

## Streuung elektromagnetischer Strahlung

Wird eine spektral zu untersuchende Probe mit Licht durch- bzw. bestrahlt, so tritt neben der *Absorption* stets eine Lichtschwächung infolge von *Streuung* ein. Der Begriff Streuung ist dabei eine Sammelbezeichnung für verschiedene physikalische Phänomene wie Brechung, Beugung, Reflektion etc., die einen Lichtstrahl (eine elektromagnetische Welle) von seinem geometrisch vorgeschriebenen Weg ablenken und dabei möglicherweise auch seine Phase und seine Wellenlänge  $\lambda$  verändern. Die gesamte Streuleistung einer Probe läßt sich in Analogie zum Lambert-Beer-Gesetz pauschal nach der Formel

$$I(x) = I_0 e^{-S'x} \quad \text{mit } S' = N \cdot \sigma_s$$

bestimmen bzw. beschreiben. Dabei ist  $I_0$  die Intensität des einfallenden Lichtstrahl und  $I(x)$  seine durch Streuung etc. verringerte Intensität in der Probentiefe  $x$ .  $S'$  ist der *Streukoeffizient* (auch *Schwächungskonstante* oder *scheinbarer Extinktionskoeffizient* genannt).  $N$  ist die Teilchenzahldichte und  $\sigma_s$  der sog. *Streuquerschnitt*. Letzterer ist ein Maß für die Größe der wirksamen Querschnittsfläche der streuenden Teilchen, innerhalb derer ein einfallendes Lichtquant abgelenkt wird und damit auch ein Maß für die *Streuintensität*.

Je nachdem, ob die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichtes vor und nach dem Streuprozess gleich oder verschieden ist, spricht man von *elastischer* oder *inelastischer* Streuung.

Besteht zwischen dem einfallenden und dem gestreuten Licht eine feste Phasenbeziehung, spricht man von *kohärenter* Streuung ( $\Delta\varphi = \text{const.}$ ), besteht diese nicht, spricht man von *inkohärenter* Streuung.

Wichtige *inelastische Streuprozesse* sind die *Compton-Streuung*, bei der das einfallende Lichtquant einen Teil seiner Energie bzw. seines Impulses auf das streuende Teilchen überträgt, sowie die *Raman-Streuung*, bei der aufgrund von Wechselwirkungen mit Schwingungsquanten eines streuenden Moleküls ein kleiner Teil des Streulichtes typische Frequenzverschiebungen von  $10^{11}$  bis  $10^{13}$  Hz (sichtbares Licht  $\sim 10^{14}$  Hz) aufweist. Auch Fluoreszenz, Phosphoreszenz und Lumineszenz lassen sich als inelastische Streuung auffassen.

*Inelastische Streuprozesse* liefern Informationen über *energetische Zustände* oder Zustandsänderungen in den bestrahlten/streuenden Proben. Dazu wird die Probe mit Licht (elektromagnetischer Strahlung) konstanter oder variabler Wellenlänge bestrahlt und die Änderung der Streuintensität in bestimmten festen Richtungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge/Frequenz/Energie der Streustrahlung mit sog. Spektrometern gemessen und ausgewertet.

*Elastische Streuprozesse* liefern Informationen über *geometrische Strukturen*. Die Streuintensität  $I_s$  hängt hier sowohl von der Wellenlänge des Lichts und der Art der streuenden Teilchen als auch von deren Größe und Form ab, und sie ist darüber hinaus u.U. auch noch richtungsabhängig. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Verhältnis von Wellenlänge  $\lambda$  zur Teilchengröße  $d$ :

Sind die streuenden Teilchen klein gegenüber der Wellenlänge, sind die Streuwellen aller Streuzentren auf und in diesen kleinen Teilchen für jede beliebige Streurichtung jeweils "in Phase". Die Streuintensität  $I_s$  eines Teilchens ist damit proportional zur 2. Potenz der Zahl  $P$  seiner Streuzentren ( $I_s \sim P^2$ ). Und da außerdem die Zahl der Streuzentren pro Teilchen proportional zum Teilchenvolumen und damit zur 3. Potenz der Teilchengröße  $d$  ist, steigt die Streuintensität  $I_s$  für solche kleinen Teilchen mit der 6. Potenz der Teilchengröße ( $I_s \sim d^6$ ).

