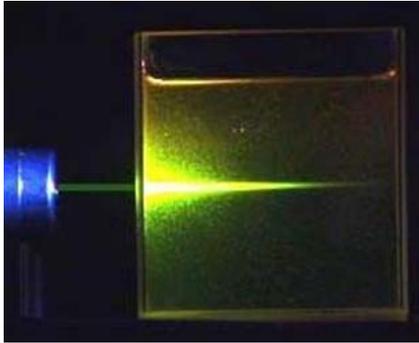


$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

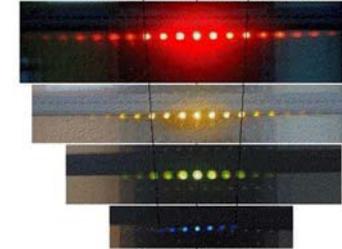
Auflösungsgrenze Lichtabsorption Lichtstreuung



KAD 2020.10.06

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

Beugung von Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge an einem optischen Gitter



Beugung ist Wellenlängeabhängig!

Beugung von weißem Licht an einem optischen Gitter



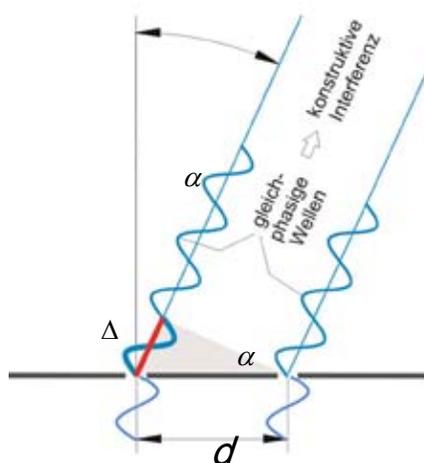
Hauptmaximum
Nebenmaximum 1-ter Ordnung
Nebenmaximum 2-ter Ordnung

2

Beugung am Gitter

Amplitudengitter

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



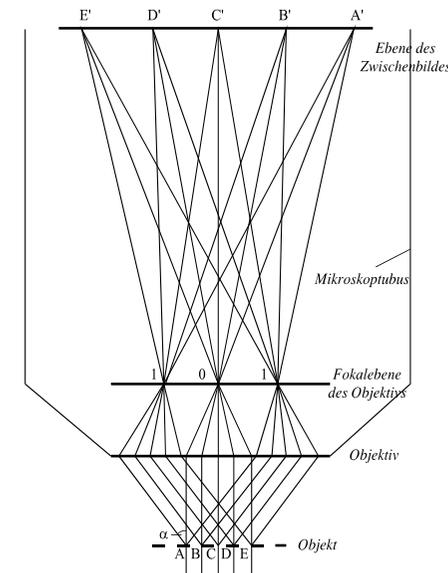
$$\Delta = d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

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

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

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

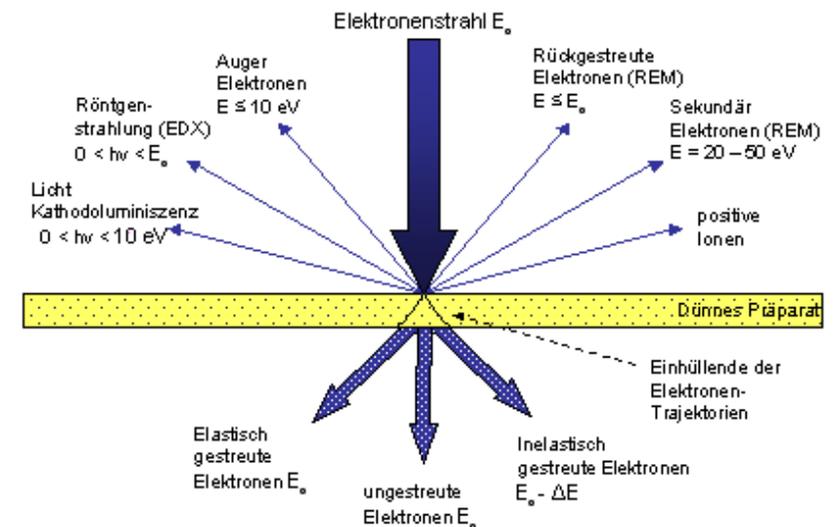
Diffraktionsmethoden/Beugungsmethoden:

