

Elemente der Quantenobjekte im Grundkurs der Q1

Peter Goldkuhle, Detmold 2015

- **Das „Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten“ zu Beginn der Q1 - eine lohnenswerte Alternative**
- **Die Möglichkeit der Behandlung von Quantenobjekten in der Q1 mit nur wenigen Lernvoraussetzungen aus der Elektrik am Beispiel des Millikanversuchs**

Inhalt:

1. Die Aussagen des KLP zu Quantenobjekten.....	2
1.1 Vorbemerkungen.....	2
1.2 Vorgaben des Kernlehrplans	2
1.3 Skizze des Ablaufs der gesamten Unterrichtsreihe <i>Quantenobjekte</i>	4
2. Das Doppelspaltexperiment als erstes Experiment in der Q1	5
2.1 Chancen und Risiken des Beginns mit dem <i>Doppelspaltexperiment</i>	5
2.2 Skizze der Unterrichtseinheit <i>Doppelspaltexperiment</i>	6
2.3 Materialien zur Unterrichtseinheit <i>Doppelspaltexperiment</i>	6
2.4 Ergänzende Bemerkungen zum <i>Doppelspaltexperiment</i>	7
3. Der Millikanversuch im Unterricht der Q1.....	8
3.1 Skizze der Unterrichtseinheit <i>Millikanversuch</i>	8
3.2 Materialien zur Unterrichtseinheit <i>Millikanversuch</i>	11

1. Die Aussagen des KLP zu Quantenobjekten

1.1 Vorbemerkungen

Die nachfolgenden Hinweise sind entstanden, weil nach der Veröffentlichung des neuen Kernlehrplans Physik für die gymnasiale Oberstufe (KLP 2013) in den Implementationsveranstaltungen gelegentlich leichte Vorbehalte gegenüber der vom KLP genannten Sequenzierung der Unterrichtsinhalte *Quantenobjekte – Elektrodynamik – Strahlung und Materie – Raum und Zeit* im Grundkurs der Qualifikationsphase entgegengebracht worden sind. Wenn auch die Anordnung der Unterrichtsinhalte im KLP nicht verbindlich ist – da es sich um einen kompetenzorientiert geschriebenen Lehrplan handelt, mit dem die am Ende der gymnasialen Oberstufe zu erreichenden Kompetenzen und nicht deren Reihenfolge im Unterricht vorgegeben werden –, so ist es wegen des bisher häufig artikulierten Vorwurfes an den Physikunterricht in der gymnasialen Oberstufe, lediglich die Physik bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts zu vermitteln, sicher sehr sinnvoll, dass verstärkt und vor auch frühzeitiger als bisher Gesichtspunkte einer „modernen“ Physik Einzug in den Oberstufenunterricht halten.

Wenn man gemäß neuem KLP mit dem Inhaltsfeld „Quantenobjekte“ den Unterricht in der Qualifikationsphase beginnt, dann liegt die Überlegung vielleicht gar nicht so fern, ob man nicht gleich mit *dem* zentralen Ergebnis der Behandlung von Wellen- und Teilchenaspekten bei Elektron und Photon, also mit den beiden Quantenobjekten gemeinsamen Eigenschaften, beginnt.

Daher möchten mit der folgenden Ausarbeitung einerseits Anregungen gegeben werden, sich mit dem *Doppelspaltexperiment für einzelne Quantenobjekte* sofort zu Beginn der Q1 im Unterricht auseinander zu setzen, und andererseits sollen anhand des *Millikanversuchs* Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie man über das Quantenobjekt Elektron im Unterricht sinnvoll sprechen kann. Es ist evident, dass in diesem Zusammenhang auch auf Konzepte der Elektrizität (wie z. B. elektrische und magnetische Felder, Spannungen, Elementarladung) zurückgegriffen werden muss. Es folgt daraus jedoch nicht zwingend, dass diese Konzepte in einem eigenständigen und umfassenden Unterrichtsvorhaben Elektrizität vorher erarbeitet werden müssen. Im Sinne der Kontextorientierung und auch des exemplarischen Lernens erscheint es vielmehr sinnvoll, die benötigten Elemente und Erweiterungen bestehenden Wissens in den Zusammenhängen zu erarbeiten, in denen sie gebraucht werden, und auf diese Weise Konzepte der Elektrizität in unterschiedlichen Unterrichtsvorhaben wieder aufzugreifen und auszudifferenzieren.

1.2 Vorgaben des Kernlehrplans

Das Inhaltsfeld „Quantenobjekte“ ohne vorherige Bearbeitung des Inhaltsfelds „Elektrizität“?!

