

# Wiederholung: Mikrohärte

Definiert durch die zurückbleibende Verformung in einem Material bei Eindringen eines unverformbaren Prüfkörpers.

## Prüfkörpermaterial:

- + Diamant

## Prüfkörpergeometrien:

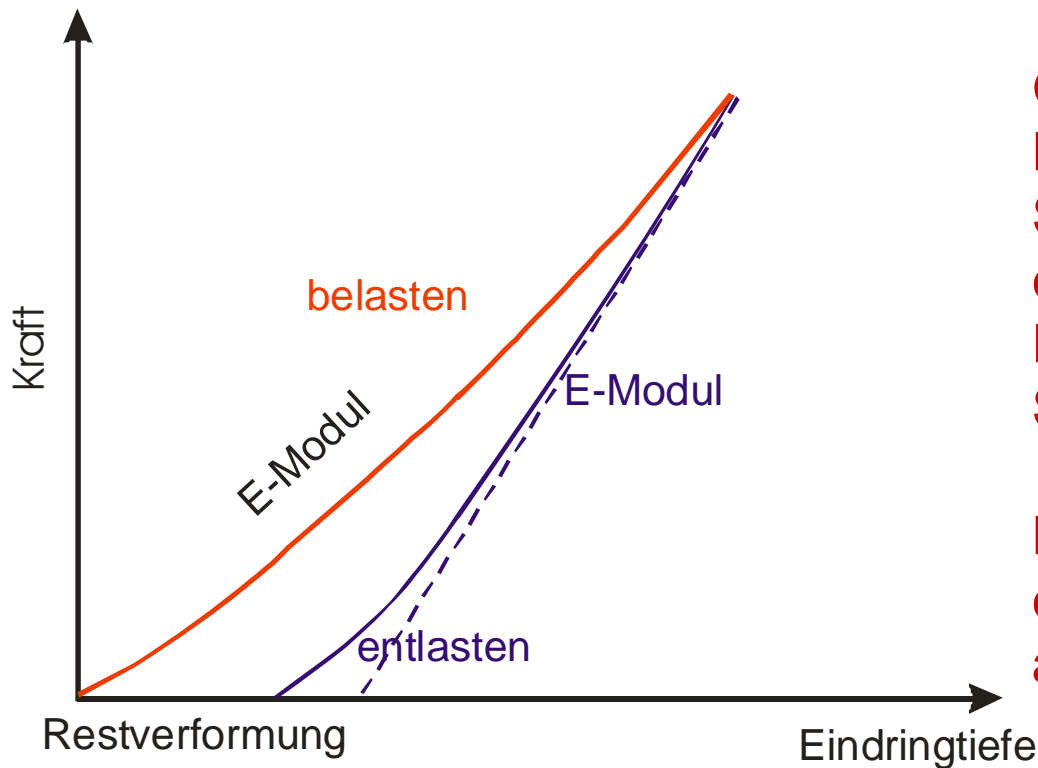
- + Vickers: Pyramide mit Diagonale: Höhe von 1:7
- + Knoop: dreiseitige Pyramide
- + Rockwell: Kugel
- + Langgezogene Schneide

## Prüflasten:

- +  $10^{-5} - 2 \text{ N}$

# Wiederholung: Nanoindenter

**Der Nanoindenter ermöglicht auch eine Bestimmung der elastischen Verformbarkeit (d. i. des E-Moduls) eines Festkörpers.**



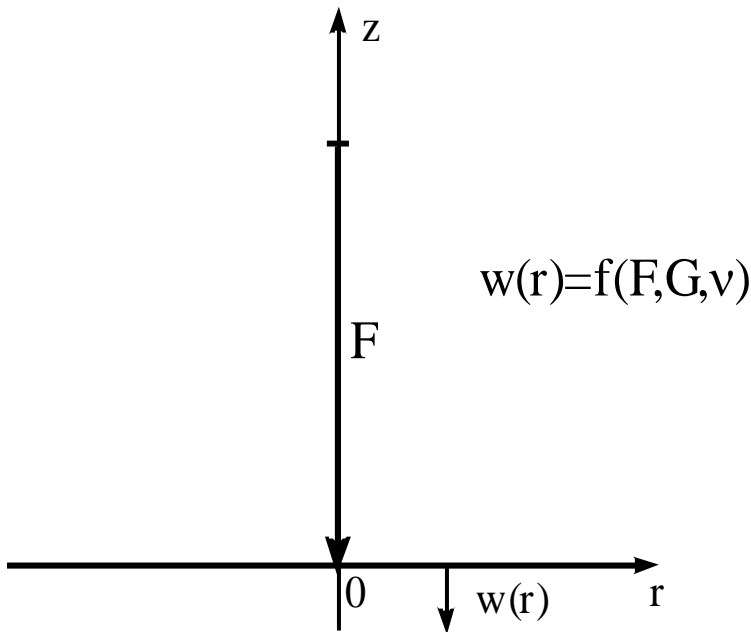
**Generell ist bei der Härteprüfung an dünnen Schichten darauf zu achten, dass die Eindringtiefe des Prüfkörpers maximal 1/3 der Schichtdicke beträgt.**

**Nur dann kann ein Einfluss des Substrates ausgeschlossen werden**

# Wiederholung: zerstörungsfreie Härtemessung

## Hertz'scher Kontakt:

Wirkung einer Punktkraft auf eine ideal elastische Halbebene:



**G**...Schubmodul

**v**...Querkontraktionszahl

**w(r)** entspricht der Eindringtiefe eines Prüfkörpers in den Festkörper.

**G** und **v** resultieren aus den elastischen Konstanten des Festkörpers:

$$G = c_{44}$$

$$v = \frac{c_{12}}{2(c_{44} + c_{12})}$$

# Wiederholung: Ortsauflösung

Mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie können folgende mechanische (Oberflächen-) Eigenschaften im Nanometerbereich ortsaufgelöst bestimmt werden:

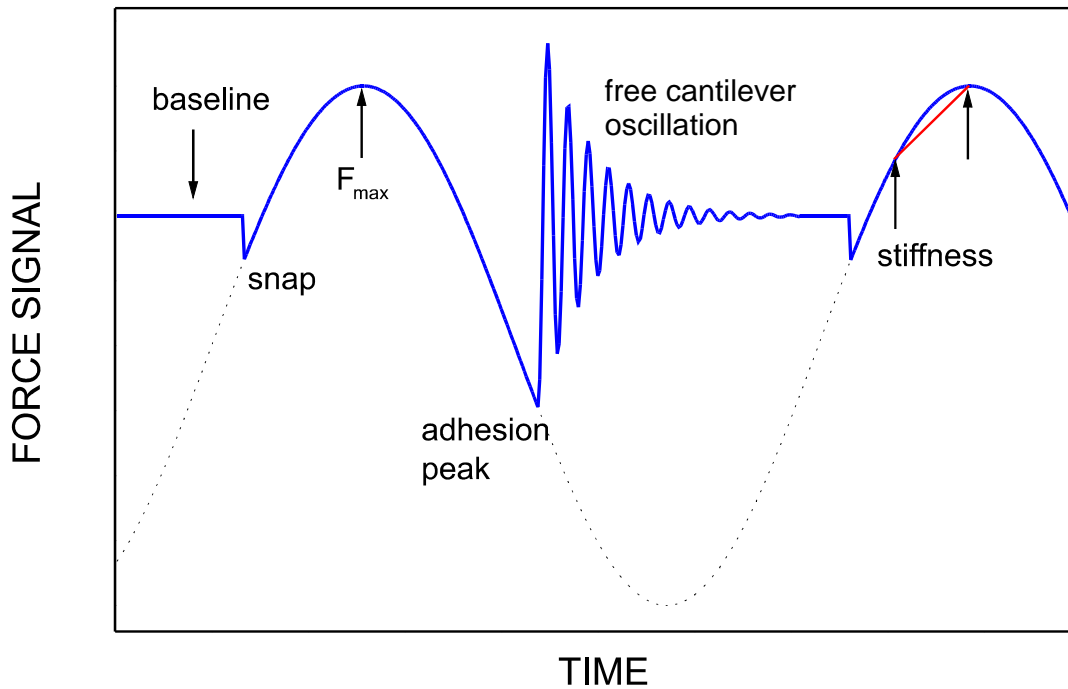
- + *Elastizitätsmodul***
- + *Härte***
- + *Adhäsionskraft***

Dies gelingt mit Hilfe der sogenannten Kraftspektroskopie.

