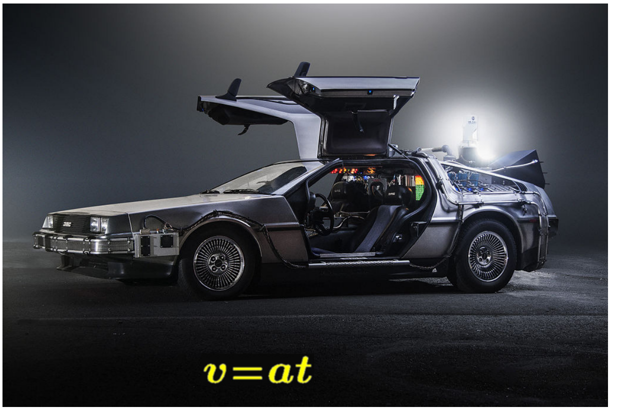

Physikalische Formeln,

die Sie kennen sollten, um die

Übungsaufgaben in Physik

lösen zu können und um insbesondere die

Prüfung in Physik I/II

erfolgreich zu bestehen

Version 2.2

(18. November 2021)

Die nachfolgenden Seiten sind ein Exzerpt aus dem Lehrbuch von

> H. STROPPE: *„PHYSIK für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften“*, 16. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München, 2018.

Die Nummerierung der Kapitel, Abschnitte und Gleichungen ist exakt dieselbe wie im Lehrbuch, sodass die Erklärungen der physikalischen Größen einschließlich der verwendeten Formelzeichen, das physikalische Umfeld, ergänzende Informationen oder Bilder zu den Formeln im Selbststudium schnell aufgefunden werden können. Es wurde darauf verzichtet, Formeln aufzunehmen, die durch einfache Rechnungen aus den grundlegenden Beziehungen folgen. Dies wird in den zugehörigen Übungen des Kurses vermittelt und trainiert.

Manche der hier enthaltenen Formeln sind nicht mit einer eigenen Formelnummer im Lehrbuch versehen; in diesem Fall wird die fortlaufende Formelnummer am rechten Seitenrand durch einen Kleinbuchstaben ersetzt, z. B. (14.a). Die entsprechende Stelle im Text lässt sich jedoch leicht finden.

Diese Formelsammlung enthält das **absolut notwendige Minimum**, um die Pflichtaufgaben in den Übungsserien vielleicht allein und ohne weitere Hilfe lösen zu können. Probieren Sie es bitte mithilfe des Lehrbuches aus!

Die Aufgaben aus den Übungsserien entstammen dem Buch

> H. STROPPE u.a.: *„PHYSIK • Beispiele und Aufgaben“*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag München, 2021.

Für eine gründliche Vorbereitung auf die Prüfung empfiehlt sich außerdem ein regelmäßiger Besuch der Vorlesungen, der Übungen und ein tieferes Studium des oben genannten oder anderer Physiklehrbücher.

Hinweis: *Vektoren* sind durch fettgedruckte Buchstaben gekennzeichnet.

Dem Carl Hanser Verlag München sei für die Zustimmung zur Verwendung des Materials herzlich gedankt.

Bildquelle auf der Titelseite:

https://de.wikipedia.org/wiki/Zur%C3%BCck_in_die_Zukunft#/media/Datei:TeamTimeCar.com-BTTF_DeLorean_Time_Machine-OtoGodfrey.com-JMortonPhoto.com-07.jpg

Die Formel $\boldsymbol{v = at}$ wurde in das ursprüngliche Bild eingefügt.

3 Kinematik der Punktmasse

3.2 Die gleichförmige Bewegung

$$v = \frac{s}{t} \qquad \text{(Geschwindigkeit der gleichförmigen Bewegung)} \qquad (3.2)$$

3.3 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

$$v = at + v_0 \qquad \text{(Endgeschwindigkeit bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung)} \qquad (3.4)$$

$$s = \frac{at^2}{2} + v_0 t + s_0 \qquad \text{(Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung)} \qquad (3.7)$$

3.4 Freier Fall. Senkrechter Wurf

$$h = \frac{g}{2} t^2 \qquad \text{(Fallhöhe)} \qquad (3.9)$$

3.5 Allgemeine Definition von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung

$$v(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{s} \qquad \text{(allgemeine Definition der Geschwindigkeit)} \qquad (3.15)$$

$$a(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{v} = \ddot{s} \qquad \text{(allgemeine Definition der Beschleunigung)} \qquad (3.16)$$

3.6 Geschwindigkeit und Beschleunigung als Vektoren. Zusammengesetzte Bewegungen (Superposition)

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{v}_2 \qquad \text{(Vektor der resultierenden Geschwindigkeit)} \qquad (3.18)$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_x + \boldsymbol{v}_y + \boldsymbol{v}_z = v_x \boldsymbol{i} + v_y \boldsymbol{j} + v_z \boldsymbol{k} \qquad \text{(Zerlegung des Vektors der Geschwindigkeit in räumliche kartesische Komponenten)} \qquad (3.21)$$

$$|\boldsymbol{v}| = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \qquad \text{(Betrag des Vektors der Geschwindigkeit)} \qquad (3.22)$$

