

Lichtstreuung

Grolik Benno, Kopp Joachim

2. Januar 2003

1 Grundlagen des Versuchs

Bei der Streuung von Licht unterscheidet man im Wesentlichen zwei verschiedene Prinzipien.

- Die *Rayleigh-Streuung* tritt bei einatomigen Streuzentren auf, oder bei solchen, die im Vergleich zur Wellenlänge des verwendeten Lichtes sehr klein sind, so dass all ihre Atome durch das Licht gleichphasig angeregt werden und sich deshalb verhalten wie ein einzelnes Atom. Sie bilden schwingende elektromagnetische Dipole und senden deshalb wiederum elektromagnetische Strahlung aus.
- Sind die Streuzentren mehratomig und in der Größenordnung der Lichtwellenlänge, so beobachtet man *Mie-Streuung*. Dabei schwingen nicht mehr alle Atome des Streuzentrums in Phase, so daß man Gangunterschiede zwischen den verschiedenen Atomen gestreuten Wellen berücksichtigen muß.

Im Folgenden wollen wir die Ergebnisse diskutieren, die wir bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Streuintensität von Streuwinkel und Polarisation des einfallenden Lichtes erhalten haben.

Der Versuchsaufbau bestand aus einem Helium-Neon-Laser, der rotes, in einem 45° -Winkel polarisiertes Licht aussendete, einem weiteren Polarisationsfilter, mit dessen Hilfe man die Polarisationsrichtung noch verändern konnte, einer in Wasser suspendierten Streusubstanz sowie einem Photomultiplier, mit dessen Hilfe die Lichtintensität bei verschiedenen Streuwinkeln gemessen werden konnte.

2 Versuchsergebnisse und Fehlerquellen

2.1 Untersuchung von Hintergrundstrahlung

Zur Vorbereitung der eigentlichen Messungen wurde zunächst die Lichtintensität ohne Streusubstanz (d.h. mit reinem Wasser) unter verschiedenen Streuwinkeln gemessen, um eine eventuelle Untergrundstrahlung zu registrieren. Diese kann z.B. durch Reflexionen an Teilen der Versuchsanordnung, durch Streuung in der Luft oder im Wasser oder durch die schwache Beleuchtung der Messgeräte entstehen.

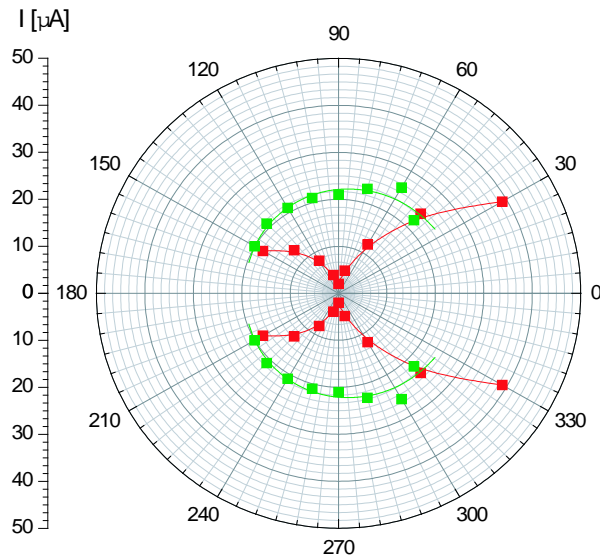


Abbildung 1: Winkelabhängigkeit der Streuintensität bei Rayleigh-Streuung für einen parallel (rote Kurve) bzw. senkrecht (grüne Kurve) zur Beobachtungsrichtung polarisierten Laserstrahl

Allerdings lag der Ausgangsstrom des Photomultipliers dabei um mehrere Größenordnungen unterhalb der Werte, die bei Vorhandensein einer Streusubstanz gemessen wurden. Die Hintergrundstrahlung ist also vollkommen vernachlässigbar und muss aus den im Folgenden erhaltenen Messwerten nicht herausgerechnet werden.

2.2 Rayleigh-Streuung

Das erste Experiment bestand in der Untersuchung einer Streusubstanz, deren Streuzentren wesentlich kleiner als die Lichtwellenlänge (633 nm, im Wasser 476 nm) waren, so dass vorwiegend Rayleigh-Streuung beobachtet werden konnte.

