Formelzettel aus meinem Physikstudium

Dr. Arne Babenhauserheide

<2020-05-10 So>

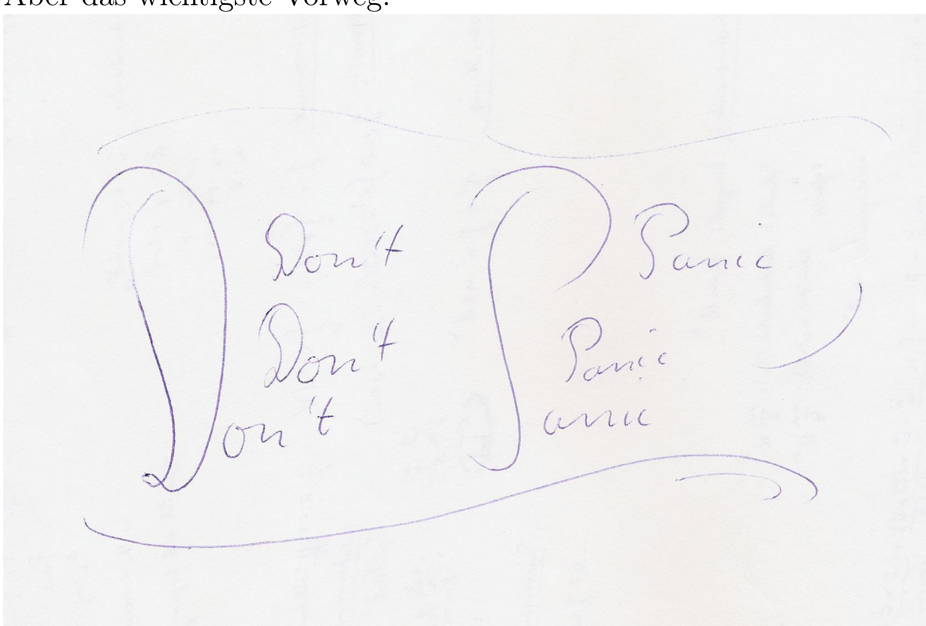
In vielen unserer Physik-Prüfungen durften wir Formelzettel verwenden — Spickzettel, maximal eine DinA4-Seite, doppelseitig in Handschrift.

Das hatte zwei Vorteile:

- Die Klausur war kein reines Abfragen von Auswendiggelerntem, das hätten wir schließlich einfach vom Formelzettel abschreiben können.
- Wir haben uns alle vorher überlegt, welche Formeln wichtig werden, und sie dann alle nochmal geschrieben.

Ich habe vor einiger Zeit viele meiner Formelzettel wiedergefunden und eingescannt und möchte sie weitergeben.

Aber das wichtigste Vorweg:

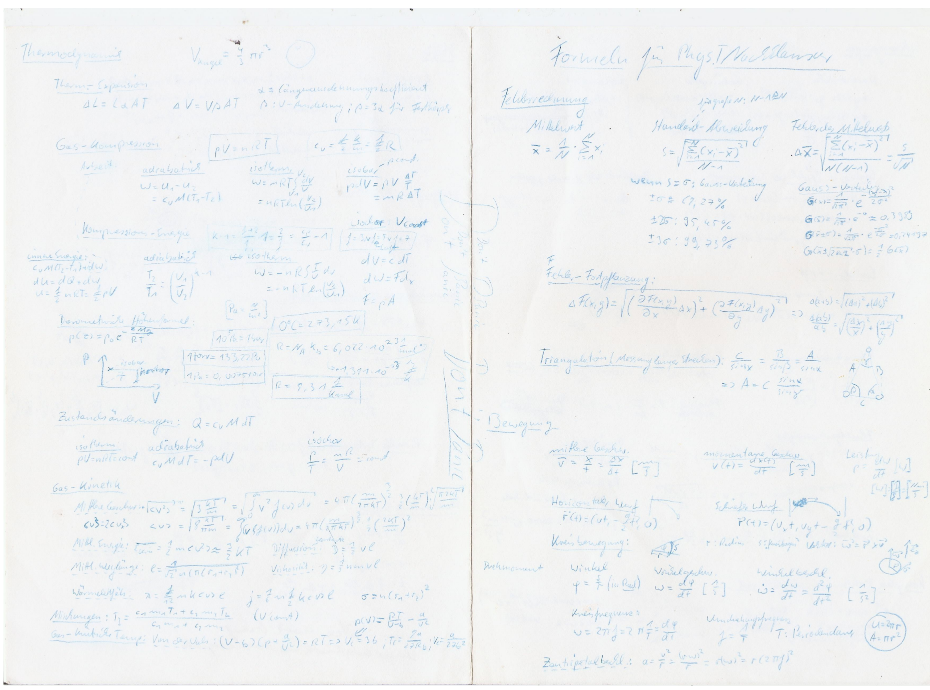


Das war auf jedem meiner Formelzettel irgendwo $\ddot\smile$

Als Warnung: Die Zettel habe ich für mich selbst geschrieben. Entsprechend ist die Schrift klein und v.a. für mich lesbar. Ich hoffe, sie bringen Dir trotzdem etwas.

Jetzt, ohne weitere Vorrede, die Formelzettel. Für die große Version, klick einfach auf das jeweilige Bild.

Experimentalphysik (1, 3-6)



Schwingungen

Harmonische

- $y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$
- $y(t) = y_0 \sin(2\pi f t + \varphi)$
- $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$

Gedämpfte

- $x(t) = x_0 \cos(\omega_D t + \varphi)$
- $\omega_D^2 = (\omega_0^2 - \delta^2)$
- $\hat{x}(t) = \hat{x}(0) \cdot e^{-\delta t}$

Erzwungene

- Maximalamplitude $A(\omega) = \frac{a_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2) + 4\delta^2\omega^2}}$

Geschw. u. Beschl. bei Schwingungen

$y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi)$

$v(t) = y_0 \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \dot{y}(t)$

$a(t) = -y_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = \ddot{y}(t)$

Amplitude bei v u, ω gegeben

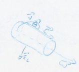
$a_{max} = \omega^2 z_0$ z_0 = Schwingamplit.

$z_0 = \frac{a_{max}}{\omega^2}$

Coriolis-Kraft

$F_c = 2mv \cdot \omega \sin\Theta$

$\vec{F}_c = 2m\omega(\vec{v} \times \vec{e}_{Achse}) = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$



Planetenbewegung

$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3$

Raketengleichung

$dv = -v_0 \frac{dm}{m(t)} \Rightarrow v(t) = \int_{m_0}^{m(t)} dv = v_u \ln\frac{m_0}{m}$

Flugzeug als Rakete: $F = \frac{m}{\Delta t} \cdot (v_2 - v_1)$

Fluchtgeschwindigkeit

$V(r) = -\gamma \cdot \frac{mM}{r}$ (γ: Grav.-konst) $F(r) = -\gamma \cdot \frac{mM}{r^2}$

$V(\infty) - V(r) = E_{kin} \Rightarrow v = \frac{\sqrt{2\gamma M}}{R}$

Gravitation

$E_{pot}(r) = \frac{g\, m}{2R_0} r^2$

R_0: Radius der Erde

E_{pot}: pot. Energie in d. Erde

$\gamma = 6{,}6742 \pm 0{,}0010 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg\, s^2}$

Federkraft: $F = -Ds \; \left[\frac{N}{m} \cdot m\right] = \left[\frac{kg}{s^2} \cdot m\right]$

Komplexe Zahlen aka Eulersche Formel

$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i \sin\alpha$

$z = x + iy = r e^{i\alpha}$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\tan\alpha = \frac{y}{x}$

$\cos\alpha = \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2}$

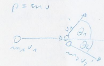
$\sin\alpha = \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2} \Rightarrow 2\cos\alpha \sin\alpha = \sin(2\alpha)$

$2\cos\alpha \sin\alpha = 2\left(\frac{1}{4} e^{2i\alpha} - e^{-2i\alpha}\right)$

Stöße

$E_{kin} = W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$

$p = mv$



x-Achse: $m_1 v_1 = m_1 v_1' \cos\Theta_1 + m_2 v_2' \cos\Theta_2$

y-Achse: $0 = -m_1 v_1' \sin\Theta_1 + m_2 v_2' \sin\Theta_2$

nur elastisch: $\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$

elastisch: $E_1 + E_2 = E_1' + E_2'$

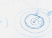
inelastisch: $E_1 + E_2 \neq E_1' + E_2'$ $\Big\} \; p_1 + p_2 = p_1' + p_2'$

Bewegung im Kreispotential

$V(\vec{r}) = V(r)$

$\vec{F}(\vec{r}) = \underbrace{\frac{-d}{dr}\left(V(r)\frac{\vec{r}}{r}\right)}_{F_r(r)}$

$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi)$



Schraubenbahnen:

$\vec{x} = a \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ k\varphi \end{pmatrix}$ $\frac{dx}{d\varphi} = a \cdot \begin{pmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\varphi \\ k \end{pmatrix}$

Kurvenintegrale (Arbeit im Kraftfeld)

$W_{a,b}(\vec{r}) = \int \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} = \int F_x(r)\,dx + \int F_y(r)\,dy + \int F_z(r)\,dz = \int_{t_a}^{t_b} F(\vec{r}(t)) \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} dt$

$\frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt}, \frac{dz(t)}{dt}\right)$

$\vec{F}(x,y,z) = (\overset{F_x}{\alpha}, \overset{F_y}{\beta}, \overset{F_z}{\gamma})$

$|\vec{F}| = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2}$

$\int_a^b (F) ds = [Fs]_a^b$

Vorgehensw.: $F_x = \alpha$, $F_y = \beta$, $F_z = \gamma$ aufschreiben vor dem rechnen

$C_1: \vec{r}(t) = (a, b, c)$

$C_2: \vec{r}(t) = (a', b', c')$

$W_{a,b} = [F_x s]_a^b + [F_y s]_a^b \cdot [F_z s]_a^b$

Partielle Integration: $\int (f(x)\, G(x))\,dx = F(x)\,G(x) - \int F(x)\, g(x)\,dx$

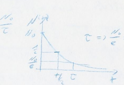
$F'(x) = f(x)$, $G'(x) = g(x)$

Radioaktiver Zerfall

$\frac{d}{dt}(N(t))_{t=0} = \left(-N_0 \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = -\frac{N_0}{\tau}$

$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

$t = \frac{1}{\lambda} \ln\frac{N_0}{N(t)} = \tau \ln\frac{N_0}{N(t)}$



$\tau \Rightarrow \frac{N_0}{e} = N(t)$

Gauss-Sätze noch drauf

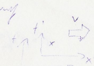
Kugelkoordinaten → Massenintegral

Don't
Don't
Don't
Panic
Panic
Panic

exPhys III Formeln / 1. Klausur Entwurf

-8.12.05-

Lorentz-Transformation



$x' = \gamma(x - vt)$ $x = \gamma(x' + vt)$

$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$ $t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)$

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

$\beta = \frac{v}{c}$

Geschwindigkeits-Addition

Photon: Richtungsänderung $\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} = \sqrt{u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2} \Rightarrow |u| = |u'| = c$

$u_x = \frac{u_x' + u}{\left(1 + \frac{u_x' u}{c^2}\right)}$

$u_y = \frac{u_y'}{\gamma\left(1 + \frac{u_x' u}{c^2}\right)}$

$u_z = \frac{u_z'}{\gamma\left(1 + \frac{u_x' u}{c^2}\right)}$

$w = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}$

Boltzmann-Konstante: $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8}$

h =

k =

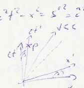
$1\,eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,J$

kT bei $T = 20° = \frac{1}{40} eV$

$\bar{E} \approx \frac{3}{2} kT$

Invariantes Zeitintervall

$s^2 = c^2t^2 - x^2 = s'^2 = c^2t'^2 - x'^2$



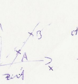
$P(x', ct') = (0,1) \Rightarrow (x, ct) = \left(\gamma \cdot \frac{v}{c}, \gamma\right)$

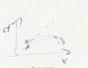
$P(x', ct') = (1,0) \Rightarrow (x, ct) = \left(\gamma, \gamma \frac{v}{c}\right)$

Abstand vom Ursprung: $\left|\vec{P}\left(\frac{\gamma u}{c}, \gamma\right)\right| = \sqrt{\left(\frac{\gamma u}{c}\right)^2 + (\gamma)^2} = \frac{\sqrt{1+\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}$

Raumartig od. zeitartig?

