



**MEHR
ERFAHREN**



Mechanik · Aufbau der Materie

Physik-KOMPAKT 1

Oberstufe



STARK

Inhalt

Vorwort

Mechanik **1**

Elemente der Kinematik **3**

1 Größen zur Beschreibung einer Bewegung 3

2 Geradlinig gleichförmige Bewegung 7

3 Geradlinig gleichmäßig beschleunigte Bewegung 8

4 Senkrechter Wurf 13

5 Waagerechter Wurf 17



6 Schiefer Wurf 19

Elemente der Dynamik **23**



7 Kraftbegriff und Newton'sche Gesetze 23



8 Einfache Kraftgesetze 26



9 Anwendung der Kraftgesetze 28

Erhaltungssätze **35**

10 Arbeit und Leistung 35

11 Mechanische Energie und Energieerhaltung 41

12 Impuls und Impulserhaltung 44

13 Gerade zentrale Stöße 47

Kreisbewegung	53
14 Kinematik der gleichförmigen Kreisbewegung	53
15 Zentripetalkraft	57
16 Trägheitskräfte	59
Gravitation und Kosmologie	65
17 Das Gravitationsgesetz	65
18 Das Gravitationsfeld	69
19 Planeten- und Erdsatellitenbewegung	74
20 Träge und schwere Masse	79
21 Aspekte der Kosmologie.....	80
Mechanische Schwingungen	83
22 Begriffe und Größen zur Beschreibung mechanischer Schwingungen	83
 23 Harmonische Schwingungen	86
Eindimensionale mechanische Wellen	93
24 Entstehung und Ausbreitung linearer harmonischer Wellen	93
25 Reflexion linearer elastischer Wellen	97
26 Interferenz linearer elastischer Wellen	98
27 Eigenschwingungen beidseitig begrenzter Wellenträger	101
28 Polarisation	103

Grundlagen der Quantenphysik 107

	29 Fotoeffekt	107
	30 Comptoneffekt	110
	31 Das Teilchenmodell der elektromagnetischen Strahlung	114
	32 De-Broglie-Wellen	117
	33 Dualismus	122
	34 Unschärferelation	124

Grundlagen der Atomphysik 127

	35 Das Atommodell von Rutherford und seine Vorläufer ..	127
	36 Quantenhafte Emission und Absorption von Energie durch Atome	131
	37 Bohr'sches Atommodell	138
	38 Ausblick auf das quantenmechanische Atommodell	141
	39 Schalenstruktur der Elektronenhülle	147
	40 Röntgenstrahlung	152

Grundlagen der Kernphysik 161

	41 Zusammensetzung der Atomkerne	161
	42 Elementare Kerndaten	164
	43 Kernbindung	166
	44 Detektoren für radioaktive Strahlung	170
	45 Arten radioaktiver Strahlung	172
	46 Schwächung radioaktiver Strahlung	177

47	Verschiebungssätze und Zerfallsreihen	179
48	Zerfallsgesetz	185
49	Neutronen	189
50	Kernreaktionen	192
51	Der Alphazerfall	196
52	Der Betazerfall	199
53	Der Gammazerfall	203
54	Physikalische Grundlagen der Kernspaltung	205
55	Grundlagen der Reaktortechnik	208
56	Kernfusion	213
57	Strahlenbelastung und Strahlenschutz	216
58	Ausblick auf die Teilchenphysik	218
	Stichwortverzeichnis	223

Autor: Horst Lautenschlager

Hinweis:

Die entsprechend gekennzeichneten Kapitel enthalten ein **Lernvideo**. An den jeweiligen Stellen im Buch befindet sich ein QR-Code, der mit einem Smartphone oder Tablet gescannt werden kann.



Im Hinblick auf eine eventuelle Begrenzung des Datenvolumens wird empfohlen, beim Ansehen der Videos eine WLAN-Verbindung zu nutzen.

