li>+Transmission</li> <li>+Reflexion</li> <li>+ Absorption</li> </ul> <p>} EM-Strahl</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Signal</li> <li>Dekor</li> <li>Linsen</li> <li>Spiegel</li> <li>Radar</li> <li>+Tribologie</li> <li>Reibung</li> <li>Schmierstoffhaftung</li> <li>+Thermische Leitfähigkeit</li> <li>Wärmeleitung</li> <li>Wärmedämmung</li> <li>+Elektron. Eigensch.</li> <li>Transistoren</li> <li>Solarzellen</li> <li>Supraleiter</li> <li>+Prägung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+Katalyse</li> <li>+Reaktionen</li> <li>Photoeffekte</li> <li>+Diffusion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+Kompatibilität</li> <li>+Endoprothetik</li> <li>Körpergewebe</li> <li>u. -flüssigkeit</li> <li>Blut (Thromb., Zersetzung)</li> <li>Aktivierung von</li> <li>Zellwachstum</li> </ul>

## Beanspruchung und Funktion



Wichtig: Kinetische Energie

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

**Belastung** statischer und dynamischer Kräfte



### Eigenschaften

Zusammensetzung

Gefüge

Fehler

mech./techn.  
Eigenschaften

physikalische  
Eigenschaften

Betriebsfestigkeit

f (Temperatur)

Zusammensetzung

Gefüge

Fehler

Eigenspannungen

Haftfestigkeit

Zusammensetzung

Gefüge

Fehler

Dicke



-Festigkeit  
-Duktilität  
-Zähigkeit  
-Verschleißverhalten  
-Korrosionsverhalten  
-Temperatur-  
leitfähigkeit

f (Temperatur)

Topographie

Reflektivität

chem. Reaktivität

Oberflächenenergie

**Belastung**



Kräfte  
tribologisch  
korrosiv  
Wärme  
Strahlung

**Funktion**



Reflexion  
Adsorption  
Reibung

**Systemeigenschaften**



**Volumen**

**Grenzfläche**

**Oberflächenschicht**

**Oberfläche**

## 2.2 Eigenschaften von Oberflächen

### 2.2.1 Oberflächenenergie – Grenzflächenenergie – Benetzung

#### 2.2.2 Adsorption – Desorption

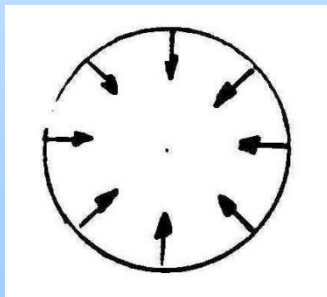
#### 2.2.3 Volumendiffusion – Oberflächendiffusion: Sinterprozess

