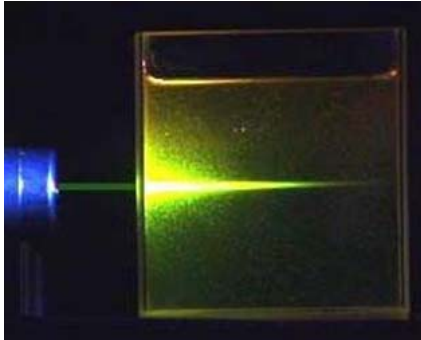


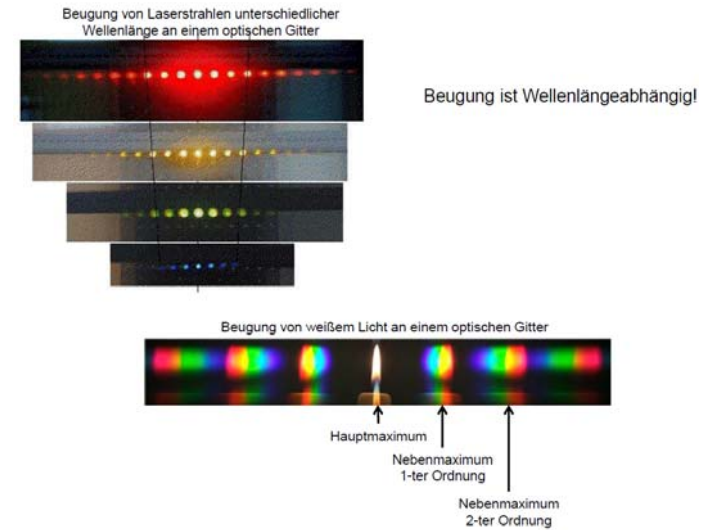
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

## Auflösungsgrenze Lichtabsorption Lichtstreuung



KAD 2020.10.06

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

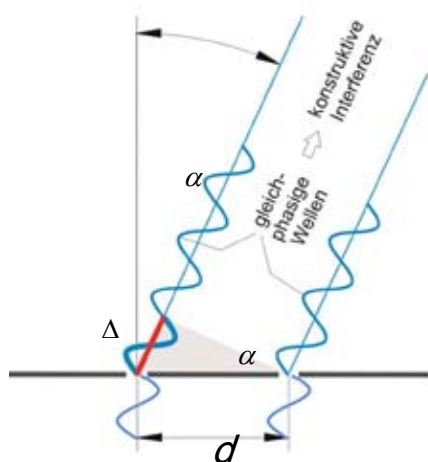


2

## Beugung am Gitter

Amplitudengitter

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



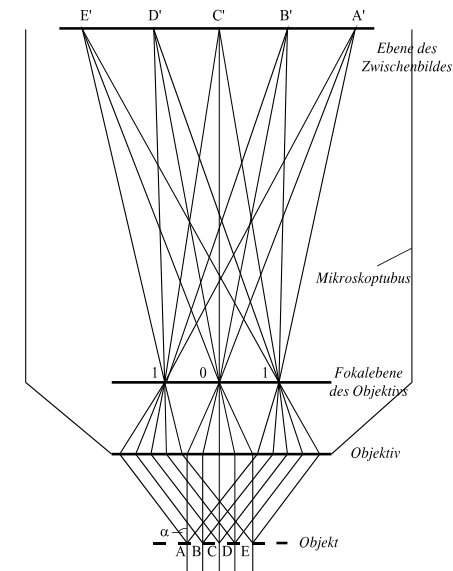
$$\Delta = d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

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

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

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.

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

$\omega$ : 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

$\lambda$ : 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

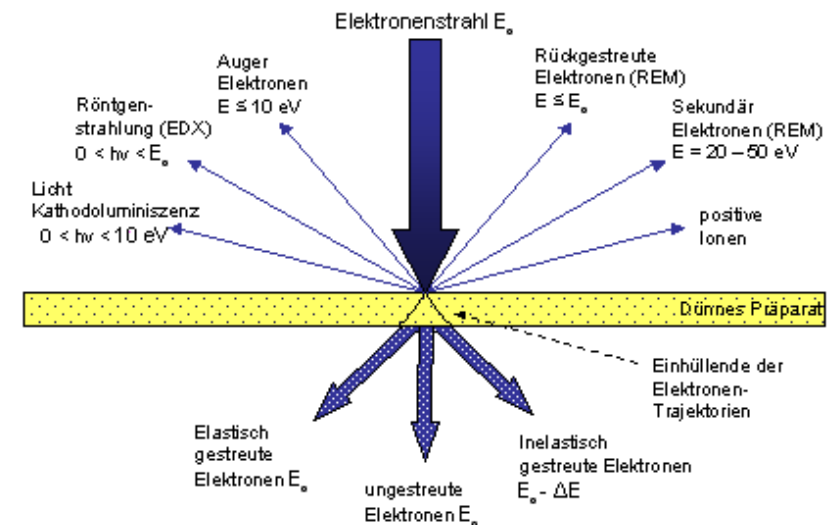
**Diffraktionsmethoden/Beugungsmethoden:**

