



SCHOOL-SCOUT.DE

Unterrichtsmaterialien in digitaler und in gedruckter Form

Auszug aus: *Der Millikan-Versuch*

Das komplette Material finden Sie hier:

School-Scout.de

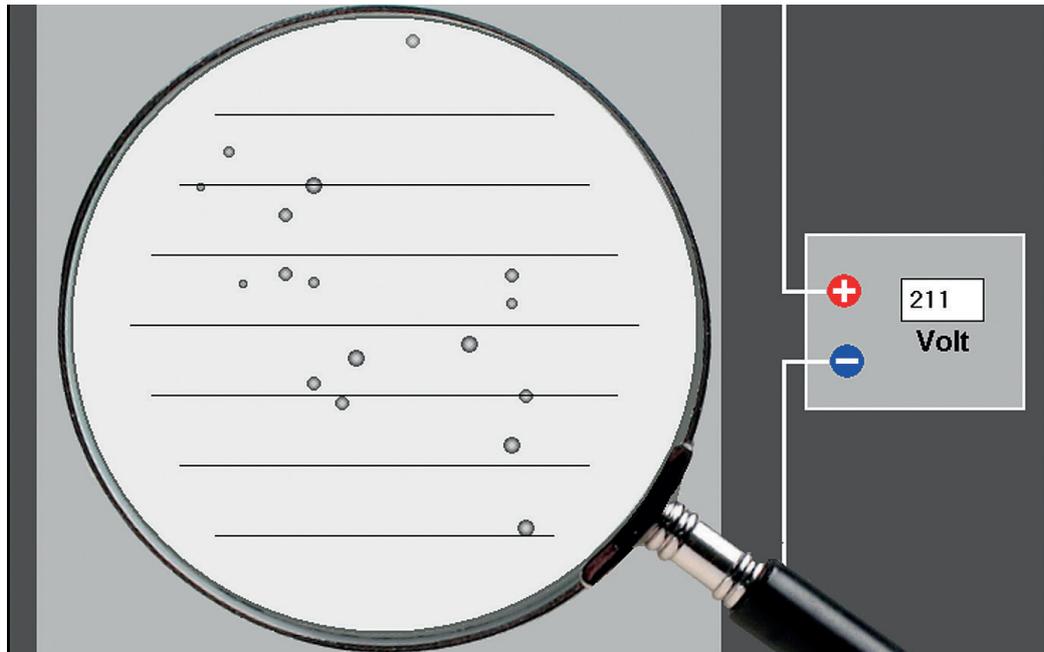


II.C.16

Elektrizitätslehre und Magnetismus

Der Millikan-Versuch

Matthias Borchardt



© RAABE 2020

M. Borchardt

Alle in der Natur vorkommenden elektrischen Ladungen sind Vielfache einer allerkleinsten Ladungsmenge. Diese Erkenntnis sowie die quantitative Bestimmung dieser Elementarladung durch Robert Millikan Anfang des letzten Jahrhunderts waren entscheidend für die Entwicklung der modernen Physik. In der Schule spielt der Millikan-Versuch daher zu Recht eine wichtige Rolle. Im Physikunterricht ist das Experiment aber oft gar nicht oder nur mit großem Zeitaufwand durchzuführen. Computersimulationen bieten eine gute Alternative und ermöglichen einen stark schüleraktivierenden Zugang zum Thema.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	11–13
Dauer:	4–11 Unterrichtsstunden
Kompetenzen:	Einordnung des Themas in einen wissenschaftshistorischen Kontext, Bekanntes Wissen in neue Kontexte einbinden, Experimente beschreiben und analysieren, Daten aufnehmen und auswerten, Umgang mit Tabellenkalkulationsprogrammen
Thematische Bereiche:	Wirkung von Kräften, Bewegung von Körpern in einem Medium, Millikan-Versuch in verschiedenen Varianten, Computersimulationen, Auswertung und Interpretation von Messdaten
Medien:	Computersimulationen, Taschenrechner, Originaltexte

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Vor über einhundert Jahren führte der amerikanische Experimentalphysiker **Robert Millikan** seine berühmten Versuche durch, um die Ladungseigenschaften des Elektrons aufzudecken. Dabei verwendete er mikroskopisch kleine **Öltröpfchen**, die durch Reibung **elektrisch aufgeladen** wurden und sich innerhalb eines **homogenen elektrischen Feldes** unterschiedlich stark bewegen ließen.