Der neue KLP Physik 2013 benennt als erstes Inhaltsfeld in der Q1 für den Grundkurs den Bereich *Quantenobjekte*, wobei hier die beiden Quantenobjekte „Photon“ und „Elektron“ als im Unterricht zu behandeln vorgegeben werden. Die vom KLP angegebene Reihenfolge der Inhaltsfelder impliziert, dass die wesentlichen Eigenschaften von Photonen und Elektronen im Unterricht – für Lernenden auf allgemeinbildenden Schulen – adäquat bearbeitet werden können, auch ohne erst alle fachlichen Grundlagen, wie beispielsweise die elektrischen oder magnetischen Feldgrößen, in ihren traditionellen Zusammenhängen zuvor explizit erarbeitet zu haben.

Das bedarf für die Lehrkraft durchaus ein bewusstes Hinterfragen der notwendigen Abkehr von einer auch im Unterricht der Grundkurse bis dato immer eher als streng fachsystematisch zu bezeichnenden Vorgehensweise: So mag es auf den ersten Blick hin nur als schwer möglich

erscheinen, beispielsweise das für die Beschleunigung der Elektronen notwendige elektrische Feld $E = \frac{F}{q}$ sowie die Arbeit (bzw. die Energie) im elektrischen Feld $E_{el} = q \cdot E \cdot d = q \cdot U$, wie

man beides für Ablenkungsexperimente von Elektronen in elektrischen und magnetischen Feldern benötigt, verstehen zu können. Viele Lehrkräfte scheuen sich bisher ein wenig davor, solche Fachkenntnisse ohne deren gründliche und zumeist experimentell untermauerte Herleitung im Unterricht zu verwenden. Mit seiner Formulierung „Schülerinnen und Schüler beschreiben Eigenschaften und Wirkungen homogener elektrischer und magnetischer Felder und erläutern deren Definitionsgleichungen“ (s. KLP S. 29 oben) im Rahmen des GK-Inhaltsfeldes *Quantenobjekte* verdeutlicht der KLP jedoch, dass man solche Kenntnisse an dieser Stelle im Unterricht durchaus verwenden soll und sogar muss; wichtig dabei ist jedoch, dass im Unterricht diese Grundlagen plausibel gemacht werden, sie müssen jedoch nicht en détail hergeleitet werden und stehen an dieser Stelle nicht im Mittelpunkt der Arbeit. Übrigens: Schülerinnen und Schüler haben mit einer solchen Vorgehensweise, die das schnelle und unkomplizierte Übernehmen notwendiger Fachinformationen einfordert, erfahrungsgemäß keine besonderen Probleme!

Die grundlegenden Experimente

In der Auflistung der verpflichtenden zentralen Versuche benennt der KLP für das Inhaltsfeld *Quantenobjekte* folgende Experimente (in der Reihenfolge ihres Auftretens):

- *Millikanversuch*
- *Elektronenbeugung*
- *Fadenstrahlrohr*
- *Doppelspalt¹*
- *Gitter*
- *Photoeffekt*
- *Wellenwanne*

Dies soll und kann keine vom KLP favorisierte Reihenfolge darstellen, weil aufgrund der prioritären Anordnung der konkretisierten Kompetenzen nach den vier Kompetenzbereichen UF (Umgang mit dem Fachwissen), E (Erkenntnisgewinnung), K (Kommunikation) und B (Bewertung) das Vorkommen der Experimente eher zufällig wird (wobei die dem Bereich der Mechanik zuzuordnenden Wellenwanne immer dann eingesetzt wird, wenn Erklärungsbedarf mithilfe eines mechanischen Analogons besteht). Eine zeitliche Vertauschung der beiden Experimente „Fadenstrahlrohr“ und „Elektronenbeugung“ führt – daher allerdings eher zufälligerweise – auf eine auch aus fachsystematischer Sicht sinnvolle zeitliche Reihenfolge für den Unterrichtsgang: Teilchenaspekt des Elektrons – Wellenaspekt des Elektrons – Wellenaspekt des Photons – Teilchenaspekt des Photons.

Die beiden jeweils letzten konkretisierten Kompetenzbeschreibungen in den Bereichen K und B im Inhaltsfeld *Quantenobjekte* zielen implizit und explizit hin auf die Kopenhagener Deutung der Quantenobjekte als ein Mittel zur Vorhersage der relativen Häufigkeit ihres Auftretens in konkreten Messungen. Genau hier steht das im Folgenden beschriebene „Doppelspaltexperiment mit einzelnen(!) Quantenobjekten“ im Zentrum. Es handelt sich bei diesem Experiment um eines mit einer ganz erheblichen Relevanz für unser naturwissenschaftliches Weltbild und somit für unsere Sicht auf die Natur besitzt und das für die Berücksichtigung der im KLP formulierten Kompetenzbeschreibungen sehr geeignet ist. Nicht umsonst ist es im Jahr 2002 zum „schönsten physikalischen Experiment aller Zeiten“ gewählt worden (s. u., Kap. 2.4).

