Exphysik - Vordiplom-Zusammenfassung

Vorlesung: Prof. Dr. Kowarschick / Wesch
Zusammenfassung: Fabian Stutzki

2. September 2006

Die Zusammenfassung bezieht sich auf Experimentalphysik 1 bis 3. Sie dient der Vorbereitung auf das Vordiplom. Fehler (auch bei kleineren Tipfehlern) und Anmerkungen bitte an fabian.stutzki@uni-jena.de.

Inhaltsverzeichnis

1 Physikalische Grundgrößen

1.1 SI-Einheiten

Meter, Sekunde, Kilogramm, Ampere, Kelvin, Candela, Mol

2 Dynamik

Kraft und Masse, Newtonsche Axiome, Arbeit, Energie, Impuls

2.1 Stöße

2.2 starrer Körper

Mechanik, Dynamik, Kreisel

2.3 Bewegte Bezugssysteme

2.4 deformierbare Festkörper

Elastizitätsmodul E: Querschnitt q, Ausdehnung $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$

$$F = E \cdot q \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

mit Zugspannung [Druck] $\frac{F}{q} = \sigma$

$$\sigma = E\varepsilon$$

Querkontraktion:

$$\Delta V = (L + \Delta L) \cdot (d - \Delta d) - L \cdot d^2$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta L}{L} - 2\frac{\Delta d}{d}$$

Man definiert als Querkontraktionszahl oder Poissonzahl

$$\mu = \left(\frac{\Delta d}{d}\right)\left(\frac{\Delta L}{L}\right)$$

Kompressionsmodul: ???

Scherung: Scherspannung

$$\tau = \frac{F_{tang}}{d^2}$$

Bei einem Quader mit Schub- oder Schermodul G und Winkel α

$$\tau = G\alpha$$

Biegung: ???

Oberflächenspannung: $\varepsilon = \frac{\Delta W}{\Delta A}$, für Lamelle mit zwei Oberflächen $\sigma = \frac{F}{2L}$ und

$$\Delta W = F\Delta s = \varepsilon L 2\Delta s = \varepsilon\Delta A$$

$$\Rightarrow \quad \sigma = \varepsilon$$

Seifenblase, Abhängigkeit des Innendrucks vom Radius (kleine bläst große Seifenblase auf)

$$\begin{aligned}
\varepsilon\ \Delta A &= \Delta p\ \Delta V \\
\varepsilon\ 2 \cdot 8\pi r\Delta r &= \Delta p\ 4\pi r^2\Delta r \\
\Rightarrow \quad \Delta p &= \frac{4\varepsilon}{r}
\end{aligned}$$

2.5 Reibung

Haftreibung: hängt von Oberfläche und Gewicht ab, nicht von Auflagefläche, mit Normalkraft auf Unterlage F_N ergibt sich

$$F_H = \mu_H F_N$$

oder zur Bestimmung auf einer schiefen Ebene

$$\mu_h = \frac{F_H}{F_N} = \tan \alpha_H$$

Gleitreibung: Objekt einmal in Bewegung versetzt ($\mu_G < \mu_H$)

$$F_G = \mu_G F_N$$

Rollreibung: noch kleiner beim Rollen mit $\mu_R = r \tan \alpha_R$

$$D_R = \mu_R F_N$$

2.6 Hydrostatik

Druck, Auftrieb, Schweredruck, Grenzflächeneffekte

2.7 Aerostatik

Barometrische Höhenformel: von h auf $h + dh$, für ideales Gas bei konstanter Temperatur

$$p \sim \frac{1}{V} = \frac{\rho}{M} \Rightarrow \quad \frac{p}{\rho} = const = \frac{p_0}{\rho_0}$$

$$\begin{aligned} dp &= -\rho \; g \; dh \\ dp &= -p \frac{\rho_0}{p_0} \; g \; dh \\ \Rightarrow \quad p(h) &= c \cdot e^{-\frac{\rho_0}{p_0} \; g \; h} \end{aligned}$$

2.8 Hydro- und Aeromechanik

Kontinuitätsgleichung, Bernoulli-Gleichung, Hydrodynamisches Paradoxon, Kavitation, Strömungsimpuls, Wirbel, reale Strömungen, laminare Strömung, turbulente Strömung, Widerstand in Strömungen, Magnus-Effekt

Strömungen: Kräfte auf ΔV

- Druckdifferenzen $F_P = -\mathbf{grad}\, p \cdot \Delta V$
- Schwerkraft $F_g = \Delta m \cdot g$
- Strömungsgeschwindigkeit nicht konstant $\Rightarrow$ Reibungskräfte
- elemag Felder bei geladenen Teilchen

Eulergleichung:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} \underbrace{=}_{\text{für ideale Fl}} g - \frac{1}{\rho}\mathbf{grad}\,\mathbf{p}$$