3.7 Die gleichförmige Kreisbewegung

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad \text{(Winkelgeschwindigkeit)} \qquad (3.24)$$

$$\varphi = \omega t \qquad \text{(Gesamtdrehwinkel)} \qquad (3.25)$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} r = \omega r \qquad \text{(Bahngeschwindigkeit)} \qquad (3.26)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad \text{(Winkelgeschwindigkeit)} \qquad (3.27)$$

$$n = \frac{z}{t} = \frac{1}{T} \qquad \text{(Drehzahl)} \qquad (3.28)$$

$$\omega = 2\pi n \qquad \text{(Kreisfrequenz, Winkelfrequenz)} \qquad (3.29)$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r} \qquad \text{(Vektor der Bahngeschwindigkeit)} \tag{3.30}$$

$$a_\mathrm{r} = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \qquad \text{(Betrag der Radial- oder Zentripetalbeschleunigung)} \tag{3.31}$$

$$\boldsymbol{a}_\mathrm{r} = -\omega^2 \boldsymbol{r} \qquad \text{(Vektor der Radial- oder Zentripetalbeschleunigung)} \tag{3.32}$$

3.8 Die ungleichförmige Kreisbewegung

$$\omega(t) = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{\varphi} \qquad \text{(allgemeine Definition der Winkelgeschwindigkeit)} \tag{3.33}$$

$$\alpha(t) = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{\omega} \qquad \text{(allgemeine Definition der Winkelbeschleunigung)} \tag{3.34}$$

$$\boldsymbol{a}_\mathrm{t} = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{r} \qquad \text{(Vektor der Tangential- oder Bahnbeschleunigung)} \tag{3.36}$$

3.9 Bewegung auf beliebig krummliniger Bahn

$$\boldsymbol{r}(t) = x(t)\,\boldsymbol{i} + y(t)\,\boldsymbol{j} + z(t)\,\boldsymbol{k} \qquad \text{(Ortsvektor in kartesischen Koordinaten)} \tag{3.43}$$

$$\boldsymbol{v}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{\boldsymbol{r}} \qquad \text{(allgemeine Definition des Vektors der Geschwindigkeit)} \tag{3.44}$$

$$\boldsymbol{a}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} \equiv \dot{\boldsymbol{v}} = \ddot{\boldsymbol{r}} \qquad \text{(allgemeine Definition des Vektors der Beschleunigung)} \tag{3.45}$$

$$\boldsymbol{a}_\mathrm{t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}_\mathrm{t}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\,\boldsymbol{e}_\mathrm{t} \qquad \text{(Vektor der Tangentialbeschleunigung)} \tag{3.46}$$

$$\boldsymbol{a}_\mathrm{n} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}_\mathrm{n}}{\Delta t} = \frac{v^2}{\varrho}\,\boldsymbol{e}_\mathrm{n} \qquad \text{(Vektor der Normalbeschleunigung)} \tag{3.47}$$

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_\mathrm{t} + \boldsymbol{a}_\mathrm{n} \qquad \text{(Vektor der resultierenden Beschleunigung)} \tag{3.48}$$

$$a = \sqrt{a_\mathrm{t}^2 + a_\mathrm{n}^2} \qquad \text{(Betrag des Vektors der resultierenden Beschleunigung)} \tag{3.49}$$

4 Dynamik der Punktmasse

4.2 Das Trägheitsgesetz (1. NEWTONsches Axiom)

$$\boldsymbol{v} = \text{const} \quad \text{für} \quad \boldsymbol{F} = 0 \qquad \text{(Trägheitsgesetz, 1. NEWTONsches Axiom)} \tag{4.3}$$

4.3 Das Grundgesetz der Dynamik (2. NEWTONsches Axiom)

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} \qquad \text{(Grundgesetz der Dynamik, 2. NEWTONsches Axiom)} \tag{4.4}$$

4.4 Träge und schwere Masse. Gewichtskraft. Radialkraft

$$G = mg \qquad \text{(Gewichtskraft)} \tag{4.5}$$

$$F = -kx \qquad \text{(Federkraft)} \tag{4.a}$$

$$\varrho = \frac{m}{V} \qquad \text{((Massen-)Dichte)} \tag{4.6}$$

$$F_\mathrm{r} = m\omega^2 r = \frac{mv^2}{r} \qquad \text{(Betrag der Radial- oder Zentripetalkraft)} \tag{4.7a}$$

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{r} = m\boldsymbol{a}_\mathrm{r} = -m\omega^2 \boldsymbol{r} \qquad \text{(Vektor der Radial- oder Zentripetalkraft)} \tag{4.7b}$$

4.5 Kraftstoß. Impuls (Bewegungsgröße)

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v} \qquad \text{(Impuls, Bewegungsgröße)} \tag{4.8}$$

$$\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t} \qquad \text{(Grundgesetz der Dynamik, 2. NEWTONsches Axiom)} \tag{4.9}$$

4.6 Lösung der Bewegungsgleichung für konstante Kraft. Die Wurfbewegung

$$x(t) = y(t) = 0, \quad z(t) = -\frac{g}{2}t^2 + v_0 t + z_0 \qquad \text{(Weg-Zeit-Gesetze des senkrechten Wurfs)} \tag{4.18}$$

$$x(t) = v_0 t \cos\alpha_0, \quad z(t) = -\frac{g}{2}t^2 + v_0 t \sin\alpha_0 + z_0 \qquad \text{(Weg-Zeit-Gesetze des schiefen Wurfs)} \tag{4.19}$$

