

Bericht zum Versuch Photoemission

Michael Goerz, Anton Haase

6. Oktober 2005

GP II

Tutor: K. Lenz

1 Einführung

Der Photoeffekt demonstriert maßgeblich die Existenz von Lichtquanten. Er ist mit einem klassischen Wellenbild nicht zu erklären.

Grundsätzlich ist es so, dass Metalle, wenn sie mit Licht bestrahlt werden, Ladungen emittieren können. Experimentell ergibt sich, dass bei der Bestrahlung einer geeigneten Metallplatte mit hochfrequentem Licht durch die zugeführte Energie Elektronen frei werden. Dies geschieht bis zu einer gewissen Grenze, da sich die Metallplatte während des Prozesses positiv auflädt, und dann dem Effekt entgegenwirkt (Hallwachs-Effekt). Die Spannung, die in diesem Gleichgewichtszustand an der Platte herrscht, nennt man das Haltepotential.

Nach klassischem Bild ist die Photoemission zwar im Prinzip verständlich, nicht jedoch in ihren Details. Man würde erwarten, dass mit der Intensität des Lichtes die kinetische Energie der Elektronen steigt. Außerdem müsste der Effekt erst nach einiger Zeit auftreten, da die Energie nach klassischem Bild von der Platte absorbiert wird, und sich erst genug Energie "ansammeln" muss, damit die Elektronen losgelöst werden können. Die Wellenlänge des Lichts sollte dabei keine große Rolle spielen. All dies ist jedoch nicht der Fall.

Stattdessen stellt man fest, dass die kinetische Energie der Elektronen von der Wellenlänge abhängt, je kürzer diese ist, desto höher die Energie. Die Intensität des Licht ist nur dafür verantwortlich, *wieviele* Elektronen losgelöst werden. Der Effekt tritt auch erst ab einer gewissen Wellenlänge auf. Zudem lässt sich keine Verzögerung feststellen, die Elektronen werden sofort frei.

All dies veranlasste dazu, vom klassischen Wellenbild zur Lichtquantenhypothese überzugehen, die durch den Photoemissionsversuch voll bestätigt wird. In diesem neuen Bild ist das Licht gequantelt. Jedes Quant besitzt eine feste Energie, abhängig von der Frequenz des Lichtes. Der genaue Zusammenhang ist über das Plancksche Wirkungsquantum:

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

Die Intensität des Lichts bezeichnet die Anzahl der Quanten. Beim Auftreffen auf die Metallplatte geben die Lichtquanten ihre gesamte Energie genau an ein Elektron weiter. Ist diese Energie ausreichend, das Elektron zu befreien, tritt es aus der Platte aus. Überschüssige Energie kommt ihm als kinetische Energie zugute.

Die Energie, die notwendig ist, ein Elektron aus dem Festkörper austreten zu lassen, ist materialabhängig. Gängigerweise liegt sie im Bereich 4-5eV. Einige Materialien haben aber auch Austrittsenergien von ca. 2 eV. Die Frequenzgrenze für den Photoeffekt liegt in diesem Fall im sichtbaren Bereich.

Um die kinetische Energie der Elektronen zu bestimmen, wird die Metallplatte, an der der Photoeffekt auftritt, als Kathode benutzt, der eine Anode gegenübergestellt wird. Es kann nun eine Spannung angelegt werden, die je nach Polung entweder die emittierten Elektronen ansaugt, oder sie bremst.

Wird die Spannung nun genau so eingestellt, dass gerade keine Elektronen mehr die Anode erreichen, kann man eine Energiebilanz aufstellen, die den Zusammenhang beschreibt. Die Austrittsarbeit sei mit W_A bezeichnet, dann ist die kinetische Energie, die die Elektronen besitzen, die Energie des Lichtquants $h \cdot \nu$ abzüglich dieser Austrittsarbeit.

$$E_{\text{kin}} = h \cdot \nu - W_A \quad (2)$$

Diese Energie ist nun im genannten Fall genau gleich der Energie, die das Elektron braucht, um die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode zu überwinden, als $U_0 \cdot e$. Insgesamt gilt also

$$U_0(\nu) = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{W_A}{e} \quad (3)$$

