

Der Millikan-Versuch als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

Sebastian Gröber, Martin Vetter, Florian Glas, Bodo Eckert, Hans-Jörg Jodl

TU Kaiserslautern, Fachbereich Physik, Erwin-Schrödinger-Str., 67663 Kaiserslautern

Kurzfassung

Die Spannweite des Unterrichts zur Bestimmung der Elementarladung mit dem Millikan-Versuch reicht vom Auslassen des Versuchs bis zu einer umfangreichen, der historischen und physikalischen Bedeutung dieses Versuches gerecht werdenden Behandlung. Nach Darstellung der Ursachen für eine eingeschränkte Behandlung werden Lösungen von mediendidaktischer und methodischer Seite aufgezeigt.

Der Millikan-Versuch wurde als über das Internet in Echtzeit durchführbares Realexperiment (RCL) ausgeführt. Im Webcam-Bild lässt sich das Steigen und Fallen der Öltröpfchen verfolgen und die Messwerte am PC aufnehmen. Der Versuchsaufbau und die Webseite zur Bedienung des Experiments werden vorgestellt. Die mediendidaktischen Eigenschaften von RCLs werden im Kontext zweier Unterrichtsszenarien zum RCL „Millikan-Versuch“ genutzt: Das eine Szenario zeichnet sich durch eine Blended-Learning-Struktur aus, das andere ist ein Gruppenpuzzle.

1. Bedeutung des Versuchs

Der nach dem amerikanischen Physiker Robert Andrews Millikan (1868 – 1953) benannte Versuch zählt zu den bedeutendsten Versuchen der Physik. Bis in das Jahr 1913 verbesserte Millikan mit seiner Apparatur stetig die Genauigkeit des Werts der Elementarladung [1]. Niels Bohr profitierte davon im gleichen Jahr in seinem die Atomphysik vorantreibenden Atommodell. Aus der Elektronenbewegung in magnetischen Feldern konnte nun auch die Elektronenmasse bestimmt werden. Die Verleihung des Physik-Nobelpreises im Jahre 1923 an Millikan für seine Arbeiten zur Elementarladung und zum photoelektrischen Effekt war ein krönender Abschluss. Für den Unterricht besitzt der Millikan-Versuch ein hohes physikdidaktisches Potential mit folgenden Aspekten:

- Entwicklung einer Messmethode zur Ladungsbestimmung,
- Gewinnung, Darstellung und Auswertung größerer Datenmengen,
- Entdeckung der Ladungsquantelung und die Bestimmung der Elementarladung,
- Geschichtliches zum Versuch, wie Hypothesen zur Existenz der Ladungsquantelung, der historische Versuchsaufbau und Details der Versuchsdurchführung, die Durchführung der Originalmessungen und Millikan als Wissenschaftler.

Heute kann mit gegenüber der Originalapparatur vereinfachten Versuchsgeräten der Lehrmittelhersteller [2, 3] die Elementarladung in der Sekundarstufe II und in Grundpraktika der Hochschule mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Allerdings bleibt die Breite und Tiefe der Behandlung insbesondere beim Unterrichten von Gruppen bzw. Kursen in der Schule hinter der historischen und

physikdidaktischen Bedeutung zurück. Dies zeigen schulische Erfahrungen und die Lehrpläne der Länder [4]:

- Der Versuch ist nicht aufgeführt, oder es wird darauf verwiesen, ihn außerhalb der regulären Unterrichtszeit durchzuführen. Faktisch bedeutet das, dass der Versuch höchstens in Ausnahmefällen durchgeführt und der Wert der Elementarladung oft nur mitgeteilt wird.
- Der Versuch wird reduziert auf die Anwendung von Gesetzen aus der Mechanik und Elektrostatik. Dadurch steht nicht die eigentliche Physik des Versuchs, sondern die mathematische Behandlung der Messmethode im Mittelpunkt.
- Der Versuch wird - meist in Grundkursen - eingeschränkt auf die Behandlung der Schwebemethode. Dadurch wird zwar die Mathematik zum Versuch, aber nicht das Verständnis der Messmethode einfacher. Weiterhin liefert die Schwebemethode ungenauere Messergebnisse.
- Das Verständnis des Versuchs wird auf „Nachvollziehen und Erläutern, wie im Versuch die Elementarladung bestimmt wird“ nivelliert. Es entsteht der Eindruck, dass dem Schüler ein Verständnis der Komplexität des Versuchs nicht zgetraut wird oder der Versuch unter den derzeitigen schulischen Rahmenbedingungen nicht adäquat unterrichtet werden kann.

