

## Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialkunde

### 10.

Thermische, elektrische und chemische Eigenschaften

Schwerpunkte:

- ❖ Grundbegriffe der *Elektrizitätslehre*
- ❖ *Bändermodell* der Festkörper
- ❖ *Halbleiter* und ihre Anwendungen

Kapitel des Lehrbuches: 19

Hausaufgaben: 5. Kapitel: 1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 32, 35

1

## Thermische Eigenschaften



- Temperatur
- Erwärmung/Abkühlung

Wärmekapazität (C):  $C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$

molare Wärmekapazität ( $c_v$ ):  $c_v = \frac{C}{\nu}$

spezifische Wärmekapazität (c):  $c = \frac{C}{m}$



- Schmelzpunkt/Schmelzwärme
- Siedepunkt/Verdampfungswärme

Einige spezifische Wärmekapazitätswerte:

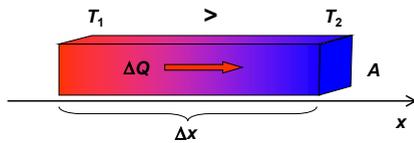
Stoff	c (J/(kg·K))
Zahnschmelz	750
Dentin	1260
Wasser	4190
Amalgam	210
Gold	126
Porzellan	1100
Glas	800
PMMA	1460
Zinkphosphat	500

~ Bindungsenergie!

2

### • Wärmeleitung

- durch Gitterschwingungen
- durch freie Elektronen



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Fourier-Gesetz

$\lambda$  — Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl)  
J/(s·m<sup>2</sup>·K/m) = W/(m·K)

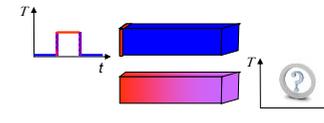
$\lambda$  ist ein guter Parameter für stationäre Bedingungen!

Einige Wärmeleitzahlen:

Stoff	$\lambda$ (W/(m·K))
Zahnschmelz	0,9
Dentin	0,6
Wasser	0,44
Amalgam	23
Gold	300
Porzellan	1
Glas	0,6-1,4
Akrylat	0,2
PMMA	0,2-0,3
Zinkphosphat	1,2

3

Bei nicht-stationären Bedingungen:



$$D = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

D — Temperaturleitfähigkeit (Temperaturleitzahl, Wärmediffusivität) (m<sup>2</sup>/s)

Einige Temperaturleitzahlen:

Stoff	$\lambda$ (W/(mK))	D (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
Zahnschmelz	0,9	0,5
Dentin	0,6	0,2
Wasser	0,44	0,14
Amalgam	23	9,6
Gold	300	118
Porzellan	1	0,4
Glas	0,6-1,4	0,3-0,7
Akrylat	0,2	0,1
PMMA	0,2-0,3	0,12
Zinkphosphat	1,2	0,3

4



• **Wärmeausdehnung**

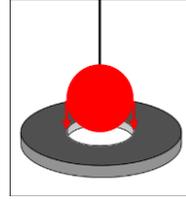
Länge:  $\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$

$\alpha$  — **linearer Wärmeausdehnungs-  
koeffizient**  
(Längenausdehnungskoeffizient) (1/K)

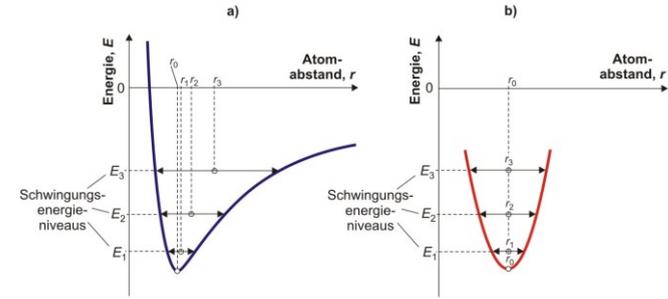
Volumen:  $\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T$

$\beta$  — **räumlicher Wärmeausdehnungs-  
koeffizient**  
(Volumenausdehnungskoeffizient) (1/K)