Kontinuitätsgleichung: Erhaltung des Flusses

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{div} \underbrace{\mathbf{j}}_{\rho\mathbf{u}} = 0$$

für inkompressible Medien ist $\rho = const$ und damit

$$\rho u_1 A_1 = \rho u_s A_2$$

Es folgt eine Geschwindigkeitserhöhung bei kleinerem Querschnitt (enger), damit steigt die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2}\Delta m u^2 = \frac{1}{2}\rho u^2 \Delta V$ und der Druck nimmt ab (wegen Energieerhaltung, Arbeit um ΔV gegen Druck p zu verschieben $\Delta W = pA\Delta x = p\Delta V$). Es folgt aus der Energieerhaltung für eine ideale und damit reibungsfreie Flüssigkeit die *Bernoulli-Gleichung*:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = const = p_o$$

mit Staudruck $p_s = \frac{1}{2}\rho u^2 = p_0 - p$, statischer Druck $p = p_0 - p_s$, Gesamtdruck p_0

Hagen-Poiseuille: z Fließrichtung, Rohr mit Radius R,$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\partial p}{\partial z}$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\pi R^4}{8\eta}\frac{\Delta p}{l}$$

Stokes-Reibung: Schwerkraft$-$Auftrieb+Reibung$=0$ (nach beschleunigtem Eintauchen und erreichen der konstanten Endgeschwindigkeit u_0)

$$(\rho_{Kugel} - \rho_{fl})\frac{4}{3}\pi r^3 g - 6\pi\eta r u_0 = 0$$

Navier-Stokes-Gleichung:

$$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\right)\mathbf{u} = -\mathbf{grad}\, p + \rho g + \eta\Delta\mathbf{u}$$

3 Schwingungen

freie ungedämpfte, freie gedämpfte Schwingung,Kriechfall, Schwingfall, aperiodischer Grenzfall, erzwungene Schwingung, Überlagerung, Fourieranalyse, gekoppelte Schwingungen, Eigenschwingung, Erzeugung ungedämpfter Schwingungen, nichtlineare Schwingungen

harmonischer Oszilator:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -Dx \\ \ddot{x} + \omega_0^2 x &= 0 \\ \Rightarrow \quad x(t) &= A\cos(\omega_0 t) + B\sin(\omega_0 t) = Ce^{i\omega_0 t} + C^* e^{-i\omega_0 t} \end{aligned}$$

Gesamtenergie bleibt im zeitlichen Mittel konstant

$$\begin{aligned} E_{kin} + E_{pot} &= \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \int_0^x F\,dx = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}Dx^2 \\ \langle E_{kin} + E_{pot} \rangle &= \frac{1}{T}\int_0^T \left[\frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}Dx^2\right] dt = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \end{aligned}$$

gedämpfter harmonischer Oszilator: mit e^λ-Ansatz folgt $w = \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 &= 0 \\ x(t) = e^{-\gamma t}\left(Ce^{i\omega t} + C^* e^{-i\omega t}\right) \end{aligned}$$

schwache Dämpfung: $\gamma < \omega_0$, man definiert logaritmisches Dekrement

$$\frac{x(t+T)}{x(t)} = e^{-\gamma T} \Rightarrow \quad \delta = \gamma T = \ln\frac{x(t+T)}{x(t)}$$

starke Dämpfung: Kriechfall $\omega_0 < \gamma$, aperiodischer Grenzfall:$\omega_0 = \gamma$

Lissajous-Figuren: Überlagerung zweier Wellen auf zwei Dimensionen, ergibt für Phasendifferenz $\Delta\varphi = 0°$ Gerade nach rechts oben, $\Delta\varphi = 90°$ Kreis, $\Delta\varphi = 180°$ Gerade nach links oben

erzwungene Schwingung: hinkt Erreger hinterher

3.1 Wellen

Wellengleichung, Interferenz, Wellen gleicher / unterschiedlicher Frequenz, Wellenpakete, stehende Wellen, Wellenausbreitung, Hhuygensches Prinzip, Reflexion, Beugung, Intensitätsverteilung, Doppler-Effekt, Oberflächenwellen

eindimensionale Wellen in z-Richtung, ξ beliebige Abweichung vom Gleichgewichtszustand (Druckänderung, Ausdehnung, Bewegung)

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$$

mit möglichen Lösungen

$$\xi(z,t) = A\sin(\omega t - kz) = Ce^{i(\omega t - kz)}$$

3D Ebene Wellen mit Ebenengleichung $\mathbf{kr} = 0$

$$\begin{aligned} \Delta\xi &= \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} \\ \xi(\mathbf{r},t) &= \mathbf{A}e^{i(\omega t - \mathbf{kr})} = \mathbf{A}f(\omega t - \mathbf{kr}) \end{aligned}$$

