

DER PHOTOEFFEKT UND DIE BESTIMMUNG DES PLANCKSCHEN WIRKUNGSQUANTUMS

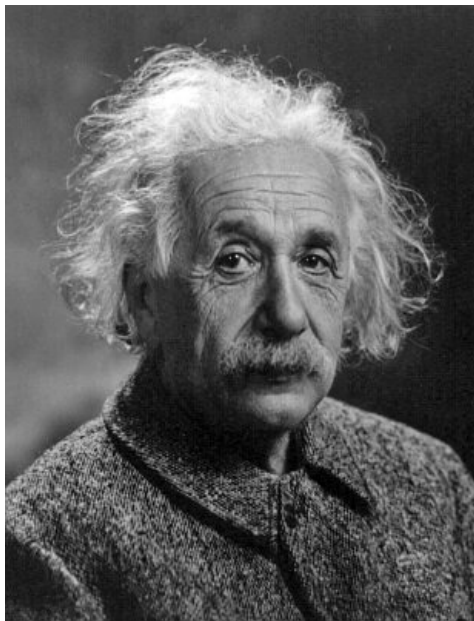


Abbildung 1: Albert Einstein (Nobelpreis für die Deutung des Photoeffekts)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	2
1.1 Historischer Hintergrund	2
1.2 Physikalische Grundlagen	2
2 Photoeffekt	3
2.1 Aufbau und Durchführung	3
2.2 Deutung	3
3 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums	4
3.1 Aufbau und Durchführung	4
3.2 Ergebnisse und Auswertung	6
3.3 Technische Anwendungen des Photoeffekts	8
4 Quellen	8
5 Geräte	8

1 Einführung

1.1 Historischer Hintergrund

Als Geburtsstunde der Quantenphysik gilt der 14. Dezember 1900. An diesem Tag stellte Max Planck sein Strahlungsgesetz vor und führte die Naturkonstante h in die Physik ein. Ihm zu Ehren wird diese Konstante heute „Plancksches Wirkungsquantum“ genannt. Einer der ersten Effekte, der durch die Quantenphysik erklärt werden konnte, war der Photoeffekt. 1887 beobachtete Heinrich Hertz, dass der Funkenüberschlag bei einer Funkenstrecke durch ultraviolettes Licht beeinflusst wurde.

Daraufhin beschäftigten sich Wilhelm Hallwachs und später Philipp Lenard (Abbildung 2) intensiver damit. Hallwachs fand heraus, dass eine negativ aufgeladene Zinkplatte durch UV-Strahlung ihre Ladung abgibt. Durch sichtbares Licht hingegen, egal welcher Intensität, konnte die Platte nicht entladen werden. Dieses Phänomen wird als (äußerer) Photoeffekt bezeichnet und konnte im Rahmen der klassischen Physik nicht erklärt werden¹. Albert Einstein deutete 1905 dieses Experiment unter Verwendung der Planckschen Quantenhypothese. Für diese Arbeit bekam er 1921 den Nobelpreis. Die Quantenphysik beschreibt das Verhalten von Quantenobjekten, z.B. von Atomen und Elektronen. Viele Naturphänomene, insbesondere im mikroskopischen Bereich, werden erst durch sie verständlich. Auch Licht verhält sich wie ein Quantenobjekt.



Abbildung 2: Philipp Lenard

1.2 Physikalische Grundlagen

Das Licht einer Quecksilberdampfampe enthält neben den sichtbaren Anteilen auch ultraviolettes Licht - also kurzwellige elektromagnetische Strahlung in einem für uns nicht sichtbarem Bereich. Mit Hilfe einer Glasscheibe kann der UV-Anteil herausgefiltert werden, da Glas UV-Strahlung absorbiert. UV-Licht besitzt eine höhere Frequenz und somit auch eine größere Energie als sichtbares Licht.

Die Zinkplatte muss zuvor abgeschmirgelt werden, damit sich an der Oberfläche kein Oxid befindet. Ein Metall besteht aus Atomen und frei beweglichen Elektronen. Es kann geladen werden, indem entweder Elektronen zugegeben (negative Ladung) oder indem Elektronen abgezogen werden (positive Ladung). Ein PVC-Stab, der an einem Katzenfell gerieben wird, lädt sich negativ auf. Diese Ladung kann auf die Zinkplatte übertragen werden. Wird stattdessen ein Glasstab verwendet, lädt sich dieser positiv auf und auch diese Ladung kann auf die Zinkplatte übertragen werden. Ein mit der Zinkplatte verbundenes Elektroskop zeigt diese Ladung an (Abbildung 3).

