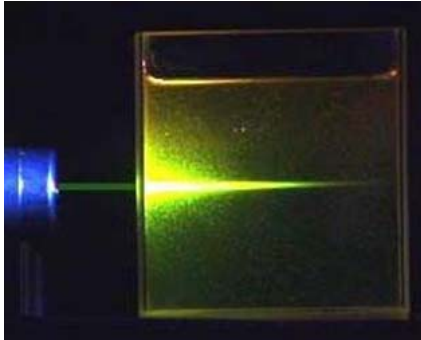


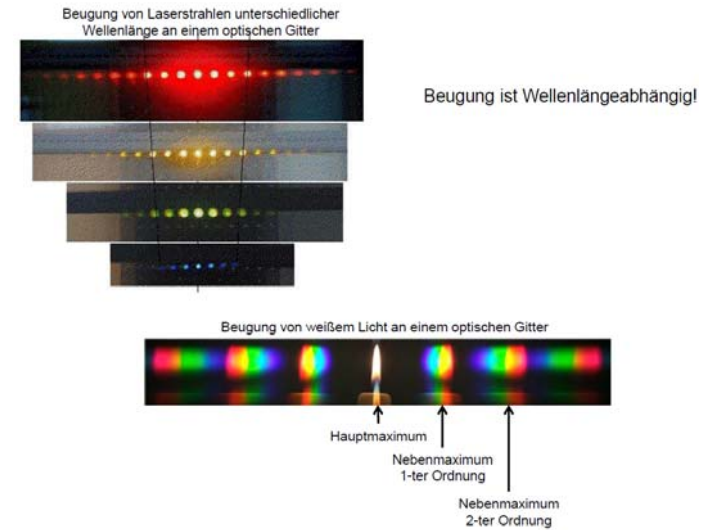
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

Auflösungsgrenze Lichtabsorption Lichtstreuung



KAD 2021.10.05

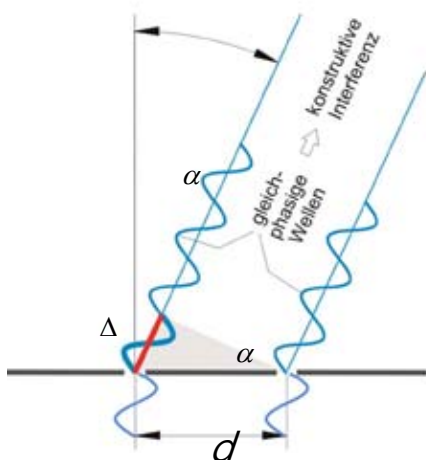
Konsequenzen des Wellencharakters des Lichtes:
endliche Auflösung der optischen Instrumenten und des Auges



2

Beugung am Gitter

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



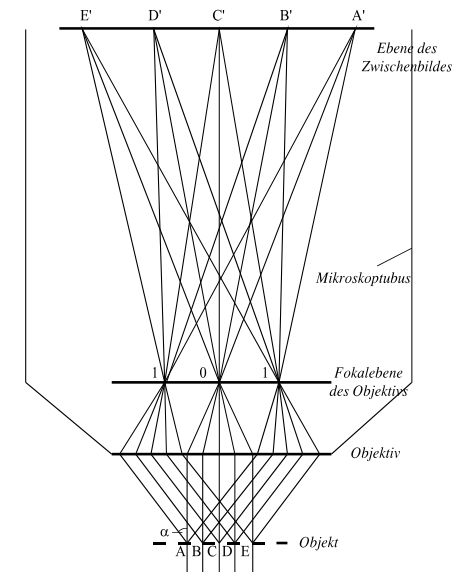
$$\Delta = d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