$s^2 = c^2t^2 - x^2 = c^2(t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 \gtrless 0$

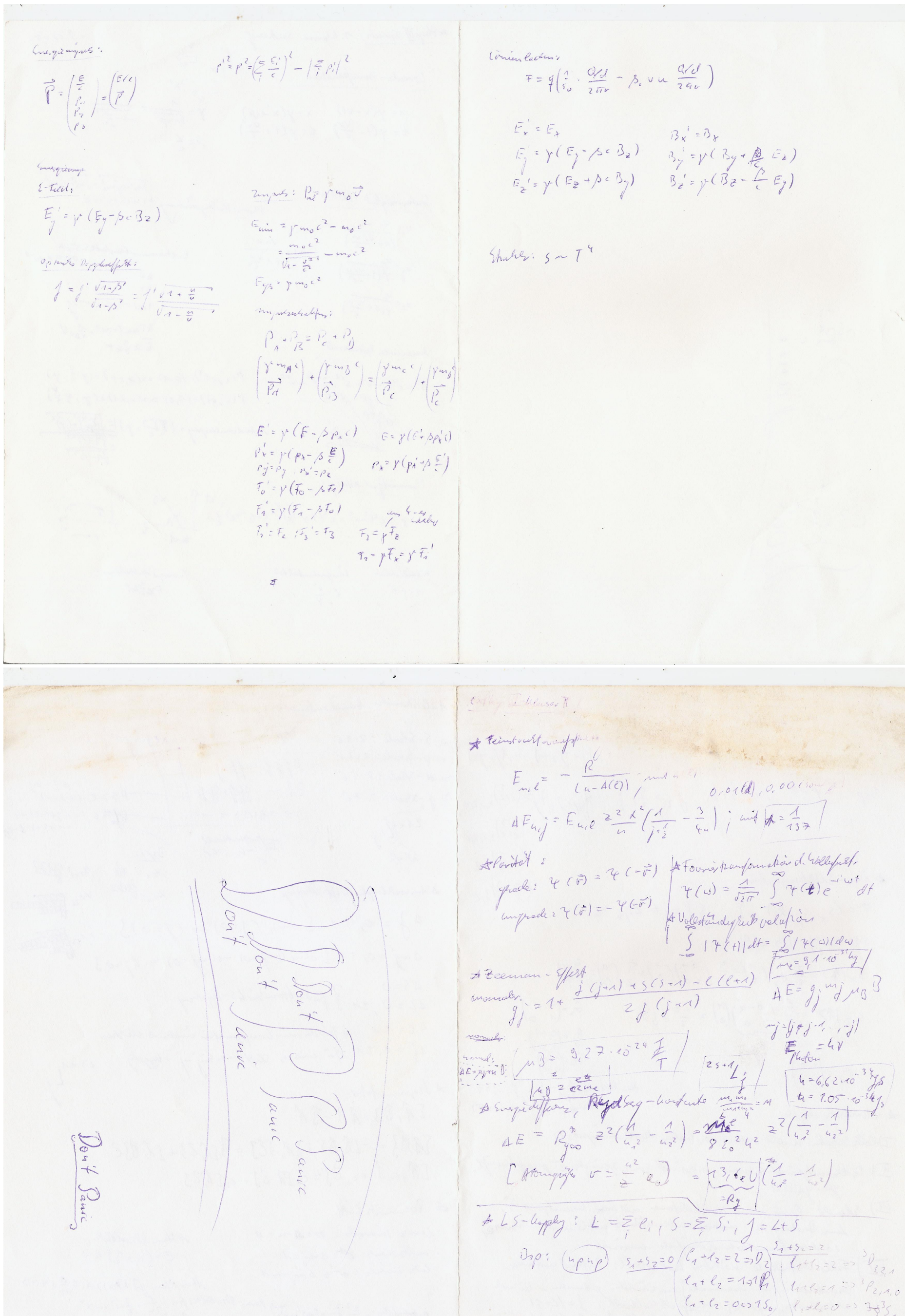




Zeitdillatation: $t = \gamma t'$

Längenkontraktion: $l = \frac{x'}{\gamma}$

Energie der Strahlung: $E \approx \frac{3}{2} kT$



Energieimpuls:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

$$p'^2 = p^2 = \left(\sum_i \frac{E_i}{c}\right)^2 - \left|\sum_i p_i\right|^2$$

Energieumf.

E-Feld:

$$E_y' = \gamma (E_y - \beta c B_z)$$

Optischer Dopplereffekt:

$$f = f' \frac{\sqrt{1+\beta}}{\sqrt{1-\beta}} = f' \frac{\sqrt{1+\frac{v}{c}}}{\sqrt{1-\frac{v}{c}}}$$

Impuls: $P_{rel} = \gamma m_0 \vec{v}$

$$E_{kin} = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

$$E_{ges} = \gamma m_0 c^2$$

Impulserhaltung:

$$P_A + P_B = P_C + P_D$$

$$\begin{pmatrix} \gamma m_A c \\ \vec{P_A} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma m_B c \\ \vec{P_B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma m_C c \\ \vec{P_C} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma m_D c \\ \vec{P_D} \end{pmatrix}$$

$$E' = \gamma (E - \beta p_x c) \qquad E = \gamma (E' + \beta p_x' c)$$

$$p_x' = \gamma \left(p_x - \beta \frac{E}{c}\right) \qquad p_x = \gamma \left(p_x' + \beta \frac{E'}{c}\right)$$

$$p_y' = p_y \quad p_z' = p_z$$

$$F_0' = \gamma (F_0 - \beta F_1)$$

$$F_1' = \gamma (F_1 - \beta F_0)$$

$$F_2' = F_2 \;; F_3' = F_3 \qquad F_3 = \gamma F_z$$

$$F_1 = \gamma F_x = \gamma F_1'$$

Linienladung:

$$F = q\left(\frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{Q/l}{2\pi r} - \mu_0 v u \frac{Q/l}{2\pi r}\right)$$

$$E_x' = E_x \qquad B_x' = B_x$$

$$E_y' = \gamma (E_y - \beta c B_z) \qquad B_y' = \gamma \left(B_y + \frac{\beta}{c} E_z\right)$$

$$E_z' = \gamma (E_z + \beta c B_y) \qquad B_z' = \gamma \left(B_z - \frac{\beta}{c} E_y\right)$$

Stefan: $S \sim T^4$

Don't Panic

Don't Panic

Don't Panic

Don't Panic

★ Feinstrukturaufspaltung

$$E_{n,l} = -\frac{R}{(n - A(l))}$$

0,01(d), 0,00(s...)

$$\Delta E_{n,j} = E_{n,l} \frac{z^2 \alpha^2}{n} \left(\frac{1}{j+\frac{1}{2}} - \frac{3}{4n}\right) \; ; \text{ mit } \boxed{\alpha = \frac{1}{137}}$$

★ Parität:

gerade: $\Psi(\vec{r}) = \Psi(-\vec{r})$

ungerade: $\Psi(\vec{r}) = -\Psi(-\vec{r})$

★ Fouriertransformation d. Wellenfkt.

$$\Psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) e^{-i\omega t} dt$$

★ Vollständigkeitsrelation

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)| dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\omega)| d\omega$$

$$\boxed{m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}$$

★ Zeeman-Effekt

anomaler:

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$$

$$\Delta E = g_j m_j \mu_B B$$

$$m_j = j, j-1, \ldots, -j$$

$$E_{Photon} = h\nu$$

~~anomaler:~~

normal: $\Delta E = m_j \mu_B B$

$$\boxed{\mu_B = 9{,}27 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}}$$

$$\boxed{\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}}$$

$$\boxed{^{2s+1}L_j}$$

$$\boxed{\begin{aligned} h &= 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \\ \hbar &= 1{,}05 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \end{aligned}}$$

★ Energiedifferenz, Rydberg-Konstante $\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = M$

$$\Delta E = R_{y\infty}^* z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

$$\left[\text{Atomgröße } r = \frac{n^2}{z} a_0\right] = \boxed{\underbrace{13{,}6\,eV}_{=R_y}} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

★ LS-Kopplung: $L = \sum_i l_i$, $S = \sum_i S_i$, $J = L + S$

Bsp: (np np)

$s_1 + s_2 = 0$: $l_1 + l_2 = 2 \Rightarrow {}^1D_2$; $l_1 + l_2 = 1 \Rightarrow {}^1P_1$; $l_1 + l_2 = 0 \Rightarrow {}^1S_0$

$s_1 + s_2 = 1$: $l_1 + l_2 = 2 \Rightarrow {}^3D_{3,2,1}$; $l_1 + l_2 = 1 \Rightarrow {}^3P_{2,1,0}$; $l_1 + l_2 = 0 \Rightarrow {}^3S_1$

Bsp: $npnd$ $j_1 = \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$ $j_2 = \frac{5}{2}, \frac{3}{2}$ $\Rightarrow (j_1, j_2)_J$ $|j_1+j_2|, |j_1+j_2-1|, \dots |j_1-j_2|$

$\left(\frac{3}{2}, \frac{5}{2}\right)_{4,3,2,1}$

$\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)_{3,2,1,0}$

$\left(\frac{1}{2}, \frac{5}{2}\right)_{3,2}$

$\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right)_{3,2}$

Zwei-Elektronensystem

$\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$, $[s_i, s_j] = i\hbar\,\varepsilon_{ijk}\,s_k$

$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$, $|\downarrow\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$

$s_x|\uparrow\rangle = \frac{\hbar}{2}\sigma_x\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$

$s_y|\uparrow\rangle = \frac{\hbar}{2}\underbrace{\begin{pmatrix}0&-i\\i&0\end{pmatrix}}_{\sigma_y}\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \frac{i\hbar}{2}|\downarrow\rangle$

$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}$

$\hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix}0&-i\\i&0\end{pmatrix}$

$\hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix}1&0\\0&-1\end{pmatrix}$

$\sigma_z = \begin{pmatrix}1&0\\0&-1\end{pmatrix}$

Hamilton: $\hat{H} = \hat{E}_{pot} - \frac{\hbar}{2m}$; $\hat{p} = -i\hbar\vec{\nabla}$

Drehimpuls: $\vec{L} = -i\hbar(r \times \vec{\nabla})$

Hundsche Regeln

I) Volle Schalen u. volle Unterschalen haben den Drehimpuls 0

II) Der Gesamtspin ~~ist~~ S muss maximal sein, Spin der e^- paarweise gleichgerichtet

III) Erlaubt Pauli mehrere Konstellationen mit max. Gesamtspin $\vec{S}$, dann Besetzung der ~~mit~~ Unterzustände mit Quantenzahl m_l, so dass Gesamtbahndrehimpuls maximal

