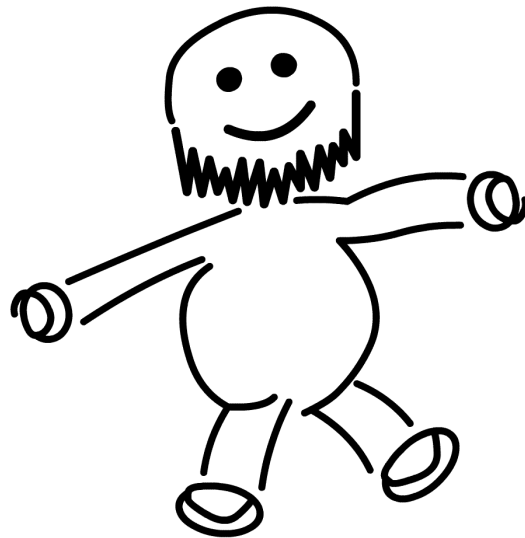


Physikalisches Praktikum für das Hauptfach Physik

Versuch 27

Der Franck-Hertz-Versuch

Wintersemester 2005 / 2006



Name:	Daniel Scholz
Mitarbeiter:	Hauke Rohmeyer
E-Mail:	physik@mehr-davon.de
Gruppe:	B9
Assistent:	André Holz
Durchgeführt am:	16. Februar 2006
Protokoll abgeben:	17. Februar 2006
Protokoll verbessert:	–

Testiert: _____

1 Einleitung

Mit Hilfe des Franck-Hertz-Versuches konnte 1913 zum ersten Mal durch ein quantenphysikalisches Experiment nachgewiesen werden, dass die Energieabgabe von Atomen nur in festen Portionen [Quanten] erfolgen kann. Damit konnte das Bohrsche Atommodell bestätigt werden.

Im Versuch werden Quecksilberatome mit verschiedenen Energien konfrontiert und somit versucht sie anzuregen. Es stellt sich heraus, dass sich das Quecksilberatom nur mit bestimmten Energien anregen lässt. Daraus kann man schließen, dass Elektronen im Atom nur zwischen fest vorgegebenen Energien wechseln können, oder wie es im Bohrschen Atommodell beschrieben wird: Elektronen können nur auf bestimmten Bahnen um den Kern kreisen.

2 Theorie

2.1 Das Bohrsche Atommodell

Nach dem Bohrschen Atommodell kreisen die negativ geladenen Elektronen um einen positiv geladenen Atomkern, ähnlich wie die Planeten im Sonnensystem. Die Zentrifugalkraft des sich bewegende Elektrons wird gleichgesetzt mit der Coulombkraft zwischen Elektronen und Protonen. Nach den Maxwellgleichungen müsste das Elektron als ein beschleunigter Ladungsträger elektromagnetische Strahlung aussenden. Dabei würde es Energie verlieren. Die Kreisbahn des Elektron würde kleiner werden, bis es schließlich in den Kern stürzt. Um seine Theorie zu retten, stellte Bohr Postulate auf. Demnach können Elektronen auf bestimmten Bahnen um den Kern kreisen, ohne Strahlen abzugeben und somit Energie zu verlieren. Man sagt, diese Bahnen seien *gequantelt*. Bei einem unangeregten Atom sind die Elektronen im energieniedrigsten Zustand. Durch Energiezufuhr kann ein Atom angeregt werden, das heißt, dass ein Elektron von einem niedrigen in einen höheren Energiezustand springt. Die Energiezufuhr entspricht dann genau der Differenz dieser beiden Zustände. Ist Licht der Energielieferant, so können die Lichtwellen die Atome anregen. Licht kann man als Teilchen mit einer Energie auffassen. Man nennt sie dann *Lichtquanten*. Lichtquanten, die die richtige Energie besitzen um ein Atom anzuregen, werden absorbiert, man sieht sie nicht mehr. Die anderen Lichtquanten bleiben unverändert. Im vorher kompletten Lichtspektrum fehlen die absorbierten Lichtquanten, dort ist anstelle der Farbe ein schwarzer Strich. Springt das Elektron in seinen ursprünglichen Zustand zurück, so wird Energie in Form von Lichtwellen frei, man nennt dies *Emission*. Der emittierte Lichtquant hat dieselbe Energie, welche notwendig war, um das Elektron in den höheren Zustand anzuregen.