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

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

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

$$\lambda_e \ll \lambda_{\text{Licht}}$$

→ **Elektronenmikroskopie:**

kleinere Auflösungsgrenze, grösseres Auflösungsvermögen

andere

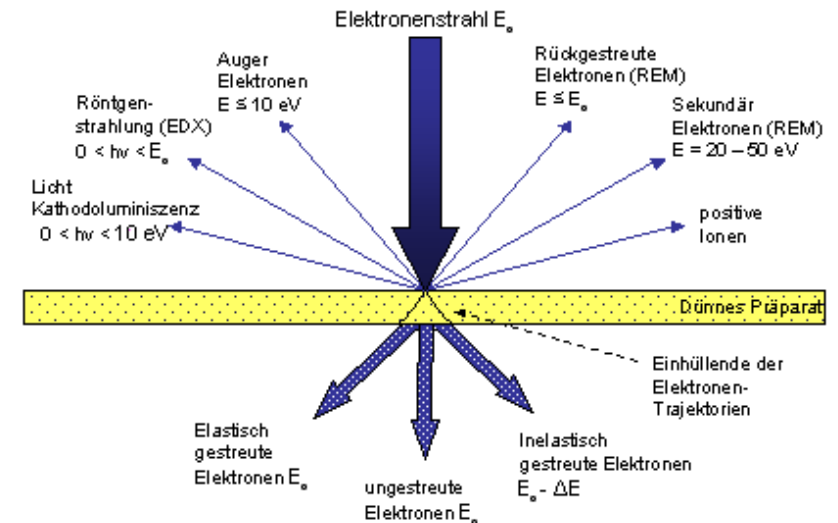
Diffraktionsmethoden/Beugungsmethoden:

Röntgendiffraktion, Elektronendiffraktion, Neutronendiffraktion

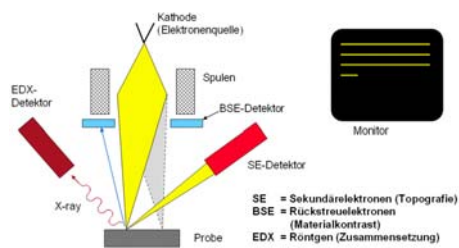
$$\lambda_{\text{Rtg}}, \lambda_e, \lambda_n \ll \lambda_{\text{Licht}}$$

Untersuchungsmöglichkeit von submikroskopische Strukturen

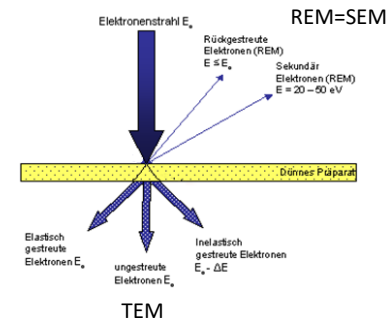
7



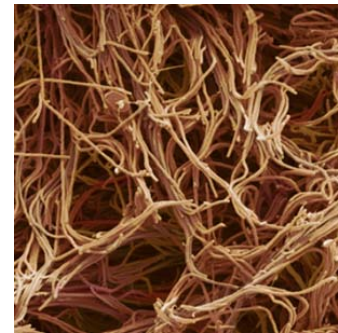
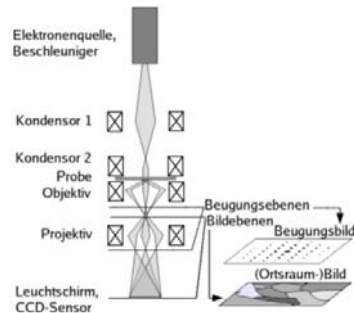
8



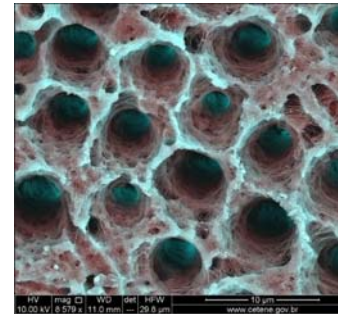
Rasterelektronenmikroskop
die erzeugte Bilder sind Abbildungen der Objektoberflächen
relativ geringere Auflösung
die Probe bleibt mechanisch intakt



