

A1: Mie-Streuung an levitierten Flüssigkeitströpfchen

1. Zusammenfassung

In diesem Versuch wird die Streuung von Licht an einem einzelnen, einige μm großen Tröpfchen nachgewiesen und analysiert. Das Tröpfchen wird während des Versuches in einer elektrodynamischen (Paul-)Falle berührungsfrei in der Schwebelage gehalten (levitiert) und mit einem HeNe-Laser beleuchtet. Das gestreute Licht wird winkelaufgelöst auf eine CCD-Kamera abgebildet und die beobachtete Intensitätsverteilung digital gespeichert. Aus den Messdaten erhält man Informationen über die Größe und den Brechungsindex des gespeicherten Tröpfchens, sowie über seine Verdampfungsgeschwindigkeit.

Zur Vorbereitung des Versuches bearbeiten Sie bitte die folgenden physikalischen Themen:

- Teilchenbewegung in zeitlich periodischen äußeren Feldern
- Das Prinzip der Paulfalle, das Stabilitätsdiagramm
- Lichtstreuung an sphärischen Teilchen
- Thermodynamik eines verdampfenden Tropfens

Bei der Durchführung des Versuches lernen Sie folgende physikalischen Geräte und Verfahren kennen:

- Elektrodynamische Teilchenfallen
- HeNe-Laser
- Optische Abbildung, Teleskop, Raumfilter
- CCD-Kamera
- Computergestützte Bildaufnahme und Auswertung
- Erzeugung von einzelnen Aerosoltröpfchen im Labor

2. Einführung

2.1 Anwendung levitierter Teilchen

Eine der wichtigsten Idealisierungen der Physik ist die des "freien Teilchens". Damit meint man ein Teilchen, welches mit seiner Umgebung nur durch die minimalen, für seine Beobachtung nötigen Wechselwirkungen in Verbindung steht. Obwohl freie Teilchen in der Natur nie vorkommen, erlaubt diese Idealisierung die Klassifizierung und Quantifizierung der vielfältigen Phänomene und Wechselwirkungen. Die Darstellung von "nahezu freien Teilchen" ist daher ein wichtiges Anliegen der Experimentalphysik, um die theoretischen Konzepte und Vorhersagen für das Verhalten freier Teilchen zu überprüfen. Dieser Versuch demonstriert ein Verfahren zur Teilchenlevitation, die sog. elektro-dynamische Falle, in der sich Ionen und geladene größere Teilchen nahezu frei präparieren lassen. Diese Technik hat breite Anwendungen sowohl in der Grundlagen- als auch in der angewandten Physik, von welchen hier einige beispielhaft angeführt werden sollen.

2.2 Atomphysik, Quantenoptik, ultrakalte Atome

Wichtige physikalische Maßeinheiten, wie die der Länge und der Zeit, sind heute spektroskopisch definiert. Die im Endeffekt erreichbare Präzision der Laser-Spektroskopie ist nach der Heisenbergschen Unschärferelation durch die für die Messung zur Verfügung stehende Zeit beschränkt. Ein gespeichertes, im Raum fast stillstehendes, kaltes, freies Teilchen erfüllt daher in idealer Weise die Anforderungen der höchstauflösenden Spektroskopie und kann daher in Zeit- und Längennormalen vorteilhaft verwendet werden.

Die mit einem derartigen Teilchen verknüpfte De Broglie-Wellenlänge kann dabei makroskopische Dimensionen erreichen. Gespeicherte Ionen werden daher oft für quantenoptische Experimente zur Teilchen-Interferenz verwendet.

2.3 Aerosolphysik und Chemie

Aerosole, das sind flüssige und feste Schwebeteilchen in der unteren und oberen Atmosphäre, haben einen entscheidenden Einfluss auf unser Klima und unsere Gesundheit. Ihre Bedeutung ist erst in den letzten Jahren in vollem Umfang in das Bewusstsein der Forschung getreten. Als Beispiele seien hier nur die gesundheitliche Problematik des Asbeststaubes und des Dieselrußes und die Bedeutung des polaren Stratosphärenaerosols bei der Bildung des "Ozonloches" angeführt. Das Hauptproblem bei der Untersuchung von Aerosoleffekten ist die Inhomogenität der Größenverteilung, der chemischen Zusammensetzung, der Morphologie und auch der räumlichen Verteilung der realen Aerosole, welche die kausale Zuordnung und Quantifizierung der Aerosoleigenschaften erschwert. Gerade deshalb sind Labormessungen an einzelnen wohl definierten Aerosoltröpfchen von großer Bedeutung für das Verständnis der vielfältigen Einflüsse des Aerosols auf unsere Umwelt.

