

Versuch A12 – Der COMPTON-Effekt		
Name:	Mitarbeiter:	
Gruppennummer:	lfd. Nummer:	Datum:

1. Aufgabenstellung

Untersuchen Sie die Winkelabhängigkeit der Energie der gestreuten RÖNTGENstrahlung infolge des COMPTON-Effektes

1.1. Versuchsziel

Beschäftigen Sie sich mit folgenden Schwerpunkten des Versuches:

- Erzeugung und Eigenschaften von Röntgenstrahlung
- Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte
- der COMPTON-Effekt
- Beschreibung der Versuchsanordnung

1.2. Messungen

1.2.1. Kalibrieren Sie den Energiedetektor.

1.2.2. Messen Sie winkelabhängig (in den bei der Versuchsdurchführung angegebenen Schritten) die Energie der gestreuten Röntgenstrahlung.

1.3 Auswertungen

1.3.1 Fassen Sie die Messergebnisse in einer Tabelle zusammen.

1.3.2 Stellen Sie die Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ in Abhängigkeit vom Streuwinkel ϑ sowie von $(1-\cos\vartheta)$ dar!

1.3.3 Berechnen Sie aus den Messdaten die COMPTON-Wellenlänge λ_c .

1.4. Zusatzaufgabe

Bei welchem Streuwinkel ist die Verschiebung $\Delta\lambda$ maximal?

2. Grundlagen

Im Jahr 1916 erweiterte EINSTEIN sein Konzept der Lichtquanten (Photonen), indem er jedem Lichtquant einen Impuls zuordnete. Ein Photon der Energie $E = hf$ hat demnach einen Impuls vom Betrag:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

Aus Gl. 1 ist zu sehen, dass bei einer Wechselwirkung zwischen einem Photon und einem materiellen Teilchen Energie und Impuls übertragen werden kann.

Im Jahre 1923 führte A. COMPTON von der Washington University in St. Louis ein Experiment durch, das einen überzeugenden Beweis für die korpuskulare Natur der elektromagnetischen Strahlung bei der Wechselwirkung mit stofflicher Materie und für die Gültigkeit von Energie- und Impulserhaltungssatz auch in der Mikrophysik lieferte. Bei diesem Experiment trafen Röntgenstrahlen der Wellenlänge λ auf eine Kohlenstoffprobe, wie in Abb. 1 dargestellt.

COMPTON ermittelte die Wellenlänge λ' und Intensität I der Röntgenstrahlen, die unter verschiedenen Winkeln ϑ von der Kohlenstoffprobe gestreut wurden.

