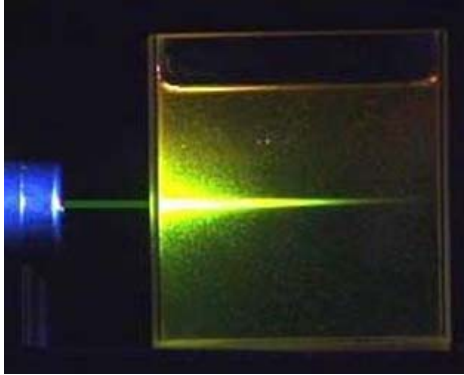
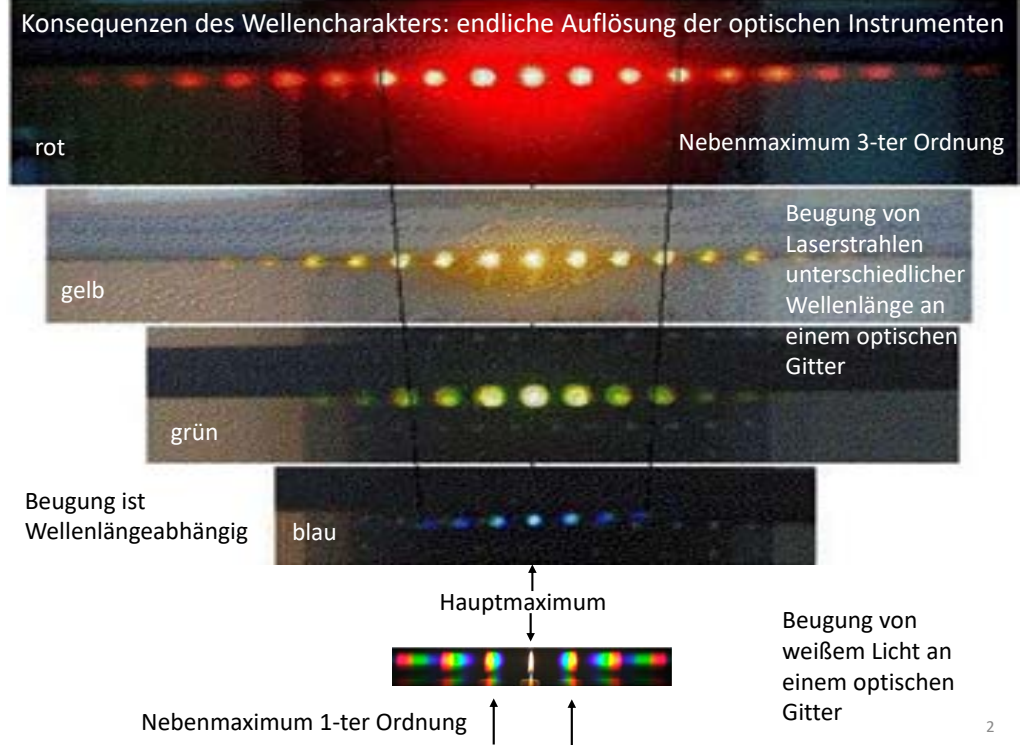