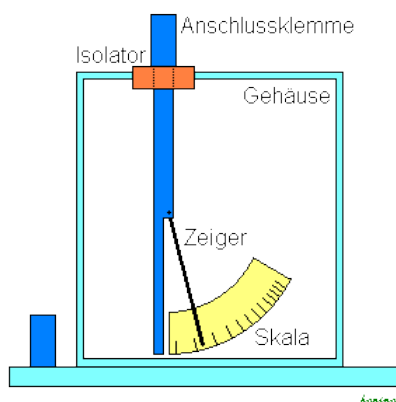


Abbildung 3: Elektroskop

¹Es treten beispielsweise folgende Widersprüche zwischen der klassischen Wellentheorie und den experimentellen Beobachtungen auf: 1. Auch Licht mit großer Wellenlänge / kleiner Frequenz sollten Elektronen herauslösen können, wenn die Intensität hinreichend hoch gewählt ist. 2. Gemäß der klassischen Theorie sollte das Auslösen der Ladungen erst nach einer kleinen Zeitverzögerung einsetzen.

2 Photoeffekt

2.1 Aufbau und Durchführung

Geräte:

- Elektroskop mit Zinkplatte
- Katzenfell
- PVC-Stab und Glasstab
- Quecksilberdampf Lampe mit Drossel
- Uhren Glas

Durchführung:

Die verschiedenen Stäbe werden am Katzenfell gerieben, wodurch die Ladungen getrennt werden und die Stäbe aufgeladen werden. Die Ladungen des Stabes werden auf die Zinkplatte des Elektroskops gebracht. Es ist ein Zeigerausschlag zu beobachten. Mithilfe der Quecksilberdampf Lampe wird die Zinkplatte bestrahlt. Die Glasscheibe wird nun zwischen die Lampe und die Zinkplatte gebracht, so dass das UV-Licht herausgefiltert wird und nur noch das sichtbare Licht zur Zinkplatte gelangt. Durch Verkürzung der Entfernung zwischen Lampe und Zinkplatte kann die Lichtintensität erhöht werden.

Zinkplatte	Licht	Beobachtung
positiv geladen	UV + sichtbar	
negativ geladen	UV + sichtbar	
negativ geladen	UV + sichtbar, hohe Intensität	
negativ geladen	nur sichtbar (kein UV)	
negativ geladen	nur sichtbar (kein UV), hohe Intensität	

Tabelle 1: Beobachtungen bei der Bestrahlung der Zinkplatte

Aufgabe 1:

- Lade die Zinkplatte einmal positiv und einmal negativ auf und bestrahle sie jeweils mit der Lampe! Was kannst du am Elektroskop beobachten?
- Variiere die Intensität durch Veränderung des Abstandes zwischen Lampe und Zinkplatte! Filtere außerdem mit der Glasscheibe die UV-Anteile heraus! Was beobachtest du? Wie ist das zu erklären? Trage deine Ergebnisse in Tabelle 1 ein!

2.2 Deutung

Die Entladung von Festkörpern mithilfe von Licht wird „äußerer Photoeffekt“ oder „lichtelektrischer Effekt“ genannt. Durch Licht wird eine negativ geladene Platte entladen, eine Platte mit positiver Ladung jedoch nicht. Man deutet dies so, dass es sich bei den negativen Ladungen um Elektronen handelt, die durch die Bestrahlung aus der Platte herausgelöst werden (Abb. 4). Durch die Erhöhung der Lichtintensität entlädt sich die Platte schneller. Wird jedoch eine Glasscheibe vorgehalten, die die UV-Strahlung abschirmt, so kommt es zu keiner Entladung - auch nicht, wenn die Intensität erhöht wird.

