

4.14. Lichtstreuung

Lichtstremessungen werden zur Untersuchung kleiner Partikel sehr häufig eingesetzt, z. B. wird die Größenbestimmung von dispergierten Partikeln (Fetttröpfchen, Bakterien, ...) standardmäßig durch Lichtstreuung durchgeführt, weil die Methode schnell und einfach in der Anwendung ist.

SICHERHEITSHINWEIS: Bei diesem Versuch wird mit Laserstrahlung gearbeitet. Bitte beachten Sie die hierfür geltenden Sicherheitsregeln. Vor allem darf der Laserstrahl nie direkt ins Auge gelangen.

Ziel

- Bestimmung der Partikelgrößen von unterschiedlichen monodispersen kolloidalen Lösungen aus der Winkelverteilung der statischen Lichtstreuung.
- Qualitative Beobachtungen zur dynamischen Lichtstreuung an einer der Lösungen.

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Was versteht man unter Interferenz?
- Welche besonderen Eigenschaften von Laserstrahlung sind für diesen Versuch wichtig?
- Was ist der Unterschied zwischen statischer und dynamischer Streuung?
- Wann spricht man von Rayleigh-Streuung, wann von Mie-Streuung?
- Wieso ist der Himmel blau?
- Was versteht man unter einem Speckle-Muster?¹

Zubehör

- grüner Laserpointer (Wellenlänge $\lambda = 532$ nm, Laserklasse 2, Leistung elektronisch geregelt < 1 mW)
- Repräsentativ mit Halter für Laserpointer und Probe

¹Die Bezeichnung kommt aus dem Englischen ((engl.) *speckle* = Sprenkel, Tupfen, Flecken), daher verwendet man die Aussprache [sp'ekəl].

- Sammellinse (Brennweite $f = 40 \text{ mm}$) in einem zur Fokussierung verschiebbaren Tubus
- Objektträger und Deckgläschen
- Kolloidsuspensionen (je nach Vorrat kugelförmige Polystyrol- oder Silica-Partikel mit verschiedenen Nenndurchmessern in Wasser):
 - Brechungsindex von Polystyrol / Latex: 1.59
 - Brechungsindex von Silica: 1.54
 - Brechungsindex von Wasser: ≈ 1.336
- Pasteurpipetten
- Fotodetektor, mit PC-Programm gesteuert (LabView)

Grundlagen

Streuung an einzelnen Objekten

Läuft eine Lichtwelle durch ein Medium, in dem Brechzahl-Inhomogenitäten (Atome, Moleküle, Bakterien, Tröpfchen in einer Emulsion . . . , aber beispielsweise auch Dichte- oder Temperaturschwankungen) vorhanden sind, so wird Licht aus der Welle herausgestreut. Je nach Form und Größe des streuenden Objekts wird die gestreute Lichtintensität unterschiedlich in den umgebenden Raum verteilt. Um diese Intensitätsverteilung im Experiment beobachten zu können muss die Konzentration der Streuer so gering sein, dass das Licht zwischen Lichtquelle und Detektor tatsächlich nur ein einziges Mal gestreut wird.

4.14.0.3.2. Rayleigh-Streuung: Ist das streuende Objekt viel kleiner als die Wellenlänge des gestreuten Lichtes (Atome, Moleküle), so bildet der Streuer einen hertzschen Dipol und strahlt mit einer Intensität

$$I(\theta) \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad \text{bzw.} \quad I(\theta) \propto \omega^4, \quad (4.14.1)$$

ist also stark abhängig von der Wellenlänge λ bzw. Frequenz ω des gestreuten Lichtes. Aufgrund der Symmetrie um die Dipolachse ist die Streuung im Regime der Rayleigh-Streuung in Vorwärts- wie in Rückwärtsrichtung gleich wahrscheinlich, was man im Allgemeinen als „isotrope Streuung“ bezeichnet.