$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

Auflösungsgrenze Lichtabsorption Lichtstreuung



KAD 2023.09.26



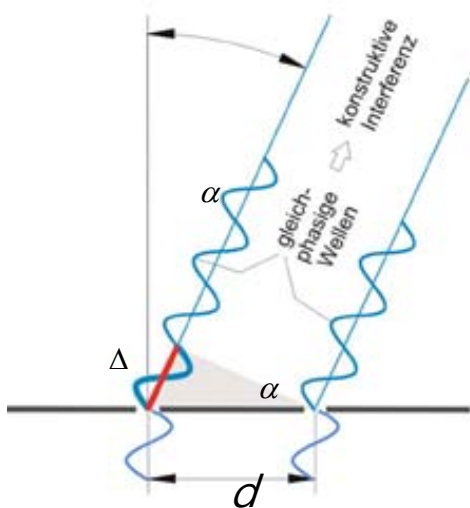
2

Wiederholung

Beugung am Gitter

Amplitudengitter

Lichtdurchlässigkeit periodisch ändert und die Periode: $d \approx \lambda$



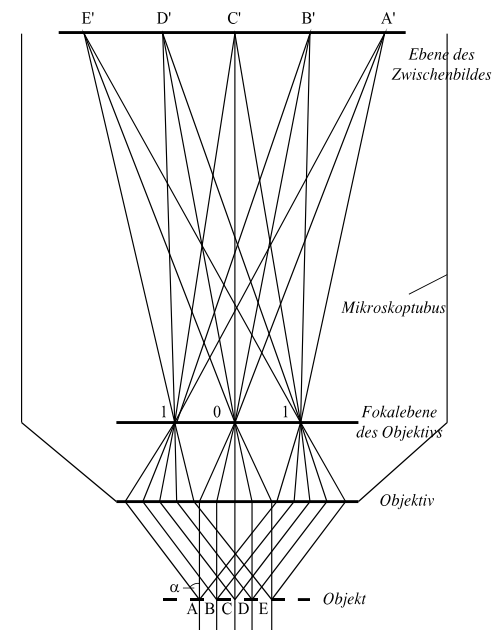
$$\Delta = d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

$$(k=1) \quad d \cdot \sin \alpha = \lambda$$

$$\frac{\lambda}{d} = \sin \alpha$$

3

Auflösungsvermögen des Mikroskops



Ernst Karl Abbe
(1840-1905)
Mitbegründer
der Zeiss-Werke

Abbe Theorie

Bild entsteht im Mikroskop, wenn in der Fokalebene des Objektivs außer dem Hauptmaximum wenigstens auch die Seitenmaxima erster Ordnung entstehen.

$$\frac{\lambda}{d} = \sin \alpha \leq \sin \omega$$

ω : Halboffnungswinkel des Objektivs

4

$$\frac{\lambda'}{d} = \sin \alpha \leq \sin \omega$$

$$d = \delta = \frac{\lambda'}{\sin \omega}$$

$$\delta = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \omega} = \frac{\lambda}{A}$$

$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{n \cdot \sin \omega}$$

$$f = \frac{1}{\delta}$$

$\lambda' = \lambda/n$: Wellenlänge im Medium

n : Brechzahl des Mediums

λ : Wellenlänge im Vakuum,

A : numerische Apertur

$d = \delta$: die kleinste auflösbare Entfernung

Auflösungsgrenze des Mikroskops (die kleinste auflösbare Entfernung)

Auflösungsvermögen des Mikroskops

5



6

(de Broglie: $\frac{h}{mv}$) $\lambda_e \ll \lambda_{\text{Licht}}$ \longrightarrow **Elektronenmikroskopie:**

kleinere Auflösungsgrenze, grösseres Auflösungsvermögen

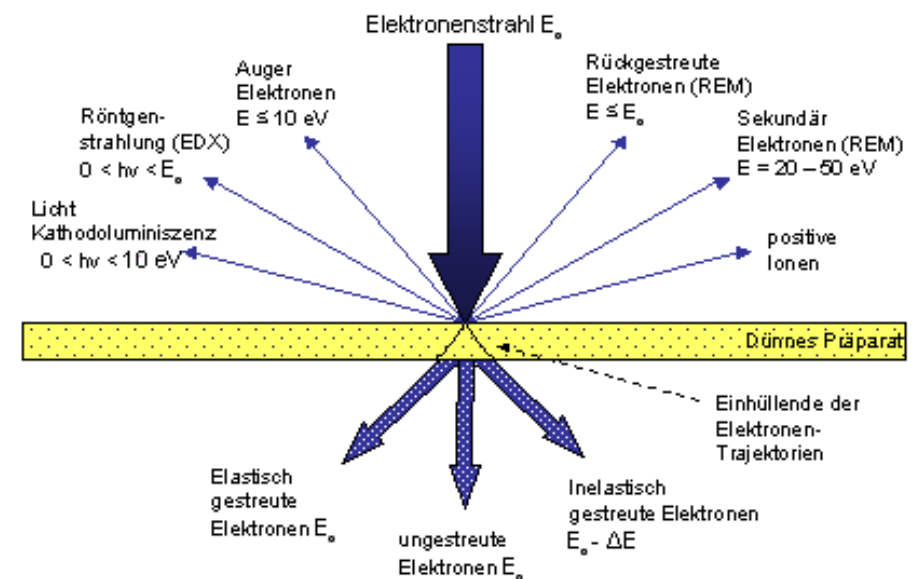
andere **Diffraktionsmethoden/Beugungsmethoden:**