IV) Falls Unterschale höchstens halb voll: Zustand mit min. Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl J am stärksten gebunden. Bei mehr als halbvoll umgekehrt: ~~weniger~~ als halbvoll: $J = |L-S|$; mehr als halbvoll: $J = |L+S|$

elektronischer Grundzustand

(0) s-Schale: $2 \cdot 1e^-$

(1) p-Schale: $2 \cdot 3e^-$

(2) d-Schale: $2 \cdot 5e^-$

(3) f-Schale: $2 \cdot 7e^-$

${}^{2S+1}L_j$

Schale

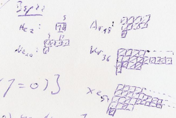
Bsp $Xe\,4f^{10}\,6s^2$

$\frac{1}{2}\ \frac{1}{2} \dots \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}\right)\left(-\frac{1}{2}\right)\left(-\frac{1}{2}\right)$ $\rightarrow S = 2$ $\left(= 3 - 1\right)$ $\left(6\cdot\frac{1}{2} - 2\cdot\frac{1}{2}\right)$

$-3\ -2\ -1\ 0\ 1\ 2\ 3\ -3\ -2\ -1\ 0$ $\rightarrow L = 6$ $(= -3 + (-2) - 1 + 1 + 2 + 3 - 3 - 2)$

magnetquantenzahl $m_l = -l, \dots, +l$

Bsp 2:



Auswahlregeln für opt. Übergänge

$\Delta J = 0, \pm 1$ [ohne $(J=0) \to (J=0)$]

$\Delta m_J = 0, \pm 1$ [ohne $(m_J = 0) \to (m_J = 0)$ wenn $\Delta J = 0$]

$\left.\begin{array}{l}\Delta S = 0\\ \Delta L = 0, \pm 1\end{array}\right\}$ für das Atom bei LS-Kopplung

$\Delta l = \pm 1$ für das seine Konfiguration ändernde Elektron

$\Delta j = 0, \pm 1$ für einzelne Elektronen bei j-j-Kopplung

${}^{2S+1}L_j$

Kommutator

$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$

$[\hat{A}, \hat{B}] = -[\hat{B}, \hat{A}]$; $[\hat{A}, \hat{B}\hat{C}] = \hat{B}[\hat{A}, \hat{C}] + [\hat{A}, \hat{B}]\hat{C}$

$[\hat{A}, c_1\hat{B} + c_2\hat{C}] = c_1[\hat{A}, \hat{B}] + c_2[\hat{A}, \hat{C}]$

Polarisiertes Licht

- linear polarisiert: π: $\Delta m = 0$
- rechts zirkular: σ^+: $\Delta m_j = 1$
- links zirkular: σ^-: $\Delta m_j = -1$

Harm. Oszillator

$E = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega$

Hamilton: $\hat{H}|\Psi(t)\rangle = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}|\Psi(t)\rangle$

Ortsdarstellung: $-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{2}\omega^2 m x^2 \rightarrow$ Harm. Oszillator: $H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}\omega^2 m x^2$

exPhys-Formeln IV/~~IV~~ - 9.2.06 -

Lichtdruck: ~~Photonen~~

- Photonenenergie: $E_{Ph} = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = pc$
- Photonenimpuls: $p_{Ph} = \frac{h}{\lambda}$ $\boxed{h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\,Js}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi}$
- ~~Photon~~ Lichtdruck: $F_L = p \cdot n$; n: ~~Rate~~ Photonenrate, $F = \frac{P_L}{c}$
- Lichtleistung: $P_L = E \cdot n = h\nu \cdot n = h \cdot \frac{c}{\lambda} \cdot n$
- bei Spiegel: $p_{eff} = 2p_{Ph}$
- bei absorbiert: $p_{eff} = p_{Ph}$ $I = \frac{P}{A}$
- $A = A_{\text{Auftreff}} \cos\alpha$

Schwarzkörperstrahlung:

Photoeffekt:

- de Broglie Wellenlänge: $\lambda = \frac{\hbar}{p}$ / nach Paul: $\lambda = \frac{h}{p}$
- $E_{max} = \underbrace{h\nu}_{\text{Photonenenergie}} - \underbrace{\phi_0}_{\text{Austrittsarbeit}}$
- Gegenspannung / Bremsspannung:

Schrödinger-Gl:

stationär: $-\frac{\hbar}{i} \cdot \frac{\partial \psi(\vec{r}(t))}{\partial t} = H(\vec{r})\psi(\vec{r}, t)$

$\Rightarrow \psi = Ae^{-ikx} + Be^{ikx}$ } einlaufend, weg, ...

Comptoneffekt:

- Comptonwellenlänge: $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c^2} = 2{,}426 \cdot 10^{-12}\,m$
- $p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{h\nu}{c}$; $E_\gamma = mc^2$

Heisenbergsche Unschärfe:

- $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ | $\Delta v \geq \frac{\hbar}{m_c \Delta x}$
- $E = h\nu$
- $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$; Δt: Lebensdauer

- Gaußsches Wellenpaket:
  - $\langle x \rangle = 0$; $\langle x^2 \rangle = \sigma^2$; $\Delta x = \sigma$
  - $\langle p \rangle = 0$; $\langle p^2 \rangle = \frac{\hbar^2}{4\sigma^2}$; $\Delta p = \frac{\hbar}{2\sigma}$
  - $\Rightarrow \Delta x \Delta p = \frac{\hbar}{2}$

Bohrsches Atommodell:

- $U = n\lambda$
- $r = 0{,}529 \cdot 10^{-10}\,m = 4\pi\varepsilon\hbar^2/m_e e^2$

$\frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = F_C = F_Z = \frac{m \pi v^2}{r}$

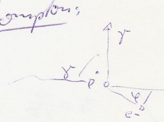
$n\frac{h}{p} = 2\pi r$

$n\hbar = rmv = L$

Coulomb-Potential

$\frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$

Compton:



$$\lambda' = \lambda + \lambda_c \underbrace{(1-\cos\theta)}_{\text{bei } 90°: = 1} \qquad E_{e^-} = 511\,\text{keV}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$v_{ex} = \frac{h}{\lambda}$$

$$v_{ey} = \frac{h}{\lambda'} = \frac{h}{\lambda + \lambda_c}$$

$$\tan\varphi = \frac{v_{ey}}{v_{ex}} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

Doppelspalt:

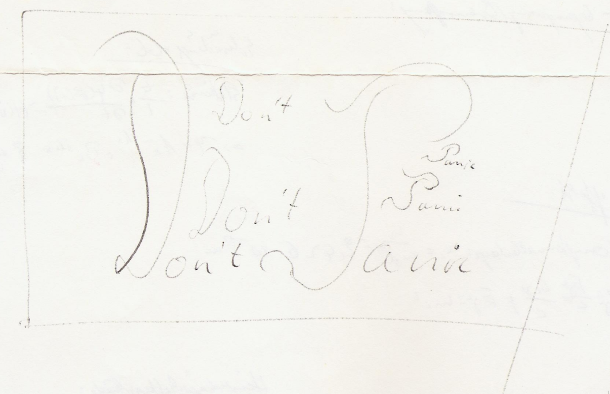
Konstruktive Interferenz:

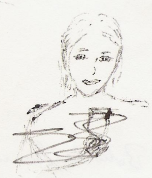
$(I = \psi^2)$

$$I_p = |\psi_1 + \psi_2|^2 = \psi_1^2 + \psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2$$
$$= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

auslöschung (destruktive Interferenz):

$$I_p = |\psi_1 - \psi_2|^2 = \psi_1^2 + \psi_2^2 - 2\psi_1\psi_2$$
$$= I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$





Wirkungsquerschnitt:

Dank Dir Danke

---

expPhys V / Formelsammlung Klausur 1, Entwurf — 8.12.06 —

~~Cross-section / Wirkungsquerschnitt~~

~~barn: 1b =~~

$\frac{1}{GeV} = 0{,}197\ fm$

Bethe-Bloch-Formel (Energieverlust beim Durchlauf Materie):

$$\frac{dE_{ion}}{dx} = K \cdot z^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2}\left[\ln\left(\frac{2 m_e v^2 \gamma^2}{I}\right) - \beta^2\right]$$

Näherung: $-\frac{dE_{ion}}{dx} = \alpha K z^2 \frac{1}{\beta^2}$; $\alpha = 6{,}53$

$\boxed{= \alpha K z^2 \frac{Z}{A} \frac{m}{2E_{kin}}}$; $\beta \ll 1$

I: Anregungsenergie

$K = 0{,}307 \frac{MeV cm^2}{g}$

Änderung des Energieverlusts bei mehr od. weniger Energie, Impuls, Masse

~~Zerfälle Kinematik, Invariante Masse, 4-er Impuls~~

Stoß: ~~Target~~-ruhendes Ziel: $(p_1 + p_2)^2 = \begin{pmatrix} E_1 + m_2 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix}^2 = (E_1 + m_2)^2 - p_1^2$

– zwei Teilchen gegeneinander $\begin{pmatrix} E_1 + E_2 \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}^2 = (E_1 + E_2)^2 + (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$

Lebenszeit: $\Delta E \Delta t \hat{=} \frac{\hbar}{2}$

$\tau \Delta E = \hbar$

$\tau = \frac{\hbar}{E}$

Teilchen in Ruhe: $m^2 = P^2 = E^2$

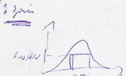
$P^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$

$\int d\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta$

$\int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta = \int_{-1}^{1} d(\cos\theta)$

Erhaltungssätze – Kinematik: Spin

- Leptonenzahl.
- Ladungszahl.
- Baryonenzahl.
- Drehimpuls-Impuls-Erhaltung. etc.



$\Gamma = \frac{1}{\tau}$: Zerfallsbreite

Feynman: Welle ~~stellt~~ Austausch-Bosonen

– γ: Photon

– Z, $W^{\pm}$: schwache WW, Quarks des Strahlen e^- ab. – – – –

– 8 Gluonen: starke WW

Teilchenarten

Quarks

Fermionen < Hadron < Baryon (3 Quarks) p, n, Σ^0; Meson π^0, η^0, ρ^0 … Quark + Antiquark

Lepton – e^-, μ^-, τ^-

Boson – Austauschboson – $\gamma, Z^0, W^{\pm}$

Quarks:

$p = (u,u,d)$ $\pi^+ = (u\bar{d})$ $\Delta^{++} = |uuu\rangle$

$n = (d,u,d)$ $\pi^- = (\bar{u}d)$

$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(|d\bar{d}\rangle - |u\bar{u}\rangle)$

$K^+ = (u\bar{s})$

$K^- = (\bar{u}s)$

Symmetrien:

	P	C	T
$\vec{r}$	−	+	+
$\vec{p}$	−	+	−
$\vec{L}$	+	+	−	Axial
$\vec{s}$	+	+	−	Spin
$\vec{E}$	−	+	−	Polarisation

Wirkungsquerschnitt

Barns: 1 barn: $1b = 10^{-28} m^2$

– Mittl. freie Weglänge: $\lambda = \frac{1}{n \sigma_{tot}}$

– Zahl der Reaktionen / Wahrsch. der Reaktionen

$n = N_A \frac{g \cdot \rho}{Mmol}$

→ $f = e^{-\frac{d}{\lambda}}$; d: Dicke

→ Rate: $\dot{N} = j \cdot \frac{dN}{dt}$; $\frac{dN}{dt}$: Teilchen

Daten zu Teilchen Masse / Ladung / Lebensdauer

$|p\rangle = |\frac{1}{2}\frac{1}{2}\rangle$

$|n\rangle = |\frac{1}{2} -\frac{1}{2}\rangle$

Σ^0

e^-

μ^-

τ^-

ν $\nu < 3eV$

Λ_0

e^-	μ	τ
$0{,}5\frac{MeV}{c^2}$	$106\frac{MeV}{c^2}$	$1{,}77\frac{GeV}{c^2}$

$|\pi^{\pm}\rangle = |1 \pm 1\rangle$

$|\pi^0\rangle = |1\,0\rangle$

K^0 $|1\,0\rangle$

Quarks:

