

1.3 Gravitation und Himmelsmechanik

Himmelsmechanik



Abb. 1.3: JOHANNES KEPLER 1571 – 1630

KEPLER'sche Gesetze

Die Bewegung der Planeten um die Sonne bzw. des Mondes um die Erde wurde erstmals von JOHANNES KEPLER im Jahr 1609 mathematisch korrekt beschrieben. Die von ihm aufgestellten **KEPLER'schen Gesetze** beschreiben die Bewegung eines einzelnen Planeten oder eines einzelnen Mondes (allgemein eines Trabanten) um ein wesentlich massereicheres Zentralgestirn (Zwei-Körper-Problem).

Erstes KEPLER'sches Gesetz (Ellipsensatz)

Die **Umlaufbahn** eines Trabanten ist eine Ellipse, deren einer Brennpunkt im Schwerzentrum des Systems liegt.

Zweites KEPLER'sches Gesetz (Flächensatz)

In gleichen Zeiten überstreicht der Fahrstrahl zwischen umlaufendem Objekt und Gravizentrum des Systems gleiche Flächen.

TIPP

Der Flächensatz gilt auch für einmalig passierende Himmelskörper: Ihre Bahnkurve ist eine Hyperbel, die wie die Ellipse den Rand einer Kegelschnittfläche darstellt.

Drittes KEPLER'sches Gesetz (Halbachsensatz)

Im **Dritten KEPLER'schen Gesetz** wird ein Zusammenhang der Bahnbewegungen zweier Planeten um dasselbe Zentralgestirn hergestellt: Demnach sind die Quadrate der Umlaufzeiten T der beiden Planeten proportional zu den dritten Potenzen ihrer großen Halbachsen a :

\propto bedeutet:
proportional zu
(oft auch: ~)

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \propto \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3$$

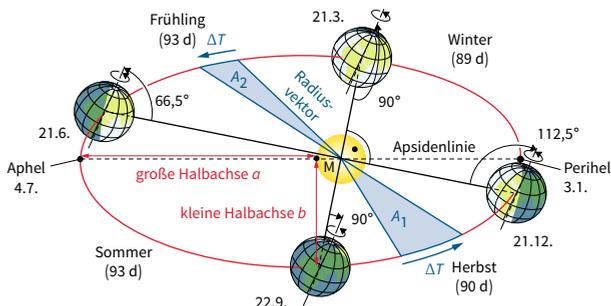


Abb. 1.4: Umlaufbahn der Erde um die Sonne. Der Flächensatz ist blau eingezeichnet.

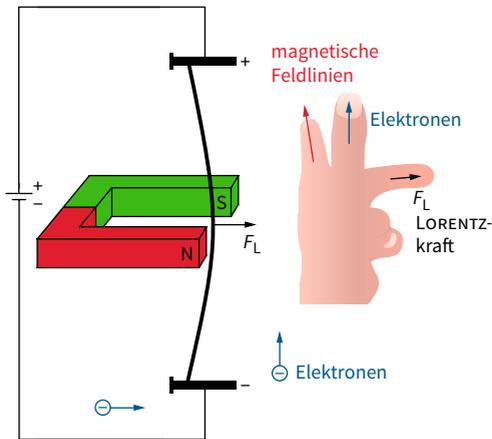


Abb. 2.19: Ein stromdurchflossener Leiter erfährt in einem Magnetfeld eine Kraft. Die Richtung dieser LORENTZ-Kraft zeigt die Drei-Finger-Regel an.

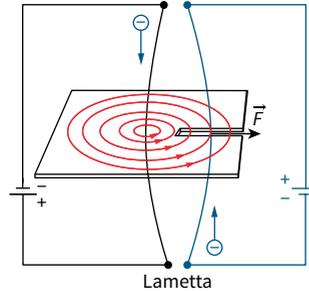


Abb. 2.20: Die Elektronen im rechten Leiter erfahren im Magnetfeld des linken Leiters die LORENTZ-Kraft.

DREI-FINGER-REGEL

Die Richtung der LORENTZ-Kraft kann mit der Drei-Finger-Regel bestimmt werden: Zeigt der Daumen der linken Hand in die Bewegungsrichtung der Elektronen und der Zeigefinger in Richtung des magnetischen Feldes, dann gibt der Mittelfinger die Richtung der LORENTZ-Kraft an.