Röntgendiffraktion, Elektronendiffraktion, Neutronendiffraktion

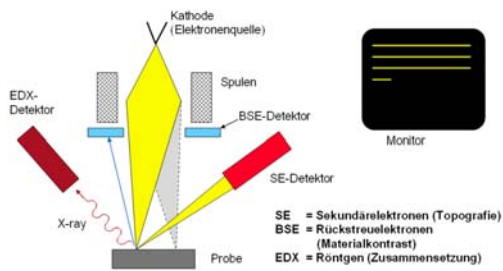
$$\lambda_{\text{Rtg}}, \lambda_e, \lambda_n \ll \lambda_{\text{Licht}}$$

Untersuchungsmöglichkeit von submikroskopische Strukturen

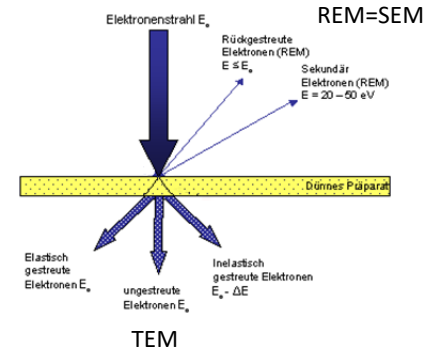
7



8

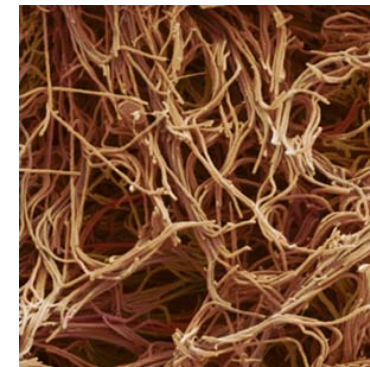


Rasterelektronenmikroskop
die erzeugte Bilder sind Abbildungen
der Objektoberflächen
relativ geringere Auflösung
die Probe bleibt mechanisch intakt

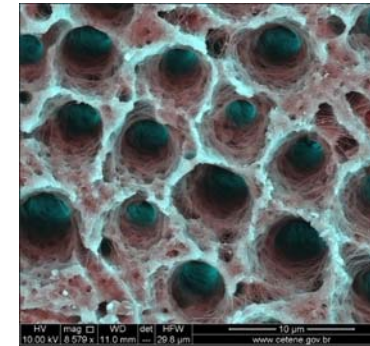


Transmissionselektronenmikroskop
direkte Abbildung von Objekten
mithilfe von Elektronenstrahlen
bessere Auflösung
stark veränderte Probe (sehr dünnes
Präparat)

9



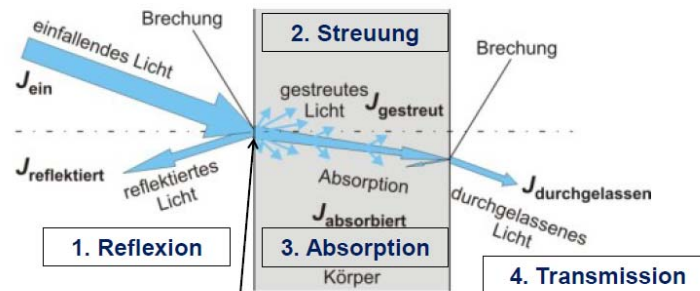
Bakterien auf den Zähnen
30 000 fache Vergrößerung