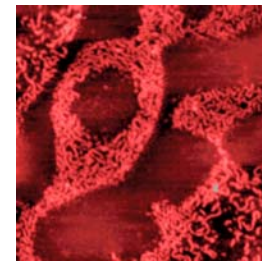
# Wiederholung: Kraftspektroskopie

## Wiederholte Kraft/Abstandskurven während AFM-Scan mit elektronischer Auswertung:

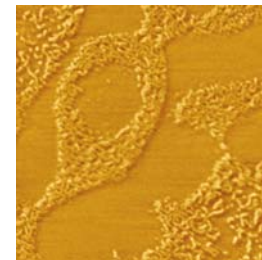
### Kraft-Abstandskurve:



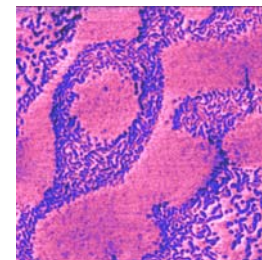
### Polymerketten:



*Topographie*



*Adhäsion*



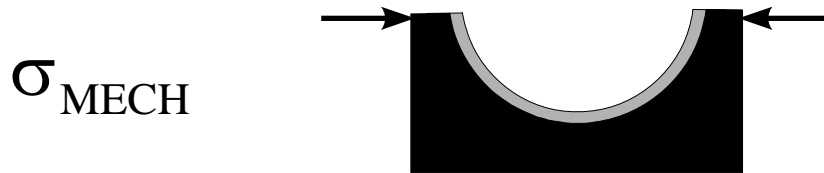
*Steifigkeit*

# Wiederholung: Spannungen

## Arten von Spannungen:

$$\sigma = \sigma_{\text{MECH}} + \sigma_{\text{T}} + \sigma_{\text{I}}$$

## Mechanische Spannung:



Erzeugt durch Einspannung des Substrates und nachfolgendes entspannen

## Thermische Spannung:

$$\sigma_{\text{T}} = E_{\text{S}} (\alpha_{\text{S}} - \alpha_{\text{U}}) (T_{\text{B}} - T_{\text{M}})$$

$E_{\text{S}}$  ... E-Modul Schicht

$\alpha_{\text{S}}$  ... Ausdehnungskoeff. Schicht

$\alpha_{\text{U}}$  ... Ausdehnungskoeff. Substrat

$T_{\text{B}}$  ... Beschichtungstemperatur

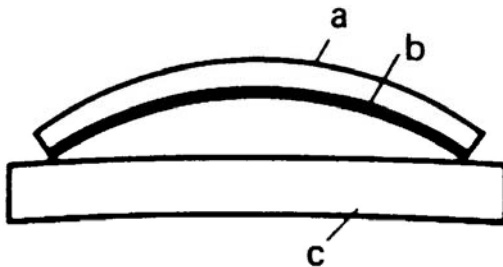
$T_{\text{M}}$  ... Messtemperatur

Erzeugt durch verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Schicht

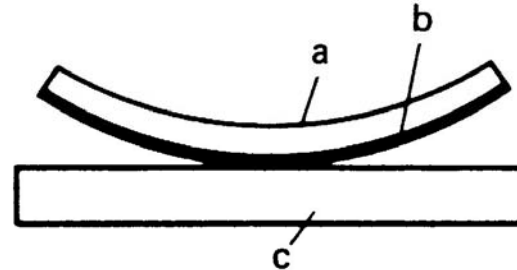
# Wiederholung: Spannungsmessung

## Gekrümmtes Substrat:

Zugspannung



Druckspannung



Gesamtspannung  $\sigma$  einer dünnen Schicht:

$$\sigma = \frac{E_s d_s^2}{6(1 - \nu_s) d_F} \left( \frac{1}{R_{s1}} - \frac{1}{R_{s2}} \right)$$

- a) Substrat
- b) Schicht
- c) Referenzplättchen

$E_s$  ... E-Modul Substrat

$\nu_s$  ... Poisson-Konstante Substrat

$d_s$  ... Dicke des Substrates

$d_F$  ... Schichtdicke

$R_{s1}, R_{s2}$  ... Krümmungsradius vor bzw. nach der Beschichtung

# Elektronische Eigenschaften

**Die Eigenschaften des elektronischen Systems eines Materiales haben Einfluss auf:**

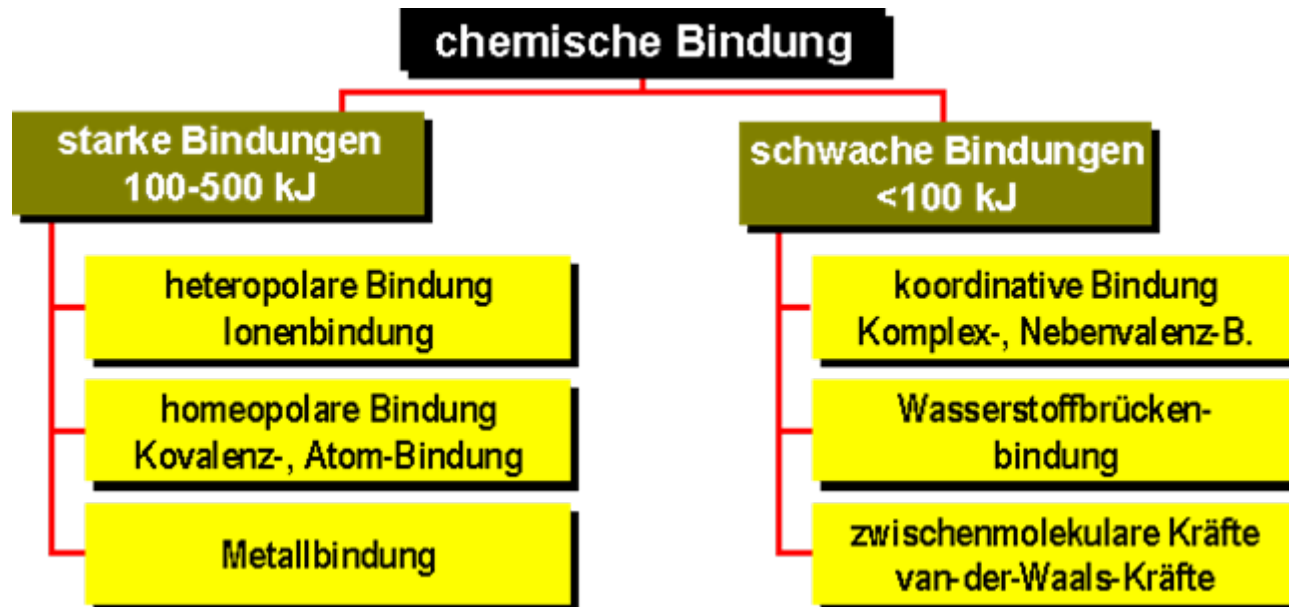
- + Leitfähigkeit**
- + Optische Eigenschaften**
- + Magnetische Eigenschaften**
- + Adsorption und Adhäsion**

**Diese Eigenschaften werden bei Dünnschichtsystemen auch noch durch das hohe Verhältnis von Oberfläche zu Volumen modifiziert.**



# Bindungstypen I

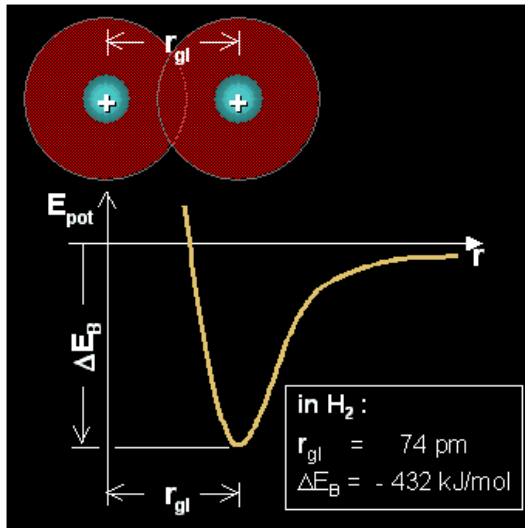
Das elektronische System eines Materials ist eine direkte Konsequenz der chemischen Bindungstypen:



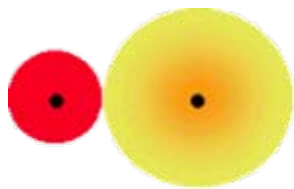
**Achtung: 100kJ bedeutet:  $100\text{kJ/Mol} \equiv 1\text{eV}$ !**

# Bindungstypen II

## Kovalente (Atom-) Bindung:



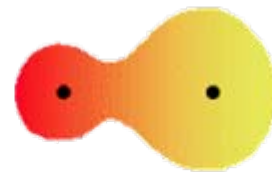
## Übergang ionisch $\rightarrow$ kovalent:



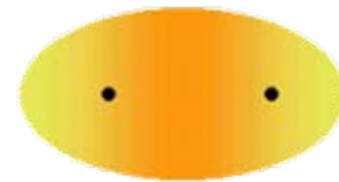
reine Ionenbindung



polarisiertes Anion



polare Atombindung



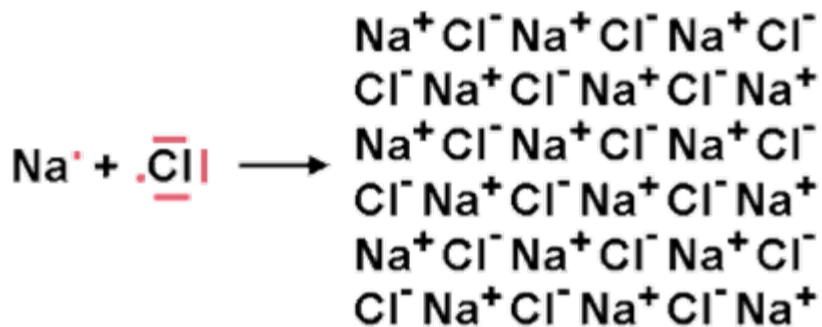
reine Atombindung

# Bindungstypen III

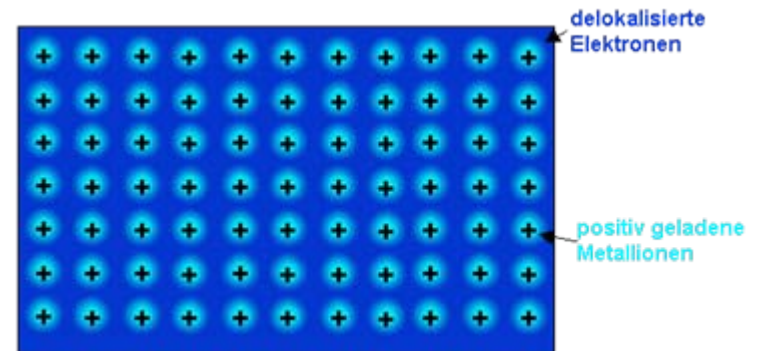
Für Festkörper relevant sind:

- + Ionische (heteropolare) Bindung
- + Kovalente Bindung
- + Metallische Bindung

**Ionisch: Elektronen stark lokalisiert**



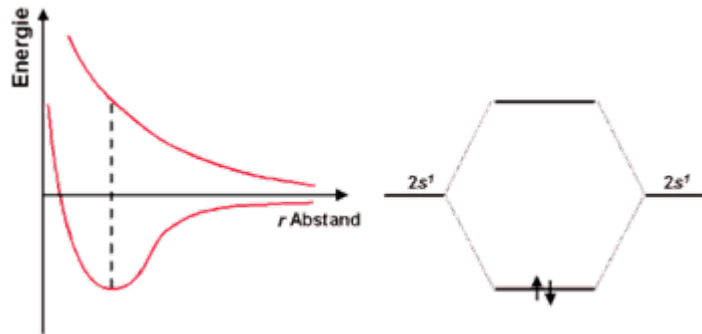
**Metallisch: Elektronen delokalisiert**



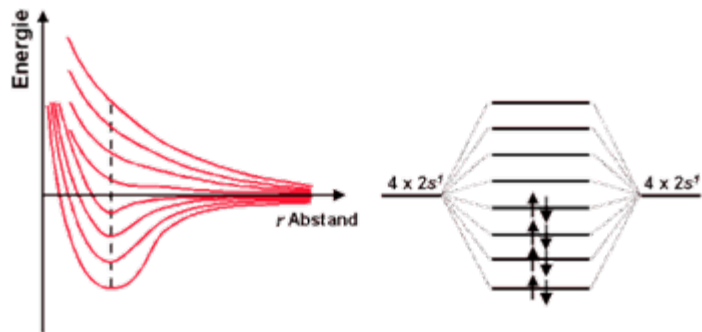
***Bindungen in Festkörpersystemen sind wesentlich von deren Vielteilchencharakter geprägt!***

# Metalle

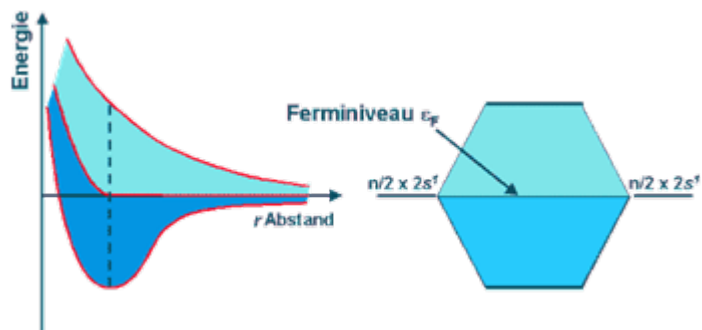
Übergang Einteilchensystem  $\rightarrow$  Vielteilchensystem:



***Einzelatom***



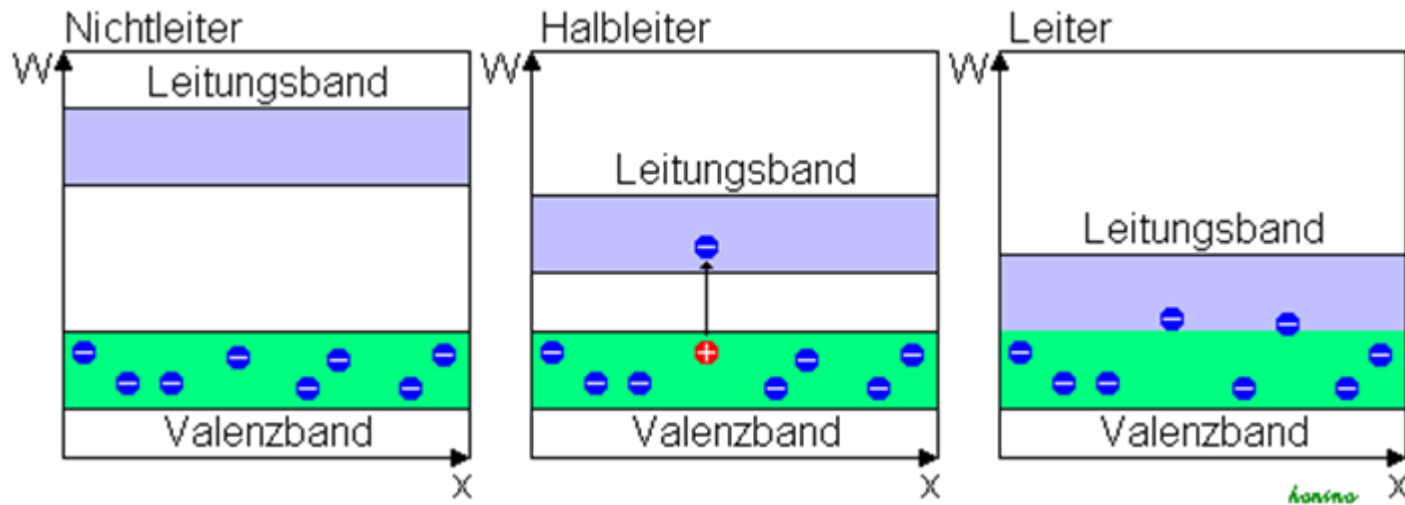
***Mehrteilchensystem***



***Festkörper***

# Halbleiter

Halbleiter bilden die Übergangsstufe von kovalenter zu metallischer Bindung. Sie sind mittels des Bändermodelles beschreibbar:



# Elektronische Bauteile und dünne Schichten

Mittels Dünnschichttechnologie können folgende elektronische Bauteile realisiert werden:

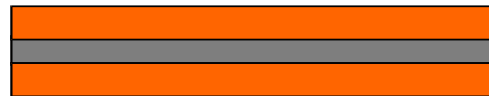
**+ Leiterbahnen**



**+ Dünnschichtwiderstände**



**+ Kondensatoren**



**+ Dioden**



**+ Transistoren**



**+ MOSFETS**



# Elektrische Leitfähigkeit von Metallen

## Makroskopische Beschreibung: Ohm'sches-Gesetz

$$I = \frac{U}{R}$$

$I$  = Strom

$U$  = Spannung

$R$  = Widerstand

## Mikroskopische Beschreibung: Drude-Gesetz

$$\vec{j} = \frac{ne^2\tau}{2m_e} \vec{E} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$j$  = Stromdichte

$E$  = E-Feld

$\sigma$  = Leitfähigkeit

$n$  = Ladungsträgerzahl

$e$  = Elementarladung

$m_e$  = Elektronenmasse

$\tau$  = mittlere Stosszeit

# Theorie der Leitfähigkeit

## Drude-Theorie:

$$\vec{j} = \frac{ne^2\tau}{2m_e} \vec{E} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$j$  = Stromdichte

$E$  = E-Feld

$\sigma$  = Leitfähigkeit

$n$  = Ladungsträgerzahl

$e$  = Elementarladung

$m_e$  = Elektronenmasse

$\tau$  = mittlere Stosszeit

Der zentrale Punkt der Drude-Theorie ist die

## Mittlere Stosszeit $\tau$



# Die mittlere Stosszeit

Die mittlere Stosszeit  $\tau$  errechnet sich aus der "Matthiessen-Regel":

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_G} + \frac{1}{\tau_K} + \frac{1}{\tau_V} + \dots$$

$\tau_G$  = Streuung an Gitteratomen

$\tau_K$  = Streuung an Korngrenzen

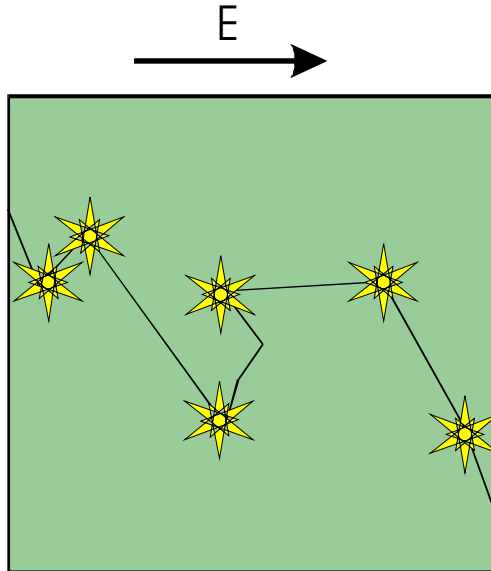
$\tau_V$  = Streuung an Verunreinigungen

Wesentlich für die Grösse der Leitfähigkeit ist also die Art und die Anzahl der Defekte, an denen Elektronen gestreut werden.