BEISPIEL

Parallele Leiter

Die LORENTZ-Kraft wirkt auch zwischen zwei stromführenden Leitern: Antiparallele Ströme stoßen sich gegenseitig ab, parallele Ströme ziehen sich an (\rightarrow Abb. 2.20). Für einen Leiter der Länge s in einem Magnetfeld bedeutet dies bei einem Strom der Stärke I :

$$\vec{F}_L = I \cdot (\vec{s} \times \vec{B})$$

Der Vektor \vec{s} entspricht der Länge des Leiters und zeigt in die technische Stromrichtung.

In der Betragsform folgt daher:

$$F_L = I \cdot s \cdot B_{\perp} = I \cdot s \cdot B \cdot \sin \varphi$$

Dabei steht B_{\perp} senkrecht zu \vec{s} und φ ist der Winkel zwischen \vec{B} und \vec{s} .

Bipolare Transistoren

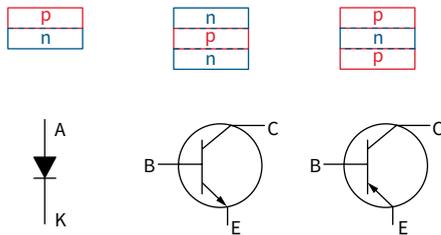


Abb. 6.30: Oben in der Abbildung ist der Schichtaufbau einer Diode, eines npn- und eines pnp-Transistors gezeigt. Darunter befinden sich die jeweils dazugehörigen Schaltsymbole.

pnp-Transistor unterschieden. Da der pnp-Transistor nur selten Verwendung findet, beschränken wir uns im Folgenden auf den npn-Transistor. Das Gesagte gilt jedoch analog auch für den pnp-Typ.

Die drei Schichten des npn-Transistors sind mit separaten Kontakten versehen, die mit **Kollektor (C)**, **Basis (B)** und **Emitter (E)** bezeichnet werden. Wird zwischen dem Kollektor (+) und dem Emitter (-) eine Spannung U_{CE} angelegt, so sperrt der pn-Übergang zwischen dem Kollektor und der Basis, sodass kein Strom fließen kann. Wird nun zusätzlich an die Basis eine Spannung U_{BE} von etwa 0,6V angelegt, so fließen die Elektronen vom Emitter in die Basis: Die Basis-Emitter-Diode ist in Durchlassrichtung gepolt. Bedingt durch die hohe Dotierung des Emitters und die geringe Schichtdicke der Basis fließen nur wenige Elektronen aus dem Emitter über die Basis ab. Die meisten Elektronen aus dem Emitter fließen durch die Basis hindurch in die Raumladungszone der Basis-Kollektor-Diode. Die Isolationschicht dieses pn-Überganges wird dadurch mit Ladungsträgern überschwemmt und wird leitfähig. Die Elektronen können nun über den Kollektor abfließen.

VERSTÄRKUNG

Durch den geschickten Schichtaufbau des Transistors kann mit einem kleinen Basisstrom I_B ein großer Kollektorstrom I_C gesteuert werden. Zum Steuern des Transistors wird die Leistung $P_B = I_B \cdot U_{BE}$ benötigt, die wesentlich kleiner ist als die gesteuerte Leistung $P_C = I_C \cdot U_{CE}$.

VORSICHT: FALLE

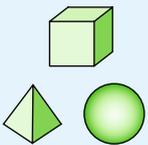
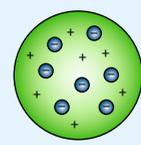
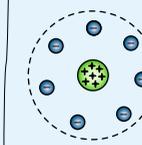
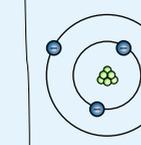
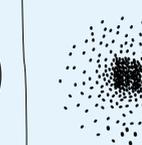
Der Aufbau von Transistoren ist nur in der Theorie symmetrisch. In der Praxis unterscheiden sich zum Beispiel die Dotierung von Kollektor und Emitter. Ein Vertauschen der beiden Anschlüsse führt daher zu ungünstigen Eigenschaften oder gar zur Zerstörung des Transistors.