¹ Der Doppelspalt ist hier als zum Gitter analoges Experiment für die Interferenz von Licht gemeint – nicht als Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten

In einem weiteren Teil wird am Beispiel des Millikanversuchs dargestellt, wie es gelingt, notwendige, aber zum Zeitpunkt der Bearbeitung im Unterricht noch nicht vorhandene Kenntnisse aus dem Sachbereich Elektrik in den Unterrichtsablauf einzubinden, ohne dass diese dabei im Vordergrund stehen. An diesem Beispiel soll deutlich gemacht werden, dass es sehr wohl möglich ist, das Inhaltsfeld *Quantenobjekte* an den Beginn des Unterrichts in der Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe zu stellen.

1.3 Skizze des Ablaufs der gesamten Unterrichtsreihe *Quantenobjekte*

Teil 1: Gemeinsame Eigenschaften aller Quantenobjekte

- **Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten** (Video / Simulation)

Teil 2a: Teilchenaspekt beim Elektron

- **Millikanversuch** (Computersimulation)
- **Fadenstrahlrohr** (quantitatives Realexperiment)

Teil 2b: Wellenaspekt beim Elektron

- **Elektronenbeugung** (quantitatives Realexperiment)

Teil 3a: Teilchenaspekt beim Photon

- **Photoeffekt** (quantitatives Realexperiment und Computersimulation)
- (Ggf.) Comptoneffekt (qualitative Darstellung, ggf. Computersimulation)

Teil 3b: Wellenaspekt beim Photon

- **Doppelspalt** (quantitatives Realexperiment)
- **Gitter** (quantitatives Realexperiment)

Als Alternative zu dieser Anordnung für die Unterrichtsreihenplanung kann man auch die Abfolge Teil 2a, Teil 3a und danach Teil 3b, Teil 2b erwägen, die dadurch fachlich motiviert ist, weil dann zunächst der Teilchenaspekt beider Quantenobjekte sowie anschließend der Wellenaspekt als jeweils gemeinsames Merkmal beider Quantenobjekte erfahren wird.

2. Das **Doppelspaltexperiment** als erstes Experiment in der Q1

2.1 Chancen und Risiken des Beginns mit dem **Doppelspaltexperiment**

Bei einem sehr frühen Einsatz des „Doppelspaltexperiments mit einzelnen Quantenobjekten“ kann man sehr wohl Vorteile hinsichtlich der Entwicklung einer tragfähigen Modell-„Vorstellung“ für Quantenobjekte seitens der Schülerinnen und Schüler erwarten:

- *Wellen- und Teilchenaspekt für beide Quantenobjekte erscheinen für den Lernenden nahezu gleichwertig.*

Das bisherige traditionelle unterrichtliche Vorgehen hingegen favorisiert allein schon durch die Effektivität und Häufigkeit des erfolgreichen Ansprechens des jeweiligen Modells in aller Regel sehr deutlich den Wellencharakter für Photonen (von Licht) sowie den Teilchencharakter für Elektronen. So tritt der Teilchencharakter des Lichts nur beim Photoeffekt (der Comptoneffekt wird im KLP nicht erwähnt) hervor, der Wellencharakter von Elektronen nur beim Elektronenbeugungsexperiment – diese beiden Eigenschaften von Photon und Elektron könnten daher für Lernende eher nachrangig, auf jeden Fall aber nicht gleichwertig zu der jeweils anderen Eigenschaft erscheinen.

- *Photon und Elektron erscheinen stärker als gleichrangige Vertreter von Quantenobjekten.*

Im üblichen Unterricht sind dies für die Schülerinnen und Schüler gänzlich unterschiedliche Objekte, denen erst gegen Ende der Schulzeit ein gleiches Eigenschaftsverhalten zugeschrieben werden, was die bis dahin erworbene Modellzuordnung nur schwerlich aufbrechen kann.

- *Der Modellcharakter der Beschreibung von Quantenobjekten kann besser verdeutlicht werden.*

Unter den Quantenobjekten selbst sollten sich die Lernenden eher nichts Konkretes vorstellen, da es bei einer allzu frühen und allzu sehr konkretisierten, bildhaften Vorstellung schnell zu gedanklichen Unverträglichkeiten (Stichwort „Dualismus“) kommen kann.