4.14.0.3.3. Mie-Streuung: Streuer, deren Abmessungen vergleichbar sind mit der Wellenlänge des gestreuten Lichtes, gleichen eher einer Ansammlung von Hertzchen Dipolen, deren Abstrahlung zu allem Überfluss miteinander und mit dem einfallenden Licht interferiert. Für sphärische Teilchen wurde dieses Problem von dem deutschen Physiker Gustav Mie [Mie08] und dem dänischen Physiker Ludvig Lorenz gelöst, weshalb man von Mie-Streuung oder auch Lorenz-Mie-Streuung spricht.

Details der mathematischen Beschreibung sollen hier nicht betrachtet werden. Wir verwenden zur Auswertung des Experimentes ein Simulationsprogramm, das die relevanten Beziehungen enthält.

4.14.0.3.4. Geometrische Optik: Für sehr große Objekte (Linsen, Spiegel, glatte Grenzflächen) verwendet man üblicherweise die Beschreibung der geometrischen Optik (Brechung, Reflexion, ...). Hier gilt das Snellius'sche Brechungsgesetz:

Trifft ein Lichtstrahl unter dem zum Einfallslot gemessenen Winkel α auf die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex n_1 und n_2 , so verläuft er im zweiten Medium unter dem Winkel β zum Einfallslot, wobei gilt:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad . \quad (4.14.2)$$

Speckles

Auch Wellen, die an benachbarten Teilchen in der Lösung gestreut werden, können miteinander interferieren. Das Streumuster der Einzelstreuung wird daher überlagert von einem körnigen Interferenzmuster, den sog. Speckles. Durch die Bewegung der streuenden Teilchen (Diffusion, brownische Bewegung) kommt es zu einer zeitlichen Veränderung der beobachteten Streuintensitäten. Bei der Betrachtung zeigt sich das als „Flimmern“. Der Effekt wird besser beobachtbar, wenn die Zahl der an der Streuung beteiligten Teilchen geringer ist. Hierzu muss der Laserstrahl durch eine Linse auf ein möglichst kleines Volumen der Probe fokussiert werden.

Statische und dynamische Lichtstreuung

Statische und dynamische Lichtstreuung betrachten keine unterschiedlichen streuenden Systeme, sondern konzentrieren sich auf unterschiedliche Aspekte der Streuung. Aus der zeitgemittelten Streuintensität pro Winkeleinheit, der Messgröße der statischen Lichtstreuung, erhält man Informationen über Form und Struktur der Streuer. Die dynamische Lichtstreuung ermittelt aus den zeitlichen Fluktuationen des Messsignals die Geschwindigkeit, mit der sich die streuenden Teilchen bewegen.

Versuchsdurchführung

Hinweis: Je nach Größe sinken die Kolloide in der Suspension mehr oder weniger schnell nach unten. Es ist daher wichtig, dass Sie die Suspensionen vor dem Gebrauch gründlich(!) schütteln.

Es ist übrigens denkbar einfach, den Erfolg des Schüttelns zu kontrollieren: Wenn der Inhalt des Fläschchens klar aussieht, wird offensichtlich zu wenig sichtbares Licht darin gestreut. Die Kolloidpartikel befinden sich dann am Boden des Fläschchens und sind dort ggf. als weißlicher Belag zu erkennen. Die Aussage über die Lichtstreuung gilt gleichermaßen für das Umgebungslicht wie für das Laserlicht. Sie müssen also auf jeden Fall so lange

schütteln, bis die Suspension „trüb“ aussieht, d. h. bis genügend streuende Kolloidpartikel in der Suspension verteilt sind.

Statische Lichtstreuung:

1. Bringen Sie mit der Pipette einen Tropfen Kolloidsuspension auf einen Objektträger auf.
2. Durchstrahlen Sie die Probe mit dem Laser und markieren Sie auf einem Blatt Papier („Schirm“) die Radien der Ringe der Minima bzw. Maxima der Streuintensität.
3. Messen Sie den Abstand der Probe vom Schirm.
4. Wiederholen Sie die Messung für die anderen Partikelgrößen.

