

Experimentalphysik

Klausurvorbereitung

Vorlesung	Prof. Dr. Dieter Neher
Experimente	Diplom-Lehrer Lothar Neumann
Semester	Wintersemester 2008/2009
Umfang	4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung
Inhalt	Erhaltungssätze, Newtonsche Mechanik

Inhalt

I Erhaltungssätze	4
I.1 Wechselwirkung und Bewegung (Seite 1)	4
I.1.1 Struktur der Materie (Seite 1)	4
I.1.2 Wechselwirkungen (Seite 1)	4
I.2 Wechselwirkungen übertragen (Seite 2)	4
I.2.1 Bewegung und Geschwindigkeit (Seite 2)	4
I.2.1.1 Bewegung in 1D Seite (2)	5
I.2.1.2 Bewegungen in 2D, 3D (Seite 3)	5
I.2.2 Impuls und Impulsübertrag (Seite 3)	5
I.2.3 Impuls und Kraftstoß (Seite 5)	5
I.2.4 Masse und Gewicht (Seite 7)	7
I.2.5 Impulsstrom und Bewegung (Seite 8)	7
I.3 Partikel und Systeme (Seite 10)	8
I.3.1 Impulserhalt und Gesamtimpuls (Seite 10)	8
I.3.2 Der Massenmittelpunkt (Seite 11)	9
I.3.3 Das Schwerpunktsystem (Seite 12)	9
I.3.4 System unter äußerer Wechselwirkung (Seite 13)	9
I.3.5 Impulserhalt unter Wechselwirkung (Seite 14)	9
I.4 Energie (Seite 15)	9
I.4.1 Stoß in 2D und kinetische Energie (Seite 15)	9
I.4.2 Freier Fall und potenzielle Energie (Seite 16)	9
I.4.3 Potenzielle und kinetische Energie (Seite 18)	9
I.4.4 Die Gravitationswechselwirkung (Seite 18)	9
I.4.5 Die elektromagnetische Wechselwirkung (Seite 19)	9
I.4.6 Energie von Systemen (Seite 19)	9
I.5 Kraft und Arbeit (Seite 20)	9
I.5.1 Kraft und kinetische Energie (Seite 20)	9
I.5.2 Kinetische Energie und mechanische Arbeit (Seite 21)	9
I.5.3 Arbeit und potenzielle Energie (Seite 22)	9
I.5.3.1 Das Newtonsche Kraftgesetz (Seite 23)	9
I.5.4 Kraft und Kraftfeld (Seite 24)	9
I.5.4.1 Konservative Kräfte (Seite 25)	9
I.5.4.2 Felder konservativer Kräfte (Seite 26)	9
I.5.5 Äußere Kräfte und Arbeit (Seite 26)	9
I.5.5.1 Äußere Arbeit und konservative Kraftfelder (Seite 28)	10
I.5.5.2 Äußere Arbeit und Reibung (Seite 28)	10
I.5.6 Das Joulische Wärmeäquivalenz (Seite 29)	10
I.5.7 Innere und äußere Energie (Seite 29)	10