Den oben genannten Chancen stehen jedoch auch möglicherweise Schwierigkeiten gegenüber:

- *Die Schülerinnen und Schüler sind zu Beginn der heutigen Q1 (aufgrund von G8) um gut zweieinhalb Lebensjahre jünger als die früheren Schülerinnen und Schüler, die (im G9-System) erst am Ende ihrer Schullaufbahn, also am Ende der damaligen Jgst. 13, sich mit dem hier angesprochenen Weltbild der Physik auseinandersetzen.*

Gut zwei Lebensjahre Unterschied bedeuten in diesem Lebensalter hinsichtlich der Reife des geistigen Durchdringens physikalisch-philosophischer Weltbildfragen möglicherweise recht viel, zumal diese Schülerinnen und Schüler bis dahin auch i. d. R. zwei Jahre weniger Physikunterricht erfahren haben, als dies früher der Fall war. Man wird gut beobachten müssen, inwieweit tatsächlich jüngere Schülerinnen und Schüler bereit und vor allem kognitiv in der Lage sind, die grundlegenden Gedanken verstehen und nachvollziehen zu können.

- *Die Schülerinnen und Schüler haben zu Beginn der heutigen Q1 weniger Erfahrung mit physikalischen Sichtweisen, als dies früher der Fall war.*

Zu dem zuvor genannten Aspekt kommt hinzu, dass die meisten Schülerinnen und Schüler zu Beginn der Q1 lediglich vier Schuljahre Physikunterricht erfahren haben, während früher mit fast sechs Jahren die Hälfte mehr Fachunterricht zu verzeichnen gewesen ist.

2.2 Skizze der Unterrichtseinheit *Doppelspaltexperiment*

(Teil 1: Gemeinsame Eigenschaften aller Quantenobjekte (s. o., Kap. 3.1))

- Einstieg in die Reihe mittels eines Videos, z. B. „Dr. Quantum“: Quantenobjekt geht durch einen Doppelspalt
Motivation und Gewinnung physikalischer Fragen
- Simulation des **Doppelspaltexperiments** mit unterschiedlichen Quantenobjekten
Quantitative Untersuchungen der Eigenschaften ausgewählter Quantenobjekte
(z. B. Computerprogramm von Klaus Muthsam)
- Realexperimente mit Elektronen: Hitachi-Experiment und Jönsson-Experiment
Vertiefung und Bezug zu realen Messungen, die (im Wesentlichen: nur) außerhalb des Physikraumes möglich sind
- Realexperimente mit Photonen: Taylor-Experiment
Vertiefung und Bezug zu realen Messungen, die (im Wesentlichen: nur) außerhalb des Physikraumes möglich sind

2.3 Materialien zur Unterrichtseinheit *Doppelspaltexperiment*

Die folgenden teilweise interaktiven Materialien sind alle kostenfrei im Internet zu finden bzw. bei den Medienzentren zu erhalten.

Internet²:

- <http://www.leifiphysik.de/teilgebiete/quantenphysik>
- <http://www.youtube.com/watch?v=3ohjOltaO6Y>
„Dr. Quantum“: ein Comic zur Erklärung des Doppelspaltversuchs
- <http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/doubleslit.html>
Internetseite zum realen Doppelspaltexperiment mit Elektronen
- http://www.youtube.com/watch?v=ZUI3lhRje_0
Youtube-Video: Erklärung des realen Doppelspaltexperiments mit Elektronen
- http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/doppelspalt/doppelspalt.zip
Klaus Muthsam (LMU München): Der quantenmechanische Doppelspaltversuch als interaktives Experiment auf dem Computerbildschirm
- http://www.mackspace.de/unterricht/simulationen_physik/quantenphysik/sv/statistik.php
Mack: eine Simulation Beugung am Doppelspalt für einzelne Photonen
- <http://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics/quantum-phenomena>
PhET: Auswahl von Simulationen zu Quantenphänomenen

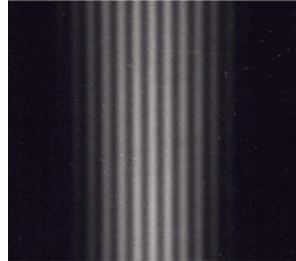
Medienzentren:

- FWU: Photonen und Elektronen als Quantenobjekte

² letzter Aufruf Februar 2015

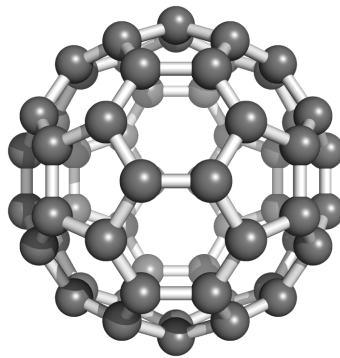
2.4 Ergänzende Bemerkungen zum *Doppelspaltexperiment*

Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen wurde 2002 in einer Umfrage des Organs der englischen physikalischen Gesellschaft „Physics World“ von Physikern zum „schönsten physikalischen Experiment aller Zeiten“ gewählt. Durchgeführt wurde es zuerst von Prof. Claus Jönsson an der Universität Tübingen im Rahmen seiner damaligen Dissertation im Jahre 1959/1961.



Originalaufnahme Jönsson 1960 mit einem Elektronenmikroskop (Quelle: leifiphysik)

Heute gelingen ähnliche Experimente mit viel „größeren“ Objekten als Elektronen oder Photonen: mit Protonen, Neutronen, sogar z. B. mit Fullerenen, deren Masse mehr als 1 Millionen mal so groß ist wie die der Elektronen.



C60-Fulleren (Quelle: Burisch)

3. Der **Millikanversuch** im Unterricht der Q1

3.1 Skizze der Unterrichtseinheit **Millikanversuch**

(Teil 2a: Teilchenaspekt beim Elektron (s. o., Kap. 3.1))

In diesem Abschnitt soll insbesondere angedeutet werden, wie man die Bearbeitung des Millikanversuchs in einem recht frühen Stadium der Reihe *Quantenobjekte* auch ohne detaillierte Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler über das elektrische Feld im Unterricht planen und durchführen kann. Es soll an diesem Beispiel verdeutlicht werden, wie man sich notwendige fachliche Kenntnisse aus anderen Sachbereichen der Physik im Zuge der Unterrichtseinheit „en passant“ aneignen kann – was typischerweise bei der neuen, exemplarischen Anlage des Unterrichts im Grundkurskonzept häufiger als früher der Fall sein wird.

Kurzübersicht über den Ablauf der (hier vorgestellten) Unterrichtseinheit

- Motivation des Millikanversuchs: Historische Bedeutung
Bestimmung der Quantisierung der Ladung sowie der Ladung als ganzzahliges Vielfaches einer kleinsten Elementarladung
- Entscheidung über den Grad der didaktischen Reduktionen
 - *Verzicht auf Cunningham-Korrektur*
 - *Nichtbeachtung von Reibungseinfluss und Auftrieb*
 - *Reduktion auf die sog. „Schwebemethode“ (ohne Fallbewegung) unter Voraussetzung einer als einheitlich und bekannt angenommenen Masse (bzw. Radius) aller beobachteten Öltröpfchen*
 - *Quantitativer Nachweis der Ladungsquantelung mit Bestimmung der Elementarladung*
 - *(rein) qualitativer Nachweis der Ladungsquantelung*
- Nachweis der Quantisierung der Ladung (Applet)
Kann qualitativ und quantitativ geschehen
Gelingt mit einfachen Kenntnissen aus der Sekundarstufe I
- Nachweis der Ladung als ganzzahliges Vielfaches einer Elementarladung (Applet)
Erfordert Kenntnisse des zu erarbeitenden quantitativen Zusammenhangs zwischen Spannung und elektrischer Kraft

Aufgrund der Formulierungen der zugehörigen Kompetenzen im KLP braucht der Millikanversuch im Unterricht des Grundkurses lediglich in der Form der sog. „**vereinfachten Schwebemethode**“ (ohne Fallbewegung) behandelt zu werden³, wobei das Experiment in den meisten Fällen in der Schule nicht real durchgeführt wird bzw. werden kann, so dass man in heutiger Zeit dann auf ein geeignetes Applet zurückgreifen kann, mit dem die Schülerinnen und Schüler weitgehend selbstständig umgehen und das Experiment durchführen können.

Bei dem real durchgeführten Millikanexperiment gelingt es nicht, die Masse (bzw. den Radius) der Öltröpfchen durch unmittelbare Beobachtung zu bestimmen: Man benötigt daher das Ausmessen zweier Bewegungsformen ein und desselben Öltröpfchens (beispielsweise durch Umpolen der Spannung, wodurch das Öltröpfchen zum Sinken oder zum Steigen veranlasst wird), um mit der Hilfe von zwei(!) Gleichungen die beiden in ihnen vorkommenden unbekanntesten Größen Masse (bzw. Radius) und Ladung des jeweils beobachteten Öltröpfchens bestimmen zu können.