Betrachtet man die Kennlinie $U-I$ der Photozelle, wird man im negativen (bremsenden) Bereich erst ab der Spannung U_0 einen Strom messen können (theoretisch). Praktisch wird allerdings der eigtl. ungewünschte Effekt auftreten, dass Kathode und Anode sich vertauschen und der Photoeffekt Elektronen an der Anode herauslöst, die an der Kathode empfangen werden. Ab der maximalen Bremsspannung U_0 ist nun allerdings der gewünschte Photoeffekt messbar, da die Elektronen nun gegen die Bremsspannung ankommen. Der Verlauf ist nahezu linear. Dies setzt sich fort, wenn die Spannung in den positiven Bereich kommt, die Elektronen also ansaugt, bis die Sättigungsstrom erreicht ist, und keine Steigerung des Stroms mehr erreicht werden kann.

2 Aufgaben

1. Aufbau und Justierung der Apparatur.
2. Messung des Sättigungsstromes und der Bremsspannung einer Kalium-Photozelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke für die 436-nm-Linie (indigo/blau) von Quecksilber.
3. Aufnahme der Strom-Spannungskennlinien für alle Hauptlinien des Quecksilber-Spektrums. Auswertung der Kennlinien und Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums und der Austrittsarbeit von Kalium.
4. Theoretische Aufgabe für die Ausarbeitung: Darstellung der Widersprüche zwischen den experimentellen Ergebnissen der Photoemission und der klassischen Wellentheorie des Lichts.

3 Auswertung

3.1 Aufbau und Kalibrierung

Der Versuchsaufbau war wie in Abb. 1 dargestellt. Die Steuerung der Intensität erfolgte über die Blende. Mithilfe der Linsen musste der Strahlengang so kalibriert werden, dass die im Prisma getrennten Spektrallinien möglichst scharf auf die Photozelle projiziert wurden. Die Photozelle war verschiebbar, um die verschiedenen Spektrallinien aufzunehmen.

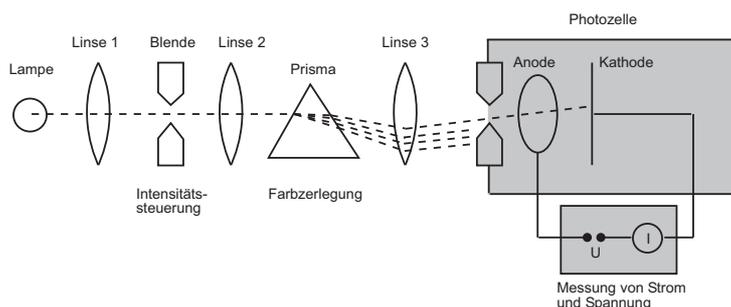


Abb. 1: Versuchsaufbau

3.2 Messung von Sättigungsstrom und Bremsspannung

Es wurden in Abhängigkeit von der Intensität (Öffnung der Blende) der Sättigungsstrom bei $U = 8.0 \text{ V}$ und die Bremsspannung für $I = 0 \text{ A}$ an der blauen Spektrallinie $\lambda = 435.8 \text{ nm}$ gemessen.

Nach der theoretischen Erwartung sollte dabei der Sättigungsstrom linear mit der Intensität ansteigen, die Bremsspannung unberührt bleiben.

In Abb. 2 ist der Sättigungsstrom über die Blendenöffnung aufgetragen. Man erkennt, dass der Verlauf tatsächlich sehr linear ist. Eine tiefere quantitative Auswertung ist nicht möglich.

Die Bremsspannung folgte weniger gut den theoretischen Erwartungen. Sie ist in Abb. 3 dargestellt. Die Werte zeigen zunächst einen starken Anstieg, halten sich dann in einem recht schmalen Bereich zwischen 0.25 mm und 0.50 mm Blendenöffnung jedoch einigermaßen konstant, mit sinkender Tendenz am Ende. Der Mittelwert in diesem Bereich ist 3.45 V . Dies ist zudem aber ein völlig anderer Wert, als später bei der Bestimmung der Kennlinien gemessen wurde. Das Ergebnis ist also äußerst kritisch zu beurteilen.