Die Energie des Lichtquanten ist dann

$$E = h\nu,$$

dabei ist $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ die Plancksche Konstante¹ und ν die Frequenz des emittierten Lichts.

Ein Atom kann auch so weit angeregt werden, dass das Elektron den Einflußbereich des Atom verlässt. Das Atom ist dann ein Ion, dem ein Elektron fehlt, daher ist es positiv geladen.

Im Franck-Hertz-Versuch ist der Energielieferant nicht Licht, sondern es sind freie Elektronen. Ihnen wird kinetische Energie durch eine Beschleunigungsspannung zugeführt. Die Elektronen können bei ihrem Gang durch die Röhre mit Quecksilberatomen zusammenstoßen. Dabei muss man zwei Fälle unterscheiden:

- (1) Die Elektronen haben nicht genug Energie, um die Quecksilberatome anzuregen.

In diesem Fall ist der Stoß unelastisch, es findet kein Energieaustausch statt. Die Elektronen haben noch ihre gesamte kinetische Energie, nur ihre Richtung kann geändert werden.

- (2) Die Elektronen haben genug Energie, um die Quecksilberatome anzuregen.

In diesem Fall ist der Stoß elastisch, es findet ein Energieaustausch statt. Das Elektron gibt genau so viel Energie ab, wie das Quecksilberatom braucht, um angeregt zu werden. Die kinetische Energie geht dem freien Elektron verloren, seine Geschwindigkeit wird kleiner.

2.2 Sättigungsdampfdruck

Betrachtet man eine Flüssigkeit, die in ein Vakuumgefäß gebracht wurde, so wird ein Teil der Flüssigkeit verdampfen und es stellt sich ein charakteristischer Druck in diesem Gefäß ein [siehe Versuch 8: Der Dampfdruck von Wasser]. Dieser Druck wird als **Sättigungsdampfdruck** bezeichnet. Er ist temperaturabhängig: Bei steigender Temperatur steigt auch der Dampfdruck. Dies liegt daran, dass bei hohen Temperaturen mehr Teilchen die Energie aufbringen können um die Kohäsionskräfte der Nachbarpartikel zu überwinden und somit aus der Flüssigkeit austreten können.

Bei unserem Versuch wird ausgenutzt, dass ein höherer Druck eine höhere kinetische Energie der Teilchen bedeutet, und somit die Kollisionswahrscheinlichkeit größer wird.

¹ Nach D. Meschede (2001): "Gerthsen Physik", 21. Auflage, Springer Verlag Berlin.

2.3 Mittlere freie Weglänge

Zwischen Elektronen und Quecksilbergasatomen kommt es zu Zusammenstößen. Als *mittlere freie Weglänge* bezeichnet man dabei den Weg, den das Teilchen im Mittel zurücklegt, ohne auf ein anderes Teilchen zu treffen. Diese Weglänge ist abhängig von der kinetischen Energie der Teilchen und damit auch abhängig von der Temperatur des gesamten Systems sowie unabhängig von der Teilchenzahldichte.

Für den Franck-Hertz-Versuch sollten die Elektronen idealerweise eine mittlere freie Weglänge haben, die kurz genug ist, so dass die Elektronen während ihres Weges von der Kathode zur Anode auf ein Quecksilberatom treffen können.

2.4 Der Franck-Hertz-Versuch

In einer mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre liegen eine Glühkathode und eine Anode. Dazwischen liegt ein Gitter, an welchem eine regelbare Spannung anliegt. Wird nun die Glühkathode erwärmt erhalten einige Elektronen genug Energie, um aus der Kathode auszutreten. Durch die Spannung am Gitter werden die Elektronen beschleunigt. Ihre Energie beträgt dann $E = eU$, dabei ist U die *Beschleunigungsspannung* mit 0 bis 30 V. Die Anode ist gegenüber dem Gitter negativ geladen. Die Elektronen müssen also Energie aufbringen, um die Anode zu erreichen, dort fließt dann ein Strom. Dieser *Auffängerstrom* wird gemessen, wodurch man erfährt, wie viele Elektronen genug Energie aufbringen konnten, um gegen die Anodenspannung anzukommen.