Röntgendiffraktion, Elektronendiffraktion, Neutronendiffraktion

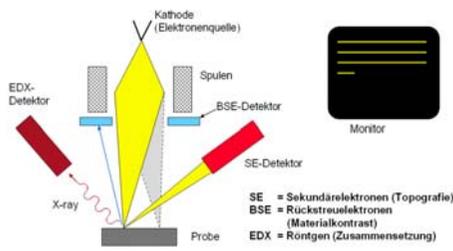
$$\lambda_{\text{Rtg}}, \lambda_e, \lambda_n \ll \lambda_{\text{Licht}}$$

Untersuchungsmöglichkeit von submikroskopische Strukturen

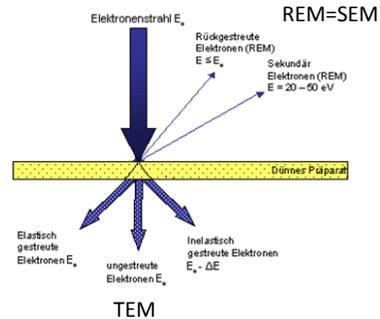
7



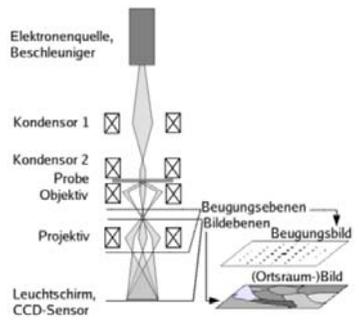
8



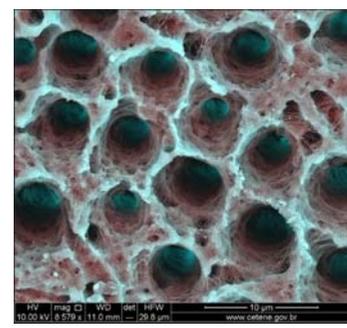
Rasterelektronenmikroskop
die erzeugte Bilder sind Abbildungen der Objektoberflächen
relativ geringere Auflösung
die Probe bleibt mechanisch intakt



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

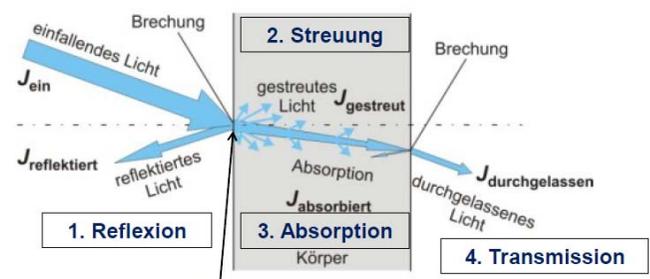


Bakterien auf den Zähnen
30 000 fache Vergrößerung

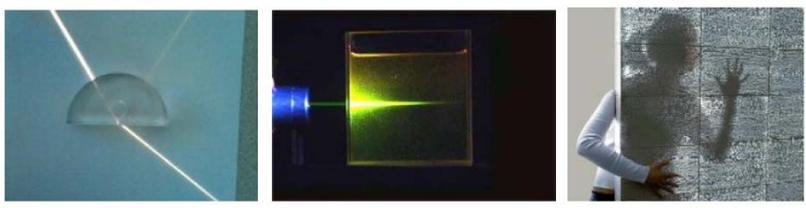


Dentinkanälchen
SEM oder TEM?

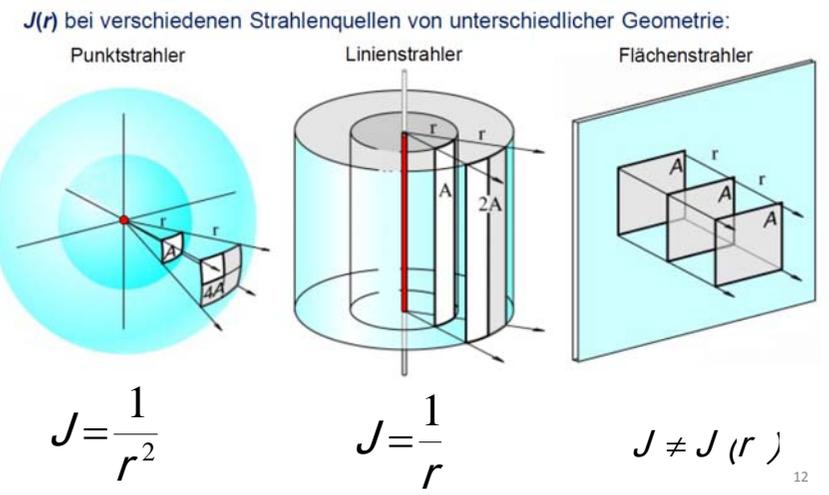
Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie



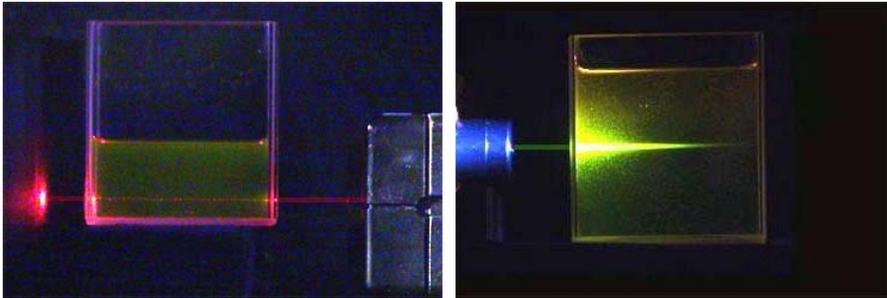
Die in den Körper eindringende Intensität ist $J_0: J_0 = J_{\text{ein}} - J_{\text{reflektiert}}$



Über die Geometrie der Strahlenquellen. Modellvorstellungen



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

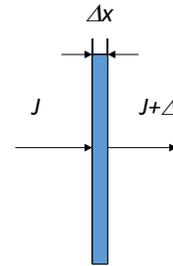
13

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

$\Delta J = -\mu J \Delta x$ differenzierte Form des Schwächungsgesetzes

μ : charakterisiert das Medium (Schwächungsfaktor)

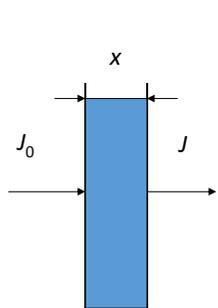
$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\mu J$$

Veränderung (*genauer*: die Ableitung) einer Funktion (*hier*: Intensität) proportional zur Funktion (Intensität)

14

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

Lösung dieser (Funktions)gleichung/Differentialgleichung:



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

das Schwächungsgesetz

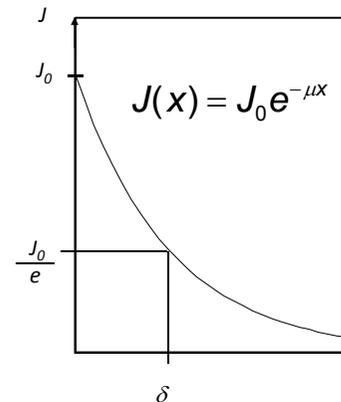
J_0 : die eintretende Intensität

J : die austretende Intensität

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

15

Graphische Darstellung des Schwächungsgesetzes



Einheit von μ : 1/m, 1/cm

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

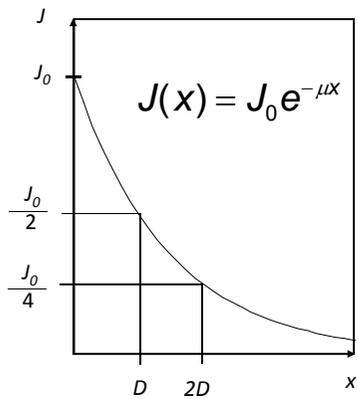
$$J(x) = J_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

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

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

16

Die Halbwertsdicke



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

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

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

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

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

17

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

18

Schwächungskoeffizient

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

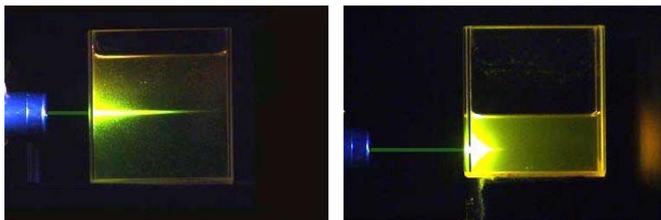
$$\mu = \mu(\text{Medium; Strahlung}) = \mu(Z; c; \lambda),$$