Vorwort

Liebe Schülerinnen und Schüler,

der Band Physik 1 aus der Reihe Kompakt-Wissen Physik bietet Ihnen eine kompakte und gleichzeitig präzise Darstellung des gymnasialen Unterrichtsstoffs zur klassischen Mechanik und zur Quanten-, Atom- und Kernphysik. Er eignet sich damit für den täglichen Schulgebrauch ebenso gut wie für die Vorbereitung auf Tests, Schulaufgaben und Abitur.

- Alle lehrplanrelevanten Themen werden **verständlich erklärt**.
- Der Inhalt ist übersichtlich aufbereitet und systematisch in **überschaubare Abschnitte** gegliedert
- **Kernaussagen** und wichtige **physikalische Begriffe** sind **blau** hervorgehoben. Mithilfe vieler **Grafiken** und **Diagramme** wird der im Text behandelte Stoff zusätzlich veranschaulicht.
- **Zahlreiche Querverweise** helfen Ihnen dabei, Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Stoffgebieten zu erkennen.
- Das **umfangreiche Stichwortverzeichnis** erleichtert Ihnen die gezielte Suche nach bestimmten Begriffen und Inhalten.

Zu ausgewählten Themen gibt es **Lernvideos**, in denen wichtige Zusammenhänge und Experimente dargestellt werden. An den entsprechenden Stellen im Buch befindet sich ein QR-Code, der mit einem Smartphone oder Tablet gescannt werden kann.



Viel Freude bei der Lektüre wünscht Ihnen



Horst Lautenschlager

Elemente der Dynamik

Die **Dynamik** untersucht die Zusammenhänge zwischen Bewegungsvorgängen und den ursächlichen mechanischen Kräften.

7 Kraftbegriff und Newton'sche Gesetze

Als **mechanische Kraft** bezeichnet man jede Einwirkung auf einen Körper, die diesen **verformt** oder seinen **Bewegungszustand ändert**. Nimmt ein verformter Körper wieder seine ursprüngliche Form an, sobald die verformende Kraft nicht mehr wirkt, spricht man von einer **elastischen**, andernfalls von einer **plastischen** Verformung.

Eine Änderung des Bewegungszustandes liegt vor, wenn sich der Betrag oder die Richtung der Momentangeschwindigkeit ändert.

1



Mechanische Kräfte sind Vektorgrößen. Das **Formelzeichen** für die mechanische Kraft ist F . Ihre **Einheit**, ausgedrückt durch die SI-Basiseinheiten, ist $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$. Gebräuchlicher ist die abgeleitete Einheit **Newton (Einheitenzeichen N)**:

2

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

Ob an einem Körper, an dem keine Verformungen auftreten, mechanische Kräfte angreifen, lässt sich mit dem **1. Newton'schen Gesetz**, dem **Trägheitsprinzip**, feststellen:

3

„Jeder Körper beharrt im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, solange er nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern.“

Wie ein Körper seinen Bewegungszustand unter dem Einfluss einer äußeren Kraft verändert, wird im **2. Newton'schen Gesetz**, das auch als **Aktionsprinzip**, **Beschleunigungsgesetz** oder **Grundgesetz der Mechanik** bezeichnet wird, beschrieben:

4

„Wirkt auf einen Körper eine ausschließlich seinen Bewegungszustand verändernde Kraft, wird er in Richtung der Kraft beschleunigt. Der Betrag a der Beschleunigung ist dem Betrag F der Kraft direkt und der Körpermasse m umgekehrt proportional.“

Im SI-System gilt:

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$$

- 5 Die Erfahrung zeigt ferner, dass Körper immer nur wechselseitig Kräfte aufeinander ausüben können. Dieser Sachverhalt wird im **3. Newton'schen Gesetz**, dem **Reaktionsprinzip** oder **Wechselwirkungsgesetz**, präzisiert:

„Wirkt ein Körper A auf einen Körper B mit der Kraft \vec{F} so greift der Körper B am Körper A mit der gleich großen, aber entgegengesetzt gerichteten Kraft $-\vec{F}$ an.“

- 6 Eine **mechanische Kraft** kann bei bekannter Körpermasse m **dy-namisch** mithilfe des 2. Newton'schen Gesetzes $F = m \cdot a$ über die von ihr verursachte Beschleunigung a **gemessen** werden. Die Definition der Krafteinheit Newton beruht auf dieser Möglichkeit. Hiernach besitzt eine Kraft den Betrag 1 Newton, wenn sie einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erteilt.

