

## Trifft ein Photon auf ein Elektron ... – Photo- und Comptoneffekt

Matthias Borchardt, Bonn

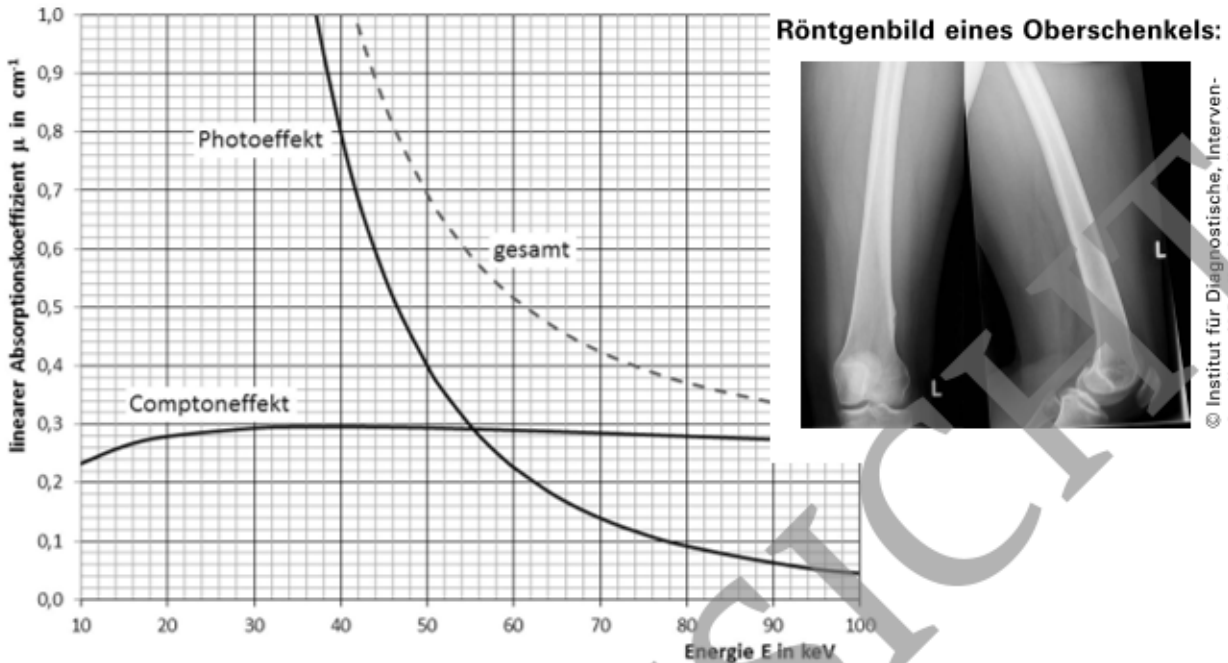


Abb. 1: Absorption von Röntgenstrahlung im Knochengewebe

Die Wechselwirkung zwischen Photonen und Elektronen in Materie wird überwiegend vom Photoeffekt und vom Comptoneffekt bestimmt. Was dabei genau geschieht, wovon das abhängt und welche wichtigen Anwendungsbereiche damit zu tun haben, erarbeiten sich Ihre Schüler mithilfe abwechslungsreicher und spannender Materialien. Dabei ermöglichen **Computersimulationen** einen besonders schüleraktivierenden Zugang zum Thema.

Der Beitrag im Überblick	
<p><b>Klasse:</b> 12 und 13</p> <p><b>Dauer:</b> 4–9 Stunden</p> <p><b>Ihr Plus:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Schüleraktivierende Materialien</li> <li>✓ Unterschiedliche Anforderungsniveaus</li> <li>✓ Drei Computersimulationen</li> </ul>	<p><b>Inhalt:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Photoeffekt und Gegenfeldmethode</li> <li>– Comptoneffekt</li> <li>– Kurzwellige Grenze des Röntgenspektrums</li> <li>– Absorptionsgesetz</li> <li>– Compton-Streuung von Röntgenphotonen</li> <li>– Gammaspektroskopie</li> <li>– Backscatter-Verfahren</li> <li>– Wirkung von Röntgenstrahlung in Materie</li> <li>– Die Teilcheneigenschaften von Licht und Röntgenstrahlung</li> </ul>

## Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

### Einordnung des Themas (Lehrplanbezug)

Das **Teilchenmodell für Licht und Röntgenstrahlung** gehört zu den Standardthemen im Grund- und Leistungskurs der Oberstufe, wobei der **Photoeffekt** eine besonders wichtige Rolle bei der Entwicklung der Photonenvorstellung von Strahlung einnimmt. Auch der **Comptoneffekt** und die kurzwellige Grenze des Röntgenspektrums sind in diesem Kontext zur Festigung des Modells wichtig, sind aber in den Lehrplänen der Länder unterschiedlich stark verankert. Die **Absorption von Strahlung** beim Durchgang durch Materie ist dagegen üblicher Unterrichtsstoff und die Formulierung des **Absorptionsgesetzes** mithilfe der Exponentialfunktion obligatorisch.

### Anwendungsbezug

Die Bedeutung der Absorption im **medizinisch-diagnostischen Bereich** sowie die damit verbundenen interessanten physikalischen Zusammenhänge tauchen in den Schulbüchern bedauerlicherweise nur wenig bis gar nicht auf. Dies gilt auch für die neuesten Entwicklungen im Sicherheitsbereich auf **Flughäfen**, wo die Röntgendurchstrahlung von Gepäckstücken inzwischen eine enorm wichtige Rolle spielt. Diese spannenden Kontextbezüge wurden daher in die Materialien dieser Unterrichtseinheit aufgenommen und didaktisch dem Schulunterricht zugänglich gemacht.

### Fachliche Hinweise

Der **Photoeffekt** beschreibt das Herauslösen von Elektronen aus einem Metall durch Photonen, also durch Bestrahlung mit Licht. Die **Gegenfeldmethode** finden Sie gut beschrieben unter:

<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/versuche/gegenfeldmethode>

Als **Comptoneffekt**<sup>1</sup> bezeichnet man die Vergrößerung der Wellenlänge eines Photons bei der Streuung an einem Teilchen. Erstmals wurde der **Comptoneffekt** an Elektronen beobachtet.