³ Eine noch weitere Vereinfachung des Millikanversuchs kann darin gesehen werden, lediglich die Quantisierung der Ladung zu zeigen, ohne den konkreten Wert für die Elementarladung zu ermitteln.

Möchte man eine weitestgehend an das Realexperiment angelehnte computersimulierte Messung behandeln, ist in Kauf zu nehmen, dass man die nicht ernsthaft im Unterricht herleitbare Formel für die Stokes'sche Reibung verwenden muss (sowie ggf. den Auftrieb der Öltröpfchen in Luft und auch unter Umständen sogar die Cunningham-Korrektur). Nimmt man jedoch der Einfachheit an, man kenne die Masse (bzw. den Radius) des zu untersuchenden Öltröpfchens bzw. könne diese direkt messen, dann genügt es, lediglich die dann einzig zur Verfügung stehende Gleichung, die bei der Schwebemethode das Gleichgewicht zwischen Gewichtskraft und elektrischer Kraft beschreibt, zur Verfügung zu haben, um die Ladung daraus zu ermitteln.

Nachweis der Ladungsquantelung

In der ersten Phase der Unterrichtseinheit wird, nach dem kontextorientierten Einstieg über die historische Bedeutung des Versuchs⁴, das mögliche Schweben von Öltröpfchen im Raum zwischen den horizontalen Platten eines Plattenkondensators erörtert, wobei man dabei vereinfachend die Masse aller Öltröpfchen als gleich groß annimmt. Zum Verständnis dieses Vorgangs benötigen die Schülerinnen und Schüler zunächst lediglich die aus der Sekundarstufe I bekannte Vorstellung über Anziehung und Abstoßung zwischen positiven und negativen Ladungen. Als Versuchsergebnis beobachtet man, dass es nur bei ganz bestimmten Einstellungen der Spannung zwischen den Kondensatorplatten gelingt, die Öltröpfchen in der Schwebelage zu halten: Damit ist bereits unmittelbar die Quantelung der Ladungen motiviert – und qualitativ „nachgewiesen“.

Nachweis und Bestimmung der Elementarladung

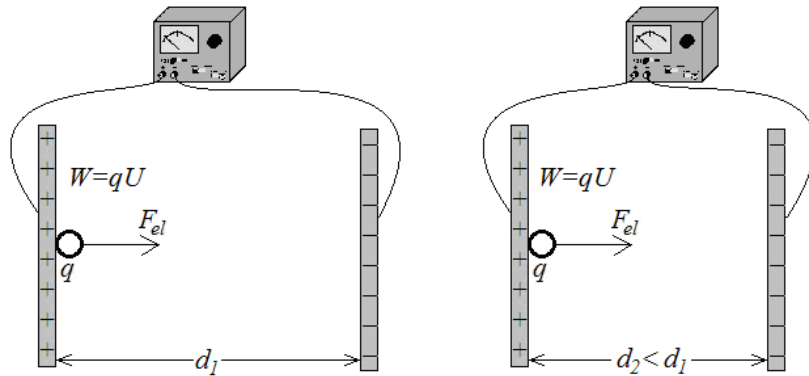
„Ermittelt“ man in der Computersimulation diejenige Spannungswerte, die zum Schweben der Öltröpfchen führen, dann stellt man fest, dass diese Spannungswerte nicht äquidistant liegen. Würde man jetzt den quantitativen Zusammenhang zwischen Ladung der Öltröpfchen und der zugehörigen „Schwebelage“-Spannung, dann wäre man fertig: Aus den Messwerten ließen sich die konkreten Ladungen berechnen.

Der benötigte Zusammenhang wird nachfolgend hergeleitet:

Für diese recht elementare Ableitung des Zusammenhangs benötigen die Schülerinnen und Schüler das – hoffentlich noch aus der Sekundarstufe I bekannte – Wissen um die elektrische Energie $W = U \cdot I \cdot t$ sowie um den Zusammenhang zwischen Ladung und Stromstärke $Q = I \cdot t$. Damit kann die Kenntnis der Gleichung $W = q \cdot U$ direkt nutzen.

Ergänzend wird an dieser Stelle der Ladungstransport in einem Plattenkondensator hinsichtlich der dafür benötigten Arbeit bzw. Energie untersucht (für den Millikan-Versuch muss man sich die Plattenanordnung um 90° gedreht vorstellen):

⁴ Man beachte, dass die Schülerinnen und Schüler spätestens seit der Klasse 6 wissen, dass es Elektronen gibt und dass es die Elektronen sind, die diese kleinste Ladungseinheit tragen.