2. Ursachen für eine eingeschränkte Behandlung

Die Gründe für eine eingeschränkte Behandlung des Millikan-Versuchs sind vielfältig:

- Hoher Zeitaufwand für die Versuchsdurchführung: Für Einzelmessungen mit einem Öltröpfchen müssen eine Vielzahl von Tätigkeiten ausgeführt werden, ausreichend genaue Messungen

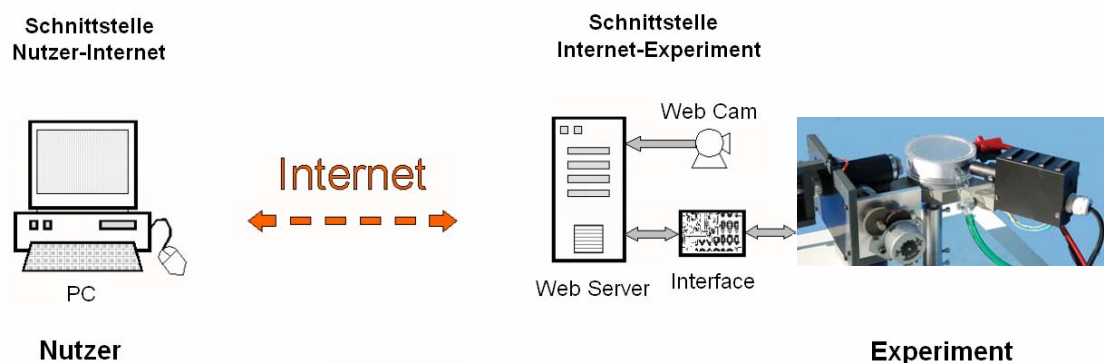


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung des Prinzips eines RCL.

erfordern ein gewisses Maß an Routine, es kommt schon nach relativ wenigen Messungen zu Ermüdungserscheinungen der Augen, und für einen einigermaßen sicheren Nachweis der Ladungsquantelung muss die Ladung von vielen Öltröpfchen bestimmt worden sein.

- Eingeschränkte Beteiligungsmöglichkeit der Schüler: Der höchstens einmal an Schulen verfügbare Versuch ist ein typisches Lehrereperiment, bei dem die Aufnahme der Messwerte von sich bewegenden Öltröpfchen mittels Standardapparaturen nicht mitverfolgt werden kann. Eine Übertragung mit Hilfe von Kamera und Monitor erlaubt lediglich das Mitverfolgen der Messungen, aber keine eigenen, unabhängigen Messungen durch mehrere Schüler (-gruppen).
- Verständnisprobleme der Schüler: Die Stokesche Reibungskraft wird einmalig in der Oberstufe in Verbindung mit dem Millikan-Versuch benötigt und wird meist aus Zeitgründen nicht systematisch eingeführt. Für Schüler erscheint besonders bei einer lehrerzentrierten Behandlung des Versuchs die Zeitdauer, bis ein Versuchsergebnis vorliegt, im Vergleich zu anderen Versuchen hoch, und Motivation und Interesse schwinden. Einem Teil der Schüler bereiten auch das Erkennen eines Gleichungssystems in einem physikalischen Zusammenhang und Umformungen mit Potenzen Probleme.

Im Folgenden wird zunächst dargestellt, was ein Remotely Controlled Laboratory (RCL) ist, und es wird der Aufbau des RCL „Millikan-Versuch“ beschrieben. Anschließend sollen zwei Unterrichtsszenarien zeigen, wie durch Abstimmung von Medium (RCL), Inhalt (Millikan-Versuch) und Methoden (Blended-Learning, Gruppenpuzzle) den genannten Problemen begegnet werden kann.