#### 2.2.4 Morphologie physikalisch idealer Oberflächen

#### 2.2.5 Morphologie technischer Oberflächen

## Grenzflächenenergie – Grenzflächenspannung

Flüssigkeitstropfen  
“schwerelos“

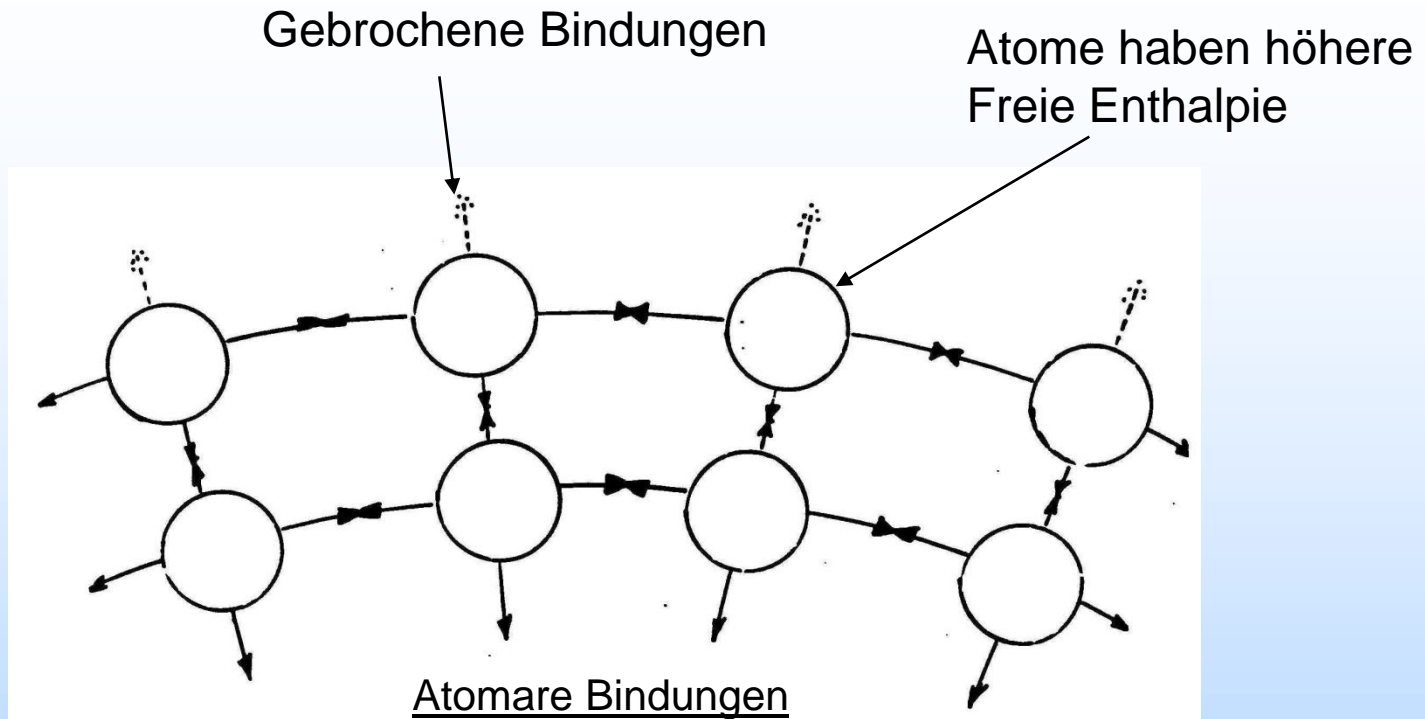


Grenzflächenenergie  
(Freie Enthalpie)

Dimension: (J/m<sup>2</sup>)

$$\frac{\text{Arbeit}}{\text{Fläche}}$$

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  $\text{cm}^2$ ; 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

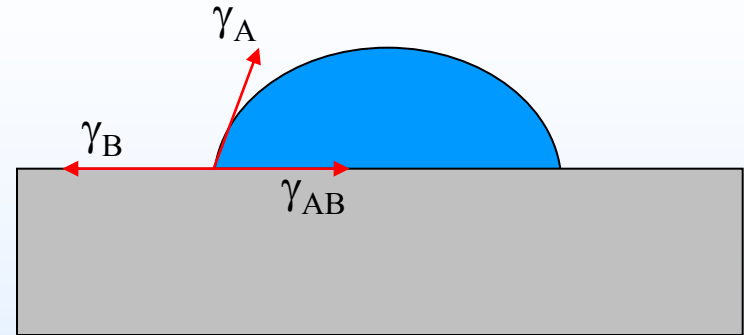
Werden Oberflächen der Stoffe A und B vereinigt

→ 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  $\approx 0,5$ h bis zur Adsorption einer Monolage.