Der Fehler wurde in beiden Messungen aus der Abweichung bei einer Kontrollmessung ermittelt.

3.3 Kennlinien für alle Spektrallinien

In diesem Versuchsteil wurde die Intensität konstant belassen (mittlere Blendenöffnung) und die Spannung variiert, um den zugehörigen Photostrom zu ermitteln. Dies wurde für alle 5 Spektrallinien durchgeführt. Die theoretische Erwartung wäre, dass nach einer kurzen Anfangsphase die Kennlinie nahezu linear verläuft, bis sie ihren Sättigungswert erreicht.

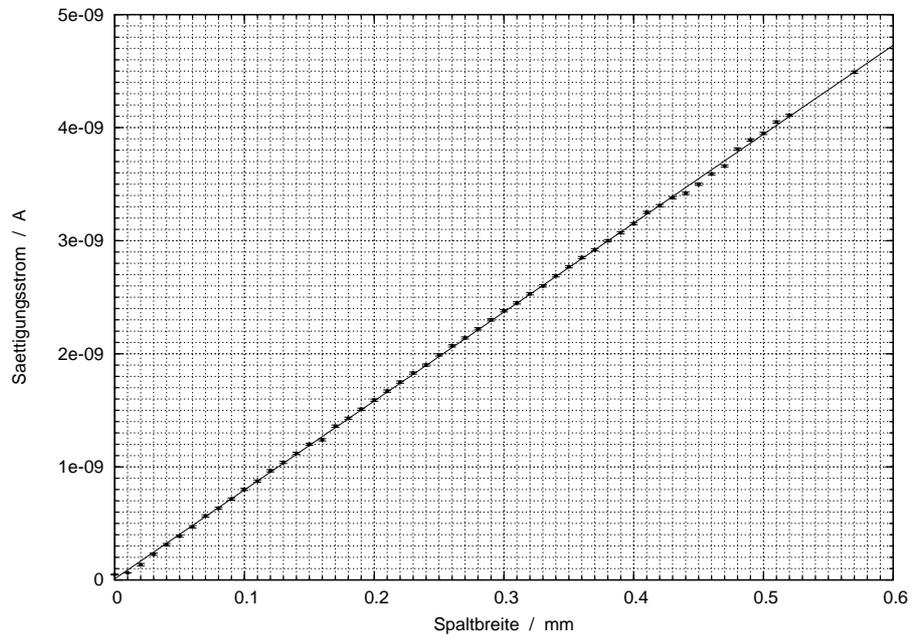


Abb. 2: Sättigungsstrom über Blendenöffnung (Intensität)