4.7 Das Wechselwirkungsgesetz (3. NEWTONsches Axiom)

$$\boldsymbol{F}_{12} = -\boldsymbol{F}_{21} \quad \text{oder} \quad \boldsymbol{F}_{12} + \boldsymbol{F}_{21} = 0 \qquad \text{(Wechselwirkungsgesetz, 3. NEWTONsches Axiom)} \tag{4.24}$$

4.8 Reibungskräfte

$$F_\mathrm{RH} = \mu_0 F_\mathrm{N} \qquad \text{(Haftreibungskraft, COULOMBsches Reibungsgesetz)} \tag{4.26}$$

$$\mu_0 = \tan\varrho_0 \qquad \text{(Haftreibungszahl, Reibungswinkel)} \tag{4.27}$$

$$F_\mathrm{RG} = \mu F_\mathrm{N} \qquad \text{(Gleitreibungskraft)} \tag{4.28}$$

5 Bewegte Bezugssysteme

5.1 Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme. Trägheitskräfte

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{T}} = -m\ddot{\boldsymbol{s}} = -m\boldsymbol{a} \qquad \text{(Trägheitskraft)} \tag{5.4}$$

$$F_{\mathrm{S}} = F' = F + F_{\mathrm{T}} \qquad \text{(Betrag der Seilkraft)} \tag{5.a}$$

5.2 Gleichförmig rotierende Bezugssysteme. Zentrifugalkraft, Coriolis-Kraft

$$F_{\mathrm{Z}} = m\omega^2 r = \frac{mv^2}{r} \qquad \text{(Betrag der Flieh- oder Zentrifugalkraft)} \tag{5.6a}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Z}} = m\omega^2 \boldsymbol{r} \qquad \text{(Vektor der Flieh- oder Zentrifugalkraft)} \tag{5.6b}$$

$$a_{\mathrm{Z}} = \omega^2 r = \frac{v^2}{r} \qquad \text{(Betrag der Zentrifugalbeschleunigung)} \tag{5.7a}$$

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{Z}} = \omega^2 \boldsymbol{r} \qquad \text{(Vektor der Zentrifugalbeschleunigung)} \tag{5.7b}$$

7 Arbeit und Energie

7.1 Arbeit

$$W = Fs \qquad \text{(Arbeit bei konstanter Kraft und } \boldsymbol{F} \parallel \boldsymbol{s}) \tag{7.1}$$

$$W = -\boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{s} = -Fs\cos\alpha \qquad \text{(Verschiebungsarbeit)} \tag{7.2}$$

$$W = \int \mathrm{d}W = -\int_{P_1}^{P_2} \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = -\int_{P_1}^{P_2} F\cos\alpha\ \mathrm{d}s = -\int_{P_1}^{P_2} F_s\,\mathrm{d}s \qquad \text{(Wegintegral der Kraft)} \tag{7.3}$$

$$W = -m\boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{s} = -mgh\cos 180^\circ = mgh \qquad \text{(Hubarbeit)} \tag{7.4}$$

$$W = -\int_0^{x_0} (-k\boldsymbol{x}) \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{x} = -k\int_0^{x_0} x\,\mathrm{d}x\cos 180^\circ = \frac{kx_0^2}{2} = \frac{F_0 x_0}{2} \qquad \text{(Federspannarbeit)} \tag{7.6}$$

$$W = -\int_{P_1}^{P_2} \boldsymbol{F}_\mathrm{T} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = \int_{v_0}^{v} \frac{m}{2}\,\mathrm{d}(\boldsymbol{v}^2) = \frac{m}{2}\,(v^2 - v_0^2) \qquad \text{(Beschleunigungsarbeit)} \tag{7.7}$$

7.2 Leistung. Wirkung

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \qquad \text{(Momentanleistung)} \tag{7.9}$$

7.3 Der Energiebegriff. Potenzielle und kinetische Energie

$$E_\mathrm{p} = mgh \qquad \text{(potenzielle Energie einer Masse im Erdschwerefeld)} \tag{7.13}$$

$$E_\mathrm{p} = \frac{kx^2}{2} \qquad \text{(potenzielle Energie einer gespannten Feder)} \tag{7.14}$$

$$E_\mathrm{k} = \frac{mv^2}{2} \qquad \text{(kinetische Energie)} \tag{7.15}$$

7.4 Das Gesetz von der Erhaltung der Energie (Energiesatz)

$$E_\mathrm{k} + E_\mathrm{p} \equiv E_\mathrm{g} = \mathrm{const} \qquad \text{(Gesamtenergie, Energiesatz)} \tag{7.16}$$

$$E_\mathrm{k}(t_1) + E_\mathrm{p}(t_1) = E_\mathrm{k}(t_2) + E_\mathrm{p}(t_2) \qquad \text{(Energiesatz für zwei unterschiedliche Zeitpunkte)} \tag{7.17}$$

9 Dynamik der Punktmassen-Systeme

9.1 Impulserhaltungssatz. Massenmittelpunkt

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = \text{const} \qquad \text{(Impulserhaltungssatz für zwei Massen)} \tag{9.2}$$