Kräfte können aber auch **statisch** z. B. mithilfe des Hooke'schen Gesetzes (\rightarrow 8 | 5) über die Verformung geeigneter Schraubenfedern **gemessen** werden.

- 7 Die Newton'sche Mechanik beschreibt Bewegungen korrekt, deren Geschwindigkeiten v deutlich unter der Lichtgeschwindigkeit c liegen. Für größere Geschwindigkeiten muss die Beschreibung im Rahmen der **Speziellen Relativitätstheorie** erfolgen, in der die Newton'sche Theorie als Grenzfall $v \ll c$ enthalten ist.

- 8 In der Newton'schen Mechanik gilt das **Kausalitätsprinzip**. Es besagt allgemein, dass zwei Ereignisse U und W kausal miteinander verknüpft sind, wenn auf das Ereignis U (Ursache) stets das Ereignis W (Wirkung) folgt, wobei U zeitlich vor W liegt. Ereignisse werden durch physikalische Größen beschrieben, die in ihrer

Gesamtheit den physikalischen Zustand eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt abbilden. Kennt man einen solchen Zustand zum Zeitpunkt t_1 vollständig – d. h. alle relevanten physikalischen Größen zu diesem Zeitpunkt –, kann man mittels der Newton-Gesetze eindeutig auf den Zustand des Systems zu einem späteren Zeitpunkt $t_2 > t_1$ schließen. Umgekehrt kann man vom Zustand zum Zeitpunkt t_2 auf den früheren Zustand zum Zeitpunkt t_1 zurückschließen. Man sagt auch, in der Newton'schen Physik sind zeitlich aufeinanderfolgende Vorgänge determiniert, d. h., der Ablauf der Ereignisse ist eindeutig festgelegt.

Aus heutiger Sicht ist der **Determinismus** physikalischer Vorgänge in mehrfacher Hinsicht nicht mehr generell zutreffend, weil die in (→ 7 §) genannte Voraussetzung der „vollständigen Kenntnis eines Zustands“ nicht stets erfüllbar ist:

- Die im 20. Jahrhundert entwickelte Theorie des **deterministischen Chaos** beruht darauf, dass viele dynamische Vorgänge nichtlinearen Bewegungsgleichungen gehorchen. Solche Bewegungen laufen, abhängig von für die Bewegung charakteristischen Parametern, potenziell „chaotisch“ ab, d. h., eine noch so geringe Abweichung in den Anfangsbedingungen führt zu einer beliebig großen Abweichung in der Zukunft (z. B.: Wettergeschehen, Börsenkursentwicklung, Doppelpendelschwingung). Solche Systeme besitzen keine **starke Kausalität** mehr („ähnliche Ursachen führen zu ähnlichen Wirkungen“), sondern sind nur mehr **schwach kausal** („gleiche Ursachen führen zu gleichen Wirkungen“); statt eines „Umgebungs determinismus“ gilt nur ein „Punktdeterminismus“. Da eine exakte Kenntnis des Anfangszustands gerade bei komplexen Systemen *praktisch* nicht gewonnen werden kann, sind langfristige Vorhersagen der Zeitentwicklung solcher Systeme unmöglich.
- In der ebenfalls im 20. Jahrhundert entwickelten **Quantenmechanik** ist selbst *theoretisch* die Angabe eines exakten Anfangszustands unmöglich: In der Newton-Mechanik ist der Anfangszustand durch die Angabe von Ort $x(t_0)$ und Geschwindigkeit $v(t_0)$ des betrachteten Körpers zum Startzeitpunkt t_0 gegeben. Eine entsprechende quantenmechanische Angabe ist nach der **Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation** nicht möglich.