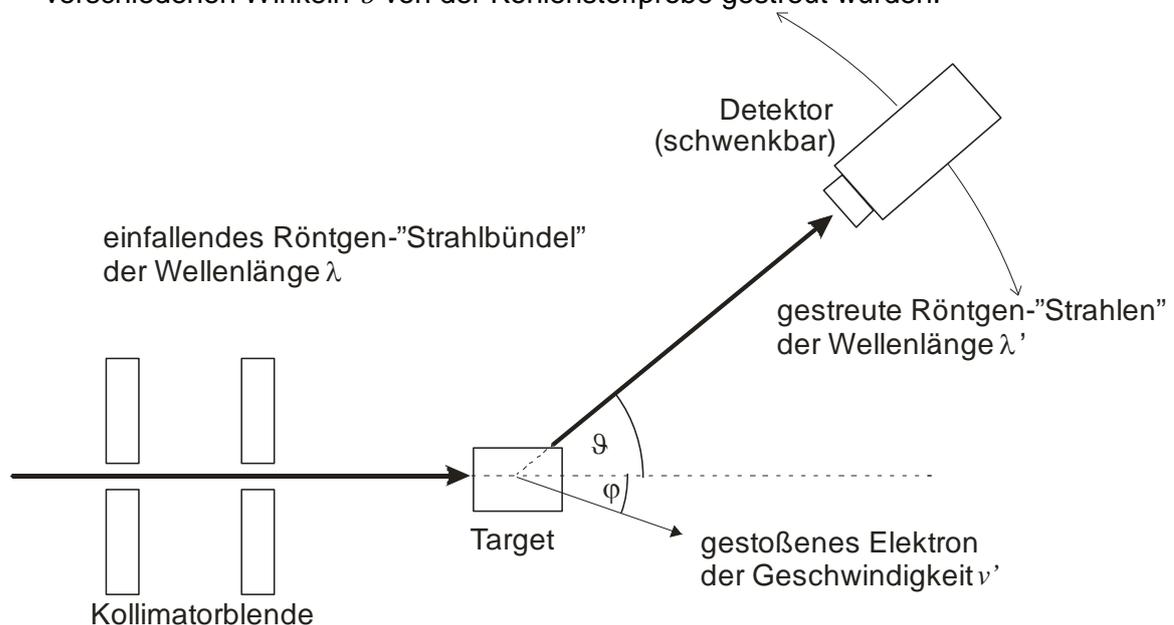


Abb. 1 Prinzipielle Anordnung.

Obwohl der einfallende Röntgenstrahl nur eine Wellenlänge λ enthielt, traten bei den gestreuten Röntgenstrahlen zwei Intensitätsmaxima auf. Ein Maximum liegt bei der Wellenlänge λ der einfallenden Strahlung (RAYLEIGH bzw. klassische oder kohärente Streuung), das zweite Maximum bei einer Wellenlänge λ' , die um eine Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ (die so genannte COMPTON-Verschiebung) länger ist (inkohärente Streuung) auf. Die mit dem Streuwinkel zunehmende Wellenlänge bedeutet einen Energie- und Impulsverlust der Röntgenstrahlung bei der Wechselwirkung mit dem Festkörper.

Diese Ergebnisse sind im Rahmen der klassischen Physik nicht zu verstehen. Danach handelt es sich bei dem einfallenden Röntgenstrahl um eine elektromagnetische Welle. Ein Elektron der Probe wird dann durch die oszillierende elektrische Kraft des elektrischen Feldes zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die Frequenz, mit der das Elektron schwingt, ist gleich der Anregungsfrequenz (kohärente Streuung) und das Elektron emittiert Strahlung mit *derselben* Frequenz (Hertzscher Dipol). Die gestreuten Röntgenstrahlen sollten also dieselbe Frequenz und damit auch dieselbe Wellenlänge wie die einfallende Strahlung haben. Das ist aber nicht der Fall. Einzig die Intensität der einfallenden Strahlung könnte abnehmen.

COMPTON interpretierte die Streuung von Röntgenstrahlen an den Elektronen des Kohlenstoffs als Energie- und Impulsübertrag (vermittelt durch Photonen) zwischen dem einfallenden Röntgenstrahl und den als – im Vergleich zur Energie der Röntgenstrahlung - frei angenommenen Elektronen im Kohlenstoff, als handle es sich um Teilchen.

Um das Problem zu lösen, nimmt man an, ein einzelnes (Röntgen-) Photon der Energie $E = hf$ sei an der Wechselwirkung zwischen dem einfallenden Röntgenstrahl und dem als ruhend angenommenen Elektron beteiligt. Durch den Stoß wird sich die Ausbreitungsrichtung des Röntgenstrahls ändern (der Röntgenstrahl wird gestreut) und das Elektron erleidet einen Rückstoß. Dem Elektron wird also ein gewisser Betrag an kinetischer Energie übertragen. Bei diesem Prozess gilt der Energieerhaltungssatz. Die Energie des gestreuten Photons ($E' = hf'$) muss daher kleiner als die des einfallenden Photons sein. Daher haben die gestreuten Röntgenstrahlen eine kleinere Frequenz f' und damit eine größere Wellenlänge λ' als die einfallenden Röntgenstrahlen. Das zeigen die experimentellen Ergebnisse von Compton.