9.2 Die Gesetze des Stoßes

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2 \qquad \text{(Impulserhaltungssatz beim Stoß zweier Massen)} \tag{9.8}$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) c \qquad \text{(Impulserhaltungssatz beim vollkommen unelastischen Stoß)} \tag{9.9}$$

$$c_1 - c_2 = -\varepsilon (v_1 - v_2) \quad \text{oder} \quad \varepsilon = -\frac{c_1 - c_2}{v_1 - v_2} \qquad \text{(Stoßzahl beim teilweise unelastischen Stoß)} \tag{9.10}$$

$$\Delta E = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{m_1 c_1^2}{2} - \frac{m_2 c_2^2}{2} \qquad \text{(Verlust an Bewegungsenergie für Verformung und Erwärmung)} \tag{9.a}$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 c_1^2}{2} + \frac{m_2 c_2^2}{2} \qquad \text{(Energiesatz beim elastischen Stoß)} \tag{9.13}$$

10 Statik des starren Körpers

10.2 Kräfte am starren Körper. Drehmoment. Gleichgewichtsbedingungen

$$M = Fr\sin\alpha \qquad \text{(Betrag des Drehmoments)} \tag{10.4}$$

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F} \qquad \text{(Vektor des Drehmoments)} \tag{10.5}$$

$$\sum \boldsymbol{F}_i = 0, \quad \sum \boldsymbol{M}_i = 0 \qquad \text{(Gleichgewichtsbedingungen für einen starren Körper)} \tag{10.7}$$

10.4 Der Schwerpunkt

$$x_S = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad y_S = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \quad z_S = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} \qquad \text{(Schwerpunkt, Massenmittelpunkt eines Punktmassensystems)} \tag{10.12}$$

$$x_S = \frac{1}{V}\int x\,\mathrm{d}V, \quad y_S = \frac{1}{V}\int y\,\mathrm{d}V, \quad z_S = \frac{1}{V}\int z\,\mathrm{d}V \qquad \text{(Schwerpunktkoordinaten für homogene Körper)} \tag{10.13}$$

11 Dynamik des starren Körpers

11.2 Kinetische Energie der Drehbewegung. Massenträgheitsmoment

$$E_\mathrm{k} = \frac{J\omega^2}{2} \qquad \text{(Rotationsenergie)} \tag{11.1}$$

$$J = mr^2 \qquad \text{(Massenträgheitsmoment einer umlaufenden Punktmasse)} \tag{11.2}$$

$$J = \sum \Delta m_i r_i^2 \quad \text{bzw.} \quad J = \int r^2 \,\mathrm{d}m \qquad \text{(allgemeine Definition des Massenträgheitsmoments)} \tag{11.3}$$

$$J_A = J_S + ms^2 \qquad \text{(STEINERscher Satz)} \tag{11.4}$$

11.3 Arbeit und Leistung bei der Drehbewegung. Grundgesetz der Dynamik

$$s = r\varphi; \quad v = r\omega; \quad a = r\alpha \qquad \text{(Zusammenhang zwischen Größen der Drehbewegung mit denen auf der Umlaufbahn)} \tag{11.a}$$

$$\mathrm{d}W = F\,\mathrm{d}s = Fr\,\mathrm{d}\varphi = M\,\mathrm{d}\varphi; \quad W = \int M\,\mathrm{d}\varphi \qquad \text{(Arbeit bei der Drehbewegung)} \tag{11.5}$$

$$M = J\dot{\omega} = J\alpha \qquad \text{(Grundgesetz der Dynamik für die Drehbewegung)} \tag{11.8}$$

11.4 Der Drehimpuls (Drall). Drehimpulserhaltungssatz

$$\boldsymbol{M} = J\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(J\boldsymbol{\omega})}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{L}}{\mathrm{d}t} \qquad \text{(vektorielle Form des Grundgesetzes der Dynamik für die Drehbewegung)} \tag{11.10}$$

$$\boldsymbol{L} = J\boldsymbol{\omega} \qquad \text{(Drehimpuls, Drall)} \tag{11.11}$$

$$\boldsymbol{L} = \text{const} \quad \text{für} \quad \boldsymbol{M} = 0 \qquad \text{(Drehimpulserhaltungssatz)} \tag{11.b}$$

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p} = m\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{v} \qquad \text{(Vektor des Bahndrehimpulses einer Punktmasse)} \tag{11.13}$$

14 Ruhende Flüssigkeiten und Gase

14.1 Druck in Flüssigkeiten (hydrostatischer Druck)

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{bzw.} \quad p = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}A} \qquad \text{(Druck)} \tag{14.1}$$

14.2 Schweredruck. Auftrieb. Schwimmstabilität

$$p = \frac{G_{\mathrm{Fl}}}{A} = \varrho g h \qquad \text{(Schweredruck in einer Flüssigkeit)} \tag{14.3}$$

$$p = \varrho g h + p_0 + p_{\ddot{\mathrm{u}}} \qquad \text{(hydrostatischer Druck)} \tag{14.a}$$

$$F_{\mathrm{A}} = \varrho_{\mathrm{Fl}} V g = m_{\mathrm{Fl}} g = G_{\mathrm{Fl}} \qquad \text{(Auftriebskraft)} \tag{14.4}$$

14.3 Druck in Gasen. Zusammenhang zwischen Druck, Volumen und Dichte

$$pV = p_0 V_0 \quad \text{oder} \quad pV = \text{const} \qquad \text{(Gesetz von Boyle-Mariotte)} \tag{14.5}$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\varrho}{\varrho_0} \quad \text{oder} \quad \frac{p}{\varrho} = \text{const} \qquad \text{(Gesetz von Boyle-Mariotte)} \tag{14.6}$$