Sie besagt, dass Impuls und Geschwindigkeit eines Quantenobjekts umso ungenauer bestimmt werden können, je genauer zum selben Zeitpunkt der Ort gemessen wird, und umgekehrt. Die Quantenmechanik ist – auf mikroskopischer Ebene, also bezogen auf das Verhalten eines einzelnen Quantenobjekts – **nicht deterministisch**, sondern lässt vielmehr nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Verhalten des Quantenobjekts zu. Sie ist aber nach wie vor **kausal** bezogen auf das Gesamtverhalten eines Systems in dem Sinne, dass eine Ursache-Wirkungs-Beziehung vorliegt.

Beispiel Doppelspaltversuch: Elektronen passieren einen Doppelspalt (DS) und treffen dahinter auf einen Schirm.

- Je nachdem, ob beide oder nur einer der Spalte geöffnet sind (Ursache), zeigt der Schirm hinter dem DS verschiedene Intensitätsverteilungen (Wirkung), und zwar stets in ihrer Gesamtheit dieselben: Einzelspaltverteilung bei einem geöffneten Spalt, Interferenzmuster bei zwei geöffneten Spalten; die *Gesamtheit* der Elektronen verhält sich kausal.
- Durch welches Elektron ein einzelner Messpunkt auf dem Schirm verursacht worden ist, lässt sich prinzipiell nicht feststellen; auch die mikroskopische Zusammensetzung eines Schirmmusters ist trotz identischer Versuchsanordnung für jede Messung unterschiedlich (nämlich zufällig): Die *einzelnen* Elektronen verhalten sich nicht deterministisch.

8 Einfache Kraftgesetze

- 1 Nach dem Gravitationsgesetz (\rightarrow 17 |1) erfährt jeder Körper der Masse m eine zum Erdmittelpunkt gerichtete, **Gewichtskraft** genannte und mit \vec{F}_G bezeichnete Kraft. Nahe der Erdoberfläche gilt für ihren Betrag (g bezeichnet den Ortsfaktor (\rightarrow 4 |1)):

$$\mathbf{F}_G = m \cdot \mathbf{g}$$

- 2 Eine senkrecht zur Unterlage wirkende Kraft bezeichnet man als **Normalkraft**. Für einen auf einer horizontalen Unterlage stehenden Körper stimmen Normal- und Gewichtskraft überein.

Grundlagen der Quantenphysik

29 Fotoeffekt

1887 entdeckte Heinrich Hertz bei Experimenten zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen als Nebenergebnis den Fotoeffekt. Eingehende Untersuchungen dieses Effekts führten zu Ergebnissen, die mit dem klassischen Wellenmodell des Lichts nicht zu erklären waren. Erst Einsteins korpuskulare Theorie des Lichts war – um den Preis eines radikalen Bruchs mit der klassischen Physik – dazu in der Lage.



Die Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen durch Licht hinreichend hoher Frequenz bezeichnet man als (äußeren) **Fotoeffekt** oder **lichtelektrischen Effekt**. Lichtelektrisch ausgelöste Elektronen nennt man **Fotoelektronen**.

1

Empirische Befunde

- Der Fotoeffekt setzt ohne zeitlichen Verzögerung ein.
- Die kinetische Energie E_{kin} der Fotoelektronen hängt nicht von der Intensität, sondern von der Frequenz f des einfallenden Lichts ab. Je höher f , desto größer E_{kin} .
- Es gibt eine Grenzfrequenz f_g . Licht mit kleinerer Frequenz löst keine Fotoelektronen aus.
- Die Anzahl der pro Zeiteinheit erzeugten Fotoelektronen ist proportional zur Intensität des einfallenden Lichts.

2

Das Wellenmodell versagt bei der Erklärung

- von 2a, weil sich die Energie der Lichtwelle gleichmäßig auf die Atome der Schichtoberfläche verteilt. Es dauert daher eine bestimmte Zeit, bis ein Atom für eines seiner Elektronen die Austrittsenergie „gesammelt“ hat.
- von 2b, weil die von einer Lichtwelle transportierte und abgegebene Energie nicht von der Frequenz, sondern vom Quadrat der Wellenamplitude (das proportional zur Intensität ist) abhängt.

