

Heft 15

ANHANG (-)

(XXX: Der Kopftext des Heftes *Anhang* ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene Text des Kapitels *Anhang* ist noch nicht verfügbar. Danach folgt:)

15.1 Lösungen der Aufgaben (-)

(XXX: Der Kopftext des Kapitels *Lösungen der Aufgaben* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.1 zu Heft 2: Die besondere Denkweise des Physikers (-)

Aufgabe 1

Teil (a): Wir gehen von einer mittleren Körpermasse eines Erwachsenen von $70 \cdot kg$ aus. Der angegebene Mindestbedarf an Energie wird vollständig in Wärme umgesetzt und an die Umgebung abgegeben. Den Zusammenhang zwischen den beiden Leistungseinheiten W und $\frac{cal}{s}$ entnehmen wir einem Tabellenwerk, z.B. [7] aus Abschnitt 3. Also folgt

$$\begin{aligned} N &= \frac{1 \cdot kcal}{h \cdot kg_{Körpermasse}} \cdot \frac{70 \cdot kg_{Körpermasse}}{Mensch} \cdot \frac{1 \cdot W}{0,239 \cdot \frac{cal}{s}} \cdot \frac{10^3 \cdot cal}{1 \cdot kcal} \cdot \frac{1 \cdot h}{3,6 \cdot 10^3 \cdot s} \\ &= 81 \cdot \frac{W}{Mensch} \end{aligned} \quad (15.1)$$

Dieser beeindruckend hohe Wert macht z.B. verständlich, dass große Säle für mehrere 1000 Besucher im Winter schnell überheizt sind, wenn nicht mit dem Eintreffen der Besucher ausreichend schnell und deutlich die Leistung der Raumheizung gedrosselt wird.

Teil (b): (XXX: Der Lösungstext ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 2

Wir verwenden für die nachfolgende Abschätzung Werte, die den Anteil der Beleuchtung am gesamten Verbrauch eher über- als unterbewerten. Ein moderner Pkw hat bei einer konstanten Geschwindigkeit von $90 \cdot \frac{km}{h}$ einen Kraftstoffverbrauch

in der Größenordnung $6 \cdot \frac{\text{ltr}}{100 \cdot \text{km}}$. Den Heizwert von Dieselkraftstoff entnehmen wir dem Kapitel 8.11 und berücksichtigen noch dessen Dichte von etwa $0,87 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{ltr}}$. Der Verbrauch an elektrischer Energie für die Beleuchtung (Abblendlicht+Rücklicht) beträgt etwa $2 \cdot (60 \cdot W + 20 \cdot W) = 160 \cdot W$. Den Wirkungsgrad des Motors schätzen wir ab zu

$$\eta_{\text{Motor}} = \frac{\text{mech. Energie}}{\text{chem. Energie}} \approx 0,3 \quad (15.2)$$

und den der Lichtmaschine zu 0,8. Insgesamt erzeugt demnach die Beleuchtung einen Treibstoffverbrauch von etwa

$$W_2 = \frac{160 \cdot W}{0,3 \cdot 0,8} \approx 0,7 \cdot kW \quad (15.3)$$

Dieser Zahlenwert ist zu vergleichen mit dem zur Aufrechterhaltung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs erforderlichen Verbrauch von

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{6 \cdot \text{ltr}}{100 \cdot \text{km}} \cdot 90 \cdot \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{40,5 \cdot \text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{0,87 \cdot \text{kg}}{\text{ltr}} \\ &\quad \cdot \frac{1 \cdot W \cdot s}{1 \cdot J} \cdot \frac{10^6 \cdot J}{1 \cdot \text{MJ}} \cdot \frac{1 \cdot \text{h}}{3,6 \cdot 10^3 \cdot s} \\ &= 57 \cdot kW \end{aligned} \quad (15.4)$$

Das auf diese Weise abgeschätzte Verhältnis

$$\frac{W_2}{W_1} = 0,012 \quad (15.5)$$

zeigt, dass die Beleuchtung eines Kraftfahrzeugs dessen Kraftstoffverbrauch nicht signifikant erhöht.

Aufgabe 4

(XXX: Der Lösungstext für diese Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

15.1.2 zu Heft 3: Mechanik (-)

Aufgabe 3

Gegeben sei also eine beliebige Untermenge $\mathbf{U} \subset M$. Enthält diese keine Randpunkte, gilt also

$$\text{Rd}(\mathbf{U}) = \mathbf{0} \quad (15.6)$$

so ist der Beweis der Aussage

$$\text{Rd}(\text{Rd}(\mathbf{U})) = \mathbf{0} \quad (15.7)$$

trivial. Denn es gilt auf Grund der Definition der Randmenge für jede beliebige Menge \mathbf{U}

$$Rd(\mathbf{U}) \subset \mathbf{U} \quad (15.8)$$

Wir nehmen also jetzt an, dass die Randmenge $Rd(\mathbf{U})$ zumindest aus einem Punkt R besteht. Um den Begriff der Randmenge unverändert zu bewahren, müssen wir für das Folgende die Menge $Rd(\mathbf{U})$ als Grundmenge interpretieren. Die jetzt betrachteten Umgebungen sind also offene Teilmengen dieser Menge $Rd(\mathbf{U})$. Dann aber ist die betrachtete Menge mit der Grundmenge identisch und demzufolge definitionsgemäß offen. Der Rand einer offenen Menge ist aber leer, q.e.d.

Aufgabe 5

Es gilt zu beweisen, dass bei jeder Folge (x_n) , die gegen einen vorgegebenen Wert ξ konvergiert, die Folge $\left(\frac{y_n - y(\xi)}{x_n - \xi}\right)$, die aus (x_n) über die Funktion $y = x^k$ entsteht, gegen den Wert $k \cdot \xi^{k-1}$ konvergiert. Hierzu wählen wir eine Folge

$$(x_n) = \xi + \frac{1}{n} \quad (15.9)$$

und berechnen zunächst die Folge

$$\begin{aligned} (y_n) &= \left(\xi + \frac{1}{n}\right)^k = \sum_{\nu=0}^k \binom{k}{\nu} \cdot \xi^{k-\nu} \cdot n^{-\nu} \\ &= \xi^k + k \cdot \xi^{k-1} \cdot n^{-1} + \sum_{\nu=2}^k \binom{k}{\nu} \cdot \xi^{k-\nu} \cdot n^{-\nu} \end{aligned} \quad (15.10)$$

Daraus ergibt sich die Folge der Differenzenquotienten

$$\left(\frac{y_n - y(\xi)}{x_n - \xi}\right) = k \cdot \xi^{k-1} + \sum_{\nu=2}^k \binom{k}{\nu} \cdot \xi^{k-\nu} \cdot n^{-\nu+1} \quad (15.11)$$

Die in diesem Ausdruck auftretende endliche Summe schätzen wir einerseits nach oben ab, indem wir jeden Summanden durch seinen Absolutwert ersetzen (Schwarzsche Ungleichung),

$$\sum_{\nu=2}^k \binom{k}{\nu} \cdot \xi^{k-\nu} \cdot n^{-\nu+1} \leq \sum_{\nu=2}^k \binom{k}{\nu} \cdot |\xi^{k-\nu}| \cdot n^{-\nu+1} \quad (15.12)$$

Den größten der $k-1$ Werte $|\xi^{k-\nu}| \cdot n^{-\nu+1}$ wollen wir mit M bezeichnen. Da $n > 1$, gilt offenbar

$$\sum_{\nu=2}^k \binom{k}{\nu} \cdot \xi^{k-\nu} \cdot n^{-\nu+1} \leq \frac{k-1}{n} \cdot M \quad (15.13)$$

Wählen wir nun zu einer beliebig vorgegebenen kleinen Zahl ε eine natürliche Zahl N derart, dass

$$N > \frac{M \cdot (k-1)}{\varepsilon} \quad (15.14)$$

so gilt:

$$n > N \Rightarrow \left(\frac{y_n - y(\xi)}{x_n - \xi} \right) - k \cdot \xi^{k-1} < \varepsilon \quad (15.15)$$

D.h. die Folge

$$\left(\left(\frac{y_n - y(\xi)}{x_n - \xi} \right) - k \cdot \xi^{k-1} \right) \quad (15.16)$$

ist eine Nullfolge. Wegen der Vollständigkeit des Körpers der reellen Zahlen gilt dann

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{y_n - y(\xi)}{x_n - \xi} \right) = k \cdot \xi^{k-1} \quad (15.17)$$

Aufgabe 6

Wir berechnen zunächst das Volumen des Torus. Hierzu geben wir die Darstellung seiner Mittellinie in einem ebenen Polarkoordinatensystem (ρ, φ) an, s. Abb. XXX (XXX: diese Abb. ist noch nicht verfügbar.) :

$$\rho(\varphi) = \text{const} = R$$

In der durch diesen Punkt $\rho(\varphi)$ und senkrecht zu seiner Mittellinie verlaufenden Ebene füllt der betrachtete Torus die Fläche

$$A(\varphi) = \text{const} = \pi \cdot r^2$$

aus. Das Volumen des Torus beträgt daher (s. Gl. XXX)

$$V = \int_0^{2\pi} \pi \cdot r^2 \cdot R \cdot d\varphi = 2 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot R$$

Als nächstes berechnen wir das Volumen eines Torusabschnitts der Höhe h , s. wieder Abb. XXX. Hierzu verwenden wir weiterhin die Darstellung der Mittellinie des Torus in der Form gem. Gl. XXX und berechnen zunächst die Fläche, die der Torusabschnitt in der durch den Punkt $\rho(\varphi)$

$$h'(\varphi) = h \cdot XXX$$

und senkrecht zu seiner Mittellinie verlaufenden Ebene ausfüllt. Diese Fläche bildet einen Kreisabschnitt des Kreises mit dem Radius r und der Höhe

$$A(\varphi) = \frac{r^2}{2} \cdot XXX$$

(XXX: Der weitere Lösungstext dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 11

Zur Reduzierung der Schreibearbeit setzen wir für die nachfolgenden Rechnungen o.B.d.A.

$$\vec{r}_0 = 0 \Rightarrow (\vec{r} - \vec{r}_0) = \vec{r} \quad (15.18)$$

Wir berechnen das gemischte Produkt

$$d\vec{v} * (\vec{v} \times \vec{r}) = a(\vec{r}) \cdot dt \cdot \vec{r} * (\vec{v} \times \vec{r}) = 0 \quad (15.19)$$

D.h. diese 3 Vektoren liegen in einer Ebene. Sofern also \vec{v} und \vec{r} nicht selbst schon kollinear sind, spannen diese beiden Vektoren die gesuchte Ebene auf. Anderenfalls ist diese Ebene zu einer Linie entartet, d.h. die Zentralbewegung verläuft entlang einer Linie.