14.4 Schweredruck in Gasen. Barometrische Höhenformel

$$p = p_0\, \mathrm{e}^{-\frac{\varrho_0 g h}{p_0}} \qquad \text{(barometrische Höhenformel für } T = \text{const).} \tag{14.9}$$

15 Strömende Flüssigkeiten und Gase (Strömungsmechanik)

15.2 Strömungen idealer Flüssigkeiten und Gase. Kontinuitätsgleichung

$$I_V = \frac{dV}{dt} = vA \qquad \text{(Volumenstrom)} \tag{15.1}$$

$$I_m = \frac{dm}{dt} = \varrho \frac{dV}{dt} = \varrho v A \qquad \text{(Massenstrom)} \tag{15.2}$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad \text{oder} \quad I_V = vA = \text{const} \qquad \text{(Kontinuitätsgleichung für eine inkompressible Flüssigkeit)} \tag{15.7}$$

15.3 Die BERNOULLIsche Gleichung. Druckmessung

$$p_1 + \frac{\varrho}{2} v_1^2 + \varrho g h_1 = p_2 + \frac{\varrho}{2} v_2^2 + \varrho g h_2 \qquad \text{(BERNOULLIsche Gleichung)} \tag{15.10}$$

15.4 Strömungen realer Flüssigkeiten und Gase. Laminare Strömung

$$F_W = c_W A \frac{\varrho v^2}{2} \qquad \text{(Strömungswiderstand)} \tag{15.20}$$

$$Re = \frac{\varrho l v}{\eta} \qquad \text{(REYNOLDS-Zahl)} \tag{15.22}$$

15.5 Gesetze von HAGEN-POISEUILLE und STOKES

$$F_R = 6\pi \eta R v \qquad \text{(STOKESsches Reibungsgesetz)} \tag{15.18}$$

16 Verhalten der Körper bei Temperaturänderung

16.4 Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} \quad \text{(thermische Zustandsgleichung des idealen Gases)} \tag{16.17}$$

$$pV = nRT \quad \text{(allgemeine Zustandsgleichung des idealen Gases)} \tag{16.20}$$

$$M = \frac{m}{n} \quad \text{(Molmasse eines Gases)} \tag{16.a}$$

$$R_\mathrm{s} = \frac{R}{M} \quad \text{(spezielle (spezifische) Gaskonstante)} \tag{16.b}$$

$$pV = \frac{m}{M}RT = mR_\mathrm{s}T \quad \text{oder} \quad p = \varrho R_\mathrm{s} T \quad \text{(allgemeine Zustandsgleichung des idealen Gases)} \tag{16.21}$$

17 Der I. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz)

17.1 Wärmemenge und Wärmekapazität

$$Q = cm\Delta T = cm(T_2 - T_1) \qquad \text{(Wärmemenge)} \tag{17.1}$$

$$Q_{\text{ab}} = cm(\vartheta - \vartheta_{\text{M}}) = c_{\text{Fl}} m_{\text{Fl}} (\vartheta_{\text{M}} - \vartheta_{\text{Fl}}) + C_{\text{K}} (\vartheta_{\text{M}} - \vartheta_{\text{Fl}}) = Q_{\text{auf}} \qquad \text{(Wärmebilanz in der Kalorimetrie)} \tag{17.5}$$

17.2 Innere Energie eines Systems. Formulierung des I. Hauptsatzes

$$\Delta U = Q + W \qquad \text{(I. Hauptsatz der Thermodynamik)} \tag{17.7}$$

$$\mathrm{d}U = \mathrm{d}Q + \mathrm{d}W \qquad \text{(I. Hauptsatz der Thermodynamik in differenzieller Form)} \tag{17.8}$$

$$W = -\int_{s_1}^{s_2} F\,\mathrm{d}s = -\int_{s_1}^{s_2} pA\,\mathrm{d}s = -\int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V \qquad \text{(Ausdehnungs- oder Volumenarbeit)} \tag{17.9}$$

$$\mathrm{d}U = \mathrm{d}Q - p\,\mathrm{d}V \quad \text{oder} \quad \mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + p\,\mathrm{d}V \qquad \text{(I. Hauptsatz der Thermodynamik)} \tag{17.10}$$

17.3 Spezifische Wärmekapazität des idealen Gases. Kalorische Zustandsgleichung

$$\mathrm{d}U = mc_V\,\mathrm{d}T = nC_{\text{m}V}\,\mathrm{d}T \qquad \text{(kalorische Zustandsgleichung des idealen Gases)} \tag{17.13}$$

$$c_p - c_V = R_{\text{s}} \quad \text{oder} \quad C_{\text{m}p} - C_{\text{m}V} = R \qquad \text{(Differenz der spezifischen Wärmekapazitäten)} \tag{17.16}$$

17.4 Anwendung des I. Hauptsatzes auf spezielle Zustandsänderungen des idealen Gases

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V = p(V_1 - V_2) = mR_{\text{s}}(T_1 - T_2) \qquad \text{(Volumenarbeit bei isobarer Zustandsänderung)} \tag{17.17}$$

