

Wiederholung: Mikrohärt

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

Prüfkörpermaterial:

+ Diamant

Prüfkörpergeometrien:

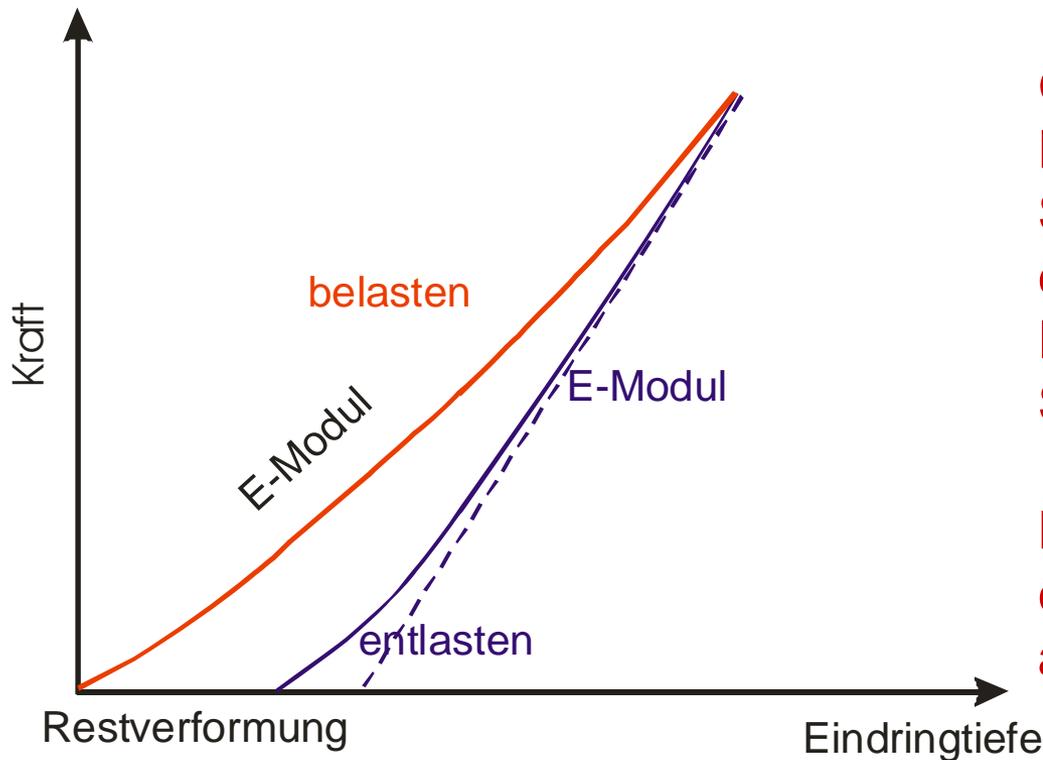
- + Vickers: Pyramide mit Diagonale: Höhe von 1:7
- + Knoop: dreiseitige Pyramide
- + Rockwell: Kugel
- + Langgezogene Schneide

Prüflasten:

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

Wiederholung: Nanoindenter

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



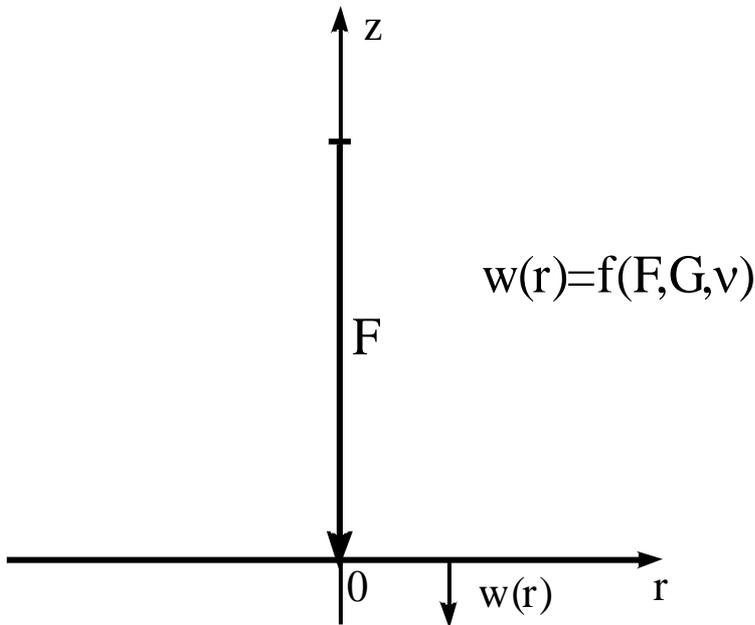
Generell ist bei der Härteprüfung an dünnen Schichten darauf zu achten, dass die Eindringtiefe des Prüfkörpers maximal 1/3 der Schichtdicke beträgt.

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

ν ...Querkontraktionszahl

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

G und ν resultieren aus den elastischen Konstanten des Festkörpers:

$$G = c_{44}$$

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

Wiederholung: Ortsauflösung

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

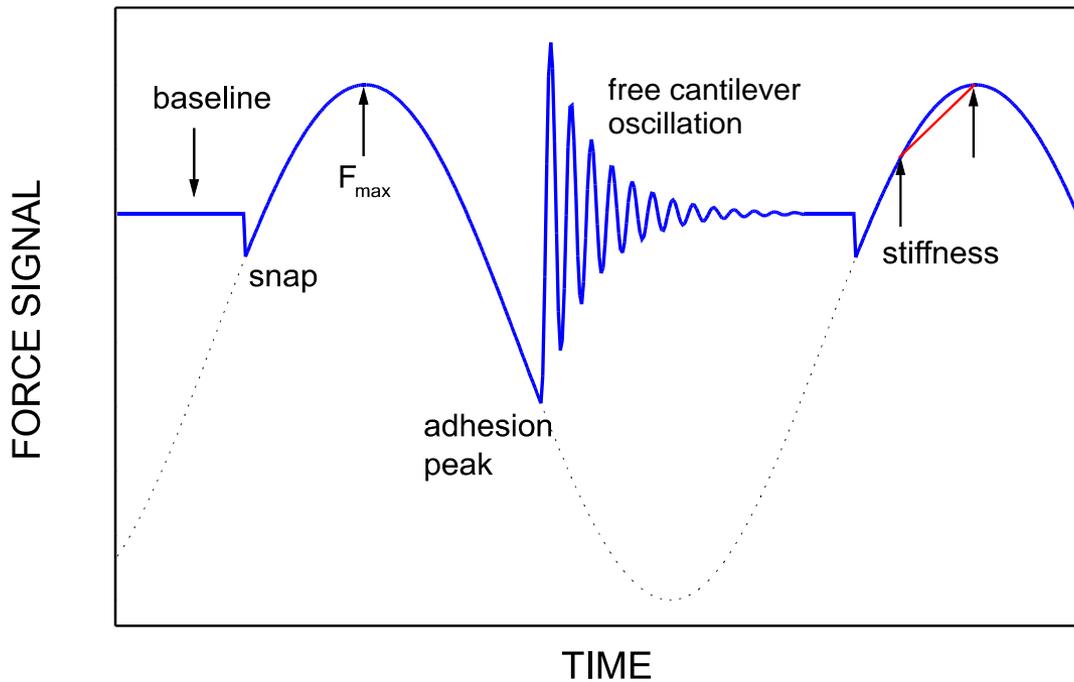
- + *Elastizitätsmodul***
- + *Härte***
- + *Adhäsionskraft***

Dies gelingt mit Hilfe der sogenannten Kraftspektroskopie.