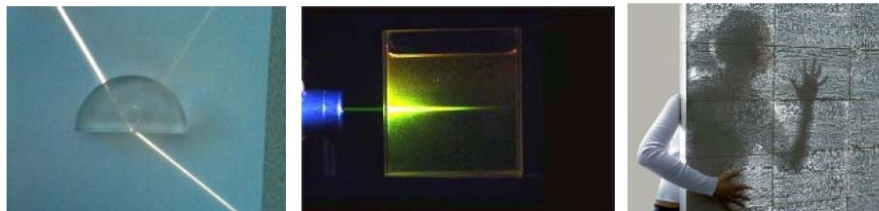
Dentinkanälchen
SEM oder TEM?

10

Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie

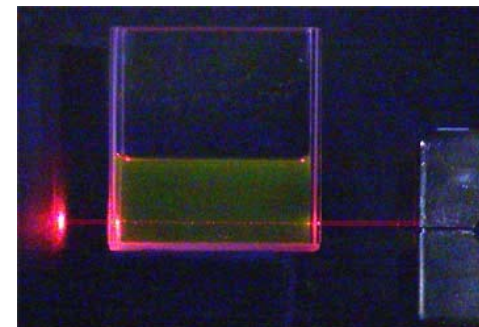


Die in den Körper eindringende
Intensität ist J_0 : $J_0 = J_{\text{ein}} - J_{\text{reflektiert}}$

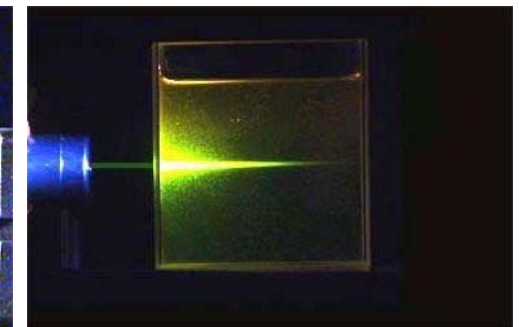


11

Absorption von Licht in einer Lösung



rote monokromatische Lichtquelle
(laser, $\lambda = 633 \text{ nm}$)
keine Absorption



grüne monokromatische Lichtquelle
(laser, $\lambda = 532 \text{ nm}$)
starke Absorption

es gibt eine Absorptionsfähigkeit
die Absorptionsfähigkeit hängt von der Wellenlänge ab

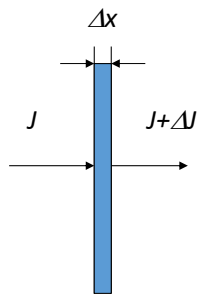
12

Quantitative Charakterisierung der Absorption

einfachste Situation: sehr kleine (infinitesimal kleine) Schichtdicke

(Parallelstrahl, senkrecht fällt auf ein Medium)

J : die eintretende Intensität



ΔJ : Veränderung der Intensität (<0)

$J + \Delta J$: die ausretende Intensität

$$\Delta J = -\mu J \Delta x \quad \text{differenzierte Form des Schwächungsgesetzes}$$

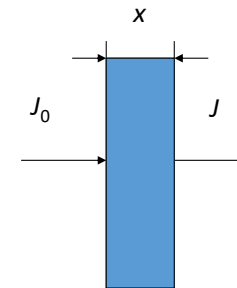
μ : charakterisiert das Medium (Schwächungsfaktor)

$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\mu J \quad \text{Veränderung (genauer: die Ableitung) einer Funktion (hier: Intensität) proportional zur Funktion (Intensität)}$$

13

$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\mu J$$

Lösung dieser (Funktions)gleichung/Differentialgleichung:



$$J = J(x) = J_0 e^{-\mu x}$$

das Schwächungsgesetz

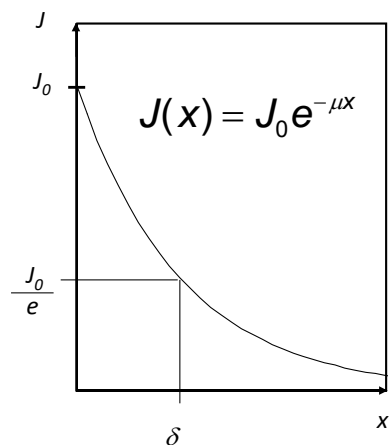
J_0 : die eintretende Intensität

J : die austretende Intensität

μ : der (lineare) Schwächungskoeffizient (Schwächungsfaktor, Absorptionskoeffizient), Einheit: 1/m, 1/cm