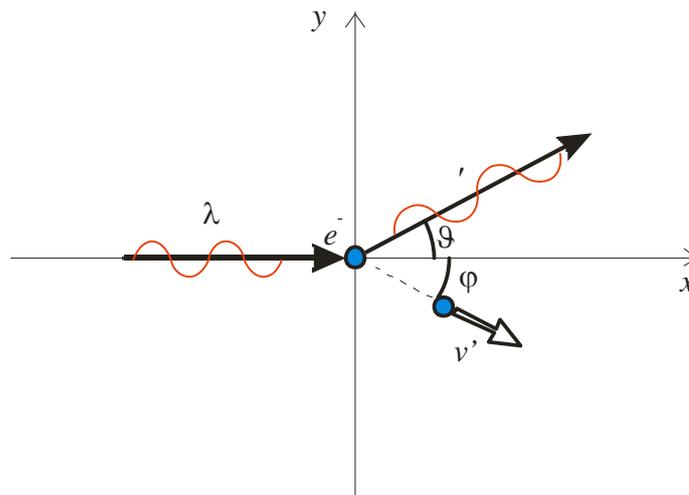


Abb. 2 Verhältnisse vor und nach dem Stoß.

Für die quantitative Behandlung dieses Prozesses wenden wir den Energieerhaltungssatz und Impulserhaltungssatz an. Abbildung 2 zeigt einen „Zusammenstoß“ zwischen einem Röntgenstrahl und einem zunächst ruhenden, freien Elektron im Target.

Nach dem Stoß bewegt sich ein Röntgenquant mit der Wellenlänge λ' in die durch den Winkel ϑ gekennzeichnete Richtung und das Elektron bewegt sich in die Richtung φ mit der Geschwindigkeit v' .

Die Energieerhaltung besagt:

$$hf + E_{e0} = hf' + E'_e \quad (2)$$

wobei hf die Energie des einfallenden Röntgenphotons, hf' die Energie des gestreuten Röntgenphotons, E_{e0} die Ruheenergie des Elektrons und E'_e die kinetische Energie des zurückgestoßenen Elektrons sind (wie in der Mechanik vereinbaren wir, dass die gestrichenen Größen für die Verhältnisse nach dem Stoß gelten). Da der Rückstoß des Elektrons mit nahezu Lichtgeschwindigkeit erfolgen kann, muss man die kinetische Energie des Elektrons nach dem Stoß relativistisch behandeln.

$$hf + m_{e0}c^2 = hf' + E'_e \quad (3)$$

Zwischen Energie und Impuls eines relativistischen Teilchens gilt

$$E_e^2 = m_{e0}^2c^4 + p_e^2c^2 \quad (4)$$

Da das Elektron diese Energie nach dem Stoß besitzt, schreiben wir

$$E_e'^2 - p_e'^2 c^2 = m_{e0}^2 c^4 \quad (5)$$

Gleichung (3) wird nach E_e' umgestellt und das Ergebnis in Gleichung (5) eingesetzt:

$$(hf + m_{e0}c^2 - hf')^2 - p_e'^2 c^2 = m_{e0}^2 c^4 \quad (6)$$

Dass der Impuls ein Vektor ist, wird in Abb. 3 berücksichtigt. Nach dem Cosinus-Satz gilt für den Betrag des Impulses vom Elektron nach dem Stoß

$$p_e'^2 = p_{Ph}^2 + p_{Ph}'^2 - 2p_{Ph} \cdot p_{Ph}' \cos \vartheta \quad (7)$$