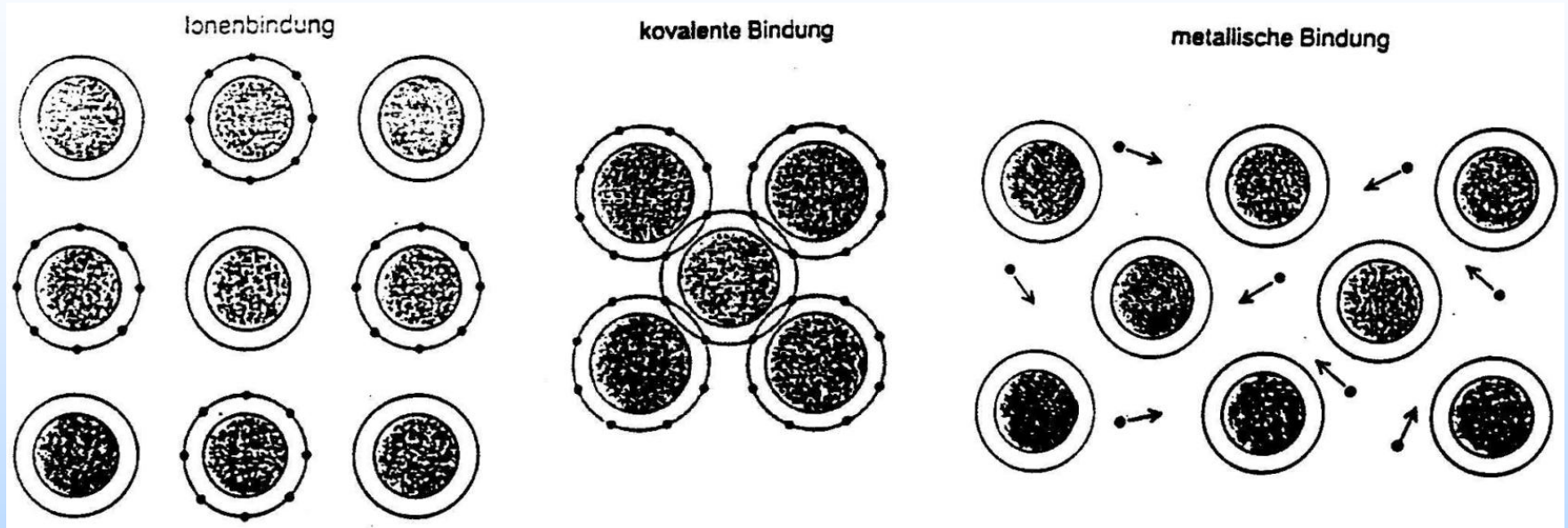
“Ideale” Oberfläche eines Metalls oder einer Legierung: Defekte → u. a. Oberflächen- und Grenzflächendiffusion um Größenordnungen größer als Volumendiffusion

## 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,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  
 $\text{ZrO}_2$ , fest, spröde

z.B. organische Stoffe,  
 $\text{SiC}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  
Graphit, Diamant

Metalle, duktil

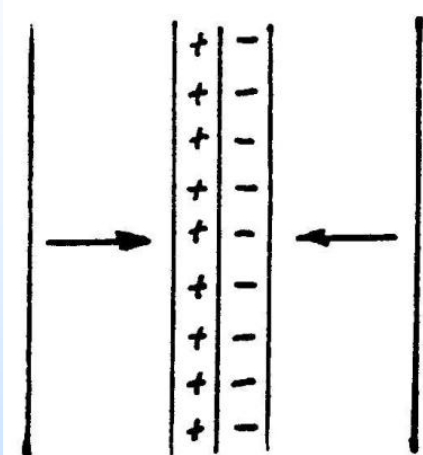
Oft Mischtypen der Bindungsarten z.B. TiN, TiC

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

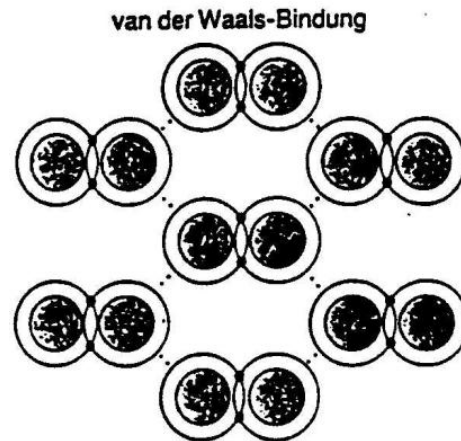
$\epsilon$  = abs. Dielektrizitätsk.