3

- c) von 2c, weil auch Licht mit Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz Energie zur Fotoschicht transportiert und nach Verstreichen einer bestimmten Zeit zur Ablösung von Fotoelektronen führen müsste.

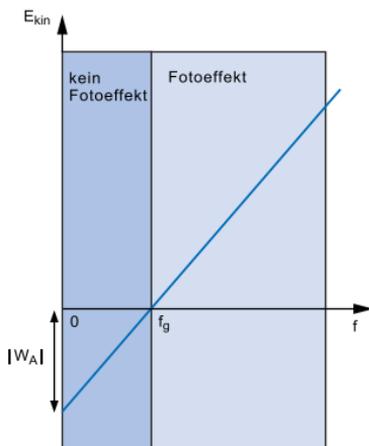
4 Zur Erklärung des Photoeffekts mit dem Photonenmodell

nimmt man an, dass **ein** Photon der Energie $h \cdot f$ mit **einem** Elektron in der Metalloberfläche zusammenstößt und dabei spontan seine **gesamte** Energie überträgt.

Einen Teil dieser Energie, die Austrittsarbeit W_A , benötigt das Elektron zum Verlassen des Metalls. Den Restbetrag $h \cdot f - W_A$ behält es als kinetische Energie. Die mathematische Form dieser **Energiebilanz**,

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A,$$

nennt man **Einstein-Gleichung**. Trägt man in einem kartesischen Koordinatensystem die kinetische Energie der Fotoelektronen gegen die Frequenz des auslösenden Lichts an, so erhält man nach der Einstein-Gleichung eine Gerade mit der Steigung h , welche die f -Achse bei der Grenzfrequenz f_g und die E_{kin} -Achse bei $-W_A$ schneidet.



5 Zusammenhang zwischen Grenzfrequenz f_g und Austrittsarbeit W_A

Die kinetische Energie von Fotoelektronen, die von Licht der Grenzfrequenz f_g ausgelöst werden, ist null. Aus der Einstein-Gleichung folgt:

$$h f_g - W_A = 0 \Rightarrow f_g = \frac{W_A}{h}$$

Unter dem **Hallwachseffekt** versteht man die positive Aufladung einer isoliert aufgestellten, anfangs ungeladenen Metallplatte bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht. Die positive Ladung auf der Platte und damit deren Spannung gegen die Erde erreicht einen Maximalwert, wenn die energiereichsten Photonen wegen der starken positiven Aufladung keine Fotoelektronen mehr auslösen können.

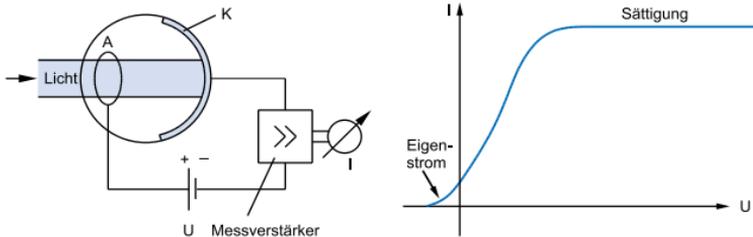
6

Die Zahl der Fotoelektronen, die im Mittel durch ein einfallendes Photon ausgelöst werden, nennt man **Quantenausbeute**. Diese hängt vom bestrahlten Material und von der Frequenz des einfallenden Lichts ab. Bei Metallen beträgt sie an der Grenzfrequenz ca. 10^{-4} und kann mit steigender Frequenz maximal 0,15 erreichen.

7

Zu Messzwecken werden **Fotozellen** benutzt. Das sind evakuierte Glaskolben, in denen einer lichtelektrisch empfindlichen Schicht K eine lichtdurchlässige, z. B. ringförmige Anode A gegenübersteht.