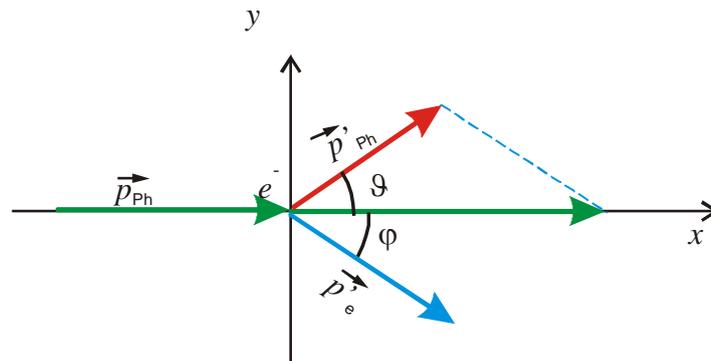


Abb. 3 Impulsdarstellung

Der Term für p_e' wird in Gleichung (6) eingesetzt, da uns nur die Beträge des gestreuten Röntgenphotons interessieren.

$$(hf + m_{e0}c^2 - hf')^2 - c^2(p_{Ph}^2 + p_{Ph}'^2 - 2p_{Ph} \cdot p_{Ph}' \cos \vartheta) = m_{e0}^2 c^4 \quad (8)$$

Rechnet man die Klammern aus und berücksichtigt die Gleichung (1), erhält man

$$f m_{e0}c^2 - f' m_{e0}c^2 - hf f' - hf f' \cos \vartheta = 0 \quad (9)$$

Weitere Umformungen ergeben:

$$\frac{f - f'}{f f'} = \frac{h}{m_{e0}c^2} (1 - \cos \vartheta) \quad (10)$$

oder mit der Wellenlänge formuliert:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_{e0}c} (1 - \cos \vartheta) \quad (11)$$

Dieses Resultat stimmt mit den Messergebnissen von COMPTON überein. Die Verschiebung der Wellenlänge $\Delta \lambda$ ist nur vom Streuwinkel abhängig. Sie ist aber nur bei kleinen Wellenlängen und Stoßpartnern kleiner Masse nachweisbar.

Bei einem Winkel von 90° beträgt die Wellenlängenänderung $\Delta \lambda = \frac{h}{m_{e0}c} = 2,4 \text{ pm}$ und

wird COMPTON-Wellenlänge λ_C genannt.

Da die Röntgen-Photonen nicht nur an den äußeren, schwach gebundenen Elektronen gestreut werden, sondern auch an fest gebundenen und damit am Atom, wird neben der geringeren Wellenlänge auch die Wellenlänge der einfallenden Röntgen-Photonen nachweisbar sein, da diese Stöße (fast) elastisch verlaufen.

3. Experiment

3.1. Versuchsanordnung

Zuerst ist die zentrale Stromversorgung an der Steckdosenleiste einzuschalten. Dadurch wird die Kühlung des Energiedetektors begonnen, um sein Rauschen herabzusetzen. Dieses Teil ist einsatzbereit, wenn an seinem Gehäuse eine grüne LED leuchtet. Der Experimentierraum des Röntgengerätes ist in Abb. 4 dargestellt. Wird das Gerät angeschaltet, führt es einen Selbsttest aus, Targettisch und Detektor stellen sich auf einen Winkel von 0° ein. Die Experimente können nur gestartet werden, wenn die Türen des Röhren- und Experimentierraumes geschlossen sind. Ein Computer mit einem entsprechenden Programm übernimmt die energieabhängige Darstellung des Röntgenspektrums. Den Kanalnummern des Vielkanalanalysators muss eine Energie zugeordnet werden. Da der Detektor vom Primärstrahl nur bei $\vartheta=0^\circ$ getroffen wird, ist bei allen anderen Messungen nur das gestreute Spektrum im Diagramm zu sehen (und nicht beide zusammen).