Bei Übergang von  $10^{12}$ -  
 $10^{13}$

Elektronenladungen/cm<sup>2</sup>

→  $K = 10^3 - 10^1$  MPa

### 2.

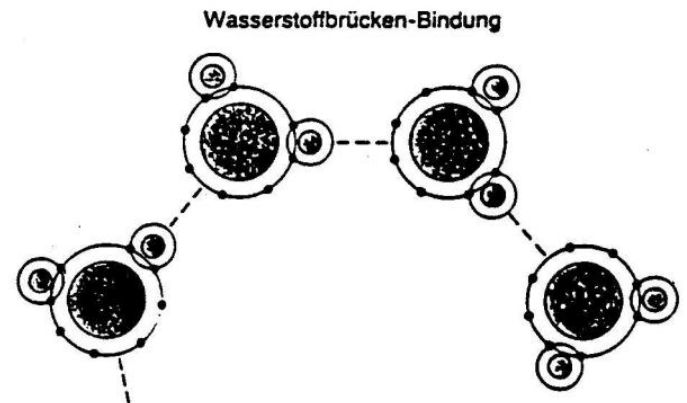


Kräfte zwischen polarisierten  
Molekülen. z.B. Edelgase,  
Graphit  $\perp$  zur Basis

#### Bindungsenergie

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

### 3.



Schema  
 $R^+ - x^- \cdots H^+ - y^-$   
(F, O, N)

z.B. viele organische Moleküle

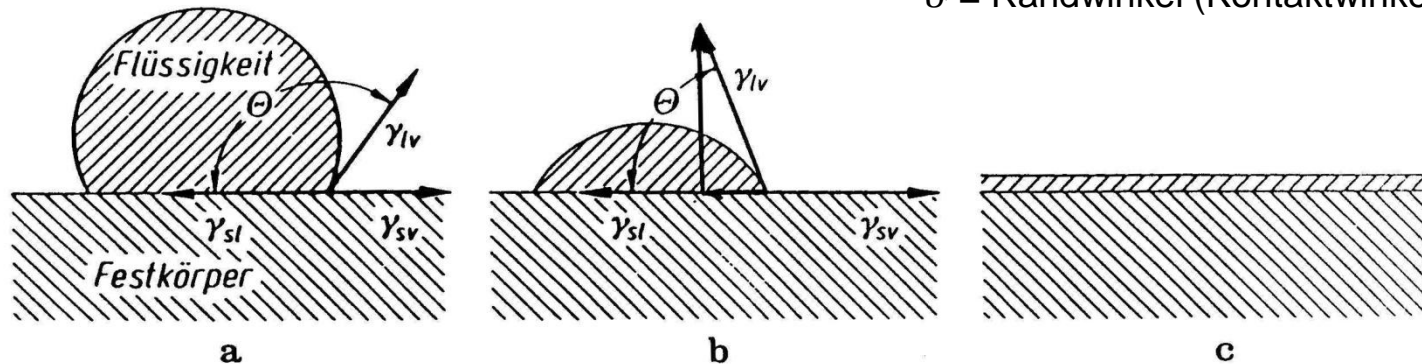
#### Bindungsenergie

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

## Benetzung

### Wechselwirkung Flüssigkeit/Festkörper

$\vartheta$  = Randwinkel (Kontaktwinkel)



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

$\gamma_{lv}$  = Oberflächenenergie der Flüssigkeit gegenüber der eigenen Dampfphase

$\gamma_{sv}$  = Grenzflächenenergie des Festkörpers gegen die Atmosphäre

$\gamma_{sl}$  = Grenzflächenenergie des Festkörpers gegen die Flüssigkeit

Youngsche Beziehung für den Zustand minimaler Energie:

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

$\theta$  muss gemessen werden, da  $\gamma_{sl}$  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)