*Auch Grenzflächen jeder Art stellen Defekte dar. Damit ergibt sich automatisch die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Schichtdicke!*

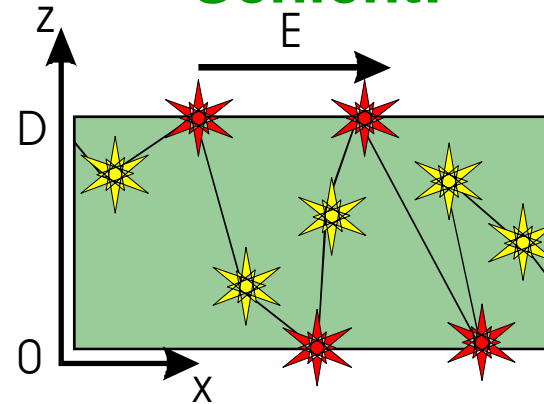
# Leitfähigkeit dünner Schichten

**Bulk:**



$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_G} + \frac{1}{\tau_K} + \frac{1}{\tau_V}$$

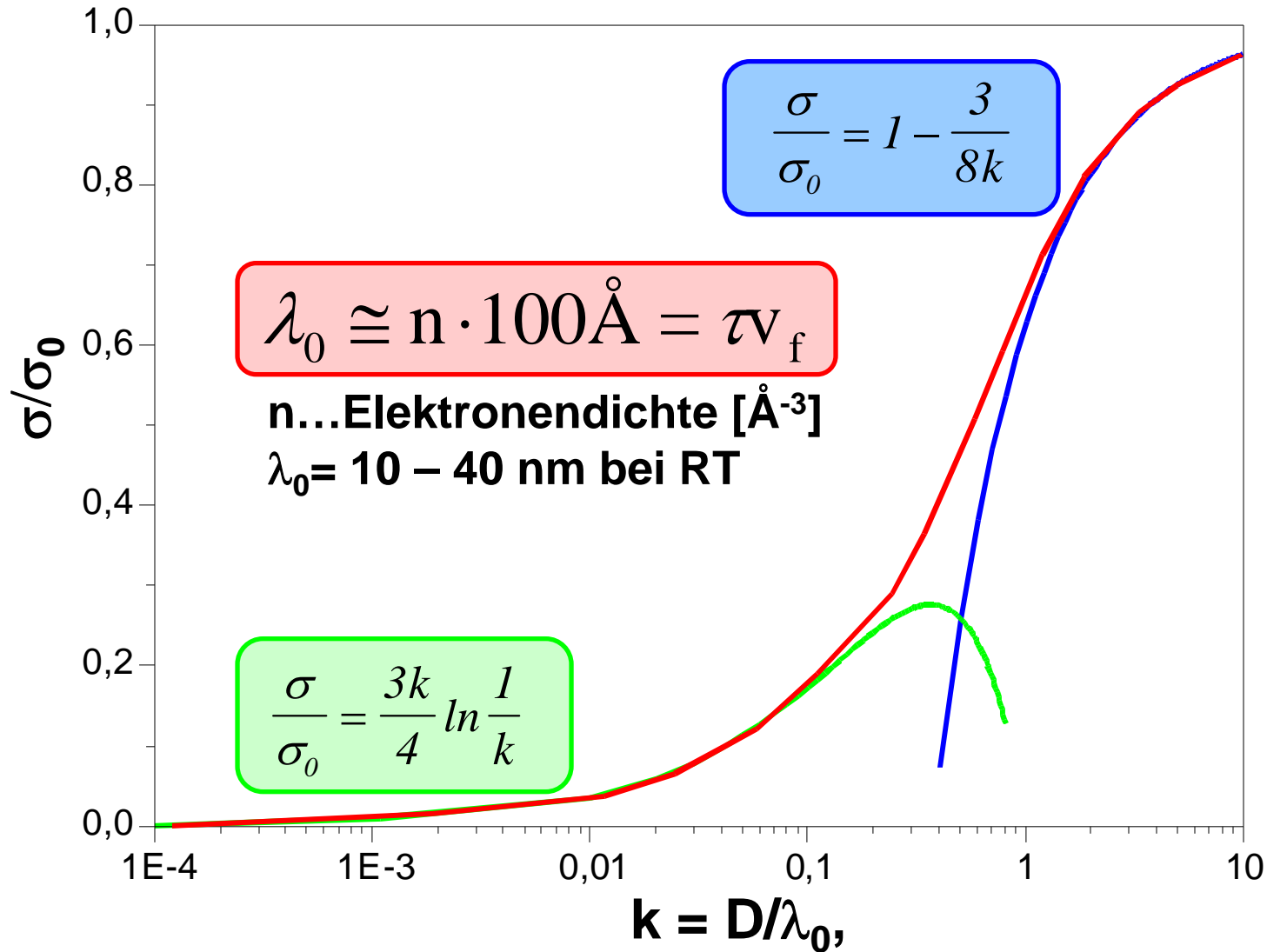
**Schicht:**



$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_G} + \frac{1}{\tau_K} + \frac{1}{\tau_V} + \frac{1}{\tau_I}$$