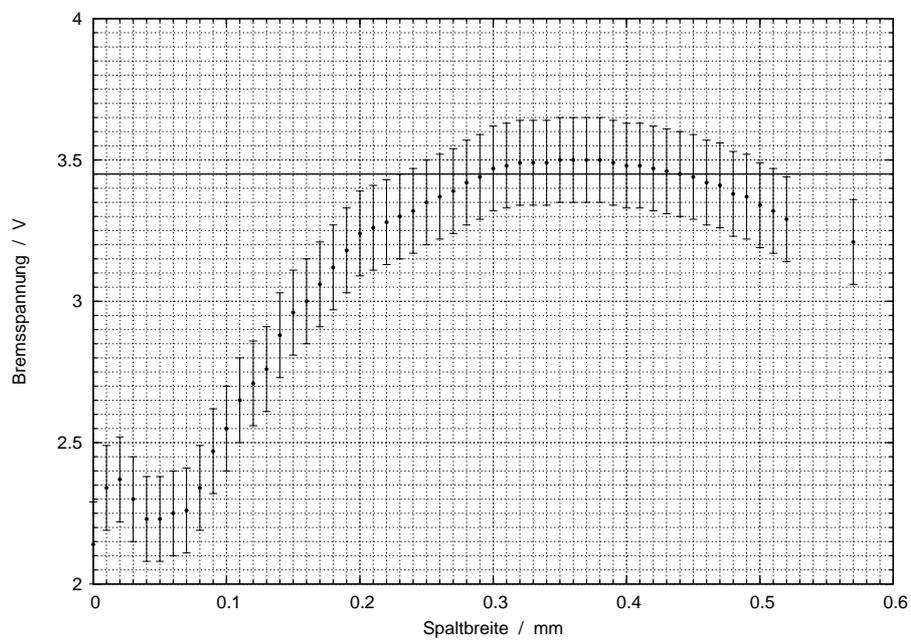


Abb. 3: Bremsspannung über Blendenöffnung (Intensität)

Gemessen wurde dieser Bereich des Sättigungsstroms nicht mehr, in Hinblick auf die Zielsetzung wurde vor allem Wert gelegt auf den linearen Teil, aus dem durch Extrapolation die Bremsspannung gemessen werden kann.

Die tatsächlichen Versuchsdaten folgen dieser Erwartung nur grob qualitativ. Die Kennlinien für die verschiedenen Spektrallinien sind in Abb. 4 - 6 dargestellt. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die Daten einige unerwartete Verhaltensweisen zeigen. Die violette und die gelbe Spektrallinie knicken beide nach einem längeren linearen Verlauf ab, ohne jedoch den Sättigungsstrom schon zu erreichen. Noch erstaunlicher ist, dass ein Photostrom für die gelbe Spektrallinie gemessen wurde, obwohl deren Wellenlänge oberhalb der Grenze für den Effekt (551 nm) liegt. Für die blaugrüne Linie ergibt sich ein nicht sinnvoller positiver Wert für die Bremsspannung. Allerdings war diese Linie auch sehr schwach ausgeprägt, sodass Störeinflüsse hier besonders ins Gewicht gefallen haben dürften.

Prinzipiell kann nun anhand von Gl. 3 durch die Zuordnung von Wellenlänge bzw. Frequenz zu Bremsspannung das Plancksche Wirkungsquantum h und die Austrittsarbeit von Kalium ermittelt werden. Dies ist betragsmäßig in Abb. 7 dargestellt. Die Werte für die blau-grüne und die gelbe Linie, welche offensichtlich unsinnig sind, werden dabei nicht berücksichtigt. Mit nur drei verbleibenden Punkten, auf denen die Gerade basiert, ergibt sich in der linearen Regression entsprechend ein sehr großer Fehler.

Multipliziert man die Steigung mit den Literaturwert von $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$, erhält man den experimentellen Wert für h .

$$h = (4.527 \pm 1.157) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Der Literaturwert ist

$$h = (6.6260 \pm 0.0002) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Ebenso ist am y-Achsenabschnitt direkt die Austrittsarbeit in eV von Kalium ablesbar. Man erhält den Wert

$$U_A = (2.10401 \pm 0.478866) \text{ eV.}$$

Der Literaturwert ist

$$U_A = 2.25 \text{ eV}$$

3.4 Widersprüche zur Wellentheorie

Obwohl, wie schon angedeutet, die Versuchsergebnisse hauptsächlich qualitativ bewertet werden können, zeigt sich dennoch ein Widerspruch zur Wellentheorie des Lichts und eine Bestätigung der Lichtquantenhypothese. Selbst wenn man einmal davon absieht, dass nach klassischem Bild eine Welle keinen Impuls besitzt und es daher eher unklar ist, wie die Energie auf ein Elektron übertragen wird, belegt doch der sehr deutliche lineare Verlauf des Sättigungsstroms in Abhängigkeit von der Intensität die Quantenhypothese. Nach klassischem Bild sollte es keinen direkten linearen Zusammenhang zwischen Intensität und der Anzahl der Elektronen geben (bestenfalls eine untergeordnete Abhängigkeit, da klassisch die gesamte Energie nur durch die Intensität bereit gestellt wird).