3. Prinzip eines RCL

Mit einem Remotely Controlled Laboratory (RCL) kann ein Realexperiment über das Internet durchgeführt werden (Abb. 1). Clientseitig ist der Nutzer über die Nutzer-Internet-Schnittstelle (Webseite im Browserfenster) mit dem Internet verbunden. Ser-

verseitig ist das mit Aktoren (z. B. Schrittmotor, Schalter) und Sensoren (z. B. Fotodiode, Spannungsmesser) ausgestattete Experiment über die Experiment-Internet-Schnittstelle (Webserver, Interface, Webcam) mit dem Internet verbunden. Das Experiment und die Experiment-Internet-Schnittstelle bilden das RCL. Auf der Webseite eingegebene Befehle werden nach der Verarbeitung durch den Webserver und das mit einem Mikrocontroller zur Steuerung ausgestattete Interface an die Aktoren weitergeleitet. In umgekehrter Richtung können Messwerte der Sensoren auf der Webseite ausgegeben werden. Eine oder zwei Webcams erlauben eine visuelle Rückmeldung über durchgeführte Aktionen, das Beobachten von Versuchsergebnissen und das Ablesen von Messwerten. Detaillierte technische Informationen sind unter [5, 6] zu finden.

4. RCL „Millikan-Versuch“ als modifiziertes Realexperiment

Beim RCL „Millikan-Versuch“ wurde das Millikan-Grundgerät der Firma Leybold modifiziert und durch Aktoren und Sensoren erweitert [7] (Abb. 2):

- Der Austausch der Glühlampe im Millikan-Grundgerät gegen eine weiße LED gewährleistet einen höheren Kontrast (bessere Sichtbarkeit der Öltröpfchen vor dunklem Hintergrund) und längere Lebensdauer der Lichtquelle (Wartungsfreiheit des Versuchs). Gleichzeitig werden durch die geringere Wärmeentwicklung der LED Konvektionsströme der Luft im Kondensator und damit störende seitliche Driftbewegungen der Öltröpfchen minimiert.
- Zum Einblasen von Öltröpfchen erzeugt ein Airbrush-Kompressor den notwendigen Luftdruck. Durch Öffnen und Schließen eines Magnetventils wird ein stoßartiger Luftstrom durch den Ölzerstäuber erzeugt.
- Eine den Lichtverhältnissen im Kondensator angepasste, nachtempfindliche und an das Mikroskopokular angeflanschte Webcam liefert ein Bild mit ausreichend hellen Öltröpfchen und einer Auflösung von 320 x 240 Pixel. Das 135 mm

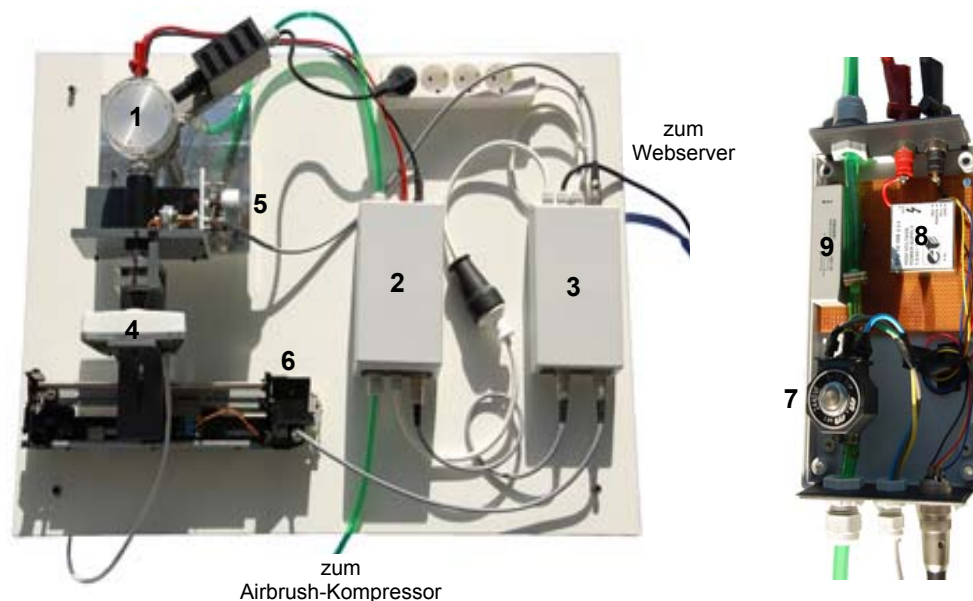


Abb. 2: Versuchsaufbau und Steuermodul. Millikan-Grundgerät mit Kondensator, Beleuchtung und Mikroskop (1), Steuermodul (2), Interface (3), Webcam (4), Motor zur Fokussierung (5), seitliche Verschiebung (6), Magnetventil (7), Hochspannungsmodul (8), Hochspannungsrelais (9), nach [7].