3D Kugelwellen skalare Multiplikation kr, in r-Richtung laufend

$$\xi(r,t) = f(r)\sin(\omega t - kr) = \frac{A}{r}e^{i(\omega t - kr)}$$

longitudinale Wellenen: $\sigma = E\frac{\partial\xi}{\partial z}$, für Gase $E = p$

$$\begin{aligned} dF &= A(\sigma + d\sigma - \sigma) = Ad\sigma = A\frac{\partial\sigma}{\partial z}dz = AE\frac{\partial^2\xi}{\partial z^2}dz \\ dF &= \Delta m\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = \rho\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}Adz \\ \Rightarrow \quad \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} &= \frac{E}{\rho}\frac{\partial^2\xi}{\partial z^2} \end{aligned}$$

transversale Wellen: analoge Betrachtung mit Scherung kommt zu $E \to G$

Flüssigkeitswellen: nur longitudianal möglich (da Scherungsmodul $G = 0$), an Grenzflächen auch transversale Wellen durch Schwerkraft und Oberflächenspannung möglich (Wasserwellen an der Küste)

Gruppengeschwindigkeit: mit $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ und $v_{ph} = \frac{\omega}{k}$

$$\begin{aligned} v_{gr} = \frac{d\omega}{dk} &= \frac{d}{dk}(v_{ph}k) \\ &= v_{ph}\frac{dk}{dk} + k\frac{dv_{ph}}{dk} \\ &= v_{ph} - \lambda\frac{dv_{ph}}{d\lambda} \end{aligned}$$

Interferenz: stationäre Überlagerung zweier Wellen (möglich, da Wellengleichung linear und somit Addition zweier Lösungen wieder Lösung), nur möglich für gleichn Frequenzen ω und Phasendifferenz $\Delta\varphi(vr)$ muss zeitlich konstant sein (räumlich kohärent).

Huygensches Prinzip: Jeder Punkt einer Phasenfläche ist wieder Ausgang neuer Elementarwellen ???

- ohne Bregrenzung: geradlinige Wellenausbreitung (durch Interferenz existiert zu jeder anderen Wellenausbreitung eine Welle mit Phasendifferenz π)
- Beugung für $d \approx \lambda$ oder $d < \lambda$ (d Öffnungsbreite)

Fermatsches Prinzip: Welle nimmt Weg mit minimaler Laufzeit

Reflexion und Brechnung: Von Medium 1 nach 2 ???

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Stehende Wellen: durch Reflexion erzeugt (Phasensprung φ)

$$\begin{aligned}\xi = \xi_1 + \xi_2 &= A\left[\cos(\omega t - kz) + \cos(\omega t - kz + \varphi)\right] \\ &= 2A\cos\left(kz - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right)\end{aligned}$$

Dopplereffekt: aus Welle $\xi = \cos(\omega t - \mathbf{kr})$ und $\mathbf{r} = \mathbf{u}_B t + \mathbf{r}_0$

$$\omega = \omega_0 \frac{\omega_0 - \mathbf{ku}_B}{\omega_0 + \mathbf{ku}_Q}$$

Beobachtbar als Machscher Kegel bei Überschallbewegung

3.2 Schallwellen

Schallquellen, Schallwellen an Grenzflächen, Physiologische Akustik

4 Elektrizität und Magnetismus

4.1 Elektrostatik

Ladung, Coulomb-Gesetz, Feldstärke, elektrischer Fluss, Potential, Dipol, Leiter, Influenz, Kapazität, Elektrometer, Dielektrika, Polarisation, Grenzflächen, Energie

Coulombsches Gesetz:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 A_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

Für die Kraft am Punkt **R** außerhalb einer Ladungsverteilung

$$\mathbf{F} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \int_V \rho(\mathbf{r}) \frac{\mathbf{R}-\mathbf{r}}{|\mathbf{R}-\mathbf{r}|^3}\, d^3r$$

Elektrisches Feld: mit $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ ergibt sich für eine Punktladung Q

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

Durch Betrachtungen des Kraftflusses ergibt sich:

$$\mathbf{E} = -grad\varphi \qquad \mathbf{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Arbeit:

$$W = \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{F}\,\mathbf{ds} = q \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{E}\,\mathbf{ds}$$

Elektrischer Dipol: $\mathbf{p} = q\mathbf{d}$, Dipolpontential $\varphi_D(\mathbf{R}) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mathbf{dR}}{R^3} = -\mathbf{d} \cdot \mathbf{grad}\,\varphi_M$, Drehmoment im homogenen Feld $\mathbf{D} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$ und im inhomogenen Feld $\mathbf{F} = Q[\mathbf{E}(\mathbf{r}+\mathbf{d}) - \mathbf{E}(\mathbf{r})] = \mathbf{p}\nabla\mathbf{E}$, potentielle Energie $W_{pot} = -\mathbf{pE}$