Wir berechnen nun den Ausdruck

$$\frac{d}{dt}(\vec{v} \times \vec{r}) = \frac{d\vec{v}}{dt} \times \vec{r} + \vec{v} \times \frac{d\vec{r}}{dt} = a(\vec{r}) \cdot (\vec{r} \times \vec{r}) + \vec{v} \times \vec{v} = 0 \quad (15.20)$$

Dem das Vektorprodukt eines jeden Vektors mit sich selbst verschwindet.

Aufgabe 14

Die Umlaufzeit des Jupiters um die Sonne ist mit $11,86 \cdot a$ wesentlich länger als die der Erde. Deswegen dürfen wir für die nachfolgende Diskussion die Position des Jupiters relativ zur Erde in 1. Näherung als konstant annehmen. Dann bewegt sich während des Beobachtungsjahres die Erde relativ zu der (annähernd) fixen Position von Sonne und Jupiter. Außerdem ist der Radius der Jupiterbahn ebenfalls groß gegen den der Erde, so dass wir die Entfernung zwischen Erde und Jupiter durch deren Projektion auf die Verbindungslinie Jupiter-Sonne annähern dürfen, s. Abb. XXX. (XXX: Diese Abb. ist noch nicht verfügbar.) In dieser Näherung beträgt die Entfernung Erde-Jupiter (s. wieder Abb. XXX)

$$a_{E-J} \approx R_J + R_E \cdot \sin \varphi \quad (15.21)$$

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T_E} \quad (15.22)$$

Die Laufzeit des Lichtes vom Jupiter bis zur Erde ist aber

$$\tau = a_{E-J} \cdot c_0 \quad (15.23)$$

Jede Änderung dieser Laufzeit wird auf der Erde als zeitliche Verschiebung des zugehörigen Ereignisses beobachtet. c_0 ist die gesuchte Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Diese lässt sich damit aus der gemessenen Oszillationsamplitude errechnen,

$$c_0 = \frac{1,496 \cdot 10^{11} \cdot m}{499,0 \cdot s} = 2,998 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{s} \quad (15.24)$$

Die dieser Oszillation überlagerten Veränderungen der Io-Aufgänge resultieren aus den bei der bisherigen Näherung nicht berücksichtigten Effekten, insbesondere also aus der Jupiterbewegung.

Aufgabe 16

Die geometrische Konfiguration bei der Anwendung des Daumensprungverfahrens ist in der Abb. 1 skizziert: Die Entfernung zwischen den Augen und dem

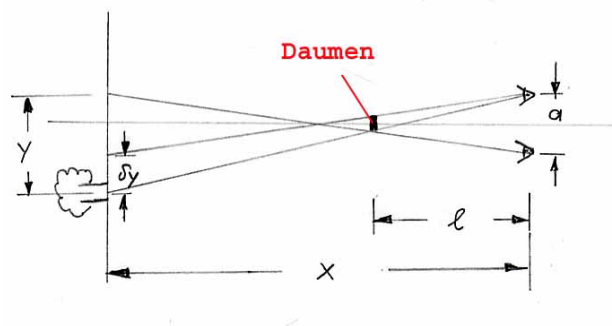


Abb. 1 Strahlengang beim sog. Daumensprungverfahren

Daumen sei l , der Augenabstand a und die gesuchte Objektentfernung x . Die reale Daumenbreite sei b . Die alternative Peilung mit dem rechten bzw. linken Auge verschiebt den Daumen in der Objektebene um die Strecke y . Diese ist nicht direkt messbar, wohl aber das Verhältnis dieser Größe y zur scheinbaren Daumenbreite δy in derselben Ebene,

$$N = \frac{y}{\delta y} \quad (15.25)$$

Durch Anwendung des Strahlensatzes erhalten wir unmittelbar

$$\frac{N \cdot b}{x - l} = \frac{a}{x} \Rightarrow x = \frac{l}{1 - N \cdot \frac{b}{a}} \quad (15.26)$$

Wenn

$$b \approx 2,5 \cdot \text{cm}; \quad a \approx 7,5 \cdot \text{cm}; \quad l \approx 0,5 \cdot \text{m} \Rightarrow \quad (15.27)$$

$$x \approx \frac{0,5 \cdot \text{m}}{1 - \frac{N}{3}} \quad (15.28)$$

In dieser Einfachstversion ist die Methode offenbar nur zur Abschätzung relativ kurzer Entfernungen bis zu wenigen Metern geeignet. Anderenfalls wird der relative Fehler des Nenners in der Gl. 15.28 zu groß.

(XXX: Der Text zur Lösung des 2. Teils der Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 17

Wir eliminieren aus den beiden Gl. 3.465 und 3.467 die Variable \vec{r}^* und erhalten

$$\gamma \cdot \vec{r} - \gamma \cdot t \cdot \vec{v} = \frac{1}{\gamma} \cdot \vec{r} - t^* \cdot \vec{v} \Rightarrow \quad (15.29)$$

$$t^* \cdot \vec{v} = \left(\frac{1}{\gamma} - \gamma\right) \cdot \vec{r} + \gamma \cdot t \cdot \vec{v} \quad (15.30)$$

Die Gl. multiplizieren wir auf beiden Seiten skalar mit \vec{v} :

$$t^* \cdot |\vec{v}|^2 = \left(\frac{1}{\gamma} - \gamma\right) \cdot \vec{r} * \vec{v} + \gamma \cdot t \cdot |\vec{v}|^2 \Rightarrow \quad (15.31)$$

$$t^* = \gamma \cdot \left[t - \frac{\vec{r} * \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) \right] \quad (15.32)$$

Wir berechnen hieraus den Ausdruck $(c_0 \cdot t^*)^2$:

$$(c_0 \cdot t^*)^2 = \gamma^2 \cdot c_0^2 \cdot t^2 - 2 \cdot t \cdot \gamma^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) \cdot \frac{c_0^2}{|\vec{v}|^2} \cdot \vec{r} * \vec{v} + \gamma^2 \cdot \frac{c_0^2}{|\vec{v}|^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^2 \cdot |\vec{r}|^2 \quad (15.33)$$

sowie aus der Gl. 3.465

$$|\vec{r}^*|^2 = \gamma^2 \cdot |\vec{r}|^2 - 2 \cdot \gamma^2 \cdot t \cdot \vec{r} * \vec{v} + \gamma^2 \cdot t^2 \cdot |\vec{v}|^2 \quad (15.34)$$

und fassen diese beiden Ausdrücke zusammen:

$$\begin{aligned} |\vec{r}^*|^2 - (c_0 \cdot t^*)^2 &= |\vec{r}|^2 \cdot \left[\gamma^2 - \gamma^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^2 \cdot \frac{c_0^2}{|\vec{v}|^2} \right] \\ &\quad - c_0^2 \cdot t^2 \cdot \left[\gamma^2 - \gamma^2 \cdot \frac{|\vec{v}|^2}{c_0^2} \right] \\ &\quad - 2 \cdot \gamma^2 \cdot t \cdot \vec{r} * \vec{v} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^2 \cdot \frac{c_0^2}{|\vec{v}|^2} \right] \end{aligned} \quad (15.35)$$

Wegen der Gl. 3.463 und 3.464 muss aber gelten

$$|\vec{r}^*|^2 - (c_0 \cdot t^*)^2 = |\vec{r}|^2 - (c_0 \cdot t)^2 \quad (15.36)$$

D.h. es muss gelten

$$\left[\gamma^2 - \gamma^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^2 \cdot \frac{c_0^2}{|\vec{v}|^2} \right] = \left[\gamma^2 - \gamma^2 \cdot \frac{|\vec{v}|^2}{c_0^2} \right] = 1 \quad (15.37)$$

$$\left[1 - \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^2 \cdot \frac{c_0^2}{|\vec{v}|^2} \right] = 0 \quad (15.38)$$

Wir schließen zunächst

$$\left[\gamma^2 - \gamma^2 \cdot \frac{|\vec{v}|^2}{c_0^2} \right] = 1 \Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{|\vec{v}|^2}{c_0^2}}} \quad (15.39)$$

und stellen danach fest, dass unter dieser Bedingung die anderen beiden Beziehungen ebenfalls erfüllt sind.

Aufgabe 18

Wir benutzen die Beziehung

$$|\vec{v}_{Obj} - \vec{v}| \leq v_{Obj} + v \quad (15.40)$$

Zum Beweis der Ungl. 3.505 genügt es also, den Fall zu betrachten, in dem \vec{v}_{Obj} und \vec{v} dieselbe Richtung, aber entgegengesetzten Richtungssinn haben, so dass in der obigen Ungl. das Gleichheitszeichen gilt. Dann wird die Gl. 3.503 zu

$$v_{Obj}^* = \frac{v_{Obj} + v}{1 + \frac{v_{Obj} \cdot v}{c_0^2}} \quad (15.41)$$

Diese Funktion $v_{Obj}^*(v_{Obj}, v)$ ist monoton steigend bzgl. beider Variablen:

$$\frac{\partial v_{Obj}^*(v_{Obj}, v)}{\partial v} = \frac{\left(1 + \frac{v_{Obj} \cdot v}{c_0^2}\right) - (v_{Obj} + v) \cdot \frac{v_{Obj}}{c_0^2}}{\left(1 + \frac{v_{Obj} \cdot v}{c_0^2}\right)^2} = \frac{1 - \frac{v_{Obj}^2}{c_0^2}}{\left(1 + \frac{v_{Obj} \cdot v}{c_0^2}\right)^2} > 0 \quad (15.42)$$

Sie nimmt also z.B. bzgl. v_{Obj} ihren höchsten Wert bei $v_{Obj} \lesssim c_0$ an, nämlich

$$v_{Obj} \lesssim c_0 \Rightarrow v_{Obj}^* \approx \frac{c_0 + v}{1 + \frac{c_0 \cdot v}{c_0^2}} \approx \frac{c_0}{1} = c_0 \quad (15.43)$$

Eine analoge Aussage gilt für v . Damit aber ist bereits gesichert, dass

$$v_{Obj}^* \leq c_0 \quad \forall v_{Obj}, v \leq c_0 \quad (15.44)$$

Aufgabe 19

Zur Beschreibung dieses zentralsymmetrischen Problems verwenden wir ein räumliches Polarkoordinatensystem (s. Abschnitt 3.1.15) und legen den Ursprung in den Schwerpunkt der Massenverteilung $m^*(\vec{r}')$. Die Koordinate ρ dieses Systems legen wir in die zum Aufpunktvektor \vec{r} senkrechte Ebene. Dann ist der Winkel zwischen dem aktuell betrachteten Ortsvektor \vec{r}' der Massenverteilung $m^*(\vec{r}')$ und dem Aufpunktvektor \vec{r} mit dem Winkel θ dieses Koordinatensystems identisch. Durch

Einsatz der in Abschnitt 3.1.15 angegebenen Rechenregeln zur Integration in beliebigen Koordinatensystemen erhalten wir

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{r^{n+1}} \cdot \int_{V_0} m^*(\vec{r}') \cdot (r')^n \cdot P_n(\cos \theta) \cdot d^3r' \\
 = & \frac{1}{r^{n+1}} \cdot \int_{V_0} m^*(\rho) \cdot \rho^n \cdot P_n(\cos \theta) \cdot \rho^2 \cdot \sin \theta \cdot d\rho \cdot d\varphi \cdot d\theta \\
 = & \frac{1}{r^{n+1}} \cdot \int_{\rho} m^*(\rho) \cdot \rho^{n+2} \cdot d\rho \cdot \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\cdot\pi} d\varphi \cdot \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} P_n(\cos \theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \quad (15.45)
 \end{aligned}$$

Das Integral über θ berechnen wir durch die Variablensubstitution

$$\cos \theta = z \Rightarrow \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} P_n(\cos \theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \int_{z=-1}^{z=+1} P_n(z) \cdot dz = 0 \quad \forall n > 0 \quad (15.46)$$

(s. Absatz *Die Legendre-Polynome* auf S. 521). Damit aber verschwinden die Integralterme in der Gl. 3.568 $\forall n > 0$, q.e.d. .