### Unterrichtliche Voraussetzungen

Material	Voraussetzung
M 1	Vorversuche zum Photoeffekt, wie z. B. Bestrahlung eines Zinkblechs mit dem Licht einer Quecksilberdampflampe (Hallwachs-Effekt), Nachweis des Photostroms oder Entladen der Zinkplatte, u. U. Grundlagen der Gegenfeldmethode
M 2	Grundlegendes Wissen zum Comptoneffekt, Auftreten einer zweiten, größeren Wellenlänge im Streuspektrum, Idee des elastischen Stoßes, u. U. auch schon Compton-Formel
M 3	Aufbau und Funktionsweise einer Röntgenröhre, Entstehung von Röntgenstrahlung, typisches Aussehen eines Röntgenspektrums, Entstehung der kurzwelligen Grenze
M 4	Entstehung und Eigenschaften von Röntgenstrahlung, Photo- und Comptoneffekt zumindest qualitativ
M 5–M 7	Basiswissen zum Photo- und Comptoneffekt

<sup>1</sup> benannt nach dem US-amerikanischen Physiker Arthur Holly Compton (1892–1962)

## Mediathek

### Computerprogramme

<http://www.mabo-physik.de/photoeffekt.html>

<http://www.mabo-physik.de/comptoneffekt.html>

<http://www.mabo-physik.de/roentgenspektren.html>

**Tabellen** zu Massenschwächungskoeffizienten verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Photonenenergie:

<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

### Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit    SV = Schülerversuch    Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt

⌚ D = Durchführungszeit    LV = Lehrerversuch    Fo = Folie

<b>M 1</b>	<b>Ab</b> ⌚ D: 90 min	<b>Wie ein Photon in Materie verschwindet – der Photoeffekt</b> <input type="checkbox"/> Simulationsprogramm „Photoeffekt.exe“ <input type="checkbox"/> Taschenrechner
<b>M 2</b>	<b>Ab</b> ⌚ D: 90 min	<b>Wie ein Photon in Materie gestreut und geschwächt wird – der Comptoneffekt</b> <input type="checkbox"/> Simulationsprogramm „Comptoneffekt.exe“ <input type="checkbox"/> Taschenrechner
<b>M 3</b>	<b>Ab</b> ⌚ D: 45 min	<b>Wie ein Photon in Materie entsteht – die Bremsstrahlung und ihre kurzwellige Grenze</b> <input type="checkbox"/> Simulationsprogramm „Roentgenspektren.exe“ <input type="checkbox"/> Taschenrechner
<b>M 4</b>	<b>Ab</b> ⌚ D: 45 min	<b>Wie Photonen in Materie auf der Strecke bleiben – das Gesetz der Absorption</b> <input type="checkbox"/> Simulationsprogramm „Roentgenspektren.exe“ <input type="checkbox"/> Taschenrechner
<b>M 5</b>	<b>Ab</b> ⌚ D: 45min	<b>Schädliche Streuung von Röntgenphotonen</b> <input type="checkbox"/> Taschenrechner
<b>M 6</b>	<b>Ab</b> ⌚ D: 45 min	<b>Störende Streuung von Röntgenphotonen</b> <input type="checkbox"/> Taschenrechner
<b>M 7</b>	<b>Ab – Referat</b> ⌚ D: 45 min	<b>Nützliche Streuung von Röntgenphotonen</b> <input type="checkbox"/> Internet
<b>M 8</b>		<b>Tippkarten</b>

**Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 24.**

### Minimalplan

Ohne Thematisierung des Comptoneffekts: Beschränken Sie sich auf **M 1**, **M 3** und **M 4**.

Mit Comptoneffekt: Sie behandeln **M 1–M 4** – unter Umständen auch noch **M 5**, wenn es die Unterrichtszeit erlaubt.

## M 1 Wie ein Photon in Materie verschwindet – der Photoeffekt

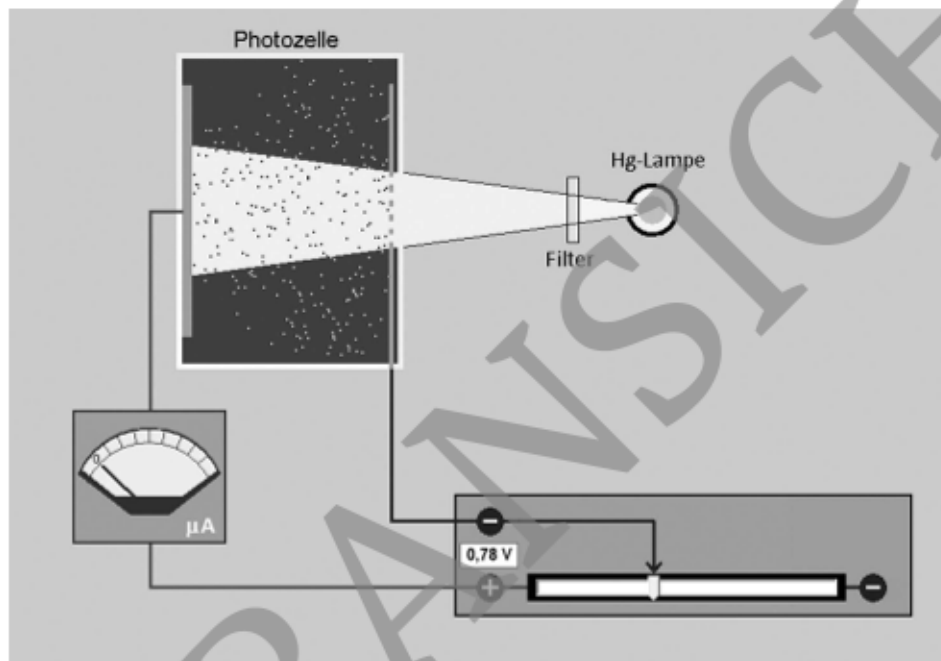
### Aufgaben (Partnerarbeit): Recherche im Schulbuch / Internet

1. Beschreiben Sie, welches physikalische Phänomen man unter dem Photoeffekt versteht.
2. Der Photoeffekt zeigt, dass die Energie des Lichtes offenbar eng mit dessen Frequenz verknüpft ist. Um diesen Zusammenhang quantitativ zu untersuchen, soll der unten abgebildete Versuchsaufbau verwendet werden.



Erklären Sie die Idee, den Aufbau und eine mögliche Durchführung des Versuchs in wenigen Sätzen. Gehen Sie dabei insbesondere auf die sog. **Gegenfeldmethode** ein.

### Versuchsaufbau zur Gegenfeldmethode



II/E

### Weitere Aufgaben (Arbeit am Computer)

3. Starten Sie die Computersimulation **Photoeffekt.exe** und machen Sie sich mit den einzelnen Funktionen vertraut.
4. Wählen Sie ein bestimmtes Material für die Photokathode aus. Ermitteln Sie mithilfe der Simulation für verschiedene Lichtfrequenzen die Werte für die Bremsspannungen, bei denen der Photostrom gleich null wird. Tragen Sie die Spannungswerte in die vorbereiteten Tabellen ein. Berechnen Sie dann mithilfe der Formel  $E_{\text{kin}} = e \cdot U$  die kinetische Energie der Elektronen in der Einheit Joule und geben Sie die Ergebnisse ebenfalls in die Tabelle ein.

**Tipp** Arbeiten Sie zu zweit oder in Gruppen und einigen Sie sich, wer welche Tabelle ausfüllt. Sammeln Sie anschließend Ihre Ergebnisse.

5. Stellen Sie die Tabellen nun graphisch dar, indem Sie die kinetische Energie der Elektronen gegen die Frequenz des Lichtes in das Diagramm auf Seite 7 eintragen. Legen Sie anschließend Ausgleichsgeraden durch die Messpunkte. Zeichnen Sie die Geraden so lang, dass sie die y-Achse schneiden.