3. Grundlagen

3.1 Mie-Streuung

Viele der Beobachtungsmethoden der Physik beruhen auf der Streuung einer (Materie-) Welle an einem Objekt, z. B. einem freien Teilchen. Aus der Amplituden- und Phasenverteilung der gestreuten Welle versucht man dann auf Eigenschaften des Objektes zu schließen. Auf diesem Prinzip beruhen so unterschiedliche Methoden wie Lichtmikroskopie, Elektronenmikroskopie, Neutronenbeugung, Röntgenbeugung und die meisten Verfahren der Elementarteilchenphysik.

Das Paradebeispiel bietet bis heute die Streuung von Licht an Teilchen, deren Größe mit der Lichtwellenlänge vergleichbar ist oder die kleiner sind. Die exakte Lösung für homogene sphärische Streuzentren wurde bereits 1908 von Gustav Mie angegeben. Bis heute ist die Mie-Theorie die Grundlage unterschiedlichster Anwendungen, die von der Astrophysik über die Biophysik und die Meteorologie bis in die Verfahrenstechnik reichen. Im allgemeinen fällt es relativ leicht, für ein bekanntes Streuzentrum das resultierende Streumuster zu berechnen, in allen praktisch relevanten Fällen - wie auch in diesem Praktikumsversuch - steht man jedoch vor dem inversen Problem: Aus einer gemessenen Streuintensität soll Information über ein unbekanntes Streuzentrum gewonnen werden. Dies kann im allgemeinen nur erreicht werden wenn Zusatzinformation über das Streuzentrum vorhanden ist (in unserem Fall: ein sphärisch symmetrisches, homogenes Tröpfchen). Eine zusammenhängende Darstellung der Mie-Theorie und ein Einblick in die verschiedenen Anwendungsgebiete gibt Bohren/Huffman 1983; sehr gut zur Vorbereitung eignet sich auch die Diplomarbeit Busolt 1995 (liegt dem Versuchsordner bei).

3.2 Die elektrodynamische Speicherung

Die stabile Levitation eines geladenen Teilchens in einem elektrostatischen Feld ist nicht möglich. Hierzu müsste das el. Potential Φ an einem Ort ein Minimum in allen drei Komponenten gleichzeitig aufweisen, d. h. $\text{grad } \Phi = 0$, und $\text{div grad } \Phi < 0$. Nun gilt aber nach dem ersten Maxwell'schen Gesetz im ladungsfreien Raum gerade $\text{div grad } \Phi = \text{div } E = 0$, im Widerspruch zu obiger Forderung. Es zeigt sich nun aber, dass in inhomogenen Wechselfeldern Kräfte auf geladene Teilchen ausgeübt werden, die zu einer stabilen Levitation führen können. Eine gute Einführung gibt die Diplomarbeit Joulenev 1994 (Kapitel 1.3 liegt dem Praktikumsordner bei). Vor Durchführung des Versuches informieren Sie sich bitte über die Kraftwirkung inhomogener elektrischer Wechselfelder, die Matthieusche Differentialgleichung und Stabilitätsdiagramme.

3.3 Die Verdampfung von Flüssigkeitströpfchen

Bei einer durch Diffusion begrenzten, isothermen, quasistationären Verdampfung sollte für die zeitliche Änderung des Tröpfchenradius gelten:

$$dr/dt = - S/2 \cdot 1/r \quad (S: \text{umgebungsabhängiger Verdampfungsparameter}) .$$

4. Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus einer Paulfalle (1) mit den zugehörigen Spannungsversorgungen (2), einem Piezo-Injektor (3) für Flüssigkeitströpfchen, einem HeNe-Laser (4) zur Beleuchtung der Tröpfchen, einem Linsensystem (5) zur winkelaufgelösten Abbildung der Mie-Streuung auf eine CCD-Kamera (6) sowie einem Computer (7) zur Digitalisierung und Auswertung der Intensitätsverteilung des Streulichtes. Einen Überblick gibt Abb. 1