Diese Unabhängigkeit von der Intensität widerspricht der klassischen Physik, in der Licht als eine elektromagnetische Welle betrachtet wird. Gemäß den klassischen Vorstellungen müssten sich die Elektronen auch durch sichtbares Licht von der Platte ablösen lassen, wenn die Lichtintensität genügend groß gewählt wird. Dieses Verhalten ist nur mithilfe der Quantenphysik zu erklären.

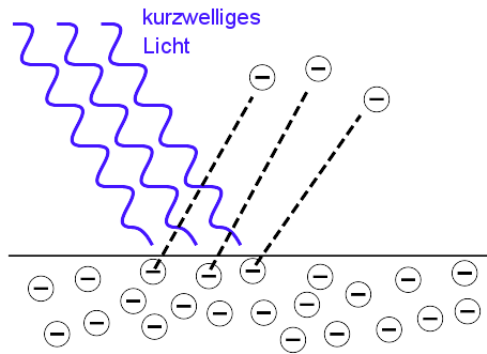


Abbildung 4: Photoeffekt

Bei der Wechselwirkung mit Materie verhält sich Licht so, als ob es aus Teilchen besteht – sogenannte „Lichtquanten“ oder „Photonen“². Die Energie eines Photons nimmt proportional zur Frequenz f zu ($E_{\text{Photon}} = h \cdot f$). UV-Licht hat eine höhere Frequenz als sichtbares Licht. Die Photonen des UV-Lichtes besitzen demnach eine größere Energie als die Photonen des sichtbaren Lichtes. Wenn ein Elektron ein Photon genügend hoher Energie absorbiert, löst es sich von der Zinkplatte ab. Wird die Intensität des UV-Lichtes erhöht, so gelangen mehr Photonen an die Zinkplatte, also geschieht die Entladung schneller. Bei sichtbarem Licht besitzen die Photonen weniger Energie. Auch wenn die Intensität erhöht wird, also mehr Photonen pro Zeit auf die Zinkplatte treffen, können keine Elektronen aus der Platte gelöst werden. Die Energieportion eines Photons reicht nicht aus, um die Austrittsarbeit zu überwinden, und die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron sehr schnell hintereinander zwei Photonen absorbiert, ist extrem gering³. Für ein Photon des UV-Lichtes gilt: Es gibt seine Energie an das Elektron ab, daraufhin kann das Elektron die zum Verlassen der Zinkplatte nötige Austrittsarbeit aufbringen und behält den Rest als kinetische Energie: $E_{\text{Photon}} = W_A + E_{\text{kin}}$.

Die Austrittsarbeit W_A , die benötigt wird, um Elektronen aus einem Festkörper herauszulösen, ist für verschiedenen Materialien unterschiedlich - sie ist eine Stoffkonstante.

3 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

3.1 Aufbau und Durchführung

Geräte:

- Optische Bank und optische Reiter
- Quecksilberdampfampe mit Drossel
- Irisblende, Linse, Linsenhalter und Farbfilter
- Photozelle mit Netzgerät
- Voltmeter

²Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war man fest davon überzeugt, dass Licht eine Welle wäre. Alle bekannten Phänomene, mit Ausnahme des Photoeffekts, waren im Wellenmodell perfekt beschreibbar. Man versuchte den Photoeffekt zu verstehen, aber niemand kam auf die Idee, die zugrunde liegende Modellvorstellung anzuzweifeln. Hier liegt die besondere Leistung Albert Einsteins, der den Mut hatte, sich von der klassischen Vorstellung zu lösen und die damals relativ neue Plancksche Strahlungshypothese aus dem Jahr 1900 auf das Licht zu verallgemeinern. Unsere Vorstellung von der Natur des Lichts wurde hierdurch grundlegend verändert.

³Verwendet man eine Lichtquelle extrem hoher Intensität (z.B. einen Laser), so können auch „Zwei-Photonen-Absorptionen“ beobachtet werden.