Objektiv und das Mikroskop sind so aufeinander abgestimmt, dass der betreffende Ausschnitt des Kondensators ausreichend groß dargestellt wird. Eine Echtzeit-Übertragung der Öltröpfchenbewegung wird durch das JPG-Komprimierungsverfahren der Webcam erreicht. Die Bildrate von 15 Bildern/s erlaubt bei einem DSL-Anschluss

einen flüssigen Stream für eine ruckelfreie Öltröpfchenbewegung im Webcam-Bild. Über den Motor zur Fokussierung kann die Gegenstandsebene verändert und über einen Druckerschlitten kann der Bildausschnitt seitlich verschoben werden.

- Die Hochspannung für den Kondensator wird mit

#	rising time	falling time	rising time
1			00:00:00
2			
3			
4			
5			
6			

Abb. 3: Laborseite des Millikan-Versuchs innerhalb des RCL-Portals.

einem spannungsgesteuerten Modul erzeugt. Um nach dem Ausschalten der Spannung das elektrische Feld zum Verschwinden zu bringen, wird der Kondensator mit einem Hochspannungsrelais kurzgeschlossen.

5. Messungen mit dem RCL

Der Versuch erlaubt die Bestimmung der Elementarladung durch Fallen von Öltröpfchen ohne elektrisches Feld und Steigen von Öltröpfchen im elektrischen Feld. Messungen werden über die Laborseite des Versuchs auf dem RCL-Portal [8] durchgeführt (Abb. 3). Nach dem Einblasen der Öltröpfchen (Button „Öltröpfchen einblasen“) können zur Beobachtung im Webcam-Bild Öltröpfchen scharf gestellt (Buttons „+“ und „-“) oder der Bildausschnitt seitlich verschoben werden (Buttons „←“ und „→“). Die Steigspannung kann in 50 V-Schritten ausgewählt (drop-down-Feld), eingestellt (Button „Spannung U einstellen“) und ein- und ausgeschaltet werden (Button „U on / off“). Mit einer auf der Webseite eingebauten Stoppuhr (Java-Applet) unterhalb des Webcam-Bildes können die Steig- und Fallzeiten gemessen und gespeichert werden. Detaillierte Informationen zur Versuchsdurchführung mit dem RCL sind in [9] zu finden.

Als Beispiel für das Ergebnis zeigt Abb. 4 die Verteilung von 230 mit dem RCL gemessenen Öltröpfchenladungen in einem Histogramm.

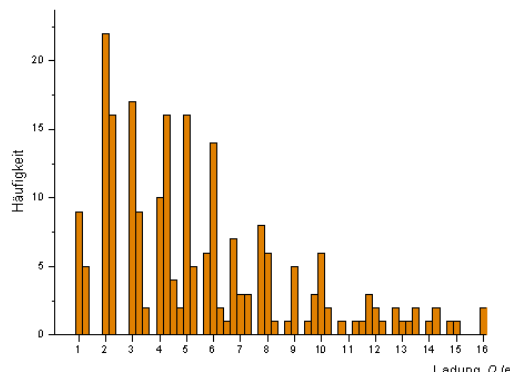


Abb. 4: Histogramm von 230 Öltröpfchenladungen, aus [7].

Aus den ersten drei deutlich voneinander abgegrenzten Häufungen um Vielfache der Elementarladung erhält man durch Mittelwertbildung $e = 1,58 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Die breiter werdenden Verteilung um größere Vielfache von e sind auf die zunehmend ungenauere Geschwindigkeitsmessung der schnelleren Öltröpfchen zurückzuführen. Nähere Informationen zur Auswertung des Millikan-Versuchs sind beispielsweise in [10] zu finden.