$\frac{2}{3}$ u 3 MeV c 1,2 GeV t 175 GeV

$-\frac{1}{3}$ d 6 MeV s 100 MeV b 4,7 GeV

$|J, M\rangle = C_{ij}(m_1, m_2, J, M)\,|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle$

Größenverhältnisse

Atom $10^{-10} m$

Kern $10^{-14} m$, $R^3 \approx 1{,}22 \cdot 10^{-15} m A^{\frac{1}{3}}$

Nukleon 10^{-15}

Quark 10^{-18}

Elektron 10^{-18} } bis dahin strukturlos

λ-Teilchen + Ladung + Masse: $\approx 1\ GeV$, $z(++)$

Natürliche Einheiten

E: GeV $\xrightarrow{}$ $1{,}6 \cdot 10^{-10} J$

M: GeV $\xrightarrow{1/c^2}$ $1{,}78 \cdot 10^{-27} kg$

L: GeV^{-1} $\xrightarrow{\hbar c}$ $0{,}197\ fm$

t: GeV^{-1} $\xrightarrow{\hbar}$ $6{,}58 \cdot 10^{-25} s$ $(= \hbar\, s)$

Temp: GeV $\xrightarrow{1/k_B}$ $1{,}16 \cdot 10^{16} K$

Ladung: $\sqrt{4\pi\alpha}$ $\xrightarrow{\sqrt{4\pi\varepsilon_0}}$ $1{,}6 \cdot 10^{-19} C$

Feynman:

– Dominante Prozesse

– Übergangsamplituden (M_{fi})

Zerfallsbreite: $d\Gamma \sim |\vec{p}_f| \cdot M^2$

Verzweigung ~~Wahrsch.~~ $BR = \frac{\Gamma_i}{\Gamma} = \frac{d\Gamma_1}{d\Gamma_2} = \frac{|\vec{p}_1|}{|\vec{p}_2|}\frac{M_1^2}{M_2^2}$

Wechselwirkungen als geladene	E/M	Schwach	Farbladung Stark
e^-	✓	✓	(—)
Quark	✓	✓	✓
γ	✓	(—)	(—)
	10^{-2}	10^{-2}	1

Stärke: (Grav: 10^{-39})

$\vec{p}_f$: Impuls im final state

Γ: Breite auf halber Signalhöhe der Verteilung bei max Menge

Detektor:

– Öffnungswinkel: $(P_1 + P_2)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos\theta)$

Spurkammer: Geladene

e/m: Geladene und Neutrale

hadronisch: alle und Hadr.

– Luminosität: $\mathcal{L} = \frac{dN}{dt}\frac{1}{\sigma} = \phi N_t$; Collider: $\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2}{A} f$

$\frac{dN}{dt}$: Anzahl Ereign. / Zeit.

– Masse: $\vec{p} = m\gamma\frac{\vec{v}}{c} = m\gamma\beta$

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

$\beta = \frac{v}{c}$

Konstanten:

$\hbar = 6{,}58 \cdot 10^{-25}$

$\hbar c = 0{,}197 \cdot 10^{-15}$

$(\hbar c)^2 = 0{,}385\ GeV^2 mb$

$h = 2\pi\hbar$

$\alpha = \frac{1}{137}$

$\frac{1}{k} = 1{,}16 \cdot 10^{16}$

Isospin

$K^0 \to \pi^+ \pi^-$ $\quad$ $K^0 \not\to \pi^0 \pi^0$

$|1,0\rangle = |1,1\rangle|1,-1\rangle$ $\quad$ $|1,0\rangle \neq |1,0\rangle|1,0\rangle$

Cherenkov-Licht:

– produziert ab $v > \frac{c}{n}$; $E_{min} \geq \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m$

Brechungsindex

$\frac{c}{v} = \frac{E}{p}$

– Winkel: $\theta_c = \arccos\left(\frac{1}{n}\frac{\sqrt{m^2 + \vec{p}^2}}{|\vec{p}|}\right) = \arccos\left(\frac{1}{n}\frac{c}{v}\right)$

Speicherring: verschiedene Typen, Magn. Fluss etc.,

Synchrotron-Strahlung: Energieverlust: $\Delta E = P \cdot t = \frac{e^2}{3\varepsilon_0}\sqrt{1 - \frac{m^2}{E^2}}^{\,3}\frac{E^4/m^4}{R}$ (eine Runde)

$t = \frac{2\pi R}{v}$

$P = \frac{e^2 c}{6\pi\varepsilon_0}\left(1 - \frac{m^2}{E^2}\right)^2 \frac{E^4/m^4}{R^2}$

Mandelstam: $s = (p_a + p_b)^2$; $t = (p_a - p_c)^2$

$u = (p_a - p_d)^2$ $\quad$ $s + t + u = m_A^2 + m_B^2 + m_C^2 + m_D^2$

Mittlere Lebensdauer: ~~N_0~~

verbleibende Teilchen: $N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

Halbwertszeit $T_{1/2} = \frac{\tau}{\ln 2}$

Lebenszeit im Lab. syst.: $t = \gamma\tau$ (im Ruhesyst.)

$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$ — Zerfallsbreite, vorherige Seite

C, P, T, Spin, Isospin ...

* Transformationen

Größe	P (Parität)	C (Ladung)	T (Zeit)
$\vec{r}$	$-\vec{r}$	$\vec{r}$	$\vec{r}$
$\vec{p}$	$-\vec{p}$	$\vec{p}$	$-\vec{p}$
$\vec{L}=\vec{r}\times\vec{p}$	$\vec{L}$	$\vec{L}$	$-\vec{L}$
$\vec{\sigma}_{spin}$	$\vec{\sigma}$	$\vec{\sigma}$	$-\vec{\sigma}$
$\vec{\sigma}\vec{p}$	$-\vec{\sigma}\vec{p}$	$\vec{\sigma}\vec{p}$	$\vec{\sigma}\vec{p}$
$\vec{B}$	$\vec{B}$	$-\vec{B}$	$-\vec{B}$

Magnet. Moment

Teilcheneigenschaften:

I	II	III	Q (Ladung)	T (Spin)	T_3 (Isospin)	Y
ν_e	ν_μ	ν_τ	0	1/2	1/2	-1
e^-	μ^-	τ^-	-1	1/2	-1/2	-1
e_R	μ_R	τ_R	-1	0	0	-2
u	c	t	2/3	1/2	1/2	1/3
d'	s'	b'	-1/3	1/2	-1/2	1/3
u_R	c_R	t_R	2/3	0	0	4/3
d_R	s_R	b_R	-1/3	0	0	-2/3

$Y = (2Q - T_3)$

Feststellung von CP-Verletzung

T-Verletzung?

Don't Panic

Kaon-System

$K^0 \{ \; d \xrightarrow{u,c,t} s, \; \bar{s} \xrightarrow{\bar{u},\bar{c},\bar{t}} \bar{d} \; (W) \} \bar{K}^0$

$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$

$K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$

$CP|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$; $CP|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$

$\Gamma \sim |M_{fi}|^2 \cdot \rho_f(E)$

$$\frac{\Gamma(K_L^0 \to \pi^0\pi^0)}{\Gamma(K_L^0 \to \pi^0\pi^0\pi^0)} = \frac{|\langle K_1|K_L^0\rangle|^2}{|\langle K_2|K_L^0\rangle|^2} \cdot \frac{\rho(2)}{\rho(3)}$$

Don't Panic

B^0 u. D^0 ähnlich

---

2. Phys 5, Formelzettel 2 / Klausur 2 — 2.2.07 —

Quarks:

Q			
$\frac{2}{3}$	u: 3 MeV	c: 1,2 GeV	t: 175 GeV
$-\frac{1}{3}$	d: 6 MeV	s: 100 MeV	b: 4,7 GeV

Teilchen:

Name	Masse	(Quarks)
Proton (p)	938 MeV	$\vert uud\rangle$
Neutron (n)	939 MeV	$\vert udd\rangle$
Elektron (e^-)	0,511 MeV	
Myon (μ)	106 MeV	
Tauon (τ)		
Pi+ (π^+)	139 MeV	$\vert u\bar{d}\rangle$
Pi− (π^-)	139 MeV	$\vert \bar{u}d\rangle$
Pi 0 (π^0)	135 MeV	$\vert u\bar{u}\rangle$ od $\vert d\bar{d}\rangle$
Kaon K^+	494 MeV	$\vert u\bar{s}\rangle$
Kaon K^-	494 MeV	$\vert \bar{u}s\rangle$
Kaon K^0	498 MeV	$\vert d\bar{s}\rangle$
$W^\pm$	80,4 GeV	
Z^0	91,2 GeV	

Bewegung:

$\beta = \frac{|\vec{p}|}{E} \cdot c = \frac{|\vec{p}|}{E} = \frac{v}{c}$

$\gamma = \frac{E}{mc^2} = \frac{E}{m}$

$\gamma\beta = \frac{|\vec{p}|}{m}$

Streuung:

* elastisch e^--Kern:

$m_e \ll E, E'$

$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{M_K}(1-\cos\theta)}$

$\Delta E = E - E' = E'_\mu - M$

$\frac{\Delta E}{E} = 1 - \frac{M}{M + E(1-\cos\theta)}$

$E'_{max} \hat{=} \cos(180°)$

* inelastisch,
  - mit Rückstoß
  - Punktförmiges Ziel

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2\alpha^2}{4E^2\sin^4\frac{\theta}{2}}\left(\frac{E'}{E}\right)$$

* ausgedehnte Ladung

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rutherford} \cdot |F(\vec{q}^2)|^2$$

Formfaktor; Kopplungsstärke

* spin $\frac{1}{2}$ e^-: $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rutherford} \cdot \left(1 - \beta^2 \sin^2\frac{\theta}{2}\right)$; $\beta^2 = \left(\frac{v}{c}\right)^2$

punktförmig

* e^- auf Nukleon: Rosenbluth

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{eN} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott}\left(\frac{G_E^2(Q^2) + \tau G_M^2(Q^2)}{1+\tau} + 2\tau G_M^2(Q^2)\tan^2\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\tau = \frac{Q^2}{4M_p^2}$$

ep: $G_E(0) = 1$, $G_M(0) = 2{,}79$

en: $G_E(0) = 0$, $G_M(0) = -1{,}91$

Natürliche Einheiten:

$\alpha = \frac{1}{137} = \frac{e^2}{4\pi}$, $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$

Energie: eV: $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

Masse: eV: $\left(\frac{1}{c^2}\right)$: $1{,}78 \cdot 10^{-27}$ kg

Länge: eV^{-1}: $(\hbar c)$: 0,197 fm

Zeit: eV^{-1}: $(\hbar)$: $6{,}58 \cdot 10^{-25}$ s

Temp: eV: $\left(\frac{1}{k}\right)$: $1{,}16 \cdot 10^{4}$ K

Ladung: $\sqrt{4\pi\alpha} = e$: $(\sqrt{\hbar c \varepsilon_0})$: $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

1 barn: $1\,b = 100\,fm^2 = 10^{-28}\,m^2$

$\alpha \cdot \hbar \cdot c = 1{,}44$ MeV fm

Streuung (ff):

Formfaktoren

Ladungsverteilung $f(r)$:

Punkt: $\frac{\delta(\vec{r})}{4\pi r}$

exponentiell: $\frac{a^3}{8\pi}e^{-ar}$

Gauss: $\left(\frac{a^2}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{a^2 r^2}{2}}$

homogene Kugel $\begin{cases} C & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases}$

Formfaktor F:

1 : Konstant

$\left(1 + \frac{q^2}{a^2}\right)^{-2}$: Dipol

$e^{-\frac{q^2}{2a^2}}$: Gauss

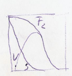
$3\alpha^{-3}(\sin\alpha - \alpha\cos\alpha)$: Oszillation

$\alpha = \frac{q}{R}$

Tiefinelastische Streuung:

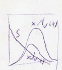
Strukturfunktionen: $F_2(x) = \nu W_2$; $\nu = E - E'$

$F_1(x) = M W_1$; $q^2 = W^2 - M^2 - 2M\nu = -Q^2$



Bjorken: $x = \frac{Q^2}{2M\nu}$

Callan-Gross-Relation: $\frac{2xF_1(x)}{F_2(x)} = 1 \Rightarrow$ Parton $\hat{=}$ Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen

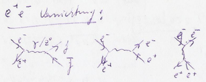


Beugung / Streuung:

— bei scharfer Ladungsverteilung

* Minimum: $\frac{|\vec{q}|R}{\hbar c} \approx 4{,}5$; $\vec{q}^2 = 4E^2 \cdot \sin^2\frac{\theta}{2}$
* Ladungsverteilung: $\langle r^2\rangle^{\frac{1}{2}} = 0{,}94\,fm\,A^{\frac{1}{3}}$; Radius (Kern: Kugel): $R_K^2 = \frac{5}{3}\langle r^2\rangle^{\frac{1}{2}} = (1{,}21\,fm\,A^{\frac{1}{3}})^2$
* Nukleonendichte: $\rho_N = 0{,}17\,\frac{\text{Nukleonen}}{fm^3}$; mittl. Quadr. Radius: $R_{ms} = \sqrt{\langle r^2\rangle} \approx 0{,}94\,fm\,A^{\frac{1}{3}}$

e^+e^- Vernichtung:



$$R_{Had} = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} = N_C \sum_{i=1}^{\text{Quarks}} Q_i^2$$

(Zähler: $\frac{4\pi\alpha^2}{3s} N_C \sum_{i=1}^{\text{Quarks}} Q_i^2$; Nenner: $\frac{4\pi\alpha^2}{3s}$)

Zerfälle / Teilchenentdeckung:

$\sqrt{s}$	Quarks	R_{Had}
< 3 GeV	u, d, s	$3 \cdot \frac{6}{9} = 2$
< 10 GeV	u, d, s, c	$3 \cdot \frac{10}{9} = 3{,}3$
< 350 GeV	u, d, s, c, b	$3 \cdot \frac{11}{9} = 3{,}67$
≥ 350 GeV	u, d, s, c, b, t	$3 \cdot \frac{15}{9} = 5$

α-Korrektur:

QED: $\alpha \to \alpha\left(1 + \frac{s}{\Lambda^2}\right)$

$\Lambda^2 > 250$ GeV

QCD: $\alpha \to \alpha\left(1 + \frac{\alpha_s}{\pi}\right)$

$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2n_f)\log\frac{Q^2}{200\,\text{GeV}}}$

Kerne:

* Massenformel: $m(A,Z) = Z m_p + (A-Z) m_n - B$

Bindungsenergie: $B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_{asym}\frac{(N-Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$

$a_V = 15{,}6$ MeV ; $a_S = 17{,}2$ MeV ; $a_C = 0{,}7$ MeV ; $a_{asym} = 22{,}5$ MeV

* Bedingung für 2-Körper Zerfall: $Q = m(A,Z) - m(A-A', Z-Z') - m(A',Z') > 0$

$\delta = \begin{cases} 11{,}2\,\text{MeV}; & gg\text{-Kerne} \\ 0 & ; ug\text{-Kerne} \\ -11{,}2\,\text{MeV}; & uu\text{-Kerne} \end{cases}$

* Kerne mit gleicher Nukleonenzahl: A: $m(A,Z) = \alpha A - \beta Z + \gamma Z^2 + \frac{\delta}{A^{1/2}}$

$\alpha = m_n - a_V + a_S A^{-\frac{1}{3}} + a_{asym} A^{-1/3}$

$\gamma = \frac{a_{asym}}{A} + \frac{a_C}{A^{1/3}}$; $\beta = a_{asym} + (m_n - m_p - m_e)$

Cabibbo-suppressed decays

$\Gamma \sim |M_{fi}|^2 \cdot \rho$

$\Gamma = \left(g_W \cdot V_{q\bar{q}} \cdot \frac{1}{q^2 - \Omega_W^2} \cdot g_W \cdot V_{q\bar{q}}\right)^2$; $\lambda = 0{,}23$, $A = 0{,}82$, $\rho = 0{,}22$, $\eta = 0{,}34$

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

exPhys VI / Formeln und Infos, Klausur 1 — 29.5.08 —

Herstellung von reinen Kristallen: ★ Kristallziehen → Samen → ziehen (Czochralski (CZ)-Methode); ★ Float-Zone (FZ) → Schmelzen und wieder auskristallisieren lassen.

Glastemperatur: $T_g \approx \frac{2}{3} T_{Schmelz}$

Oberflächenenergie: $\gamma = \left(G(T,p,N) - \mu N\right)/A_{Oberfläche}$ (Gibbs Enthalpie)

Werte (J/m^2): ◦ Kristalle: 0,02; ◦ NaCl: 0,3; ◦ Metalle: 1–3

Konstruktion Oberfläche (Wulff-Konstruktion): minimale Oberflächenenergien; $\frac{\gamma_i}{h_i} = \text{konst}$

◦ Kristalle wachsen lassen: Abscheiden aus Gas od. Flüssigkeit

◦ Mögl. Rotationsachsen: 1, 2, 3, 4, 6

Gittertypen: System	Zähligkeit (Rot-Achse)
triklin	1
monoklin	2
orthorhombisch	2 (3)
tetragonal	4
hexagonal	6 → hexagonal close packing: hcp
trigonal	3
kubisch	3 (4) → simple cubic (sc), face centred (fcc), body centred (bcc)

Wigner-Seitz-Zelle → mit Mittelsenkrechten zwischen Gitteratom und nächsten Atomen/Basen konstruiert.

2D Bravais-Gitter: Quadrat, Rechteck, centred rectangular, hexagonal, schief.

Bindungsenergie von Ionenkristallen: $U_0 = -\frac{N\alpha e^2}{4\pi\varepsilon_0 R_0}\left(-\frac{1}{n}+1\right)$

Bindungsarten: ★ Kovalent (Elektronen gemeinsam) → Diamant, H_2^+ Ion; ★ Ionisch → NaCl (8–11 eV/Molekül); ★ Metallisch (1–4 eV/Atom); ★ Wasserstoffbrücken (0,1 eV); ★ Van der Waals (0,026–0,174 eV/Atom)

$\mathcal{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_A}$

Strukturbestimmung: ★ Mikroskopie: ◦ transmission electron microscopy; ◦ field ion microscopy; ◦ Rastertunnelmikroskop; ◦ Rasterkraftmikroskop.

Streuung: Reziproke Gittervektoren: $b_i a_j = 2\pi\delta_{ij}$; $G_{hkl} \cdot R = 2\pi p$, $p \in \mathbb{N}$

Empirische Streuung: Photonen: 1–100 meV; X-ray: $4\cdot10^6$–$3\cdot10^7$ meV; Neutronen: 10^4–$5\cdot10^5$ meV; He-Atome: 5–100

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{V_{pc}}(\vec{a}_2\times\vec{a}_3),\quad \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{V_{pc}}(\vec{a}_3\times\vec{a}_1),\quad \vec{b}_3 = \frac{2\pi}{V_{pc}}(\vec{a}_1\times\vec{a}_2)$$

$G_{hkl} = h\vec{b}_1 + k\vec{b}_2 + l\vec{b}_3$

1 Dim: $b = \frac{2\pi}{a}$

Elektronendichteverteilung: $g(\vec{r}) = \sum_{hkl} g_{hkl} e^{iG_{hkl}r}$; $g_{hkl} = \frac{1}{V_{pc}}\int g(\vec{r}) e^{-iG_{hkl}r} dV$

Intensität $I = |S(\vec{r})|^2$

Punkte: Γ: Mitte Brillouin-Zone; X: Rand "

Bragg-Gesetz: $2d_{hkl}\sin\theta = p\lambda$, $p \in \mathbb{N}$

Abstand der Gitterebenen im Realgitter: $d_{hkl} = \frac{2\pi}{G_{hkl}}$

Ewald-Kugel

Brillouin-Zonen: Konstruktion mittels Mittelsenkrechten.
1.: Man kreuzt keine Mittelsenkrechte.
2.: Man eine "
3.: Man zwei " "

Miller Indices: [1 0 0] → Vektor
(1 0 0) Ebene, die [1,0,0] bei 1 schneidet.
(2 0 0) " " " " $\frac{1}{2}$ schneidet.
($\bar{2}$ 0 0) " " " " $-\frac{1}{2}$ "
{1 0 0} sämtliche symm. äquiv. Ebenen.
→ hexagonal kommt ein 4. dazu: $i = -(h+k)$.

Strukturfaktor: $S_{hkl} = \sum_\alpha \hat{a}_\alpha(G_{hkl}) e^{-iG_{hkl}\cdot r_\alpha}$ (Atomformfaktor)

→ monoatomisch: $S_{hkl} = \hat{a}(G_{hkl})$

in bcc verschwindet der (001) Reflex.

Atomformfaktor:
$\vec{r} = R_m + \vec{r}_\alpha + \vec{r}'$ (zum Gitterpunkt, zum Atom, im Atom)
$\tilde{a}_\alpha(\vec{k}) = \int_{V_\alpha} g_\alpha(\vec{r}) e^{-i\vec{k}\vec{r}} dV$

$g_{hkl} = \frac{1}{V_{pc}}\sum_\alpha \tilde{a}_\alpha(G_{hkl}) e^{-iG_{hkl}r_\alpha}$

Debye-Waller Faktor: $D = e^{-\frac{1}{3}k^2\langle u^2(T)\rangle}$ → Streuintensität geht in den Untergrund.

Elastizitätskonstanten: Spannungen: $\vec{\sigma}_{ij} = c_{ijkl}\varepsilon_{kl}$

Schall: $v_{long} = \sqrt{\frac{c_{11}}{g}}$; $v_t = \sqrt{\frac{c_{44}}{g}}$

lineare Kette: $\omega = \sqrt{\frac{4C}{M}}\left|\sin\left(\frac{qa}{2}\right)\right|$

opt. Phononen: 3p–3; ≈ 10 THz

Dispersionsrelation: Bedeutet ω über k

ij	Voigt
11	1
22	2
33	3
23	4
31	5
12	6

Kompressibilität $B = (2c_{12} + c_{11})/3$

Amorphe Festkörper: Paar-Korrelationsfunktion $g(r)$
$g(r) = \frac{1}{n_0^2}\langle n(\vec{r}')\, n(\vec{r}'+\vec{r})\rangle$ (mittl. Teilchendichte, in amorphen 1–10% kleiner als in Kristallen.)

für ein homogenes, isotropes System: $g(\vec{r}) = \frac{n(r)}{n_0}$ — mittl. Teilchendichte.