Gemessen wurde die Winkelabhängigkeit der Lichtintensität einmal für einen parallel zur Beobachtungsebene und einmal für einen senkrecht dazu polarisierten Laserstrahl. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt. Aufgetragen ist dabei der gemessene Ausgangsstrom des Photomultipliers, der proportional zur Lichtintensität ist. Man erkennt, dass bei dem senkrecht polarisierten Primärstrahl keine Winkelabhängigkeit vorliegt, während das parallel polarisierte Licht bevorzugt nach vorne und hinten gestreut wird, während die Intensität beim Streuwinkel $\Theta = 90^\circ$ fast auf 0 zurückgeht.

Diese Beobachtungen bestätigen die theoretischen Vorhersagen, wonach ebenfalls die Streuung des senkrecht zur Beobachtungsebene polarisierten Lichtes winkelunabhängig sein muss, während beim parallel polarisierten Laserstrahl die Intensität bei $\Theta = 90^\circ$ gleich 0 ist.

Allerdings müsste theoretisch die Intensität der Streustrahlung symmetrisch um

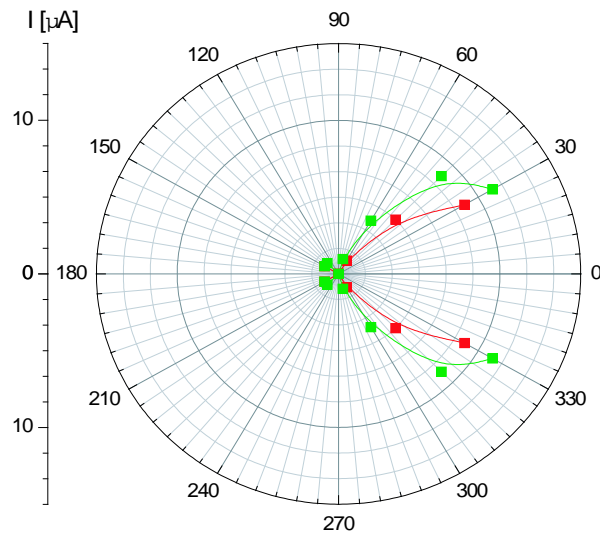


Abbildung 2: Winkelabhängigkeit der Streuintensität bei Mie-Streuung für einen parallel (rote Kurve) bzw. senkrecht (grüne Kurve) zur Beobachtungsrichtung polarisierten Laserstrahl

90° verteilt sein, während sie in unserem Versuch für große Winkel abnimmt. Das ist darauf zurückzuführen, dass hier keine optimale Rayleigh-Streuung vorliegt, da die Größe der Streuzentren mit ca. 91 nm sich um nicht einmal eine Größenordnung von der Lichtwellenlänge in Wasser (476 nm) unterscheidet. Deshalb kann die Mie-Streuung hier nicht vernachlässigt werden, die bevorzugt nach vorne erfolgt (vgl. Abschnitt 2.3).

Daneben ist die Messung mit einem analogen Amperemeter mit dem relativ großen Fehler von $\pm 3 \mu A$, das entspricht ca. $\pm 15\%$, behaftet.

2.3 Mie-Streuung

In einem weiteren Versuch wurde eine Streusubstanz verwendet, deren Teilchen so groß waren, dass die Mie-Streuung deutlich beobachtet werden konnte. In Abbildung 2 ist wiederum für parallel und senkrecht zur Beobachtungsebene polarisiertes Licht der Ausgangsstrom des Photomultipliers in Abhängigkeit vom Winkel aufgetragen.

Hier ist die Intensität des Streulichtes geringer, was auf die teilweise Auslöschung von Wellenzügen zurückzuführen ist, die bei der Streuung an dem großen Streuzentrum einen Gangunterschied erhalten. Da dieser Gangunterschied bei Rückstreuung am größten ist, kann man bei großen Winkeln fast kein Streulicht mehr beobachten. Wegen der geringen Lichtintensität ist hier das bei der Rayleigh-Streuung des parallel polarisierten Strahls beobachtete Intensitätsminimum bei $\Theta = 90^\circ$ nicht mehr nachweisbar. Es fällt lediglich auf, dass die Intensität dieses Strahls noch schneller abfällt als die des senkrecht polarisierten.