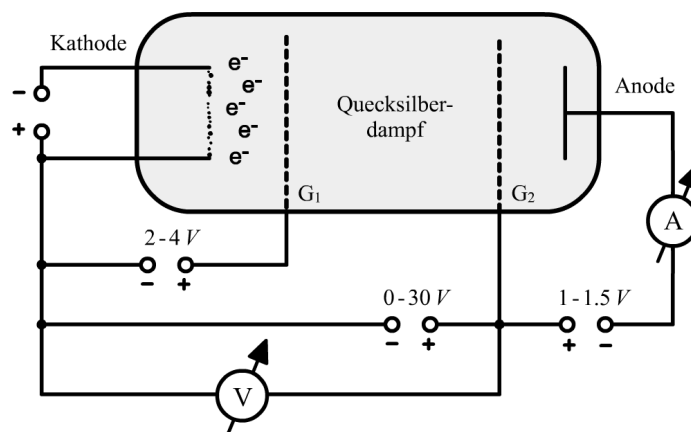


Abbildung 1: Aufbau des Franck-Hertz-Versuches mit Raumladungsgitter G_1 und Beschleunigungsgitter G_2 .

Auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode treffen einige Elektronen also auf Quecksilberatome, mit denen sie kollidieren. Haben die Elektronen wenig Energie, so werden diese Stöße nur elastisch sein und es kommt zu

keinem Energieaustausch. Der Anodenstrom steigt dann proportional zur Beschleunigungsspannung.

Ab einer bestimmten Beschleunigungsspannung sinkt der Anodenstrom ab. Dies liegt daran, dass die Elektronen genug kinetische Energie aufbringen können, um die Quecksilberatome anzuregen. Diese kinetische Energie entspricht gerade der Anregungsenergie des Quecksilberatoms² von 4.9 eV . Hierzu geben sie kinetische Energie ab und sind daher nicht mehr in der Lage die Anodenspannung zu überwinden.

Bei einem weiteren Anstieg der Beschleunigungsspannung steigt auch der Anodenstrom weiter an, bis die Elektronen genug Energie haben zwei Quecksilberatome anzuregen und so weiter. Wir erwarten also einen Verlauf, wie er in Abbildung 2 skizziert wurde.

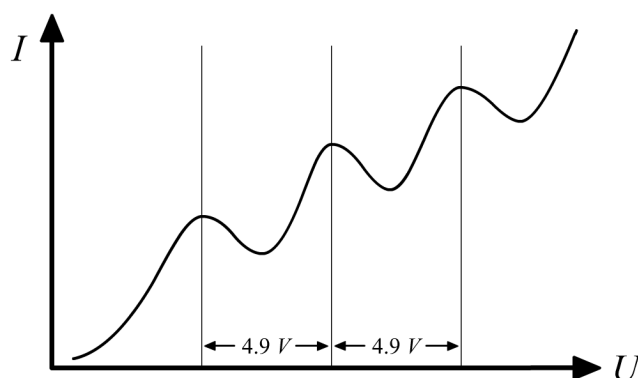


Abbildung 2: Erwarteter Zusammenhang zwischen Beschleunigungsspannung U und Auffängerstrom I .

Aus der Spannungsdifferenz zweier Maxima von 4.9 V und der Elementarladung $E = eU$ erhält man die Energie, die nötig ist, um ein Quecksilberatom auf ein höheres Niveau anzuregen.

An der Stelle eines Anodenstromminimums gilt

$$eU = h\nu,$$

dabei ist wieder e die Elementarladung, U die Beschleunigungsspannung, h die Plancksche Konstante und ν die Frequenz des Lichts, das bei der Rückkehr in den Grundzustand ausgestrahlt wird. Man erhält also einen Zusammenhang zwischen elektrisch gemessener Energie und Lichtwellenlänge.

Ziel des Versuches wird es nun sein, diese Phänomene zu untersuchen.

² Nach Praktikumsript: Peter Schaaf (2005): "Das Physikalische Praktikum". Universitätsdrucke Göttingen, Seite 204.

Der Raumladungseffekt

Da die Quecksilberatome ungeladen sind, herrscht innerhalb der Röhre im Idealfall ein homogenes elektrisches Feld. Dies ist aber in der Realität nicht der Fall. Insbesondere bei kleinen Anodenspannungen bildet sich zwischen Anode und Kathode eine negative Raumladung aus und nur deren oberste Schicht wird durch das Feld beschleunigt. Ihr Feld stößt auch abgedampfte Elektronen in die Kathode zurück, so dass sie zeitlich konstant bleibt. Bei wachsender Anodenspannung wird diese Raumladung schrittweise abgebaut, da Elektronen „abgesaugt“ werden und die Emissionsfähigkeit der Kathode begrenzt ist. Daher beginnt der regulär zu messende Stromfluss erst bei einer Spannung, die der negativen Raumladung überwiegt. Für die Auswertung hat dies die Folge, dass nicht der Absolutbetrag des ersten Maximums als Anregungsenergie verwendet werden kann, sondern nur die Differenz zwischen den Maxima, die von der Theorie ja mit 4.9 eV pro Quecksilberatom als konstant vorhergesagt wird.