Ebenso deutlich ist, dass die Abhängigkeit der Bremsspannung U_0 von der Intensität definitiv *nicht* linear ist, wie die Wellentheorie dies ansetzen würde,

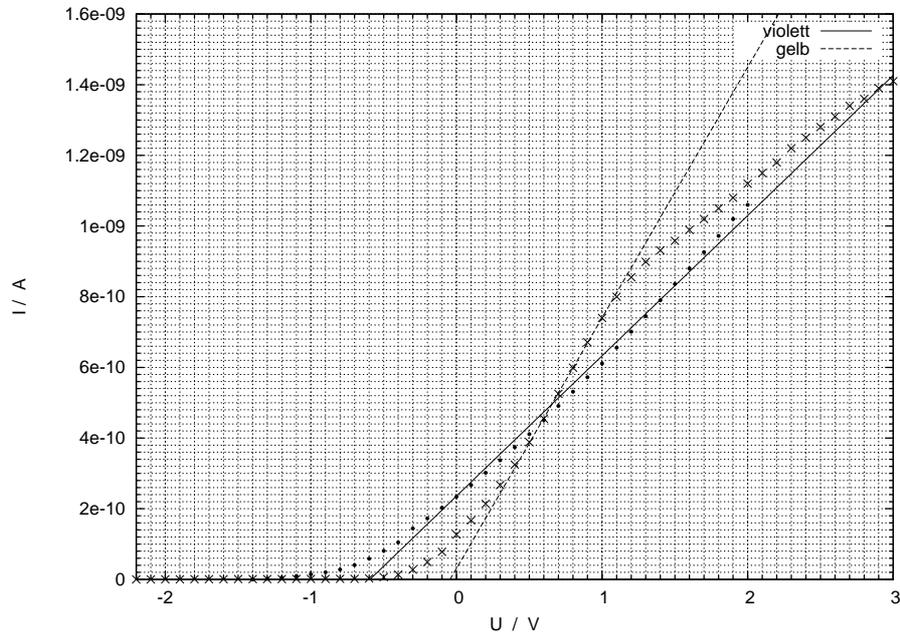


Abb. 4: Kennlinie für die violette und gelbe Spektrallinie

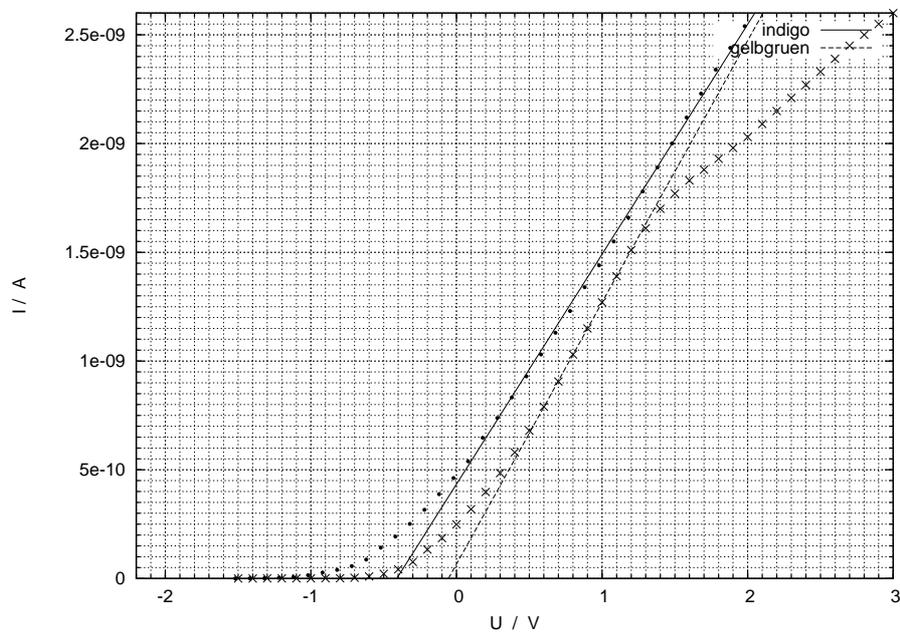