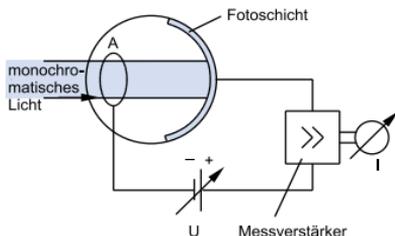
8



Ist A positiv und K negativ gepolt, saugt eine Gleichspannung U die Fotoelektronen zum Anodenring. Mit zunehmender Saugspannung U steigt der Fotostrom an, weil pro Zeiteinheit immer mehr Fotoelektronen von K nach A gelangen. Wenn bei größeren Saugspannungen alle in einer Zeitspanne ausgelösten Fotoelektronen in dieser Zeitspanne auch zur Anode gelangen, ist eine weitere Steigerung des Fotostroms nicht mehr zu beobachten, **Sättigung** tritt auf.

Die Fotoelektronen verlassen die Fotokathode auch ohne Saugspannung bereits mit einer bestimmten Geschwindigkeit und gelangen teilweise zur Anode A. Dieser schwache, **Eigenstrom** genannte Fotostrom lässt sich durch eine geringe Gegenspannung auf null absenken.

- 9 Die **Messung der kinetischen Energie** der schnellsten, von monochromatischem Licht ausgelösten **Fotoelektronen** erfolgt mit einer Gegenfeldmethode.



Der Anodenring einer Fozelle wird negativ, ihre Kathode positiv gepolt. Die Fotoelektronen müssen daher ein elektrisches Gegenfeld durchlaufen, um von der Fotokathode zur Anode zu gelangen.

Stellt man die Gegenspannung U_G so ein, dass der Fotostrom gerade zum Erliegen kommt, dann gilt für die kinetische Energie der schnellsten Fotoelektronen:

$$E_{\text{kin, max}} = e U_G$$

Die Fotoelektronen haben u. a. deswegen keine einheitlichen Geschwindigkeiten, weil sie aus verschiedenen tiefen Schichten ausgelöst werden.

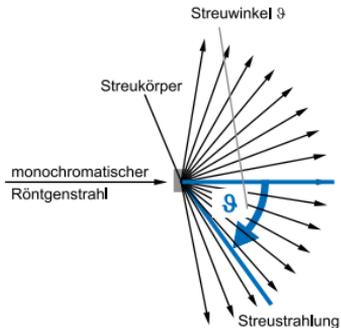
30 Comptoneffekt

Der 1923 von Compton bei der Untersuchung der Streuung von Röntgenstrahlung an Graphit entdeckte Effekt ist nach dem Fotoeffekt das zweite Phänomen, das für die Photonentheorie und gegen die Wellennatur des Lichts spricht.

- 1 Dass bei der Streuung von monochromatischer Röntgenstrahlung der Wellenlänge λ an einem geeigneten Körper in der Streustrahlung neben der Primärstrahlung der Wellenlänge λ auch längerwellige Sekundärstrahlung der Wellenlänge $\lambda' = \lambda + D\lambda$ auftritt, bezeichnet man als **Comptoneffekt**.

$\Delta\lambda$ lässt sich durch den Streuwinkel ϑ , die Ruhemasse m_0 des Elektrons, das Planck'sche Wirkungsquantum h und die Vakuumlichtgeschwindigkeit c in der **Comptonformel** ausdrücken (\rightarrow 30 | 5):

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\vartheta)$$



Das Wellenmodell versagt bei der Erklärung des Comptoneffekts.

2

Im Wellenmodell veranlasst der periodisch mit der Frequenz f schwingende \vec{E} -Vektor der einfallenden Röntgenwelle einige Elektronen im Streukörper zu erzwungenen Schwingungen mit der gleichen Frequenz. Diese strahlen als kleine Hertz'sche Dipole nach den Gesetzen der Dipolstrahlung in alle Richtungen nur monochromatische Röntgenwellen der Frequenz f ab. Die in der Streustrahlung auftretenden Wellen mit kleinerer Frequenz bzw. größerer Wellenlänge können somit nicht erklärt werden.