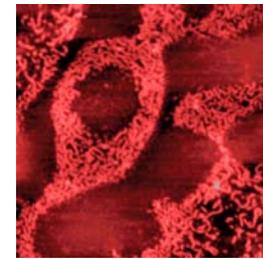
Wiederholung: Kraftspektroskopie

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

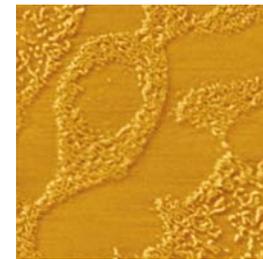
Kraft-Abstandskurve:



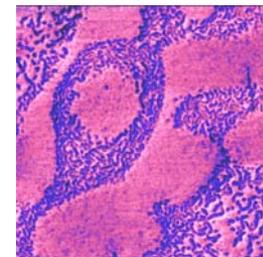
Polymerketten:



Topographie



Adhäsion



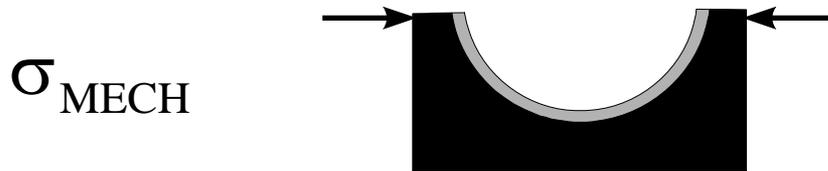
Steifigkeit

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_{S} ... E-Modul Schicht

α_{S} ... Ausdehnungskoeff. Schicht

α_{U} ... Ausdehnungskoeff. Substrat

T_{B} ... Beschichtungstemperatur

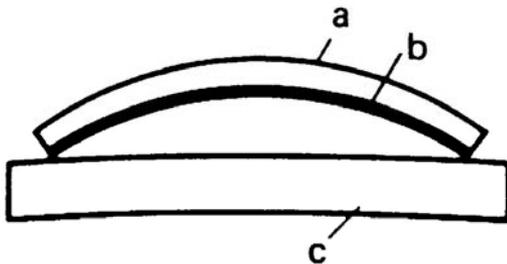
T_{M} ... Messtemperatur

Erzeugt durch verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Schicht

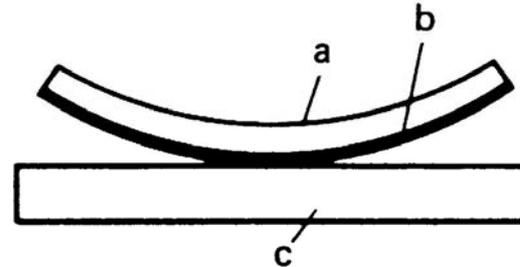
Wiederholung: Spannungsmessung

Gekrümmtes Substrat:

Zugspannung



Druckspannung



Gesamtspannung σ 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

ν_s ... Poisson-Konstante Substrat

d_s ... Dicke des Substrates

d_F ... Schichtdicke

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

Elektronische Eigenschaften

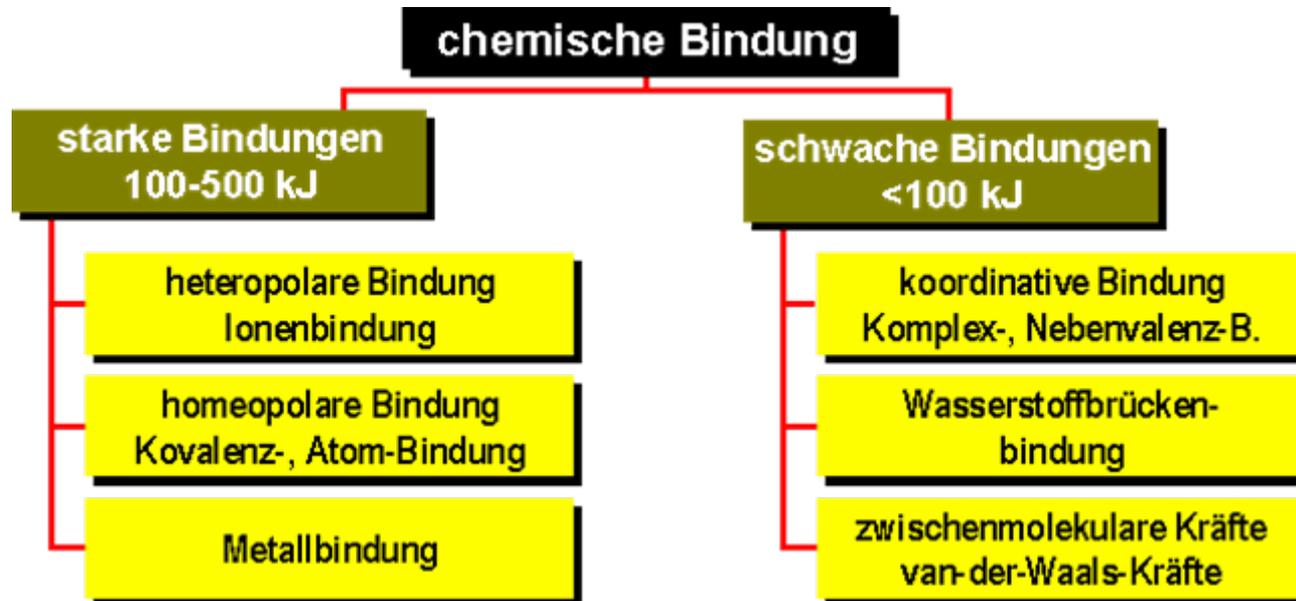
Die Eigenschaften des elektronischen Systems eines Materiales haben Einfluss auf:

- + 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

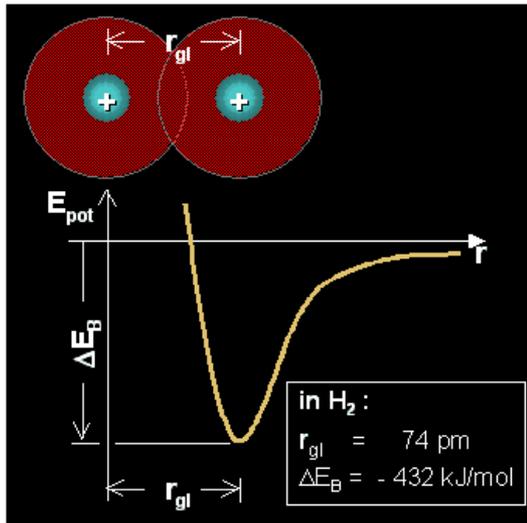
Das elektronische System eines Materials ist eine direkte Konsequenz der chemischen Bindungstypen:



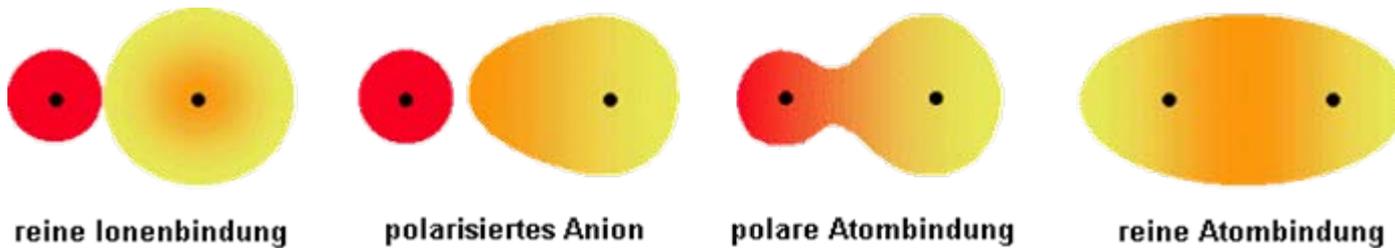
Achtung: 100kJ bedeutet: $100\text{kJ}/\text{Mol} \equiv 1\text{eV}$!