14

Graphische Darstellung des Schwächungsgesetzes



Einheit von μ : 1/m, 1/cm

$\delta = 1/\mu$, δ : eine spezielle Schichtdicke

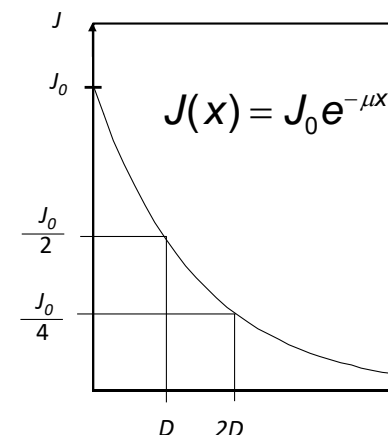
$$J(x) = J_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

$$J(\delta) = J_0 e^{-\frac{\delta}{\delta}} = J_0 e^{-1} = \frac{J_0}{e}$$

δ : die Schichtdicke nach welcher sich die Intensität der Strahlung auf den e -ten Teil vermindert

15

Die Halbwertsdicke



D : die Schichtdicke nach welcher sich die Intensität der Strahlung halbiert

$$J(D) = J_0 e^{-\mu D} = \frac{J_0}{2}$$

$$e^{-\mu D} = \frac{1}{2} = 2^{-1} \quad e^{+\mu D} = 2$$

$$\mu D = \ln 2,$$

$$\mu = \frac{\ln 2}{D} = \frac{0.693}{D}$$

$$J(x) = J_0 e^{-\frac{0.693}{D} x}$$

16

Optische Dichte = Extinktion = Absorbanz

OD

E

A

Absorption	$\frac{J}{J_0}$	$\frac{J_0}{J}$	$\lg \frac{J_0}{J}$
k(l)eine ($J=J_0$)	1 = 100 %	1	0
grosse ($J=0$)	0	∞	∞
	Durchlässigkeit		Absorbanz
	wichtige Grösse	keine Bedeutung	wichtigste Grösse

17

Schwächungskoeffizient

$$\Delta J = -\mu J \Delta x,$$

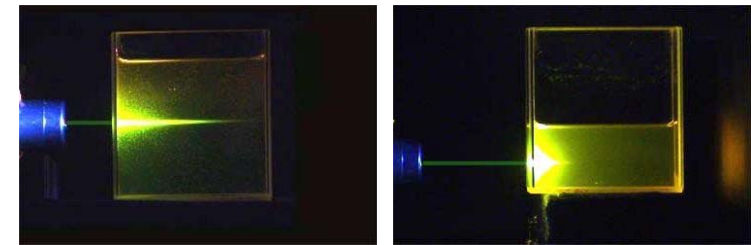
$$\mu = \mu(\text{Medium; Strahlung}) = \mu(Z, c; \lambda),$$

wo Z: die (effektive) Ordnungszahl des Mediums/der Lösung

c: die Konzentration der Lösung

λ : die Wellenlänge

für dünne Lösungen: $\Delta J \sim c \rightarrow \mu \sim c$



18

Lambert-Beersches Gesetz

$$J = J_0 e^{-\mu x} \quad J_0 = J e^{+\mu x} \quad \frac{J_0}{J} = e^{\mu x}$$

$$\lg \frac{J_0}{J} = \mu x (\lg e) = \left((\lg e) \frac{\mu}{c} \right) c x = \varepsilon c x$$