Energie beim Transport einer Ladung im Plattenkondensator (Quelle: Autor)

Die Energie, die zum Transport der Ladung q von der einen zur anderen Platte in den beiden dargestellten Kondensatoren unterschiedlichen Plattenabstands benötigt wird, ist gleich groß, da wegen $W = q \cdot U$ diese Energie nicht von der Länge des Weges, sondern neben der zu transportierenden Ladung nur von der angelegten Spannung abhängig ist. Andererseits gilt auch die Gleichung $W = F_{el} \cdot d$, die die aufzubringende Arbeit beschreibt, um gegen die elektrische Kraft die Ladung über die Strecke d zu transportieren. Also ergibt sich: $F_{el} \cdot d = q \cdot U$ bzw. $F_{el} = \frac{q \cdot U}{d}$.

Für Öltröpfchen im Schwebezustand kompensiert diese elektrische Kraft F_{el} die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ der Öltröpfchen.

Aus $F_{el} = F_G$ erhält man schließlich: $m \cdot g = \frac{q \cdot U}{d}$ und somit für die Ladung: $q = \frac{m \cdot g \cdot d}{U}$.

Alle rechts auftretenden Größen kann man in der Computersimulation bestimmen, sodass sich die konkreten Ladungswerte ermitteln lassen. Trägt man die jeweils so gemessene Ladung für die einzelnen Öltröpfchen auf, ergibt sich die bekannte Abbildung.

Alternative

Die oben genannte Herleitung gelingt weitestgehend ohne den Begriff der elektrischen Feldstärke E . Man kann sich jedoch alternativ auch dazu entschließen, im Zuge dieser Unterrichtseinheit schon an dieser Stelle die elektrische Feldstärke E (und vielleicht auch die magnetische Flussdichte B) in einer stärker konzeptbildenden Form einzuführen. Dafür kann man auf Vorkenntnisse zum Gravitationsfeld zurückgreifen sowie auf Alltagserfahrungen zurückgreifen, um auf dieser Basis das Feldkonzept mit Blick auf elektrische Phänomene zu erweitern und ausdifferenzieren. Schülerinnen und Schülern sollten bezüglich des Feldkonzepts folgendes wissen:

1. Fernwirkungskräfte bei der Gravitation sowie bei elektrischen und magnetischen Phänomenen lassen sich mit dem Modell eines Feldes erklären, wobei ein Feld als krafterfüllter Raum verstanden wird.
2. Felder werden sichtbar durch Kraftwirkungen auf bestimmte „Probekörper“ (Massen, Ladungen, stromdurchflossene Leiter bzw. bewegte Ladungen).
3. Die Stärke eines Feldes an einem bestimmten Raumpunkt lässt sich quantitativ bestimmen über eine Messung der Kraft auf einen Probekörper an diesem Punkt: $G = F/m$, $E = F/q$, $B = F/(I \cdot s)$ bzw. $B = F/(q \cdot v)$.

Bei diesen Formeln handelt es sich um Definitionsgleichungen, die aus dem verwendeten Feldkonzept resultieren und unmittelbar plausibel werden. Die Frage, ob diese Definitionen sinnvoll sind, kann selbstverständlich auf experimentellem Wege überprüft und beantwortet werden. Das ist jedoch für ein an dieser Stelle hinreichendes Verständnis des Feldkonzepts nicht zwingend erforderlich, da es erfahrungsgemäß für Schülerinnen und Schüler fast selbstverständlich ist, dass beispielsweise die Kraft auf eine doppelt so große Ladung an derselben Stelle in einem Raum, in dem elektrische Kräfte auftreten bzw. festgestellt werden, auch „natürlich“ doppelt so groß sein wird: Die o. g. Proportionalitäten und damit auch die Quotientengleichheiten sind praktisch selbstverständlich. Damit entfallen alle z. T. recht diffizil und zeitaufwändig durchzuführenden Versuche, mit denen beispielsweise die kleinen elektrischen Kräfte auf winzige Ladungsmengen in einem Realexperiment quantitativ ausgewertet werden müssen.

Mögliche Vertiefung

Wenn man es für seinen Kurs als sinnvoll erachtet, kann man den Millikanversuch auch dazu nutzen, in Form eines kleinen Projektes hinreichend viele Messdaten über Öltröpfchen in einem Realexperiment zu gewinnen, indem die Schülerinnen und Schüler von zuhause aus (aus Gründen der Unterrichtszeitökonomie) mit einem im Internet verfügbaren Versuchsaufbau ferngesteuert arbeiten. Der Link zum Experiment findet sich weiter unten. Die Gleichungen, die jetzt selbstverständlich auf der Methode der Bestimmung des Sinkens und des Steigens der Öltröpfchen basieren, kann man der dortigen Versuchbeschreibung entnehmen – sie müssen in einem Grundkurs sicher nicht hergeleitet werden (zumal auch die Cunningham-Korrektur noch zu berücksichtigen ist).