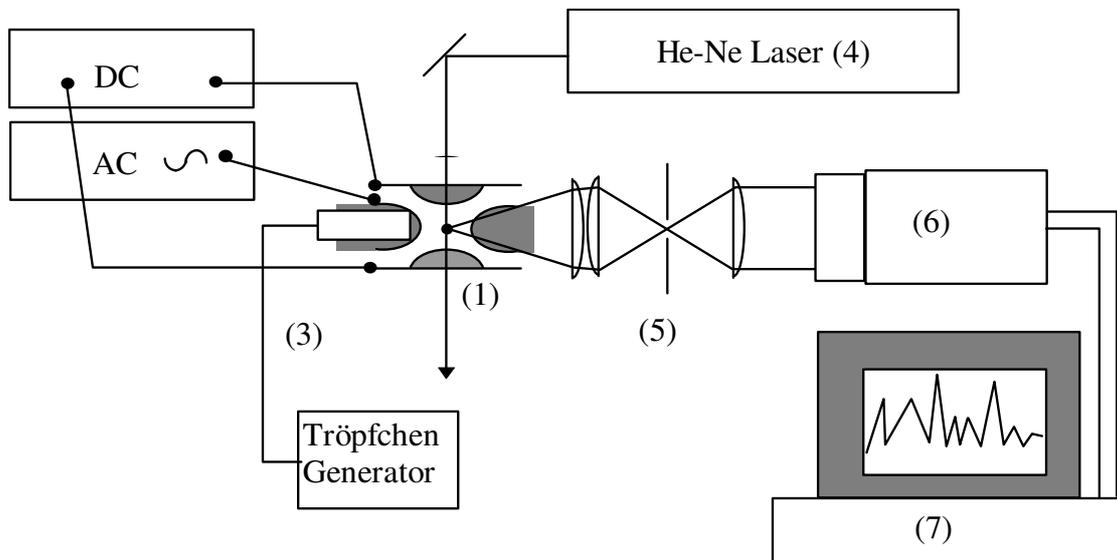


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Praktikumsversuches

Die Paulfalle besitzt hyperbolisch geformte Elektroden aus Messing mit Löchern für den Laserstrahl, den Tröpfcheninjektor und die Lichtauskopplung. Die Geometrie ist in Abb. 2 gegeben.

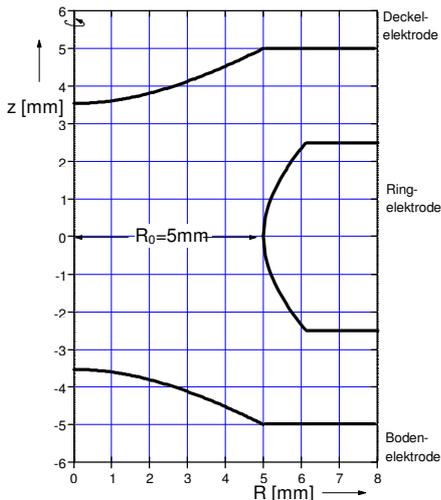


Abb.2: Geometrische Abmessungen der Paul-Falle

Die Paulfalle ist rotationssymmetrisch um die z-Achse und besteht aus Deckel-, Ring-, und Bodenelektrode. Der innere Durchmesser der Ringelektrode beträgt 10 mm, der minimale Abstand zwischen Boden- und Deckelektrode $10/\sqrt{2}$ mm (warum?). Die Ringelektrode wird mit einer Wechselspannung einstellbarer Frequenz und Amplitude versorgt, Boden- und Deckelektroden werden jeweils mit einer einstellbaren Gleichspannung belegt. Die Differenz der Gleichspannungen an Boden- und Deckelektrode dient zur Kompensation der Gravitationskraft auf das Teilchen. Die durch diese Spannungsdifferenz erzeugte elektrische Feldstärke in der Fallenmitte lässt sich aufgrund der komplizierten Elektrodengeometrie nicht elementar berechnen. Eine numerische Berechnung ergibt für Paulfallen mit hyperbolischen Elektroden: $E_{\text{mitte}} = 0.798 (U_{\text{deckel}} - U_{\text{boden}}) / 2z_0$, wobei z_0 der Abstand von der Fallenmitte zum Scheitel der Boden- bzw. Deckelektrode ist. Bei idealer Kompensation der Gravitationskraft lässt sich aus dieser Beziehung das Q/m -Verhältnis des gespeicherten Teilchens bestimmen.

Der Mittelwert der Gleichspannungen an Boden- und Deckelektrode sowie Frequenz und Amplitude der Wechselspannung bestimmen den Betriebspunkt der Falle im Stabilitätsdiagramm. Wie lassen sich die entsprechenden a - bzw. q - Parameter bestimmen?