Bindungstypen II

Kovalente (Atom-) Bindung:



Übergang ionisch \rightarrow kovalent:

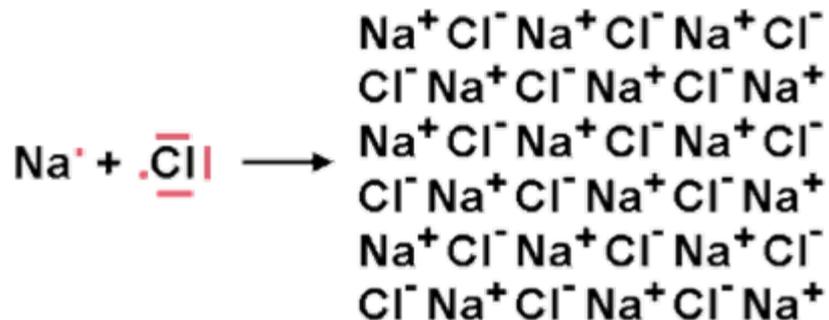


Bindungstypen III

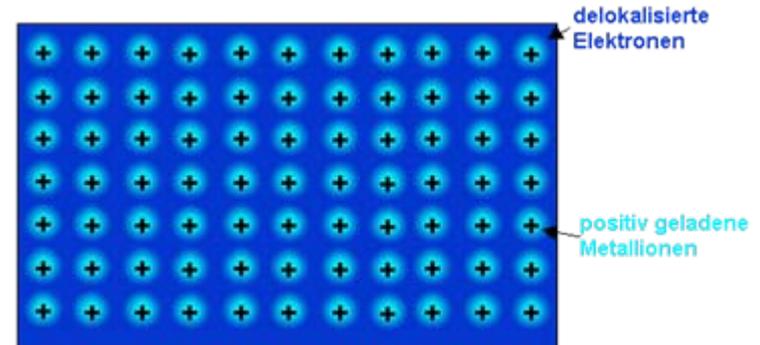
Für Festkörper relevant sind:

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

Ionisch: Elektronen stark lokalisiert



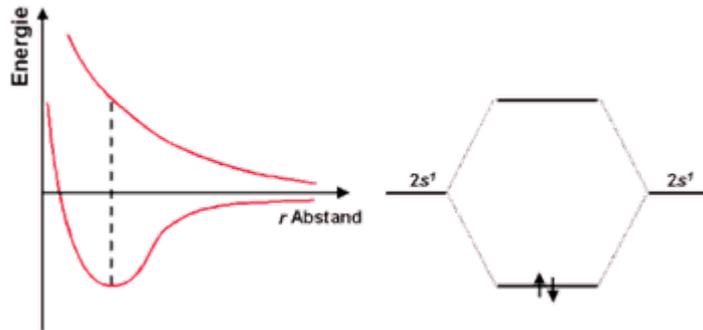
Metallisch: Elektronen delokalisiert



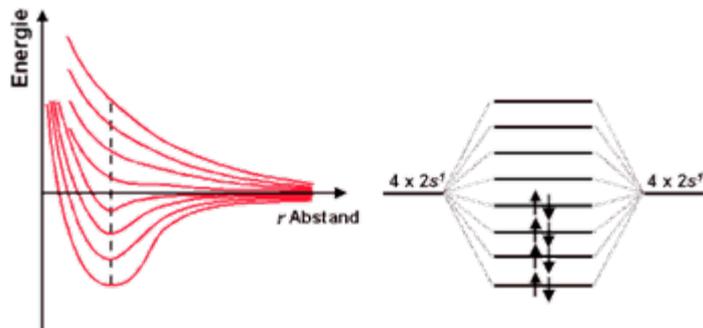
Bindungen in Festkörpersystemen sind wesentlich von deren Vielteilchencharakter geprägt!

Metalle

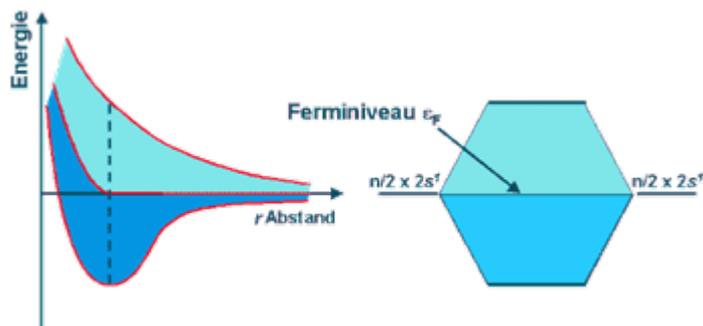
Übergang Einteilchensystem \rightarrow Vielteilchensystem:



Einzelatom



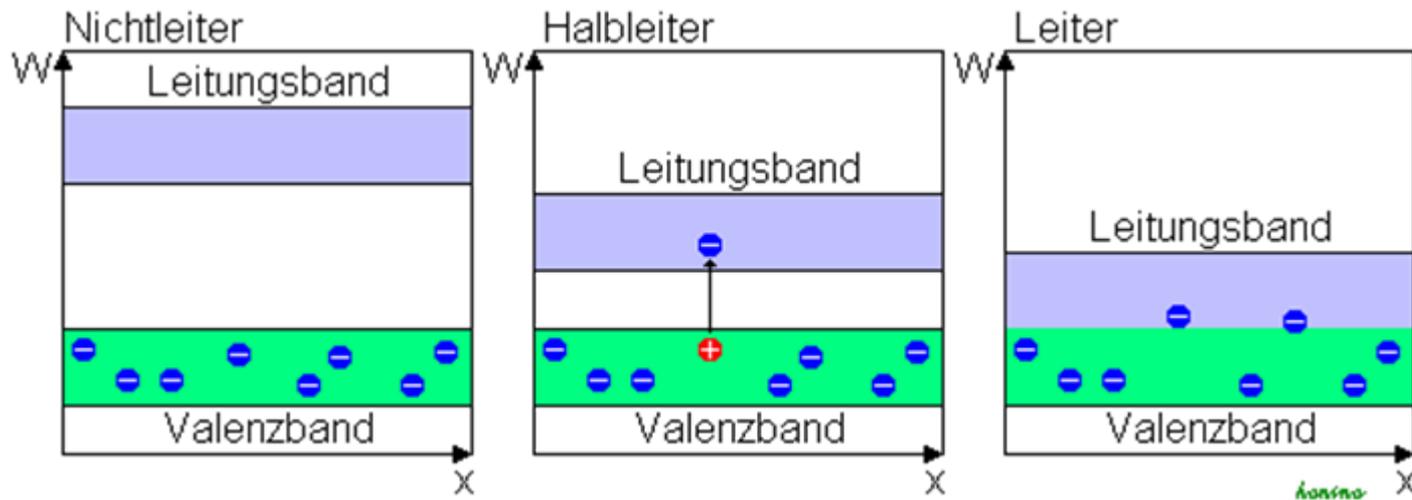
Mehrteilchensystem



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

σ = Leitfähigkeit

n = Ladungsträgerzahl

e = Elementarladung

m_e = Elektronenmasse

τ = 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

σ = Leitfähigkeit

n = Ladungsträgerzahl

e = Elementarladung

m_e = Elektronenmasse

τ = mittlere Stosszeit

Der zentrale Punkt der Drude-Theorie ist die

Mittlere Stosszeit τ

Die mittlere Stosszeit

Die mittlere Stosszeit τ errechnet sich aus der "Matthiessen-Regel":

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

τ_G = Streuung an Gitteratomen

τ_K = Streuung an Korngrenzen

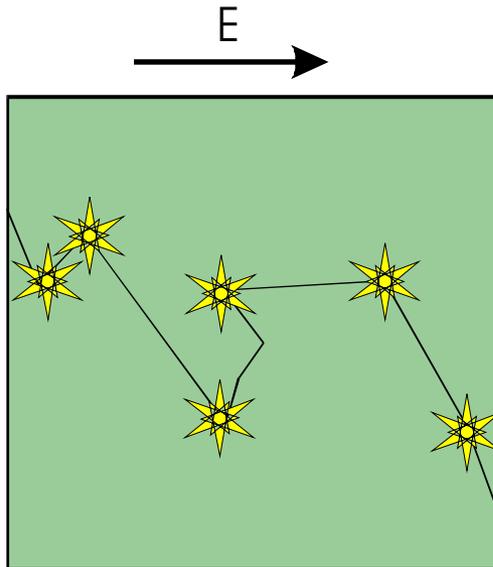
τ_V = Streuung an Verunreinigungen

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!