Quadrupol: $\varphi_4(\mathbf{R}) = \varphi_D(\mathbf{R} + \frac{1}{2}\mathbf{a}) + \varphi_D(\mathbf{R} - \frac{1}{2}\mathbf{a}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{grad}\,\varphi_D$

Influenz: Durch äußeres Feld wirkt Kraft auf Ladungen im Leiter, bis Gegenfeld Kraft kompensiert$\Rightarrow$ Leiterinnenraum feldfrei

Kondensator: ??? $Q = CU$, Energie $W = \frac{1}{2}CU^2$

Dielektrika: $\varepsilon_0 \to \varepsilon\varepsilon_0$ durch Polarisation in Isolatoren erzeugt, Feldstärke im Dielektrikum kleiner $E_D = E_{Vak} - \frac{1}{\varepsilon_0}P$

4.2 Stationäre Ströme

Gleichstrom, Widerstand, Kirchhoffsche Gesetze, Arbeit, Leistung

Strom:

$$I = \dot{Q} = \int_A \mathbf{j}\,\mathbf{dA} = nq\mathbf{A}\mathbf{v}$$

ferner Gaußscher Satz $\int_{(A)} \mathbf{j}\,\mathbf{dA} = \int_V \mathbf{div}\,\mathbf{j}\,dV$ und es folgt Kontinuitätsgleichung

$$\mathbf{div}\,\mathbf{j} = -\dot{\rho}$$

In Leitern $\mathbf{j} = \frac{nq^2}{m}\tau_s\mathbf{E} = \sigma_{el}\mathbf{E}$ und es zeigt sich, dass elektrische Leitfähigkeit proportional zur Wärmeleitfähigkeit (*Wiedemann-Franz-Gesetz*) mit $a = 3\left(\frac{k}{e}\right)^2$

$$\frac{\lambda}{\sigma_{el}} = aT$$

Der Widerstand eines Leiters wird definiert zu $R = \frac{1}{\sigma_{el}}\frac{L}{A}$, womit sich für $\sigma_{el} \neq f(I,U)$ das Ohmsche Gesetz ergibt

$$U = RI$$

Leistung:

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = U\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

Kirchhoffsche Maschensätze: in einem Knoten $\sum I_k = 0$, für eine Masche $\sum U_k = 0$

4.3 Magnetisches Feld

Permanentmagnete, Magnetfeld stationärer Ströme, Durchflutungsgesetz, Biot-Savartsches Gesetz, magnetischer Fluss, Kräfte, Leiterschleife, Lorentzkraft

Dipol: ???

Vektorpotential: ???

Lorentz-Kraft: ???

Hall-Spannung: ???

4.4 Elektromagnetische Induktion

Induktionsgesetz, Selbstinduktion, Lenzsche Regel, Energie

Induktionsgesetz:

$$\begin{aligned} U_{ind} &= -\dot{\Phi}_m = -\frac{\partial}{\partial t}\int_A B\,\mathbf{df} \\ \mathbf{rot}\,\mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

Verschiebungsstrom: Notwendige Ergänzung von Maxwell, zeigt sich beispielsweise in einem Stromkreis mit Kondensator bei Differenz zweier Flächen einmal durch den Leiter und einmal durch den Kondensator

$$\mathbf{rot}\,\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

4.5 Materie im Magnetfeld

Permeabilitätszahl, magnetische Polarisation, Diamagnetismus, Paramagnetismus, Ferromagnetismus

4.6 Maxwellsche Gleichungen

4.7 Wechselstrom

Arbeit, Leistung, Momentanleistung, Bauteile, komplexe Widerstände, Induktivität, Kapazität, Reihen- und Parallelschaltung, Mehrphasenstrom, Drehstrom, Transformator, Generatoren, Motoren, Elektromagnetische Schwingungen, Skin-Effekt, Elektromagnetische Wellen, Energiestromdichte, Leitungsgeführte Wellen

Wechselstrom: ???

Motoren und Generatoren: ???

Drehstrom: ???