Sind die streuenden Teilchen gleich groß oder größer als die Wellenlänge des eingestrahnten/gestreuten Lichtes, sind die Streuwellen der verschiedenen Streuzentren auf und in diesen großen Teilchen nur noch in Einstrahlrichtung "in Phase". Für alle anderen Streurichtungen kommt es zu streuwinkelabhängigen, verstärkenden oder schwächenden *Interferenzeffekten* zwischen den Streuwellen der verschiedenen Bereiche der einzelnen Teilchen (siehe Abb.1), und die Streuintensität  $I_S$  solcher großen Teilchen steigt nur noch mit dem Quadrat der Teilchengröße  $d$  ( $I_S \sim d^2$ ).

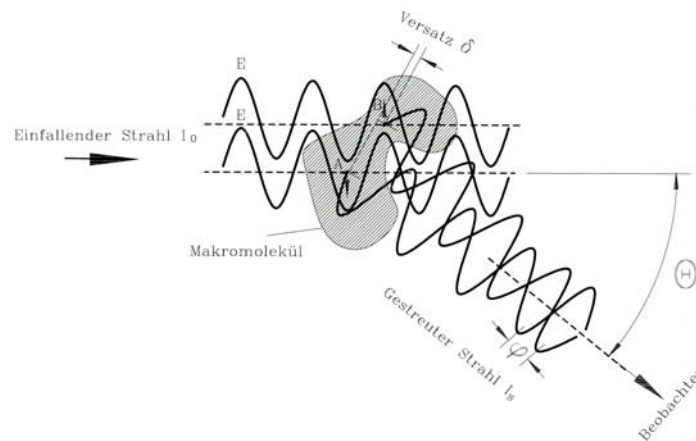


Abb1. Streuung kollimierten, monochromatischen und kohärenten Lichts an einem Teilchen, dessen Größe vergleichbar mit der Wellenlänge des eingestrahnten/gestreuten Lichtes ist.

Die Abhängigkeit der Streuintensität  $I_S$  von der Teilchengröße  $d$  ist für sichtbares Licht der Wellenlänge  $\lambda = 633 \text{ nm}$  (He-Ne-Laser) doppeltlogarithmisch in Abb. 2 dargestellt.

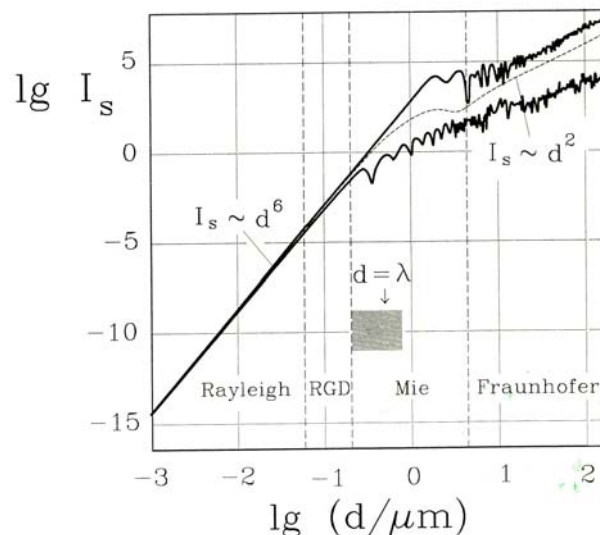


Abb. 2 Streuintensität  $I_S$  als Funktion der Partikelgröße  $d$  im Größenbereich  $10^{-3} - 200 \mu\text{m}$  für sichtbares Licht der Wellenlänge  $\lambda = 633 \text{ nm}$  (He-Ne-Laser).