Röntgendiffraktion, Elektronendiffraktion, Neutronendiffraktion

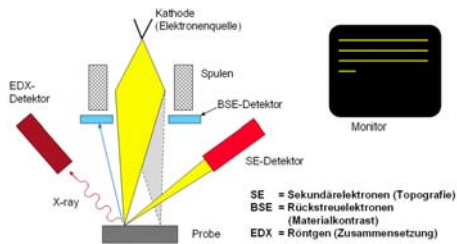
$$\lambda_{\text{Rtg}}, \lambda_e, \lambda_n \ll \lambda_{\text{Licht}}$$

Untersuchungsmöglichkeit von submikroskopische Strukturen

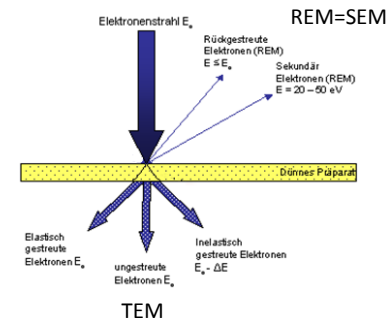
7



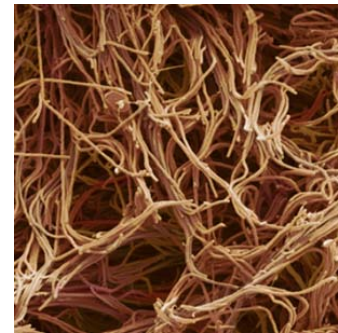
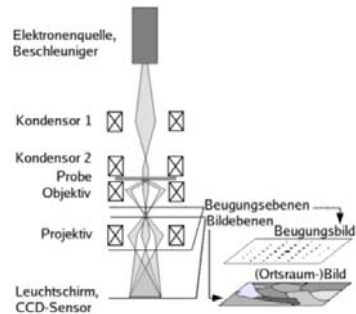
8



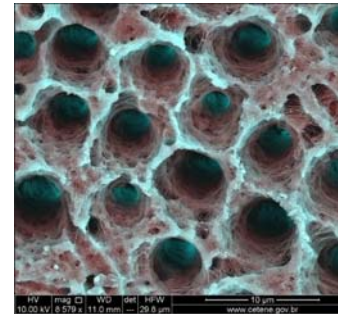
**Rasterelektronenmikroskop**  
die erzeugte Bilder sind Abbildungen  
der Objektoberflächen  
relativ geringere Auflösung  
die Probe bleibt mechanisch intakt



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



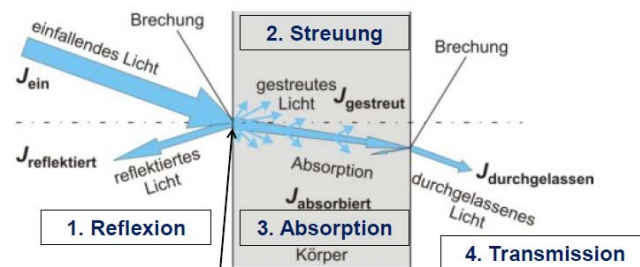
**Bakterien auf den Zähnen**  
30 000 fache Vergrößerung



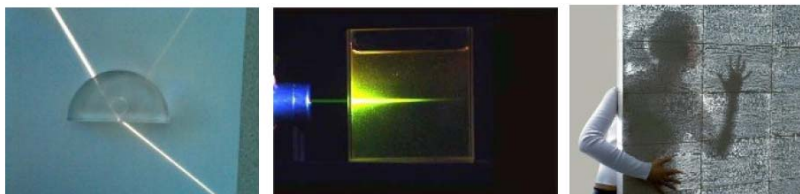
**Dentinkanälchen**  
SEM oder TEM?