Aufgabe 20

In einem Inertialsystem, in dem der Billardtisch ruht, haben die Kugeln im Anfang die Geschwindigkeiten

$$v_1^{(a)} = v \quad ; \quad v_2^{(a)} = -v \quad (15.47)$$

Die Energie- und Impulserhaltung führt unabhängig von der Wahl des Inertialsystems auf die Beziehung

$$\left(v_1^{(a)}\right)^2 + \left(v_2^{(a)}\right)^2 = \left(v_1^{(e)}\right)^2 + \left(v_2^{(e)}\right)^2 \quad (15.48)$$

$$v_1^{(a)} + v_2^{(a)} = v_1^{(e)} + v_2^{(e)} \quad (15.49)$$

Unter den durch die Gl. 15.47 vorgegebenen Anfangsbedingungen gibt es daher für den Endzustand nur die Lösung

$$v_1^{(e)} = -v \quad ; \quad v_2^{(e)} = v \quad (15.50)$$

Die Geschwindigkeit beider Kugeln hat das Vorzeichen gewechselt. Der Energie- und Impulsübertrag von der Kugel (1) auf die Kugel (2) beträgt daher

$$\Delta E_{1 \rightarrow 2} = 0 \quad ; \quad \Delta P_{1 \rightarrow 2} = 2 \cdot m \cdot v \quad (15.51)$$

Für einen Beobachter, der relativ zum Billardtisch ruht, wird also bei diesem Prozess Impuls übertragen, aber keine Energie.

In einem Inertialsystem, in dem zu Beginn die Kugel (2) ruht, haben die Kugeln im Anfang die Geschwindigkeiten

$$v_1^{(a)} = 2 \cdot v \ ; \ v_2^{(a)} = 0 \quad (15.52)$$

Aus der Energie- und Impulserhaltung folgt nun

$$v_1^{(e)} = 0 \ ; \ v_2^{(e)} = 2 \cdot v \quad (15.53)$$

und für die Energie- und Impulsüberträge

$$\Delta E_{1 \rightarrow 2} = 2 \cdot m \cdot v^2 \ ; \ \Delta P_{1 \rightarrow 2} = 2 \cdot m \cdot v \quad (15.54)$$

Für einen Beobachter, der relativ zur Kugel (2) ruht, wird also zusätzlich zum Impuls auch Energie übertragen.

Die Antwort auf die Frage, ob bei diesem Prozess Energie von einer Kugel auf die andere übertragen wird oder nicht, ist also von der Wahl des Bezugssystems abhängig!

Aufgabe 21

Die Grenzgeschwindigkeit des Schiffes bei diesem Manöver wird genau dann erreicht, wenn die bis zum Zerreißen in dem Schiffstau gespeicherte Energie gleich der kinetischen Energie des Schiffes zu Beginn dieses Manövers ist:

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \varepsilon_{\max}^2 \cdot L \quad (15.55)$$

Daraus folgt

$$v_0 = \frac{D}{2} \cdot \varepsilon_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot E \cdot L}{M}} \quad (15.56)$$

Durch Einsetzen der im Aufgabentext genannten Zahlenwerte in die Gl. 15.56 erhalten wir

$$v_0 = \frac{20 \cdot \text{cm}}{2} \cdot 0,017 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 3 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot 30 \cdot \text{m}}{4,5 \cdot 10^4 \cdot \text{t}}} = 0,14 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (15.57)$$

Damit also die Schiffstau bei diesem Anlegemanöver nicht reißen, muss das Kreuzfahrerschiff während des *Festmachens*, d.h. während der Phase der Fixierung durch diese Tauen bereits durch *eigene Kraft* bis auf eine minimale Restgeschwindigkeit im Bereich von wenigen $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ zum Stillstand gekommen sein.

Der Einsatz von Trossen, die wesentlich dicker sind als die hier angenommenen $20 \cdot \text{cm}$, ist nicht üblich. Die Bedingung 15.57 lässt sich daher primär dadurch etwas entschärfen, dass noch längere Trossen und insbesondere jeweils mehrere eingesetzt werden, s. Abb. 2. Es ist jedoch klar, dass ein Schiff dieser Größenordnung während



Abb. 2 Das Kreuzfahrtschiff MSC Armonia im Hafen von Istanbul
(Quelle: eigene Aufnahme des Autors v. 03.10.2008)

seiner Liegezeit in einem Hafen nicht die geringste Gerschwindigkeit z.B. als durch Wind und Wellen angeregte Dämpfungsbewegung aufnehmen darf, weil anderenfalls die Festmacher-Trossen nicht mehr in der Lage wären, diese Bewegung abzubremsen, ohne zu reißen.

Aufgabe 22

Diese Aufgabe hat die Struktur einer Fangfrage: Durch ein Abschmelzen der im Meer schwimmenden Eisberge alleine steigt der Meeresspiegel überhaupt nicht! Wegen des Archimedischen Prinzips (Gl. 3.757) verdrängt der Eisberg exakt die mit seiner eigenen Masse identische Masse an Wasser. Nach seinem eigenen Aufschmelzen benötigt daher die entstandene Menge an flüssigem Wasser exakt das vorher von ihm verdrängte Volumen.

Es ist das auf dem **Festland** vorhandene Gletschereis (im Hochgebirge und insbesondere auf Grönland und in der Antarktis), dessen Abschmelzen im Zuge des aktuellen Klimawandels das Ansteigen des Meeresspiegels bewirken wird. Glücklicherweise wird das in der Antarktis vorhandene Gletschereis auf Grund der besonderen klimatischen Verhältnisse in dieser Region anfangs eher zunehmen als abnehmen.

Aufgabe 23

Als Kriterium für das Einhalten eines nicht zu großen Luftwiderstandes sehen wir die Bedingung an, dass die Strömung durch das Netz weitgehend laminar verläuft. Es muss also die Bedingung XXX (s. Absatz 3.3.16) gelten.

(XXX: Der weitere Lösungstext zu dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 24

Die Änderung des Winkels, unter dem ein Stern von der Erde aus im Laufe eines Jahres beobachtet wird, ist identisch mit der Änderung des Winkels, unter dem die Erde von diesem Stern aus erscheint. Dieser Winkel beträgt

$$\delta\alpha = \frac{d_{\text{Erdbahn}}}{a_{S-\alpha C}} = \frac{2 \cdot AE}{4,32 \cdot lj} \cdot \frac{1,496 \cdot 10^{11} \cdot m}{1 \cdot AE} \cdot \frac{1 \cdot lj}{9,46 \cdot 10^{15} \cdot m} = 7,32 \cdot 10^{-6} = 1,51'' \quad (15.58)$$

Zum Vergleich: Das (theoretische) Auflösungsvermögen des Hubble-Teleskops beträgt $0,1''$. Mit diesem Teleskop ist die Bewegung von Alpha-Centauri also noch detektierbar.

Aufgabe 25

Wir berechnen zunächst den an den beiden Extrempunkten auf der Erdoberfläche (äquaturnah und Mond-zugewandt bzw. äquaturnah und mondabgewandt) auftretenden Unterschied in der Gravitationsbeschleunigung durch den Mond:

$$\begin{aligned} \Delta b_{\text{Mondgrav.}} &= \gamma \cdot M_{\text{Mond}} \cdot \left(\frac{1}{(R_{\text{Mondbahn}} - R_{\text{Erde}})^2} - \frac{1}{(R_{\text{Mondbahn}} + R_{\text{Erde}})^2} \right) \\ &\approx \gamma \cdot M_{\text{Mond}} \cdot \frac{4 \cdot R_{\text{Erde}}}{R_{\text{Mondbahn}}^3} \end{aligned} \quad (15.59)$$

Um die Zentrifugalkraft bestimmen zu können, berechnen wir zunächst die Lage des Schwerpunktes \vec{S}_{ME} des 2-Körper-Systems aus Erde und Mond innerhalb der Verbindungslinie Erde-Mond. Aus Gl. 3.572 folgt unmittelbar

$$\begin{aligned} a &= \frac{M_{\text{Mond}}}{M_{\text{Erde}} + M_{\text{Mond}}} \cdot R_{\text{Mondbahn}} = 1,22 \cdot 10^{-2} \cdot 3,84 \cdot 10^5 \cdot km \quad (15.60) \\ &= 4,67 \cdot 10^3 \cdot km \\ a &: \text{Entfernung zw. } \vec{S}_{ME} \text{ u. dem Erdmittelpunkt} \end{aligned}$$

\vec{S}_{ME} liegt also noch **innerhalb** der Erde. Die Rotation der Erde um diesen Punkt innerhalb der Periode von $29,5 \cdot d$ erzeugt an einem Ort auf Meeresspiegelniveau eine Zentrifugalbeschleunigung, die von der relativen Lage dieses Ortes relativ zur Position des Mondes abhängt, also mit einer Periode von knapp $24 \cdot h$ oszilliert. Sie wird extrem, wenn diese 3 Punkte auf einer Linie liegen. Solange dieser Schwerpunkt innerhalb der Erde liegt, ist diese Beschleunigung immer nach außen gerichtet, und der Unterschied der beiden Extremwerte beträgt

$$\Delta b_{\text{Rotation}} = \omega^2 \cdot 2 \cdot a \quad (15.61)$$

Wir bestimmen nun das Verhältnis dieser beiden beschleunigungen

$$\begin{aligned} \frac{\Delta b_{\text{Rotation}}}{\Delta b_{\text{Mondgrav.}}} &= \frac{\omega^2 \cdot 2 \cdot M_{\text{Mond}} \cdot R_{\text{Mondbahn}}^4}{(M_{\text{Erde}} + M_{\text{Mond}}) \cdot \gamma \cdot M_{\text{Mond}} \cdot 4 \cdot R_{\text{Erde}}} \\ &= \frac{\omega^2 \cdot R_{\text{Mondbahn}}^4}{2 \cdot \gamma \cdot (M_{\text{Erde}} + M_{\text{Mond}}) \cdot R_{\text{Erde}}} \end{aligned} \quad (15.62)$$