**Tipp** Sie können dazu auch ein Tabellenkalkulationsprogramm verwenden und Regressionsgeraden durch die Messpunkte legen lassen.

## M 1 Der Photoeffekt – Fortsetzung

### Weitere Aufgaben (Arbeit am Computer)

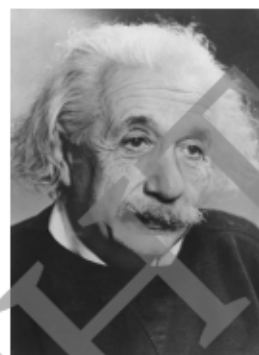
6. Beschreiben und erklären Sie die Ergebnisse und bringen Sie diese in Zusammenhang mit der Zielsetzung des Versuchs. Verwenden Sie in Ihren Ausführungen an geeigneter Stelle die folgenden Begriffe und Formeln:

*Auslösearbeit, Grenzfrequenz, Planck'sches Wirkungsquantum, materialabhängig, materialunabhängig, Naturkonstante,*

$$E_{\text{kin}_e} = h \cdot f - E_a \Leftrightarrow h \cdot f = E_{\text{kin}_e} + E_a \text{ und } E_{\text{Licht}} = h \cdot f.$$

7. Bestimmen Sie aus Ihrer graphischen Darstellung für die vier Materialien jeweils die Auslösearbeit, die Grenzfrequenz und das Planck'sche Wirkungsquantum.
8. Erklären Sie, wie der Photoeffekt durch Albert Einstein gedeutet wurde<sup>2</sup>.

Verwenden Sie dazu Ihre Mitschriften aus dem Unterricht, Ihr Physikbuch oder geeignete Internetquellen.



A. Einstein (1879–1955)

© picture-alliance/dpa

Material: Wolfram-Cäsium		
Frequenz in $10^{14}$ Hz	Bremsspannung in Volt	Kin. Energie der Elektronen in $10^{-19}$ J
5,19 (gelb)		
5,49 (grün)		
6,08 (türkis)		
6,88 (blau)		
7,41 (violett)		

Material: Kalium		
Frequenz in $10^{14}$ Hz	Bremsspannung in Volt	Kin. Energie der Elektronen in $10^{-19}$ J
5,19 (gelb)		
5,49 (grün)		
6,08 (türkis)		
6,88 (blau)		
7,41 (violett)		

Material: Cäsium		
Frequenz in $10^{14}$ Hz	Bremsspannung in Volt	Kin. Energie der Elektronen in $10^{-19}$ J
5,19 (gelb)		
5,49 (grün)		
6,08 (türkis)		
6,88 (blau)		
7,41 (violett)		

Material: Natrium		
Frequenz in $10^{14}$ Hz	Bremsspannung in Volt	Kin. Energie der Elektronen in $10^{-19}$ J
5,19 (gelb)		
5,49 (grün)		
6,08 (türkis)		
6,88 (blau)		
7,41 (violett)		

<sup>2</sup> Albert Einstein erhielt für die Interpretation des Photoeffekts 1922 den Nobelpreis für Physik.

## M 2 Wie ein Photon in Materie gestreut und geschwächt wird – der Comptoneffekt

Wenn ein Photon auf ein Elektron trifft, stellt der Photoeffekt nicht die einzige Möglichkeit der Wechselwirkung dar. Ist das Elektron nämlich nur locker gebunden, kann es auch zum **Comptoneffekt** kommen.

### Aufgabe 1: Recherche im Schulbuch / Internet

Beschreiben Sie mithilfe Ihrer Mitschriften, Ihres Physikbuchs oder geeigneter Internetquellen, wie das Photon beim Comptoneffekt mit einem Elektron wechselwirkt, und erläutern Sie in diesem Zusammenhang die Compton-Formel

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} \cdot (1 - \cos(\alpha)) = \lambda_c \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

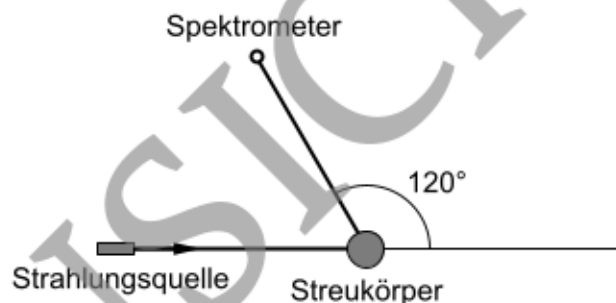
mit der Konstante  $\lambda_c = 2,4263102 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2,4263102 \text{ pm}$ .



II/E

### Aufgabe 2

Gammaquanten der Energie  $E_\gamma = 300 \text{ keV}$  werden auf einen Streukörper (z. B. Graphit) geschickt. Die Streustrahlung, die aufgrund des Comptoneffekts dabei entsteht, soll mithilfe einer Spektrometeranordnung (z. B. Drehkristallmethode) unter einem Winkel von  $120^\circ$  untersucht werden.



a) Berechnen Sie die folgenden Größen:

- die Wellenlänge  $\lambda_\gamma$  der einfallenden Gammastrahlung,
- die Wellenlänge  $\lambda'_\gamma$  der gestreuten Gammastrahlung (Compton-Streuung),
- die Energie der Streustrahlung in keV,
- die Impulse  $p_\gamma$  und  $p'_\gamma$  der einfallenden und der gestreuten Gammaquanten.

#### Tipp

Folgende Formeln sind hilfreich:  $E = h \cdot f$ ;  $c = \lambda \cdot f$ ;  $E = p \cdot c$ ;  $\Delta\lambda = \lambda_c \cdot (1 - \cos(\alpha))$ .

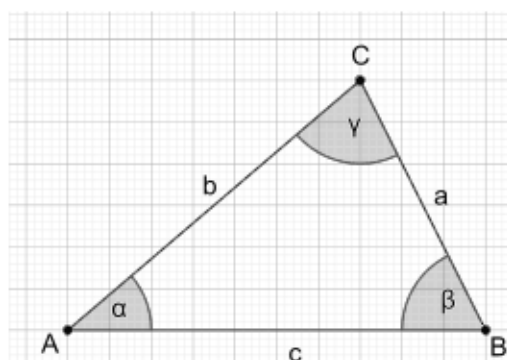
b) Zeichnen Sie ein maßstabsgerechtes Impulsdiagramm und bestimmen Sie aus Ihrer Zeichnung den Impuls  $p_e$  des gestoßenen Elektrons.

Vorschlag:

Sie können diesen Impuls auch mithilfe des Kosinussatzes berechnen.

Der Kosinussatz für den Winkel  $\alpha$  in einem Dreieck lautet:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos(\alpha).$$



### M 3 Wie ein Photon in Materie entsteht – die Bremsstrahlung und ihre kurzwellige Grenze

Die Einstein'sche Deutung des Photoeffekts liefert die Formel  $E = h \cdot f$ , die einen Zusammenhang zwischen der Energie von Licht und dessen Frequenz herstellt. Auch bei der Erklärung des Comptoneffekts spielt die Formel eine wichtige Rolle.