Dadurch gelang es Millikan erstmals, die Elementarladung mit recht guter Genauigkeit zu bestimmen. Dieser Beitrag stellt vier verschiedene Wege vor, **mithilfe eines computersimulierten Millikan-Versuchs die Bestimmung der Elementarladung e im Unterricht nachzuvollziehen** und die Quantelung der elektrischen Ladung sichtbar zu machen.

Die **vier Methoden** lassen sich mit folgenden Stichworten charakterisieren:

- Schweben im E-Feld
- Schweben im E-Feld und Fallen im Schwerfeld
- Steigen im E-Feld und Fallen im Schwerfeld
- Steigen im E-Feld und Sinken im umgepolten E-Feld

Diese vier Möglichkeiten weisen eine klare **Progression im Schwierigkeitsgrad** auf. Dies betrifft sowohl die Durchführung der Versuche als auch deren formelmäßige Erarbeitung und die quantitative Auswertung der Messergebnisse. Die ersten beiden Methoden sind daher gut für einen Grundkurs geeignet, während die beiden anderen eher im Leistungskurs verortet sein sollten.

Didaktische und methodische Aspekte

Millikans Idee, die Ladung kleiner Öltröpfchen durch deren Bewegung in einem elektrischen Feld zu bestimmen, erscheint auf den ersten Blick bestechend einfach. Bei näherer Betrachtung entpuppt sich der **klassische Millikan-Versuch** jedoch als **äußerst komplexes** und zeitintensives Experiment – zumindest, wenn man auf quantitativ exakte Ergebnisse Wert legt.

Dies liegt vor allem daran, dass die Öltröpfchen sich im Medium Luft bewegen. Das hat nämlich zur Folge, dass außer der Wirkung der Schwerkraft und der des elektrischen Feldes die Luftreibung zu berücksichtigen ist, sobald sich das Teilchen bewegt. Diese Reibungskraft nach dem Gesetz von Stokes $F_{\text{Reib}} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ ist von einer Vielzahl von äußeren Faktoren abhängig. Beispielsweise haben die Temperatur, der Druck und die Feuchte Einfluss auf die Zähigkeit η der Luft. Hinzu kommt, dass das Gesetz von Stokes für sehr kleine kugelförmige Körper nur noch bedingt gilt. Aus diesem Grund ist ein Korrekturterm notwendig, die sogenannte Cunningham-Korrektur, welche die mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle enthält, die ebenfalls temperatur- und druckabhängig ist. Hinzu kommt, dass die Öltröpfchen aufgrund der Stöße der umgebenden Luftmoleküle der Brownschen Molekularbewegung unterliegen und ein reiner Schwebestand der Tröpfchen innerhalb des elektrischen Feldes nur schwer einzustellen ist. Die Auftriebskraft, welche die Tröpfchen in der Luft erfahren und von deren Dichte abhängt, ist zwar klein, muss für exakte Versuche aber ebenfalls berücksichtigt werden.

Es sind also sehr genaue Kenntnisse über die verschiedensten Parameter des Mediums notwendig, in dem die Öltröpfchen sich bewegen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Millikan über fünf Jahre an seinen Versuchen arbeitete, bis er den Wert der Elementarladung mit ausreichender Genauigkeit ermitteln konnte. Diese Komplexität des Millikan-Versuchs kann und sollte in der Schule nicht abgebildet werden. Vielmehr ist eine deutliche **didaktische Reduktion des Themas notwendig**, welche, abhängig vom Kenntnisstand der Lernenden, der Kursart (Grund- oder Leistungskurs), des Lehrplans und der Intention der Lehrperson unterschiedlich stark ausfallen wird. Die folgende Übersicht vergleicht die vier Versuchsauslegungen hinsichtlich ihres Einsatzes im Physikunterricht der Oberstufe.