6. Unterrichtseinsatz

Im Folgenden werden zwei Unterrichtsszenarien vorgestellt. Ein erstes mit einem linearen Vorgehen für ein inhaltlich aufeinander aufbauendes Lernen

und ein zweites mit einem parallelen Vorgehen für ein inhaltlich vernetztes Lernen. Die Szenarien nutzen hierbei methodisch die mediendidaktischen Eigenschaften von RCLs:

- Traditionelle Lehrereperimente können als Schülerexperimente durchgeführt werden.
- Experimente können von Schülern zuhause im eigenen Tempo ohne formale Zeitvorgaben durchgeführt werden.
- Experimentelle Beobachtungen und Versuchsergebnisse - und nicht theoretische Überlegungen - können zum Ausgangspunkt von Themen bzw. Versuchen gemacht werden. Auf diesem Weg wird umgekehrt auch das Interesse an der Theorie geweckt.

6.1 Unterrichtsszenario mit Blended Learning

Die Struktur des ersten Szenarios (Abb. 5) entspricht der des Blended Learning: Zuhause sammeln die Schüler individuell experimentelle Erfahrungen mit dem RCL am PC. Im Schulunterricht wird die Präsenz der Schüler (-gruppe) zum Austausch von Wissen oder Erfahrungen und zur Strukturierung oder Organisation des Lernprozesses genutzt.



Abb. 5: Struktur des Unterrichtsszenarios mit Blended-Learning.



Abb. 6: Analogie-Experiment „Glaskugelfall in Öl“.

Den Einstieg bildet ein Realexperiment, in dem die konstante (End-) Geschwindigkeit einer in Salatöl fallenden Glaskugel unter der Annahme einer Stokeschen oder Newtonschen Reibungskraft und den gegebenen Versuchsdaten berechnet und mit der gemessenen Geschwindigkeit verglichen wird (Abb. 6). Die Messungen können in einem Lehrer- oder

Auf Grundlage der physikalischen Überlegungen kann je nach Leistungsfähigkeit der Gruppe die Formel zur Ladungsbestimmung lehrergelenkt oder eigenständig in Kleingruppen erarbeitet werden. Das RCL ermöglicht es, durch kooperatives Messen ausreichend Messdaten in relativ kurzer Zeit zu gewinnen. Nachdem an einem Beispiel die La-

Tab. 1: Struktur des Unterrichtsszenarios mit Gruppenpuzzle.

Phase	Inhalt(e)	Ziel(e)
Einführung und Gruppenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorversuch „Fallende Glaskugel in Öl“ ▪ Fragestellung des Versuchs mit RCL ▪ Informationen zur Versuchsgeschichte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundlagen ▪ Motivation für Expertengruppen
Lernen in den Expertengruppen Experiment, Theorie und Geschichte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kooperative Versuchsdurchführung mit RCL und Auswertung z. B. mit Excel ▪ Theorie für RCL-Versuchsvariante, Berechnung von Kräften, weitere Versuchsvarianten ▪ Zusammenstellen von Informationen zur Versuchsgeschichte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eigenständiges Arbeiten mit Materialien ▪ Ausarbeitung und Vermittlungskonzept für Stammgruppe
Lernen in den Stammgruppen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wissensaustausch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wissen verständlich weitergeben ▪ Lernen mit und von anderen
Testerstellung in den Expertengruppen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Expertengruppen erarbeiteten Testfragen mit Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reflexion eigenen Wissenszuwachses ▪ Verfügbares Wissen für Test zum Millikan-Versuch

Schülerexperiment mit Stoppuhren oder anhand eines Videos [11] mit einem Videoanalyseprogramm durchgeführt werden. Lediglich die Stokesche Reibungskraft ergibt eine gute Übereinstimmung von Theorie und Experiment. Der Einstieg hat folgende Funktionen:

- Aktivierung des Vorwissens der Schüler aus der Mechanik,
- experimentelle Einführung der Stokeschen Reibungskraft,
- vorgelagerte Einführung der Stokeschen Reibungskraft und dadurch eine stärkere Fokussierung auf die Fragestellung des Millikan-Versuchs,
- vorbereitendes Analogie-Experiment zum Millikan-Versuch.