Die Kreisfrequenz ω dieser Rotation ist aber identisch mit der des Mondes um \vec{S}_{ME} . Für diese gilt aber

$$\omega^2 = \gamma \cdot \frac{M_{\text{Erde}}}{R_{\text{Mondbahn}}^3} \quad (15.63)$$

Der Ausdruck in Gl. 15.63 wird also zu

$$\frac{\Delta b_{\text{Rotation}}}{\Delta b_{\text{Mondgrav.}}} = \frac{M_{\text{Erde}} \cdot R_{\text{Mondbahn}}}{2 \cdot (M_{\text{Erde}} + M_{\text{Mond}}) \cdot R_{\text{Erde}}} = 29,8 \quad (15.64)$$

Nach dieser Rechnung unterscheiden sich also die beiden primär den jeweiligen Flutberg auslösenden Mechanismen in ihrer Stärke etwa um den Faktor 30. Also sollten auch die hierdurch generierten Flutberge sich etwa um diesen Faktor unterscheiden! M.a.W. es sollte im wesentlichen doch nur einen Flutberg pro Tag geben. Die genannte Hypothese muss also auch aus diesem Grunde falsch sein! Um so erstaunlicher ist es, dass diese Hypothese von vielen Wissenschaftlern ernsthaft vertreten wurde und wird. U.a. trug ein bekannter Astrophysiker diese Deutungs-Hypothese ca. 2007 in einer populärwissenschaftlichen deutschsprachigen Fernsehsendung vor.

Der Leser hat in dieser Aufgabe erneut ein Beispiel dafür gefunden, dass bereits das in diesem Lehrbuch vermittelte Wissen ausreicht, um so manche in der Öffentlichkeit vertretene Hypothese durch eigenes Nachdenken und Rechnen (!) zu überprüfen.

Aufgabe 26

Diese Aufgabe ist erneut eine Fangfrage: Da für die Höhendifferenz, um die die Last angehoben wird, nur die absolute Längendifferenz relevant ist, um die das Zugseil aus dem Flaschenzug herausgezogen wird, ist der Winkel, unter dem das Zugseil bei dieser Bewegung gehalten wird, für die erforderliche Kraft irrelevant.

Aufgabe 27

Um die gestellte Frage beantworten zu können, müssen wir den Inhalt an kinetischer Energie z.B. eines typischen Sturmtiefs mit dem Energiestrom vergleichen, der diesem über Windkraftanlagen entzogen werden kann. Ergebnis ist dann die Größenordnung einer Lebensdauer dieses Tiefdruckgebietes, die es haben würde, wenn neben den WKA-en keinerlei (natürliche) dissipative Prozesse existieren würden. Diese Lebensdauer können wir dann mit der realen typischen Lebensdauer von Tiefdruckgebieten (3 ... 4 Tage) vergleichen. Für diese Abschätzung ist keinesfalls

ein mehr oder weniger offensichtlicher Weg vorgezeichnet. Es gilt, eine nicht zu komplizierte Abschätzung zu finden. Ich habe die nachfolgend beschriebene sehr einfache Vorgehensweise gewählt:

Bei der Berechnung der kinetischen Energie der bewegten Luftmassen wähle ich den (nur leicht überzogenen) Ansatz, dass sich die **gesamte** vertikale Luftschicht mit der mittleren Geschwindigkeit v bewegt:

$$E = A \cdot m_{\text{Atm}}^{(A)} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (15.65)$$

A : Flächenausdehnung des Tiefdruckgebietes
 $m_{\text{Atm}}^{(A)}$: auf die Fläche bezogene Gesamtmasse der Erdatmosphäre

Als Orientierung werde ich mit dem Wert $v = 50 \cdot \frac{\text{km}}{\text{h}}$ entsprechend $7 \cdot \text{Bft}$ (s. Abschnitt 3.4.4) rechnen.

Der Energiestrom, den eine (großräumige) Anordnung von WKA-en der Atmosphäre entzieht, beträgt

$$\frac{dE}{dt} = A \cdot n_{\text{WKA}}^{(A)} \cdot N_{\text{WKA}} \quad (15.66)$$

$n_{\text{WKA}}^{(A)}$: Flächendichte der aufgestellten WKA-Anlagen

Die Leistung N_{WKA} der betrachteten WKA ist außer vom betrachteten Typ auch noch stark von der jeweiligen Windgeschwindigkeit abhängig. Ich werde den festen (optimistischen) Wert $N_{\text{WKA}} = 5 \cdot \text{MW}$ verwenden. außerdem werde ich zur Abschätzung der o.a. Lebensdauer die stark vereinfachende Beziehung

$$\tau \approx \frac{E}{\frac{dE}{dt}} \quad (15.67)$$

verwenden. Dann folgt

$$\tau \approx \frac{A \cdot m_{\text{Atm}}^{(A)} \cdot \frac{v^2}{2}}{A \cdot n_{\text{WKA}}^{(A)} \cdot N_{\text{WKA}}} = \frac{m_{\text{Atm}}^{(A)} \cdot v^2}{2 \cdot n_{\text{WKA}}^{(A)} \cdot N_{\text{WKA}}} \quad (15.68)$$

Als Abstand zwischen 2 großen WKA-en wird heute typischerweise der Wert $500 \cdot m$ gewählt entsprechend

$$n_{\text{WKA}}^{(A)} = \frac{4 \text{ Anlagen}}{(\text{km})^2} \quad (15.69)$$

Auf diese Weise komme ich zu dem Ergebnis

$$\tau \approx \frac{4,9 \cdot 10^{18} \cdot \text{kg} \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{(\text{km})^2}{\text{h}^2}}{5,1 \cdot 10^8 \cdot (\text{km})^2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot (\text{km})^{-2} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot \text{W}} = 13 \cdot h \quad (15.70)$$

Durch diese allerdings recht grob vereinfachende Näherungsrechnung komme ich zu dem Ergebnis, dass ein ausreichend großflächig installierter Park von Windkraftanlagen von einer Leistungsklasse, die der Obergrenze der aktuell technisch-kommerziell realisierbaren Anlagen entspricht, durchaus eine Chance hat, auch zur Abschwächung der sturmbedingten Schäden an der Natur und an den vom Menschen geschaffenen Anlagen und Einrichtungen einen Beitrag zu leisten. Dieses Ergebnis ist insbesondere deswegen etwas überraschend, weil eine WKA selbst bei einem Rotordurchmesser von $100 \cdot m$ momentan in der vertikalen Richtung nur einen Bruchteil der Luftschicht von mehreren km Dicke erfasst.

Diese Vorgehensweise ist sicherlich in vielerlei Hinsicht angreifbar. Sie setzt z.B. voraus, dass sich die Dichte an kinetischer Energie innerhalb des betrachteten Tiefdruckgebietes hinter einer WKA ausreichend rasch wieder vertikal ausgleicht. Denn nur dann kann die in der lokalen Windrichtung nachfolgende WKA ebenfalls ihren Beitrag zur Reduzierung der kinetischen Energie des Tiefs leisten. Im entgegengesetzten Grenzfall würden die WKA eine bodennahe Schicht stark reduzierter Windgeschwindigkeiten erzeugen. Dies würde aber auch (bzw. erst recht) das Schädigungspotenzial des Sturmtiefs reduzieren. B.a.w. halte ich also meine Behauptung aufrecht, dass die o.a. Abschätzung wenn auch sehr grob, aber dennoch in ihrer Größenordnung zulässig ist.

Falls der Leser eine alternative Vorgehensweise gefunden hat, würde ich mich über eine Mitteilung z.B. an meine e-mail-Adresse sehr freuen.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Mechanik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.3 zu Heft 4: Elektrostatik (-)

Aufgabe 1

Das 1. Gruppen-Axiom lautet jetzt

$$z_1, z_2 \in \hat{\mathbf{C}} \Rightarrow z_1 \circ z_2 \in \hat{\mathbf{C}} \quad (15.71)$$

Diese Aussage ergibt sich unmittelbar aus der analogen Aussage für den \mathfrak{R}^1 . Das 2. Gruppen-Axiom

$$(z_1 \circ z_2) \circ z_3 = z_1 \circ (z_2 \circ z_3) \quad (15.72)$$

beweisen wir durch Nachrechnen:

$$\begin{aligned} (z_1 \circ z_2) \circ z_3 &= (x_1 \cdot x_2 - y_1 \cdot y_2; x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_1) \circ (x_3; y_3) \\ &= (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - x_3 \cdot y_1 \cdot y_2 - x_1 \cdot y_2 \cdot y_3 - x_2 \cdot y_1 \cdot y_3; \\ &\quad x_1 \cdot x_2 \cdot y_3 - y_1 \cdot y_2 \cdot y_3 + x_1 \cdot x_3 \cdot y_2 + x_2 \cdot x_3 \cdot y_1) \end{aligned} \quad (15.73)$$

$$\begin{aligned}
z_1 \circ (z_2 \circ z_3) &= (x_1; y_1) \circ (x_2 \cdot x_3 - y_2 \cdot y_3; x_2 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_2) \\
&= (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - x_1 \cdot y_2 \cdot y_3 - x_2 \cdot y_1 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_1 \cdot y_2; \\
&\quad x_1 \cdot x_2 \cdot y_3 + x_1 \cdot x_3 \cdot y_2 + x_2 \cdot x_3 \cdot y_1 - y_1 \cdot y_2 \cdot y_3) \quad (15.74)
\end{aligned}$$