Aufbau:

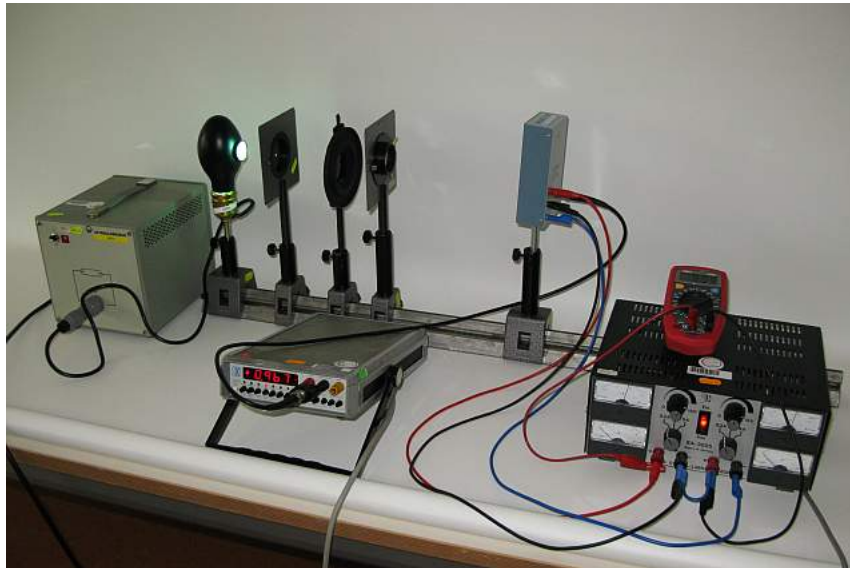


Abbildung 5: Versuchsaufbau

Auf einer optischen Bank werden die Geräte in folgender Reihenfolge montiert: Quecksilberdampfampe, Irisblende, Farbfilter, Linse, und die Photozelle. Die Quecksilberdampfampe wird mithilfe einer Drossel betrieben. In der Photozelle befindet sich ein eingebauter Verstärker, der durch ein Netzgerät mit Strom versorgt wird (Abb. 6). Zur Kontrolle der anliegenden Spannung wird ein Digitalmultimeter parallel geschaltet. Beachte beim Einstellen die Beschriftung auf der Photozelle! Ein an die Photozelle angeschlossenes Voltmeter zeigt die Grenzspannung (s. u.) an. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 5 zu sehen. Lass deinen Aufbau bitte prüfen, bevor du das Experiment beginnst!

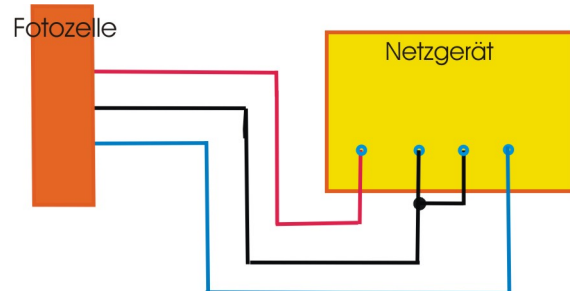


Abbildung 6: Anschluss des Netzgeräts

Die empfindliche Photozelle muss, während sie nicht benutzt wird, mit Papier abgedeckt werden. Fällt Licht genügend kleiner Wellenlänge auf die Kathode der Photozelle, so treten Elektronen aus der Oberfläche aus. Da die Kathode aus Kalium⁴ ist, dessen Austrittsarbeit geringer ist als die von Zink, reicht bereits sichtbares Licht, um den Photoeffekt hervorzurufen. Ist die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen groß genug, gelangen sie auf die ringförmige Auffängerelektrode (Abb. 7). Da die Elektronen nicht (bzw. nur schlecht) abfließen können, baut sich zwischen Auffängerelektrode und Kathode eine Spannung auf, so dass es für nachfolgende Elektronen immer schwerer wird, die Auffängerelektrode zu erreichen. Nach kurzer Zeit nimmt diese Spannung einen stabilen Wert an, d.h. auch die schnellsten aus der Kathode herausgelösten Elektronen können die Auffängerelektrode nicht mehr erreichen. Diese Grenzspannung wird von uns gemessen.

Durchführung:
Mithilfe der Grenzspannungsmethode kann die kinetische Energie der Elektronen bestimmt werden. Wenn die Elektronen nicht mehr zur Auffängerelektrode gelangen können, ist der maximale Wert der Grenzspannung erreicht und ändert sich nicht mehr. Die maximale kinetische Energie der Elektronen ist dann:

$$E_{kin}^{max} = e \cdot U \quad (1)$$

⁴Alkalimetalle weisen im Allgemeinen eine relativ geringe Austrittsarbeit auf.