Atomaufbau

Festkörperphysik

6.2
6.3

ATOMMODELL

					
DEMOKRIT (ca. 400 v. Chr.)	J. DALTON (1803)	J. J. THOMSON (1897)	E. RUTHERFORD (1909)	N. BOHR (1913)	E. SCHRÖDINGER (1926)
unteilbare Teilchen	gleichartige Kugeln	Elektronen in einer positiv geladenen Kugel	positiver Kern, Elektronen bilden eine Hülle	Elektronen auf festen Kreisbahnen	Wellenfunktion beschreibt Elekt- ronen Orbitale

WELLENFUNKTION UND SCHRÖDINGER-GLEICHUNG

Ist ein Teilchen in einem Potential $W_{\text{pot}}(x)$ eingeschlossen, so bilden sich stehende Materiewellen mit diskreten Energieniveaus $W_n > 0$. Der Ort des Teilchens wird durch die Wellenfunktion $\Psi_n(\vec{r})$ beschrieben, wobei $|\Psi_n(\vec{r})|^2$ die Aufenthaltswahrscheinlichkeit angibt. Zur Berechnung der Wellenfunktion und der Energieeigenwerte W_n dient die **SCHRÖDINGER-Gleichung**:

$$\Psi_n''(x) = -\frac{8\pi^2 m}{h^2} \cdot (W_n - W_{\text{pot}}(x)) \cdot \Psi_n(x)$$

POTENTIALTOPF UND HARMONISCHER OSZILLATOR

→ 1-D-Potentialtopf: $W_n = \frac{h^2}{8m \cdot L^2} n^2$ mit $n = 1, 2, 3, \dots$

→ 3-D-Potentialtopf: $W_n = \frac{P^2}{2m} = \frac{h^2}{8m \cdot L} \cdot (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$
mit $n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$

→ Harmonischer Oszillator: $W_{\text{pot}}(x) = \frac{1}{2} m \omega_0^2 x^2$

$$W_n = h \cdot f \cdot \left(n + \frac{1}{2} \right) \text{ mit } f = 2\pi\omega_0 \text{ und}$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots \Rightarrow \Delta W = h \cdot f$$

DAS WASSERSTOFF-ATOM

→ Energieniveaus:

$$W_{\text{ges},n} = -\frac{m_e \cdot e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

→ mittlerer Radius:

$$\bar{r}_1 = 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,8 \text{ \AA}$$

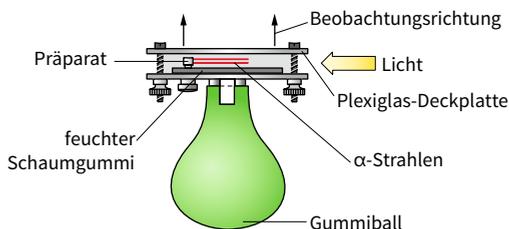
mit 1 Ångström
= 1 Å = 0,1 nm = 10⁻¹⁰ m



Nachweis ionisierender Strahlung

CHARLES THOMSON REES
WILSON
1869 – 1959,
Nobelpreis 1927

Die **WILSON'sche Nebelkammer** ist eine mit Luft gefüllte Kammer, die mit Wasserdampf oder Alkohol gesättigt ist. Wird das Volumen z. B. durch das Entspannen eines Gummiballs schnell vergrößert (\rightarrow „adiabatische Expansion“, Glossar Seite 268), so kühlt sich die Luft ab und der Taupunkt wird unterschritten. Luftmoleküle, die durch α - oder β -Teilchen ionisiert sind, wirken als **Kondensationskeime** für die Bildung von Nebeltröpfchen. Die Flugbahn der Teilchen wird so als Nebelspur sichtbar (\rightarrow Abb. 8.7). Durch das Anlegen von elektrischen oder magnetischen Feldern wird die Bahn der Teilchen gekrümmt, sodass Ladung, Masse und Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt werden können (\rightarrow siehe Zusatzwissen).



CARL D. ANDERSON
1905 – 1991,
Nobelpreis 1936

Abb. 8.7: CARL D. ANDERSON entdeckte 1932 in einer Nebelkammer das Positron.