Dynamische Lichtstreuung:

5. Wählen Sie für diesen Versuchsteil die kleinste Partikelgröße.
6. Fokussieren Sie den Laser mit Hilfe der Sammellinse auf ein möglichst kleines Probenvolumen und beobachten Sie qualitativ das Speckle-Muster², also die räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Streuintensität.
7. Bringen Sie den Detektor in den Bereich des Speckle-Musters und betrachten Sie mittels des PC-Programms *Lichtstreuung* die zeitlichen Schwankungen der Intensität.

Speichern Sie die Daten, um sie für den Bericht zu verwenden.

Hinweis: Lassen Sie sich die Bedienung des Programms zunächst von Ihrer Betreuerin/Ihrem Betreuer erklären. Sie dürfen dann gerne auch selber mit dem Programm „herumspielen“.

Auswertung

Statische Lichtstreuung:

1. Berechnen Sie aus den gemessenen Strecken (senkrechter Abstand des Schirms von der Probe, seitliche Ablenkung des Lichts) die Streuwinkel zu den Maxima und Minima des Streubildes.
2. Berechnen Sie unter Berücksichtigung des nach Gleichung (4.18.2) beim Austritt aus der Probe (maßgeblich ist hierbei der Brechungsindex des Wassers) in die Luft auftretenden Brechung des gestreuten Lichtes die ursprünglichen Streuwinkel in der Kolloidsuspension.

Hinweis: Der zwischen der wässrigen Suspension und der Luft liegende Objektträger aus Glas kann bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden. Der sich ergebende Winkel wäre auch ohne diese Zwischenschicht der gleiche (siehe auch Aufgabenteil).

²von (engl.) *speckle* = Sprenkel, Tupfen, Flecken

3. Simulieren Sie die Streuung an kugelförmigen Partikeln, und variieren Sie den Partikeldurchmesser, um eine Übereinstimmung der simulierten mit den von Ihnen gemessenen Streuwinkeln zu erhalten (siehe dazu Literaturhinweise am Ende dieser Versuchsanleitung). Der Durchmesser, für den Sie die beste Übereinstimmung finden, ist das Ergebnis Ihres Experimentes, nämlich der von Ihnen ermittelte Partikeldurchmesser. Dieser kann u. U. etwas vom nominellen Durchmesser der Partikel abweichen. Schätzen Sie möglichst realistisch unter Berücksichtigung möglicher Unsicherheitsquellen ab, wie groß die Unsicherheit des von Ihnen ermittelten Durchmessers ist.

Dynamische Lichtstreuung:

4. Diskutieren Sie qualitativ Ihre mit dem Programm `Lichtstreuung.vi` aufgenommenen Daten unter folgenden Gesichtspunkten:
 - Welche physikalische Größe wurde gemessen, und was können sie über den Verlauf der Kurve sagen?
 - In welcher Weise ändert sich das Speckle-Muster, wenn Sie den Laserstrahl im Bereich der Probe stärker oder schwächer fokussieren?

Fragen und Aufgaben

1. Zeigen Sie durch zweimalige Anwendung des Snellius'schen Brechungsgesetzes aus Gleichung (4.18.2), dass der sich im Experiment ergebende Winkel für die Ausbreitung in Luft unabhängig davon ist, ob das Licht zwischen der wässrigen Lösung und der Luft noch eine zusätzliche Glasscheibe durchläuft.
Zeichnen Sie dazu eine Skizze für die Richtungen eines Lichtstrahls beim Durchgang durch Wasser/Glas/Luft.³
2. Simulieren Sie die Streuung in der Erdatmosphäre als Streuung an sehr kleinen „Luftkugeln“ im Vakuum (siehe dazu Literaturhinweise am Ende dieser Versuchsanleitung).
 - a) Was hat die unterschiedliche Streuintensität für die verschiedenen Wellenlängen mit der blauen Farbe des Himmels zu tun?
 - b) Bienen können die Polarisationsrichtung und den Polarisationsgrad von Licht sehen und nutzen dies zur Feststellung der Sonnenrichtung für den Fall, dass bei insgesamt geringer Bewölkung die Sonne selbst hinter einer Wolke verschwindet.
Bei welchem Winkel ist der Polarisationsgrad des Lichtes am höchsten?