Abb. 5: Kennlinie für die blaue und gelb-grüne Spektrallinie

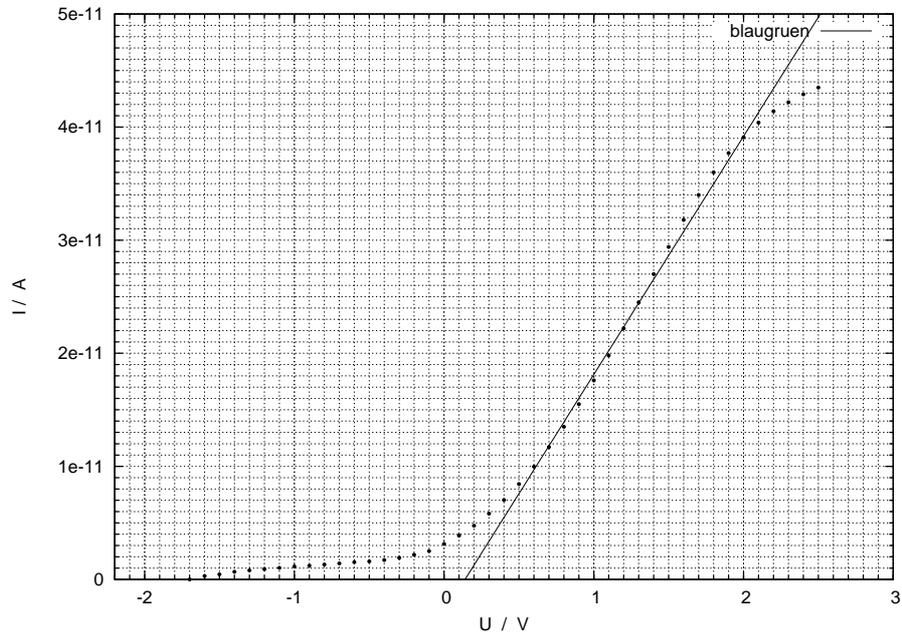


Abb. 6: Kennlinie für die blau-grüne Spektrallinie

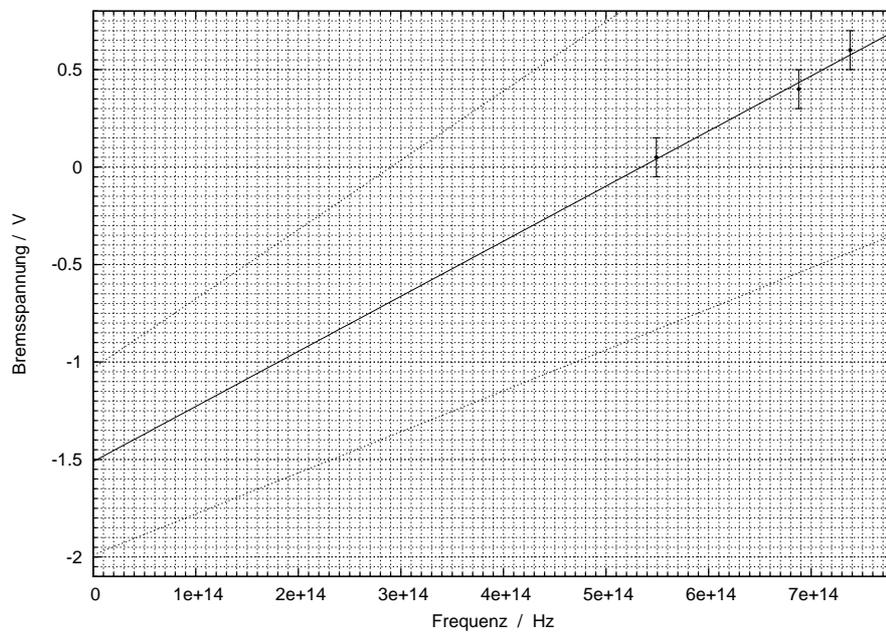


Abb. 7: Bremsspannung über Frequenz

auch wenn es eher gewagt wäre, die experimentellen Daten als “konstant” zu bezeichnen.