Sie soll nun durch ein weiteres simuliertes Experiment bestätigt werden, nämlich durch die **kurzwellige Grenze des Röntgenspektrums**. Dieses Phänomen stellt eine Art Umkehrung des Photoeffekts dar: Schnell bewegte Elektronen werden abrupt gestoppt und einige können dabei ihre gesamte Bewegungsenergie auf ein Photon, das bei diesem Prozess erzeugt wird, übertragen. Aufgrund der hohen Elektronenenergie handelt es sich hierbei um Röntgenphotonen.

#### Aufgaben: Recherche

1. Beschreiben Sie mithilfe Ihrer Mitschriften, Ihres Physikbuchs oder geeigneter Internetquellen, wie eine Röntgenröhre aufgebaut ist, wie sie funktioniert und wie typischerweise ein Röntgenspektrum aussieht.

2. Erklären Sie, was die kurzwellige Grenze eines Röntgenspektrums ist und wie sie entsteht.

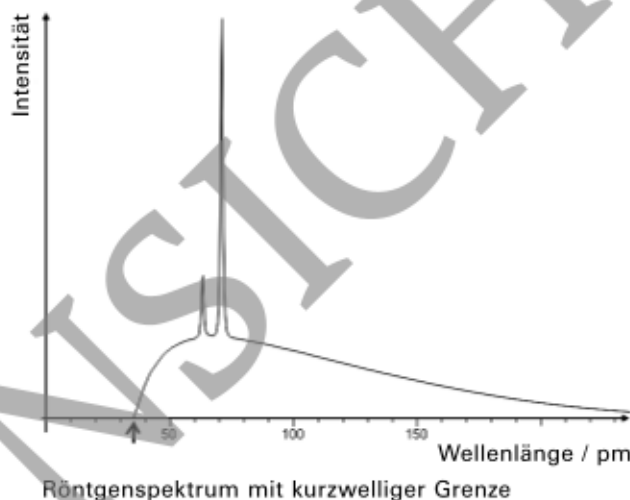
3. Leiten Sie mithilfe der Formeln

$$E_{\text{ph}} = h \cdot f_G; \quad W_{\text{el}} = e \cdot U_A \quad \text{und} \quad \lambda_G \cdot f_G = c$$

die Beziehung

$$h = \frac{e}{c} \cdot U_A \cdot \lambda_G$$

her, mit der man das Planck'sche Wirkungsquantum aus der kurzwelligen Grenze  $\lambda_G$  und der Spannung  $U_A$  der Röntgenröhre berechnen kann.



#### Weitere Aufgaben (Arbeit am Computer)

4. Starten Sie die Computersimulation **Roentgenspektren.exe** und machen Sie sich mit den Funktionen des Programms vertraut.

Hinweis: Die Röntgenfilter benötigen Sie für die folgende Aufgabe nicht und sollten diese daher ausgeschaltet lassen.

5. Wählen Sie nun die Wellenlängendarstellung für die Spektren und ein Material für die Röntgenröhre aus (z. B. Molybdän). Ermitteln Sie für die verschiedenen Anodenspannungen jeweils die kurzwellige Grenze des Spektrums. Sammeln Sie Ihre Ergebnisse in der vorbereiteten Tabelle.

$U_A$ / kV	$\lambda_G$ / $10^{-12}$ m	$h$ / Js
30		
40		
60		
80		
100		

6. Berechnen Sie nun mithilfe der Formel aus Aufgabe 3 jeweils das Planck'sche Wirkungsquantum. Bilden Sie den Mittelwert Ihrer Ergebnisse und geben Sie die prozentuale Abweichung zum Literaturwert an.

## M 5 Schädliche Streuung von Röntgenphotonen

Bekanntlich kann Röntgenstrahlung menschliches Gewebe durchdringen. In Muskel- oder Fettgewebe wird Röntgenlicht weniger absorbiert als in Knochen, sodass bei der Durchstrahlung beispielsweise eines Oberschenkels eine Art Schattenbild der Knochen und des Gewebes entsteht, welches auf speziellen Röntgenfilmen oder Sensorschichten abgebildet werden kann.

Neben diesem diagnostischen Nutzen von Röntgenstrahlung sollte die schädigende Wirkung der Strahlung auf den menschlichen Körper aber nicht unbeachtet bleiben.

Für die Absorption von Röntgenstrahlung sind vor allem der Photo- und der Comptoneffekt verantwortlich.

In diesem Zusammenhang zeigt vor allem die **Compton-Streuung** der Röntgenphotonen die unangenehme Eigenschaft, die Strahlung in Bereiche zu verteilen, die eindeutig außerhalb des Durchstrahlungsbereiches liegen. Dies führt zum einen zu einem deutlichen Kontrastverlust im Röntgenbild und zum anderen zu einer erweiterten Strahlenbelastung des menschlichen Gewebes. Der Kontrast des Röntgenbildes lässt sich durch bestimmte Rasterfilter verbessern. Die Streuung der Photonen im Gewebe des Patienten können diese Raster leider nicht verhindern. Der Comptoneffekt lässt sich eben nicht ausschalten, sondern findet unter bestimmten Bedingungen zwingend statt.

Die beiden Diagramme auf der Folgeseite 14 zeigen, wie sich der Absorptionskoeffizient bei der Durchstrahlung von Knochen und von Muskelgewebe auf Photoeffekt und Comptoneffekt verteilt.

- Aus Gründen des Kontrastes müssen Skelettaufnahmen mit Röntgenenergien im Bereich von 50 keV bis 100 keV durchgeführt werden. Nehmen Sie beispielsweise an, dass die Aufnahme eines Oberschenkels mit einer (mittleren) Röntgenenergie von **60 keV** durchgeführt wird. Beschreiben Sie mithilfe der Diagramme qualitativ, wie sich die Wirkung des Photoeffekts und des Comptoneffekts auf die Gesamtabsorption der Strahlung in den beiden Gewebearten verteilt.
- Eine **Beispielrechnung**: Nehmen Sie an, dass 100 Röntgenphotonen der Energie 60 keV einen 3,5 cm dicken Oberschenkelknochen durchstrahlen. Mithilfe des Absorptionsgesetzes können Sie ausrechnen, wie viele Photonen durch den Photoeffekt „auf der Strecke bleiben“, also komplett absorbiert werden, bzw. wie viele vom Photoeffekt verschont bleiben. An der Kurve für den Photoeffekt lesen Sie im ersten Diagramm für 60 keV einen Absorptionskoeffizienten von ungefähr  $\mu_{\text{Ph}} = 0,22 \frac{1}{\text{cm}}$  ab.