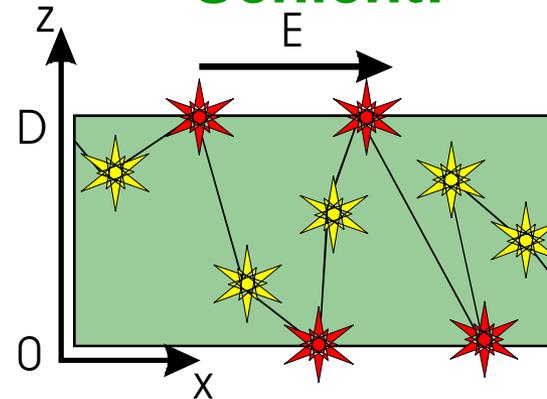
Leitfähigkeit dünner Schichten

Bulk:



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

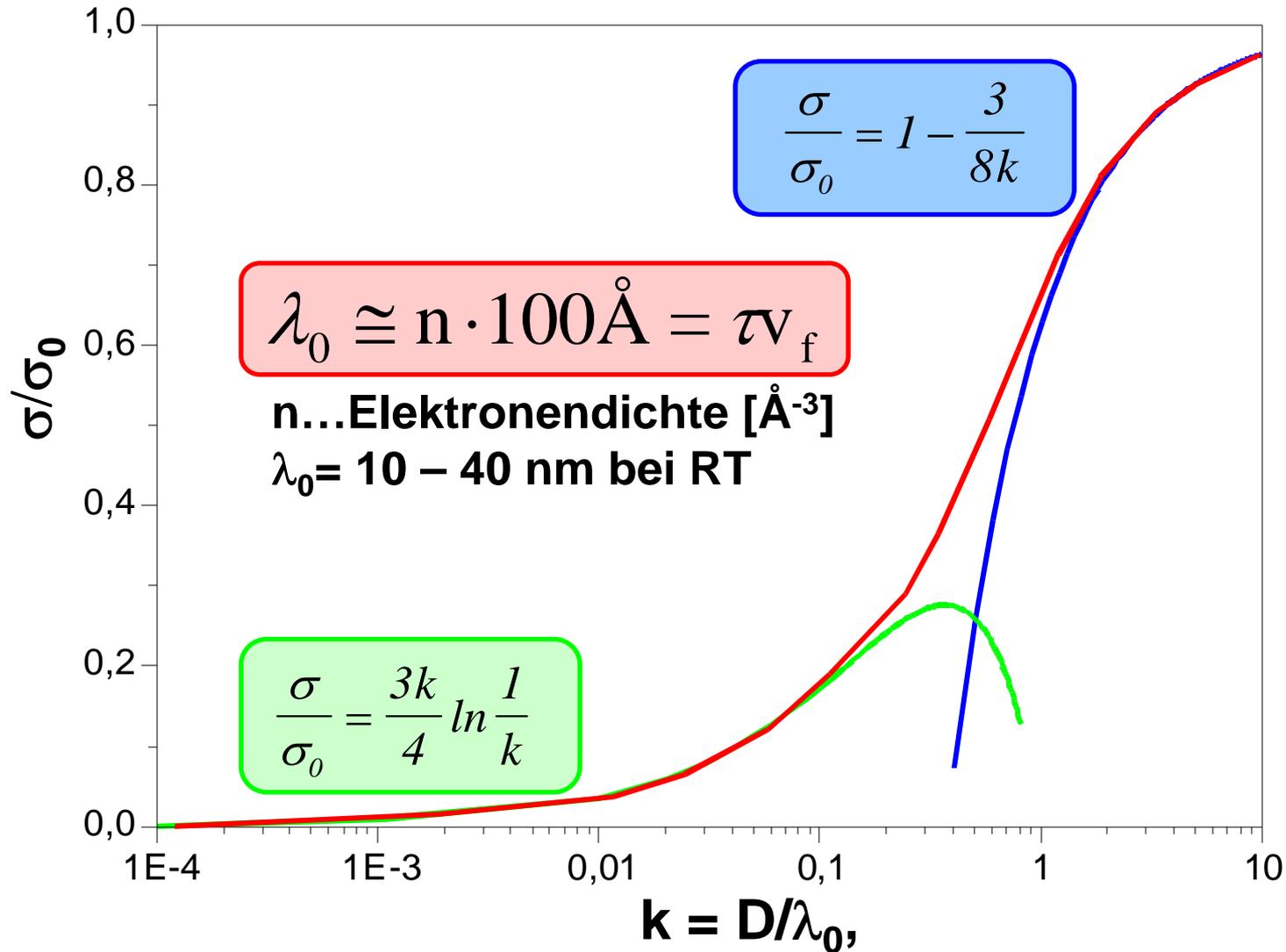
Schicht:



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

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

Leitfähigkeitsnäherungen

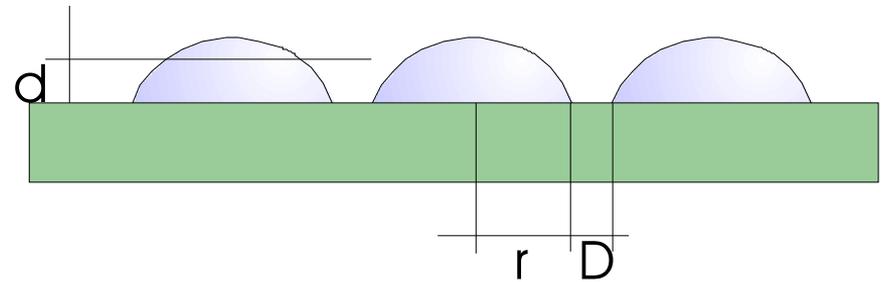


Reale Dünnschichtsysteme

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:

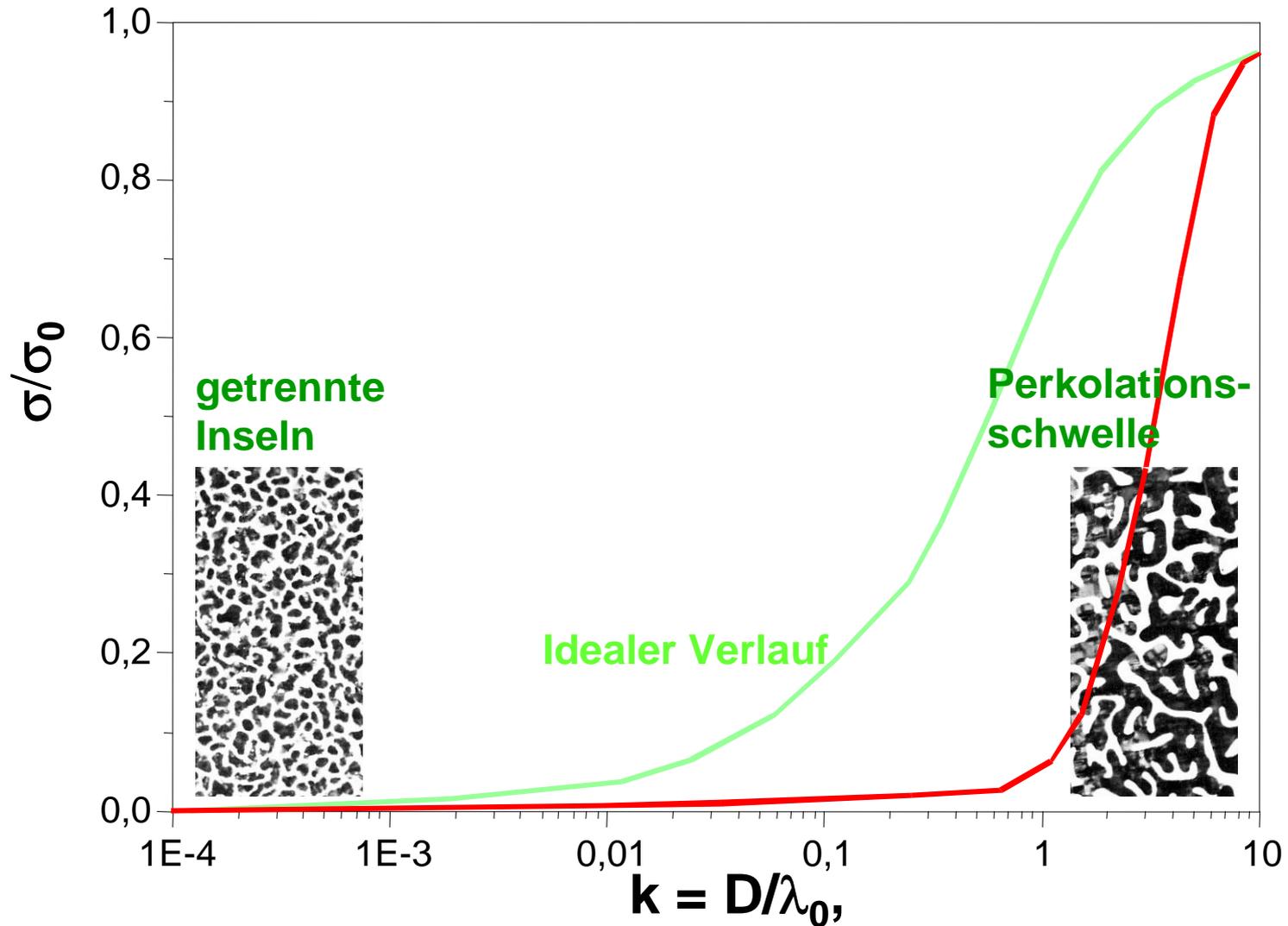
Diskontinuität

Thermische Emission

Feldemission

Tunneleffekt

Leitfähigkeit und Schichtdicke - Real



Anwendung: Dünnschichtwiderstände

Widerstandsbereich:

100 Ω_{\square} – 100 M Ω_{\square}

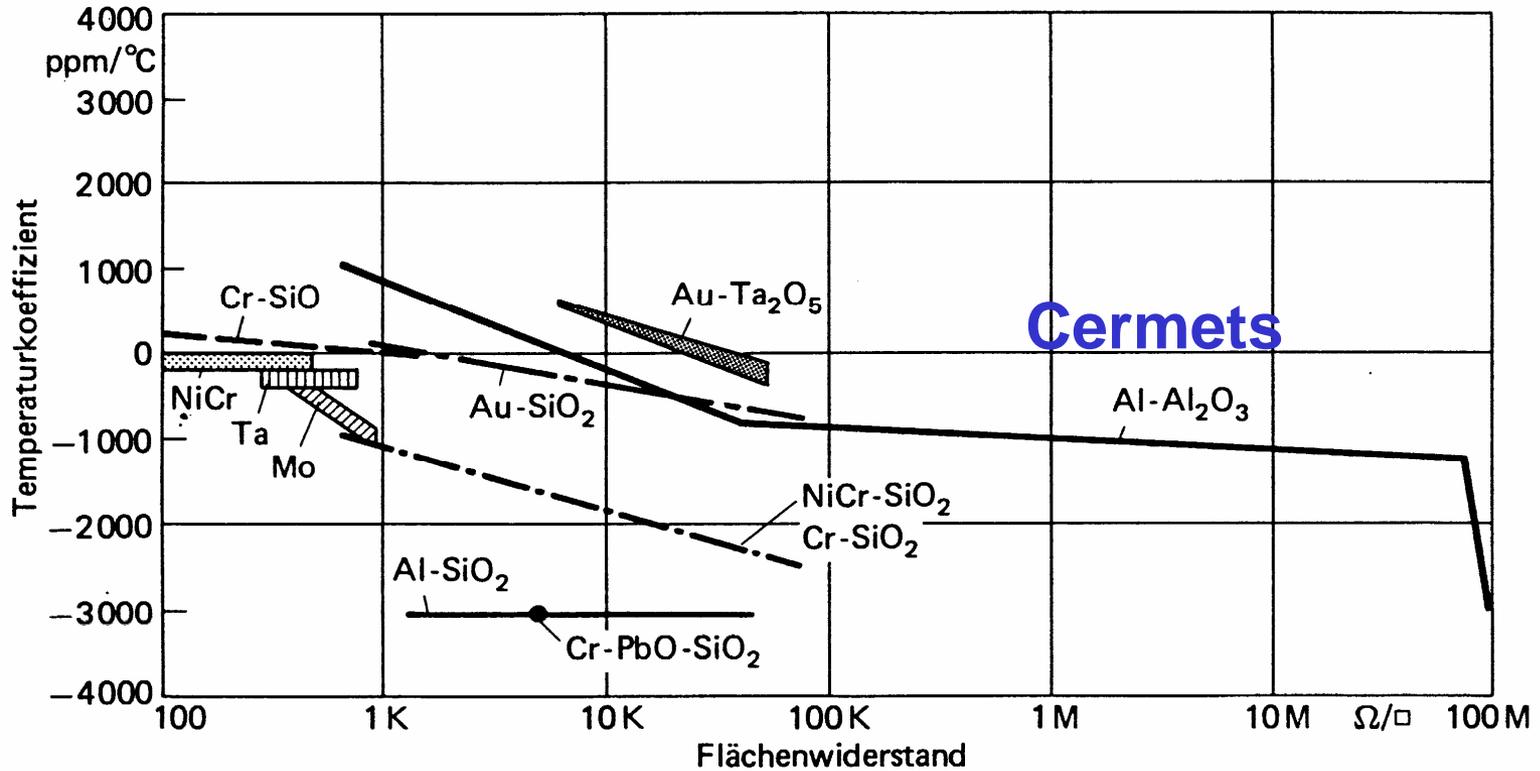
Abgedeckt durch:

- + 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

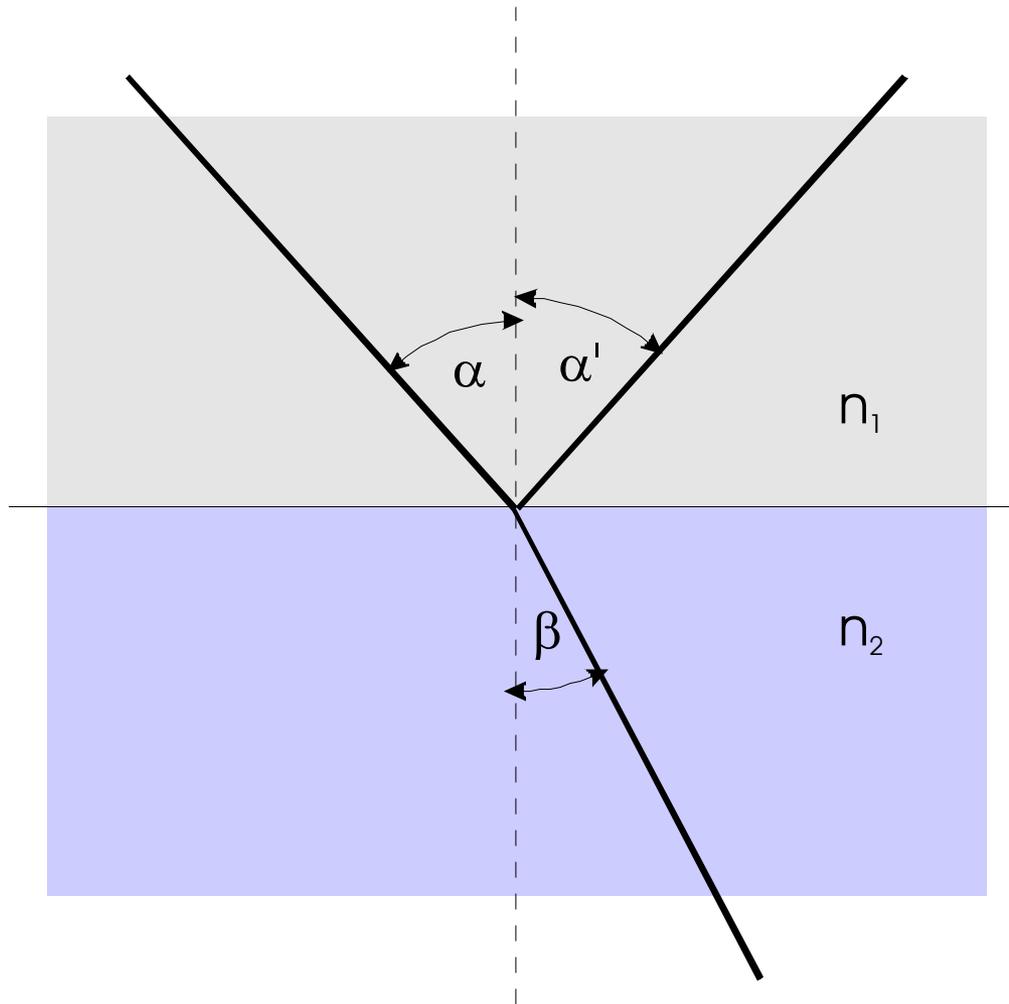
R ... Reflexion

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:

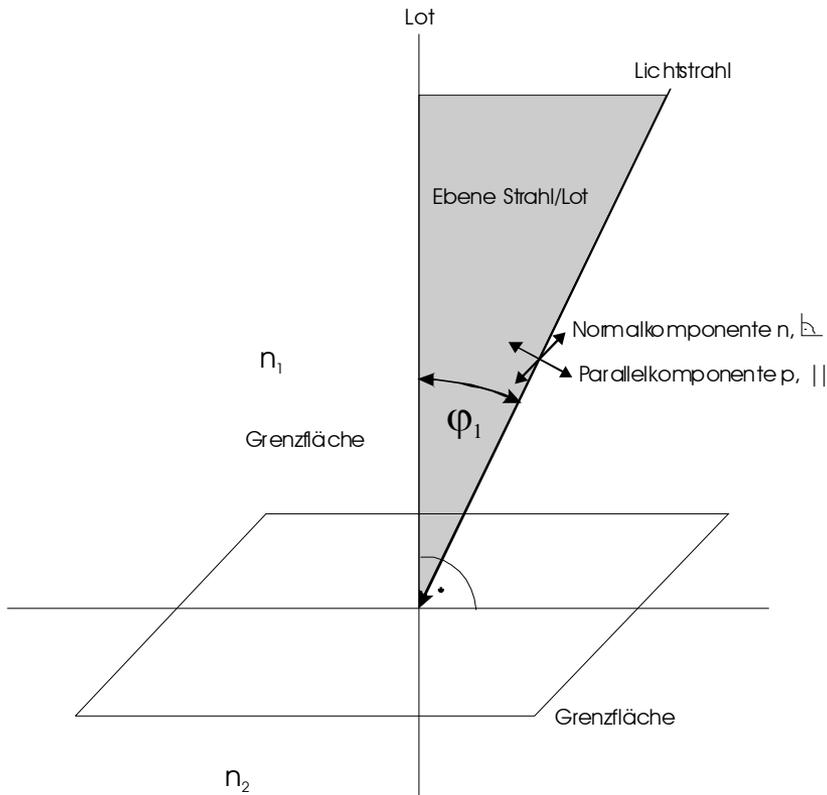
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

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.: $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ$**

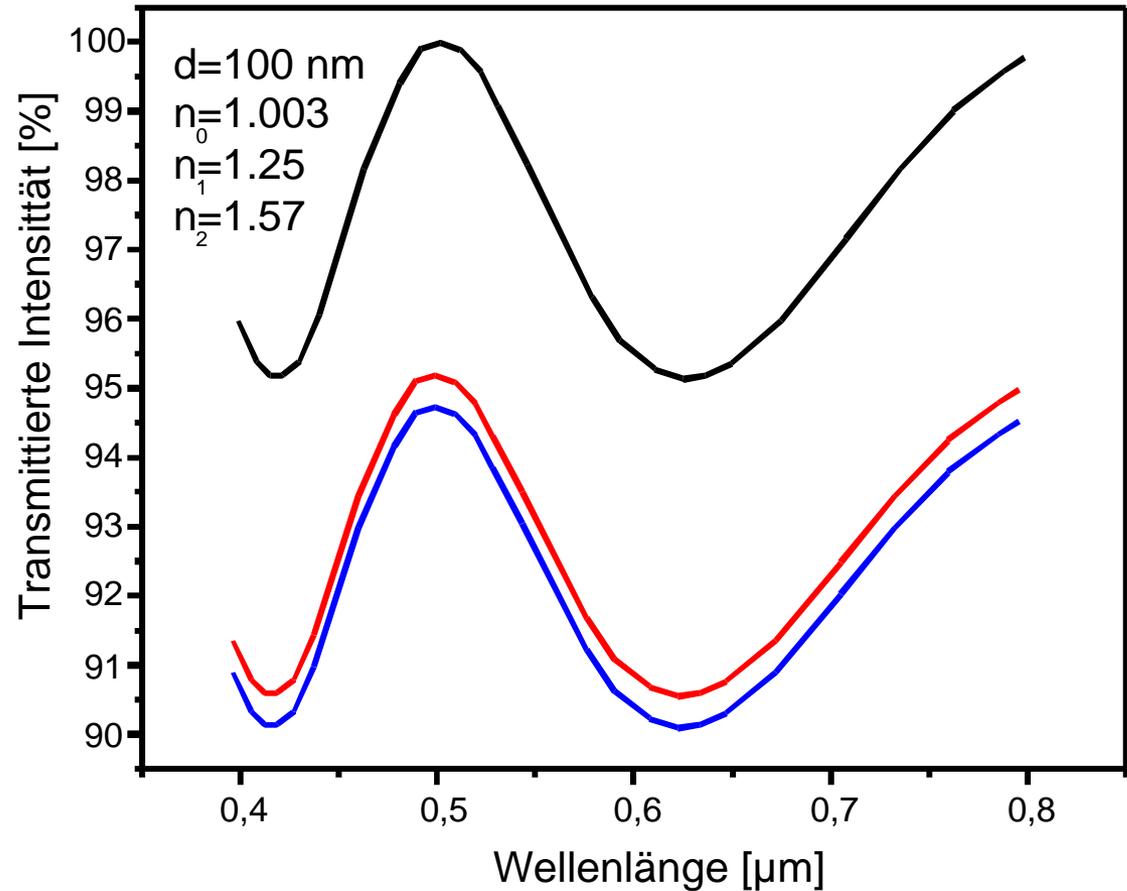
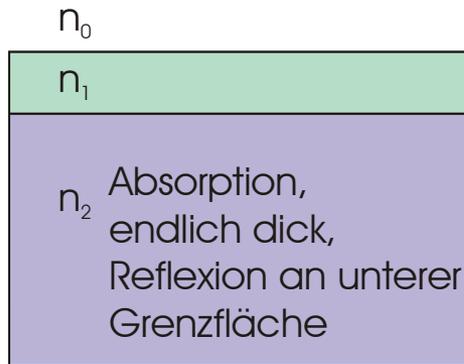
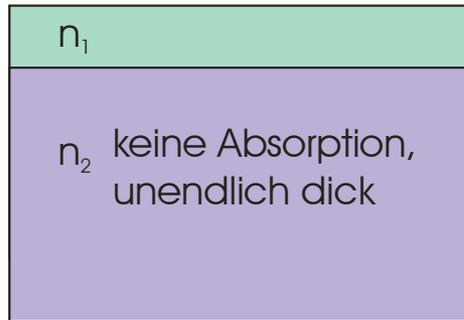
Reflexion:

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

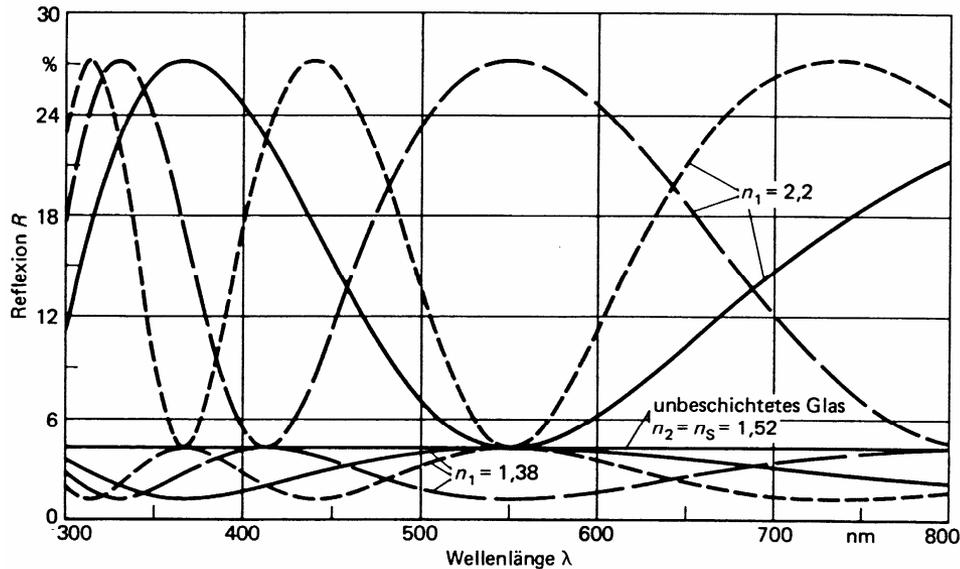
Transmission:

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

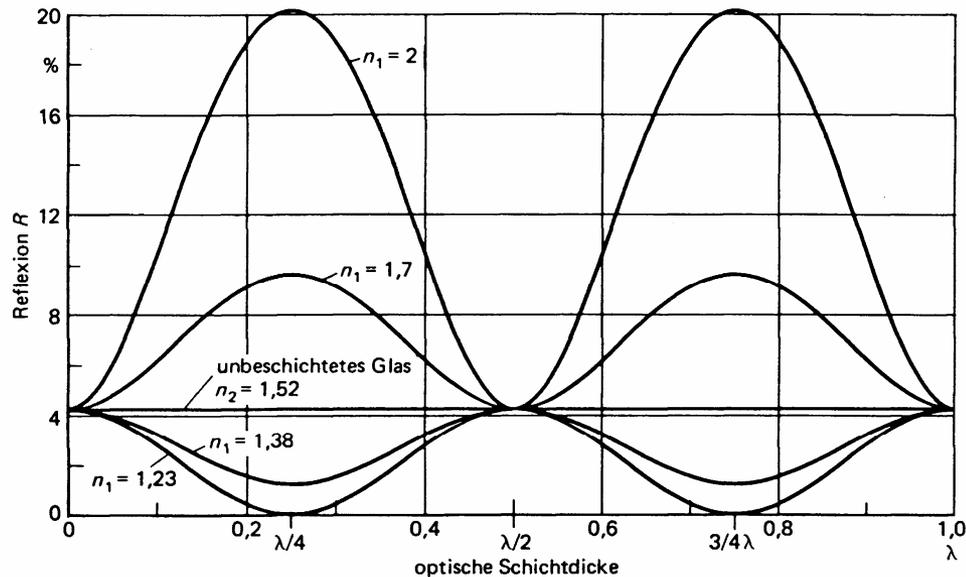
Ideales und reales Einschichtsystem



Einschichtsysteme - generell



Reflexion/Wellenlänge



Reflexion/Schichtdicke

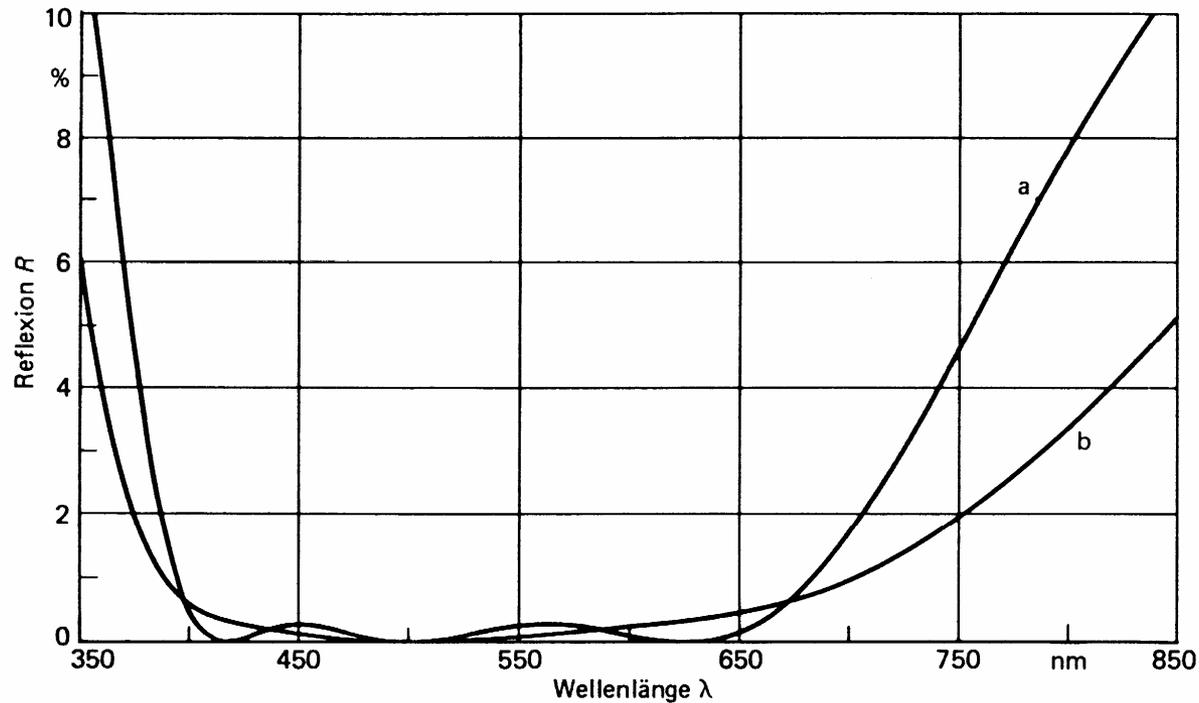
Mehrschichtsysteme - Reflexionsminderung