Das Photonenmodell erklärt die

3

- längerwellige Sekundärstrahlung:** Ein Röntgenphoton stößt ein **ungebundenes, anfangs ruhendes** Elektron des Streukörpers **vollkommen elastisch** und überträgt dabei nur **einen Teil** ΔE seiner Energie E_{Ph} auf das Elektron. Nach dem Stoß verlassen ein Photon mit der kleineren Energie $E'_{\text{Ph}} = E_{\text{Ph}} - \Delta E$, also mit einer größeren Wellenlänge, und das gestoßene Elektron mit der kinetischen Energie $E_{\text{kin}} = \Delta E$ den Streukörper.
- Primärstrahlung:** Besonders bei schweren Streukörperatomen sind die inneren Elektronen fest gebunden und können nicht mehr als frei angesehen werden. Bei Stößen mit solchen Elektronen tauscht das Photon Energie und Impuls mit dem Atom als Ganzem aus. Wegen der großen Masse des Atoms ändern sich dabei die Energie und damit auch die Wellenlänge des Photons nicht.

4 Erhaltungssätze beim Comptoneffekt

Für den elastischen Stoß eines Röntgenphotons mit einem freien, ruhenden Elektron gelten der Energie- und der Impulserhaltungssatz. Wegen der hohen Energien der beteiligten Partner sind aber relativistische Ansätze erforderlich.

Energieerhaltungssatz:

$$E_{\text{Ph}} + E_0 = E'_{\text{Ph}} + E'_e$$

Impulserhaltungssatz in Vektorform:

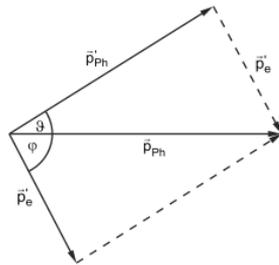
$$\vec{p}_{\text{Ph}} = \vec{p}'_{\text{Ph}} + \vec{p}'_e$$

Impulserhaltungssatz in Betragsform:

$$p_e'^2 = p_{\text{Ph}}^2 + p_{\text{Ph}}'^2 - 2p_{\text{Ph}} p_{\text{Ph}}' \cos \mathcal{J}$$

Dabei bezeichnen

- E_{Ph} bzw. E'_{Ph} die Energie des Photons vor bzw. nach dem Stoß,
- E_0 bzw. E'_e die Ruheenergie bzw. relativistische Energie des Elektrons vor bzw. nach dem Stoß,
- p_{Ph} bzw. p'_{Ph} die Impulsbeträge des Photons vor bzw. nach dem Stoß,
- p'_e den relativistischen Impulsbetrag des Elektrons nach dem Stoß.



5 Herleitung der Comptonformel

a) In der Impulsleichung drückt man alle Impulse mittels

$$p_{\text{Ph}} = p_{\text{Ph}} c \text{ bzw. } E'_{\text{Ph}} = p'_{\text{Ph}} c \text{ bzw. } p_e'^2 c^2 = E_e'^2 - E_0^2$$

durch Energien aus. Dies führt auf die Gleichung

$$(1) E_e'^2 - E_0^2 = E_{\text{Ph}}^2 + E_{\text{Ph}}'^2 - 2E_{\text{Ph}} E_{\text{Ph}}' \cos \mathcal{J}.$$

b) Die Energiegleichung formt man so um, dass auf einer Seite $E_e'^2 - E_0^2$ zu stehen kommt. Dies führt auf die Gleichung

$$(2) E_e'^2 - E_0^2 = E_{\text{Ph}}^2 + E_{\text{Ph}}'^2 - 2E_{\text{Ph}} E_{\text{Ph}}' + 2E_{\text{Ph}} E_0 - 2E_{\text{Ph}}' E_0.$$