10

## Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie



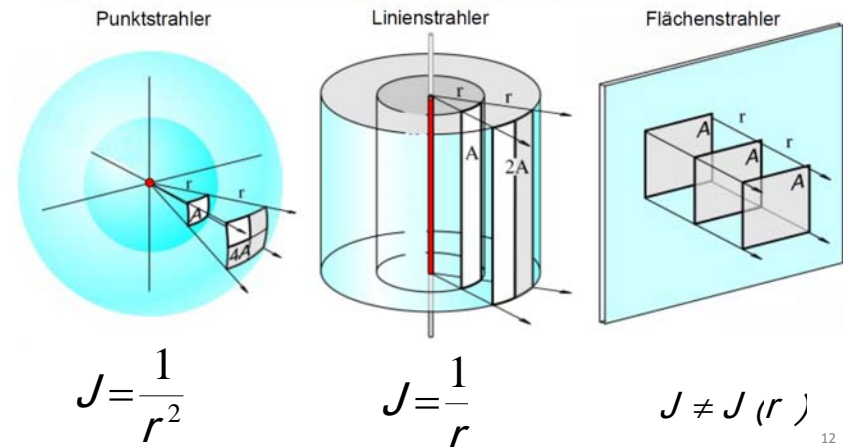
Die in den Körper eindringende  
Intensität ist  $J_0: J_0 = J_{\text{ein}} - J_{\text{reflektiert}}$



11

## Über die Geometrie der Strahlenquellen. Modellvorstellungen

$J(r)$  bei verschiedenen Strahlenquellen von unterschiedlicher Geometrie:



$$J = \frac{1}{r^2}$$

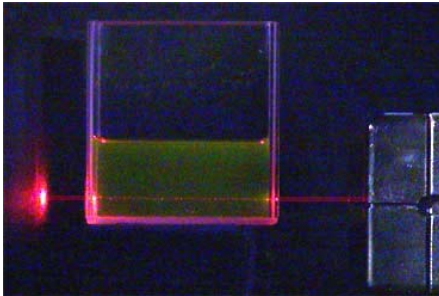
$$J = \frac{1}{r}$$

$$J \neq J(r)$$

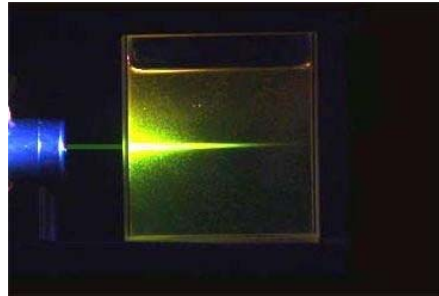
12



## 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

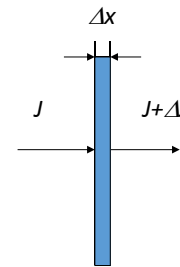
13

## Quantitative Charakterisierung der Absorption

einfachste Situation: sehr kleine (infinitesimal kleine) Schichtdicke

(Parallelstrahl, senkrecht fällt auf ein Medium)

$J$ : die eintretende Intensität



$\Delta J$ : Veränderung der Intensität ( $<0$ )

$J + \Delta J$ : die ausretende Intensität

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

$\mu$ : charakterisiert das Medium (Schwächungsfaktor)

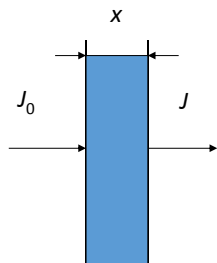
$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\mu J$$

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

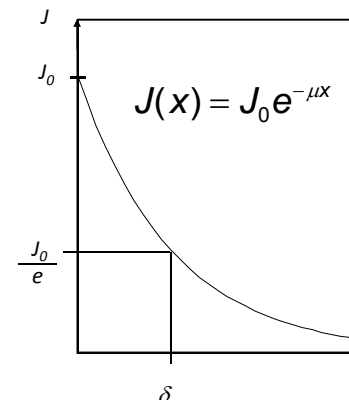
$J_0$ : die eintretende Intensität

$J$ : die austretende Intensität

$\mu$ : der (lineare) Schwächungskoeffizient  
(Schwächungsfaktor, Absorptionskoeffizient), Einheit: 1/m, 1/cm

15

## Graphische Darstellung des Schwächungsgesetzes



Einheit von  $\mu$ : 1/m, 1/cm

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

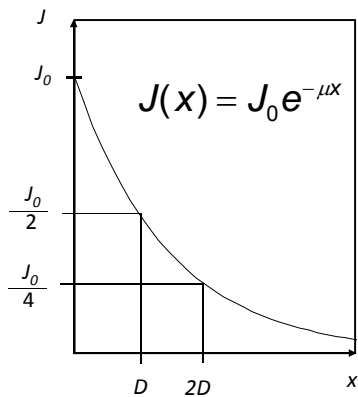
$$J(x) = J_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