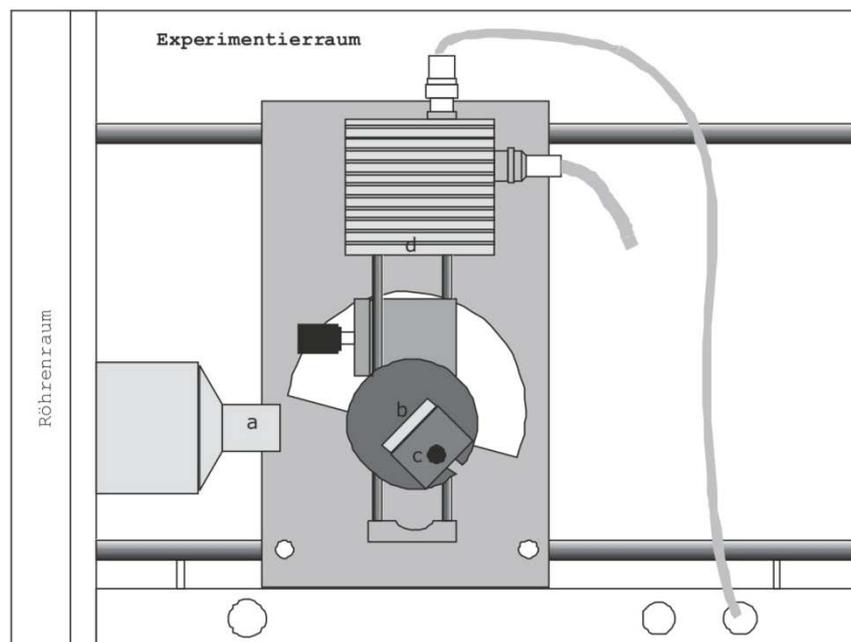


Abb. 4 Aufbau des Experiments
a - Kreis-Kollimator; b - Target; c - Targettisch; d - Detektor

3.2. Hinweise zur Versuchsdurchführung

Im ersten Teil des Experiments wird mit der Energieverteilung des Primärspektrums die Kalibrierung der Kanäle vorgenommen und das Maximum der Energie bestimmt. Der Computer wird eingeschaltet, das Programm CASSY Lab gestartet. Die Targethalterung muss ausgebaut werden. Dazu wird der Öffnungsknopf gedrückt und die Bleiglastür zur Seite geschoben. Dann wird die gerändelte Überwurfmutter hinter dem eigentlichen Targettisch (vgl. Abb. 4) gelöst und die Halterung heraus gezogen.

Danach wird der Kreiskollimator des Röntgengerätes ausgebaut und die Abschwächerblende aufgesetzt (vgl. Abb. 5). Achten Sie auf die Markierungen an den Teilen. Auf dem Kreiskollimator befindet sich zur Monochromatisierung des Röntgenstrahls immer ein Zirkoniumfilter (für das Bremskontinuum der Molybdänanode hat Zirkonium einen großen atomaren Schwächungskoeffizienten). Die beiden Teile werden so zusammengesteckt, dass die Markierungen übereinstimmen. Danach wird das System wieder in seine Halterung im Experimentierraum eingesetzt (Markierung beachten). Am Bedienfeld wird die Röntgenspannung von 35 kV eingestellt (Taste \cup drücken und dann mit dem Dreheinsteller die geforderte Spannung einstellen).

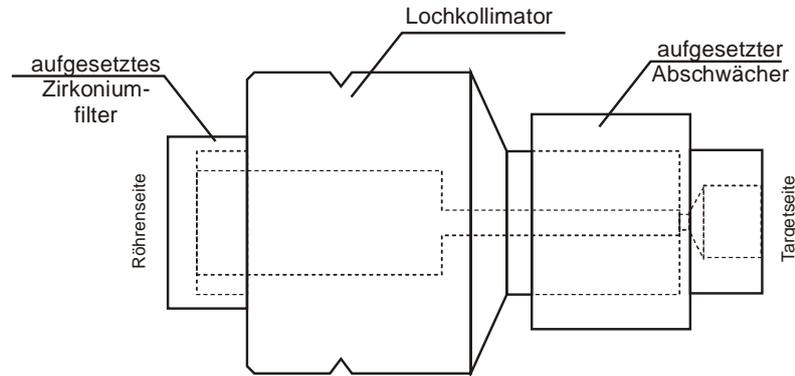


Abb. 5 Blendensystem.