3.2 Materialien zur Unterrichtseinheit *Millikanversuch*

Im Internet findet man in diversen Sprachen viele Applets, Animationen und visualisierte Erklärungen zum Millikanversuch⁵, wobei sich aber insbesondere solche Applets, die das oben dargestellte „vereinfachte Schwebeverfahren“ zu bearbeiten gestatten, jedoch relativ selten anzutreffen sind. Die allermeisten Applets realisieren jene Millikan-Methoden, bei der auch der Radius bzw. die Masse der Öltröpfchen durch das Sinken der Tröpfchen (mittels Stokes'scher Reibung) ermittelt werden muss.

Applets zum Millikanversuch nach dem „vereinfachten Schwebeverfahren“:

<http://www.webassign.net/resources/serpse8/activeFigures/25.22.swf>

In englischer Sprache (einfach) / Schwebespannung einstellbar, einheitliche Masse der Öltröpfchen, quantitativ auswertbar / einfache, aber ausreichende Grafik

Animationsgestützte Erläuterung des Millikanversuchs nach dem „vereinfachten Schwebeverfahren“:

<http://g.web.umkc.edu/gounevt/Animations/Animations211/MillikanOilDropExp.swf>

In englischer Sprache (aber gut verständlich) / es wird von elektrischer Feldstärke gesprochen

<http://www.youtube.com/watch?v=XMfYHag7Liw>
<http://www.youtube.com/watch?v=XMfYHag7Liw>

In englischer Sprache (aber gut verständlich) / mit Aufladung durch Röntgenstrahlung / schöne Visualisierung / im Wesentlichen wird das Schweben erwähnt (das zusätzliche Sinken nur kurz mit einem Wort)

⁵ letzter Aufruf der nachfolgenden Links Februar 2015

Applets zum Millikanversuch in komplexerer Form:

<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/millikan/millikan.htm>

In französischer Sprache (auch intuitiv verständlich) / eines der besten Applets (wie viele von G. Gastebois), das eine quantitative Auswertung des komplexeren Versuchs erlaubt / verschiedene Methoden einstellbar / realitätsnahe Simulation

http://webphysics.davidson.edu/applets/pqp_preview/contents/pqp_errata/cd_errata_fixes/section4_5.html

In englischer Sprache / quantitativ auswertbares Applet / verwendet nur die im Text angegebene Formel (ohne elektrische Feldstärke)

Animationsgestützte Erläuterung des Millikanversuchs in komplexerer Form:

<http://www.youtube.com/watch?v=UFiPWv03f6g>

In englischer Sprache (aber gut verständlich) / mit Aufladung durch Röntgenstrahlung / mit dargestellter Reibungskraft, aber ohne Auftriebskraft / schöne Visualisierung /

http://glencoe.com/sec/science/physics/ppp_09/animation/Chapter%2021/Millikans%20Oil-Drop%20Experiment.swf

In englischer Sprache (aber gut verständlich) / die Reibung wird zwar genutzt, aber nur, um die Messbarkeit der Masse zu begründen

Filmaufnahme des Blicks durch das Fernrohr im Realexperiment

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Millikan_experiment.ogv

ohne Kommentar / gut zu ahnen ist die experimentelle Herausforderung der Beobachtung eines Öltröpfchens

RCL (Remotely Controlled Laboratories) zum Millikanversuch an der Uni Kaiserslautern

Vielen Lesern sind sicher seit nun schon langen Jahren die fernsteuerbaren physikalischen Realexperimente aus dem RCL-Projekt von Prof. Jodl (Universität Kaiserslautern) bekannt. Unter diesen Experimenten befindet sich der Millikanversuch (selbstverständlich mit der Methode des Ausmessens von Steigen und Sinken der Öltröpfchen sowie der Cunningham-Korrektur).

<http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/>

Die Durchführung dieses Experimentes zeigt, wie schwierig sich die Aufnahme der Daten der Öltröpfchen in einem Realexperiment gestaltet... Es bietet sich daher an, dass mehrere Schülerinnen und Schüler das Experiment von zuhause aus für einige wenige Öltröpfchen durchführen und ihre Daten dann zusammentragen.