Die Lichtstreuungsmessungen werden an gefangenen Glaskügelchen und Flüssigkeitströpfchen durchgeführt. Während sich die Glaskügelchen mit einem elektrostatisch geladenem Glasstab in die Falle bringen lassen, ist zur Erzeugung der Flüssigkeitströpfchen eine piezoelektrisch betriebene Düse (3) vorhanden, welche ähnlich dem Druckkopf eines Tintenstrahldruckers funktioniert.

Die Beleuchtung der levitierten Teilchen erfolgt durch einen HeNe-Laser (4) ($\lambda=632$ nm), dessen Licht über zwei justierbare Spiegel vertikal in die Paulfalle eingekoppelt wird. Dabei kann die Polarisation des Laserlichtes entweder in der durch einfallenden Strahl und Beobachtungsrichtung definierten Streuebene liegen oder senkrecht dazu stehen. Die beobachtete Streustrahlung ist dann auch jeweils parallel bzw. senkrecht zu dieser Ebene polarisiert. Die winkelaufgelöste Auskopplung des gestreuten Lichtes geschieht horizontal mit Hilfe von drei Linsen und einer justierbaren Lochblende (5). Auf dem CCD-Chip der Kamera (6) erhält man so eine räumlich aufgelöste Abbildung der Winkelverteilung des Streulichtes. Wie ist der Strahlengang, und wie hängen Streuwinkel und Nachweisort auf der Kamera zusammen?

Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach der Übertragung von Intensitätsverteilungssequenzen in den Computer mit einem Programm zur theoretischen Berechnung von Streulichtverteilungen. Durch Angleichung von Experiment und Theorie kann die Größe und der Brechungsindex des Tröpfchens in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden.

5. Versuchsdurchführung

5.0. Vorbereitung

5.0.1 Betrachten und beschreiben Sie zunächst den Versuchsaufbau, die elektrische Beschaltung der Paul-Falle und den Lichtweg. Identifizieren Sie alle zur Versuchsdurchführung nötigen Geräte und Hilfsmittel. Führen Sie ein Protokoll, in dem Sie Skizzen des Aufbaus sowie alle durchgeführten Experimente und Beobachtungen notieren.

5.1. Charakterisierung der Paulfalle mit kleinen Glaskügelchen.

5.1.1 Nehmen Sie die Falle in Betrieb. Legen Sie dazu eine Wechselspannung an die Ringelektrode an. Typische Werte für Amplitude und Frequenz: 1kV, 100 Hz.

5.1.2 Bringen Sie mit Hilfe des Glasstabes einige Glaskugeln in die Deckelektrode der Falle und versuchen Sie, ein einziges Glaskügelchen in der Falle zu speichern. Beobachten Sie das Kügelchen mit Hilfe der Videokamera. Verschieben Sie dazu die frei bewegliche Linse der Abbildungsoptik, bis Sie ein Bild des Glaskügelchens erhalten.

5.1.3 Variieren Sie die Gleichspannung zwischen Boden- und Deckelektrode der Falle, bis das Kügelchen ruhig in der Fallenmitte schwebt.

5.1.4 Bestimmen Sie aus der dazu nötigen Spannung das Q/m -Verhältnis der Kugel.

5.1.5 Berechnen Sie aus diesem Wert sowie Amplitude und Frequenz der anliegenden Wechselspannung den momentanen q -Wert der Falle.

5.1.6 Variieren Sie q (vgl. Kap. 2.2 der o. a. Diplomarbeit) bei festem $a = 0$ und finden Sie die Grenzen der stabilen Speicherung des Kügelchens. Erproben Sie das bei geeigneten Teilchen für unterschiedliche Frequenz-Amplituden-Kombinationen.

5.1.7 Wiederholen Sie Schritt 1.2 bis 1.6 einige Male für unterschiedliche Kügelchen.

5.1.8 Besonders Geschickte können versuchen, durch Variation von q und a mit einem Kügelchen die Grenzen des Stabilitätsdiagramms zu erkunden.

5.2. Justage des Lichtweges, Kalibrierung der Winkelabbildung

5.2.1 Justieren Sie die Lochblende des Raumfilters und das Teleskop so, dass das Streulicht als näherungsweise paralleles Streulichtbündel auf die CCD-Kamera fällt.