$\beta \approx 3\alpha$

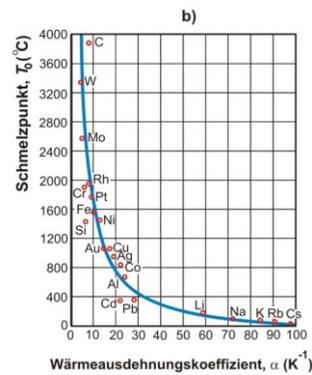
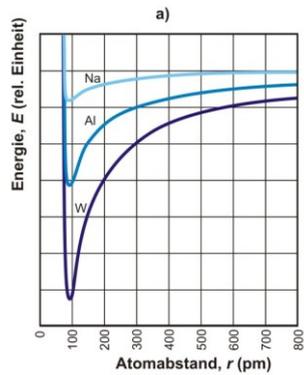


**Hintergrund der Wärmeausdehnung:**



5

6



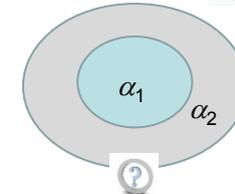
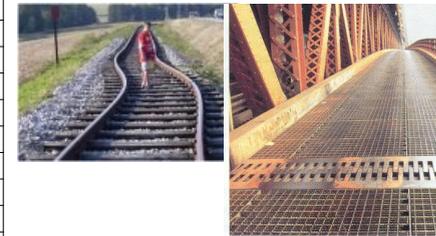
7

**Einige Längenausdehnungskoeffizienten:**

Stoff	$\alpha$ ( $10^{-6} 1/K$ )
Zahnschmelz	11,4
Dentin	8,3
Gold	14,2
Goldlegierungen	11-16
Amalgam	≈ 25
Porzellan	4-16
Akrylat	90
Glas	8
PMMA	90-160
Silikon	100-200
Gips	15-20
Wachs	300-500

**Unterschiedliche Wärmeausdehnung**

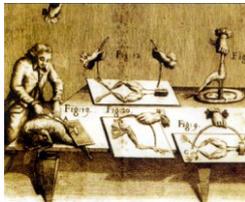
↓  
**innere Spannungen!**



8

## Rekapitulation der Elektrizitätslehre

Rekapitulation



9

## Elektrische Ladung

Rekapitulation

**Ladung:** ist an Materie gebunden, eine wesentliche Eigenschaft der Materie (wie die Masse).  
Makroskopische Objekte sind im allgemeinen elektrisch neutral.



Elektron (griechisch, ηλεκτρον) heißt „Bernstein“

Elektronen sind negativ geladene Elementarteilchen. Das Proton hat die entgegengesetzte Ladung (positiv).

Die elektrische Ladung ist quantisiert und der Betrag der Ladung des Elektrons ( $e^-$ ) ist die **Elementarladung** ( $e$ ).  
Einheit der Ladung: 1 C (Coulomb) = 1 A·s

$$e = |e^-| = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Faraday-Konstante (Gesamtladung von 1 mol Proton):

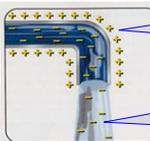
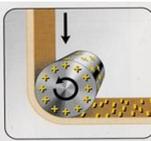
$$F = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 6 \times 10^{23} \text{ 1/mol} = 96\,500 \text{ C/mol}$$

10

## Ladungstrennung

Rekapitulation

Die elektrischen Ladungen können durch Reibung getrennt werden (statische Elektrizität = Reibungselektrizität).



Elektronenmangel

Elektronenüberschuss



"I told you nylon carpets were a mistake."



Nach der Ladungstrennung kommt die Entladung.

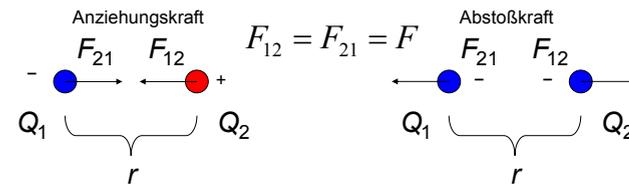
11

## Elektrische Wechselwirkung

Rekapitulation

Es gibt eine **Wechselwirkung** zwischen den Ladungen:

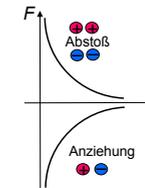
- ungleichnamige Ladungen ziehen sich an
- gleichnamige Ladungen stoßen sich ab



Coulomb-Gesetz:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$



12

# Elektrisches Feld und Feldlinien

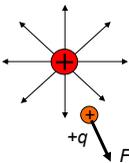
Wenn sich der physikalische Zustand eines Objekts im Raum ändert, ohne dass ein direkter Kontakt mit einem anderen Objekt besteht, spricht man von einem Feld.