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

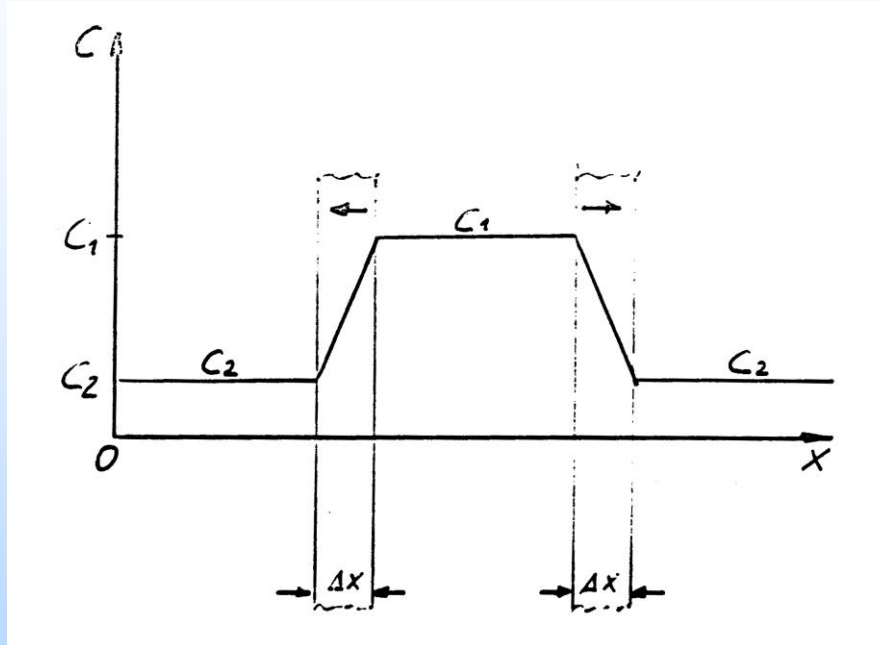
$W = \gamma_{lv} (\cos \theta + 1)$

$W$  = 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

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

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:

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

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

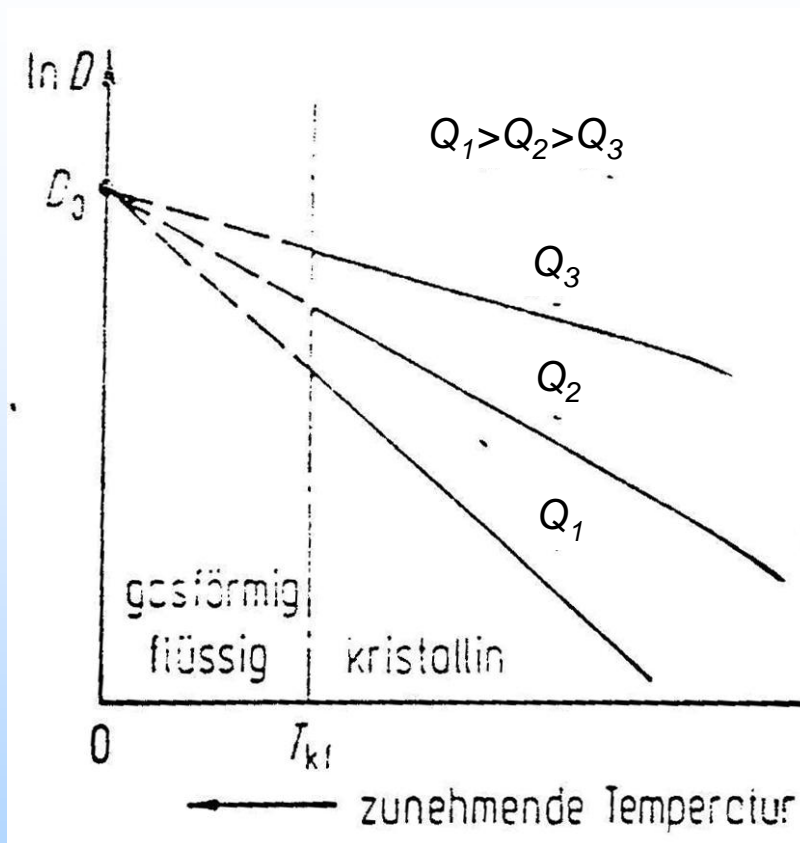
$$Q = H_W + H_B$$

 $H_B$  = Aktivierungsenergie für Leerstellenbildung

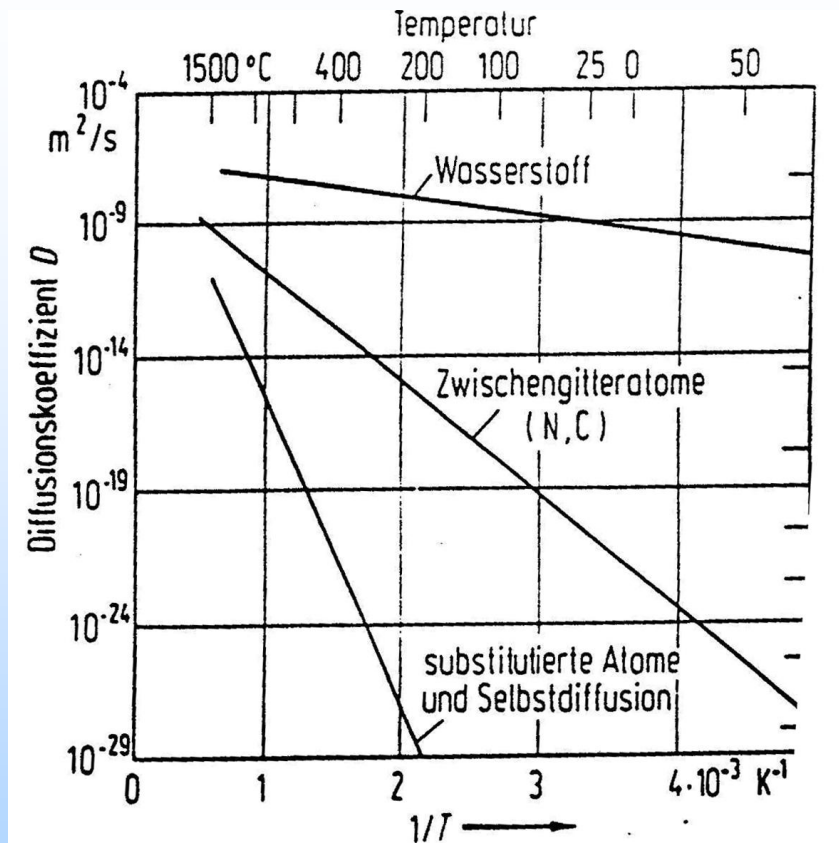
Interstitielle Atome: große Diffusionsgeschwindigkeit

Längs Korngrenzen: größere Diffusionsgeschwindigkeit als Gitter.

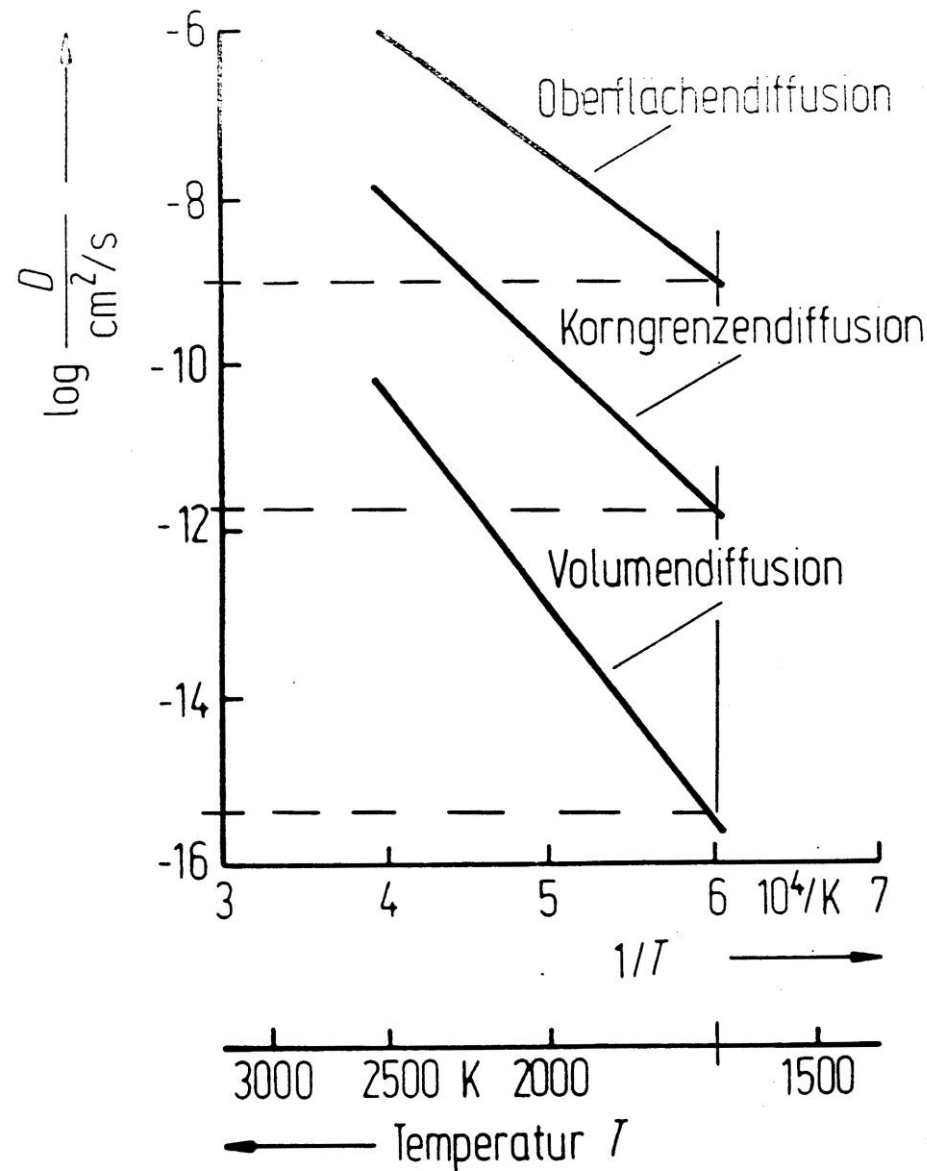
 $Q$  (selbstdiffusion) ~ Schmelztemperatur