I.5.8 Leistung (Seite 30)	10
I.6 Rotationsenergie (Seite 31)	10
I.6.1 Rotation und Winkelgeschwindigkeit (Seite 31)	10
I.6.2 Der Vektor der Winkelgeschwindigkeit (Seite 32)	10
I.6.3 Trägheitsmoment (Seite 32)	10
I.6.4 Rotation und Translation (Seite 33)	10
I.6.5 Satz von Steiner (Seite 34)	10
I.7 Drehimpuls (Seite 35)	10
I.7.1 Rotation und Drehimpuls (Seite 35)	10
I.7.2 Betrag und Richtung des Drehimpulses (Seite 36)	10
I.7.3 Drehimpuls eines starren symmetrischen Körpers (Seite 37)	10
I.7.4 Drehimpuls eines starren Körpers bei gleichzeitiger Rotation und Translation (Seite 38)	10
I.7.5 Drehimpuls und Drehmoment (Seite 38)	10
I.7.6 Deviationsmomente (Seite 39)	10
I.7.7 Drehung und sogenannte freie Achsen (Seite 41)	10
I.7.8 Kreiselbewegung bei externen Kräften – Präzession (Seite 42)	10
I.7.9 Erhalt des Drehimpulses in isolierten Systemen (Seite 42)	10
I.7.10 Nutation und seltsame Kreisel (Seite 42)	11
I.8 Erhaltungssätze bei Stoßprozessen (Seite 43)	11
I.8.1 Elastische Stöße (Seite 43)	11
I.8.1.1 Stoß in 1D – zentraler Stoß (Seite 43)	11
I.8.1.2 Stoß in n Dimensionen (Seite 43)	11
I.8.2 Inelastischer Stoß (Seite 45)	11
I.8.2.1 Total inelastischer Stoß in 1D (Seite 45)	11
I.8.2.2 Rückstoß bei Kernreaktionen (Seite 46)	11
I.8.2.3 Schiefer inelastischer Stoß (Seite 47)	11
II Newtonsche Mechanik	11

I Erhaltungssätze

I.1 Wechselwirkung und Bewegung (Seite 1)

1. NEWTONSCHES GRUNDGESETZ

Ein Objekt, das mit keinem anderen Objekt wechselwirkt bewegt sich geradlinig gleichförmig mit konstanter Geschwindigkeit.

Wechselwirkung: Eine Wechselwirkung ist eine physikalische Beziehung zwischen zwei Objekten, die bei Abwesenheit anderer Wechselwirkungen deren Bewegung ändert.

I.1.1 Struktur der Materie (Seite 1)

makroskopisches Objekt Moleküle → Atome
 aus Elementarteilchen aufgebaut → Protonen und Neutronen (bestehen aus Quarks), Elektronen
 Einteilung der Elementarteilchen nach Standardmodell

Makroskopische Objekte wechselwirken über die sie aufbauenden Elementarteilchen

I.1.2 Wechselwirkungen (Seite 1)

Es gibt vier elementare Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Auftreten	Reichweite	Maßstab der Kraft
1. Starke Wechselwirkung	zwischen Quarks	$10^{-15} m$	1
2. Schwache (Kern-Wechselwirkung)	zwischen Quarks und Leptonen (z.B. Elektronen)	$10^{-18} m$	10^{-13}
3. Elektromagnetische Wechselwirkung	zwischen geladenen Teilchen	∞	10^{-2}
4. Gravitationswechselwirkung	zwischen massebehafteten Teilchen	∞	10^{-38}

Makroskopische Wechselwirkungen

langreichweitig (kein Kontakt)	Kontakt-Wechselwirkung
<ul style="list-style-type: none"> • Gravitationswechselwirkung • elektrostatische Wechselwirkung • magnetische Wechselwirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • „Reibung“ • „Kompression“ • Spannungs-Wechselwirkung

I.2 Wechselwirkungen übertragen (Seite 2)

I.2.1 Bewegung und Geschwindigkeit (Seite 2)

- Wechselwirkungen können den Betrag der Geschwindigkeit der beteiligten Objekte ändern

- Wechselwirkungen können die Richtung der Bewegungen ändern

⇒ als Maß für Bewegung benutzen wir die physikalische Größe **Geschwindigkeit** \vec{v} als gerichtete Größe

Massenpunkt: nicht verformbar, kein Drehimpuls

1.2.1.1 Bewegung in 1D Seite (2)

ist eine geradlinige Bewegung

Der Massenpunkt ist zu jedem Zeitpunkt t an einem bestimmten Ort x .