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

c : die Konzentration der Lösung

λ : die Wellenlänge

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



19

Lambert-Beersches Gesetz

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

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

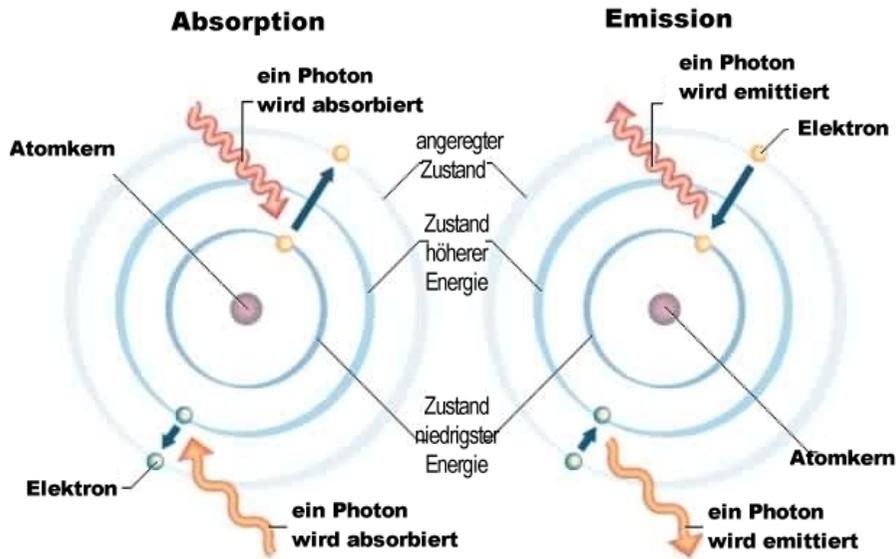
Gültigkeit: für dünne Lösungen

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

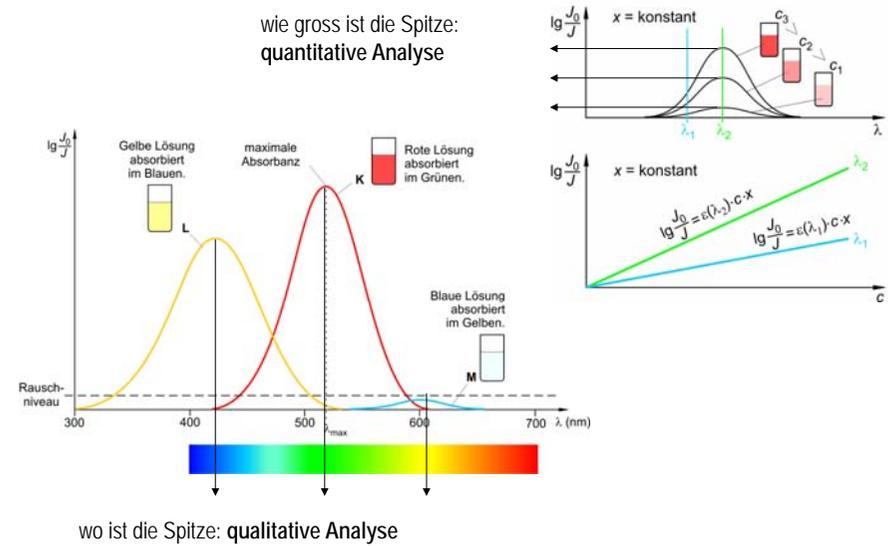
wichtig: nicht hängt von der Konzentration ab

20

Atomare Grundlagen der Absorption und Emission

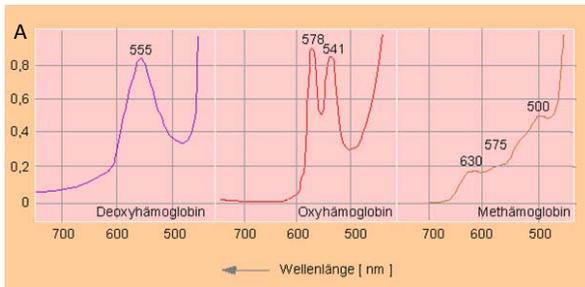


Absorptionsspektrum



wo ist die Spitze: qualitative Analyse

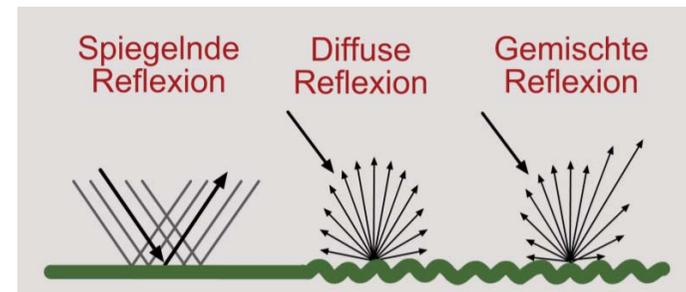
Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Gewebe