Diese beiden Ausdrücke sind aber - bis auf die Reihenfolge innerhalb der Summen (durchzuführen im Bereich der reellen Zahlen) - identisch. Das 3. Gruppen-Axiom ist das Kommutativgesetz

$$z_1 \circ z_2 = z_2 \circ z_1 \quad (15.75)$$

Dessen Gültigkeit erkennt man wieder unmittelbar aus der Definition 96. Das 4. Gruppen-Axiom verlangt für je 2 komplexe Zahlen z_1 und z_2 die immer eindeutige Lösung der Gleichung

$$z_1 \circ z_3 = z_2 \quad (15.76)$$

Wir multiplizieren diese Gl. auf beiden Seiten mit der immer eindeutig definierten komplexen Zahl z_1^* :

$$z_1^* \circ z_1 \circ z_3 = z_1^* \circ z_2 \Rightarrow \quad (15.77)$$

$$|z_1|^2 \cdot z_3 = z_1^* \circ z_2 \Rightarrow$$

$$z_3 = \frac{1}{|z_1|^2} \cdot z_1^* \circ z_2 \quad (15.78)$$

Der auf der rechten Seite dieser Gl. stehende Ausdruck ist immer eindeutig definiert. Damit ist das Axiom bewiesen, und die Division komplexer Zahlen ist auf die Division reeller Zahlen zurückgeführt. Das Distributivgesetz

$$z_1 \circ (z_2 + z_3) = z_1 \circ z_2 + z_1 \circ z_3 \quad (15.79)$$

beweisen wir wieder durch Nachrechnen:

$$\begin{aligned}
z_1 \circ (z_2 + z_3) &= (x_1; y_1) \circ (x_2 + x_3; y_2 + y_3) \\
&= (x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 - y_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot y_3; x_1 \cdot y_2 \\
&\quad + x_1 \cdot y_3 + x_2 \cdot y_1 + x_3 \cdot y_1) \quad (15.80)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z_1 \circ z_2 + z_1 \circ z_3 &= (x_1; y_1) \circ (x_2; y_2) + (x_1; y_1) \circ (x_3; y_3) \\
&= (x_1 \cdot x_2 - y_1 \cdot y_2; x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_1) \\
&\quad + (x_1 \cdot x_3 - y_1 \cdot y_3; x_1 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1) \\
&= (x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 - y_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot y_3; x_1 \cdot y_2 \\
&\quad + x_1 \cdot y_3 + x_2 \cdot y_1 + x_3 \cdot y_1) \quad (15.81)
\end{aligned}$$

Aufgabe 3

Die äußeren elektrischen bzw. Gravitations-Potenziale eines rotationssymmetrischen Körpers (Gl. 4.164 bzw. 3.556) betragen

$$\varphi_{el.}(r) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r} \quad ; \quad \varphi_{grav.}(r) = -\gamma \cdot \frac{M}{r} \quad (15.82)$$

Die Annäherung des 2. Körpers auf den Abstand R ist daher mit einer Energieänderung verbunden von

$$\Delta E_{el} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{R} \quad ; \quad \Delta E_{grav.} = -\gamma \cdot \frac{M^2}{R} \Rightarrow \quad (15.83)$$

$$\frac{\Delta E_{el}}{\Delta E_{grav.}} = -\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{Q}{M}\right)^2 \quad (15.84)$$

Setzen wir nun die Zahlenwerte für ε_0 und γ ein, so erhalten wir

$$\left| \frac{\Delta E_{el}}{\Delta E_{grav.}} \right| \approx 10^{20} \cdot \left(\frac{kg}{Cb}\right)^2 \cdot \left(\frac{Q}{M}\right)^2 \quad (15.85)$$

Um dieses Ergebnis in seiner Bedeutung einordnen zu können, betrachten wir als erstes das Beispiel 2-er Protonen. Für diese Elementarteilchen gilt

$$\left(\frac{Q}{M}\right) = \frac{1,60 \cdot 10^{-19} \cdot Cb}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot kg} \approx 10^{-8} \cdot \frac{Cb}{kg} \quad (15.86)$$

Für 2 Protonen gilt also

$$\left| \frac{\Delta E_{el}}{\Delta E_{grav.}} \right| \approx 10^4 \quad (15.87)$$

Die elektrostatische Wechselwirkungsenergie liegt also bei Protonen um etwa 4 Größenordnungen über der der Gravitationswechselwirkung. Für Elektronen ist dieses Verhältnis noch einmal um mehr 2 Größenordnungen höher. Die Gravitations-Wechselwirkung ist also in der Physik der Atome und der Elementarteilchen ohne Bedeutung. Sie zeigt ihre Wirkung erst bei massereichen, aber elektrisch nahezu neutralen Körpern, bei denen erst auf mehr als 10^4 Nukleonen (Protonen oder Neutronen) eine elektrische Elementarladung im Überschuss auftritt. Bei einem Material mittlerer Atommasse (von z.B. $50 \cdot \frac{g}{Mol}$) entspricht dies etwa 1 Überschuss- (oder Unterschuss-)Elektron auf 200 Atome.

Aufgabe 4

Wir verwenden insbesondere die Eigenschaft der Wirbelfreiheit elektrostatischer Felder bzw. die daraus resultierende Gl. 3.358. Als Integrationsweg wählen wir zunächst den Verlauf einer Feldlinie, die von der Außenseite der einen Kondensatorplatte ausgeht und durch den außenbereich des Kondensators verläuft, bis sie schließlich auf die außenseite der anderen Kondensatorplatte auftritt. Aus Symmetriegründen liegt dieser Punkt dem gewählten Startpunkt der Integration genau

gegenüber. Danach vervollständigen wir den Integrationsweg zu einer in sich geschlossenen Kurve, indem wir innerhalb des Kondensators die Feldlinie auswählen, die diesen Punkt geradlinig mit dem Startpunkt verbindet, s. hierzu Abb. XXX. (XXX: Diese Abb. ist noch nicht verfügbar.)

Bei der Wahl dieses Integrationsweges ist sowohl im Außenbereich des Kondensators als auch in dessen Inneren das elektrische Feld immer parallel zum Linienelement des Integrationsweges orientiert, es wechselt jedoch relativ zur Richtung des gewählten Integrationsweges das Vorzeichen. Es gilt also einfach

$$\oint_{\mathfrak{S}} \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} = \oint_{\mathfrak{S}_{\text{außen}}} |\vec{\mathcal{E}}(\vec{r})| \cdot ds - \oint_{\mathfrak{S}_{\text{innen}}} |\vec{\mathcal{E}}(\vec{r})| \cdot ds \quad (15.88)$$

Wir ersetzen nun in jedem dieser beiden Teilintegrale den Betrag $\mathcal{E}(\vec{r})$ des elektrischen Feldes durch seinen entlang dieses Integrationswegs gebildeten Mittelwert. Dann gilt einfach

$$\oint_{\mathfrak{S}} \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} = \langle \mathcal{E}_{\text{außen}} \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{außen}}} \cdot s_{\text{außen}} - \langle \mathcal{E}_{\text{innen}} \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{innen}}} \cdot s_{\text{innen}} \quad (15.89)$$

Wegen der Wirbelfreiheit muss daher gelten

$$\langle \mathcal{E}_{\text{außen}} \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{außen}}} = \langle \mathcal{E}_{\text{innen}} \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{innen}}} \cdot \frac{s_{\text{innen}}}{s_{\text{außen}}} \quad (15.90)$$

Die Länge s_{innen} ist identisch mit dem Plattenabstand d . Die Feldstärke im Inneren des Kondensators ist unabhängig von der Ortskoordinate, wir können also auf den Mittelungsprozess verzichten. Für die Länge $s_{\text{außen}}$, die sich stark mit der Lage des Startpunktes auf der (kreisförmigen) Plattenfläche ändert, lässt sich kein einfacher analytischer Ausdruck angeben. Wir begnügen uns damit, diese Länge sehr grob abzuschätzen. Hierzu ersetzen wir das reale Bild der Feldlinienverteilung im Außenbereich durch die in der Abb. XXX angedeutete Verteilung: Alle von der positiv geladenen Kondensatorplatte nach außen gerichteten Feldlinien verbleiben in einem sich um die Kondensatorplatten schmiegenden Torus, dessen Querschnittsfläche überall den gleichen Inhalt aufweist. Der Abstand des Startpunktes der Feldlinie von dem Rand der Kreisfläche sei ρ . Dann hat $s_{\text{außen}}$ den Näherungswert (s. wieder Abb. XXX)

$$s_{\text{außen}} = 2 \cdot \pi \cdot \rho + d \quad (15.91)$$

Damit wird Gl. 15.90 zu

$$\langle \mathcal{E}_{\text{außen}} \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{außen}}} = \mathcal{E}_{\text{innen}} \cdot \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \rho + d} = \mathcal{E}_{\text{innen}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot \pi}{d} \cdot \rho} \quad (15.92)$$

Die im Inneren des Kondensators gespeicherte Feldenergie beträgt (s. Gl. 4.181)

$$E_{\text{innen}} = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \mathcal{E}_{\text{innen}}^2 \cdot d \cdot \pi \cdot R^2 \quad (15.93)$$

Die im Außenbereich gespeicherte Feldenergie ergibt sich im Rahmen der getroffenen Näherungen zu

$$E_{\text{außen}} = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \int_{\text{Torusvolumen}} \langle \mathcal{E}_{\text{außen}}^2 \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{außen}}} \cdot d^3 r \approx \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \int_{\text{Torusvolumen}} (\langle \mathcal{E}_{\text{außen}} \rangle_{\mathfrak{S}_{\text{außen}}})^2 \cdot d^3 r \quad (15.94)$$

D.h. wir haben den Mittelwert $\langle \mathcal{E}^2 \rangle$ durch den Ausdruck $\langle \mathcal{E} \rangle^2$ ersetzt. Wie wir später noch eingehend diskutieren werden (s. Gl. 7.239) ist dies i.a. nicht zulässig und kann zu drastischen Fehlern führen (s. insbes. Abschnitt 7.18.2). An dieser Stelle ist der Fehler jedoch nur moderat, weil die bereits getroffene Näherung des kreissymmetrischen Torus für das vom dem Außenfeld eingenommene Volumen bewirkt, dass sich der Betrag des Feldes $\mathcal{E}_{\text{außen}}$ entlang einer Feldlinie nur geringfügig verändert. Mit dieser Näherung können wir nun die Energie $E_{\text{außen}}$ unmittelbar angeben:

$$E_{\text{außen}} = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \int_{z=0; \rho=0}^{2 \cdot \pi \cdot R; \frac{R}{2}} \frac{\mathcal{E}_{\text{innen}}^2}{\left(1 + \frac{2 \cdot \pi}{d} \cdot \rho\right)^2} \cdot d \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \pi}{d} \cdot \rho\right) \cdot d\rho \cdot dz \quad (15.95)$$