5.2.2 Kalibrieren Sie die Winkelzuordnung des Streulichtes zur Pixelstruktur auf dem Chip der CCD-Kamera. Dabei ist der Öffnungswinkel des Gesichtsfeldes vorgegeben durch die Beobachtungsöffnung in der Ringelektrode (2 mm Durchmesser im Abstand $R_0 = 5$ mm von der Fallenmitte).

5.2.3 Wählen Sie für die Aufzeichnung der Intensitätsverteilungen im Gesichtsfeld einen durch Markerlinien begrenzten Beobachtungs- und Integrationsbereich aus. Der sollte einerseits möglichst groß sein, andererseits aber nicht so groß, dass die Intensitätsmessungen durch Abbildungsfehler verfälscht werden

5.2.4 Bestimmen Sie für den gewählten Beobachtungsbereich den maximalen und den minimalen Streuwinkel.

5.2.5 Überprüfen Sie die Polarisation des Laserstrahles und des gestreuten Lichtes mit Hilfe des Polarisators. Führen Sie den Rest des Versuches mit paralleler Polarisation durch.

5.3. Erzeugung von Aerosoltröpfchen

Nehmen Sie den Aerosolgenerator mit Hilfe des Betreuers in Betrieb. Beobachten Sie die Tröpfchenbildung bei stroboskopischer Beleuchtung unter dem Mikroskop.

5.4. Mie-Streuung an Flüssigkeitströpfchen

- 5.4.1 Schießen Sie ein Glykoltröpfchen in die Falle ein und schweben Sie es durch Nachregeln der Gleich- und Wechsellspannungen an der Falle aus.
- 5.4.2 Beobachten Sie mit dem Programm "View" das Streifenmuster im Streulicht des verdampfenden Tröpfchens auf dem Bildschirm.
- 5.4.3 Wiederholen Sie 4.1 und 4.2 und speichern Sie dabei eine Sequenz von Intensitätsverteilungen des zentralen Beobachtungsbereichs im Computer. Versuchen Sie das Tröpfchen dabei durch Nachregeln der Spannungen an der Falle über einen längeren Zeitraum (einigen Minuten) stabil in der Fallenmitte zu halten.
- 5.4.4 Werten Sie die so erhaltene Sequenz von Streuintensitäten mit dem Programm "Analyze" aus. Passen Sie für ausgewählte Streuverteilungen (Frames) zu verschiedenen Zeiten die Tröpfchengröße (Durchmesser!) so an, dass Sie eine optimale Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie erhalten.
- 5.4.5 Bestimmen Sie die Genauigkeit, mit welcher bei dieser optischen Methode die Tröpfchengröße bestimmt werden kann, und vergleichen Sie mit der Lichtwellenlänge.
- 5.4.6 Drucken Sie ein exemplarisches Streubild sowie einige Beispiele von gemessenen und berechneten Streuintensitätsverteilungen.

6. Versuchsauswertung

Beschreiben Sie den Versuchsaufbau und die durchgeführten Experimente.

In welchem Bereich lagen die Q/m -Werte der gefangenen Glaskugeln? Wo waren die Grenzen des stabilen Bereiches im a/q -Raum? Vergleichen Sie mit den theoretischen Vorhersagen.

Stellen Sie typische Messresultate für verdampfende Tröpfchen dar. Bestimmen Sie den Verdampfungsparameter S . Werten Sie dazu die Beziehung $r^2 = r_0^2 - S \cdot (t - t_0)$ aus (siehe Busolt 1995, S. 70 und 91-92). Wie hängt der Tröpfchendurchmesser von der Zeit ab? Geben Sie den Durchmesser bei Beginn der Aufzeichnung und die Lebensdauer des Tröpfchens an. Machen Sie Aussagen über die Verdampfungsgeschwindigkeit des Tröpfchens. Hängt sie von der momentanen Tröpfchengröße ab? Erläutern Sie die Methode und Genauigkeit der Größenbestimmung.

Diskutieren Sie die Möglichkeiten und Grenzen der Größenbestimmung von Tröpfchen durch Mie-Streuung.

7. Literatur

Bohren/Huffman 1983: C. F. Bohren and D. R. Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", John Wiley and Sons, New York (1983)

Busolt 1995: "Winkelaufgelöste Beobachtung der Mie-Streuung an einzelnen Mikropartikeln", Diplomarbeit Ulrike Busolt, FB Physik der FU Berlin (1995)

Joulenev 1994: "Thermisches Leuchten kleiner Metallpartikel in einer Paul-Falle", Diplomarbeit Andrei Joulenev, FB Physik der FU Berlin (1994)