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

$\delta$ : 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

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

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

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

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

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

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	$\infty$	$\infty$
	Durchlässigkeit		Absorbanz
	wichtige Grösse	keine Bedeutung	wichtigste Grösse

18

## Schwächungskoeffizient

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

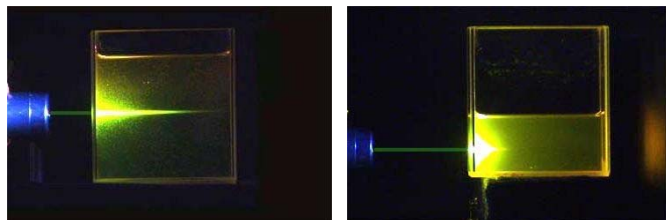
$$\mu = \mu(\text{Medium; Strahlung}) = \mu(Z, c; \lambda),$$

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

$c$ : die Konzentration der Lösung

$\lambda$ : die Wellenlänge

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



19

## Lambert-Beersches Gesetz

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

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

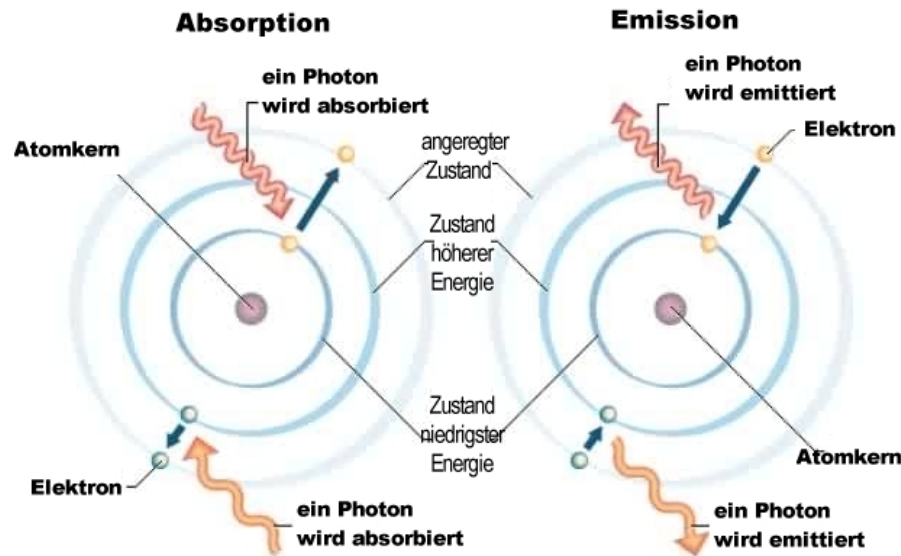
Gültigkeit: für dünne Lösungen

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

wichtig: nicht hängt von der Konzentration ab

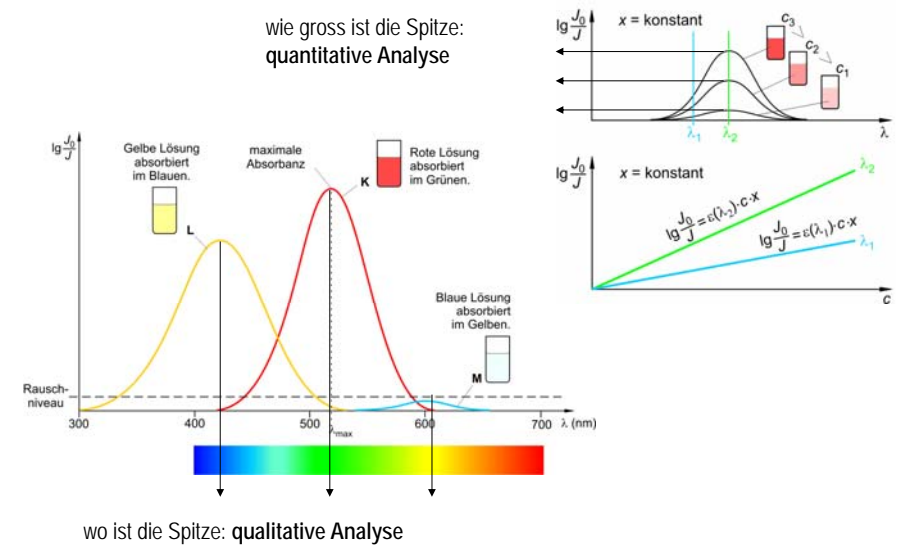
20

# Atomare Grundlagen der Absorption und Emission



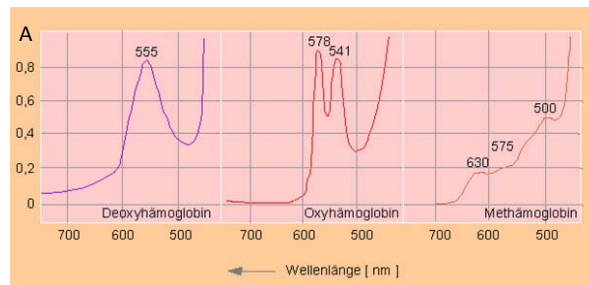
21

## Absorptionsspektrum



22

## Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Gewebe

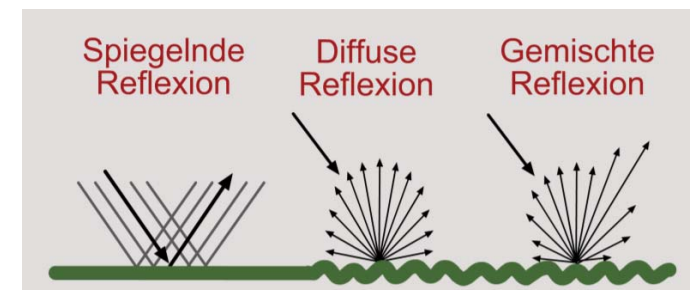


## Photopolymerisation, Lichthärtung



23

## 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

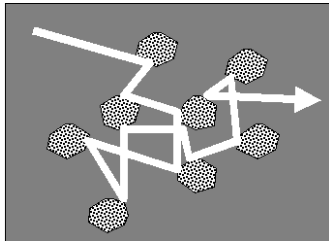
24

# Lichtstreuung

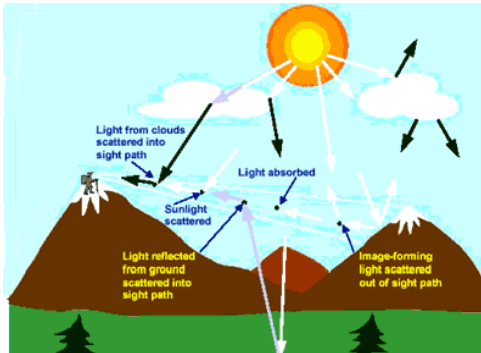
Ablenkung des Lichtes an kleinen Teilchen oder rauen Oberflächen.  
Inhomogenitäten in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes streuen Licht

**räumliche** Inhomogenitäten – **elastische** Lichtstreuung

**zeitliche** Inhomogenitäten/Fluktuationen – **inelastische** Lichtstreuung



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



25

# Elastische Lichtstreuung

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

## 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

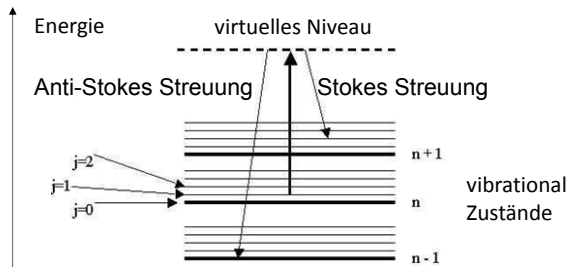
## nicht-selektive Streuung

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

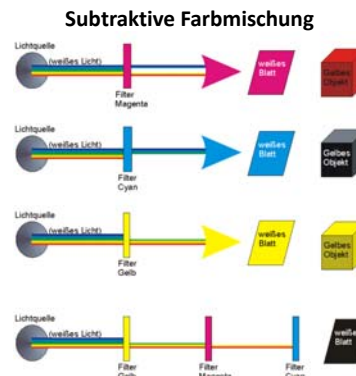
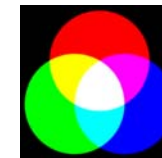
die Intensität des inelastisch gestreuten Lichts ist um 2 bis 3 Größenordnungen geringer als das elastisch an den Molekülen rückgestreute Licht

27

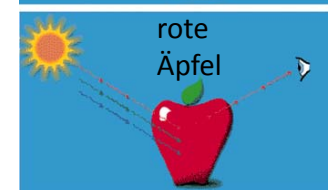
# Farbe von Gegenständen, sehr komplex: Reflexion + Streuung + Absorption

**Additive Farbmischung**

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



C: cyan  
M: magenta  
Y: yellow = gelb



28