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p\,\mathrm{d}V = -mR_{\text{s}}T\int_{V_1}^{V_2} \frac{\mathrm{d}V}{V} = mR_{\text{s}}T\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \qquad \text{(Volumenarbeit bei isothermer Zustandsänderung)} \tag{17.18}$$

$$\mathrm{d}Q = 0 \qquad \text{(adiabatische Zustandsänderung)} \tag{17.a}$$

$$\varkappa = \frac{c_p}{c_V} \qquad \text{(Adiabaten-(Isentropen-)exponent)} \tag{17.b}$$

$$pV^{\varkappa} = \text{const} \quad \text{oder} \quad p_1 V_1^{\varkappa} = p_2 V_2^{\varkappa} \qquad \text{(POISSONsche Adiabatengleichung)} \tag{17.20}$$

$$W = \Delta U = mc_V(T_2 - T_1) \qquad \text{(Volumenarbeit bei adiabatischer Zustandsänderung)} \tag{17.22}$$

19 Der II. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz)

19.1 Der CARNOT-Kreisprozess. Wärmekraftmaschine, Kältemaschine und Wärmepumpe

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad \text{(thermischer Wirkungsgrad der CARNOT-Maschine)} \tag{19.6}$$

$$\varepsilon_{KM} = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \qquad \text{(Leistungszahl der Kältemaschine)} \tag{19.7}$$

$$\varepsilon_{WP} = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \qquad \text{(Leistungszahl der Wärmepumpe)} \tag{19.8}$$

23 Das elektrostatische Feld

23.3 Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Elektrische Feldstärke

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q} \qquad \text{(elektrische Feldstärke)} \tag{23.2a}$$

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} \qquad \text{(Feldkraft)} \tag{23.2b}$$

23.4 Elektrostatisches Potenzial. Spannung

$$W = -\int_{P_1}^{P_2} \boldsymbol{F}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = -q\int_{P_1}^{P_2} \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} \qquad \text{(Verschiebungsarbeit im elektrischen Feld)} \tag{23.7}$$

$$\varphi(P) = -\int_{\infty}^{P} \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} \qquad \text{(elektrostatisches Potenzial)} \tag{23.9}$$

$$W = \Delta E_{\mathrm{p}} = qU \qquad \begin{array}{l}\text{(Verschiebungsarbeit;}\\ \text{Änderung der potenziellen Energie)}\end{array} \tag{23.13}$$

$$U = -\int_{P_1}^{P_2} \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi \qquad \text{(Spannung)} \tag{23.14}$$

23.7 Das elektrische Zentralfeld (Punktladung und Punktladungssystem)

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,\boldsymbol{e}_r \qquad \text{(elektrische Feldstärke einer Punktladung)} \tag{23.24}$$

$$\varphi(r) = -\int_{\infty}^{r} \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad \text{(elektrostatisches Potenzial einer Punktladung)} \tag{23.25}$$

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2}\,\boldsymbol{e}_r \qquad \text{(COULOMBsches Gesetz)} \tag{23.27}$$

23.8 Kapazität. Kondensatoren

$$C = \frac{Q}{U} \qquad \text{(Kapazität, allgemein)} \tag{23.29}$$

$$E = \frac{U}{d} = \text{const} \qquad \text{(Feldstärke im Plattenkondensator)} \tag{23.30}$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \qquad \text{(Kapazität des leeren Plattenkondensators)} \tag{23.31}$$

$$C = \sum_i C_i \qquad \text{(Gesamtkapazität } C \text{ bei Parallelschaltung)} \tag{23.32}$$

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} \qquad \text{(Gesamtkapazität } C \text{ bei Reihenschaltung)} \tag{23.33}$$

24 Das elektrische Feld in Isolatoren (Dielektrika)

24.2 Permittivität (Dielektrizitätskonstante), elektrische Suszeptibilität

$$\varepsilon_\mathrm{r} = \frac{C}{C_0} \qquad \text{(Permittivitäts- oder Dielektrizitätszahl)} \tag{24.3}$$

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_\mathrm{r}\varepsilon_0\boldsymbol{E} = \varepsilon\boldsymbol{E} \qquad \text{(Verschiebungsdichte im Dielektrikum)} \tag{24.6}$$

24.4 Energieinhalt des elektrischen Feldes

$$W = \frac{1}{C}\int_0^Q q\,\mathrm{d}q = \frac{1}{2C}Q^2 = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}QU \qquad \text{(Arbeit zum Aufladen eines Kondensators)} \tag{24.11}$$

25 Der Gleichstromkreis

25.2 Stromstärke, Spannung, Widerstand. OHMsches Gesetz

$$I = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \qquad \text{(elektrische Stromstärke)} \tag{25.1}$$

$$j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}A} \quad \text{bzw.} \quad j = \frac{I}{A} \qquad \text{(Stromdichte)} \tag{25.4}$$

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{mit} \quad R = \text{const} \qquad \text{(OHMsches Gesetz)} \tag{25.6}$$

$$R = \varrho \frac{l}{A} \qquad \text{(Widerstand eines Drahtes)} \tag{25.8}$$

25.3 Schaltungen und Messmethoden

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i \qquad \text{(Gesamtwiderstand } R \text{ bei Reihenschaltung)} \tag{25.11}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \qquad \text{(Gesamtwiderstand } R \text{ bei Parallelschaltung)} \tag{25.12}$$

$$U_\mathrm{K}(I) = U_0 - IR_\mathrm{I} = IR_\mathrm{A} \qquad \text{(Klemmenspannung einer belasteten Spannungsquelle)} \tag{25.14}$$

$$\sum_i I_i = 0 \qquad \text{(1. KIRCHHOFFsches Gesetz; Knotensatz)} \tag{25.17}$$

$$\sum_i R_i I_i = \sum_k U_k \qquad \text{(2. KIRCHHOFFsches Gesetz; Maschensatz)} \tag{25.18}$$