Zur Integration entlang der Torusachse haben wir eine weitere Vereinfachung vorgenommen: Wir haben den Torus gedanklich zu einem Rundzylinder der Länge $2 \cdot \pi \cdot R$ abgewickelt (und dabei leicht deformiert), so dass sich die Integration über die 3. Koordinate zu einer Multiplikation mit dieser Länge reduziert:

$$\begin{aligned} E_{\text{außen}} &= \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \int_{z=0; \rho=0}^{2 \cdot \pi \cdot R; \frac{R}{2}} \frac{\mathcal{E}_{\text{innen}}^2 \cdot d}{\left(1 + \frac{2 \cdot \pi}{d} \cdot \rho\right)} \cdot d\rho \cdot dz = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \mathcal{E}_{\text{innen}}^2 \cdot d \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \int_0^{\frac{R}{2}} \frac{d\rho}{\left(1 + \frac{2 \cdot \pi}{d} \cdot \rho\right)} \\ &= \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \mathcal{E}_{\text{innen}}^2 \cdot d \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{d}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot \pi}{d} \cdot \frac{R}{2}\right) \\ &= \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \mathcal{E}_{\text{innen}}^2 \cdot d^2 \cdot R \cdot \ln \left(1 + \pi \cdot \frac{R}{d}\right) \end{aligned} \quad (15.96)$$

Durch Vergleich mit der Gl. 15.93 erhalten wir das Ergebnis

$$E_{\text{außen}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{d}{R} \cdot \ln \left(1 + \pi \cdot \frac{R}{d}\right) \cdot E_{\text{innen}} \quad (15.97)$$

Wir schätzen also den in der Gl. 4.223 eingeführten Geometriefaktor ab zu

$$g \approx 1 + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{d}{R} \cdot \ln \left(1 + \pi \cdot \frac{R}{d}\right) \quad (15.98)$$

Sobald also bei einem Plattenkondensator die Plattengröße \sqrt{A} deutlich größer ist als der Plattenabstand d , trägt die im Außenbereich des Kondensators gespeicherte

Feldenergie nur minimal zu der Gesamtenergie bei. Hierzu bedarf es nicht einmal zusätzlicher konstruktiver Maßnahmen (Zusatzabschirmung o.ä.).

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Elektrostatik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.4 zu Heft 5: Magnetostatik (-/-)

Text

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Magnetostatik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.5 zu Heft 6: Elektrodynamik (-/-)

Text

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Elektrodynamik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.6 zu Heft 7: Quantenmechanik (-)

Aufgabe 2

Bei der Annäherung eines mit der Ladung $-Q_0$ belegten Teilchens (des Elektrons) an das mit der Ladung $+Q_0$ belegte Teilchen (das Proton) bis auf einen mittleren Abstand R wird dem elektrischen Feld eine Energie entzogen von (Gl. 4.164)

$$\Delta E_{\text{el.Feld}} = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_0^2}{R} \quad (15.99)$$

Die Lokalisationsenergie des Elektrons schätzen wir wie folgt ab:

$$E_{\text{Lok}} = 3 \cdot \Delta E_x \approx 3 \cdot \frac{\Delta P^2}{2 \cdot M_{\text{Elektron}}} \approx 3 \cdot \frac{\hbar^2}{8 \cdot M_{\text{Elektron}} \cdot R^2} \quad (15.100)$$

Die Gesamtenergie beträgt dann

$$E = \Delta E_{\text{el.Feld}} + E_{\text{Lok}} = \frac{3 \cdot \hbar^2}{8 \cdot M_{\text{Elektron}} \cdot R^2} - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_0^2}{R} \quad (15.101)$$

Wir berechnen nun das Minimum dieser Funktion $E = E(R)$:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dR} &= \frac{-6 \cdot \hbar^2}{8 \cdot M_{\text{Elektron}} \cdot R^3} + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_0^2}{R^2} \\ &= \frac{1}{4 \cdot R^2} \cdot \left(\frac{Q_0^2}{\pi \cdot \varepsilon_0} - \frac{3 \cdot \hbar^2}{M_{\text{Elektron}} \cdot R} \right) = 0 \end{aligned} \quad (15.102)$$

$$\Rightarrow R_0 = \frac{3 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \hbar^2}{Q_0^2 \cdot M_{\text{Elektron}}} \quad (15.103)$$

Diesen Wert setzen wir nun in die Gl. 15.101 ein,

$$\begin{aligned}
 E_0 &\approx \frac{3 \cdot \hbar^2 \cdot Q_0^4 \cdot M_{\text{Elektron}}^2}{8 \cdot M_{\text{Elektron}} \cdot (3 \cdot \hbar^2)^2 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0^2} - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_0^2 \cdot Q_0^2 \cdot M_{\text{Elektron}}}{3 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \hbar^2} \\
 &= \frac{Q_0^4 \cdot M_{\text{Elektron}}}{24 \cdot \hbar^2 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0^2} - \frac{Q_0^4 \cdot M_{\text{Elektron}}}{12 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot \hbar^2} = -\frac{Q_0^4 \cdot M_{\text{Elektron}}}{24 \cdot \hbar^2 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0^2} \quad (15.104)
 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Naturkonstanten in die Gl. 15.103 bzw. Gl. 15.104 erhalten wir

$$R_0 = 3,97 \cdot 10^{-2} \cdot nm ; E_0 = 18,1 \cdot eV \quad (15.105)$$

Die heute als zutreffend akzeptierten Werte für das Wasserstoffatom im Grundzustand sind

$$\text{Literaturwerte: } R_0 = 5,3 \cdot 10^{-2} \cdot nm ; E_0 = 13,6058 \cdot eV \quad (15.106)$$

Wir sehen, dass allein die Berücksichtigung der Unschärferelation uns bereits in die Lage versetzt hat, die physikalischen Daten des Grundzustands des H-Atoms relativ gut abzuschätzen. Wir können dieses Ergebnis auch dahin gehend interpretieren, dass wir hiermit bereits im Grundsatz verstanden haben, warum und wie Elektronen und Nukleonen sich zu stabilen Atomen zusammen fügen.

Aufgabe 3

Es sind also die Funktionen

$$f_i(x) = x^i ; i \geq 0 \quad (15.107)$$

mit Hilfe des Schmidtschen Orthonormierungsverfahrens umzurechnen. Der Übersichtlichkeit halber führen wir die Umrechnungsvorschrift noch einmal an:

$$|k_0^\perp\rangle = \frac{|k_0\rangle}{\sqrt{\langle k_0 | k_0 \rangle}} \quad (15.108)$$

$$|k_i^\perp\rangle = |k_i\rangle - \sum_{j=0}^{i-1} \langle k_i | k_j^\perp \rangle \cdot |k_j^\perp\rangle ; i = 1, \dots, N \quad (15.109)$$

(Da wir die Potenzen ab $i = 0$ zählen wollen, habe ich den Laufindex i in der Gl. 15.109 gleich entsprechend angepasst.)

Wir beginnen die konkrete Rechnung mit dem 0-ten Glied:

$$\langle k_0 | k_0 \rangle = \int_{-1}^{+1} x^0 \cdot dx = 2 \Rightarrow |k_0^\perp\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (15.110)$$

Das nachfolgende Glied berechnet sich wie folgt:

$$\langle k_1 | k_0^\perp \rangle = \int_{-1}^{+1} x^1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot dx = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \quad (15.111)$$

$$|k_1^\perp\rangle = x - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = x - \frac{1}{2} \quad (15.112)$$

(XXX: Der weitere Lösungstext dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 4

Wir berechnen die Ableitung von $P_n(x)$ über die Gl. 7.152

$$\frac{dP_n(x)}{dx} = \frac{1}{(x^2 - 1)} \cdot [n \cdot x \cdot P_n(x) - n \cdot P_{n-1}(x)] \quad (15.113)$$

und sodann

$$\begin{aligned} \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} &= \frac{(-2 \cdot x)}{(x^2 - 1)^2} \cdot [n \cdot x \cdot P_n(x) - n \cdot P_{n-1}(x)] \\ &+ \frac{1}{(x^2 - 1)} \cdot \left[n \cdot P_n(x) + n \cdot x \cdot \frac{dP_n(x)}{dx} - n \cdot \frac{dP_{n-1}(x)}{dx} \right] \end{aligned} \quad (15.114)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(-2 \cdot x)}{(x^2 - 1)^2} \cdot [n \cdot x \cdot P_n(x) - n \cdot P_{n-1}(x)] + \frac{n}{(x^2 - 1)} \cdot P_n(x) \\ &+ \frac{n \cdot x}{(x^2 - 1)^2} \cdot [n \cdot x \cdot P_n(x) - n \cdot P_{n-1}(x)] \quad (15.115) \\ &- \frac{n}{(x^2 - 1)^2} \cdot [(n - 1) \cdot x \cdot P_{n-1}(x) - (n - 1) \cdot P_{n-2}(x)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{n \cdot (n - 1)}{(x^2 - 1)^2} \cdot P_{n-2}(x) - \left[\frac{2 \cdot n \cdot x}{(x^2 - 1)^2} + \frac{n^2 \cdot x}{(x^2 - 1)^2} + \frac{n \cdot (n - 1) \cdot x}{(x^2 - 1)^2} \right] \cdot P_{n-1}(x) \\ &+ \left[\frac{-2 \cdot n \cdot x^2}{(x^2 - 1)^2} + \frac{n}{(x^2 - 1)} + \frac{(n \cdot x)^2}{(x^2 - 1)^2} \right] \cdot P_n(x) \end{aligned} \quad (15.116)$$

(XXX: Der weitere Lösungstext dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 9

(a) Wir beweisen zunächst, dass gilt

$$\begin{aligned} \mathbf{A} |k\rangle &= a \cdot |k\rangle ; \mathbf{B} |k\rangle = b \cdot |k\rangle ; a, b \in \hat{\mathbf{C}} \Rightarrow \\ [\mathbf{A}, \mathbf{B}] &= \mathbf{A} \circ \mathbf{B} - \mathbf{B} \circ \mathbf{A} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (15.117)$$

Hierzu setzen wir die jeweiligen Eigenwertgleichungen für die Operatoren \mathbf{A} und \mathbf{B} in die linke Seite von Gl. 15.117 ein und erhalten:

$$(\mathbf{A} \circ \mathbf{B}) |k\rangle - (\mathbf{B} \circ \mathbf{A}) |k\rangle = \mathbf{A} (b \cdot |k\rangle) - \mathbf{B} (a \cdot |k\rangle) = a \cdot b |k\rangle - b \cdot a \cdot |k\rangle = 0 \quad (15.118)$$

(b) Um die in die umgekehrte Richtung weisende Aussage zu beweisen, setzen wir voraus, dass

$$[\mathbf{A}, \mathbf{B}] = \mathbf{0} ; \mathbf{A} |k\rangle = a \cdot |k\rangle \quad (15.119)$$

und zeigen, dass dann der Vektor $|k\rangle$ auch Eigenvektor zu \mathbf{B} ist. Wir führen den Beweis indirekt und nehmen an, dass

$$\mathbf{B} |k\rangle = b \cdot |k\rangle + c \cdot |l\rangle \quad \text{wobei } \langle l | k \rangle = 0 \text{ und } c \neq 0 \quad (15.120)$$

D.h. der Vektor $\mathbf{B} |k\rangle$ besteht außer einer Komponente in $|k\rangle$ -Richtung (die jedoch auch 0 werden kann) insbesondere aus einer nicht verschwindenden Komponente senkrecht zu $|k\rangle$. Dann folgt

$$(\mathbf{A} \circ \mathbf{B} - \mathbf{B} \circ \mathbf{A}) |k\rangle = \mathbf{A} (b \cdot |k\rangle + c \cdot |l\rangle) - a \cdot (b \cdot |k\rangle + c \cdot |l\rangle) = c \cdot (\mathbf{A} |l\rangle - a \cdot |l\rangle) \quad (15.121)$$

Dieser Ausdruck muss aber nach Voraussetzung verschwinden, d.h. es folgt

$$c = 0 \text{ oder } (\mathbf{A} - a \cdot \mathbf{1}) |l\rangle = |0\rangle \quad (15.122)$$

Die Bedingung $c = 0$ ist aber ein Widerspruch zur Annahme, dass $|k\rangle$ nicht Eigenvektor zu \mathbf{B} ist. Die 2. Bedingung ist aber identisch mit der Eigenwertgleichung, also mit der Bedingung, dass $|l\rangle$ ebenfalls Eigenvektor zu \mathbf{A} ist und zwar zu demselben Eigenwert a wie $|k\rangle$. Damit ist aber auch der Vektor $\mathbf{B} |k\rangle$ Eigenvektor von \mathbf{A} und zu dem selben Eigenwert a .