Das Feld wird durch die Feldstärke definiert. Veranschaulichung des Feldes: mit Hilfe der Feldlinien

**Richtung der Feldlinien:** Richtung des Feldstärkevektors

**Dichte der Feldlinien** (Anzahl der Feldlinien pro Fläche): Betrag des Feldstärkevektors

**elektrische Feldstärke, E:**

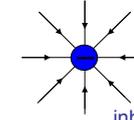
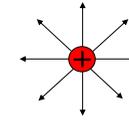
$$E = \frac{F}{q} \quad \left[ \frac{N}{C} \right]$$


Rekapitulation

13

## Feldlinien einer Punktladung:

Radialfeld

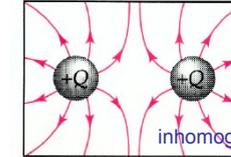
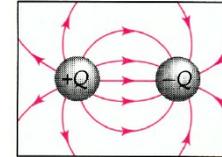


inhomogenes Feld

Rekapitulation

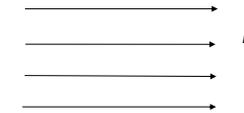
## Feldlinien eines Dipols und zwei gleicher Ladungen:

Ladungen:



inhomogenes Feld

homogenes Feld:

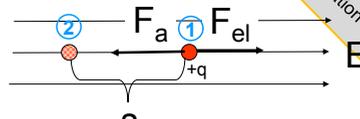


E

14

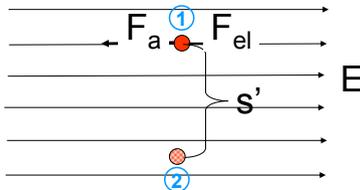
## Arbeit im elektrischen Feld:

Bewegung einer Ladung parallel zu den Feldlinien:



$$W = |\vec{F}_a| \cdot s = |\vec{F}_{el}| \cdot s = q|\vec{E}|s = qEs$$

Bewegung einer Ladung senkrecht zu den Feldlinien:

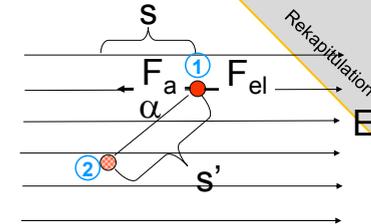


$$W = |\vec{F}_a| \cdot s' \cdot \cos \alpha = 0$$

Rekapitulation

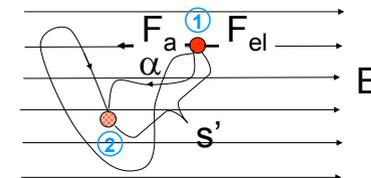
15

Bewegung einer Ladung schräg zu den Feldlinien:



$$W = |\vec{F}_a| \cdot s' \cdot \cos \alpha = qEs' \cdot \cos \alpha = qEs$$

W ist unabhängig von dem aktuellen Weg zwischen den zwei Punkten!



Rekapitulation

16

## Spannung (= Potenzialdifferenz)

Man braucht  $W_{1 \rightarrow 2}$  Energie um eine Probeladung  $q$  aus Punkt 1 nach Punkt 2 zu bringen,  $W_{1 \rightarrow 2} / q$  ist unabhängig von der Probeladung und vom Weg.

Elektrische Spannung zwischen zwei Punkten 1 und 2 (Spannung des Punktes 2 gegenüber 1):

$$U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} \quad \text{Einheit: Volt [V]} \quad 1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

Bemerkungen:

- Wenn  $U_{21} > 0 \Rightarrow$  Punkt 2 ist „positiver“ als Punkt 1
- $U_{21} = -U_{12}$
- Im homogenen Feld:  $U_{21} = W_{1 \rightarrow 2} / q = qEs / q = Es$
- Bei der Röntgenröhre:  $W = eU = \frac{1}{2} mv^2$
- $U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$

17

## Elektrisches Potenzial

Man braucht  $W_{0 \rightarrow i}$  Energie um eine Probeladung  $q$  aus einem Bezugspunkt 0 nach Punkt  $i$  zu bringen.

$\frac{W_{0 \rightarrow i}}{q}$  ist unabhängig von der Probeladung und vom Weg!

Elektrisches Potenzial:  $\varphi_i = \frac{W_{0 \rightarrow i}}{q}$  Einheit: Volt (V)

Das elektrische Potenzial ( $\varphi_i$ ) gibt an, welche potenzielle Energie eine Probeladung von 1 C in einem Punkt ( $i$ ) hat, nachdem sie in einem vorgegebenen elektrischen Feld vom Punkt (0) zu dem Punkt ( $i$ ) gebracht wurde.