Das Bedienfeld des Röntgengerätes und seine Bezeichnungen sind im Anhang dargestellt. Der Anodenstrom wird auf 0,02 mA eingestellt (dazu wird die Taste `I` gedrückt und mit dem Dreheinsteller die Stromstärke eingestellt). Da das System Lochkollimator – Abschwächerblende nur noch einen dünnen Röntgenstrahl hindurch lässt, muss der Winkel $\vartheta = 0^\circ$ sehr sorgfältig einjustiert werden. Drücken Sie am Bedienfeld des Röntgengerätes die Taste `Sensor` und stellen Sie mit dem Dreheinsteller einen Winkel von $0,6^\circ$ ein. Inzwischen müsste der Energiedetektor seine Betriebstemperatur erreicht haben, erkennbar am Leuchten der grünen LED an seiner Gehäuseseite. Starten Sie das Computerprogramm `CASSY` und das Messprogramm `Primärspektrum 1` (im Verzeichnis `Eigene Dateien\Cassy`) mit der Taste `F3`. In diesem Messprogramm sind eingestellt (im Fenster `Einstellungen` auf `Messparameter anzeigen` klicken):

Vielkanalmessung

- 512 Kanäle
- Messdauer 100 s
- Verstärkung -3

Dieses Fenster und das Fenster `Einstellungen` werden geschlossen.

Schalten Sie am Bedienfeld die Hochspannung ein (Taste `HV on`). Danach wird mit der Taste `F9` am Computer die Messung begonnen. Im rechten oberen Teil des Bildschirmfensters stehen die Zählrate und die verbleibende Messzeit. Die Zählrate sollte in der Größenordnung $n = 50$ liegen. Es wird am Bedienfeld die Taste `Sensor` gedrückt, um den Strahlenverlauf Kollimator – Abschwächerblende – Eingangsfenster des Energiedetektors zu optimieren. Mit dem Dreheinsteller wird in $0,1^\circ$ -Schritten der Winkel geändert, um festzustellen, ob sich die Zählrate noch erhöhen lässt. Das gefundene Maximum des Winkels wird als $\vartheta = 0^\circ$ definiert. Die Hochspannung ist auszuschalten und das Messende abzuwarten. Löschen Sie die Messung mit der Taste `F4`, drücken 2-mal `F5` und stellen im Fenster `Messparameter` die Messdauer auf 300 s ein. Das Fenster wird wieder geschlossen. Nach Zuschalten der Hochspannung wird die Messung zur Aufnahme des primären Röntgenspektrums begonnen. Nach Messende erfolgt die Energiekalibrierung. Das aufgenommene Spektrum sollte dem der Abb. 6 ähnlich sein. Erkennbar ist die hohe Spitze der charakteristischen Strahlung der Molybdän-Anode. Links daneben sind zwei kleine Maxima der K-Linien von Gold erkennbar. Sie stammen aus dem Material der Diode, die als Energiedetektor fungiert. Den Kanälen wird folgendermaßen eine Energie zugeordnet: Führen Sie den Mauszeiger ins Diagramm. Rechtsklicken Sie und dann auf `weitere Auswertungen`. Klicken Sie auf `Peakschwerpunkt berechnen`. Führen Sie im unteren Drittel den Mauszeiger auf die eine Seite der Kurve, drücken Sie die linke Maustaste und halten Sie diese gedrückt und ziehen Sie den Mauszeiger waagrecht bis auf die andere Seite der Kurve.