Anschließend untersuchen die Schüler zuhause Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem Fallen der Glaskugel in Öl und der Bewegung des Öltröpfchens im RCL unter folgenden Aspekten:

- Wissen aus dem Analogie-Experiment anwenden und selbstständig Vorwissen aus der Elektrostatik nutzen,
- Offenheit bezüglich der Eindringtiefe der Schüler in den Versuch bis hin zum Entdecken des Versuchszwecks „Ladungsbestimmung“,
- Vorbereitung auf Messungen zur Ladungsbestimmung mit RCL.

bestimmung demonstriert wurde, wird der Kurs für Messungen mit dem RCL zuhause in Gruppen mit verantwortlichen Gruppenleitern aufgeteilt. Messergebnisse von den Gruppenmitgliedern werden über E-Mail oder andere elektronische Austauschmöglichkeiten von den Gruppenleitern gesammelt. Folgende Aspekte sind relevant:

- Die Schüler messen nicht für den Lehrer, sondern für die Gruppe.
- Es bleibt offen, ob einzelne Gruppen den Ehrgeiz entwickeln, die Ladungsquantelung durch ausreichend viele Messungen zu entdecken bzw. nachzuweisen. Andernfalls kann durch Zusammenfügen der Gruppenmessungen (gleichartige Tabellen verwenden) leicht die erforderliche Anzahl an Messungen erreicht werden.
- Die Schüler sollten dazu aufgefordert werden, ihre Messwerte in geeigneter Weise darzustellen und unterschiedliche Repräsentationsformen kritisch zu diskutieren.

Für dieses Unterrichtsszenario werden ca. fünf Unterrichtsstunden benötigt.

6.2 Unterrichtsszenario mit Gruppenpuzzle

Das zweite Unterrichtsszenario nutzt die Methode „Gruppenpuzzle“ [12]. Die alternative Methode des Stationenlernens ist ungeeignet, da sich die Inhalte des Millikan-Versuchs nicht in ausreichend kleine Blöcke zerteilen lassen. Das Gruppenpuzzle bietet

gegenüber dem Stationenlernen auch den Vorteil, dass

- während des Lernens ein Austausch des erworbenen Wissens stattfindet,
- die Aufgabe, nicht nur Inhalte selbst zu verstehen, sondern sie auch weiterzugeben (Lehrerwartung), das Lernen der Schüler befördert [13],
- die Lernwirksamkeit der Methode weitgehend nachgewiesen ist [13].

Zur Einführung für die Expertengruppen „Theorie“ und „Experiment“ (Tab. 1) dienen die ersten beiden Schritte des vorhergehenden Szenarios. Für die dritte Expertengruppe „Geschichte“ informiert die Lehrkraft überblicksartig zu geschichtlichen Aspekten des Millikan-Versuchs [14, 15, 16]. Mit der Einführung wird erreicht, dass

- jede Expertengruppe eine Vorstellung von den Inhalten der anderen Expertengruppen hat,
- die Schüler sich nicht ohne Vorinformationen einer Expertengruppe zuordnen müssen,
- frühzeitig inhaltliche Zusammenhänge zwischen den Expertenthemen erkennbar werden.

Die anschließende Arbeit und das Lernen in den Expertengruppen muss von der Lehrkraft durch Medien (RCL), Werkzeuge (Excel, Word, Power-Point), Materialien (Aufgabensammlung [17] und Internetseiten zum Millikan-Versuch) und Förderung des Austauschs zwischen den Expertengruppen unterstützt und moderiert werden. Für die Weitergabe des Expertenwissens in den Stammgruppen ist die Verschriftlichung der Lerninhalte und Überlegungen, wie das Wissen weitergegeben werden kann, notwendig.

Inbesondere offene Methoden, wie das Gruppenpuzzle, erfordern eine an die Methode angepasste Überprüfung des Lernzuwachses: Die Expertengruppen entwickeln, nachdem sie sich bisher Inhalte erarbeitet, sie weitergeben und Rückmeldungen über den Erfolg der Weitergabe durch ihre Mitschüler erhalten haben, Aufgaben für einen Test zum Millikan-Versuch. Damit wird der eigene Wissenszuwachs transparent und das erworbene Wissen gefestigt.

Für das Unterrichtsszenario sind je nachdem, wie häufig mit offeneren Methoden gearbeitet wurde, das 1,5 bis 2-fache der Zeit des ersten Szenarios zu veranschlagen. Dies ist gerechtfertigt, da die Schüler außer der Physik wichtige Schlüsselqualifikationen, wie z. B. eigenständig Themen erarbeiten, Arbeiten im Team oder Andere sachgerecht zu informieren, erlernen und üben.