Als Bezugspunkt 0 wird oft ein Punkt im Unendlichen gewählt, in diesem Fall gibt das elektrische Potenzial ( $\varphi_i$ ) an, welche potenzielle Energie eine Probeladung von 1 C in einem Punkt ( $i$ ) hat, nachdem sie in einem vorgegebenen elektrischen Feld vom Unendlichen zu dem Punkt ( $i$ ) gebracht wurde:

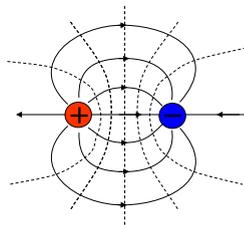
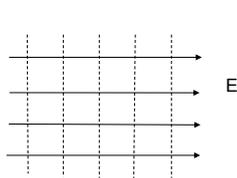
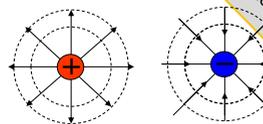
$$\varphi_i = \frac{W_{\infty \rightarrow i}}{q}$$

18

## Potenzialfeld, Äquipotenzialflächen

Äquipotenzial = dasgleiche Potenzial

Äquipotenziallinien(-flächen) (gestrichelte Linien) und Feldlinien (durchgezogene Linien) stehen senkrecht zueinander



Bewegung an einer Äquipotenzialfläche: keine Arbeit!

19

## Elektrischer Strom

gerichteter Transport oder kollektive Wanderung von elektrischen Ladungen

elektrische Ladungsträgern  
= frei bewegliche elektrisch geladene Teilchen:  
in Metallen: **Elektronen**  
in Elektrolytlösungen und Gasen: **Ionen**

Elektrische Stromstärke ( $I$ ):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

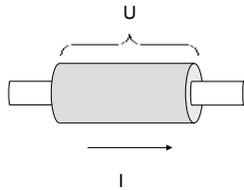
$\Delta Q$ : durch einen Leiterquerschnitt während der Zeitdauer  $\Delta t$  durchgeflossene Ladungsmenge

Einheit: Ampere (A),  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$

Technische (konventionelle) Stromrichtung: Bewegungsrichtung der positiven Ladungen.

20

## Ohmsches Gesetz



Der Spannungsabfall U über bestimmte metallische Leiter ist proportional zu der hindurchfließenden elektrischen Stromstärke I.

$$U \sim I \begin{cases} U = RI \\ GU = I \end{cases}$$

R: elektrischer Widerstand

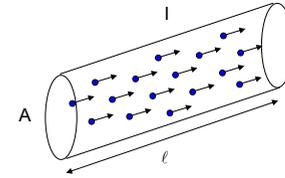
G: elektrischer Leitwert

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{Einheit: Ohm } (\Omega), 1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{Einheit: Siemens(S), } 1S = \frac{1}{1\Omega}$$

21

## Widerstand eines Leiters



$$\begin{aligned} I &\sim v \sim E = U/l \\ I &\sim Q \sim A \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} I &\sim \frac{A}{l} U \\ I &= \frac{U}{R} \end{aligned} \right\} R \sim \frac{l}{A} \Rightarrow R = \rho \frac{l}{A}$$

spezifischer Widerstand  
SI-Einheit:  $\Omega m$

Elektrische Leitfähigkeit ( $\sigma$ ):  
SI-Einheit: S/m

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

22

## Sonstige Eigenschaften

### • elektrisch

Elektrische Ladungsträger: Elektronen, Ionen.

Spezifischer Widerstand ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (\Omega m)$$

Elektrische Leitfähigkeit ( $\sigma$ ):

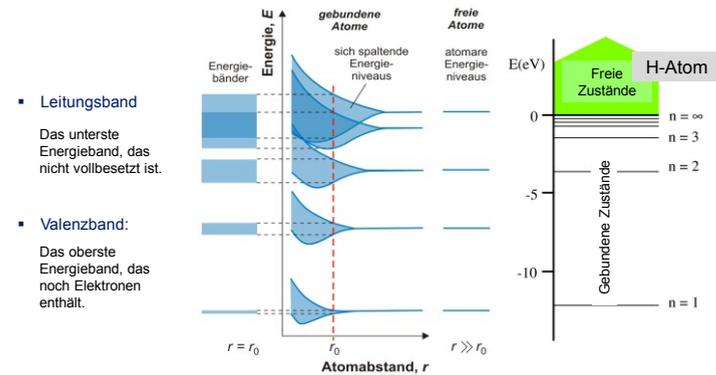
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad ((\Omega m)^{-1} = S/m)$$