Die **Durchschnittsgeschwindigkeit** ist \bar{v} mit $\bar{v}(x) = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, die **Augenblicksgeschwindigkeit** ist

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x}.$$

1.2.1.2 Bewegungen in 2D, 3D (Seite 3)

Bewegungen sind geradlinig oder krummlinig.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}} \text{ mit } \vec{r} \text{ als Ortsvektor.}$$

1.2.2 Impuls und Impulsübertrag (Seite 3)

Der **Impuls** ist eine charakteristische Größe der Bewegung ⇒ wird übertragen bei Wechselwirkung

Impuls eines Objektes: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

Schlussfolgerungen

Jede Wechselwirkung zwischen Objekten verändert ihren Bewegungszustand durch den Übertrag von Impuls. Das gilt sowohl für langreichweitige Wechselwirkungen als auch für Kontakt-Wechselwirkungen.

Impuls wird weder zusätzlich erzeugt noch vernichtet.

IMPULSERHALT

Bei einer Wechselwirkung zwischen Objekten bleibt der Gesamtimpuls all dieser erhalten.

TRÄGHEITSPRINZIP (1. NEWTONSCHES GESETZ)

Ohne Wechselwirkung ist der Impuls in Betrag und Richtung erhalten, das Objekt bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit.

1.2.3 Impuls und Kraftstoß (Seite 5)

Mit \vec{p} bezeichnet man den **momentanen Impuls** eines Objektes.

Ein **Kraftstoß** ist der bei einer Wechselwirkung übertragene Impuls $[d\vec{p}]$

Bei mehreren Wechselwirkungen gilt $\vec{p} + d\vec{p} = \vec{p} + [d\vec{p}_1] + \dots + [d\vec{p}_n]$

MASS FÜR STÄRKE EINE WECHSELWIRKUNG

Kraft auf ein Objekt ist gleich dem pro Zeiteinheit auf das Objekt übertragene Impuls.

Kraft ist gleich dem Impulsstrom.

2. NEWTONSCHES GESETZ

Die resultierende Kraft \vec{F}_{res} durch Wechselwirkung A ist $\vec{F}_{res} = \frac{[d\vec{p}]_A}{dt}$

dt bezeichnet ein kurzes Zeitintervall und $[d\vec{p}]_A$ den innerhalb von dt durch die Wechselwirkung A übertragenen Impuls.

Beispiel.

Bewege sich Objekt 1 der Masse m mit der Geschwindigkeit \vec{v}_0 und wechselwirke mit dem Objekt 2 (Masse m , Geschwindigkeit $-\vec{v}_0$). Dann gilt für die Änderung des Impulses von **Objekt 1**:

$$d\vec{p}_1 = [d\vec{p}_1]_2 = -2m\vec{v}_0$$

Objekt 2:

$$d\vec{p}_2 = [d\vec{p}_2]_1 = 2m\vec{v}_0$$

Kraft auf Objekt 1 während Stoß:

$$\vec{F}_1 = \frac{[d\vec{p}_1]_2}{dt} = \frac{-[d\vec{p}_2]_1}{dt} = -\vec{F}_2$$

Daraus folgt:

DAS 3. NEWTONSCHE GESETZ

„actio = reactio“.

Es ist nicht möglich, dass während einer Wechselwirkung eine Kraft auf ein Objekt wirkt, ohne dass die Gegenkraft auf das andere wirkt.

Betrachte man eine Vielzahl von Wechselwirkungen während eines dt .

$$[d\vec{p}]_1 \Rightarrow \text{Kraft } \vec{F}_1 = \frac{[d\vec{p}]_1}{dt} \Leftrightarrow [d\vec{p}]_1 = \vec{F}_1(t_1)dt$$

Gesamter Impulsübertrag

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_e(t_e) - \vec{p}_a(t_a) = \sum_1^n [d\vec{p}]_n = \sum_1^n \vec{F}(t_n)dt$$

Der gesamte Impulsübertrag ist gleich der Änderung des Impulses. Allgemein:

$$\Delta \vec{p} = \sum_{t_a}^{t_e} \vec{F}(t)dt$$

Experiment: Kraftstoß mit gespannter Feder

vor Kraftstoß $p_e = 0$

$$p_e = p_a + \sum_{t_a}^{t_e} F(t) dt = m \cdot v_e$$

Masse bestimmen:
$$m = \frac{\sum_{t_a}^{t_e} F(t) dt}{v_e}$$

1.2.4 Masse und Gewicht (Seite 7)

Experiment: Fallende Kugel auf Erde

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_e - \vec{v}_a = \frac{\sum_{t_a}^{t_e} \vec{F}_s(t) dt}{m_t} \quad \text{wobei } \vec{F}_s \text{ die } \textit{Schwerkraft} \text{ und } m_t \text{ die } \textit{träge Masse} \text{ (Widerstand gegen}$$

Änderung des Bewegungszustandes) sind.