4.8 Ladungstransportprozesse

Gasentladung, Entladungstypen, Glimmentladung, Bogenentladung, Plasma, Photoemission, Ladungstransport im Hochvakuum, Elektrolytische Leitung (Flüssigkeiten), Elektrochemische Spannungsquellen, Energiebänder (Festkörper), Halleffekt, Quanten-Halleffekt, Halbleiter, Supraleitung, Thermoelektrizität

5 Optik

5.1 optisches Strahlungsfeld

Strahlungsphysikalische Größen, Strahlungsleistung, Raumwinkel, Detektoren, Photometrische Größen (Lichttechnisch)

5.2 Geometrische Optik

Reflexion, Brechung. Totalreflexion, numerische Apertur, Fermatsches Prinzip, optische Abbildung, Kugelflächen, Bildkonstruktion an Linsen, Dicke Linse, Strahlmatrizen, Blenden, Feldblende, Abbildungsfehler: sphärische Aberation, Öffnungsfehler, Koma, Asymmetriefelder, Astigmatismus, Verzeichnung

Voraussetzung: Lichtbündelquerschnitt $\gg$ Wellenlänge $\Rightarrow$ Beugung vernachlässigt!

Lochblende: ???

sphärischer Hohlspiegel: Brennweite $f = R\left[1 - \frac{1}{2\cos\alpha}\right] \approx \frac{1}{2}R$ für paraxiale Strahlen, bei Gegenstandsweite g und Bildweite b

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

konkav wenn M und Gegenstand auf gleicher Seite, konvex wenn auf entgegengesetzten Seite

Parabolspiegel: Ebene Welle wird zur Kugelwelle, optischer Weg von $x = const$ zu F gleich für alle Strahlen $y^2 = 4fx$

Prismen: $\delta = \alpha_1 - \beta_1 + \alpha_2 - \beta_2 = 2\alpha - \gamma$ mit α Winkel zur Flächennormalen, γ Prismenwinkel, für Glas $n = 1,5$ rot, grün, blau

Gekrümmte Fläche: $n_1 < n_2 \Rightarrow$ für achsennahe Strahlen

$$f_2 = \frac{n_2}{n_2 - n_1}R$$

und

$$\frac{n_1}{a} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2}{f_2} = -\frac{n_1}{f_1}$$

Dünne Linsen:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{f}$$

Abbildungsmaßstab

$$M = \frac{B}{A} = -\frac{b}{a} = \frac{f}{f-a}$$

Dicke Linsen: wenn a und b zur jeweiligen Hauptebene gemessen, gilt auch hier

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Linsensystem: zwei Linsen mit Abstand d

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Abbildungsfehler:

- chromatische Aberration: Brennweite $f = f(\lambda)$ weil $n(\lambda)$, Korrektur durch Achromat (zwei Brechzahlen kombinieren)
- sphärische Aberration:$f = f$(Abstand zur optischen Achse), Korrektur durch Blende (enges Lichtbündel), plan-konvexe Linse $C|$, Linsensystem, nicht-sphärische Linse
- Koma: Schiefer Lichteinfall
- Astigmatismus: schiefes Lichtbündel (Kreis hinter Abbildung Ellipse, Punkt wird zu Bildlinie), Korrektur durch Zylinderkrümmung der sphärischen Linse
- Bildfeldwölbung: Unterschiedliche Brechung (Ebene auf gewölbte Ebene abgebildet)

Aplamatische Abbildung: wenn Abbesche Sinusbedingung mit u_G und u_B Öffnungswinkeln, $M = \frac{|B|}{|A|}$ Abbildungsmaßstab erfüllt

$$\frac{\sin u_G}{\sin u_B} = \frac{|B|}{|A|} = M = const$$

Einfaches Beispiel bei Durchlaufen einer Linse, einmal parallel zur optischen Achse und einmal unter Winkel

$$A \sin u_G = \Delta s_G \stackrel{!}{=} \Delta s_B = B \sin u_B$$

Matrixmethoden: für paraxiale Näherung, x_o Ausgangsgröße, x_i Eingangsgröße, n Brechzahl, α Winkel zur optischen Achse, r Abstand zur optischen Achse

$$\begin{pmatrix} n_o\alpha_o \\ r_o \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} n_i\alpha_i \\ r_i \end{pmatrix}$$

Translation

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{x_2-x_1}{n} & 1 \end{pmatrix}$$

Brechung

$$B = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{n_2-n_1}{R}r \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Transformation an dünner Linse

$$M_{Linse} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{f} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Geometrische Optik an Erdatmosphäre: Ablenkung von Licht da n(Dichte), die sich mit der Höhe h ändert. Im Regenbogen entsteht Hauptregenbogen durch einfache, der Nebenbogen durch doppelte Totalreflexion

5.2.1 Optische Instrumente

Auge, Mikroskop, Fernrohr, Lupe, Teleskop, Fotoapparat

Auge: adaptives optisches Instrument, Sehwinkel $\tan\frac{\varepsilon}{2} = \frac{1}{2}\frac{G}{s}$ oder näherungsweise $\varepsilon \approx \frac{G}{s}$, deutliche Sehweite 25 cm, womit $\varepsilon_0^{min} \approx 1' \Rightarrow 70\mu m$ noch auflösbar