[  $G = \frac{1}{R}$  nennt man elektrischen Leitwert. ]

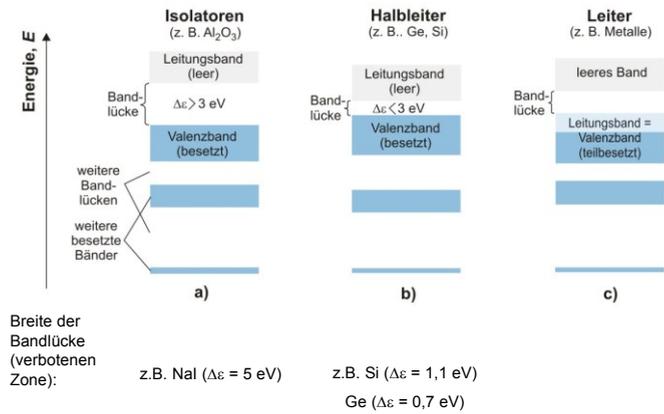
Stoff	$\sigma$ (S/m)	
Silber	$6,8 \cdot 10^7$	Leiter
Gold	$4,3 \cdot 10^7$	
Platin	$0,94 \cdot 10^7$	
Germanium	2,2	Halbleiter
Silizium	$4 \cdot 10^{-4}$	
Zirkon	$\approx 10^{-10}$	Isolator
Porzellan	$\approx 10^{-11}$	
Glas	$\approx 10^{-13}$	
PMMA	$\approx 10^{-12}$	
PE	$\approx 10^{-16}$	

23

## Elektronenstruktur - Energiebänder

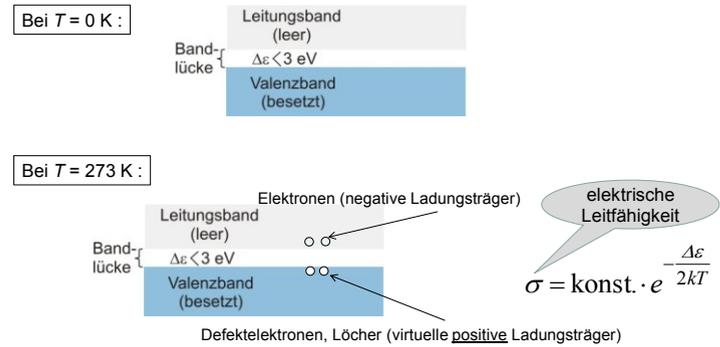


24



25

Eigenhalbleiter (intrinsic Halbleiter)

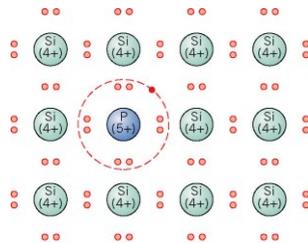
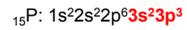


26

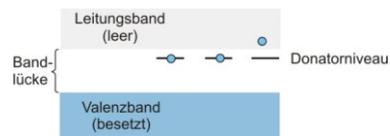
Dotierte Halbleiter

n-Halbleiter

z. B. + P



Grundkristall z.B. Si



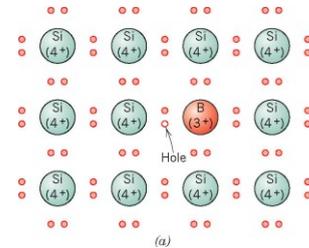
Elektronenleitung (n-Leitung)

27

Dotierte Halbleiter

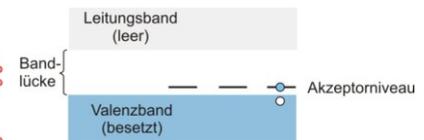
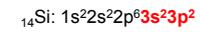
p-Halbleiter

z. B. + B



(a)