Kristalldefekte: ★ Punktdefekte: Leerstellen, Zwischengitteratome, Fremdatome; ★ Liniendefekte: Stufenversetzung, Schraubenversetzung; ★ Flächendefekte: Korngrenzen, Oberflächen

Temperaturabh. Defektdichte: Beitrag zur freien Energie
$\delta F_L = N_L E_L - T\delta S$
$= N_L E_L - N_L T S_L - k_B T \ln\left(\frac{(N+N_L)!}{N!\,N_L!}\right)$
$\frac{\partial(\delta F_L)}{\partial N_L} = 0$
⇒ Kristall: $n_L = n\, e^{S_L/k_B} e^{-E_L/(k_B T)}$

Werte: E_L (eV): Zink (Zn) 0,42 eV; NaCl: 1,01 eV; Cu: 1,28 eV

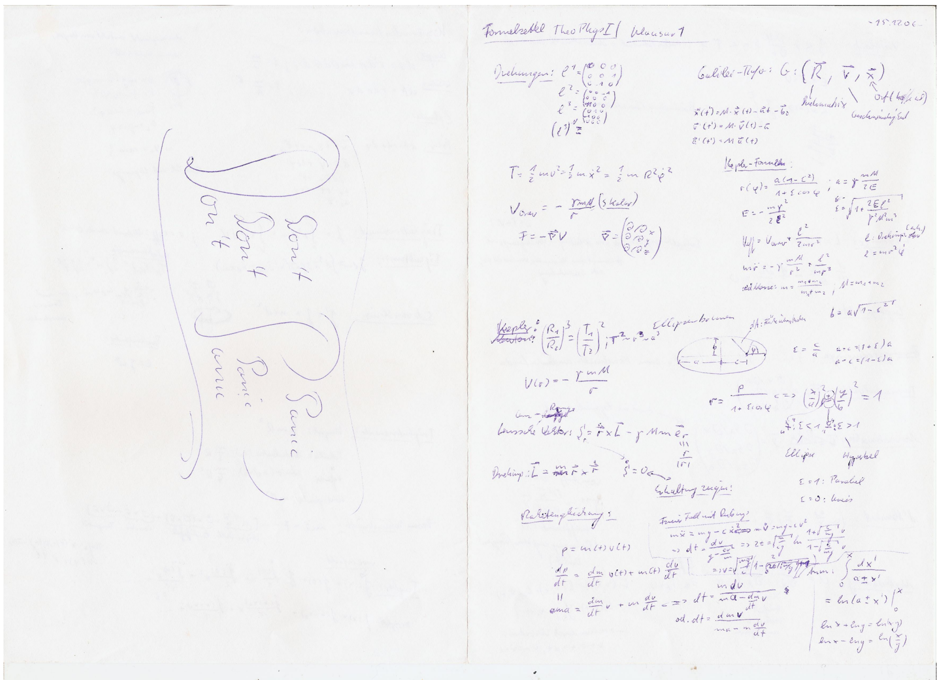
In Ionenkristallen: $n_L^+ = n_L^- = \sqrt{n^+ n^-}\, e^{S_L/(2k_B)} \cdot e^{-E_L/(2k_B T)}$; $S_L = S_L^+ + S_L^-$; $E_L = E_L^+ + E_L^-$

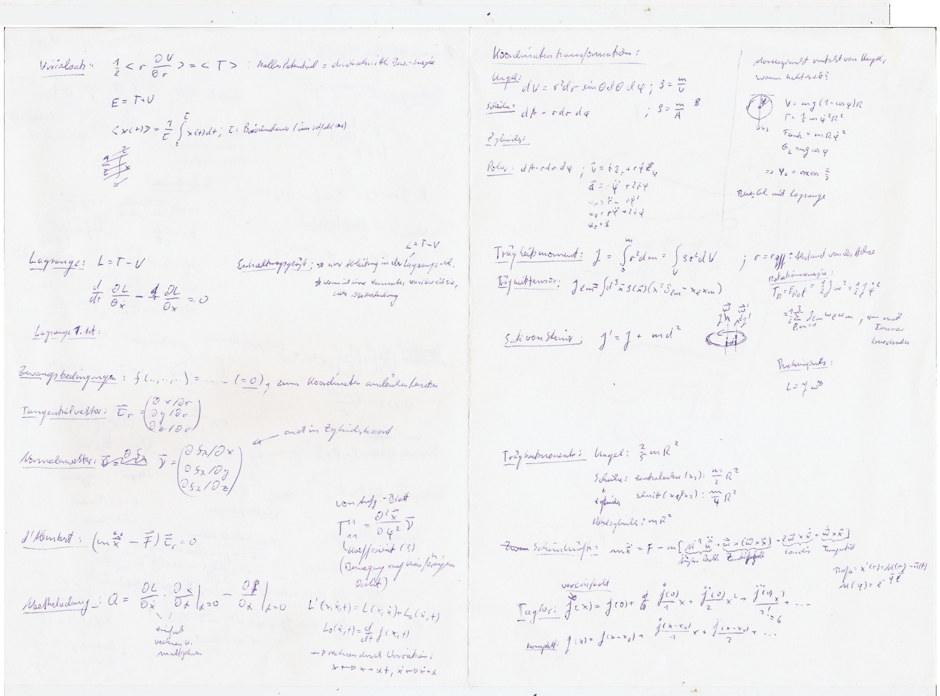
Arrhenius Plot: $\ln(n_L/n)$ über $1/T$

Leerstellendiffusion: $D \approx a^2\nu = a^2\nu_0 e^{-E_D/k_B T} = D_0 e^{-E_D/k_B T}$
$\nu = \nu_0 e^{-E_D/k_B T}$ ⇒ Diffusionsstrom: $j = -D\,\text{grad}\, n_L$

Diffusionsweg: $\sqrt{\langle\vec{r}^2\rangle} = \sqrt{6Dt}$ (Standardabweichung)

Theoretische Physik (1 und 2)





Koordinatentransformation:

Polar: $x_1 \to r\cos\varphi$
$x_2 \to r\sin\varphi$
$dA \to r\,dr\,d\varphi$
$\vec{v} = \dot{r}\vec{e}_r + r\dot{\varphi}\vec{e}_\varphi$
$\vec{a} = r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi}$

Zylinder: $x_1 \to r\cos\varphi$
$x_2 \to r\sin\varphi$
$x_3 \to z$
$dV \to r\,dr\,d\varphi\,dz$

Kugel: $x_1 \to$ ~~sin ϑ dr dφ dϑ~~ $r\sin\vartheta\cos\varphi$
$x_2 \to$ ~~sin~~ $r\sin\vartheta\sin\varphi$
$x_3 \to r\cos\vartheta$
$dV = r^2\sin\vartheta\,dr\,d\varphi\,d\vartheta$

Taylor:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots + \frac{d^n f(x_0)}{dt^n}\frac{(x-x_0)^n}{n!}$$

Don't Panic

Don't Panic

Don't Panic

Raketengl.

$$p(t) = m(t)\cdot v(t)$$
$$\frac{dp}{dt} = \frac{dm}{dt}v + m\frac{dv}{dt}$$
$$m \cdot a = \frac{dm}{dt}v + m\frac{dv}{dt}$$
$$dt = \frac{m\,dv}{ma - \frac{dm}{dt}v} = \frac{v\,dm}{ma - m\frac{dv}{dt}}$$
$$\int \frac{dx'}{a \pm x'} = \ln(a \pm x')\Big|_0^x$$
$$\ln(xy) = \ln x + \ln y$$
$$\ln\left(\frac{x}{y}\right) = \ln x - \ln y$$

Mathematische Grundlagen:

$\sin^2 + \cos^2 = 1$

$$\int_0^{2\pi} \sin^2(\varphi)\,d\varphi = \pi = \frac{2\pi}{2} - \frac{1}{4}\sin(2\pi) = \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{4}\sin(\varphi)\Big|_0^{2\pi} = \pi$$

TheoPhys I/ Wanner 2 Formelblatt

-3.2.07-

Trägheitsmoment

Steiner: $J' = J + md^2$ — abstand von 2ter Trägheitsachse (Zentralachse, Schwerpunktachse).

$$J = \int_m r^2\,dm = \rho\int r^2\,dV = \rho\int r^2\,dr\,\sin\vartheta\,d\varphi\,d\vartheta$$

Zylinder: $\frac{1}{2}MR^2$; Kugel: $\frac{2}{5}MR^2$; $\frac{1}{2}MR^2$; Scheibe: $\frac{1}{4}MR^2$

Rot-Energie: $T_R = \frac{1}{2}\sum_{l,m=1}^{3} J_{lm}\,\omega_l\,\omega_m$

Trägheitstensor

$$\int d^3x\,\rho(\vec{x})(\vec{x}^2\delta_{lm} - x_l x_m)$$
$$J_{lm} = \sum_{i=1}^{3} m_i(\vec{r}_i^{\,2}\delta_{lm} - x_{il}x_{im}) \quad ; \; l,m = 1,\dots,3$$

Eigenwerte: λ: $\det((\ddots) - \lambda\mathbb{1}) \stackrel{!}{=} 0$ — auch bei gekoppelten Schwingungen
~~Matrix~~ det rechnen.

Eigenvektor: λ einsetzen, Matrix $\left(\begin{array}{ccc|c} x-\lambda & x & x & 0 \\ x & x-\lambda & x & 0 \\ x & x & x-\lambda & 0 \end{array}\right)$

EV ist jener, was eingesetzt werden muss. Können mehrere sein.

Coriolis-Kraft; Scheinkräfte:

$$m\ddot{\vec{x}} = F - m\Big[\underbrace{M^{-1}\ddot{\vec{u}}}_{\text{Beschl. d. Ursprungs}} + \underbrace{\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{x})}_{\text{Zentrifugal}} + \underbrace{2\vec{\omega}\times\dot{\vec{x}}}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\dot{\vec{\omega}}\times\vec{x}}_{\text{Tangentialbeschl.}}\Big]$$

Drehungen: $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}$

$$\ell^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \; \ell^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \; \ell^3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \; \vec{\ell} = \begin{pmatrix} \ell^1 \\ \ell^2 \\ \ell^3 \end{pmatrix}$$

um $\hat{e}_1$ — um $\hat{e}_2$ — um $\hat{e}_3$

Lagrange

$$L = T - U \quad ; \quad \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

Legendre Transformation

Erh. Gr.:
z.B. $\frac{\partial L}{\partial q} = 0$, nicht explizit enth. — nur die Abl. hat auf.
* Zykl. Variable
* wenn H nicht explizit zeitabh.: E

Hamilton:

$$H = T + U = p\dot{q} - L$$
$$-\dot{p} = \frac{\partial H}{\partial q} \; ; \; \dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p} \; ; \; p = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}$$

Schwingung: $\ddot{x} = (A + B)x \; ; \; B > 0$
$\Rightarrow x = k_1 e^{\sqrt{B}t} + k_2 e^{-\sqrt{B}t}\left(-\frac{A}{B}\right)$

$\dot{x} = Bx$
$= C \cdot e^{-Bt}$

$\ddot{x} = -Bx(+A)$
$\Rightarrow x = k_1\sin\sqrt{B}t + k_2\cos\sqrt{B}t\left(-\frac{A}{B}\right)$
$\omega = \sqrt{B}$

Harm. Oszillator:

$$H = T + U = \frac{p^2}{2m} + \frac{f}{2}q^2 \; ; \; \{p, H\}_{qp} = \frac{\partial p}{\partial q}\frac{\partial H}{\partial p} - \frac{\partial p}{\partial p}\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{\partial H}{\partial q} = \dot{p}$$

$m\ddot{x} = -Gx$

$x(t) = Ae^{-\omega t} + Be^{\omega t}$ ~~…~~

2 Körper: allg.: $H = \underbrace{\frac{1}{2m}p_r^2 + \frac{\vec{L}^2}{2mr^2}}_{T_{rel}} - \underbrace{\frac{\gamma}{r}}_{V_{Pot}} + \underbrace{\frac{\vec{P}_S^2}{2m}}_{T_S\text{ – Schwerpunkt}}$