(XXX: Der weitere Text der Lösung zu dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 11

(XXX: Der Text zur Lösung dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 14

Als nicht mit signifikant erhöhter Strahlungsgefahr belastet wird i.a. eine Situation angesehen, bei der die betrachtete (zusätzliche) radioaktive Bestrahlung um einen (noch festzulegenden) Faktor unter der an derselben Stelle vorliegenden sog. natürlichen radioaktiven Belastung liegt.

(XXX: Der weitere, eigentliche Lösungstext ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Quantenmechanik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.7 zu Heft 8: Thermodynamik (-)

Aufgabe 2

Der energie-spezifische Flächenbedarf einer Photovoltaik-Einheit ist einfach der Kehrwert des angegebenen, über ein Jahr gemittelten Energiestroms pro Fläche,

$$J^{(E)} = \left(42 \cdot \frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot a} \right)^{-1} = 0,209 \cdot \frac{m^2}{W} \quad (15.123)$$

Um die analoge Größe für den Fall des Zuckerrüben-Anbaus zu bestimmen, müssen wir lediglich die angegebenen Zahlenwerte in korrekter Weise miteinander verknüpfen:

$$\begin{aligned} \frac{A}{J^{(E)}} &= \frac{1 \cdot ha \cdot a}{35,3 \cdot t_{\text{Rüben}}} \cdot \frac{1 \cdot t_{\text{Rüben}}}{0,139 \cdot t_{\text{Zucker}}} \cdot \frac{1 \cdot g_{\text{Zucker}}}{16,8 \cdot kJ} \cdot \frac{1 \cdot t}{10^6 \cdot g} \cdot \frac{10^4 \cdot m^2}{1 \cdot ha} \cdot \frac{1 \cdot kJ}{2,78 \cdot 10^{-4} \cdot kWh} \\ &= 0,436 \cdot \frac{m^2 \cdot a}{kWh} = 3,82 \cdot \frac{m^2}{W} \end{aligned} \quad (15.124)$$

Obwohl der Zuckerrüben-Anbau eine bzgl. der Ausbeute an Energie besonders effektive landwirtschaftliche Methode darstellt, ist dessen energie-spezifischer Flächenbedarf immer noch um gut eine Größenordnung höher als der der Photovoltaik und zwar gerechnet für unsere Breitengrade!

Das Ergebnis dieser Aufgabe ist von signifikanter energie- und umweltpolitischer Relevanz: Wenn es darum geht, in einer Zone der Erde, in der die bereitstellbare Fläche knapp ist, möglichst effektiv, d.h. unter Optimierung der Kenngröße $\frac{\text{Energie}}{\text{Zeit} \cdot \text{Fläche}}$ Energie zu erzeugen, ist die Landwirtschaft nicht die Technik der Wahl, selbst wenn der vorhandene Boden dafür geeignet ist und Wasser in ausreichendem Maße zu Verfügung steht. Vielmehr ist die Photovoltaik selbst in Mitteleuropa der Landwirtschaft hierin bereits um mehr als eine Größenordnung überlegen. Nicht ein Naturgesetz, sondern einzig und allein die heute noch erforderliche hohe Investitionssumme pro Erzeugungseinheit steht dem generellen Durchbruch der Photovoltaik aktuell noch entgegen. Welche spezifischen Kosten für Wartung- und Ersatz-Investitionen bei einem großtechnischen Einsatz entstehen würden, ist z.Zt. nur sehr eingeschränkt vorhersehbar. Es gibt aber gute Gründe anzunehmen, dass die Photovoltaik auch in diesen beiden Bereichen den derzeit eingesetzten Techniken einschließlich der Windkraftenergie deutlich überlegen sein wird.

Das Ergebnis dieser Aufgabe gibt aber auch eine Orientierung über die durch biochemische Prozesse erreichbare Größenordnung der Umwandlung von solarer Einstrahlung in chemische Energie: Vergleichen wir den durch die Gl. 15.124 angegebenen Wert mit der sog. Solarkonstante (Kapitel 8.11) und berücksichtigen, dass

- dieser Strahlungsstrom bei Mittelung über 1 Jahr etwa mit dem Faktor 0,25 gewichtet wird (Absatz S. 806), und dass
- im Mittel jeweils 35% der Erdoberfläche mit Wolken bedeckt sind,

so schätzen wir als Wirkungsgrad dieses Prozesses den Wert

$$\eta \approx \frac{\frac{1 \cdot W}{3,82 \cdot m^2}}{1,4 \cdot \frac{kW}{m^2} \cdot 0,25 \cdot 0,65} \approx 1 \cdot 10^{-3} \quad (15.125)$$

ab. Diese sehr grobe Abschätzung kann sicherlich nur eine Auskunft über die Größenordnung dieses Prozesses geben. Aber auch in dieser Näherung ist dieser Wert

bereits eine wichtige Hilfe bei der Bestimmung der für den globalen Energie-Haushalt der Erde relevanten Prozesse, s. Absatz S. 798.

Aufgabe 3

(XXX: Der Lösungstext ist noch nicht verfügbar)

Aufgabe 4

Die Joule-Thomson-Expansion ist ein Prozess bei konstanter teilchenbezogener Enthalpiedichte \hat{h} . Der für die dabei auftretende Entropie-Änderung relevante Materialparameter ist daher die Größe

$$\beta_s = \frac{\partial \hat{s}(\hat{h}, p)}{\partial p} \quad (15.126)$$

Diese können wir nach den Regeln der Differenzialrechnung wie folgt umwandeln:

$$\frac{\partial \hat{s}(\hat{h}, p)}{\partial p} = -\frac{\frac{\partial \hat{h}(\hat{s}, p)}{\partial p}}{\frac{\partial \hat{h}(\hat{s}, p)}{\partial \hat{s}}} = -\frac{\hat{v}}{T} < 0 \quad (15.127)$$

Dieses Ergebnis gilt für alle beliebigen Materialien, ist also insbesondere auch unabhängig von dem Vorzeichen des Joule-Thomson-Koeffizienten! Bei jedem Material nimmt also durch eine Joule-Thomson-Expansion ($\delta p > 0$) die Entropie \hat{s} zu,

$$\Delta \hat{s} = -\int_{p_a}^{p_e} \frac{\hat{v}(\hat{h}, p)}{T(\hat{h}, p)} \cdot dp = \int_{p_e}^{p_a} \frac{\hat{v}(\hat{h}, p)}{T(\hat{h}, p)} \cdot dp \quad (15.128)$$

Wir diskutieren nun noch den Sonderfall eines idealen Gases. Es hat einen verschwindenden JTK, d.h. die Temperatur bleibt während der JT-Expansion konstant und es gilt

$$\hat{v} = \frac{k \cdot T}{p} \quad (15.129)$$

Die Gl. 15.128 wird daher zu

$$\Delta \hat{s} = \frac{1}{T} \cdot \int_{p_e}^{p_a} \frac{k \cdot T}{p} \cdot dp = k \cdot \ln \frac{p_a}{p_e} \quad (15.130)$$

Aufgabe 5

Wir schreiben die Gleichgewichtsbedingung für den freien Teilchenaustausch zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase (Gl. 8.208) als implizite Gleichung

$$f(T, p) = \mu_2(T, p) - \mu_1(T, p) = 0 \quad (15.131)$$

Nach den Regeln über die Differenziation impliziter Funktionen folgt daraus

$$\frac{dp}{dT} = -\frac{\frac{\partial f(T,p)}{\partial T}}{\frac{\partial f(T,p)}{\partial p}} = -\frac{\frac{\partial \mu_2(T,p)}{\partial T} - \frac{\partial \mu_1(T,p)}{\partial T}}{\frac{\partial \mu_2(T,p)}{\partial p} - \frac{\partial \mu_1(T,p)}{\partial p}} \quad (15.132)$$

Nun gilt aber für jede Phase

$$\frac{\partial \mu(T,p)}{\partial T} = \frac{\partial^2 G(T,p,N)}{\partial T \cdot \partial N} = -\frac{\partial S(T,p,N)}{\partial N} = -\hat{s}(T,p) \quad (15.133)$$

und entsprechend

$$\frac{\partial \mu(T,p)}{\partial p} = \frac{\partial^2 G(T,p,N)}{\partial p \cdot \partial N} = \frac{\partial V(T,p,N)}{\partial N} = \hat{v}(T,p) \quad (15.134)$$

Daher gilt

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\hat{s}_2 - \hat{s}_1}{\hat{v}_2 - \hat{v}_1} \quad (15.135)$$

Damit ist der 1. Teil dieser Aufgabe bereits bewiesen. Nun gilt aber für jede der beiden Phasen

$$\hat{e} = T \cdot \hat{s} - p \cdot \hat{v} + \mu \quad (15.136)$$

Also gilt auf der Koexistenzkurve ($\mu_2 = \mu_1$)

$$T \cdot (\hat{s}_2 - \hat{s}_1) = \hat{e}_2 - \hat{e}_1 + p \cdot \hat{v}_2 - p \cdot \hat{v}_1 = \hat{h}_2 - \hat{h}_1 \quad (15.137)$$

und die Gl. 15.135 wird zu

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\hat{h}_2 - \hat{h}_1}{\hat{v}_2 - \hat{v}_1}$$