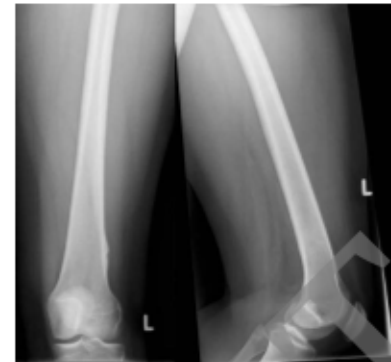
Damit erhalten Sie mit  $I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$  die Zahl der nicht absorbierten Photonen, nämlich  $I(3,5 \text{ cm}) = 100 \cdot e^{-0,22 \cdot 3,5}$

$\approx 46$ . Von diesen übrig gebliebenen 46 Photonen können nun aufgrund des Comptoneffekts Photonen aus der Strahlrichtung weggelenkt werden. An der Compton-Kurve lesen Sie  $\mu_{\text{C}} = 0,29 \frac{1}{\text{cm}}$  ab und rechnen  $I(3,5 \text{ cm}) = 46 \cdot e^{-0,29 \cdot 3,5} \approx 17$ .

Von den 100 Photonen werden also  $100 - 46 = 54$  durch den Photoeffekt geschluckt und  $46 - 17 = 29$  Photonen durch den Comptoneffekt gestreut.

Interessant ist nun die Frage, wie sich die Streuung im Muskelgewebe des Oberschenkels verhält. Führen Sie dazu die obere Rechnung für Muskelgewebe (zweites Diagramm) durch. Sie können die Dicke der Muskelschicht mit 9 cm ansetzen.

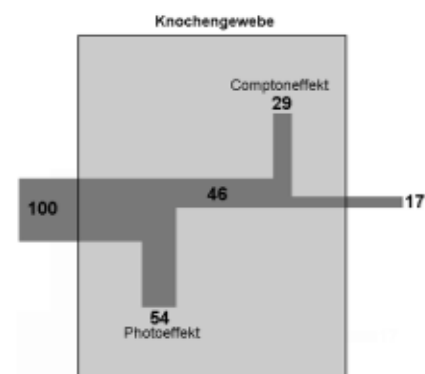
- Beurteilen Sie die schädliche Wirkung der Compton-Streuung auf die beiden Gewebearten auf der Basis Ihrer Ergebnisse aus Aufgabe 2.



Röntgenbild eines Oberschenkels

© Institut für Diagnostische, Interventionelle und Pädiatrische Radiologie, Inselspital Bern – www.pedrad.ch

II/E



## M 6 Störende Streuung von Röntgenphotonen

Die spektrale Energieverteilung von Gammastrahlung lässt sich mithilfe eines Szintillations-Detektors aufzeichnen. Gammaquanten dringen in das durchsichtige Szintillationsmaterial ein und wechselwirken dort durch Photoeffekt oder Comptoneffekt.

Bei beiden Prozessen wird Energie auf Elektronen übertragen, welche dann im Material durch atomare Anregungen Lichtblitze erzeugen, deren Intensitäten ein Maß für die Elektronenenergie darstellen. (Die Lichtintensität der schwach leuchtenden Blitze wird durch einen Lichtverstärker, einen sog. Photomultiplier, so erhöht, dass sie durch eine Elektronik messbar wird.)

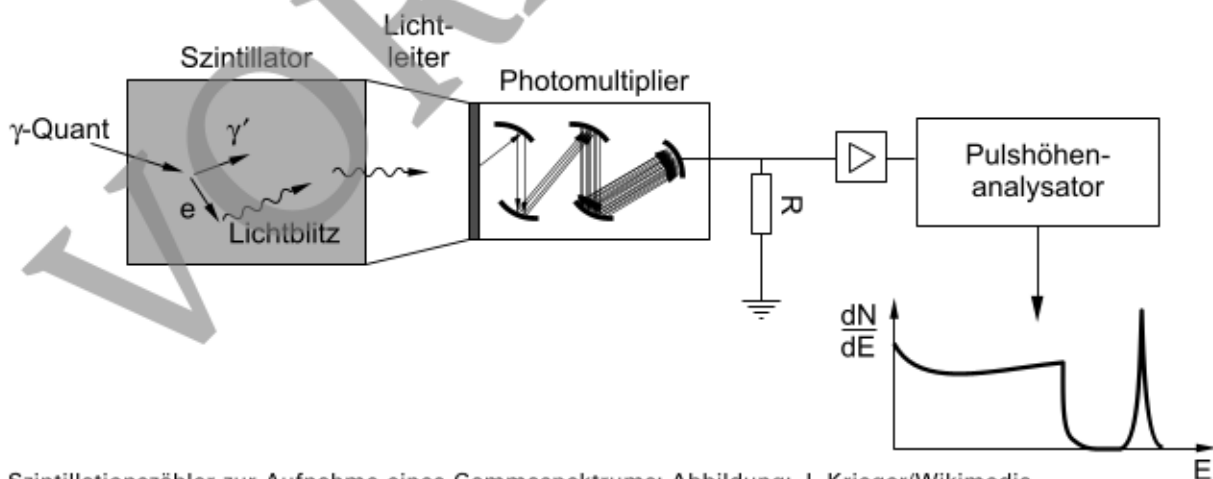
### Photoeffekt

Da beim Photoeffekt die gesamte Energie des Gammaquants an das Elektron abgegeben wird<sup>4</sup>, sind die Lichtblitze dieser Elektronen besonders hell und bilden die Energie der Gammaquanten deutlich ab – also das, was man messen möchte. Im Energiediagramm (Spektrum) erscheint diese Energie als ausgeprägter Peak bei hohen Energien. Man spricht auch vom „Photopeak“ im Energiespektrum der Gammastrahlung.

### Comptoneffekt

Allerdings wechselwirken auch viele Gammaquanten über den Comptoneffekt mit den Elektronen im Szintillatormaterial. Die Lichtblitze, die von diesen Elektronen ausgelöst werden, haben ganz unterschiedliche Intensitäten, denn je nach Stoßwinkel erhalten die Elektronen mal mehr oder weniger Energie der Gammaquanten. Daher erscheinen diese Energien als diffus verteiltes Energiespektrum bei niedrigen Energien – man spricht auch vom „Comptongeberge“. Dieses Energiespektrum bricht allerdings bei einer bestimmten Energie abrupt ab – das ist die „Compton-Kante“ im Spektrum. Ein Gammaquant kann nämlich maximal nur eine ganz bestimmte Energie an die Elektronen abgeben – genau dann, wenn das Gammaquant zentral auf das Elektron stößt und (unter 180°) rückwärts gestreut wird.

Das Comptongeberge ist störend im Spektrum – lässt sich allerdings in einem Szintillationszähler nicht vermeiden, denn man kann den Gammaquanten ja nicht „verbieten“, über den Comptoneffekt zu wechselwirken.



Szintillationszähler zur Aufnahme eines Gammaspektrums; Abbildung: J. Krieger/Wikimedia

<sup>4</sup> Die Auslösearbeit ist im Vergleich zur Energie der Gammaquanten so klein, dass sie vernachlässigt werden darf.