25.4 Arbeit und Leistung elektrischer Gleichströme

$$W = QU = UIt \qquad \text{(Arbeit eines Gleichstromes)} \tag{25.20}$$

$$P = \frac{W}{t} = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \qquad \text{(Leistung eines Gleichstromes)} \tag{25.21}$$

28 Das magnetostatische Feld der Dipole und Gleichströme

28.3 Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters. Durchflutungsgesetz

$$H = \frac{I}{2\pi r} \qquad \text{(magnetische Feldstärke außerhalb eines geraden Stromleiters)} \tag{28.4}$$

$$H = \frac{NI}{l} \qquad \text{(magnetische Feldstärke in einer langen Zylinderspule)} \tag{28.7}$$

28.5 Magnetische Flussdichte (Induktion)

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \text{bzw.} \quad B = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A} \qquad \text{(magnetische Flussdichte; Induktion)} \tag{28.11}$$

$$\Phi = \int \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A} = \int B\,\mathrm{d}A \cos\alpha \qquad \text{(magnetischer Fluss)} \tag{28.12}$$

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} \qquad \text{(magnetische Flussdichte im Vakuum)} \tag{28.14}$$

28.6 Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf Stromleiter

$$\boldsymbol{F} = I\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B} = \mu_0 I \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{H} \qquad \text{(Kraft auf einen Stromleiter im Magnetfeld)} \tag{28.17}$$

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r} \qquad \text{(Kraft zwischen zwei parallelen Stromleitern)} \tag{28.18}$$

28.7 Bewegung freier Ladungsträger im magnetischen Feld. LORENTZ-Kraft

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{L} = q\,(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \qquad \text{(LORENTZ-Kraft)} \tag{28.22}$$

30 Elektromagnetische Induktion

30.1 Das FARADAYsche Induktionsgesetz

$$u_{\text{ind}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad \text{(FARADAYsches Induktionsgesetz)} \tag{30.1}$$

$$u_{\text{ind}} = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad \text{(Induktionsspannung in einer Spule)} \tag{30.2}$$

$$u_{\text{ind}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int \boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{A} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int B\,\mathrm{d}A\cos\alpha \quad \text{(FARADAYsches Induktionsgesetz)} \tag{30.3}$$

30.2 Selbstinduktion

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{NBA}{I} = \frac{N\mu_0 HA}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \quad \text{(Induktivität einer leeren Zylinderspule)} \tag{30.6}$$

$$u_{\text{ind}} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \quad \text{(Selbstinduktionsspannung)} \tag{30.7}$$

30.3 Energieinhalt des magnetischen Feldes

$$W_{\text{m}} = \int_0^I Li\,\mathrm{d}i = \frac{1}{2}LI^2 \quad \text{(magnetische Feldenergie)} \tag{30.10}$$

$$w_{\text{m}} = \frac{1}{2}\mu_0 H^2 = \frac{1}{2}BH \quad \text{(Energiedichte des magnetischen Feldes)} \tag{30.11}$$

30.4 Elektromagnetische Induktion in einem bewegten Leiter

$$u_{\text{ind}} = -\frac{\mathrm{d}(BA)}{\mathrm{d}t} = -B\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = -Bl\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = -Blv \quad \text{(Induktionsspannung in einem bewegten, geraden Drahtstück)} \tag{30.13}$$

$$\Phi = \Phi(t) = \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{A} = BA\cos\alpha = \Phi_0\cos\omega t \quad \text{(magnetischer Fluss durch eine rotierende Leiterschleife)} \tag{30.14}$$

$$u(t) = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \omega\Phi_0\sin\omega t = U_0\sin\omega t \quad \text{(Induktionswechselspannung in einer rotierenden Leiterschleife)} \tag{30.15}$$

31 Der Wechselstromkreis

31.1 Wechselspannung, Wechselstrom, Dreiphasenstrom

$u(t) = U_0 \sin \omega t$ (Momentanwert der harmonischen Wechselspannung) (31.1)

$i(t) = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$ (Momentanwert der Stromstärke) (31.2)

31.2 Arbeit und Leistung elektrischer Wechselströme

$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, I_0$ (Effektivwert der Stromstärke harmonischer Wechselströme) (31.3)

$P = \frac{U_0 I_0}{2} \cos \varphi = U I \cos \varphi$ (Wirkleistung) (31.4)

$Q = U I \sin \varphi$ (Blindleistung) (31.5)

31.3 Wechselstromwiderstände. Ohmsches Gesetz für Wechselstrom

$Z = \frac{u}{i} = \mathrm{j}\omega L$, Betrag: $X_L = \omega L$ (induktiver Schein- bzw. Blindwiderstand) (31.9)

$Z = \frac{u}{i} = \frac{1}{\mathrm{j}\omega C} = -\frac{\mathrm{j}}{\omega C}$, Betrag: $X_C = \frac{1}{\omega C}$ (kapazitiver Schein- bzw. Blindwiderstand) (31.10)