2.4 Bestimmung der Streuteilchengröße

Wie oben bereits diskutiert, erfolgt Mie-Streuung bevorzugt nach vorne. Aus dieser Asymmetrie der Streuintensität können Rückschlüsse auf die Größe der Streuzentren gezogen werden. Hierzu berechnet man aus den experimentellen Werten den sogenannten Asymmetriefaktor

$$A = \frac{I(\Theta = 45^\circ)}{I(\Theta = 135^\circ)}$$

der das Verhältnis der Lichtintensität beim Winkel von 45° zu der bei 135° angibt. Daraus kann man bei bekannter Lichtwellenlänge die Teilchengröße bestimmen. In unserem Fall ergab sich für die zur Untersuchung der Rayleigh-Streuung verwendete Probe ein Wert von 38 nm, für die zweite Probe, an der die Mie-Streuung untersucht wurde, erhielt man 265 nm.

Diese Werte erscheinen sinnvoll, da bei der Lichtwellenlänge von 476 nm an Teilchen vom Durchmesser 38 nm tatsächlich vorwiegend Rayleigh-Streuung zu erwarten ist, während an Streuzentren der Größe 265 nm Mie-Streuung erfolgt.

Allerdings war von der ersten Probe bekannt, dass die Streuzentren eine Größe von 91 nm haben. Der große Fehler von fast 60% liegt zum einen in der Ungenauigkeit des Amperemeters begründet, die unter Berücksichtigung linearer Fehlerfortpflanzung bereits eine Unsicherheit von $\pm 287\%$ impliziert.

Andererseits kann es auch vorkommen, dass das Licht an mehreren Streuzentren nacheinander gestreut wird, wodurch die Intensität bei großen Winkeln geringfügig größer wird. Dadurch ist auch der berechnete Asymmetriefaktor zu klein, und das führt letztlich zu einem zu geringen Wert für die Teilchengröße.

2.5 Der Polarisationsgrad für $\Theta = 90^\circ$

Wie oben erläutert, wird unter dem Streuwinkel von 90° theoretisch nur der senkrecht zur Beobachtungsebene polarisierte Anteil des Laserlichtes registriert. Ein Maß hierfür ist der Polarisationsgrad

$$P = \frac{I_\perp - I_\parallel}{I_\perp + I_\parallel}$$

Mit dieser Formel ergibt sich für unseren ersten Versuch (Rayleigh-Streuung) ein Polarisationsgrad von $P(\Theta = 90^\circ) = 83\%$. Dieser Wert liegt schon sehr nahe an dem idealen Wert von 100%. Für die Mie-Streuung konnte auf Grund der geringen Lichtintensität kein Polarisationsgrad ermittelt werden. Theoretisch müsste er aber für $\Theta = 90^\circ$ ebenfalls nahe bei 100% liegen.

Zu klären ist noch, warum der beobachtete Polarisationsgrad nicht exakt 100% ist. Naheliegend ist die Vermutung, bereits der Primärstrahl sei nicht vollständig polarisiert. Diese Theorie konnte jedoch experimentell widerlegt werden. Dazu wurde der Polarisationfilter, mit dessen Hilfe wir bisher die senkrecht und parallel zur Beobachtungsebene gerichteten Komponenten des Laserlichtes trennten einmal parallel und einmal senkrecht zur ursprünglichen Polarisationsrichtung des Lasers von 45° gedreht

und jeweils die Lichtintensität gemessen. Dabei konnten wir feststellen, dass bei senkrechter Ausrichtung des Polfilters die Intensität auf 0 zurückging, d.h. der Filter ist in der Lage, die unerwünschten Komponenten des Lichtstrahls vollständig herauszufiltern.

Deshalb kann die Abweichung der experimentell bestimmten Teilchengröße von dem gegebenen Wert nicht durch eine mangelhafte Polarisation des Primärstrahls erklärt werden. Der wahre Grund für die beobachtete Abweichung ist wohl die Mehrfachstreuung des Laserlichtes entweder bereits in der Streuprobe oder an Luftteilchen zwischen Probe und Photomultiplier. Wird der Lichtstrahl z.B. zuerst unter einem Winkel von 135° gestreut, tritt dann in Wechselwirkung mit einem weiteren Streuzentrum und wird von diesem z.B. um -45° abgelenkt, so erscheint es von außen so, als wäre er insgesamt um 90° abgelenkt worden.