Je nach Partikelgröße und entsprechend der unterschiedlichen theoretischen Behandlung wird zwischen *Rayleigh-* ( $1 \text{ nm} \leq d \leq 60 \text{ nm}$ ), *Rayleigh-Gans-Debye-* (RGD,  $60 \text{ nm} \leq d \leq 200 \text{ nm}$ ), *Mie-* ( $200 \text{ nm} \leq d \leq 5 \mu\text{m}$ ) und *Fraunhofer-* ( $5 \mu\text{m} \leq d < 1 \text{ mm}$ ) *Streuung* unterschieden.

Nach der *Maxwellschen* Theorie wird Licht als elektromagnetische Transversalwelle beschrieben, wobei magnetische ( $\mathbf{H}$ ) und elektrische ( $\mathbf{E}$ ) Komponenten (senkrecht zueinander) in Phase schwingen. Ihr (mathematisches) Kreuzprodukt  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ , der sogenannte *Poynting-Vektor*, zeigt in Richtung des Energieflusses (der Ausbreitungsrichtung des Lichts) und ist ein Maß für die Intensität.

Bei der elastischen Streuung erregt der elektrische Vektor  $\mathbf{E}$  einer (in Z-Richtung) linear polarisierten elektromagnetischen Lichtwelle eine erzwungene Sinusschwingung der „Elektronenwolke“ des Streuers. Das Ausmaß, mit der diese Verschiebung stattfindet, wird durch den Polarisierbarkeitstensor  $\alpha$  beschrieben. Das Resultat ist ein oszillierendes elektrisches Dipolmoment  $\mu$ . Ein derart oszillierende Ladung entspricht nach den Gesetzen der Elektrodynamik einem winzigen *Hertzschen Dipol*  $= \alpha \mathbf{E}$  mit charakteristischem Abstrahlungsmuster.

Für die elastische Streuung linear polarisierten Lichts an Teilchen, die deutlich kleiner sind als die Wellenlänge des eingestrahnten Lichts, gilt nach der *Maxwellschen* Theorie für die Feldstärke  $\mathbf{E}_r$  bzw. die Intensität  $I_s$  des abgestrahlten/gestreuten Lichts im Abstand  $r$  und einem Winkel  $\Phi$  zur Richtung (Z) des elektrischen Dipols  $\mu$  und zur Intensität  $I_0$  des eingestrahnten Lichts die sogenannte *Rayleigh-Gleichung*

$$\frac{I_s}{I_0} = \frac{E_r^2}{E_0^2} = \frac{\left( \frac{\alpha E_0 4 \pi^2}{r \lambda^2} \sin \Phi \right)^2}{E_0^2} = \frac{16 \pi^4 \alpha^2 \sin^2 \Phi}{r^2 \lambda^4}$$

und die Abstrahlungs- bzw. Streucharakteristik hat die in Abb. 3 dargestellte Form.

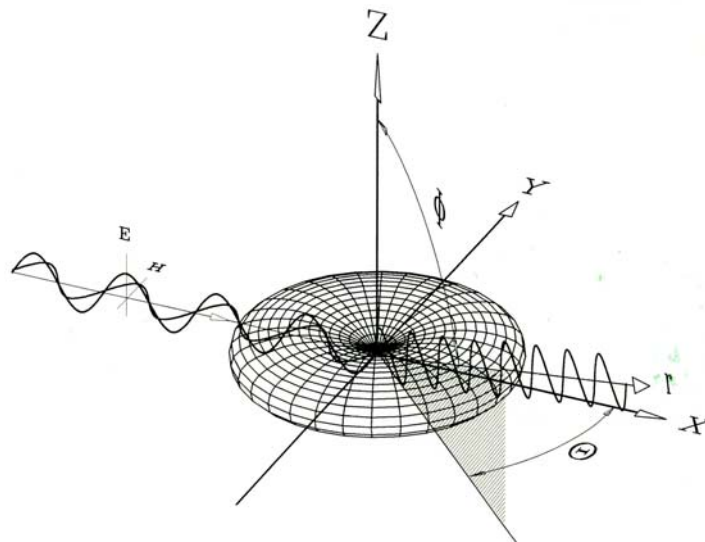


Abb. 3 Abstrahlungs- bzw. Streucharakteristik (Orte gleicher Intensität) der *Rayleigh*-Streuung kleiner Teilchen bei Einstrahlung monochromatischen, *linear polarisierten* Lichts.