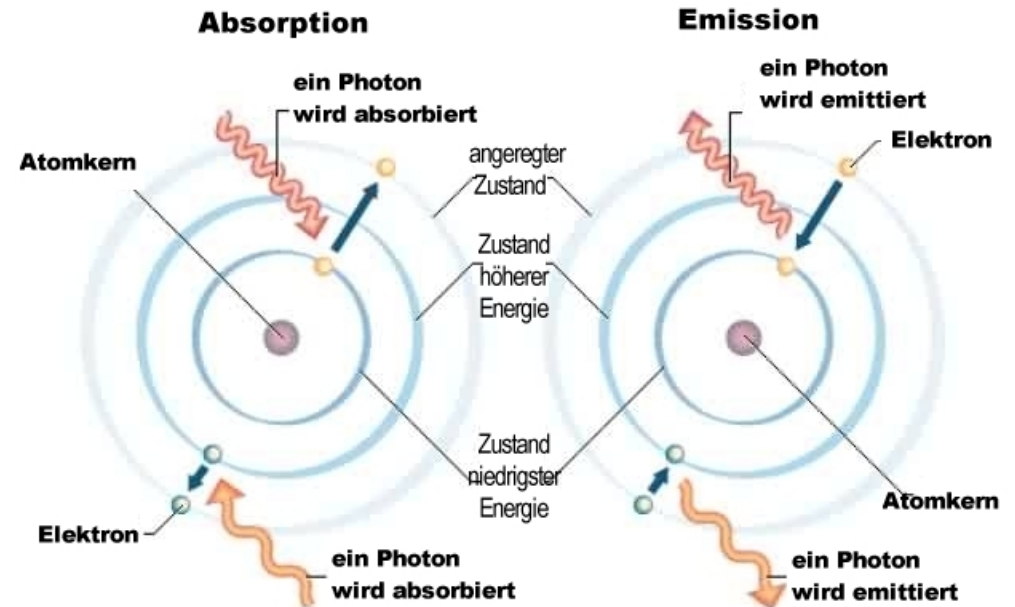
Gültigkeit: für dünne Lösungen

der (dekadische molare) Extinktionskoeffizient: $\varepsilon = \varepsilon(Z; \lambda)$

wichtig: nicht hängt von der Konzentration ab

19

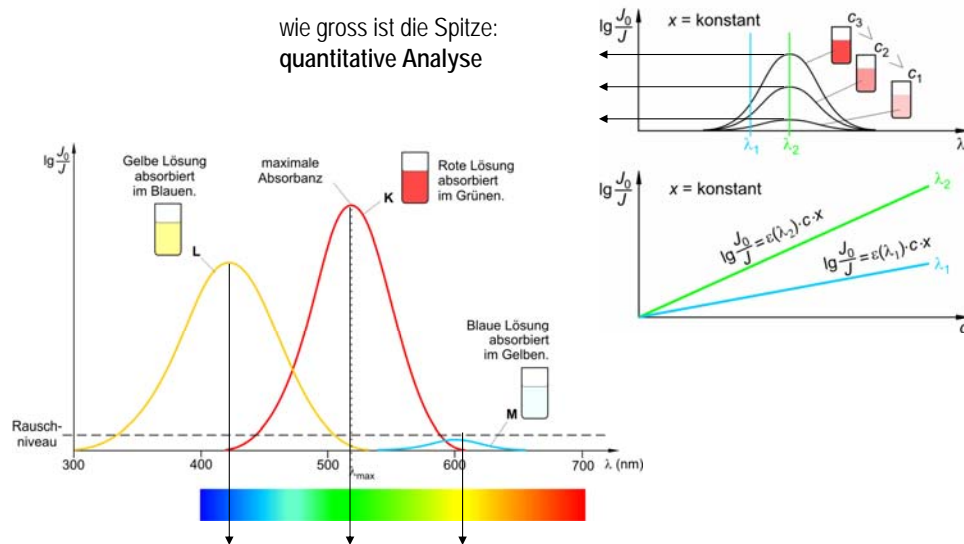
Atomare Grundlagen der Absorption und Emission