**Die Grenzflächen bei  $z=0$  und  $z=D$  stellen zusätzliche Elektronenstreuungszentren dar!**

# Leitfähigkeitsnäherungen

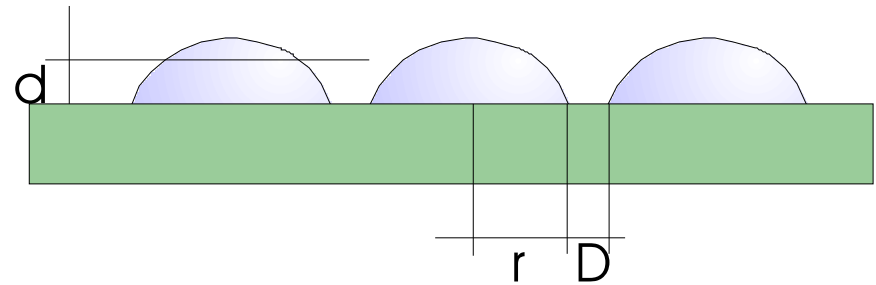


# Reale Dünnschichtsysteme

**Ideal:**



**Real:**



**Experiment:**

$$\sigma_{\text{dis}} \ll \sigma_{\text{kont}}$$

$$\sigma \propto e^{-A/k_B T}$$

$$\sigma = \sigma(E)$$

$$\sigma = \sigma(r, d)$$

**Begründung:**

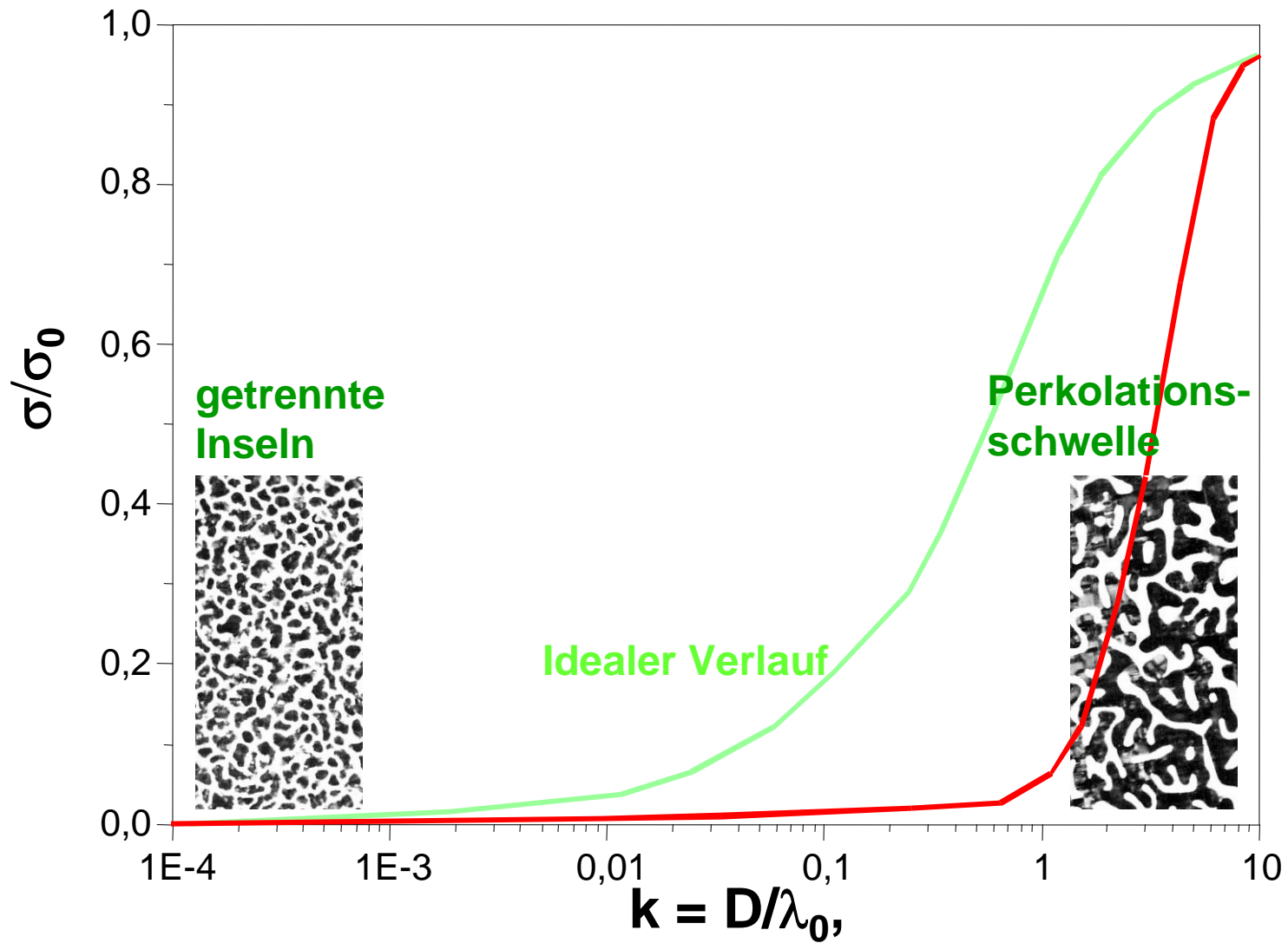
**Diskontinuität**

**Thermische Emission**

**Feldemission**

**Tunneleffekt**

# Leitfähigkeit und Schichtdicke - Real



# Anwendung: Dünnschichtwiderstände

## Widerstandsbereich:

**100  $\Omega_{\square}$  – 100 M $\Omega_{\square}$**

## Abgedeckt durch:

**+ Schichtdickenvariation**

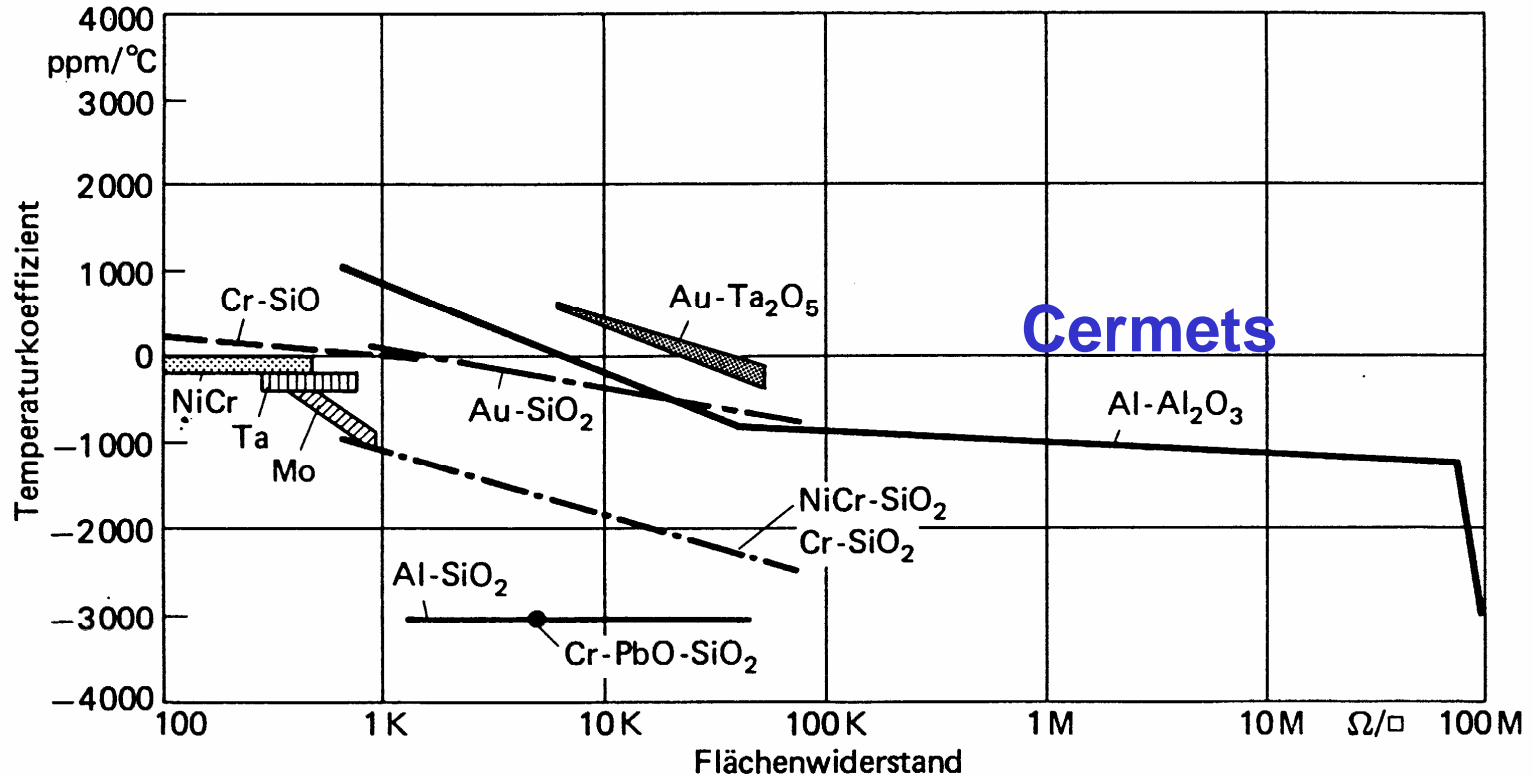
**+ Materialwahl**

## Voraussetzungen:

**+ geringer Temperaturkoeffizient**

**+ geringe Kosten (Schüttgut!)**

# Temperaturkoeffizienten



# Optische Eigenschaften

## Grundlagen:

Die optischen Eigenschaften von Materialien resultieren aus der Reaktion des elektronischen Systems auf elektromagnetische Wechselfelder

## Statisch:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

## Dynamisch:

### Allgemein:

$$\ddot{\vec{u}} + \Gamma \dot{\vec{u}} + \omega_0^2 \vec{u} = \frac{Q}{m} \vec{E}(\vec{u}, t)$$

### Senkrechte, ebene Welle, $z=0$ :

$$\ddot{x} + \Gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = -\frac{e}{m} E_0 \exp(i\omega t)$$



# Optik – frequenzunabhängige Brechung

Allgemein gilt in der Optik folgender Erhaltungssatz:

$$T + R + A + S = 1$$

T ... Transmission

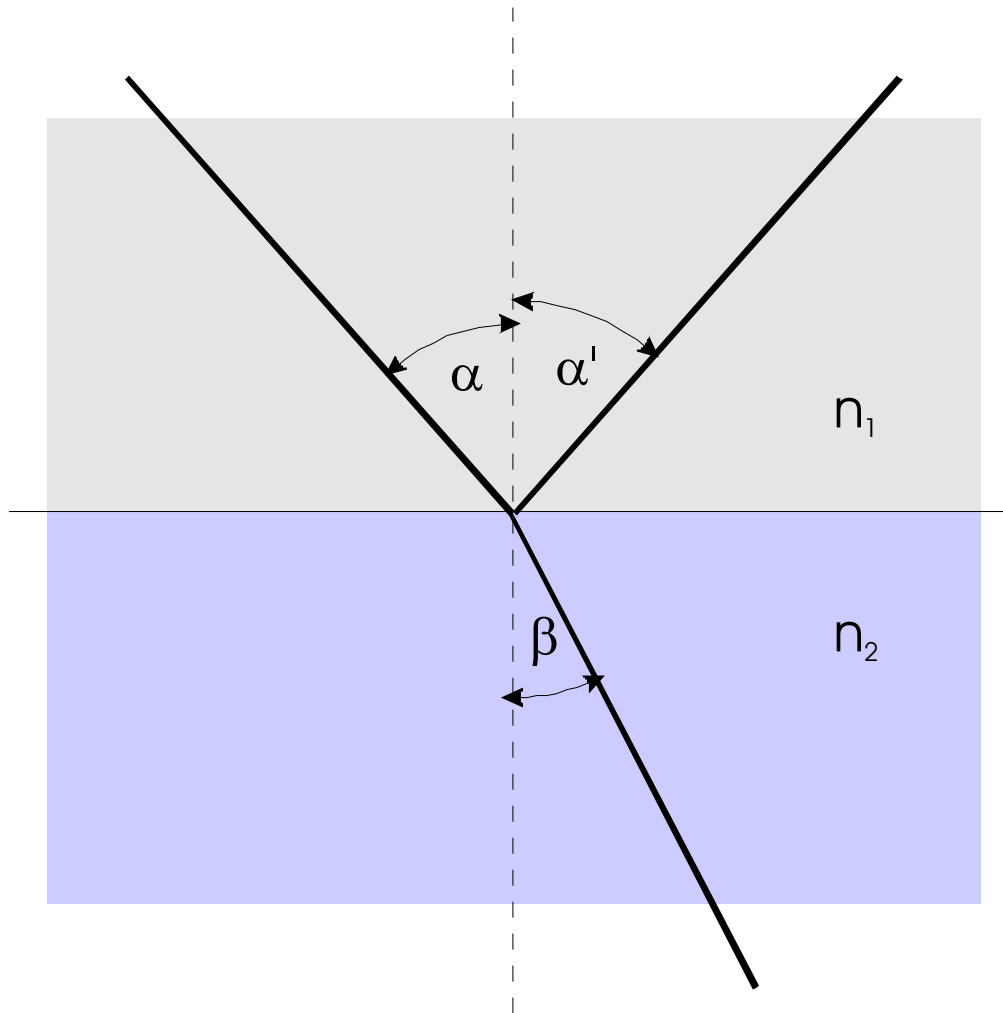
R ... Reflexion

A ... Absorption

S ... Streuung

In der geometrische Optik geht man weiters davon aus, daß der Brechungsindex  $n$  frequenzunabhängig ist.

# Optik – Grenzflächen



**Reflexion:**

$$\alpha = \alpha'$$

**Brechung:**

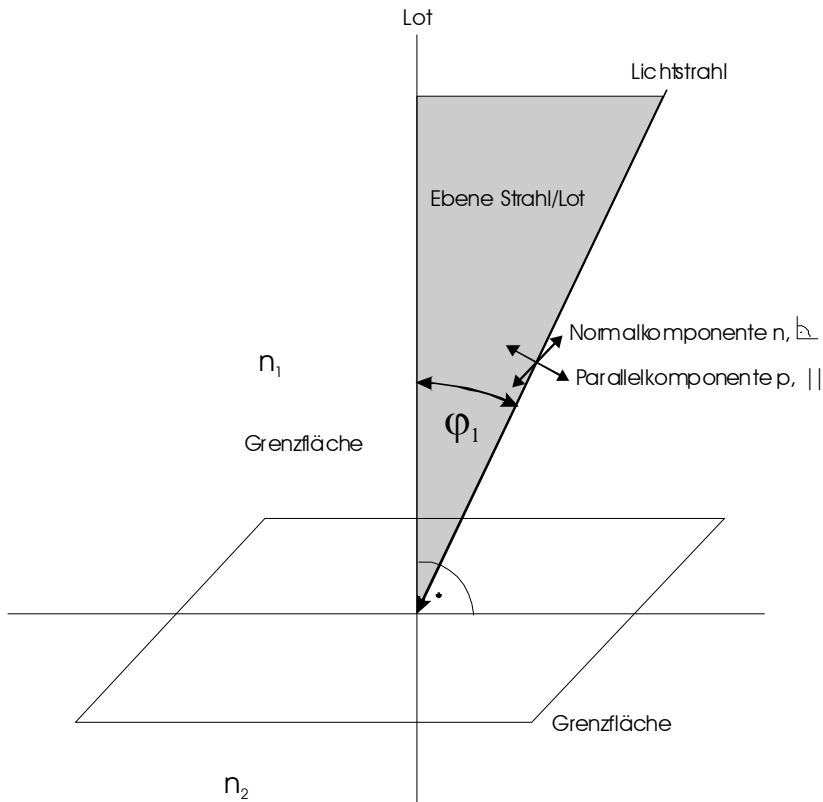
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

**Wellenlänge:**

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{\text{vak}}}{n_i}$$

# Fresnel'sche Formeln

Allgemeinste Beschreibung  
des Durchtrittes eines  
Lichtstrahles (ebene EM Welle)  
durch eine Grenzfläche



Reflexion:

$$r_k^p = \frac{n_{k-1} \cos \varphi_k - n_k \cos \varphi_{k-1}}{n_{k-1} \cos \varphi_k + n_k \cos \varphi_{k-1}}$$

$$r_k^n = \frac{n_{k-1} \cos \varphi_{k-1} - n_k \cos \varphi_k}{n_{k-1} \cos \varphi_{k-1} + n_k \cos \varphi_k}$$

Transmission:

$$t_k^p = \frac{2n_k \cos \varphi_k}{n_{k-1} \cos \varphi_k + n_k \cos \varphi_{k-1}}$$

$$t_k^n = \frac{2n_k \cos \varphi_k}{n_k \cos \varphi_k + n_{k-1} \cos \varphi_{k-1}}$$

# Fresnel'sche Formeln: Vereinfachung

**2 Medien, Brechungsindizes  $n_1, n_2$ ,  
senkrechter Einfall, d. h.:  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ$**

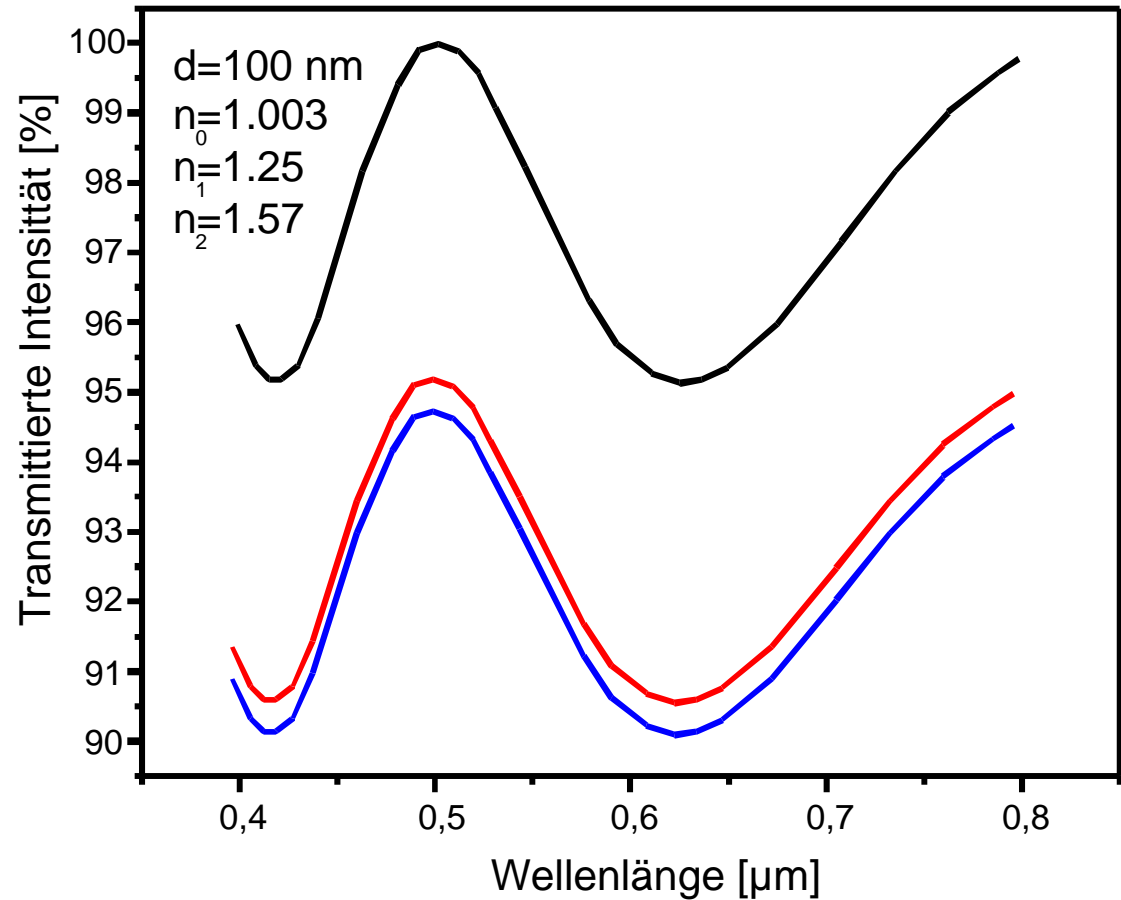
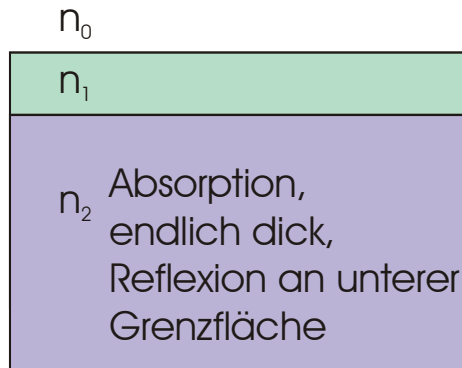
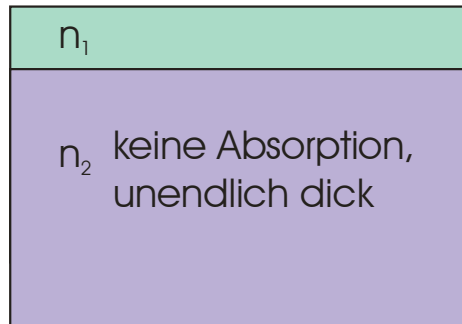
**Reflexion:**