Gewicht eines Körpers im Schwerfeld der Erde

$\vec{F}_s = \vec{G} = m_s \cdot \vec{g}$ mit der *schweren Masse* m_s (bestimmt Gewicht unabhängig vom Bewegungszustand)

$$\begin{aligned} \vec{v}_e &= \vec{v}_a + \frac{\sum_{t_a}^{t_e} \vec{F}_s(t) dt}{m_t} \\ &= 0 + \frac{\sum_{t_a}^{t_e} m_s \vec{g} dt}{m_t} \\ &= \frac{m_s}{m_t} \sum_{t_a}^{t_e} \vec{g} dt \end{aligned}$$

Daraus folgt: Träge Masse = Schwere Masse.

Bei 3D gilt: $\Delta \vec{p} = \sum_{t_a}^{t_e} \vec{F}(t) dt \rightarrow \Delta \vec{p}_x = \sum_{t_a}^{t_e} F_x(t) dt$ Die Kraft in x-Richtung ändert nur die x-Komponente des Impulses.

1.2.5 Impulsstrom und Bewegung (Seite 8)

Raketengleichung

In der Rakete ist die Geschwindigkeit des Gases gleich Null. Nach Ausstoß dann \vec{u} .

Impulsübertrag auf Gaspakete $[d \vec{p}_m] = dm \vec{u}$ (pro Zeitintervall dt ein Gaspaket).

→ Impulsübertrag auf Rakete

$[d \vec{p}_R] = -[d \vec{u}] = -dm \vec{u} = M(t) \cdot d \vec{v}(t)$ (Zunahme der Geschwindigkeit der Rakete zum Zeitpunkt t , wobei $\vec{u} \downarrow \vec{v} \uparrow$)

$$\Rightarrow +M(t)d\vec{v}(t) = +dm\vec{u} \Leftrightarrow dM = -dm \quad (\text{Änderung der Raketenmasse pro } dt)$$

$$M(t)dv(t) = -dM u$$

$$dv(t) = -u \frac{dM}{M}(t)$$

$$\int_{v_a}^{v_e} dv = -u \int_{M_a}^{M_e} \frac{1}{M} dM$$

$$v_e - v_a = -u \ln\left(\frac{M_e}{M_a}\right)$$

$$v_e - v_a = \underbrace{u \ln\left(\frac{M_a}{M_e}\right)}_{>0}$$

Beispiel.

$$\underbrace{\frac{M_a}{M_e}}_{\text{Nutzlast}} = 10, \quad u = 2 \frac{km}{s}, \quad v_a = 0, \quad v_e = 4,6 \frac{km}{s} = 16500 \frac{km}{h}$$

I.3 Partikel und Systeme (Seite 10)

System: Ensemble wechselwirkender Objekte (Teilchen) mit definierter Ausdehnung. Es existiert die Abgrenzung innen/außen.

Objekt: materielles System mit klar definierter Oberfläche

- **isolierte (abgeschlossene) Systeme**
keine Austausch von Materie
keine äußere Wechselwirkung
- **geschlossene Systeme**
kein Austausch von Materie
äußere Wechselwirkung vorhanden
- **offene Systeme**
Austausch von Materie
äußere Wechselwirkung

Wechselwirkungen (Kräfte)

Innere (interne)	Äußere (externe)
zwischen Partikeln des Systems	zwischen einem Partikel des Systems und Außen

I.3.1 Impulserhalt und Gesamtimpuls (Seite 10)

System von N Partikeln und dem **Gesamtimpuls** \vec{p}_{tot} :

$$\vec{p}_{tot} = \sum_{n=1}^N \vec{p}_n$$

Der Gesamtimpuls in isolierten System ist erhalten.

$$\vec{p}_{tot} = \text{const.}$$

1.3.2 Der Massenmittelpunkt (Seite 11)

Problem: Wo ist das System? Wie bewegt es sich?