3 Versuchsdurchführung

Der allgemeine Versuchsaufbau wurde bereits in Abbildung 1 veranschaulicht und unter Kapitel 2.4 beschrieben.

Nach halbstündigem Vorheizen auf 167°C wird die Kathodenspannung [Beschleunigungsspannung] in 0.2 V Schritten von 0 V bis ca. 30 V hochgeregelt und die entstehenden Ströme [Auffängerstrom] über das Nanoamperemeter abgelesen.

Anschließend wird die Anlage auf 191°C vorgeheizt und es wird eine analoge Messung durchgeführt.

Es sollte auch die Nummer der verwendeten Anlage notiert werden.

4 Auswertung

Zunächst möchten wir festhalten, dass der Versuch sehr viel schlechter verlief, als wir erwartet hätten. Unserer erste Messung [nach langem Vorheizen] mussten wir abbrechen, da wir an der Skala des Ampèremeters unseren Auffängerstrom bereits bei einer Beschleunigungsspannung von 12 V nicht mehr messen konnten.

Bei unseren weiteren Messungen entschlossen wir uns, die Skala des Ampèremeters auf der größten Auflösung zu halten. Somit erwarten wir im gesamten Versuch alleine durch Ableseschwierigkeiten recht große Fehler.

4.1 Bestimmung der Anregungsenergie des Quecksilbers

Zunächst haben wir in Abbildung 3 den Auffängerstrom I gegen die Beschleunigungsspannung U von beiden Messungen gemeinsam aufgetragen.

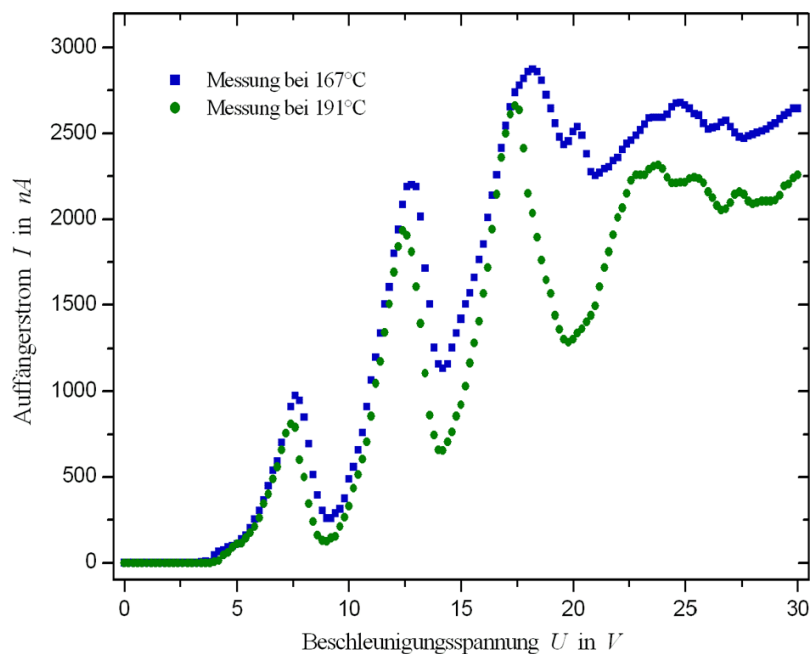


Abbildung 3: Auffängerstrom I gegen Beschleunigungsspannung U .

Bei diesen Auftragungen haben wir bereits einige Messwerte ignoriert, die ganz offensichtlich Ablesefehler darstellten. Desweiteren haben wir auch eine Sprünge in den Kurven korrigiert. Diese Sprünge entstanden evtl. durch eine Verschiebung des Offsets oder Ähnliches. Die originalen Auftragungen ohne jegliche Korrekturen sind im Anhang zu finden.