$$r_k^p = r_k^n = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

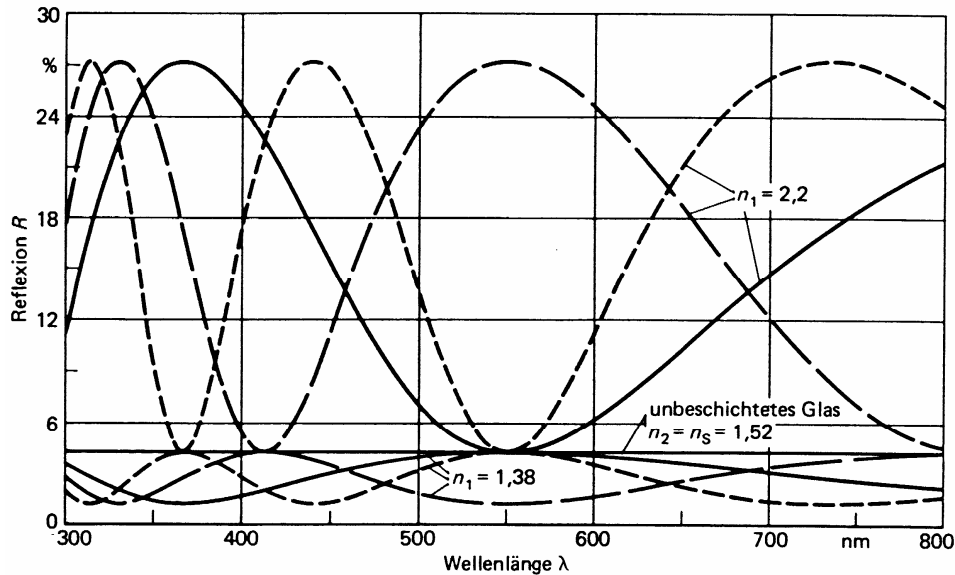
**Transmission:**

$$t_k^p = t_k^n = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

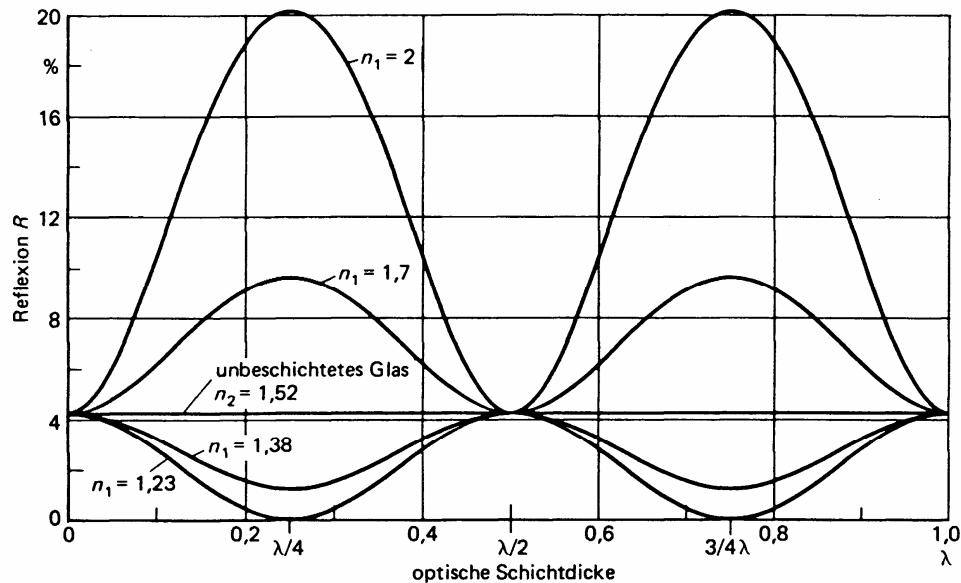
# Ideales und reales Einschichtsystem



# Einschichtsysteme - generell



Reflexion/Wellenlänge



Reflexion/Schichtdicke

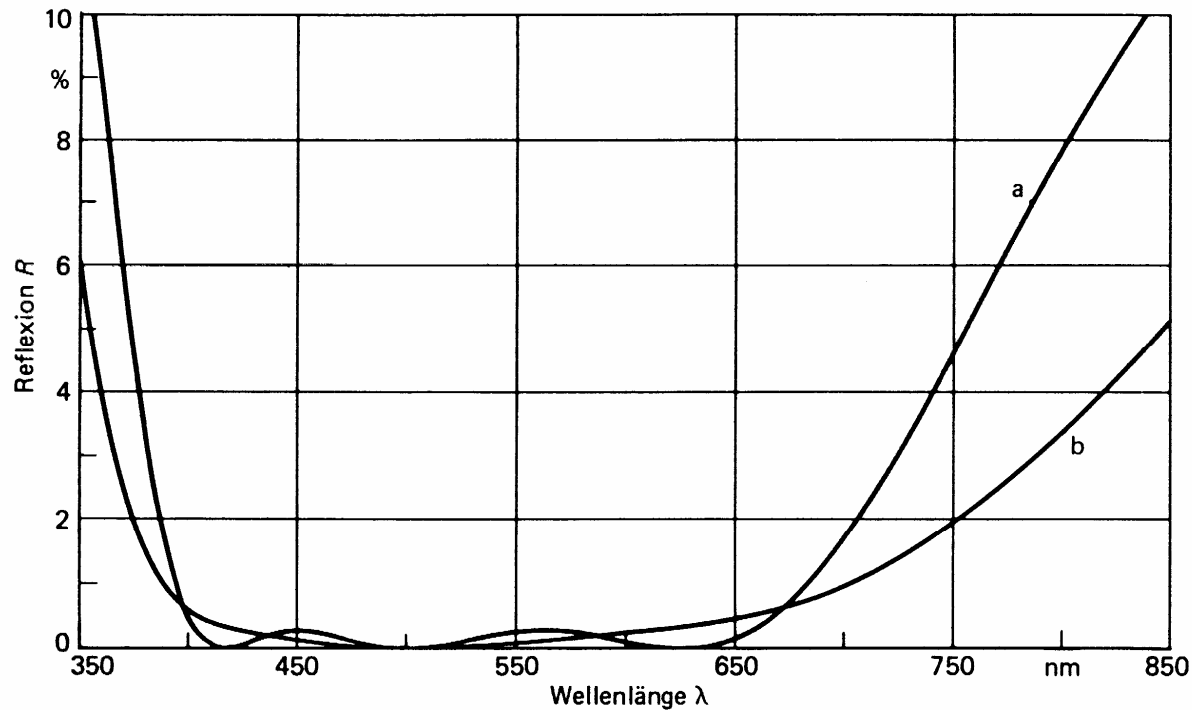
# Mehrschichtsysteme - Reflexionsminderung

**Einfachschichten erlauben keine Reflexionsminderung in einem breiten Wellenlängenbereich.**

**→ Anwendung von Mehrschichtsystemen**

**Mit Hilfe von Mehrschichtsystemen lassen sich auch auf Substraten geringer Brechzahl (1,5-1,7) in weiten Wellenlängenbereichen reflexionsmindernde Beschichtungen realisieren.**