Für den Gesamtimpuls gilt:

$$\vec{p}_{tot} = \sum_{n=1}^N \vec{p}_n = \sum_{n=1}^N m_n \vec{v}_n \quad \text{Impuls des Gesamtsystems der Gesamtmasse } M = \sum_{n=1}^N m_n. \text{ Also:}$$

$$\vec{p}_{tot} = M \vec{v}_{tot}$$

Hierbei ist \vec{v}_{tot} die Geschwindigkeit eines **virtuelles Teilchens** der Masse M , das den Gesamtimpuls des Systems hat.

Wo ist das Objekt zum Zeitpunkt t : $r_{CM}^{\vec{}}$. **Massenmittelpunkt** („center of mass“)

$$\begin{aligned} r_{CM}^{\vec{}} = v_{CM}^{\vec{}}(t) &= \frac{d r_{CM}^{\vec{}}(t)}{dt} = \frac{1}{M} \vec{p}_{tot} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^N m_n \vec{v}_n(t) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^N m_n \frac{d \vec{r}_n(t)}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left[\underbrace{\sum_{n=1}^N m_n \vec{r}_n(t)}_{r_{CM}^{\vec{}}(t)} \right] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow r_{CM}^{\vec{}} = \frac{\sum_{n=1}^N m_n \vec{r}_n(t)}{M} \quad r_{CM}^{\vec{}} \text{ ist der } \mathbf{massegerichtete Mittelwert der Ortsvektoren.}$$

$$v_{CM}^{\vec{}} = \frac{\sum_{n=1}^N m_n \vec{v}_n(t)}{M} \quad v_{CM}^{\vec{}} \text{ ist der } \mathbf{massegerichtete Mittelwert der Geschwindigkeiten.}$$

Beispiel.

System aus zwei Objekten.

$$r_{CM}^{\vec{}} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}; \quad \text{Gesamtimpulse: } \vec{p}_{tot} = \vec{p}_{CM} = M v_{CM}^{\vec{}}.$$

1. NEWTONSCHES GESETZ

Der Massenmittelpunkt eines isolierten Systems bewegt sich geradlinig gleichförmig.

$$\vec{p}_{tot} = \vec{p}_{CM} = const.$$

$$\vec{v}_{CM} = const.$$

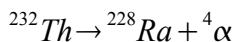
I.3.3 Das Schwerpunktsystem (Seite 12)

→ Koordinatensystem

Isoliertes System (CM geradlinig gleichförmig) von CM aus beobachtet:

$\vec{p}_{tot} = 0$ **Der Gesamtimpuls aller Objekte des Systems ist Null.**

Beispiel Kernzerfälle.



Es gilt dann: $228 \vec{v}_{Ra} = -4 \vec{v}_{\alpha}$

Wichtige Bemerkung:

Bewegungsprozesse, die vom Massenmittelpunkt aus in einem isolierten System betrachtet werden folgen der Newtonschen Mechanik.

$$m_n \cdot \frac{d\vec{v}_n}{dt} = \frac{d\vec{p}_n}{dt} = \vec{F}_n \quad \text{falls } \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{p} = const. .$$

Dies gilt auch für alle Beobachtungssysteme, die sich geradlinig gleichförmig im Raum bewegen

→ Inertialsysteme

In allen Inertialsystemen gilt die Newtonsche Mechanik (falls $\forall v: v \ll c$), alle Inertialsysteme sind gleichwertig.