ZUSATZWISSEN

Relativistische Nebelspuren

Ein homogenes Magnetfeld ($\vec{B} \perp \vec{v}$) führt in der Nebelkammer zu gekrümmten Teilchenbahnen. Durch Gleichsetzen der LORENTZ-Kraft (\rightarrow Seite 60f.) mit der Zentripetalkraft (\rightarrow Seite 34) ergibt sich:

$$F_Z = m_{\text{rel}} \cdot \frac{v^2}{R} = B \cdot q \cdot v = F_L \Rightarrow R = \frac{m_{\text{rel}} \cdot v}{q \cdot B} \Leftrightarrow \frac{q}{m_{\text{rel}} \cdot v} = \frac{q}{p_{\text{rel}}} = \frac{1}{R \cdot B} \Leftrightarrow \frac{q}{m_0} = \frac{\gamma \cdot v}{R \cdot B}$$

Für ein elektrisches Feld ($\vec{E} \perp \vec{v}$) folgt analog zur BRAUN'schen Röhre (\rightarrow Seite 50f.):

$$x = v \cdot t \Leftrightarrow t = \frac{x}{v}; \quad a = \frac{F}{m_{\text{rel}}} = \frac{q \cdot E}{m_{\text{rel}}}; \quad y = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{q \cdot E}{2 m_{\text{rel}} v^2} x^2 = \frac{q}{p_{\text{rel}}} \cdot \frac{E}{2v} x^2$$

Einsetzen des Messergebnisses für $\frac{q}{p_{\text{rel}}} = \frac{1}{R \cdot B}$ vom magnetischen Feld und Auflösen nach v liefert:

$$v = \frac{E}{2R \cdot B} \frac{x^2}{y}$$

Hiermit lassen sich nun γ und damit auch $\frac{q}{m_0}$ berechnen. Ist die kinetische Energie der Teilchen aus einer anderen Messung (zum Beispiel mit einem Proportionalzählrohr) bekannt, so lässt sich aus $W_{\text{kin}} = (\gamma - 1) m_0 c^2$ die Ruhemasse und aus $\frac{q}{m_0}$ die Ladung bestimmen. Das Vorzeichen der Ladung ist von Beginn an aus der Krümmungsrichtung bekannt.

9

Thermodynamik (Wärmelehre)

Die Thermodynamik beschäftigt sich mit allen Phänomenen, bei denen Wärme eine Rolle spielt. Insbesondere beschreibt sie das Verhalten von realen und idealen Gasen bei Druck-, Temperatur-, und Volumenänderung.

9.1 Kinetische Gastheorie

KINETISCHE GASTHEORIE

Die kinetische Gastheorie beschreibt das Verhalten von (idealen) Gasen auf atomarer Skala. Die makroskopischen Größen wie Druck und Temperatur werden aus den statistischen Eigenschaften der Gasteilchen berechnet.

Stoffmenge

Die Anzahl von Atomen oder Molekülen N wird in der Einheit Mol angegeben. Definitionsgemäß entspricht 1 Mol exakt der Anzahl von Atomen in 12 g des Kohlenstoffisotops ^{12}C . Diese Anzahl an Teilchen wird als **AVOGADRO-Konstante** N_A und gelegentlich falsch als **LOSCHMIDT-Konstante** N_L bezeichnet. Die **atomare Masseneinheit** $1 \text{ u} = 1,660\,54 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ basiert ebenfalls auf dem Kohlenstoffisotop ^{12}C und bezeichnet $\frac{1}{12}$ der Masse eines ^{12}C -Atoms:

$$1 \text{ u} = \frac{12 \text{ g}}{6,022\,136\,7 \cdot 10^{23}} = 1,660\,54 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

AMEDEO AVOGADRO
1776 – 1856
JOSEF LOSCHMIDT
1821 – 1895

STOFFMENGE

Normvolumen
→ Seite 240

AVOGADRO-Konstante: $N_A = 6,022\,136\,7 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

LOSCHMIDT-Konstante: $N_L = N_A/V_n$ mit $V_n = 22,41 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$

atomare Masseneinheit: $1 \text{ u} = 1,660\,54 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Stoffmenge: $v = N/N_A$

Teilchenzahl: $N = v \cdot N_A$ Teilchendichte: $n = N/V$

FORMELBUCHSTABEN

	Thermodynamik	sonst
n	Teilchendichte	Brechungsindex oder Abzählindex
p	Druck	Impuls
Q	Wärmemenge	Ladung

Tab. 9.1: Verschiedene Formelbuchstaben in der Thermodynamik und der sonstigen Physik