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



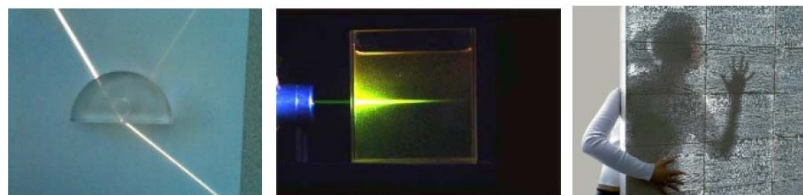
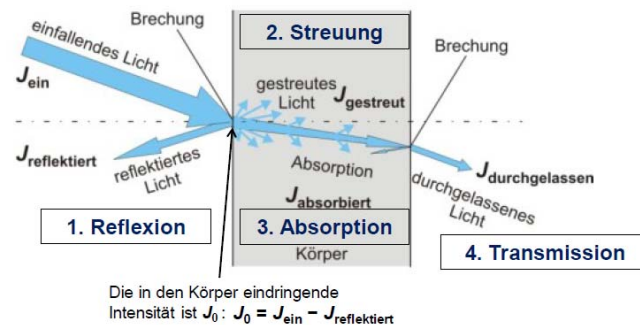
Bakterien auf den Zähnen
30 000 fache Vergrößerung



Dentinkanälchen
SEM oder TEM?

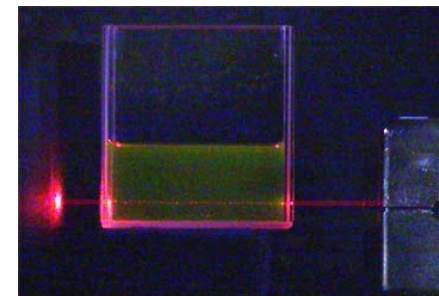
10

Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie

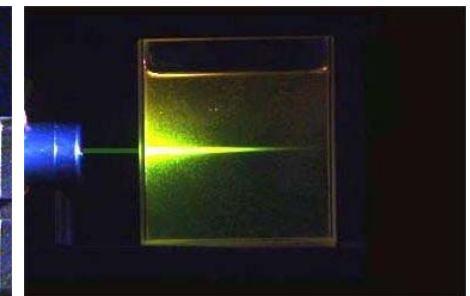


11

Absorption von Licht in einer Lösung



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



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

es gibt eine Absorptionsfähigkeit
die Absorptionsfähigkeit hängt von der Wellenlänge ab

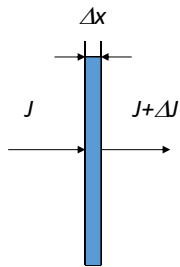
12

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

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

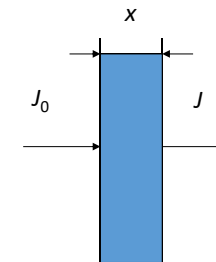
μ : charakterisiert das Medium (Schwächungsfaktor)

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

13

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

Lösung dieser (Funktions)gleichung/Differentialgleichung:



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

das Schwächungsgesetz

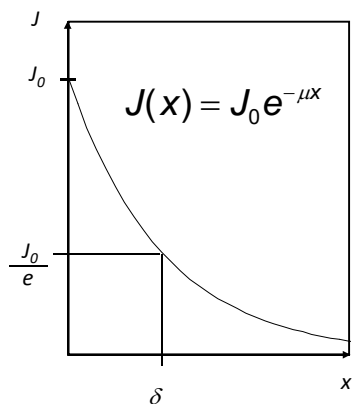
J_0 : die eintretende Intensität

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

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

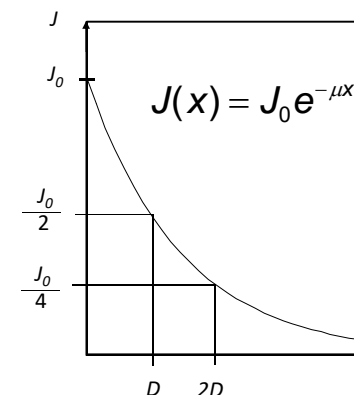
$$J(x) = J_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

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

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

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

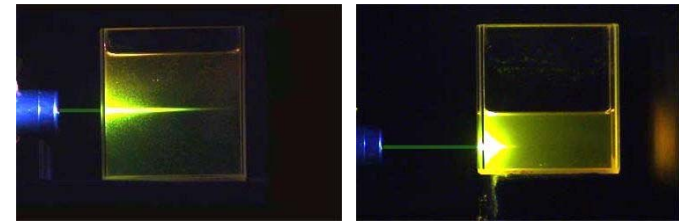
$$\mu = \mu(\text{Medium; Strahlung}) = \mu(Z, c; \lambda),$$