## M 7 Nützliche Streuung von Röntgenphotonen

Eine wichtige Aufgabe der Gepäckscanner auf **Flughäfen** ist die Identifizierung gefährlicher Gegenstände und Substanzen, wie beispielsweise Waffen, Sprengstoffe und Drogen. In der Regel werden daher Koffer und Taschen mit zwei unterschiedlichen Röntgenenergien durchleuchtet, und aus den beiden Bildern wird ein Falschfarbenbild erzeugt, das gewisse Informationen über die Art der durchstrahlten Gegenstände liefert. Dieses Verfahren (**Dual-Energy-Verfahren**) stößt allerdings dann an seine Grenzen, wenn leichte Materialien, wie z. B. Plastiksprengstoff, hinter Materialien mit hoher Kernladungszahl (Eisen, Kupfer, Blei) versteckt werden.



Gepäckscanner

© aerogondo/iStock/  
Getty Images Plus

Solche Überlappungsprobleme lassen sich in vielen Fällen mithilfe der rückgestreuten Strahlung (**Backscatter**) erfolgreich umgehen. Dieses interessante und leistungsstarke Verfahren soll im Folgenden eingehender erklärt werden.

### Das Backscatter-Verfahren

Röntgenphotonen können im Wesentlichen durch den Photoeffekt und den Comptoneffekt mit der bestrahlten Materie wechselwirken. Die Wahrscheinlichkeit dafür, ob ein Röntgenphoton über den Photoeffekt oder über den Comptoneffekt wechselwirkt, ist abhängig von der Wellenlänge der Strahlung und der Kernladungszahl des durchstrahlten Materials.

Besonders Letzteres ist bei der Erkennung von problematischen Stoffen wie Sprengstoffen oder Drogen wesentlich, denn diese weisen in der Regel Kernladungszahlen deutlich unter  $Z = 10$  auf. Die beiden Diagramme auf der Folgeseite 18 zeigen, wie sich die Absorption der Röntgenstrahlung bei verschiedenen Stoffen auf Compton- und Photoeffekt verteilt.

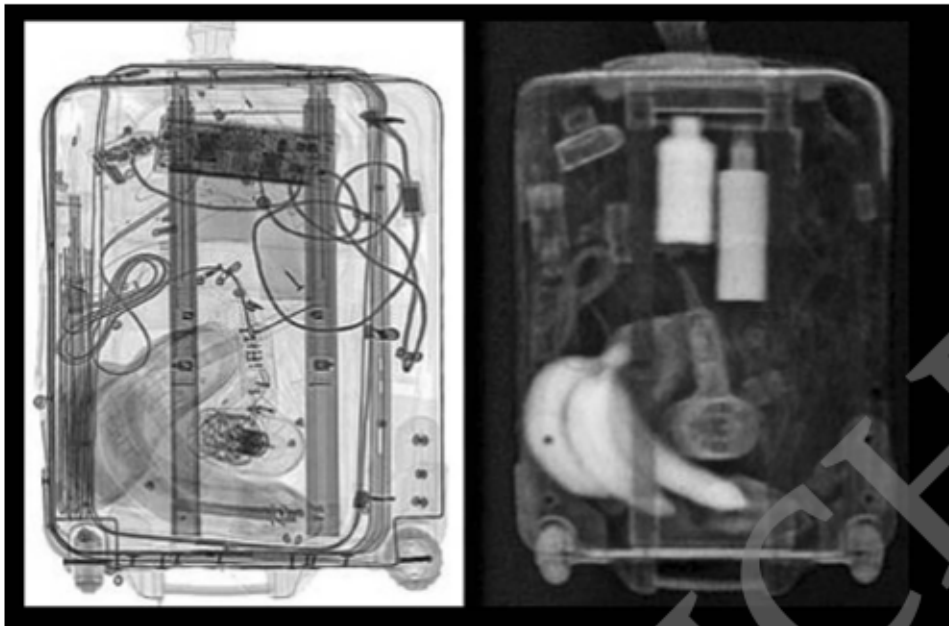
Semtex ist ein formbarer Plastiksprengstoff auf der Basis von Nitropenta (PETN) mit der Strukturformel  $C_5H_8N_4O_{12}$ . Die Dichte beträgt  $1778 \text{ kg/m}^3$  und die effektive Kernladungszahl  $Z_{\text{eff}} = 7,4$ . Das zweite Diagramm zeigt das Absorptionsverhalten von Eisen mit  $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$  und  $Z = 26$ .

Die extrem unterschiedliche Verteilung von Compton- und Photoeffekt auf den Absorptionsprozess fällt deutlich ins Auge. Nehmen Sie an, dass Eisenblech und eine Schicht Semtex-Sprengstoff mit Röntgenphotonen der Energie  $70 \text{ keV}$  durchstrahlt werden. Während der Comptoneffekt bei Semtex und Eisen nahezu die gleiche Wirkung zeigt, ergibt der Photoeffekt beim Sprengstoff Semtex und bei Eisen deutlich unterschiedliche Werte des Schwächungskoeffizienten – der Comptoneffekt dominiert eindeutig beim Sprengstoff.

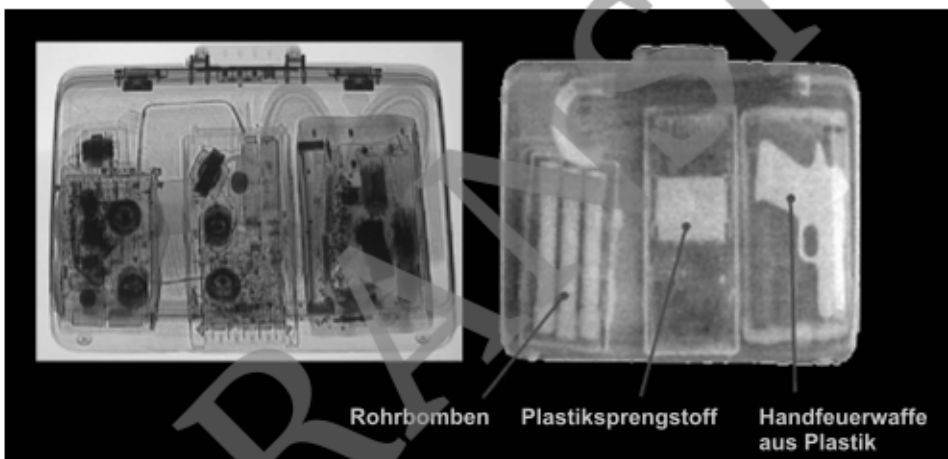
Materialien mit kleiner effektiver Kernladungszahl weisen immer eine sehr starke Streuung der Photonen aufgrund des Comptoneffekts auf. Dadurch kann das versteckte Material mit einer höheren Intensität durch das Eisenblech „leuchten“ und mithilfe spezieller Sensoren abgebildet werden. Dieses Phänomen ermöglicht beeindruckende Erfolge bei der Identifizierung gefährlicher Stoffe, wie die Abbildungen auf Seite 19 (**M 7**) zeigen sollen: Es wurde ein Koffer mit dem Dual-Energy-Verfahren durchleuchtet und zusätzlich noch mit der Backscatter-Methode abgebildet. Die organischen Materialien in Form von Bananen und Flüssigsprengstoff sind im Durchleuchtungsbild nur schemenhaft bis gar nicht auszumachen – im Backscatter-Bild dagegen treten sie deutlich hervor – die Comptonphotonen überstrahlen alle anderen, schwereren Materialien im Koffer und der Umgebung. Auch das zweite Beispiel demonstriert, wie sich versteckte gefährliche Materialien mit niedriger Kernladungszahl durch die rückgestreuten Photonen deutlich abzeichnen.