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

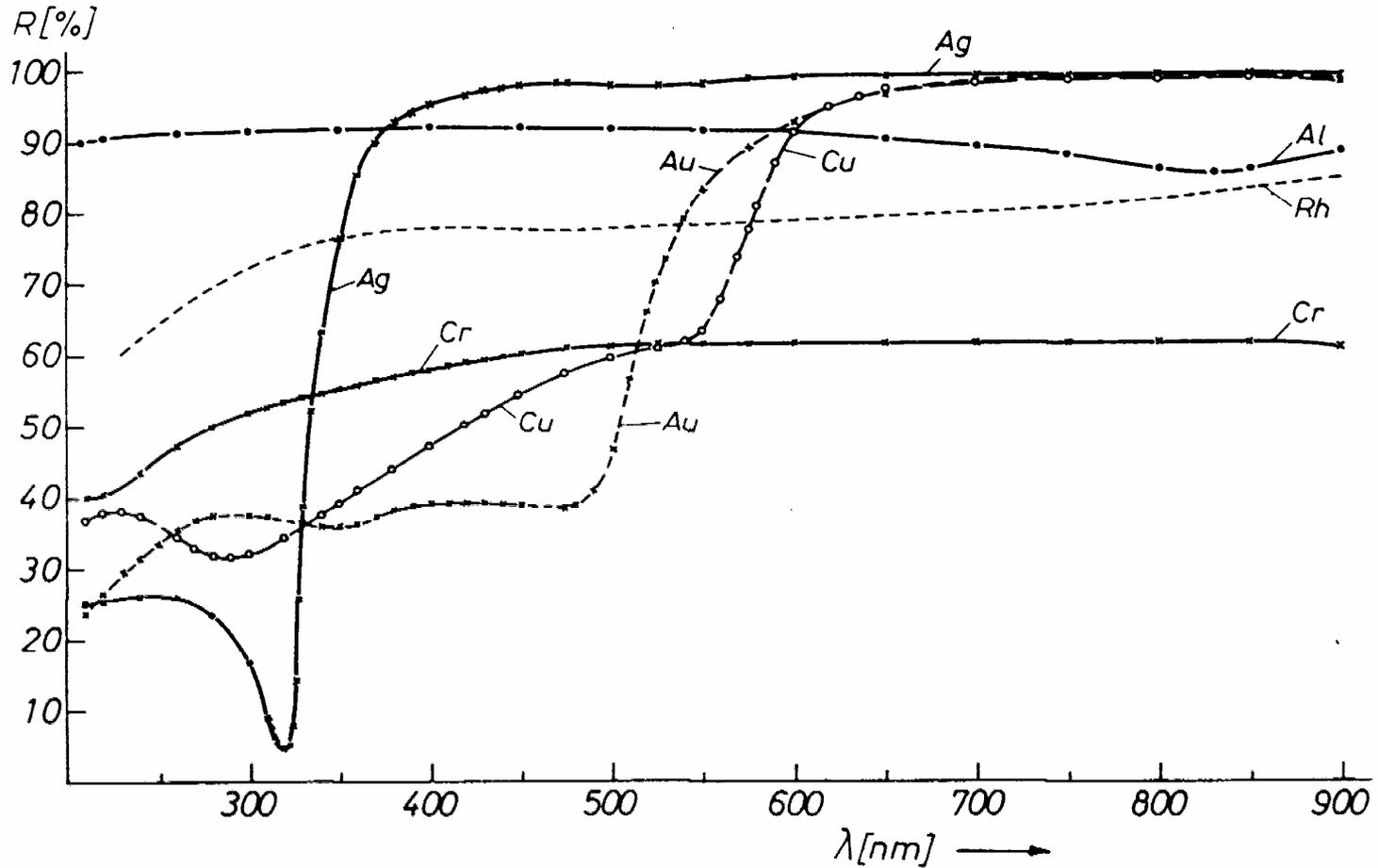
$n_1 = 1.38$

$n_2 = 2.1$

$n_3 = 1.7$

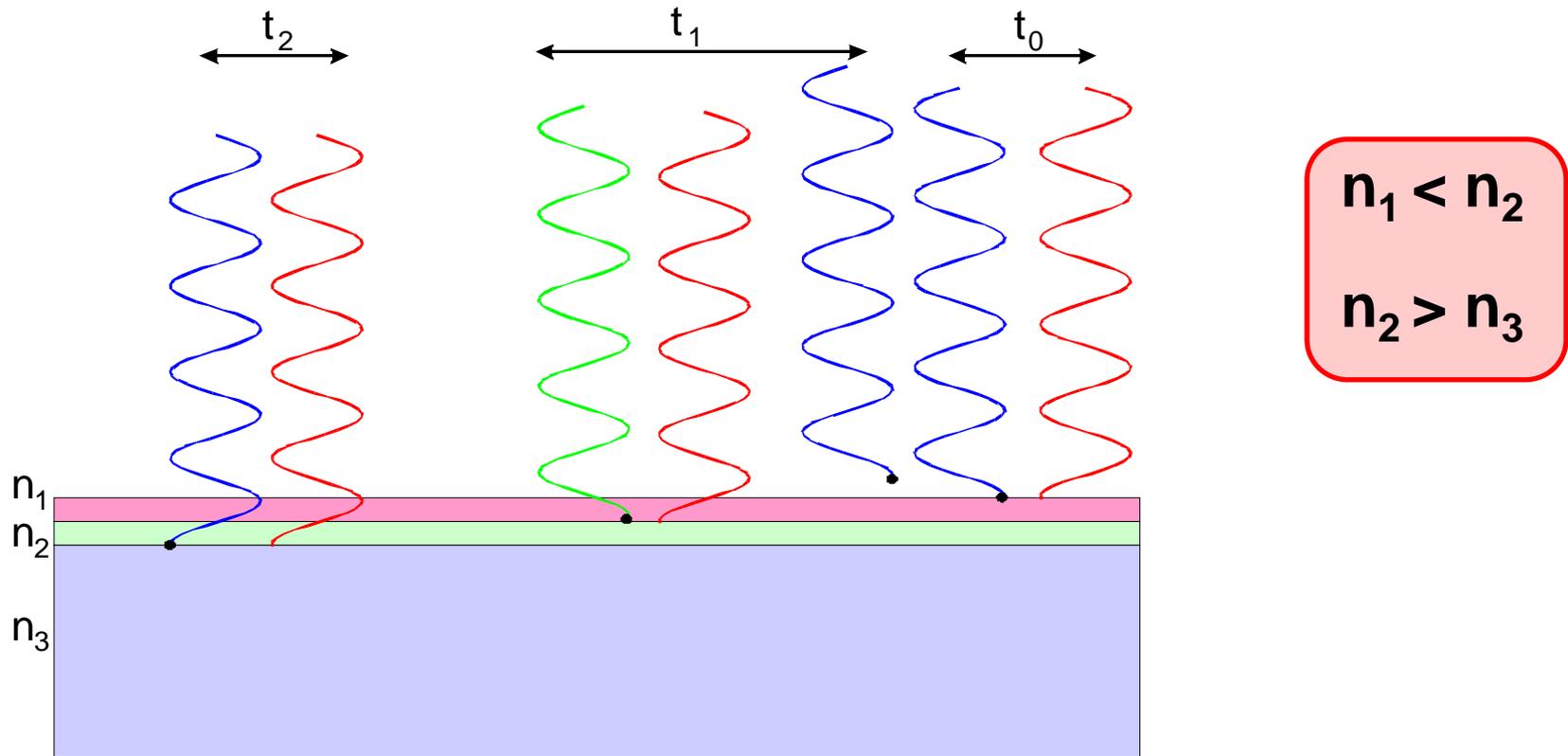
$n_4 = 1.52$

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.