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

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

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

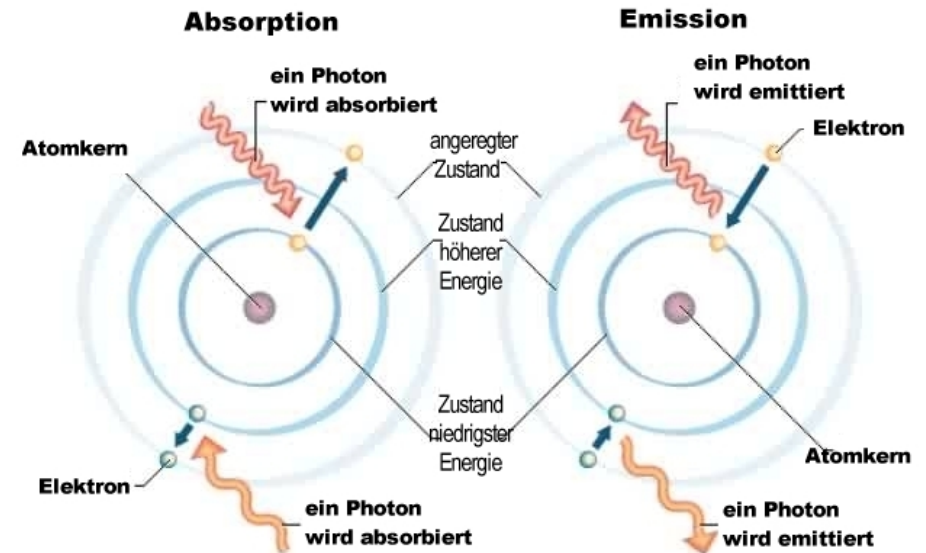
Gültigkeit: für dünne Lösungen

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

wichtig: nicht hängt von der Konzentration ab

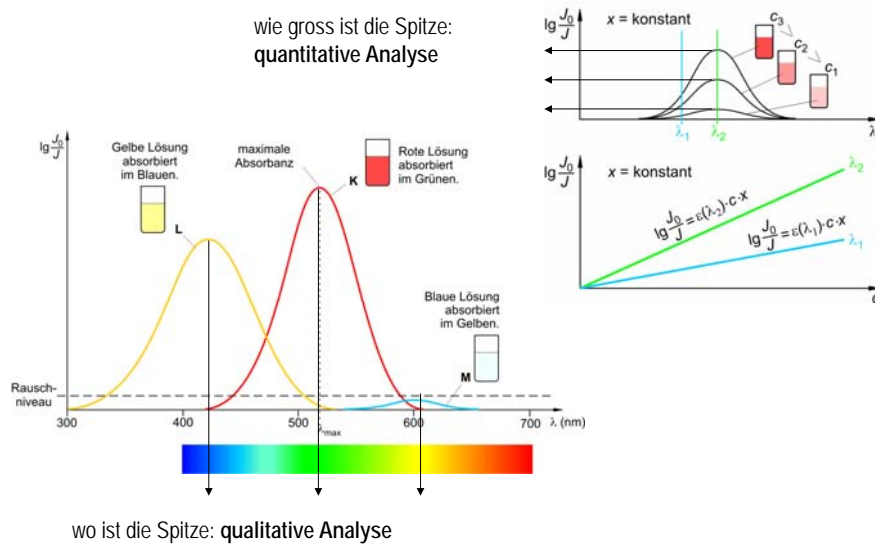
19

Atomare Grundlagen der Absorption und Emission



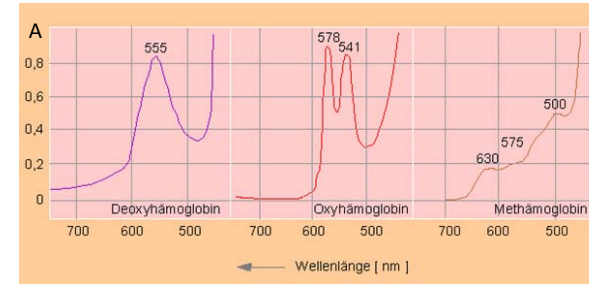
20

Absorptionsspektrum



21

Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Gewebe

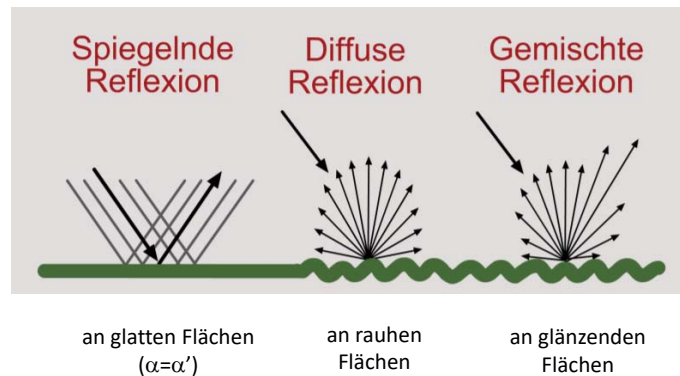


Photopolymerisation, Lichthärtung



22

Lichtreflexion



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

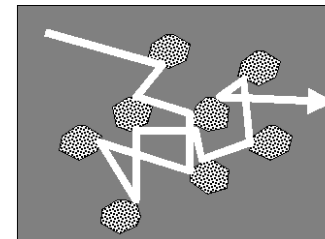
23

Lichtstreuung

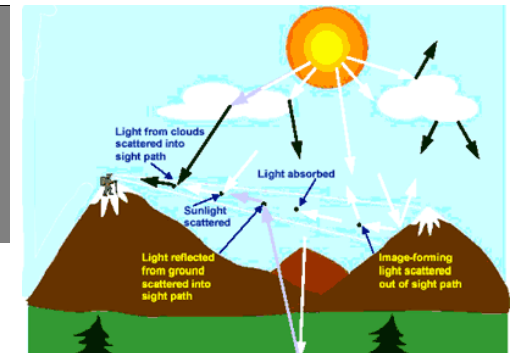
Ablenkung des Lichtes an kleinen Teilchen oder rauen Oberflächen. Inhomogenitäten in der Grössenordnung der Wellenlänge des Lichtes streuen Licht

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