I.3.4 System unter äußerer Wechselwirkung (Seite 13)

Änderung des Gesamtimpuls des Systems A durch Wechselwirkung mit System B:

$$\sum_n \left[\sum_e [d\vec{p}_n]_e + \sum [d\vec{p}_n]_m \right]$$

$$= \underbrace{\sum_n \sum_e [d\vec{p}_n]_m}_{\text{Impulsübertrag innerhalb A ist Null wg. action gleich reactio}} + \underbrace{\sum_n \sum_m [d\vec{p}_n]_m}_{\text{Impulsübertrag auf alle Atome in A von außen}}$$

$$d\vec{p}_n = \sum_{\substack{n \\ \text{in A}}} \sum_{\substack{m \\ \text{in B}}} [d\vec{p}_n]_m \quad \text{wobei } [d\vec{p}_n]_m = \vec{F}_{n, ext.} \cdot dt .$$

$$d\vec{p}_n = \sum_n \sum_m \vec{F}_{n, ext.} \cdot dt$$

$$\frac{d\vec{p}_n}{dt} = \vec{F}_{n, ext.}$$

$M_A \cdot \frac{d\vec{v}_{CM}}{dt} = \vec{F}_{A, ext.}$ Schwerpunkt bewegt sich so, als wäre er allein unter Wechselwirkung mit der Gesamtkraft.

Die Bewegung des Massenmittelpunkts eines beliebigen Systems wird allein durch die Summe der am System angreifenden externen Kräfte bestimmt, egal wo die Kräfte angreifen.

Das bedeutet nicht, dass das System sich so bewegt, als würden alle Kräfte am Massenmittelpunkt angreifen.

Nur die Bewegung des Massenmittelpunktes ist dadurch bestimmt, nicht die Bewegung des Gesamtsystems.

I.3.5 Impulserhalt unter Wechselwirkung (Seite 14)

Beispiel Flugzeug.

Es findet ein Impulsübertrag nach unten statt (Gravitation)

Die Flügel übertragen Impuls auf Luft nach unten. Wegen **actio = reactio** findet ein Impulsübertrag auf Flügel nach oben statt.

I.4 Energie (Seite 15)

Stoß in 1D

Wegen Impulserhalt: $m \vec{v}_0 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$ und $\vec{v}_0 = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$

I.4.1 Stoß in 2D und kinetische Energie (Seite 15)

\vec{v}_1 , \vec{v}_2 unbekannt, vier Unbekannte.

Impulserhalt: $\vec{v}_0 = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$, zwei bestimmende Gleichungen (gilt bei gleichen Massen)

$m_1 \vec{v}_{1_a} + m_2 \vec{v}_{2_a} = m_1 \vec{v}_{1_e} + m_2 \vec{v}_{2_e}$ **Impulserhalt**

$\frac{1}{2} m_1 \vec{v}_{1_a} + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_{2_a} = \frac{1}{2} m_1 \vec{v}_{1_e} + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_{2_e}$ **Experimentell**

$K = \frac{1}{2} m v^2$ **Kinetische Energie** eines Objekts der Masse m , das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt.

$\Rightarrow K_{1_a} + K_{2_a} = K_{1_e} + K_{2_e}$ Die Summe der kinetischen Energien ist konstant.

Bei einem elastischen Stoß ist die kinetische Energie erhalten.

I.4.2 Freier Fall und potenzielle Energie (Seite 16)

Experiment.

Fall von Höhe h_1 auf h_2 . Für die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} gilt

$$\bar{v} \sim \sqrt{\Delta h} \Rightarrow \bar{v}^2 \sim \Delta h.$$

Impulsänderung bei freiem Fall

$$\vec{F} = m \vec{g}.$$

Für ein kurzes Zeitintervall dt nach Zeitpunkt t folgt die Impulsänderung:

$$\begin{aligned} d\vec{p}(t) &= \underbrace{\vec{p}(dt+t) - \vec{p}(t)}_{m\vec{v}(dt+t) - m\vec{v}(t)} = \vec{F} dt = m \vec{g} dt \\ &= m(\vec{v}(dt+t) - \vec{v}(t)) && \text{wobei } m = \text{const.} \\ &\Rightarrow m d\vec{v}(t) = m \vec{g} dt \end{aligned}$$