20

Absorptionsspektrum

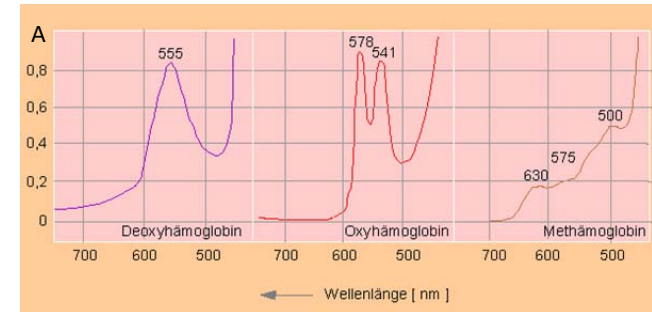
wie gross ist die Spitze:
quantitative Analyse



wo ist die Spitze: qualitative Analyse

21

Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Gewebe

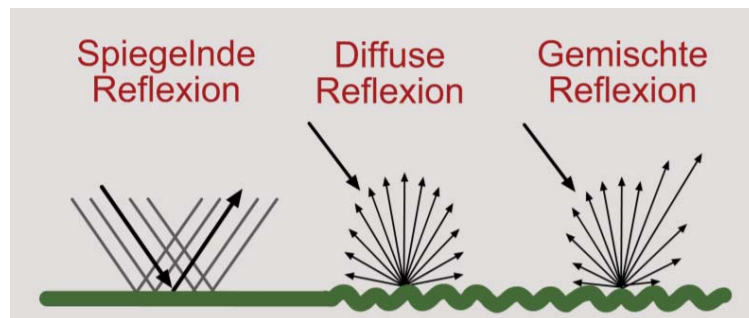


Photopolymerisation, Lichthärtung



22

Lichtreflexion



an glatten Flächen
($\alpha = \alpha'$)

an rauen
Flächen

an glänzenden
Flächen

Reflektanz:
$$\rho(\lambda) = \frac{J_{\text{reflektierte}}}{J_{\text{eintretende}}}$$

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

Reflexionsspektrum: s. Physikalische Grundlagen der Zahnärztlichen Materialkunde

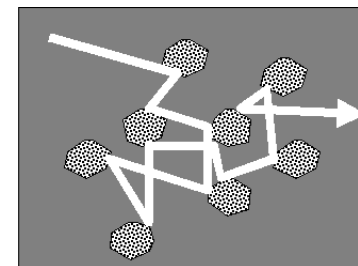
23

Lichtstreuung

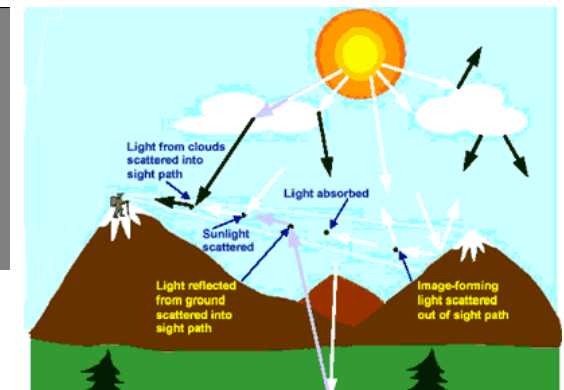
Ablenkung des Lichtes an kleinen Teilchen oder rauen Oberflächen.
Inhomogenitäten in der Grössenordnung der Wellenlänge des Lichtes
streuen Licht

räumliche Inhomogenitäten – **elastische** Lichtstreuung

zeitliche Inhomogenitäten/Fluktuationen – **inelastische** Lichtstreuung



durch Lichtstreuung wird
gerichtetes Licht in
diffuses Licht verwandelt



24

Elastische Lichtstreuung

spektraler Streukoeffizient $\sigma(\lambda) = \frac{\int_{\text{gestreut}}}{\int_{\text{einfallend}}}$

Rayleigh-Streuung

Wechselwirkung mit Moleküle deren Durchmesser viel kleiner als die Wellenlänge ist ($d < 0.1 \lambda$).