Lupe: Vergrößerung wird definiert als

$$V = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument } \varepsilon}{\text{Sehwinkel ohne Instrument } \varepsilon_0}$$

Schärfentiefe: Bereich in dem Bildfläche maximal doppelte Fläche der optimalen Einstellung haben.
Für die Lupe ergibt sich $V = \frac{s_0}{f}$, falls Gegenstand im Abstand der Brennweite f

Mikroskop: Objektiv erzeugt Zwischenbild, das vom Okular als Lupe vergrößert wird.

$$\tan\varepsilon = \frac{D_1}{f_2} = \frac{D_0 b}{g f_2}$$

maximaler Öffnungswinkel: numerische Apertur $NA = 2\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{D}{f}$, begrenzt durch Beugung wie beispiel zweier Spalte zeigt: 0. Beugungsordnung enthält keine Information über Spaltabstand, mindestens 1. Ordnung notwending: $d\sin\vartheta_m = 1,22m\lambda \Rightarrow \quad NA \geqslant 2\sin\vartheta_1 = \frac{1,22\lambda}{2nd}$

Fernrohr: L_1 große Brennweite $\Rightarrow$ Zwischenbild mit L_2 als Lupe betrachten

$$V = \frac{f_1}{f_2}$$

Durch Beugung ist Auflösung begrenzt: Winkel zwischen zwei Sternen $\delta_{min} = 1,22\frac{\lambda}{D}$, Winkelauflösungsvermögen $R_W = \frac{1}{\delta_{min}}$

Spektrographen Prismen: für $\alpha = 60°$ an gleichseitiges Prisma ergibt sich spektrales Auflösungsvermögen zu

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{1}{4}\frac{L}{\sqrt{1-\frac{n^2}{4}}}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}$$

Spektrographen Gitter: Um zwei Maxima unterscheiden zu können, muss das 2. Maximum mindestens im 1. Nebenminimum des anderen liegen (*Rayleigh-Kriterium*). Mit Breite der Austrittspupulle $a = Nd\cos\beta$ (d Furchenabstand, N Anzahl der beleuchteten Furchen, m Interferenzordnung)

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \leqslant mN$$

5.3 Wellenoptik

Interferenz, Kohärenz, Doppelspalt, Young-Interferometer (Wellenfrontteilung), Michelson-Interferometer (Amplitudenteilung), Interferenz an dünnen Schwichten, Keilinterferenz, Vielstrahlinterferenz, Fabry-Perot-Interferometer, Rayleigh, Beugung, Huygens-Fresnelsches-Prinzip, Kirchhoffsches Beugungsintegral, Frauenhofer-Beugung, Beugungsgitter, Fresnel-Beugung, Auflösungsvermögen, Abbbe-Theorie des Mikroskops

Brechungsindex n: Anregung der Atome im Medium (gedämpfter harmonischer Oszilator), erzeugen Phasenversatz und Überlagerung zu geringerer Geschwindigkeit

$$c_{med} = \frac{c_{cak}}{n}$$

Dabei ist $n = n' + i\kappa$ komplex und abhängig von Dichte, Frequenzdifferenz (Resonanzfrequenz der Moleküle zu eingestrahlter Frequenz).

Der Imaginärteil beschreibt die Absorption, so dass mit der Intensität $I = \varepsilon_0 c E^2$ und Absorptionskoeffizient $\alpha = 2k_0\kappa$ folgt:

$$I = I_0 e^{\alpha \Delta z}$$

Dispersion: Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge oder Frequenz mit $k = k_0 n'$ und $v_{Ph} = \frac{c}{n'}$

$$\frac{\partial \omega}{\partial k} = v_G = v_{Ph} + k\frac{\mathrm{d}v_{Ph}}{\mathrm{d}k} = \frac{c}{n' - \omega\frac{\mathrm{d}n'}{\mathrm{d}\omega}}$$

normale Dispersion für $\frac{\mathrm{d}n'}{\mathrm{d}\omega} > 0$ und anormale Dispersion für $\frac{\mathrm{d}n'}{\mathrm{d}\omega} < 0$ (dann Imaginärteil maximal, Absorption maximal)

5.3.1 Interferenz

zeitlich kohärent: $\Delta\varphi = \varphi_j - \varphi_k < 2\pi$ während der Beobachtungszeit Δt. Ist $Deltat_c$ maximal nennt sich Kohärenzzeit und es gilt $\Delta t_c = \frac{1}{\Delta\nu}$. Kohärente Wellen lassen sich durch phasenstarr gekoppelte Sender oder Aufspalten in Teilwellen (Zweistrahl/Vielstrahl) erzeugen.

Fresnel-Spiegelversuch: ???