$L_j C_i = \varepsilon_{ijk}\,x_j\,p_k$, $p_r = m\dot{r}$, $r = \|\vec{r}\|$

Poisson-Klammer:

$$\{X, Y\}_{q,p} = \frac{\partial X}{\partial q}\frac{\partial Y}{\partial p} - \frac{\partial X}{\partial p}\frac{\partial Y}{\partial q} \; , \; \{X, y + z\} = \{X, y\} + \{X, z\}$$

$\{\alpha X, y\} = \alpha\{X, y\}$ $\quad$ $\{A \cdot C, B\} = \{A, B\}\,C + A\,\{C, B\}$

$$\{Q_e, P_m\}_{PQ} = \delta_{em} \; ; \; \{Q_e, Q_m\}_{PQ} = 0 \; ; \; \{P_e, P_m\}_{PQ} = 0$$

$\{D_A, D_B\} = D_A D_B - D_B D_A$

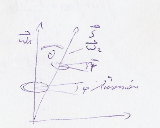
Kanonische Transformationen:

	Q	P
q	$F_1(q, Q; t)$ $p_j = \frac{\partial F_1}{\partial q_j}$; $P_j = -\frac{\partial F_1}{\partial Q_j}$	$F_2(q, P, t)$ $p_j = \frac{\partial F_2}{\partial q_j}$; $Q_j = \frac{\partial F_2}{\partial P_j}$
p	$F_3(p, Q; t)$ $q_j = -\frac{\partial F_3}{\partial p_j}$; $P_j = -\frac{\partial F_3}{\partial Q_j}$	$F_4(p, P, t)$ $q_j = -\frac{\partial F_4}{\partial p}$; $Q_j = -\frac{\partial F_4}{\partial P_j}$

$F = -\nabla V$

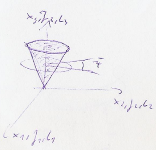
Kreisel:

s: Abstand Schwerpunkt zu Ursprung. $s = |\vec{s}_{Schwerpunkt}|$



$$L = \frac{1}{2}\sum_i J_i\omega_i^2 - mgs\cos\theta$$

$$\omega_1 = \dot{\theta}\cos\psi + \dot{\varphi}\sin\psi\sin\theta$$
$$\omega_2 = -\dot{\theta}\sin\psi + \dot{\varphi}\cos\psi\sin\theta$$
$$\omega_3 = \dot{\psi} + \dot{\varphi}\cos\theta$$



Drehimpuls: φ: $J_3' = \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}$

$(L_3\dot{\varphi} \gg J_1\cos\theta\dot{\varphi}^2)$

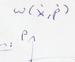
$$L_P\,\dot{\varphi} = \frac{(L_3' - L_3\cos\theta)}{\sin\theta} = \frac{mgs}{L_3}$$

$L_3 = J_3\,\omega$ — J_3: Trägheitsmoment

Vektorfeld: $\omega(\dot{x}, \dot{p})$

~~Laplace~~ Lenz-Runge-Vektor + zeigen dass erhalten

Phasenraum:

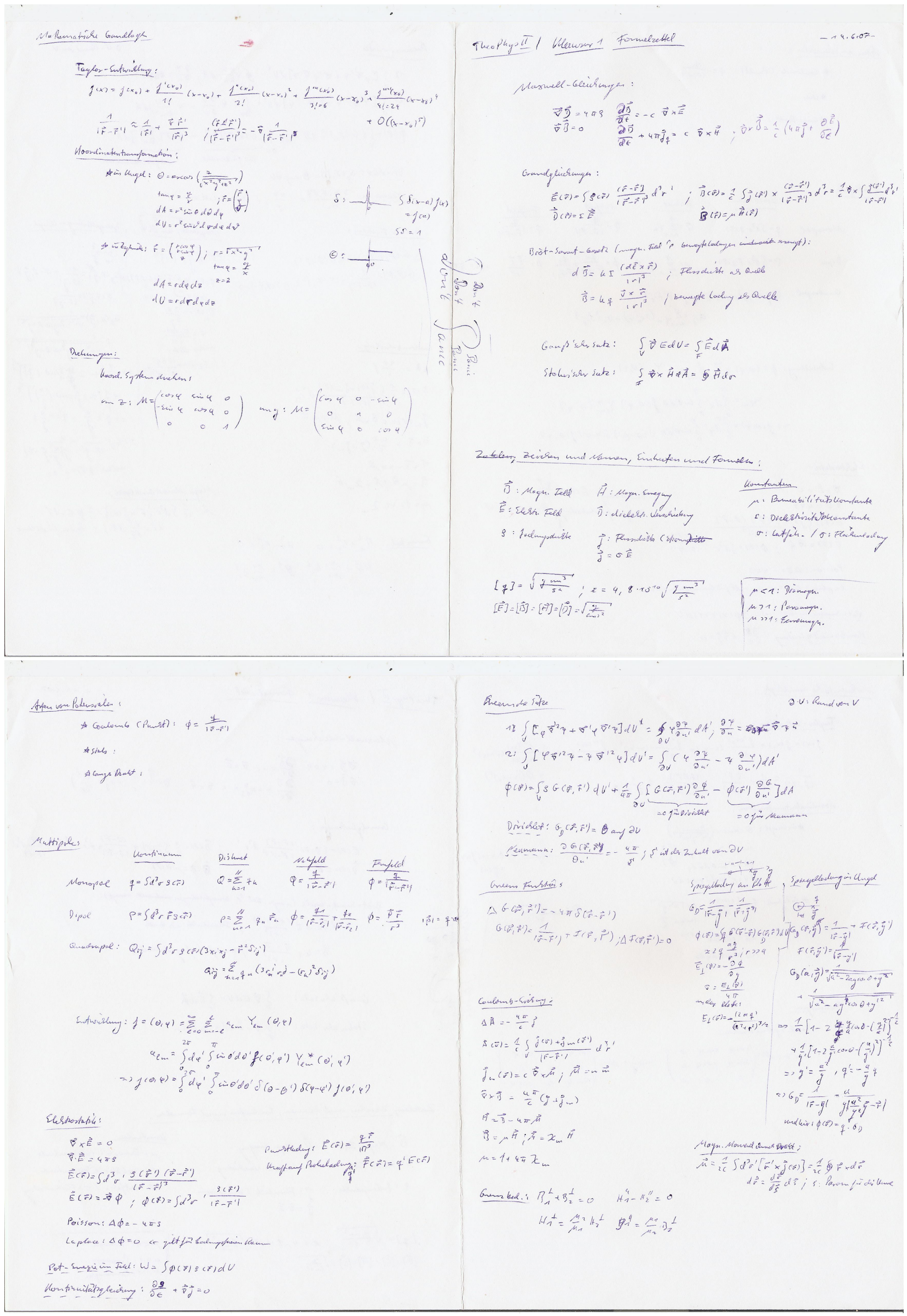


Erzeugende

$F = F_1(q, Q, t)$ $\qquad$ $F = F_3(p, Q, t) + \vec{p}\,\vec{q}$
$F = F_2(q, P, t) - PQ$ $\qquad$ $F = F_4(p, P, t) + (\vec{p}\,\vec{q} - \vec{P}\vec{Q})$

$$\left(p_i - \frac{\partial F}{\partial q_i}\right)dq_i - \left(P_i + \frac{\partial F}{\partial Q_i}\right)dQ_i - \frac{\partial F}{\partial p_i}dp_i - \frac{\partial F}{\partial P_i}dP_i - \left(H - \bar{H} + \frac{\partial F}{\partial t}\right) = 0$$

jeder Term muss individuell 0 sein.


Mathematische Grundlagen

Taylor-Entwicklung:

$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!=6}(x-x_0)^3 + \frac{f''''(x_0)}{4!=24}(x-x_0)^4 + O((x-x_0)^5)$

$\frac{1}{|\vec r-\vec r'|} \approx \frac{1}{|\vec r|} + \frac{\vec r\,\vec r'}{|\vec r|^3}$; $\frac{(\vec r-\vec r')}{|\vec r-\vec r'|^3} = -\vec\nabla\frac{1}{|\vec r-\vec r'|}$

Koordinatentransformation:

in Kugel: $\Theta = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}\right)$, $\tan\varphi = \frac{y}{x}$; $\vec r = \begin{pmatrix} r \\ \varphi \\ \vartheta \end{pmatrix}$

$dA = r^2 \sin\theta\, d\theta\, d\varphi$

$dV = r^2 \sin\vartheta\, dr\, d\varphi\, d\vartheta$

in Zylinder: $\vec r = \begin{pmatrix} r\cos\varphi \\ r\sin\varphi \\ z \end{pmatrix}$; $r = \sqrt{x^2+y^2}$, $\tan\varphi = \frac{y}{x}$, $z = z$

$dA = r\,d\varphi\,dz$

$dV = r\,dr\,d\varphi\,dz$

δ: $\int \delta(x-a) f(x) = f(a)$; $\int\delta = 1$

Θ:

Drehungen:

Koord. System drehen:

um z: $M = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ um y: $M = \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix}$

Don't Panic

TheoPhys II / Klausur 1 Formelzettel — 14.6.07 —

Maxwell-Gleichungen:

$\vec\nabla\vec D = 4\pi\rho$; $\frac{\partial\vec B}{\partial t} = -c\,\vec\nabla\times\vec E$

$\vec\nabla\vec B = 0$; $\frac{\partial\vec D}{\partial t} + 4\pi\vec j_f = c\,\vec\nabla\times\vec H$; $\vec\nabla\times\vec B = \frac{1}{c}\left(4\pi\vec j + \frac{\partial\vec E}{\partial t}\right)$

Grundgleichungen:

$\vec E(\vec r) = \int\rho(\vec r')\frac{(\vec r-\vec r')}{|\vec r-\vec r'|^3}d^3r'$; $\vec B(\vec r) = \frac{1}{c}\int\vec j(\vec r')\times\frac{(\vec r-\vec r')}{|\vec r-\vec r'|^3}d^3r = \frac{1}{c}\vec\nabla\times\int\frac{\vec j(\vec r')}{|\vec r-\vec r'|}d^3r'$

$\vec D(\vec r) = \varepsilon\vec E$; $\vec B(\vec r) = \mu\vec H(\vec r)$

Biot-Savart-Gesetz (magn. Feld, ~~indirekt~~ von bewegten Ladungen erzeugt):

$d\vec B = k I\frac{(d\vec l\times\vec r)}{|r|^3}$; Flussdichte als Quelle

$\vec B = k q\frac{\vec v\times\vec r}{|r|^3}$; bewegte Ladung als Quelle

Gauß'scher Satz: $\int_V \vec\nabla E\,dV = \int_F \vec E\,d\vec A$

Stokes'scher Satz: $\int_F \vec\nabla\times\vec H\,d\vec A = \oint\vec H\,d\vec r$

~~Zahlen,~~ Zeichen und Namen, Einheiten und Formeln:

$\vec B$: Magn. Feld ; $\vec H$: Magn. Erregung

$\vec E$: Elektr. Feld ; $\vec D$: dielektr. Verschiebung

ρ: Ladungsdichte ; $\vec j$: Flussdichte (~~Stromdichte~~), $\vec j = \sigma\vec E$

Konstanten

μ: Permeabilitätskonstante

ε: Dielektrizitätskonstante

σ: Leitfäh. / σ: Flächenladung

$[q] = \sqrt{g\frac{cm^3}{s^2}}$; $e = 4{,}8\cdot10^{-10}\sqrt{g\frac{cm^3}{s^2}}$

$[\vec E] = [\vec B] = [\vec H] = [\vec D] = \sqrt{\frac{g}{cm\,s^2}}$

$\mu < 1$: Diamagn.

$\mu > 1$: Paramagn.

$\mu \gg 1$: Ferromagn.