Variante 1: Schweben im E-Feld

Die Schwebemethode, bei der ein ausgesuchtes Öltröpfchen durch geschicktes Regeln der Kondensatorspannung in der Schwebe gehalten wird, ist **im realen Experiment nicht durchführbar**, da der Radius der Tröpfchen optisch nicht bestimmt werden kann. Die Größe der Tröpfchen liegt nämlich im Bereich der Wellenlänge sichtbaren Lichts und die Beugungs- und Streuungseffekte der Beleuchtung vereiteln eine Größenbestimmung im Mikroskop. Außerdem ist es aufgrund der Brownschen Molekularbewegung schwierig, ein Tröpfchen in Ruhe zu halten. Der Vorteil dieser Methode ist jedoch die überschaubare Physik, mit der das Experiment analysiert und die Ladungsformel hergeleitet werden kann. Für einen **Grundkurs** also eine sehr geeignete Versuchsvariante. Die eingesetzte Computersimulation stellt eine **idealisierte Versuchsumgebung** bereit – der Schwebezustand lässt sich leicht einstellen und der Radius der Tröpfchen lässt sich durch Anklicken der Teilchen direkt ablesen.

Die Formel für die Ladung der Öltröpfchen lautet:

$$q = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_{\text{öl}} \cdot g \cdot d \cdot \frac{r^3}{U_k}$$

Variante 2: Schweben im E-Feld und Fallen im Schwerfeld

Diese Methode ist im realen Experiment nur mit gewissen Ungenauigkeit durchführbar, da die Brownsche Molekularbewegung die Einstellung des Schwebezustands erschwert. Allerdings lässt sich durch die Fallbewegung im Medium Luft aus der Fallgeschwindigkeit der Radius der Tröpfchen errechnen. In der **computersimulierten Version** ist diese Versuchsvariante **sehr gut durchführbar** und als Ergänzung der reinen Schwebemethode auch für einen **Grundkurs** geeignet. Allerdings verlangt die Messmethode eine kompliziertere Formelherleitung und bei der Durchführung deutlich mehr Zeit.

Die Formeln für die Ladung der Öltröpfchen lauten:

$$q = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_{\text{öl}} \cdot g \cdot d \cdot \frac{r^3}{U_k} \text{ mit } r = \sqrt{\frac{9 \cdot \eta}{2 \cdot \rho_{\text{öl}} \cdot g}} \cdot \sqrt{v}$$

Variante 3: Steigen im E-Feld und Fallen im Schwerfeld

Diese Versuchsvariante entspricht der **Versuchsdurchführung, die Robert Millikan seinerzeit angewendet** hatte. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der Schwebzustand vermieden wird und das Problem der Brownschen Molekularbewegung deutlich vermindert wird. Nachteilig ist die wesentlich kompliziertere Herleitung der Ladungsformel. Hier ist es aber auch möglich, auf eine Herleitung zu verzichten und die fertige Formel anzugeben. Dennoch bleibt eine recht **zeitaufwändige Versuchsdurchführung** – auch in der computersimulierten Version des Versuchs. Das Starten der Stoppuhr, das Umpolen des Feldes bei bestimmten Positionen des Teilchens im Gesichtsfeld des Mikroskops, sowie das rechtzeitige Stoppen der Uhr erfordert eine hohe Konzentration und Geduld des Experimentators. Die Gefahr, dass die Ergebnisse schlecht ausfallen, ist durchaus gegeben. Aufgrund der größeren Komplexer der Versuchsvariante sollte diese eher einem Leistungskurs vorbehalten bleiben.