3 Fragen

3.1 Parallele Polarisations- und Beobachtungsrichtung

Licht stellt eine elektromagnetische Welle dar, die einen Dipol geeigneter Eigenfrequenz zu Schwingungen anregen kann. Im Falle von sichtbarem Licht kommen hierfür die Atome des Streuzentrums in Frage. Ist beispielsweise die Polarisation des einfallenden Lichtes parallel zur Beobachtungsrichtung, so beginnen die atomaren Dipole in dieser Richtung zu schwingen. Ein schwingender Dipol strahlt aber seinerseits wieder elektromagnetische Wellen aus, in diesem Fall ist dies das Streulicht. Die Abstrahlung erfolgt bevorzugt *senkrecht* zur Dipolachse. Im vorliegenden Fall strahlt das Atom also bevorzugt senkrecht zur Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes ab, während in dieser Richtung keine Abstrahlung erfolgt. Deshalb wird bei Parallelität von Polarisations- und Beobachtungsrichtung kein Streulicht beobachtet.

3.2 Polarisationsgrad für $\Theta = 90^\circ$

Wie in Abschnitt 2.5 ausführlich erläutert, hat der Polarisationsgrad beim Streuwinkel 90° deshalb nicht den theoretischen Idealwert von 100%, weil das Licht evtl. mehrmals gestreut wurde, bevor es auf den Detektor trifft und sich deshalb anders verhält als Licht, das bei einem einzigen Streuprozess um 90° abgelenkt wird.

3.3 Blaufärbung des Himmels, Morgen- und Abendrot

Ein interessantes Beispiel für Lichtstreuung ist die Blaufärbung des Himmels. Das Sonnenlicht wird in den oberen Atmosphärenschichten an winzigen Staubeilchen gestreut. Theoretisch lässt sich herleiten, dass die Intensität des Streulichtes mit λ^4 abnimmt, d.h. es wird bevorzugt der kurzwellige — also blaue — Anteil des Sonnenspektrums gestreut, weshalb der Himmel blau erscheint. Die bei der Streuung auftretende Polarisation des Lichtes kann auch für das Himmelslicht experimentell beobachtet werden. Sie dient beispielsweise den Bienen zur Orientierung.

Das Phänomen des Morgen- bzw. Abendrotes ist dagegen v.a. auf Lichtbrechung zurückzuführen, wie sie z.B. an kleinen Wassertröpfchen auftritt. Deshalb ist hier nicht die kurzwellige sondern die langwellige rote Komponente zu sehen, die bei tiefem Sonnenstand am stärksten gebrochen wird. Während der Großteil des Sonnenlichtes die Erdoberfläche dann nicht mehr erreicht, werden die kurzwelligen Anteile so stark abgelenkt, dass sie am Erdboden noch zu sehen sind.

3.4 $1/\lambda^4$ -Abhängigkeit der Streuintensität

Um die Proportionalität der Intensität des Streulichtes von $1/\lambda^4$ experimentell zu überprüfen benötigt man Lichtquellen verschiedener Farbe. Man kann beispielsweise unterschiedliche Laser verwenden oder einen Laser mit variabler Wellenlänge.

Alternativ kann man auch eine Weißlichtquelle wie z.B. eine Hg-Dampflampe verwenden. Deren Spektrum kann mit Hilfe eines Prismas oder Streugitter in seine Komponenten zerlegt werden. Durch einen engen Spalt kann schließlich monochromatisches Licht herausgefiltert werden.

3.5 Geeignete Lichtquellen für den Streuversuch

Für Versuche zur Lichtstreuung ist nicht unbedingt ein Laser erforderlich. Allerdings muss das verwendete Licht monochromatisch sein, da verschiedenfarbiges Licht unterschiedlich gestreut wird.

Daneben muss das Licht polarisiert sein, um die Abhängigkeit der Streuung von der Polarisation untersuchen zu können. Das kann jedoch für jede beliebige Lichtquelle mit einem Polarisationsfilter erreicht werden.

Da bei der Mie-Streuung jedoch auch Interferenzeffekte eine Rolle spielen, braucht man zur Beobachtung dieser Effekte kohärentes Licht, wie es aus dem Licht gewöhnlichen Lichtquellen nur unter großem Aufwand gewonnen werden kann.