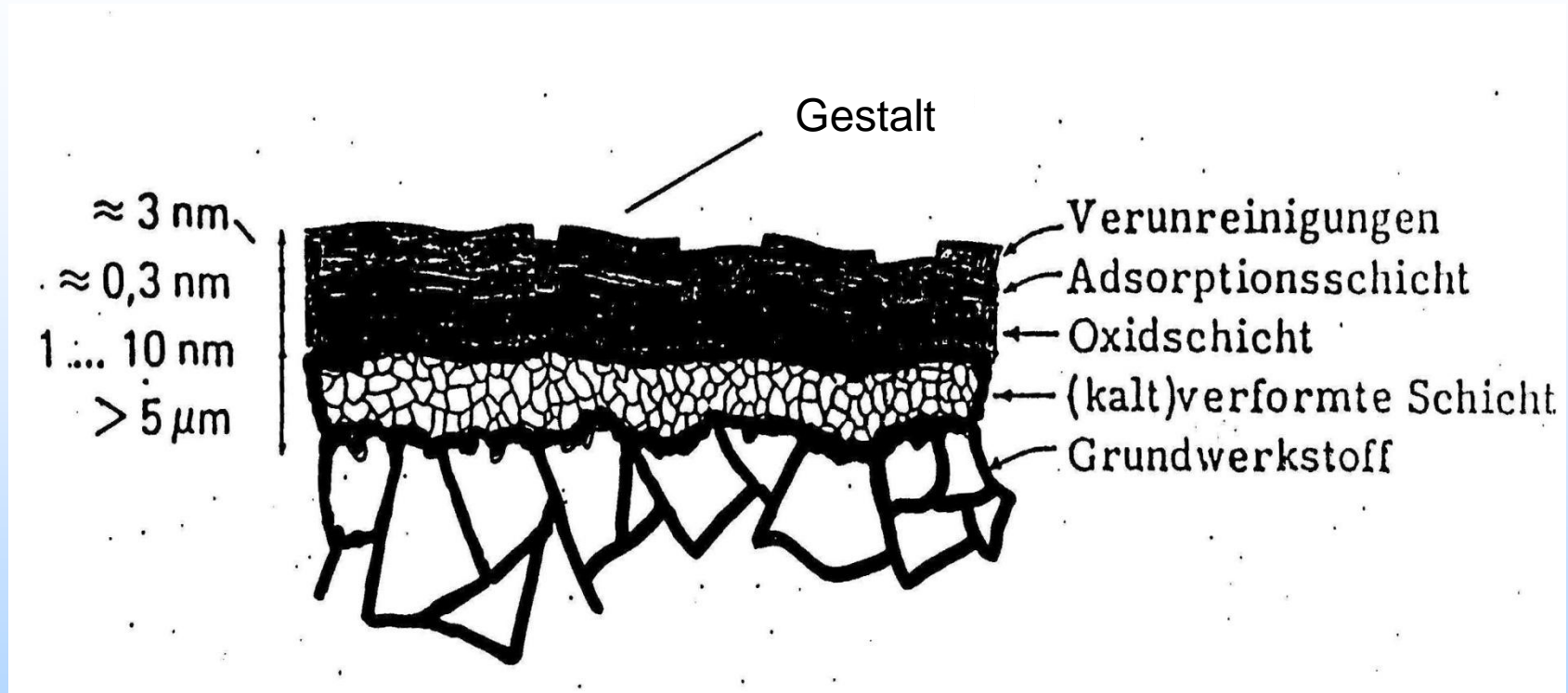
Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten wird bestimmt durch die Aktivierungsenergie  $Q$ , die etwa proportional der Schmelztemperatur ist.