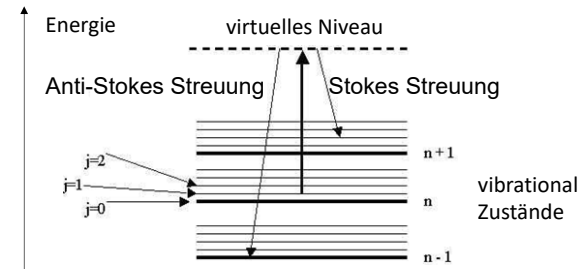
der Durchmesser der Partikel ist in der Größenordnung der Wellenlänge ($0.1 \lambda < d < 10 \lambda$) sehr geringe Wellenlängenabhängigkeit

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)

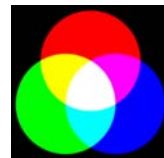
bei der Raman-Streuung werden Moleküle durch das ausgesendete Laserlicht in andere Vibrations- und Rotationszustände versetzt. Die Moleküle nehmen hierbei einen Teil der Lichtenergie auf bzw. geben einen Teil ihrer Energie ab; die Wellenlänge des rückgestreuten Lichts wird durch die Streuung geändert

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

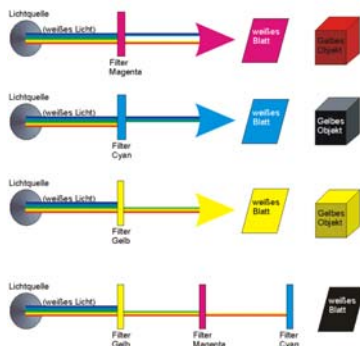
26

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

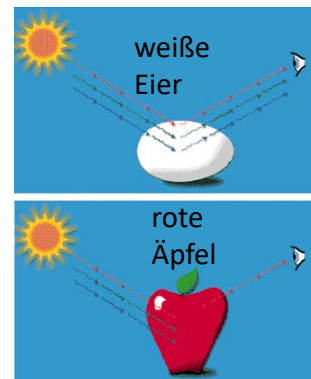
Additive Farbmischung									
	Rot	+		Grün	=  Gelb				
				Grün	+		Blau	=	 Cyan
	Rot				+		Blau	=	 Magenta
	Rot	+		Grün	+		Blau	=	 Weiß



Subtraktive Farbmischung



C: cyan
M: magenta
Y: yellow = gelb



27