II/E

## M 7 Nützliche Streuung von Röntgenphotonen – Abbildungen



Dual-Energy-Bild und Backscatter-Bild eines Koffers

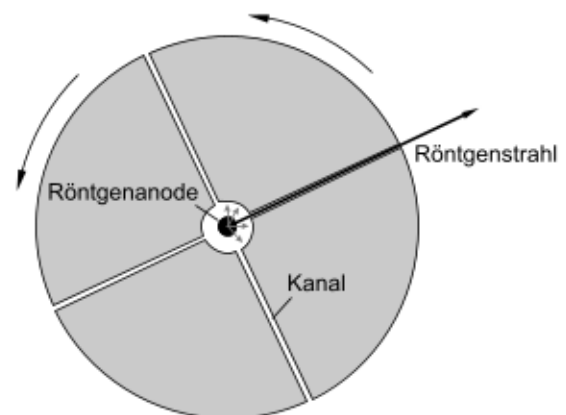


Rohrbomben Plastiksprengstoff Handfeuerwaffe aus Plastik

Gefährliche Materialien aus leichten Atomen treten im Backscatter-Bild deutlich hervor.

### Aufbau einer Backscatter-Apparatur

Um aus den zurückgestreuten Photonen ein Gesamtbild erstellen zu können, wird das zu untersuchende Objekt mit einem einzigen, feinen Röntgenstrahl zeilenweise abgetastet. Allerdings lassen sich Röntgenstrahlen nicht einfach durch elektrische oder magnetische Felder ablenken, steuern und formen. Eine häufig verwendete Methode besteht darin, aus dem stark divergenten Strahlenbündel, das von der Röntgenanode ausgeht, durch bewegliche Blenden die passenden Strahlen auszuwählen. Die Abbildung zeigt ein Blendenrad (Chopper-Wheel), das aus Metall besteht und über feine, speichenförmige Kanäle verfügt.

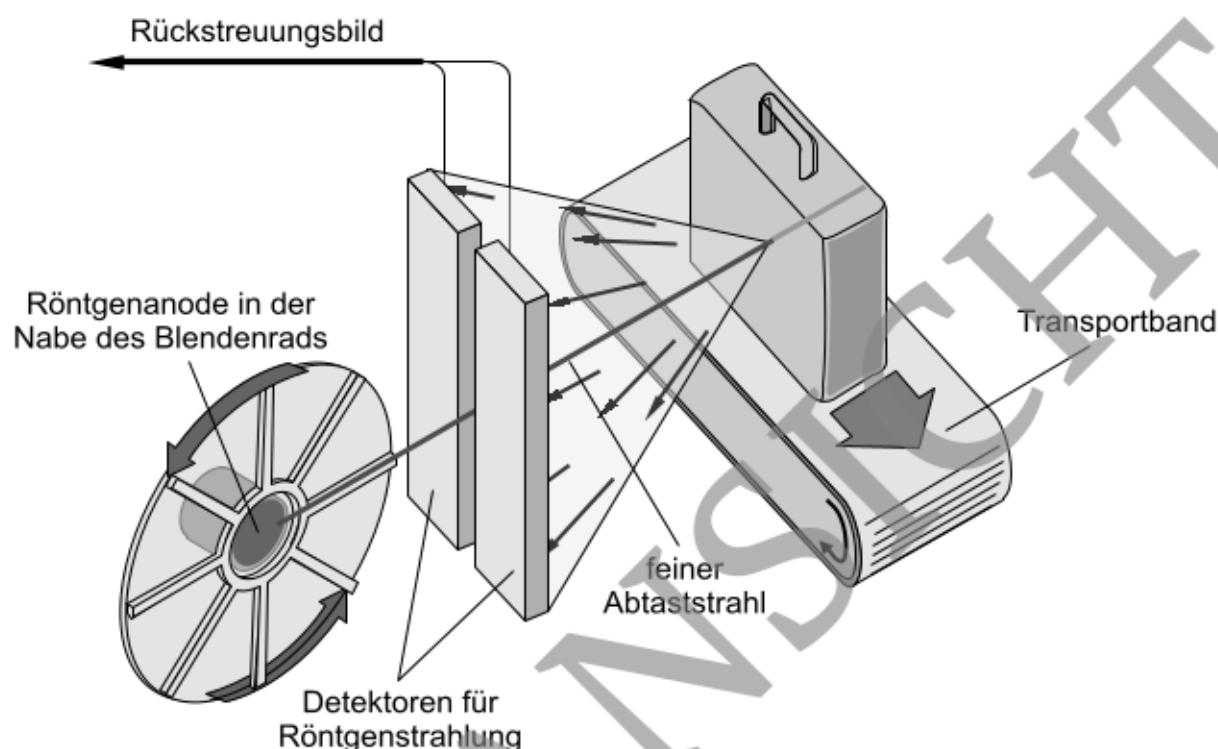


Blendenrad zur Erzeugung eines Abtaststrahls

II/E

## M 7 Nützliche Streuung von Röntgenphotonen – Fortsetzung

Die Röntgenanode befindet sich in der Nabe dieses Rades und erzeugt ein divergentes Strahlenbündel, von dem durch die sich bewegenden Bohrungen nur einzelne Röntgenstrahlen nach außen gelangen. Da das Rad rotiert, entsteht ein Abtaststrahl, der sich mit großer Geschwindigkeit von unten nach oben bewegt. Gleichzeitig wird das Objekt langsam weiterbewegt, sodass ein kompletter Scan ermöglicht wird. Die rückgestreuten Photonen werden durch zwei Detektoren registriert.



Backscatter Scanner

Aus der bekannten Position des Abtaststrahls und den dazugehörigen rückgestreuten Röntgenphotonen wird dann pixel- und zeilenweise ein Gesamtbild des Objekts hergestellt.

Inzwischen wird diese Technik in den USA sogar mobil zur Untersuchung von Fahrzeugen (Autos, Lkw) und Containern verwendet. Die Röntgenanlage befindet sich dann komplett mit Energieversorgung und Detektoren in einem Transporter. Wenn dieser mit langsamem Tempo an verdächtigen Fahrzeugen oder Containern vorbeifährt, kann das Innere dieser Objekte durch die Backscattermethode abgebildet werden. Diese Backscatter-Vans wurden einst erfolgreich im Irakkrieg verwendet, um nach versteckten Waffen zu suchen. Heute kommen sie in Afghanistan auf der Suche nach Sprengfallen zum Einsatz oder an Grenzübergängen zum Aufspüren von illegalen Personen. Aber auch im Inland werden sie inzwischen verstärkt zur Terrorabwehr eingesetzt. Kritik kommt vor allem von Bürgerrechtsorganisationen, die vermuten, dass die Röntgenautos unkontrolliert im zivilen Bereich eingesetzt werden, durch Hauswände, Fahrzeuge und Kleidung schauen und die Persönlichkeitsrechte der Bürger massiv verletzen – ganz abgesehen von den gesundheitsschädlichen Aspekten solcher Röntgenabtastung. In Deutschland sind solche mobilen Anlagen nicht erlaubt.