- c) Setzt man (1) und (2) gleich und dividiert die Gleichung durch $2E_{\text{Ph}} E'_{\text{Ph}} E_0$, ergibt sich nach kurzer Rechnung die Comptonformel

$$\Delta l = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \mathcal{J}).$$

Die in der Comptonformel auftretende Größe

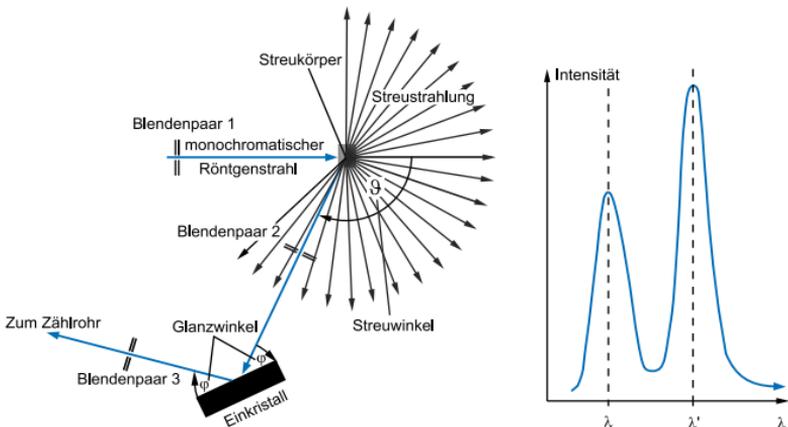
$$l_C = \frac{h}{m_0 c}$$

hat die Dimension einer Länge, heißt **Comptonwellenlänge** und besitzt den numerischen Wert $l_C = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.

Die Wellenlängenzunahme $l' - l$ hängt nach der Comptonformel ($\rightarrow 30 | 1$) nicht von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung, sondern nur vom Streuwinkel \mathcal{J} ab. Die für ein bestimmtes \mathcal{J} beobachtbare **relative Wellenlängenzunahme** $\frac{l' - l}{l}$ ist daher umso größer, je kleiner die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist.

Der **Comptoneffekt** ist daher nur im **Röntgen-** und **Gammabereich** beobachtbar.

Aufnahme des Streustrahlungsspektrums



Das Blendenpaar 1 gewährleistet, dass ein monoenergetischer Röntgenstrahl in wohl definierter Richtung auf den Streukörper trifft. Aus der Streustrahlung wird durch das Blendenpaar 2 ein Strahl unter dem Winkel ϑ gegen die Einfallrichtung ausgeblendet, der anschließend auf einen Einkristall trifft.

Kristall und Zählrohr stellen ein **Röntgenspektrometer** dar, mit dem man nach dem Bragg'schen Drehkristallverfahren (\rightarrow 40 [5]) das in der Abbildung dargestellte Spektrum der Streustrahlung erhält. Es weist zwei relative Extrema auf: Die kurzwelligere Primärstrahlung (1) und die längerwellige, durch den Comptoneffekt bedingte Sekundärstrahlung (1').

9 Vergleich zwischen Foto- und Comptoneffekt

Fotoeffekt	Comptoneffekt
Wechselwirkung eines Photons mit einem an ein Atom gebundenen Elektron.	Wechselwirkung eines Photons mit einem freien Elektron.
Das Photon überträgt seine Energie vollständig auf das Elektron.	Das Photon gibt nur einen Teil seiner Energie an das Elektron ab.
Nach der Wechselwirkung gibt es kein Photon mehr.	Nach der Wechselwirkung gibt es ein Photon geringerer Energie.
Die Fotoelektronen besitzen alle die gleiche Geschwindigkeit, ihr Geschwindigkeitsspektrum ist diskret.	Comptonelektronen besitzen ein kontinuierliches Geschwindigkeitsspektrum.

31 Das Teilchenmodell der elektromagnetischen Strahlung

Elektromagnetische Strahlung besitzt eine Doppelnatur. Bei der Ausbreitung verhält sie sich wie eine Welle, bei der Wechselwirkung mit Materie wie Teilchen. Der Teilchencharakter tritt dabei umso deutlicher zutage, je größer die Energie der Teilchen ist.



© **STARK Verlag**

www.stark-verlag.de
info@stark-verlag.de

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH ist urheberrechtlich international geschützt. Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung des Rechteinhabers in irgendeiner Form verwertet werden.

STARK