Aus beiden Messungen bestimmen wir die lokalen Maxima dadurch, dass wir die Schnittpunkte der Tangenten an den Linienflanken bestimmen, siehe dazu Abbildung 4 und Abbildung 5.

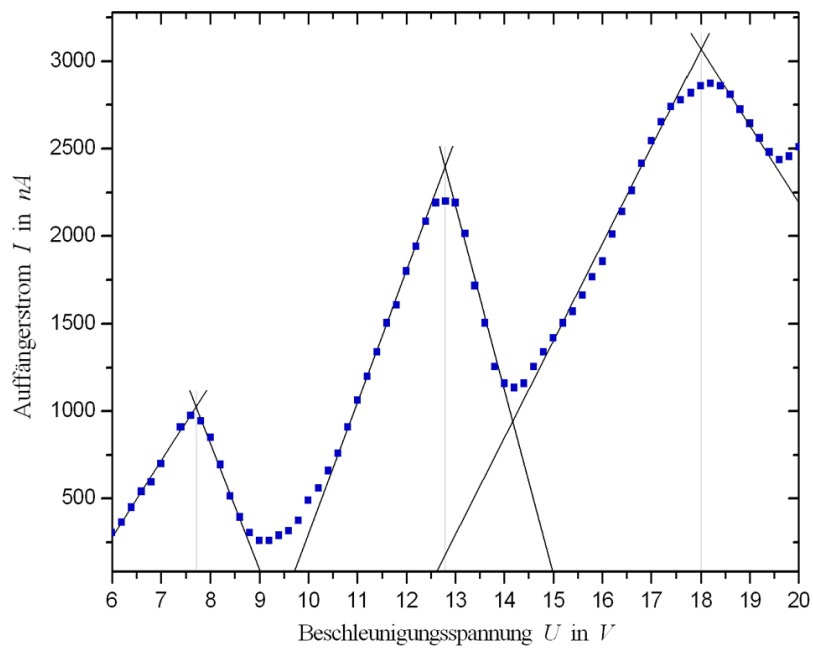


Abbildung 4: Bestimmung der lokalen Maxima bei der Messung bei $167^{\circ}C$.

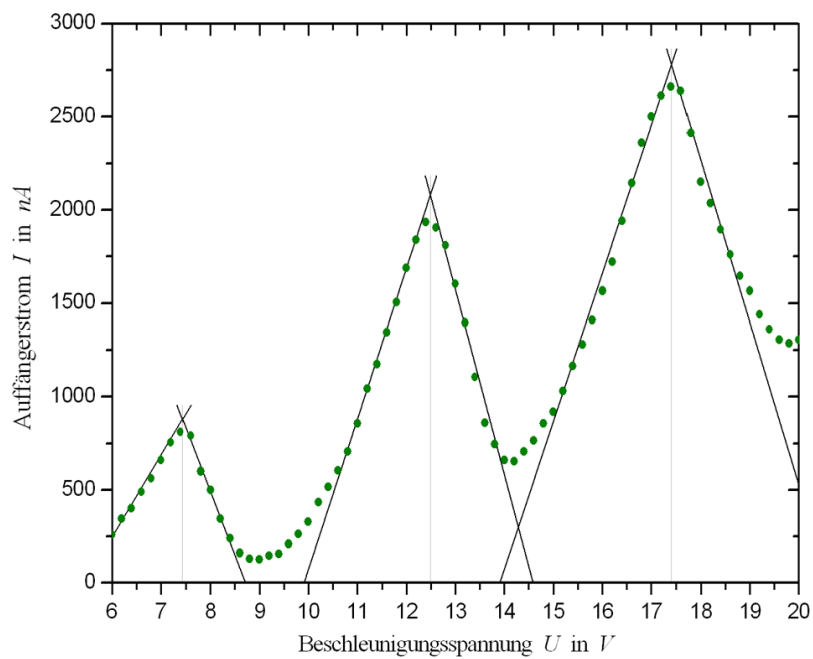


Abbildung 5: Bestimmung der lokalen Maxima bei der Messung bei $191^{\circ}C$.