Arten von Potentialen:

Coulomb (Punkt): $\phi = \frac{q}{|\vec r-\vec r'|}$

Stab:

Langer Draht:

Multipole:

	Kontinuum	Diskret	Nahfeld	Fernfeld
Monopol	$q = \int d^3r\,\rho(\vec r)$	$Q = \sum_{n=1}^{N} q_n$	$\varphi = \frac{q}{\lvert\vec r-\vec r'\rvert}$	$\phi = \frac{q}{\lvert\vec r-\vec r'\rvert}$
Dipol	$p = \int d^3r\,\vec r\rho(\vec r)$	$p = \sum_{n=1}^{N} q_n\vec r_n$	$\phi = \frac{q_1}{\lvert\vec r-\vec r_1\rvert} + \frac{q_2}{\lvert\vec r-\vec r_2\rvert}$	$\phi = \frac{\vec p\,\vec r}{r^3}$

Quadrupol: $Q_{ij} = \int d^3r\,\rho(\vec r)(3x_ix_j - \vec r^2\delta_{ij})$

$Q_{ij} = \sum_{n=1}^{N} q_n(3r_n^i r_n^j - (r_n)^2\delta_{ij})$

Entwicklung: $f(\theta,\varphi) = \sum_{\ell=0}^{\infty}\sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\varphi)$

$a_{\ell m} = \int_0^{2\pi}d\varphi'\int_0^{\pi}\sin\theta' d\theta' f(\theta',\varphi')\,Y^*_{\ell m}(\theta',\varphi')$

$\Rightarrow f(\theta,\varphi) = \int_0^{2\pi}d\varphi'\int_0^{\pi}\sin\theta' d\theta'\,\delta(\theta-\theta')\,\delta(\varphi-\varphi')\,f(\theta',\varphi')$

Elektrostatik:

$\vec\nabla\times\vec E = 0$

$\vec\nabla\cdot\vec E = 4\pi\rho$

$\vec E(\vec r) = \int d^3r'\frac{\rho(\vec r')(\vec r-\vec r')}{|\vec r-\vec r'|^3}$

$\vec E(\vec r) = -\vec\nabla\phi$; $\phi(\vec r) = \int d^3r'\frac{\rho(\vec r')}{|\vec r-\vec r'|}$

Punktladung: $\vec E(\vec r) = \frac{q\vec r}{|r|^3}$

Kraft auf Probeladung q': $\vec F(\vec r) = q' E(\vec r)$

Poisson: $\Delta\phi = -4\pi\rho$

Laplace: $\Delta\phi = 0$ gilt für ladungsfreien Raum

Pot.-Energie im Feld: $W = \int\phi(\vec r)\rho(\vec r)\,dV$

Kontinuitätsgleichung: $\frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec\nabla\vec j = 0$

Green'sche Sätze ; ∂V: Rand von V

1: $\int_V[\varphi\vec\nabla'^2\psi + \vec\nabla'\varphi\,\vec\nabla'\psi]\,dV' = \oint_{\partial V}\varphi\frac{\partial\psi}{\partial n'}dA'$; $\frac{\partial\psi}{\partial n} = \vec\nabla\psi\,\vec n$

2: $\int_V[\varphi\vec\nabla'^2\psi - \psi\vec\nabla'^2\varphi]\,dV' = \int_{\partial V}\left(\varphi\frac{\partial\psi}{\partial n'} - \psi\frac{\partial\varphi}{\partial n'}\right)dA'$

$\phi(\vec r) = \int_V\rho\,G(\vec r,\vec r')\,dV' + \frac{1}{4\pi}\int_{\partial V}[\underbrace{G(\vec r,\vec r')\frac{\partial\phi}{\partial n'}}_{=0\text{ für Dirichlet}} - \underbrace{\phi(\vec r')\frac{\partial G}{\partial n'}}_{=0\text{ für Neumann}}]dA$

Dirichlet: $G_D(\vec r,\vec r') = 0$ auf ∂V

Neumann: $\frac{\partial G(\vec r,\vec r')}{\partial n'} = -\frac{4\pi}{S}$; S ist der Inhalt von ∂V

Greens Funktion:

$\Delta G(\vec r,\vec r') = -4\pi\delta(\vec r-\vec r')$

$G(\vec r,\vec r') = \frac{1}{|\vec r-\vec r'|} + F(\vec r,\vec r')$; $\Delta F(\vec r,\vec r') = 0$

Spiegelladung an Platte:

$G_D = \frac{1}{|\vec r-\vec y|} - \frac{1}{|\vec r+\vec y|}$

$\phi(\vec r) = \int q\,\delta(\vec r'-\vec y)\,G_D(\vec r,\vec r')\,dV$

$\approx 2q\frac{ay}{r^3}$; $r \gg a$

$E_\perp(\vec r) = -\frac{\partial\phi}{\partial y}$

$\sigma = \frac{E_\perp(\vec r)}{4\pi}$

an der Platte: $E_\perp(\vec r) = -\frac{(2aq)}{(\rho^2+a^2)^{3/2}}$

Spiegelladung in Kugel:

$G_D(\vec r,\vec y) = \frac{1}{|\vec r-\vec y|} + F(\vec r,\vec y')$

$F(\vec r,\vec y') = \frac{f}{|\vec r-\vec y'|}$

$G_D(a,\vec y) = \frac{1}{\sqrt{a^2-2ay\cos\theta+y^2}} + \frac{f}{\sqrt{a^2-ay'\cos\theta+y'^2}}$

$\Rightarrow \frac{1}{a}\left[1-2\frac{y}{a}\cos\theta-\left(\frac{y}{a}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} + \frac{f}{y'}\left[1-2\frac{a}{y'}\cos\theta-\left(\frac{a}{y'}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$

$\Rightarrow y' = \frac{a^2}{y}$, $q' = -\frac{a}{y}q$

$\Rightarrow G_D = \frac{1}{|\vec r-\vec y|} - \frac{a}{y\left|\frac{a^2}{y^2}\vec y-\vec r\right|}$

und hier: $\phi(\vec r) = q\cdot G_D$

Coulomb-Eichung:

$\Delta\vec A = -\frac{4\pi}{c}\vec j$

$\vec A(\vec r) = \frac{1}{c}\int_V\frac{\vec j(\vec r')+\vec j_m(\vec r')}{|\vec r-\vec r'|}d^3r'$

$\vec j_m(\vec r) = c\,\vec\nabla\times\vec M$; $\vec M = n\,\vec m$

$\vec\nabla\times\vec B = \frac{4\pi}{c}(\vec j+\vec j_m)$

$\vec H = \vec B - 4\pi\vec M$

$\vec B = \mu\vec H$; $\vec M = \chi_m\vec H$

$\mu = 1 + 4\pi\chi_m$

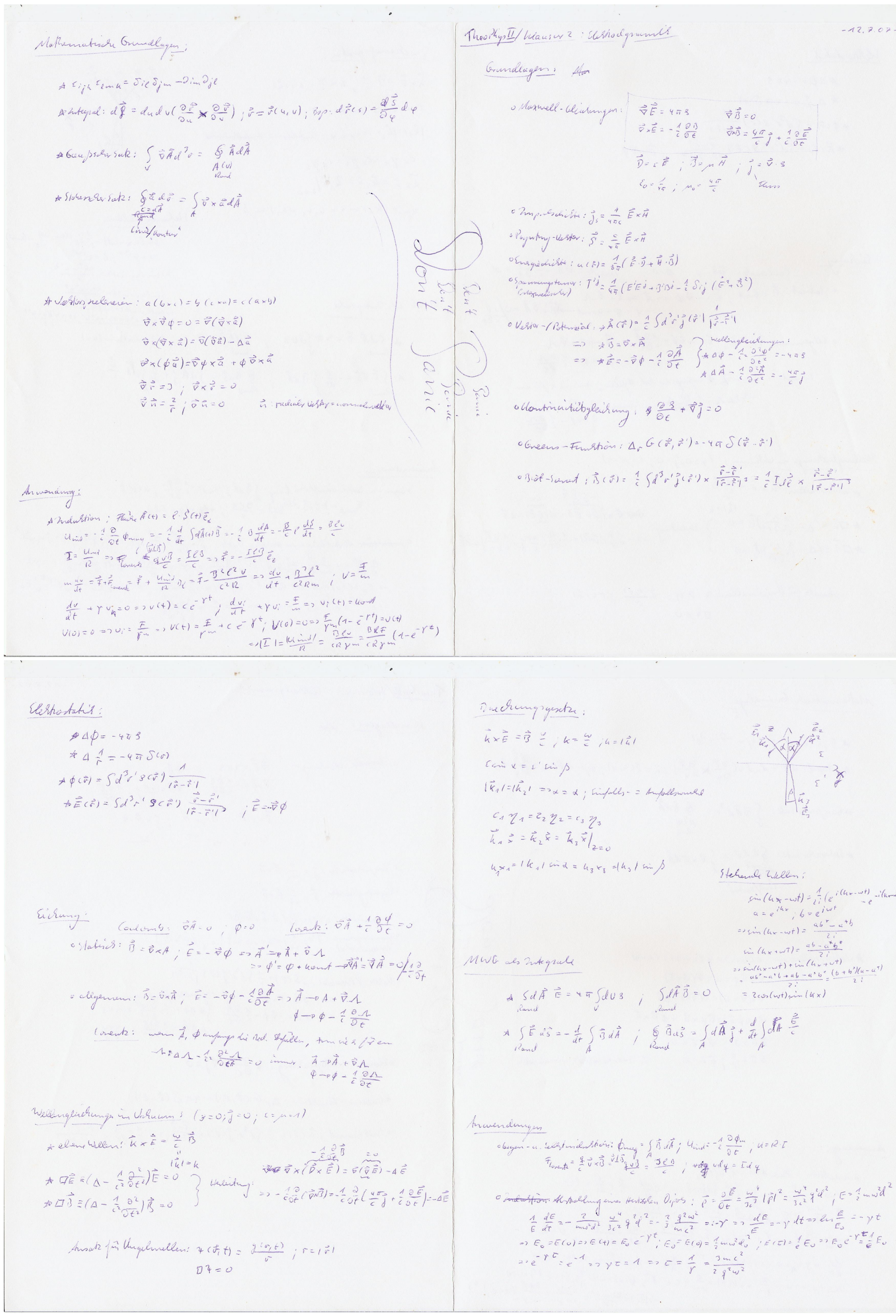
Magn. Moment einer Drahtschleife:

$\vec m = \frac{1}{2c}\int d^3r'[\vec r'\times\vec j(\vec r')] = \frac{1}{2c}\oint\vec r\times d\vec r$

$d\vec r = \frac{d\vec r}{d s}ds$; s: Param. für die Kurve

Grenzbed.: $B_1^\perp + B_2^\perp = 0$; $H_1^\parallel - H_2^\parallel = 0$

$H_1^\perp = \frac{\mu_2}{\mu_1}H_2^\perp$; $B_1^\parallel = \frac{\mu_1}{\mu_2}B_2^\parallel$



Zu Theophys 3 (Quantenmechanik) habe ich leider keinen Zettel mehr gefunden.

Ich hoffe, Du hattest Spaß beim Lesen! Das ist die höchste Dichte an Infos aus meinem Studium, die ich produzieren kann $\ddot\smile$

Solltest du selbst Physiker sein und noch ein paar deiner eigenen Formelzettel haben, würde ich mich freuen, wenn du mir erlauben würdest, sie hier einzustellen, um die Lücken zu füllen oder eine andere Sicht zu geben. Schreib mir bitte unter arne_ bab -ät- web.de

Die Zettel sind übrigens wie alles andere hier frei lizensiert (cc by-sa oder GPLv3+). Falls du ein freies Spiel schreibst und dafür Verrückte-Wissenschaftler-Notizen brauchst, fühl Dich frei, sie zu verwenden $\ddot\smile$.