Young-Doppelspalt: auch im inkohärenten ausgedehnten Lichtquellen möglich, so lange $\Delta s_{max} < \frac{\lambda}{2}$ D Abstand Quelle-Schirm, d Spaltabstand, b Quellengröße) erfüllt:

$$\Delta s_{max} = \sin\vartheta b = \frac{bd}{2D} \Rightarrow \quad \frac{d}{\lambda} < \frac{D}{b}$$

plan-parallele Platten bei Beobachtung der Reflektierten Wellen: $\Delta s = n(\overline{AB} + \overline{BC}) - \overline{AD} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}$ und damit

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta s - \pi$$

Ein Phasensprung von π entsteht durch die Reflexion des einen Wellenteils an festem Ende.

Michelson-Interferometer: Die einlaufende Welle $E_i = A_i \cos(\omega t - kz)$ teilt sich in zwei Wellen mit Phasendifferenz auf, sodass sich für die gemittelte Intensität mit $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta s$ und $I_0 = c\varepsilon_0 E_i^2$ ergibt

$$\bar{I} = RTI_0(1 + \cos\Delta\varphi)$$

Vielstrahl-IF an plan-parallelen Platten: Überlagerung vieler Teilwellen

$$A = A_1 + \sum_{m=2}^{p} A_m e^{i(m-1)\Delta\varphi}$$

womit sich die Intensität der reflektierten und transmittierten Wellen mit $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ zu

$$I_R = I_0 \frac{F \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}} \qquad I_T = I_0 \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}$$

ergibt.

Fabry-Perot-IF: bei senkrechtem Einfall $\alpha = 0$ ergibt sich $\Delta s = 2nd$, Wellenlängen $\lambda = \frac{2nd}{m}$ werden maximal durchgelassen, Finesse $F^* = \frac{\delta\nu}{\Delta\nu} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ mit Reflexionsvermögen R, freiem Spektralbereich $\delta\nu = \lambda_m - \lambda_{m+1}$ und Halbwertbreite $\Delta\nu$

Dielektrischer Spiegel: Übereinander Schichten unterschiedlicher Brechzahlen zur Erhöhung der Reflexion aus bis zu $R = 0,99995$ (reine Metallbeschichtung nur $R < 0,95$)

Antireflexschicht: Dielektrische Schich mit destruktiver Interferenz. normales Glas $R = 0.04$, 1x mit $\lambda/4$-Beschichtung $R = 0$ nur für eine Wellenlänge, Doppelbeschichtung mit $\lambda/2$ und darunter $\lambda/4$ ergibt bereits $R \approx 0,01$

5.3.2 Beugung

Licht erscheint auch im Schatten, Frauenhofer-Fall im Fernfeld $z \gg \frac{b^2}{\lambda}$, Fresnel-Beugung im Nahfeld $z \ll \frac{b^2}{\lambda}$, b Spaltbreite

am Spalt: Frauenhofer-Beugung, für 1. Minimum Strahl in zwei Hälften aufteilen, sodass jeder Lichtstrahl einen Partner zur destruktiven Interferenz erhält

$$\frac{\lambda}{2} \stackrel{!}{=} \Delta s = \sin\vartheta \frac{b}{2} \Rightarrow \quad \sin\vartheta = \frac{\lambda}{b}$$

Beugungsgitter: Beugung bringt Licht in die Schattengebiet und ermöglich somit die Interferenz der einzelnen Strahlen, Maxima bei $d \sin\vartheta = \Delta s = m\lambda$, $I(\vartheta) = I_0 \cdot$Beugung am Einzelspalt$\cdot$Interferenz.

Fresnel-Beugung im Nahfeld, ausgehende Kugelwellen einer Punktquelle, es ergeben sich Kreise auf den Wellenebenen mit $\Delta s = const$ für einen Punkt P. Bei Abdecken der 1. Fresnel Zone mit Durchmesser $2\sqrt{r_0 \lambda}$ fällt auf P die doppelte Feldstärke E (damit die vierfache Intensität)

5.4 Polarisation

durch Reflexion und Beugung, Interferenzen im divergenten Licht, (induzierte) Doppelbrechung, optische Aktivität

5.5 Holographie

Aufnahme von Amplitude und Phase durch kohärente Lichtquelle $\Rightarrow$ Strahlteiler $\Rightarrow$ Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle. Später ist auslesen mit der Referenzwelle möglich.