Dabei erschien es uns am sinnvollsten, die Tangenten mit dem Auge und nicht durch lineare Regression zu bestimmen³. Die Fehler der ermittelten Maxima ergeben sich aus den Einstellungsschwierigkeiten der Beschleunigungsspannung sowie aus dem geschätzten Fehler bei der Ermittlung der Tangenten. Durch sinnvolle Schätzungen der Fehler erhalten wir die folgenden Werte der Maxima:

	Maximum 1	Maximum 2	Maximum 3
Messung 167 °C	$(7.44 \pm 0.15) V$	$(12.50 \pm 0.1) V$	$(17.41 \pm 0.2) V$
Messung 191 °C	$(7.73 \pm 0.15) V$	$(12.79 \pm 0.1) V$	$(17.52 \pm 0.15) V$

Als gewichteten Mittelwert aus den Differenzen zwischen den Maxima erhalten wir

$$(4.94 \pm 0.07) V.$$

Nach Definition der Spannung erhält man die Energie, die die Elektronen brauchen, um die Quecksilberatome in einen angeregten Zustand zu versetzen:

$$U = \frac{\Delta E}{Q} \quad \Rightarrow \quad \Delta E = U \cdot Q.$$

Bei uns beträgt die Anregungsenergie also

$$\Delta E = (4.94 \pm 0.07) eV.$$

4.2 Wellenlänge des optischen Übergangs zwischen den Niveaustufen

Mit der Planckschen-Konstante $h = 6.626 \cdot 10^{-34} Js$ und der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2.997 \cdot 10^8 m/s$ kann nun die Wellenlänge des von Quecksilber ausgesandten Lichts beim Übergang vom angeregten in den Grundzustand bestimmen werden, denn es gilt

$$\Delta E = eU = h\nu = h \frac{c_0}{\lambda}$$

und damit folgt

$$\lambda = h \frac{c_0}{\Delta E}.$$

Wir erwarten dabei einen Fehler von

$$\sigma_\lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta E} \cdot \sigma_{\Delta E} \right| = \left| h \frac{c_0}{(\Delta E)^2} \cdot \sigma_{\Delta E} \right|$$

und berechneten eine Wellenlänge von

$$\lambda = (251 \pm 3) nm.$$

³ Zur sinnvollen Abschätzungen mit dem Auge hat auch Herr Schaaf in der Vorbesprechung zum Praktikum geraten.

Übergang der Elektronen

Ein Quecksilberatom besitzt 80 Elektronen, die nach dem Bohrschen Atommodell auf 6 Schalen angeordnet sind. Auf der n -ten Schale finden maximal $2n^2$ Elektronen Platz. Ein Quecksilberatom hat im Grundzustand auf der $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ Schale genau $\{2, 8, 18, 32, 18, 2\}$ Elektronen. Somit sind die fünfte und die sechste Schale nicht vollständig besetzt und können angeregte Elektronen aus darunter liegenden Schalen aufnehmen. Die hier beobachteten Anregungen sind also P - Q - bzw. O - P -Übergänge.

5 Diskussion

Bei höherer Temperatur haben wir einen Verlauf erwartet, der deutlicher unter dem bei geringerer Temperatur liegt, da hier der höhere Dampfdruck die Bewegung der Elektronen beeinträchtigt. Bei großen Beschleunigungsspannungen sind die Maxima nicht mehr ausreichend erkennbar, zudem liefern diese zunehmend schlechtere Werte, es wurden daher nur die ersten drei lokalen Maxima betrachtet.

Die gemessene Anregungsenergie $(4.94 \pm 0.07) \text{ eV}$ liegt nahe beim Literaturwert von 4.9 eV .

Der Literaturwert der berechneten Wellenlänge⁴ beträgt $\lambda = 253.7 \text{ nm}$. Damit haben wir mit $\lambda = (251 \pm 3) \text{ nm}$ einen hervorragenden Wert erzielt. Trotz der großzügigen Schätzungen unserer Fehler haben sich schließlich viele Messungenauigkeiten gegeneinander aufgehoben.

Eigene Kommentare

[Mal wieder ein Versuch mit drei Gruppen in einem Raum, das macht 20 Leute. Ansonsten nette Theorie, netter Versuch, aber recht stumpf.]_{Daniel}

[Schade, dass wir den Versuch schon drei mal in der Physik III Vorlesung gesehen haben. Sonst wäre er ja vielleicht spannender gewesen und man hätte nicht gewusst, dass dieser Versuch auch innerhalb von 20 s durchführbar ist.]_{Hauke}

⁴ Nach Praktikumsript: Peter Schaaf (2005): "Das Physikalische Praktikum". Universitätsdrucke Göttingen, Seite 204.