Die Formel für die Ladung der Öltröpfchen lautet:

$$q = 18\pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\eta^3}{2 \cdot \rho_{\text{öl}} \cdot g}} \cdot \frac{(v_{\text{Steig}} + v_{\text{Fall}}) \cdot \sqrt{v_{\text{Fall}}}}{U_k}$$

Variante 4: Steigen im E-Feld und Sinken im umgepolten E-Feld

Dies ist eine Erweiterung der dritten Versuchsvariante. Die Fallbewegung wird hierbei zusätzlich zum Schwerfeld der Erde durch das umgepolte elektrische Feld des Plattenkondensators beschleunigt. Dies führt zu einer schnelleren Abwärtsbewegung, was hinsichtlich der Brownschen Molekularbewegung günstig ist, die Versuchsdurchführung allerdings erschwert, weil der Zeitpunkt des Umpolens des Feldes aufgrund der höheren Geschwindigkeit schwieriger zu erkennen ist.

Die Formel für die Ladung der Öltröpfchen ist:

$$q = 4,5 \cdot \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\eta^3}{\rho_{\text{öl}} \cdot g}} \cdot \frac{(v_{\text{Steig}} + v_{\text{Fall}}) \cdot \sqrt{v_{\text{Fall}} - v_{\text{Steig}}}}{U_k}$$

Die Computersimulationen

Im Gegensatz zu vielen im Internet zu findenden Simulationsprogrammen zum Millikan-Versuch verzichten die hier eingesetzten Programme auf eine realitätsnahe Darstellung des Mikroskop-Gesichtsfeldes. Es ist für den Anwender nämlich ausgesprochen gewöhnungsbedürftig, dass sich im Mikroskop die Bewegungsrichtung der Tröpfchen umkehrt („Fallbewegung nach oben“). Eine Nachbildung dieses Phänomens in einer Simulation erschwert die Durchführung des Versuchs unnötig und bringt keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Daher wurde anstelle eines Mikroskops in den eingesetzten Simulationen die Vergrößerung mithilfe einer Lupe symbolhaft angedeutet. Allerdings sollte man die Lernenden darauf hinweisen, dass dies in der Realität aufgrund der Winzigkeit der Öltröpfchen nur schwerlich umsetzbar wäre.

Darüber hinaus **vereinfachen die Simulationen** den Millikan-Versuch in der Art, dass er im Physikunterricht **auf Schülerniveau gut zu verstehen** und umzusetzen ist, da weder die Brownsche Molekularbewegung noch die Auftriebskraft auf die Tröpfchen berücksichtigt werden. Auch die Cunningham-Korrektur wurde nicht eingebaut. Dadurch reduzieren sich die zu berücksichtigenden Kräfte lediglich auf die Gewichtskraft, die elektrische Feldkraft und die Stokessche Reibungskraft, womit sich die wesentlichen, für das Verständnis des Millikan-Versuchs notwendigen physikalischen Abläufe im didaktisch-methodischen Kontext zufriedenstellend erarbeiten lassen.

Die Auswertung

Für eine Gesamtauswertung des Millikan-Versuchs ist es vorteilhaft, wenn Sie möglichst viele Einzelergebnisse in die Auswertestatistik integrieren können. Daher ist es ratsam, dass die Lernenden in Partnerarbeit an verschiedenen Computern arbeiten und ihre Ergebnisse zunächst handschriftlich in einer Tabelle notieren. Anschließend werden alle Ergebnisse der Arbeitsgruppe in eine vorbereitete Tabellenkalkulation eingetragen. Damit erhalten Sie in der Regel genügend Datenpunkte, um die Quantelung der Ladung im Diagramm zu erkennen.

Lernvoraussetzungen

Die Lernenden sollten grundlegende Eigenschaft des elektrischen Feldes, sowie dessen quantitative

Erfassung mithilfe der Formeln $E = \frac{F}{q}$ und $E = \frac{U}{d}$ kennen.

Des Weiteren sollte der Umgang mit komplexeren physikalischen Formeln geübt sein, insbesondere grundlegende Umformungen und Berechnungen. Kenntnisse beim Umgang mit einer Tabellenkalkulation erleichtern das Verständnis und die Durchführung der Versuchsauswertungen.