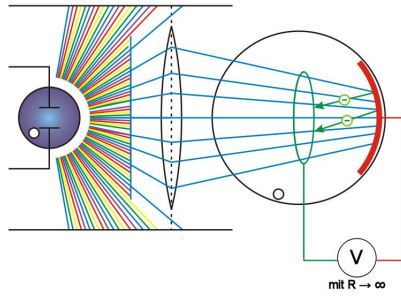


Abbildung 7: Aufbau der Grenzspannung in der Photozelle

Die Energie eines Lichtquants (Photons) wächst linear mit der Frequenz $E_{\text{Photon}} = h \cdot f$. Mithilfe von Farbfiltern können die verschiedenen Linien aus dem Spektrum der Quecksilberdampfampe herausgefiltert werden, um verschiedene Frequenzen des sichtbaren Lichtes zu nutzen. Mithilfe der Formel $c = f \cdot \lambda$ (c : Lichtgeschwindigkeit, $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) und der Tabelle 2 können die entsprechenden Frequenzen des Lichtes bestimmt werden. Anschließend wird aus der gemessenen elektrischen (Grenz-)Spannung die Energie der einzelnen Elektronen berechnet. Es ist zweckmäßig, diese in der Einheit „Elektronenvolt“ (eV) anzugeben ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Farbe	Filter	Wellenlänge λ/nm
violett	33	405
blau	32	436
grün	31	546
gelb	30	578

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge

Farbe	Frequenz / Hz	Grenzspannung / V	Kinetische Energie / eV
violett			
blau			
grün			
gelb			

Tabelle 3: Zusammenhang zwischen Frequenz und Energie

Aufgabe 2:

- Berechne die Frequenzen der entsprechenden Farben und trage sie in Tabelle 3 ein!
- Miss die Grenzspannung, die sich für die einzelnen Farben ergibt!
- Berechne dann die kinetische Energie der Elektronen!
- Stelle den Zusammenhang zwischen der Frequenz des Lichts und der Energie der Elektronen grafisch auf Millimeterpapier dar!
- Bestimme aus deiner Graphik das Plancksche Wirkungsquantum sowie die Austrittsarbeit für Kalium! Was sagt die Grenzfrequenz aus?

3.2 Ergebnisse und Auswertung

Durch die Messpunkte legt man eine Ausgleichsgerade.

Die Gleichung dieser sogenannten *Einsteingeraden* lautet:

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

Der Schnittpunkt der Einsteingeraden mit der vertikalen Achse (Ordinate) stellt die Austrittsarbeit dar. Die Austrittsarbeit wird von der Energie des Photons abgezogen, da sie der kinetischen Energie des Elektrons beim Austreten aus der Metalloberfläche verloren ging. Die Steigung der Gerade entspricht dem Planckschen Wirkungsquantum.