Diffusionskoeffizienten verschiedener Elemente im  $\alpha$ -Eisen. Im  $\gamma$ -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

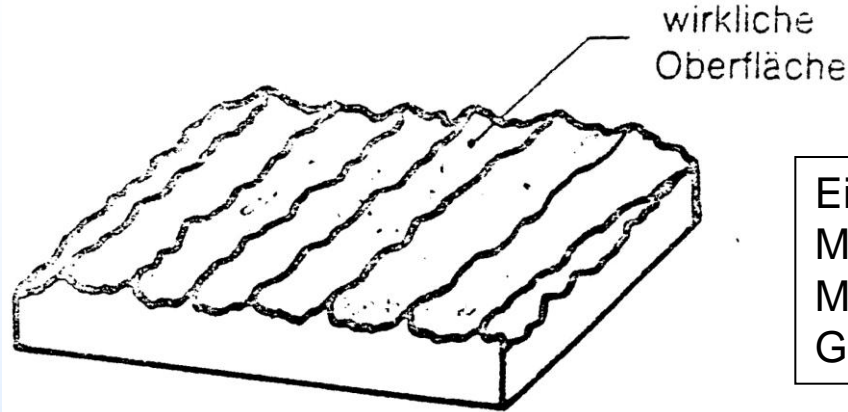
Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Unebenheit Unrundheit	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des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



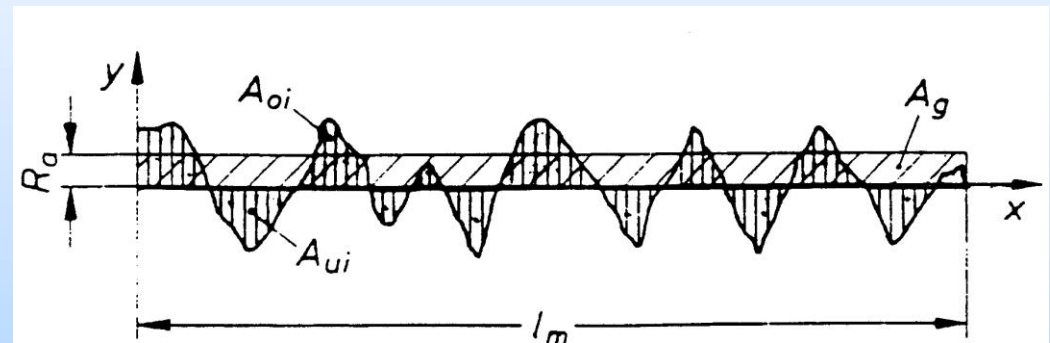
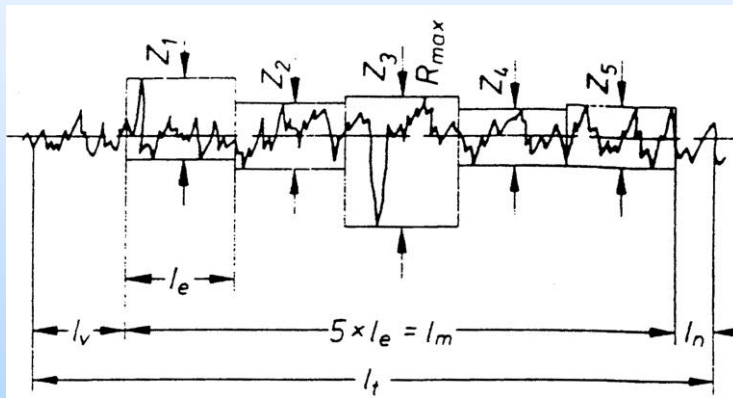
Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. Bis 4. Ordnung



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

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

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

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

Mittenrauhwert  $R_a$

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