5.6 Dispersion

6 Thermodynamik

6.1 Thermodynamische Systeme

Zustandsgrößen, Wärmekapazitäten

6.2 Grundzüge der kinetischen Gastheorie

Geschwindigkeitsverteilung, Freiheitsgrade

6.3 Hauptsätze

Energiesatz, Zustandsänderung idealer Gase (isochor, isotherm, isobar, adiabatisch, polytrop), Carnot-Prozess, Wärmekraftmaschinen, Heißluftmotor (Stirling), Wärmepumpe, 2. Hauptsatz, Entropie (adiabatisch, ireversiebel), Wahrscheinlichkeit, Maxwells Dämon, Exergie, Anergie, freie Energie, freie Enthalpie, thermische Potentiale

1. Hauptsatz: innere Energie = Wärme + Arbeit

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

für ideales Gas gilt $dU = dQ - pdV$

2. Hauptsatz: Wärme bewegt sich von wärmeren zu kälterem Körper. Die Zustandsgröße Entropie nimmt in einem abgeschlossenen System immer zu $dS = \frac{dQ}{T} > 0$.

3. Hauptsatz: Der absolute Nullpunkt der Temperatur kann nicht erreicht werden. (Nernst Theorem)

6.4 Zustandsänderung realer Gase

Phasenumwandlung, Wasser, Tripelpunkt, Zustandsdiagramm, Van-der-Waals-Gleichung, Gibbs-Phasenregel, Gasverflüssiger, Inversiontemperatur, Lindsches Luftverflüssigungsverfahren

Van-der-Waals-Gleichung: Erweiterung der Grundgleichung idealer Gase $pV = RT$ auf reale Gase:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

a beschreibt die Anziehung der Moleküle (Binnendruck), b das Eigenvolumen der Moleküle (4 faches Eigenvolumen)

Clausius-Clapeyron: Verdampfungwärme (Arbeit gegen Außendruck und Vergrößerung des Abstandes bei Anziehung)

$$\Lambda = T\frac{\partial p_s}{\partial T}(V_D - V_{Fl}$$

Joule-Thomson-Effekt: Reale Gase kühlen bei Expansion ab. (Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung)

6.5 Mehrkomponentensysteme

Osmothischer Druck, Dampfdrucksenkung

7 Atome und Moleküle

7.1 Elementare Quantenphysik

7.1.1 Photonen

Photonenenergie, Impuls, Ruhemasse, Eigendrehimpuls, Wellenvektor

7.1.2 Materiewelle

7.1.3 Wellenfunktion, Wellenpaket, Unschärferelation

Überlagerung, Gruppengeschwindigkeit, Phasengeschwindigkeit

7.1.4 Schrödinger-Gleichung

7.2 Atome und Atomspektren

7.2.1 Atomspektren

Streuexperimente, Spektroskopie

7.2.2 Bohrsches Atommodell

Frank-Hertz-Versuch, Grenzen

7.2.3 Quantenmechanische Behandlung von Wasserstoff

3 Quantenzahlen: Hauptquantenzahl, Bahndrehimpulsquantenzahl, magnetische Quantenzahl

7.2.4 Magnetisches Moment, Elektronenspin

Feinstruktur der Spektrallinie, Stern-Gerlach-Versuch

7.2.5 Schalenmodell (PSE)

7.3 Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung

Absorption, sponanten Emission, induzierte Emission, Entartung, Laseridee, Schwellbedingung

7.3.1 Lebensdauer von Zuständen, natürliche Linienbreite

7.3.2 Röntgenstrahlung

Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung, Absorption (Absorptionsquerschnitt), Beugung, von Laue, Bragg-Reflexion

7.4

7.4.1 Molekülpotential

Morse-Potential

7.4.2 chemische Bindung

ionische Bindung, kovalente Bindung, Van-der-Waals-Bindung, Metallbindung

7.4.3 Molekühlspektren

8 Elemente der Festkörperphysik

8.1 Einführung

Struktr, Einkristalle, Polykristaline Festkörper, Amorphe Festkörper, Flüssigkristalle

8.2 Struktur aus Einkristallen

atomarer Kristall, Translationsvektor, Parallelepiped (Spat), Elementarzelle, primitives Gitter, Symmetrieebenen und -achsen, Gitterebenen

8.3 Reziprokes Gitter

Elementarzelle

8.4 Kristallstrukturanalyse

.... FEHLT! ....

8.5 FEHLT

8.5.1 FEHLT

8.5.2 Spezifische Wärmekapazität

Schwingungsenergie, Einsteinmodell, Bose-Einstein-Statistik, Boltzmann-Verteilung, Debye-Modell

8.5.3 Phononenspektroskopie

Infrarotabstrahlung, Streuintensität

8.6 Elektronen im Festkörper

8.6.1 Elektronengas

8.6.2 Elektronen im periodischen Gas

9 Kernphysik

elastische, inelastische Streuung

9.1 Eigenschaften stabiler Kerne

9.1.1 Kernradius, Ladungs und Nukleonenverteilungen

9.1.2 Kernmasse, Kernbausteine, Bindungsenergie

9.1.3 Tröpfchenmodell