³Falls die Winkel sehr groß werden, kann es unter Umständen zu Totalreflexion kommen, dann kommt das Licht gar nicht mehr „unten“ an. Dieser Fall ist aber bei unserer Anordnung ausgeschlossen, die betrachteten Winkel sind dafür zu klein.

Ergänzende Informationen

Zirkular polarisiertes Licht

Es gibt noch weitere Varianten der Polarisation. Bei sog. zirkular polarisiertem Licht beschreiben die Vektoren der elektrischen und magnetischen Feldstärke eine Schraubenlinie. Man unterscheidet rechts- und linkszirkulare Polarisation, je nachdem, ob die Schraubenlinie rechts- oder linksherum dreht. Erstaunlicherweise gibt es auch hierfür Rezeptoren in der Natur. So wurde im Jahr 2008 entdeckt, dass männliche Fangschreckenkrebe (*Odonotodaktylus*) darauf trainiert werden können, ihr Futter an Stellen zu suchen, die durch zirkulare Polarisation markiert sind. Die Bedeutung dieser Fähigkeit ist derzeit weitgehend unklar. Möglich wäre, dass sie als „geheimer“ Kommunikationskanal eine Rolle spielt [CKC⁺08].

Literaturhinweise

Im Internet sind viele Programme zur Simulation der Mie-Streuung verfügbar. Die einfacheren Versionen, die sich auf die Berechnung an kugelförmigen Partikeln beschränken, sind für diesen Praktikumsversuch ausreichend und meist kostenlos erhältlich.

Besonders geeignet ist z. B. das Windows[®]-Programm **MiePlot**, das Sie unter der Adresse <http://philiplaven.com/MiePlot.htm> herunterladen können.⁴

- Falls Ihr Betriebssystem nicht standardmäßig den Dezimalpunkt verwendet, müssen Sie dies zumindest für die Zeit der Verwendung von **MiePlot** umstellen (Start – Systemsteuerung – Regions- und Sprachoptionen – Regionale Einstellungen – Anpassen – Dezimaltrennzeichen)
- Starten Sie das Programm **MiePlot 4.0.01**
- Ermittlung der Teilchendurchmesser (Auswertung Aufgabe 3):
 - Stellen Sie auf die Verwendung des Durchmessers an Stelle des Radius um mit Advanced – Radius or diameter – Diameter
 - Nehmen Sie folgende Einstellungen vor:
 - * Wavelength (μm) in vacuo: 0.532
 - * Refractive index (sphere): Real: 1.59, Imaginary: 0
 - * Die Einstellung des Brechungsindex des umgebenden Mediums erfolgt über Advanced – Refractive Index – Surrounding Medium – Water – IAPWS – Temperature: 20C
 - * Angle scale: Minimum angle: 0, Maximum angle: 40, Angular resolution: 0.1

⁴Sie brauchen dazu keine Administratorrechte. Das Programm läuft z. B. auch problemlos von einem USB-Stick.