Im Zeitintervall dt ändert sich die Höhe um $d h(t) = -v(t) dt$

$$\begin{aligned} m dv &= mg dt \quad | \cdot v \\ m v dv &= mg v dt \\ m v dv &= -mg dh \end{aligned}$$

$$\int_{v_1}^{v_2} m v dv = - \int_{h_1}^{h_2} m g dh$$

$$\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = -m g h_2 + m g h_1$$

$$\frac{1}{2} m v_2^2 + m g h_2 = \frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1$$

$V = m \cdot g \cdot h$ **potenzielle Energie** eines Objektes der Masse m in einer Höhe h über N.N.

I.4.3 Potenzielle und kinetische Energie (Seite 18)

Mit $K = \frac{1}{2} m v^2$ und $V = m g h$ gilt für einen Vorgang:

$$\Delta K + \Delta V = 0$$

Die Änderung der Summe aus kinetischer und potenzieller Energie ist gleich Null.

I.4.4 Die Gravitationswechselwirkung (Seite 18)

Die potenzielle Energie der Gravitationswechselwirkung ist

$V(\vec{r}_{12}) = -G \cdot \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}_{12}|}$ und damit **unabhängig von der Geschwindigkeit der Objekte**.

G ist die **Gravitationskonstante** (universell).

$m_1 > 0$, $m_2 > 0$, $V(\vec{r}_{12}) \leq 0$.

Festlegung: $V(\vec{r}_{12} \rightarrow \infty) \rightarrow 0$.

1.4.5 Die elektromagnetische Wechselwirkung (Seite 19)

$V(\vec{r}_{12}) = K \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|}$ **Potenzielle Energie**, wobei gilt:

$V(\vec{r}_{12} \rightarrow \infty) \rightarrow 0$.

Die Ladung q in Coulomb: $[q] = 1 C = 1 As$

Hierbei ist K die **Coulomb-Konstante**, $K = 8,99 \cdot 10^9 \frac{Jm}{C}$.

$q_1 \cdot q_2 > 0$ $V(\vec{r}_{12}) \geq 0$ potenzielle Energie (**Abstoßung**) steigt mit sinkendem Abstand

$q_1 \cdot q_2 < 0$ $V(\vec{r}_{12}) < 0$ potenzielle Energie (**Anziehung**) sinkt mit sinkendem Abstand

1.4.6 Energie von Systemen (Seite 19)

Z.B. Atomkerne, Atome, ..., Galaxien

Gedankenexperiment.

Baue System aus Objekten auf, die sich ursprünglich in großem Abstand befanden.

vorher: $V = K = 0$, die Gesamtenergie ist also Null.

danach: $V < 0$, $K > 0$, die Gesamtenergie ist kleiner Null.

Ein System ist gebunden, falls die Gesamtenergie kleiner als Null ist.

Die potenzielle Energie muss aufgrund aller inneren Wechselwirkungen kleiner Null und vom Betrag her als die Summe der kinetischen Energien der das System aufbauenden Objekte sein.

Für kleine Systeme gilt die **Heisenbergsche Unschärferelation**.

$\Delta p \cdot \Delta x \geq h$ mit h als **Plancksches Wirkungsquantum**.

Kinetische Energie: $\bar{K} = \frac{\overline{p^2}}{m} = \frac{1}{2} \frac{1}{m} \frac{h^2}{(\Delta x)^2} > 0$

Die **Bindungskräfte** müssen so groß sein, dass sie diese Nullpunktbewegung **überkompensieren**, die Quantenmechanik verbietet die Ruhe dieser Objekte.

Auch Festkörper werden durch elektromagnetische Wechselwirkungen zusammengehalten (Lennard-Jones-Potential).