Die folgenden Bilder zeigen, wie leistungsstark diese Technik inzwischen ist und wie berechtigt die Forderungen nach Regeln sind, die den Einsatz der Backscatter-Vans legitimieren sollen.

## M 8 Tippkarten

Schneiden Sie die Tippkarten aus, drehen Sie sie auf die Rückseite, und legen Sie sie so auf den Lehrertisch. Schreiben Sie an die Tafel die Nummern der Aufgaben, zu denen Sie Tippkarten anbieten wollen.



### Tipps zu M 2, Aufgabe 2 a)

$$\text{Es gilt: } E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E} \text{ und damit: } \lambda_{\gamma} = \frac{h \cdot c}{E_{\gamma}}$$

Wellenlänge des gestreuten Photons:

$$\lambda'_{\gamma} = \lambda_{\gamma} + \Delta\lambda = \lambda_{\gamma} + \lambda_C \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

Impulse:

$$p_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{c} \text{ und } p'_{\gamma} = \frac{E'_{\gamma}}{c}$$



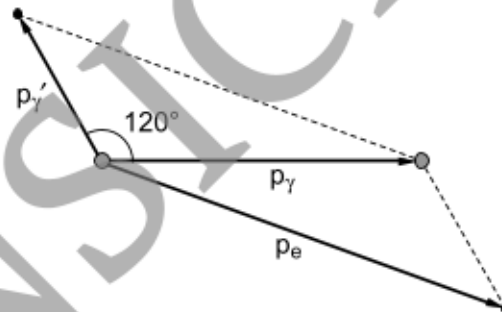
### M 2, Aufgabe 2 b)

Maßstab z. B.:

$$1 \cdot 10^{-22} \text{ Ns} \hat{=} 5 \text{ cm}$$

Mithilfe des Kosinussatzes:

$$p_e = \sqrt{p_{\gamma}^2 + p_{\gamma}'^2 - 2 \cdot p_{\gamma} \cdot p_{\gamma}' \cdot \cos(120^{\circ})}$$



### M 2, Aufgabe 2 c)

Mithilfe des Kosinussatzes:

$$p_{\gamma}'^2 = p_{\gamma}^2 + p_e^2 - 2 \cdot p_{\gamma} \cdot p_e \cdot \cos(\beta) \Leftrightarrow \cos(\beta) = \frac{p_{\gamma}^2 + p_e^2 - p_{\gamma}'^2}{2 \cdot p_{\gamma} \cdot p_e}$$

### M 2, Aufgabe 2 e)

$$\left( \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right)^2 = E_0^2 + (p \cdot c)^2 \Leftrightarrow \frac{E_0^2}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = E_0^2 + (p \cdot c)^2$$



### Tipps zu M 6, Aufgabe 1 b)

$$\text{Es gilt: } E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E} \text{ und}$$

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \lambda + \lambda_C \cdot (1 - \cos(\alpha))$$

### M 6, Aufgabe 2

$$E_{\text{Kante}} = E_{\text{El}} = E_{\text{Ph}} - E'_{\text{Ph}} = E_{\text{Ph}} - \frac{h \cdot c}{\lambda'}$$



II/E

## Erläuterungen und Lösungen

Wir verwenden in den Lösungen die folgenden physikalischen Konstanten:

Elementarladung:	$e = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Elektronenmasse:	$m_e = 9,10938215 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Lichtgeschwindigkeit:	$c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Planck'sches Wirkungsquantum:	$h = 6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Comptonwellenlänge:	$\lambda_c = 2,426310218 \cdot 10^{-12} \text{ m}$
Umrechnung:	$1\text{eV} = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



### M 1 Wie ein Photon in Materie verschwindet – der Photoeffekt

- Der Photoeffekt beschreibt das Herauslösen von Elektronen aus einer blanken Metalloberfläche, wenn diese mit Licht bestimmter Frequenz bestrahlt wird.
- Ziel des Versuches ist es, die Energie des Lichts in Abhängigkeit von seiner Wellenlänge zu messen. Als Lichtquelle wird eine Quecksilberdampf Lampe verwendet, weil deren Licht ein helles Linienspektrum aufweist, dessen Wellenlängen (bzw. Frequenzen) wohlbekannt sind (Tabellenwerke). Das Licht dieser Linien (Farben) kann durch engbandige Filter (oder eine Prismenanordnung) einzeln ausgewählt und auf die Photozelle geschickt werden. Damit hat man genaue Kenntnis über die Frequenzen des eingestrahlt Lichtes.

Die Energie der Photonen wird über die Bewegungsenergie der herausgelösten Elektronen bestimmt, denn man geht davon aus, dass ein Photon seine gesamte Energie an ein Elektron übergibt, das dadurch herausgelöst und bewegt wird. Diese kinetische Energie wird gemessen, indem man die herausgelösten Elektronen gegen ein elektrisches Feld (Gegenfeld) laufen lässt. Die Spannung, die dieses Feld aufbaut, wird dabei so geregelt, dass keine Elektronen mehr an der Auffangelektrode der Photozelle ankommen, was man daran erkennt, dass der Photostrom bei dieser Bremsspannung gerade null wird. Dann ist die Bremsspannung, bei der der Photostrom gleich null wird, gerade ein Maß für die kinetische Energie der Elektronen und es gilt:

$$E_{\text{kin}} = e \cdot U_{\text{Brems}}$$

Dies entspricht aber noch nicht der Energie des Photons, das seine Energie auf das Elektron übertragen hat – zu berücksichtigen ist nämlich noch die Energie, die notwendig ist, das Elektron aus dem Metallgitter zu lösen. Diese Auslösearbeit ergibt sich später bei der Auswertung aller Messdaten.

- und 5. Auswertung Photoeffekt (Simulation)

Material: Wolfram-Cäsium		
Frequenz in $10^{14} \text{ Hz}$	Bremsspannung in Volt	Kin. Energie der Elektronen in $10^{-19} \text{ J}$
5,19 (gelb)	0,74	1,19
5,49 (grün)	0,87	1,39
6,08 (türkis)	1,11	1,78
6,88 (blau)	1,43	2,29
7,41 (violett)	1,65	2,64

Material: Kalium		
Frequenz in $10^{14} \text{ Hz}$	Bremsspannung in Volt	Kin. Energie der Elektronen in $10^{-19} \text{ J}$
5,19 (gelb)	0,35	0,56
5,49 (grün)	0,47	0,75
6,08 (türkis)	0,7	1,12
6,88 (blau)	1,04	1,67
7,41 (violett)	1,25	2,00