Hinweise zur Reihenfolge der Materialien und zur Unterrichtsgestaltung

In jedem Fall sollten Sie, **unabhängig von der Art des Kurses**, die Materialien **M 1** bis **M 3** bearbeiten lassen, denn dadurch lernen Ihre Schüler den **wissenschaftshistorischen Hintergrund** des Millikanversuchs kennen und können die Bedeutung des Versuchs besser einordnen. Die weiteren Materialien (**M 4** bis **M 7**) sind als Auswahl gedacht – abhängig davon, mit welcher Lerngruppe, welchem Schwierigkeitsgrad und mit welchem Zeitbudget Sie arbeiten werden.

Im **Grundkurs** empfiehlt sich die Bearbeitung der Schwebemethode (**M 4**), unter Umständen auch noch die Erweiterung durch die Fallbewegung zur Bestimmung des Tröpfchenradius (**M 5**).

Auch für den **Leistungskurs** könnte das ein möglicher Zugang zum Millikanversuch sein, wobei Sie dann die weiteren Methoden (**M 6**) im Rahmen von Schülerreferaten vorstellen könnten. Es ist aber auch durchaus möglich, dass Sie mit einem leistungsstarken Kurs direkt mit Material **M 6** beginnen.

Da die Herleitungen der Ladungsformeln für die Steig-Fall-Methode ziemlich knifflig und zeitaufwändig sind, wurden sie im Material **M 7** komplett vorgerechnet. Damit stellt **M 7** besonders für interessierte und leistungsstarke Schülerinnen und Schüler ein geeignetes **Zusatzmaterial** dar.

Literaturangaben

- ▶ **Millikan, A.R.:** *Das Elektron. Übersetzung: Stöckl, K., Vieweg & Sohn, Braunschweig 1922*

Die Materialien **M 1** bis **M 3** nehmen Bezug auf das Buch von Robert Andrews Millikan: *The electron, its isolation and measurement and the determination of some of its properties*, The University of Chicago Press, 1917. Dieses Buch kam 1922 in deutscher Übersetzung heraus. Die Textausschnitte wurden dieser deutschen Ausgabe entnommen.

Internetseiten

- ▶ http://mabo-physik.de/millikan_versuch.html [letzter Abruf: 6.7.2020]
Computersimulationen zum Millikanversuch.
- ▶ http://mabo-physik.de/brownsche_molekularbewegung.html [letzter Abruf: 6.7.2020]
Computersimulationen zur Brownschen Molekularbewegung.
- ▶ http://mabo-physik.de/millikan_versuch.html [letzter Abruf: 6.7.2020]
Vorbereitete Excel-Tabellen, welche die Auswertearbeit enorm erleichtern.
- ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=16Kzvgu3aa0> [letzter Abruf: 6.7.2020]
Video eines vergrößerten Ausschnitts aus dem Gesichtsfeld des Mikroskops in einem realen Millikan-Versuch.

Auf einen Blick

1./2. Stunde

Thema: Wissenschaftshistorische Einordnung des Themas

M 1 Dem Elektron auf der Spur

M 2 Robert Millikan – Idee und Aufbau des Experiments

M 3 Robert Millikan – der Perfektionist

Benötigt:

- Texte
- Computer für Recherche
- Physikbuch

3./4. Stunde

Thema: Der vereinfachte Millikan-Versuch

M 4 Die Schwebemethode

Benötigt: Computer für Simulation *Millikan_1.exe* und Tabellenkalkulation



5./6. Stunde

Thema: Der vereinfachte Millikan-Versuch mit Erweiterung

M 5 Schweben und Fallen

Benötigt: Computer für Simulation *Millikan_2.exe* und Tabellenkalkulation



7.–10. Stunde

Thema: Der anspruchsvolle Millikan-Versuch

M 6 Steigen und Fallen

Benötigt: Computer für Simulation *Millikan_3.exe* und *Brown.exe* und Tabellenkalkulation



11. Stunde

Thema: Komplexe Herleitungen

M 7 Steigen und Fallen – Herleitung Formeln



SCHOOL-SCOUT.DE

Unterrichtsmaterialien in digitaler und in gedruckter Form

Auszug aus: *Der Millikan-Versuch*

Das komplette Material finden Sie hier:

School-Scout.de