Die *Rayleigh*-Gleichung und Abb. 3 zeigen, dass

- die Streuintensität mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt,
- die Streuintensität von  $\sin^2 \Phi$  abhängt nicht jedoch vom Azimut-/Streuwinkel  $\theta$ ,
- die Streuintensität mit der vierten Potenz der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts abnimmt

Bei Verwendung unpolarisierten Lichts geht die *Rayleigh*-Gleichung über in die Gleichung

$$\frac{I_s}{I_0} = \frac{8 \pi^4 \alpha^2}{r^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \theta)$$

und die Abstrahlungs- bzw. Streucharakteristik hat die in Abb. 4 dargestellte Form.

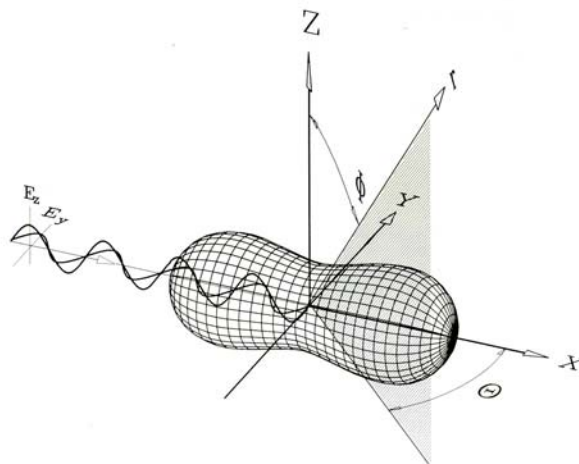


Abb. 4 Abstrahlungs- bzw. Streucharakteristik (Orte gleicher Intensität) der *Rayleigh*-Streuung kleiner Teilchen bei Einstrahlung monochromatischen, *unpolarisierten* Lichts.

Die Verteilung der *Rayleigh*-Streustrahlung kleiner Teilchen bei Einstrahlung monochromatischen, unpolarisierten Lichts ergibt sich durch Rotation des Rotationskörpers aus Abb. 3 um die X-Achse. Der resultierende Streukörper ist spiegelsymmetrisch zur Y-Z-Ebene. Die Verteilung der *Rayleigh*-Streustrahlung ändert sich hier mit dem Azimutwinkel  $\theta$  nicht jedoch mit  $\Phi$ .

Nimmt die Größe der streuenden Teilchen zu, verschwindet die Spiegelsymmetrie zur Y-Z-Ebene, und die Streuintensität in Einstrahlrichtung wird nimmt zu (siehe Abb. 5).

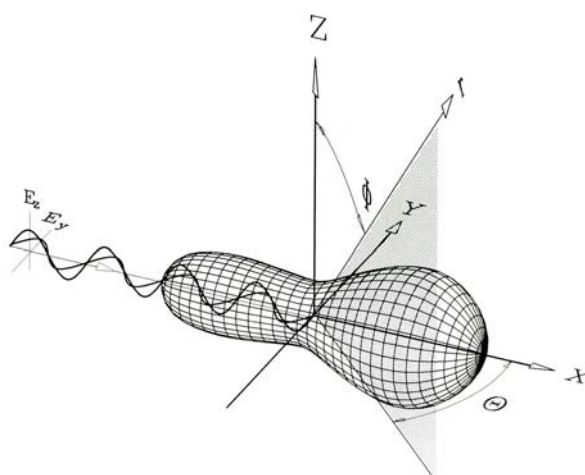


Abb. 5 Abstrahlungs- bzw. Streucharakteristik großer Teilchen (vgl. Abb.4).

Die Wellenlänge des Lichtes bestimmt auch die Unterscheidbarkeit der streuenden Partikel und die Erkennbarkeit von Strukturen und Formen, also die geometrische Auflösung, da diese umgekehrt proportional zu  $\lambda^2$  ist.