33 Mechanische Schwingungen

33.1 Lineare Federschwingungen

$F = -ku$ (Kraftgesetz der ungedämpften harmonischen Schwingung) (33.1)

$m\frac{d^2u}{dt^2} + ku = 0$ (Bewegungsgleichung, Differenzialgleichung der ungedämpften harmonischen Schwingung) (33.2)

$u(t) = u_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ (Weg-Zeit-Gesetz der harmonischen Schwingung) (33.3)

$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T}$ (Eigenkreisfrequenz) (33.4)

$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (Eigenfrequenz f_0 und Periodendauer T des Federschwingers) (33.7)

33.3 Drehschwingungen

$M = -D\varphi$ (Drehmomentgesetz der ungedämpften harmonischen Drehschwingung) (33.12)

$J\frac{d^2\varphi}{dt^2} + D\varphi = 0$ (Bewegungsgleichung, Differenzialgleichung der ungedämpften harmonischen Drehschwingung) (33.13)

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{D}{J}}$ (Eigenkreisfrequenz der ungedämpften Drehschwingung) (33.14)

33.4 Pendelschwingungen

$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgs}}$ (Periodendauer des physikalischen Pendels) (33.16)

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ (Periodendauer des mathematischen Pendels) (33.17)

33.5 Freie gedämpfte Schwingungen

$m\frac{d^2u}{dt^2} + \beta\frac{du}{dt} + ku = 0$ (Bewegungsgleichung, Differenzialgleichung der gedämpften Schwingung) (33.21)

$u(t) = u_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0)$ (Weg-Zeit-Gesetz der gedämpften Schwingung) (33.22)

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T}$ (Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung) (33.23)

33.6 Erzwungene Schwingungen

$\omega_{res} = 2\pi f_{res} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$ (Resonanzkreisfrequenz) (33.33)

36 Allgemeine Wellenlehre

36.1 Zusammenhang von Schwingungen und Wellen

$$u(t,x) = u_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0) \qquad \text{(Gleichung der harmonischen Welle)} \tag{36.2}$$

$$c = f\lambda \qquad \text{(Phasengeschwindigkeit einer Welle)} \tag{36.3}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \text{(Wellenzahl)} \tag{36.4}$$

$$u(t,x) = u_0 \sin(\omega t - kx) \qquad \text{(Wellenfunktion)} \tag{36.6}$$

36.4 Stehende Wellen. Eigenschwingungen

$$u(t,x) = 2u_0 \cos(kx) \cdot \sin(\omega t) \qquad \text{(Wellenfunktion einer stehenden Welle)} \tag{36.17}$$

39 Einfluss von Stoffen auf die Wellenausbreitung

39.4 Reflexion und Brechung (Refraktion). Totalreflexion

$$\alpha_1 = \alpha_1' \quad \text{(Einfallswinkel = Reflexionswinkel)} \qquad \text{(Reflexionsgesetz)} \tag{39.8}$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = \text{const} \qquad \text{(SNELLIUSsches Brechungsgesetz)} \tag{39.9}$$

41 Wellenoptik

41.1 Interferenz. Interferenzbedingungen

$L = ns$ (optische Weglänge in homogenen Medien) (41.1)

$\Delta L = z\lambda$ (Bedingung für Interferenzmaxima) (41.2)

$\Delta L = \left(z + \frac{1}{2}\right)\lambda$ (Bedingung für Interferenzminima) (41.3)

41.2 Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke

$a_z^2 = \left(z - \frac{1}{2}\right)\lambda r$ (Bedingung für Interferenzmaxima bei NEWTONschen Ringen) (41.11)

$a_z^2 = z\lambda r$ (Bedingung für Interferenzminima bei NEWTONschen Ringen) (41.12)

A ANHANG: Fehlerrechnung (Messabweichungen)

A.2 Ermittlung von Messergebnis und Messabweichung

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \text{(Mittelwert einer Wiederholmessreihe)} \tag{A.1}$$

$$X = \overline{x} \pm \Delta x \quad \text{oder} \quad X = \overline{x}\left(1 \pm \frac{\Delta x}{\overline{x}}\right) \qquad \text{(Messergebnis)} \tag{A.2}$$

$$\Delta x = \text{systematische plus zufällige Messabweichung} \qquad \text{(Größtabweichung)} \tag{A.99}$$

A.3 Zufallsstreuung von Messwerten

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} \qquad \text{(Standardabweichung)} \tag{A.4}$$

$$\Delta\overline{x} = \frac{ts}{\sqrt{n}} \qquad \text{(Streubreite des Mittelwertes; zufällige Messabweichung)} \tag{A.5}$$

A.4 Fehlerfortpflanzung

$$\Delta F = \left|\frac{\partial F}{\partial x}\right|\Delta x + \left|\frac{\partial F}{\partial y}\right|\Delta y + \left|\frac{\partial F}{\partial z}\right|\Delta z + \ldots \qquad \text{(lineares Fehlerfortpflanzungsgesetz)} \tag{A.7}$$

$$\frac{\Delta F}{F} = |\alpha|\frac{\Delta x}{x} + |\beta|\frac{\Delta y}{y} + |\gamma|\frac{\Delta z}{z} + \ldots \qquad \text{(lineares Fehlerfortpflanzungsgesetz für Potenzprodukte)} \tag{A.9}$$