Photopolymerisation, Lichthärtung



Lichtreflexion



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

an rauhen Flächen

an glänzenden Flächen

Reflektanz: $\rho(\lambda) = \frac{J_{reflektierte}}{J_{eintretende}}$ $\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$

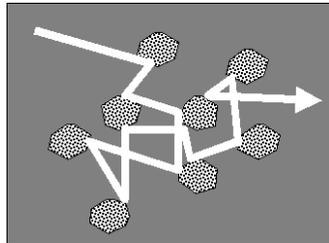
Reflexionsspektrum: s. Physikalische Grundlagen der Zahnärztlichen Materialkunde

Lichtstreuung

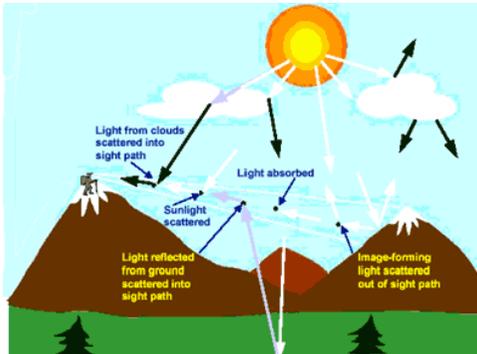
Ablenkung des Lichtes an kleinen Teilchen oder rauen Oberflächen. Inhomogenitäten in der Grössenordnung der Wellenlänge des Lichtes streuen Licht

räumliche Inhomogenitäten – **elastische** Lichtstreuung

zeitliche Inhomogenitäten/Fluktuationen – **inelastische** Lichtstreuung



durch Lichtstreuung wird gerichtetes Licht in **diffuses Licht** verwandelt



25

Elastische Lichtstreuung

spektraler Streuungskoeffizient $\sigma(\lambda) = \frac{J_{\text{gestreut}}}{J_{\text{einfallend}}}$

Rayleigh-Streuung

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

$\sigma_{\text{Rayleigh}} \sim \frac{d^6}{\lambda^4}$ 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

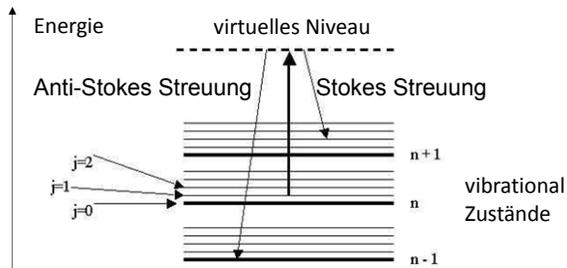
nicht-selektive Streuung

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



26

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

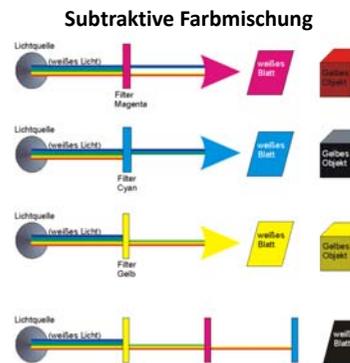
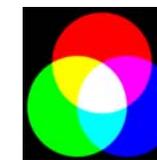
die Intensität des inelastisch gestreuten Lichts ist um 2 bis 3 Größenordnungen geringer als das elastisch an den Molekülen rückgestreute Licht

27

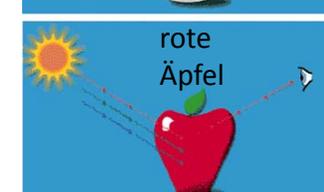
Farbe von Gegenständen, sehr komplex: Reflexion + Streuung + Absorption

Additive Farbmischung

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



C: cyan
M: magenta
Y: yellow = gelb



28