I.5 Kraft und Arbeit (Seite 20)

I.5.1 Kraft und kinetische Energie (Seite 20)

Änderung des Impulses durch Kosinussatz ermitteln.

$$[p(t+dt)]^2 = [p(t)]^2 + \underbrace{(dp(t))^2}_{\text{sehr klein}} - 2p(t)dp(t)\cos(180^\circ - \theta)$$

Änderung der kinetischen Energie

$$dK(t) = \frac{1}{2}(v^2(t+dt) \cdot v(t)) = \frac{1}{2} \frac{p^2(t+dt) - p^2(t)}{m}$$

$$dK(t) = \frac{p(t)}{m} dp(t) \cos \theta = v(t) dp(t) \cos \theta = \vec{v}(t) d\vec{p}(t) \quad (\text{Skalarprodukt})$$

Die Änderung der kinetischen Energie ist gleich der Geschwindigkeit skalar multipliziert mit der Änderung des Impulses aufgrund einer Wechselwirkung.

$$dK(t) = \vec{v}(t) \vec{F}(t) dt = \vec{v}(t) dt \vec{F}(t) \quad \text{Daraus folgt:}$$

$$dK(t) = d\vec{r} \vec{F}(t)$$

$d\vec{r}$ Verschiebung des Objektes im Zeitintervall dt

Das Gesetz gilt immer, egal woher \vec{F} kommt.

- I.5.2 Kinetische Energie und mechanische Arbeit (Seite 21)**
- I.5.3 Arbeit und potenzielle Energie (Seite 22)**
 - I.5.3.1 Das Newtonsche Kraftgesetz (Seite 23)**
- I.5.4 Kraft und Kraftfeld (Seite 24)**
 - I.5.4.1 Konservative Kräfte (Seite 25)**
 - I.5.4.2 Felder konservativer Kräfte (Seite 26)**
- I.5.5 Äußere Kräfte und Arbeit (Seite 26)**
 - I.5.5.1 Äußere Arbeit und konservative Kraftfelder (Seite 28)**
 - I.5.5.2 Äußere Arbeit und Reibung (Seite 28)**
- I.5.6 Das Joulsche Wärmeäquivalenz (Seite 29)**
- I.5.7 Innere und äußere Energie (Seite 29)**
- I.5.8 Leistung (Seite 30)**
- I.6 Rotationsenergie (Seite 31)**
 - I.6.1 Rotation und Winkelgeschwindigkeit (Seite 31)**
 - I.6.2 Der Vektor der Winkelgeschwindigkeit (Seite 32)**
 - I.6.3 Trägheitsmoment (Seite 32)**
 - I.6.4 Rotation und Translation (Seite 33)**
 - I.6.5 Satz von Steiner (Seite 34)**
- I.7 Drehimpuls (Seite 35)**
 - I.7.1 Rotation und Drehimpuls (Seite 35)**
 - I.7.2 Betrag und Richtung des Drehimpulses (Seite 36)**

- I.7.3 Drehimpuls eines starren symmetrischen Körpers (Seite 37)**
- I.7.4 Drehimpuls eines starren Körpers bei gleichzeitiger Rotation und Translation (Seite 38)**
- I.7.5 Drehimpuls und Drehmoment (Seite 38)**
- I.7.6 Deviationsmomente (Seite 39)**
- I.7.7 Drehung und sogenannte freie Achsen (Seite 41)**
- I.7.8 Kreiselbewegung bei externen Kräften – Präzession (Seite 42)**
- I.7.9 Erhalt des Drehimpulses in isolierten Systemen (Seite 42)**
- I.7.10 Nutation und seltsame Kreisel (Seite 42)**
- I.8 Erhaltungssätze bei Stoßprozessen (Seite 43)**
 - I.8.1 Elastische Stöße (Seite 43)**
 - I.8.1.1 Stoß in 1D – zentraler Stoß (Seite 43)**
 - I.8.1.2 Stoß in n Dimensionen (Seite 43)**
 - I.8.2 Inelastischer Stoß (Seite 45)**
 - I.8.2.1 Total inelastischer Stoß in 1D (Seite 45)**
 - I.8.2.2 Rückstoß bei Kernreaktionen (Seite 46)**
 - I.8.2.3 Schiefer inelastischer Stoß (Seite 47)**

II Newtonsche Mechanik