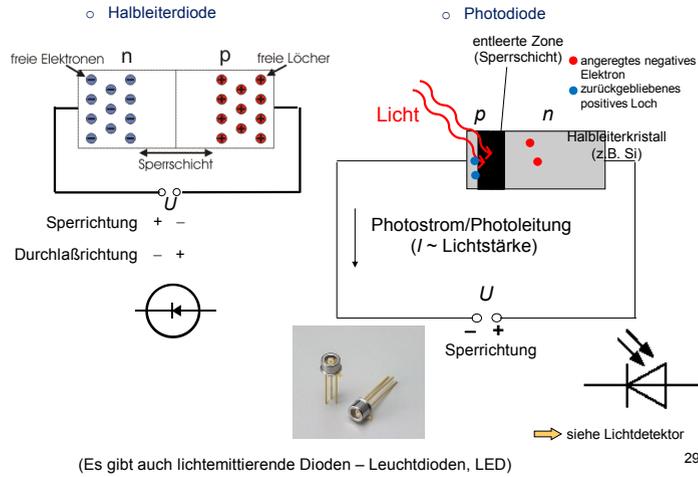
Grundkristall z.B. Si



Löcherleitung (p-Leitung)

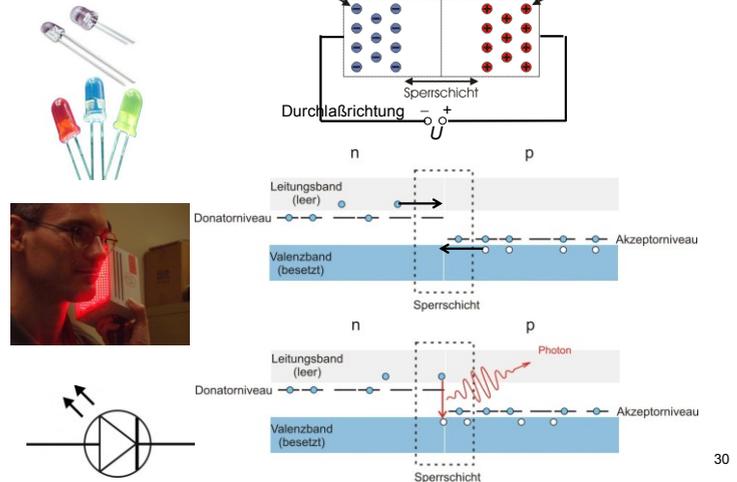
28

• Anwendungen der dotierten Halbleiter



29

Leuchtdiode (light emitting diode — LED)



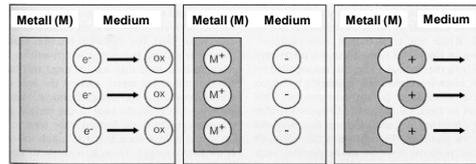
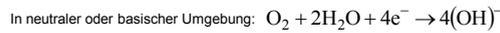
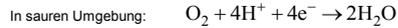
30

• chemisch

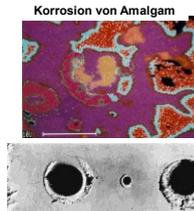
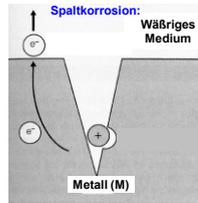
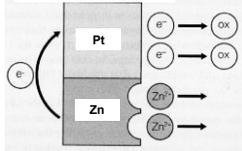
- Oxidation, Korrosion von Metallen  $M \rightarrow M^{n+} + n \cdot e^-$

Galvanische Reihe der Elemente (im Meereswasser):

- Pt
  - Au
  - Ti
  - Ag
  - Cu
  - Ni
  - Sn
  - Pb
  - Al
  - Zn
- ↑ inert  
↓ aktiv

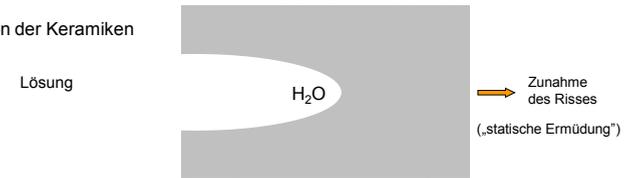


Galvanische Korrosion:



31

• Korrosion der Keramiken



• Degradation der Polymere

Wasseraufnahme (Alkohol) → Schwellung, Lösung → Schwächung der intermolekularen Kräfte → Änderungen der mech., opt., usw. Eigenschaften



UV-Bestrahlung → Ionisation → Abspaltung, bzw. Entstehung von Bindungen → Änderungen der mech., opt., usw. Eigenschaften

Nächste Vorlesung: Kapitel 20 und 21

32