# Mehrschichtsysteme - Beispiel



a)  $\lambda/4 - \lambda/2 - 3\lambda/4$

$n_0 = 1$

b)  $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$

$n_1 = 1.38$

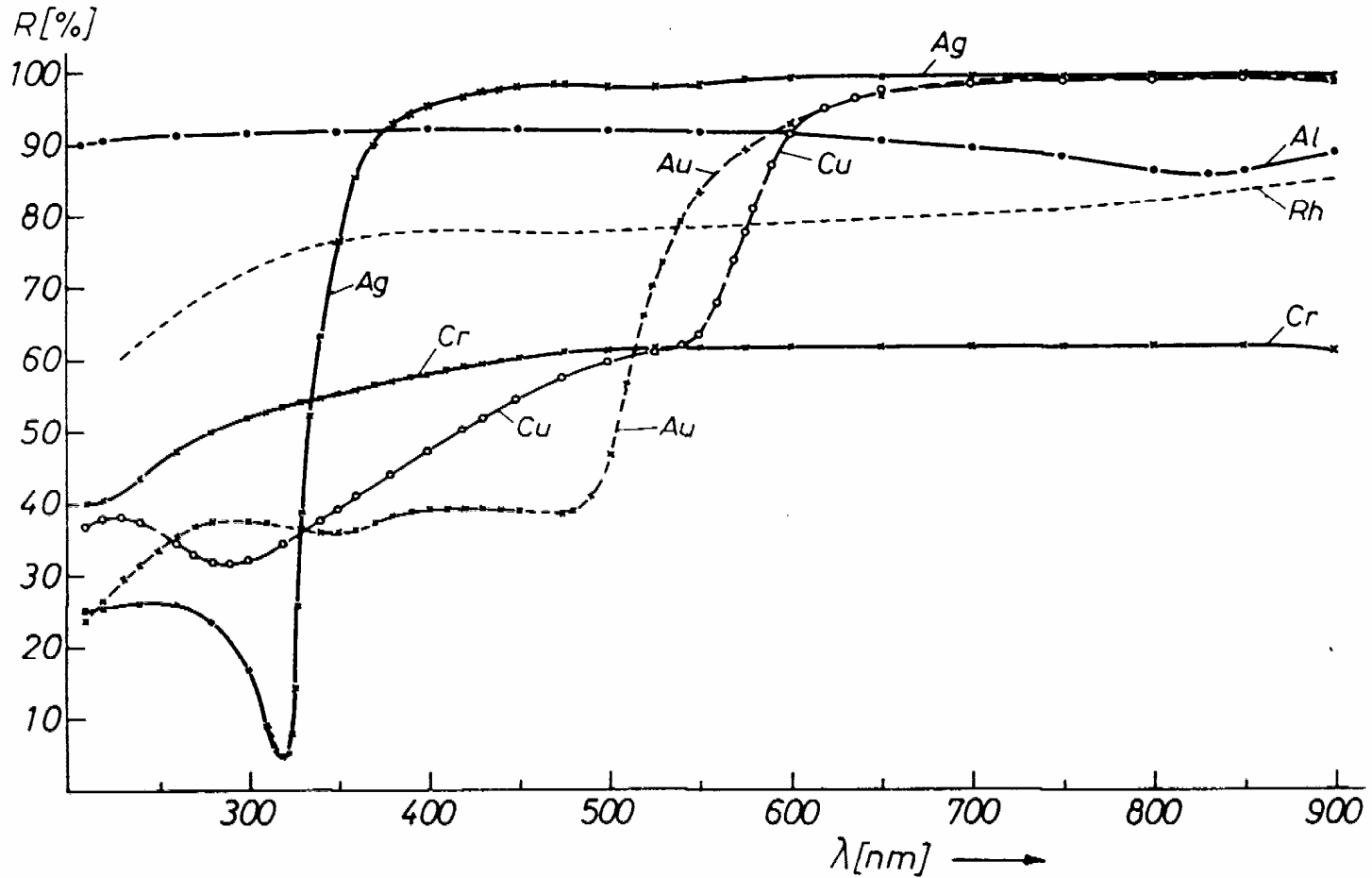
$n_2 = 2.1$

$n_3 = 1.7$

$n_4 = 1.52$

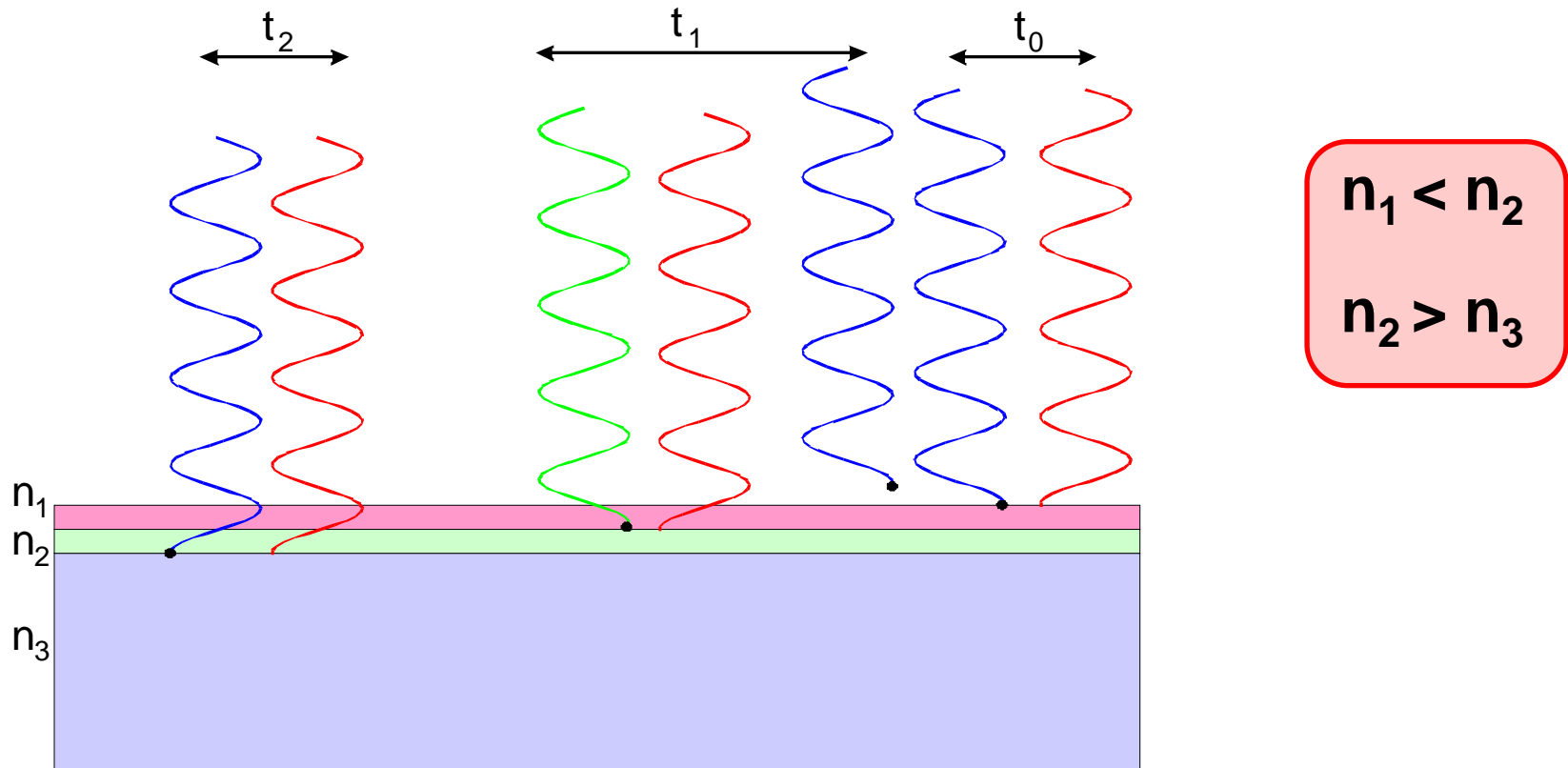


# Reflexionserhöhung: Metallschichten



# Reflexionserhöhung: dielektrische Spiegel I

System aus hochbrechender und niedrigbrechender  $\lambda/4$ -Schicht:



# Reflexionserhöhung: dielektrische Spiegel II

Als dielektrischer Spiegel wird eine Mehrschicht (Multilayer) aus hochbrechenden (H) und niedrigbrechenden (L)  $\lambda/4$ -Schichten bezeichnet.

Anzahl der Schichten	Reflexion in %	
	$n_L = 1,38$ $n_H = 2,3$ $n_s = 1,51$	$n_L = 1,47$ $n_H = 2,3$ $n_s = 1,51$
3	53,89	53,23
5	85,20	80,84
7	94,67	92,15
9	98,08	96,79
11	99,31	98,68
13	99,75	99,46
15	99,91	99,78
17	99,97	99,91
19	99,99	99,63

# Filtersysteme und optische Elemente

**Aus den bisher besprochenen Dünnschichtsystemen lassen sich nahezu beliebige Filtersysteme herstellen.**

**Als Bauelemente dienen dabei:**

- + Reflexionsmindernde Schichten**
- + Interferenzschichten**
- + Metallspiegel**
- + Dielektrische Spiegel**
- + Nanocluster (Farbzentren und Pigmente)**

**Damit lässt sich eine umfassende Anzahl optischer Systeme realisieren.**

# Charakterisierung optischer Schichten

Generell erlauben **Reflexion** und **Transmission** dünner optischer Schichten sowie die **Streuung** elektromagnetischer Strahlung an Oberflächen auch den Umkehrschluss auf **Brechungsindizes**, **Schichtdicken** und **Rauhigkeiten**.

Diese Größen können oft auch zerstörungsfrei und in situ bestimmt werden, was die **reproduzierbare** Herstellung hochqualitativer optischer Schichtsysteme erlaubt.

# Mechanisch/abrasive Charakterisierung

- + **Feuchtwechselklima:** 12 Stunden bei 40°C , 100% Luftfeuchtigkeit, dann 12 Stunden Abkühlung ergibt einen Zyklus. Die Anzahl der Zyklen wird variiert.
- + **Sprühnebelprüfung:** Bei 50°C Aufsprühen einer wässrigen Lösung mit 5% NaCl.
- + **Sandrieselverfahren:** 3kg Sand der Kornklasse 0,4 bis 0,8mm aus 1650mm Höhe rieseln durch ein Fallrohr auf die Probe, die sich auf einem Drehteller befindet, der 45° geneigt ist.
- + **Kochen in Salzwasser und deionisiertem Wasser:** Der Prüfling verbleibt 5 bis 60 min in der Salzlösung.