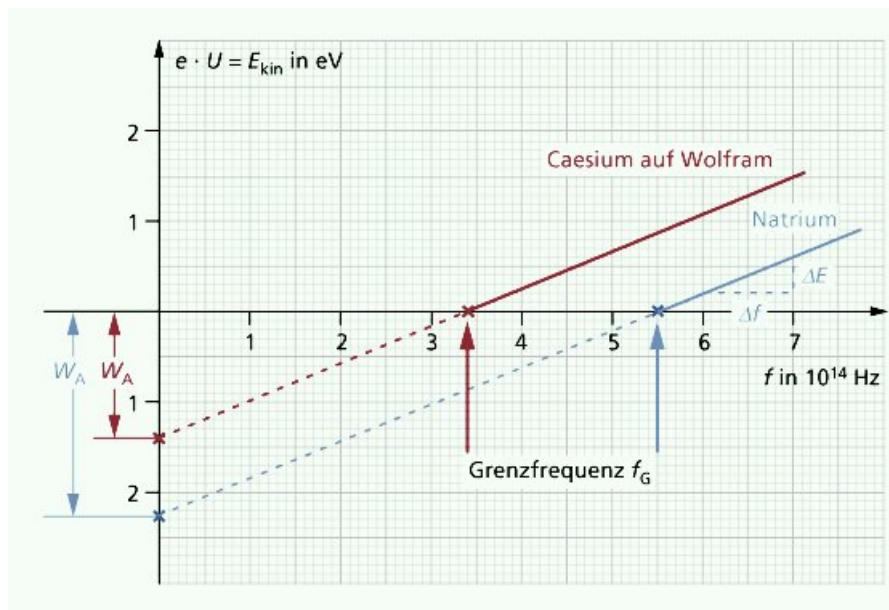


Abbildung 8: Einsteingerade für Cäsium und Natrium

Das Plancksche Wirkungsquantum ist eine Naturkonstante, sie beträgt $h = 6,6 \cdot 10^{-34} Js$. Somit ergeben sich für die unterschiedlichen Materialien Parallelen: Die Geraden haben zwar unterschiedliche Ordinaten-Abschnitte (Austrittsarbeiten), aber stets die gleiche Steigung (h) (Abb. 8). Der Schnittpunkt mit der horizontalen Achse (Abszisse) ist die „Grenzfrequenz“ - nur Licht mit mindestens dieser Frequenz kann Elektronen aus der Platte auslösen. Die Energie ist umso größer, je höher die Frequenz des verwendeten Lichtes ist. Die Energie des Lichtquants hf wird auf das Elektron übertragen. Ein Teil dieser Energie wird benötigt, um Austrittsarbeit zu überwinden. Die restliche Energie verbleibt dem Elektron als kinetische Energie.

Der Photoeffekt lässt sich im Wellenbild nicht verstehen, sondern nur im Teilchenbild. Das heißt aber nicht, dass Licht wirklich aus Teilchen besteht! Licht ist etwas Drittes, weder Welle noch Teilchen. Die komplette, mathematische Beschreibung des Verhaltens von Licht erfolgt durch die Quantenelektrodynamik, an deren Formulierung RICHARD FEYNMAN (Abb. 9) wesentlichen Anteil hatte. Doch man kann mit Hilfe der nachfolgend aufgeführten „Faustregel“ das Verhalten von Quantenobjekten auch ohne Quantenelektrodynamik beschreiben, muss dann aber zwei scheinbar zueinander widersprüchliche Modelle (Wellenbild und Teilchenbild) verwenden.



Abbildung 9: Richard Feynman (1965)

Zum Verständnis der meisten Phänomene reicht die folgende „Faustregel“ aus:

**Die Ausbreitung von Quantenobjekten im Raum
wird im Wellenbild beschrieben.**

**Die Wechselwirkung von Quantenobjekten mit Materie
wird im Teilchenbild beschrieben.**

3.3 Technische Anwendungen des Photoeffekts

- Lichtschranken
- Restlichtverstärker
- Photomultiplier
- Photoelektronenspektroskopie (→ Untersuchung von Festkörpern)
- Erzeugung freier Elektronen für Teilchenbeschleuniger

4 Quellen

- Meyer, Schmidt (Herausgeber); Basiswissen Schule - Physik Abitur, Paetec 2003
- Wikipedia, <http://de.wikipedia.org>
- Abbildungen (Stand 16.01.2010):
 - Abb. 1: Wikipedia, public domain (copyright not renewed)
 - Abb. 2: Wikipedia, public domain (because of age - published 1905)
 - Abb. 3: Wikipedia, GNU-Lizenz für freie Dokumentation, gezeichnet von Honina
 - Abb. 4: Wikipedia, public domain
 - Abb. 7: Wikipedia, GNU-FDL (Urheber: Stefan-Xp), modifiziert
 - Abb. 8: Meyer, Schmidt (Herausgeber); Basiswissen Schule - Physik Abitur, Paetec 2003
 - Abb. 9: Wikipedia, public domain (created before January 1, 1969),
Quelle: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html

5 Geräte

Bezeichnung		Bezeichnung
Photozelle		Optische Bank
Doppel-Labornetzgerät		Optische Reiter
Quecksilberdampf Lampe		Voltmeter
Irisblende		PVC-Stab & Plexiglasstab
Linsenhalter		Katzenfell
Farbfilter (46830-46833)		Kabel und Adapter
Linse ($f=90-120$)		Uhrenglas
Elektroskop		Bleistifte und Lineal
Digital-Multimeter		Millimeterpapier
Drossel		Taschenrechner