- Geben Sie einen „geratenen“ Durchmesser ein, z. B. $5\ \mu\text{m}$.
- Starten Sie die Berechnung mit dem Knopf „New Plot“.
- Wiederholen Sie die letzten beiden Schritte und variieren Sie dabei den Durchmesser, bis Sie eine gute Übereinstimmung mit Ihren Messdaten finden.
- Simulation von „Luftkugeln“ (Fragen und Aufgaben2):
 - Nehmen Sie folgende Einstellungen vor:
 - * Advanced – Refractive index – Sphere – Air – Temperature: 0C
 - * Advanced – Refractive index – Surrounding Medium – Vacuum
 - * Drop Size: Diameter (μm): 0.001 (oder Radius (μm): 0.0005)
 - * Number of Wavelengths: 3
 - * Polarisation: Both
- Die Daten können mit File – Save numerical results as text file exportiert und dann in ein externes Plot-Programm eingelesen werden.

Wer Probleme hat, dieses Programm laufen zu lassen, kann alternativ auch die online-Simulation MieCalc unter

<http://www.lightscattering.de/MieCalc/>
nutzen.

- Zum Starten des Applets muss in Ihrem Webbrowser die Ausführung von Java erlaubt sein (bei Firefox macht man das z. B. unter dem Menüpunkt „Extras – Einstellungen – Inhalt – Java aktivieren“).
- Starten Sie das Programm MieCalc in Ihrem Webbrowser.
- Ermittlung der Teilchendurchmesser (Auswertung Aufgabe 3):
 - Nehmen Sie folgende Einstellungen vor:
 - * In die leere Schaltfläche rechts neben „Output“ klicken und „Angular Scattering“ auswählen.
 - * Schaltfläche „Input“:
 - var/tab. (linke Spalte): theta
 - const. (rechte Spalte): lambda, d, refmed, ref, refim
 Schließen Sie dieses Fenster wieder.
 - * Schaltfläche „Output“:
 - var. (linke Spalte): theta
 - def. (rechte Spalte): ss, sp
 Schließen Sie auch dieses Fenster wieder.
 - * lambda: $0.532\ \mu\text{m}$
 - * refmed: 1.3362344

- * ref: 1.59 , refim: 0
- * theta from: 0 to: 40 , n = 400
- Geben Sie einen „gerateten“ Durchmesser ein, z. B. $d = 5 \mu\text{m}$.
- Starten Sie die Berechnung mit dem Knopf „Plot“.
- Stellen Sie die Intensitätsachse auf logarithmische Skalierung um: Menü „Axis/log y-axis“
- Wiederholen Sie die Berechnung für verschiedene Partikeldurchmesser (nur den Wert für d ändern), bis Sie eine gute Übereinstimmung finden.
- Simulation von „Luftkugeln“ (Fragen und Aufgaben2):
 - Einstellungen:
 - d: 0.001 , refmed: 1.0 , refim: 0.0
 - Die Kurven für die einzelnen Wellenlängen müssen Sie nacheinander plotten lassen:
 - * lambda: 400 , ref: 1.0002974
Plot
 - * lambda: 700 , ref: 1.0002905
Overplot
 - * lambda: 500 , ref: 1.0002935
Overplot
- Sollten sich die Daten unter File – Save Ascii nicht exportieren lassen hilft nur ein Screenshot des Graphen.

Einen Artikel zur Lichtstreuung an stäbchenförmigen Partikeln, nämlich am Tabak-Mosaik-Virus finden Sie unter [SC96].

Literaturverzeichnis

- [CKC⁺08] CHIOU, TSYR-HUEI, SONJA KLEINLOGEL, TOM CRONIN, ROY CALDWELL, BIRTE LOEFFLER, AFSHEEN SIDDIQI, ALAN GOLDIZEN, and JUSTIN MARSHALL: *Circular Polarization Vision in a Stomatopod Crustacean*. *Current Biology*, 18:429–434, March 2008.
- [Mie08] MIE, GUSTAV: *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*. *Annalen der Physik*, Vierte Folge, 25(3):377–445, 1908.
- [SC96] SANTOS, NUNO C. and MIGUEL A. R. B. CASTANHO: *Teaching Light Scattering Spectroscopy: The Dimension and Shape of Tobacco Mosaic Virus*. *Bio-physical Journal*, 71:1641–1646, September 1996.