Diese Beobachtung führt sich bei der Aufnahme der Kennlinien fort. Nach klassischer Theorie dürfte die Frequenz keine Rolle für U_0 spielen. Dies ist jedoch bei der Messung in aller Deutlichkeit der Fall. Die Bremsspannung folgt ungefähr linear der Frequenz, wie dies die Lichtquantenhypothese verlangt. Dies ist der deutlichste Widerspruch zur klassischen Theorie in diesem Experiment.

Der zeitliche Verlauf des Stroms wurde zwar nicht explizit gemessen, allerdings ist während dem Experiment keine Verzögerung aufgefallen. Nach klassischem Bild hätte es einige 10 Sekunden dauern müssen, bis der Photostrom eingesetzt hätte.

Ein Aspekt, der leider nicht beobachtet werden konnte, und der ein weiterer Widerspruch zur klassischen Theorie gewesen wäre, war die Existenz einer Wellenlängengrenze, ab der der Photoeffekt erst auftreten kann.

Insgesamt zeigt das Experiment eine Reihe von Widersprüchen zur klassischen Wellentheorie, die alle problemlos durch die Lichtquantenhypothese zu erklären sind.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der Messungen folgen qualitativ den Erwartungen, quantitativ sind allerdings große Ungenauigkeiten festzustellen.

Die Messung des Sättigungsstroms in Abhängigkeit von der Intensität war dabei noch am genauesten, ließ jedoch keine weitere quantitative Analyse zu, da kein absolutes Maß für die Intensität (nur die Spaltbreite) zur Verfügung stand.

Die Messung der Bremsspannung erwies sich als sehr ungenau. Zwar konnte ein linearer Verlauf ausgeschlossen werden, aber die Erwartung eines konstanten Wertes wurde nur sehr dürftig erfüllt. Für kleinere Spaltbreiten scheinen zusätzliche nicht kontrollierbare Effekte ins Spiel zu kommen, die die Bremsspannung in diesem Bereich ansteigen lassen. Während der Messung drifteten die Werte zudem recht stark. Der zu erahnende konstante Wert bei dieser Messung ist zudem nicht konsistent zu dem bei der Kennlinienmessung ermittelten Wert.

Allgemein war das Messgerät bei allen Messungen extrem störanfällig. Dies überrascht nicht in Anbetracht der extrem kleinen Ströme, die gemessen wurden. Schon ein Näherkommen hatte eine merklich Auswirkung auf die Messung. Zudem konnte beobachtet werden, dass es im Verlauf der Messung zu erheblichen inneren Aufladungen in der Photozelle kam, die das Ergebnis signifikant verändert haben. Für eine genauere Messung sollte auf eine deutlich bessere Abschirmung der Geräte geachtet werden.

Möglicherweise hatten auch Reste von Hintergrundlicht Einfluss auf die Messung (insbesondere bei den sehr schwachen Spektrallinien)

Sehr ungenau war auch die Messung der Kennlinien. Alle bisher genannten Störeinflüsse waren hier merklich vertreten. Wie schon in der Auswertung beschrieben, gab es einige atypische Erscheinungen. Was die darauf basierende Ermittlung von h und W_A betrifft, so ist zu bemerken, dass zwei der fünf maximal zur Verfügung stehenden Werte verworfen werden mussten. Ob mit nur drei verbleibenden Messwerten sinnvoll ein linearer Verlauf festgestellt werden kann, ist fraglich. Der Fehler ist dann entsprechend hoch, und dank dieser Tatsache sind die ermittelten Werte mit den Literaturwerten verträglich. Für eine aussa-

gekräftige Messung sollten deutlich mehr Spektrallinien untersucht werden. Als ernsthafte Methode für die Bestimmung von h ist dieser Aufbau so nicht als sinnvoll anzusehen.

Alles in allem war dieses Experiment von extremen Störeinflüssen gekennzeichnet, die eine quantitative Analyse sehr schwer machen. Quantitativ konnten jedoch wesentliche Voraussagen bestätigt werden.