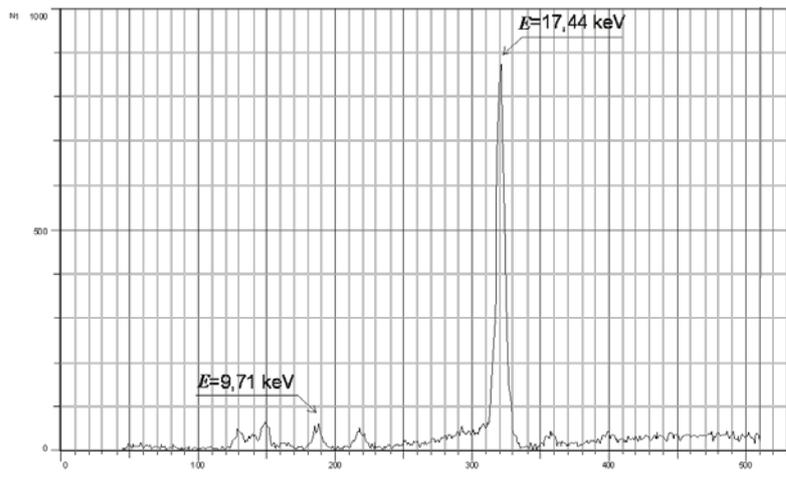


Abb.6 Kalibrierspektrum.

Der markierte Teil der Kurve erscheint in einer anderen Farbe. Nach Loslassen der Taste erscheint links unter dem Diagramm die Kanalnummer des Peakschwerpunktes, die man sich notiert. Ebenso verfährt man mit der linken der beiden kleinen Kurven.

Mit der Tastenkombination `Alt+E` öffnet man das Fenster der Energiekalibrierung. In das obere linke Eingabefeld wird die Kanalnummer des hohen rechten Peaks eingetragen, im rechten Feld der Wert der Energie in keV 17,44 (das ist gleichzeitig der Messwert für $\vartheta = 0^\circ$). In der unteren Zeile kommt zur notierten Kanalnummer 9,71 keV. Das Fenster wird mit `OK` geschlossen. Damit ist die Energiekalibrierung beendet. Auf der Abszisse des Diagramms stehen jetzt Energiewerte, die für alle weiteren Messungen Gültigkeit behalten.

Öffnen Sie den Experimentierraum, bauen Sie den Kollimator aus um den Abschwächer nach vorne abziehen. Der Kreiskollimator wird ebenso wie der Targettisch (waagrecht) wieder eingesetzt und der durchsichtige Kunststoffkörper auf den Tisch gelegt. Nach dem Schließen der Tür stellen Sie den Röhrenstrom auf 1 mA und den Targetwinkel auf 20° . Der Sensorwinkel wird vorsichtig auf $\vartheta = 145^\circ$ (plus der gemessenen Nullpunktkorrektur) gestellt. Achten Sie darauf, dass sich die Anschlusskabel im Experimentierraum frei bewegen können. Mit der Taste `F4` wird die alte Messung gelöscht. Drücken Sie die Taste `F5` zweimal und tragen Sie als Messzeit 300 s ein. Schließen Sie das Fenster. Schalten Sie die Hochspannung ein und beginnen Sie die Computermessung mit `F9`. Nach Messende wird zur genaueren Bestimmung der Maximalenergie der interessierende Teil des Spektrums vergrößert dargestellt, indem man im Diagramm rechtsklickt, den Menüpunkt Zoomen anklickt und dann bei gedrückter Maustaste den interessierenden Teil auswählt. Dann wird wieder der Peakschwerpunkt bestimmt und der Energiewert zu diesem Winkel in einer Tabelle notiert.

Als weitere Winkel werden zur Messung $\vartheta = 130^\circ, 110^\circ, 90^\circ, 70^\circ, 50^\circ$ und 30° gewählt. Wegen der Übersichtlichkeit in der Darstellung sollten vor jeder neuen Messung die alten Messreihen mit `F4` gelöscht werden.

4. Literatur

[1] – LD Didactic GmbH; Röntgengerät, eine Anleitung; Hürth oder

[2] – www.ld-didactic.de/service unter „Experimente“ und „Handblätter Physik - Sekundarstufe 2 und Hochschulpraktikum“ im Abschnitt 6.3.7

[3] – Eichler, Kronfeldt, Sahn; Das neue Physikalische Grundpraktikum; Springer Verlag Berlin Heidelberg 2006, Abschn. 48

5. Anhang



Abb. 7 Erläuterungen zum Bedienfeld des Gerätes.