$$\sigma_{\text{Rayleigh}} \sim \frac{d^6}{\lambda^4} \quad \text{sehr starke Wellenlängenabhängigkeit}$$

Diese Rayleigh-Streuung ist für den blauen Himmel und das rötliche Licht am Morgen und am Abend verantwortlich



Mie-Streuung

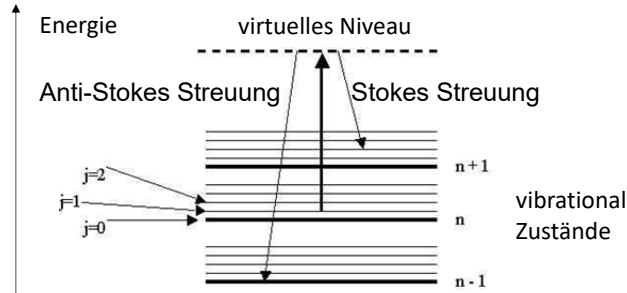
der Durchmesser der Partikel ist in der Größenordnung der Wellenlänge ($0.1 \lambda < d < 10 \lambda$) sehr geringe Wellenlängenabhängigkeit

nicht-selektive Streuung

alle Wellenlängen werden ungefähr gleich beeinflusst
Durchmesser der Partikel ist viel grösser als die Wellenlänge ($d > 10 \lambda$).



Nichtelastische Lichtstreuung: Raman-Streuung



Sir Raman in unserem Institut (1961),
Nobel-Preis (1930)

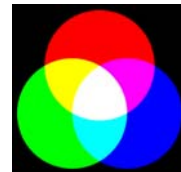
bei der Raman-Streuung werden Moleküle durch das ausgesendete Laserlicht in andere Vibrations- und Rotationszustände versetzt. Die Moleküle nehmen hierbei einen Teil der Lichtenergie auf bzw. geben einen Teil ihrer Energie ab; die Wellenlänge des rückgestreuten Lichts wird durch die Streuung geändert

die Intensität des inelastisch gestreuten Lichts ist um 2 bis 3 Größenordnungen geringer als das elastisch an den Molekülen rückgestreute Licht

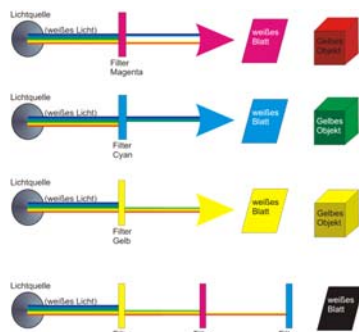
26

Farbe von Gegenständen, sehr komplex: Reflexion + Streuung + Absorption

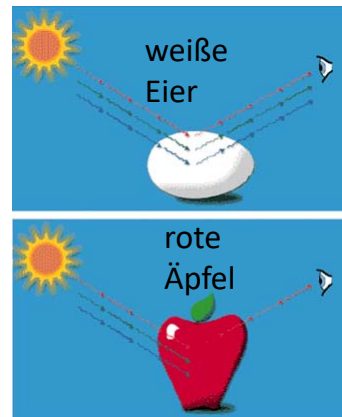
Additive Farbmischung					
Rot	+	Grün	=	Gelb	
Grün	+	Blau	=	Cyan	
Rot	+	Blau	=	Magenta	
Rot	+	Grün	+	Blau	= Weiß



Subtraktive Farbmischung



C: cyan
M: magenta
Y: yellow = gelb



27

Abbe Theorie

Auflösungsgrenze

Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops

andere Methoden:

Vorteil der Elektronenmikroskopie

Diffraktionsmethoden (Röntgen-, Elektronen-, Neutronen-Diffraktion)

Raster- und Transmissions-Elektronenmikroskopie

Wechselwirkung zwischen Licht und Materie

Lichtabsorption

Schwächungsgesetz

Halbwertsdicke

Optische Dichte, Absorbanz

Schwächungskoeffizient

Lambert-Beersches Gesetz

Absorptionsspektrum

Lichtreflexion, Lichtstreuung (elastisch, nichtelastisch)

Farbe von Gegenständen

28