7. Fazit

Das Beispiel Millikan-Versuch zeigt, dass RCLs bei entsprechender Unterrichtsorganisation es ganzen Oberstufenkursen ermöglichen, quantitative Messungen an zentralen physikalischen Experimenten durchzuführen. Die konsequente methodische Integration des Mediums RCL in den Physikunterricht kann damit eine stärkere Wissenschaftsorientierung

des Oberstufenunterrichts bewirken. Der einzelne Schüler hat auch außerhalb des Unterrichts Zeit, sich in Versuche hineinzudenken und eigenständig Messungen durchführen zu können. Die Notwendigkeit, Messergebnisse zu verstehen, motiviert zu theoretischen Überlegungen, und die Präsentation eigener Messergebnisse schafft Verantwortung für das eigene Tun – alles Fähigkeiten, die z. B. Wissenschaftler brauchen und die mit einem propädeutischen Unterricht verfolgt werden.

Mit den hier vorgestellten Unterrichtsszenarien zum Millikan-Versuch können Schüler die Quantisierung der Ladung entdecken. Dies hängt vom Geschick des Lehrers und vom Vorwissen der Schüler ab. Einige Schüler kennen zwar den Wert der Elementarladung, aber die Quantisierung der Ladung ist den meisten unbekannt. Vielleicht gelingt es erfahrbar zu machen, was einen Wissenschaftler wie Millikan antrieb, sich so lange und zielstrebig mit einem Versuch auseinanderzusetzen.

8. Literatur

- [1] Millikan, R. A. (1924): The Electron – Its isolation and measurement and the determination of some of its properties, Chicago & London: University of Chicago Press.
- [2] Leybold Didaktik GmbH: Gebrauchsanweisung Millikan-Gerät, <http://www.leybold-didactic.de/ga/5/559/559411/559411d.pdf>.
- [3] Phywe Systeme GmbH & Co. KG: Elementarladung und Millikan-Versuch, <http://shop.phywe.de/prod/de/362/422487/elementarladung-und-millikan-versuch.html>.
- [4] Deutscher Bildungsserver: Lehrpläne der Länder für allgemeinbildende Schulen, <http://www.eduserver.de/zeigen.html?seite=400>.
- [5] Vetter, M.; Gröber, S.; Eckert, B.; Jodl, H.-J. (2006): Neues vom Remote Controlled Lab Projekt, In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Kassel 2006. Berlin: Lehmanns Media, http://rcl.physik.uni-kl.de/docs/Kassel_DD_21.2.pdf.
- [6] Vetter, M.; Ludwig, M. (2006): Tutorial zum Selbstbau eines RCL, http://rcl.physik.uni-kl.de/docs/Tutorial_RCL.pdf.
- [7] Glas, F. (2006): Remotely Controlled Lab: Experimentieren aus der Ferne – Der Millikan-Versuch, Staatsexamensarbeit, Fachbereich Physik, TU Kaiserslautern.
- [8] RCL Millikan-Versuch, erreichbar über das RCL-Portal: <http://rcl.physik.uni-kl.de>.
- [9] Messanleitung für RCL „Millikan-Versuch“ (2007), siehe [8] unter „Aufgaben“.
- [10] Vogel, D. (1996): Die Auswertung des Millikan-Versuches, Physik in der Schule 34 (3), S. 110-113.
- [11] Video „Glaskugelfall in Öl“, siehe [8] unter „Aufgaben“.

- [12] Meyer, H. (2006): Methodenskript "Gruppenpuzzle", <http://www.member.uni-oldenburg.de/hilbert.meyer/download/Gruppenpuzzle.pdf>.
- [13] Renkl, A. (1997): Lernen durch Lehren - Zentrale Wirkmechanismen beim kooperativen Lernen, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- [14] Koch, M. (1992): Robert A. Millikan: Der Zweck heiligt die Mittel, Physik in der Schule 30 (6), S. 235-236.
- [15] Heering, P. (2006): Fragwürdiges beim Millikan-Versuch, Physik in unserer Zeit 5 (37), S. 227.
- [16] Millikan, R. A. (1913): On the elementary electrical charge and the Avogadro constant, Physical Review 2 (2), pp109-143, <http://authors.library.caltech.edu/6438/01/MILpr13b.pdf>.
- [17] Gröber, S. (2007): Aufgabensammlung zum RCL "Millikan-Versuch", siehe [8] unter „Aufgaben“.