Aufgabe 8

Wir bestimmen zunächst eine Näherung für die Steigung der Schmelzkurve von Wasser über die Clausius-Clapeyronsche Gl. 8.214:

$$\frac{dT}{dp} = T \cdot \frac{\hat{v}_L - \hat{v}_S}{\hat{h}_L - \hat{h}_S} = 273,15 \cdot K \cdot \frac{-0,083 \cdot \frac{dm^3}{kg}}{334 \cdot \frac{kJ}{kg}} \approx -8,3 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{K}{Pa} \quad (15.138)$$

Sodann schätzen wir den Druck ab, den ein Schlittschuhläufer unter der Schlittschuhkufe erzeugt:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{70 \cdot kg}{4 \cdot mm \cdot 280 \cdot mm} = 6,1 \cdot 10^5 \cdot Pa = 6,1 \cdot bar \quad (15.139)$$

Daraus resultiert eine Schmelztemperatureniedrigung von

$$\Delta T = -8,3 \cdot 10^{-8} \cdot 6,1 \cdot 10^5 \cdot K = 0,051 \cdot K \quad (15.140)$$

Es darf also vermutet werden, dass (entgegen häufig zu findender Anmerkungen) diese druckinduzierte Erniedrigung der Schmelztemperatur kaum einen signifikanten Einfluss hat auf die Gleiteigenschaften des Schlittschuhs auf dem Eis. Die äußerst niedrige Reibung muss also einen anderen Grund haben. Neuesten Untersuchungen folgend ist jede Eisoberfläche von $T > -35^\circ C$ wegen der in der Grenzflächenschicht stark unterschiedlichen Bindungsverhältnisse mit einer $12 \dots 70 \cdot nm$ dicken Schicht aus flüssigem Wasser bedeckt.

Aufgabe 9

Teil a): Die durch den Kontakt mit der Umgebungsluft auf die Heckscheibe übertragene Wärmestromdichte beträgt (Abschnitt 8.2.5)

$$j_{\text{Konv.}} = \alpha \cdot (T_L - T_{\text{Obj.}}) \quad ; \quad T_{\text{Obj.}} : \text{Temperatur der Scheibe} \quad (15.141)$$

Als Kennwert für den *Wärmeübergangskoeffizienten* α einer ebenen Fläche gegenüber ruhender Luft findet man in den Tabellenwerken (z.B. [1])

$$\alpha = 3,5 \dots 35 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (15.142)$$

Da die Scheibe immer etwas geneigt ist, andererseits eine sehr glatte Fläche den Wärmeübergang eher hindert, werden wir mit dem Wert $\alpha = 20 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$ rechnen. Der Strahlungskontakt findet mit der Zone der Atmosphäre statt, innerhalb der der größte Teil der von der Erdoberfläche ausgehenden Strahlung absorbiert wird. Wir setzen zur Orientierung als relevante Temperatur T_S den Wert an, den die für die Abstrahlung der Erdstrahlung in das Weltall relevante Schicht annimmt, nämlich

$$T_S \gtrsim -18^\circ C = 255 \cdot K \quad (15.143)$$

Dann ergibt sich als durch Strahlung abgegebene Leistungsdichte der Wert (Abschnitt 8.5.2)

$$j_S \approx \varepsilon_{\text{Obj.}} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot (T_{\text{Obj.}} - 255 \cdot K) \cdot T_{\text{Obj.}}^3 \quad (15.144)$$

Den Emissionskoeffizienten der Scheibe schätzen wir mit $\varepsilon_{\text{Obj.}} \approx 0,9$ ab. Im stationären Zustand sind diese beiden Stromdichten (Gl. 15.141 und 15.144) gleich,

$$\alpha \cdot (T_L - T_{\text{Obj.}}) = \varepsilon_{\text{Obj.}} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot (T_{\text{Obj.}} - 255 \cdot K) \cdot T_{\text{Obj.}}^3 \quad (15.145)$$

Diese Gl. 4. Grades ist numerisch ohne Probleme lösbar. Wir bestimmen eine analytische Näherungslösung, indem wir die Gl. nach dem primär interessierenden Ausdruck $T_L - T_{\text{Obj.}}$ auflösen, uns auf Werte $T_{\text{Obj.}} \approx 0^\circ C$ beschränken und die Differenz $(T_{\text{Obj.}} - 255 \cdot K)$ daher durch den Wert $18 \cdot K$ approximieren:

$$(T_L - T_{\text{Obj.}}) \approx \frac{\varepsilon_{\text{Obj.}} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot 18 \cdot K \cdot (273 \cdot K)^3}{20 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 3,7 \cdot K \quad (15.146)$$

Der Temperaturunterschied zwischen der Temperatur der umgebenden Luft und der Heckscheibe eines Fahrzeugs kann also bei klarem Nachthimmel bis zu $4 \cdot K$ betragen. Selbst bei Lufttemperaturen knapp oberhalb von $0^\circ C$ können daher insbesondere die Front- und die Heckscheibe eines Autos vereist sein.

Teil b): Der Zusatz in der Aufgabenstellung, dass die Sonne nicht sehr hoch am Himmel stehe, soll nur unterstreichen, dass die Annahme der nahezu senkrecht auf das Thermometer auftreffenden Sonneneinstrahlung durchaus realitätsnah ist. Die nun zu diskutierende Situation ist gegenüber der des Aufgabenteils (a) etwas komplizierter, weil nun der Strahlungskontakt mit 2 verschiedenen Systemen erfolgt, nämlich mit der Sonne ($T_{S1} = 5500 \cdot K$) und mit dem Rest des Taghimmels. Dieser verhält sich jedoch nicht wie ein schwarzer Körper. Wir werden ihn der Einfachheit halber nicht berücksichtigen. Bei der Sonne benutzen wir der Einfachheit halber unmittelbar den Wert der sog; Solarkonstanten, also die von der Sonne bei senkrechtem Einfall auf die Erdoberfläche eingestrahlte Leistung J_{Solar} . Dann lautet die Strahlungsbilanz einfach

$$\alpha \cdot (T_{\text{Obj.}} - T_L) = \varepsilon_{\text{Obj.}} \cdot J_{\text{Solar}} \quad (15.147)$$

$\varepsilon_{\text{Obj.}}$ ist nun der Absorptionskoeffizient des Thermometergehäuses. Wir schätzen diese Größe mit $\varepsilon_{\text{Obj.}} \approx 0,2$. Für α müssen wir nun einen typischen Wert für eine senkrecht orientierte Fläche nehmen: $\alpha \approx 5,8 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Daraus folgt

$$(T_{\text{Obj.}} - T_L) = \frac{0,2 \cdot 1,4 \cdot \frac{kW}{m^2}}{5,8 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 48,3 \cdot K \quad (15.148)$$

Dieses Ergebnis besagt folgendes:

Beabsichtigt man, mit einem Thermometer die Temperatur der umgebenden Luft zu messen, setzt es aber während der Messung der direkten Sonneneinstrahlung aus, so misst man einen Wert, der bis zu $50^\circ C$ über der wahren Luft-Temperatur liegt.

Aufgabe 13

Vorausgesetzt wird, dass die in der Gl. 8.321

$$g(E, \delta E) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \delta E} \int_0^\infty \gamma_E(E', V, N) \cdot e^{-\frac{(E' - E)^2}{2 \cdot (\delta E)^2}} \cdot dE' \quad (15.149)$$

enthaltene Größe $\gamma_E(E', V, N)$ in einem Intervall $[E - \Delta E; E + \Delta E]$ ($\Delta E \gg \delta E$) nur aus Singularitäten mit identischem Gewicht besteht:

$$\int_{E_i - \varepsilon}^{E_i + \varepsilon} \gamma_E(E', V, N) \cdot dE' = g(E) \quad \forall i \text{ mit } E_i \in [E - \Delta E; E + \Delta E] \quad (15.150)$$

Daraus folgt

$$g(E, \delta E) \approx \frac{g(E)}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \delta E}} \sum_{i=1}^{\infty} e^{-\frac{(E_i - E)^2}{2 \cdot (\delta E)^2}} \quad (15.151)$$

Da nun aber die Werte E_i in dem Bereich der Energie, für den die Funktion $e^{-\frac{(E_i - E)^2}{2 \cdot (\delta E)^2}}$ signifikant von 0 verschieden ist, dicht liegen, darf in der Gl. 15.151 die Summation wieder durch die Integration ersetzt werden,

$$g(E, \delta E) \approx \frac{g(E)}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \delta E}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(E' - E)^2}{2 \cdot (\delta E)^2}} \cdot dE' = g(E) \quad (15.152)$$

Aufgabe 14

Das System mit den Werten $(2 \cdot E, 2 \cdot V, 2 \cdot N)$ kann man sich aus 2 identischen Teilsystemen mit den Werten (E, V, N) zusammengesetzt denken, zwischen denen ein freier Energieaustausch möglich ist. Dann gilt

$$g(2 \cdot E, 2 \cdot V, 2 \cdot N) = [g(E, V, N)]^2 \quad (15.153)$$

und entsprechend

$$\sigma(2 \cdot E, 2 \cdot V, 2 \cdot N) = \log \frac{[g(E, V, N)]^2}{g_0} = 2 \cdot \log \frac{g(E, V, N)}{\sqrt{g_0}} \quad (15.154)$$

D.h. die Homogenität von σ ist nur gegeben, wenn

$$g_0 = \sqrt{g_0} \Rightarrow g_0 = 1 \quad (15.155)$$

Aufgabe 17

Der Grundumsatz eines normalgewichtigen Menschen beträgt

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = 75 \cdot kg \cdot 4 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot h} \cdot \frac{24 \cdot h}{1 \cdot d} = 7.200 \cdot \frac{kJ}{d} \quad (15.156)$$

Dieser Energiestrom muss ständig von dem menschlichen Körper abgeführt werden, um die Körpertemperatur konstant halten zu können. Wenn aber die Aussentemperatur mit der Körpertemperatur ($37^\circ C$) identisch ist, entfallen alle Mechanismen der Wärmeleitung, -konvektion oder -strahlung. Es verbleibt die Möglichkeit der Verdunstung von Wasser. Der Körper ist gezwungen, seine Temperatur durch Schwitzen zu regeln. Hierzu benötigt er einen Verdunstungs-Massenstrom $\frac{dM}{dt}$, der folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{dM}{dt} \cdot \Delta \tilde{e}_{ev} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Rightarrow \quad (15.157)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta \tilde{e}_{ev}} = 7.200 \cdot \frac{kJ}{d} \cdot \frac{kg}{2.256 \cdot kJ} = 3,2 \cdot \frac{kg}{d} \quad (15.158)$$

Ein Tourist, der sich in einer derartigen Region aufhält und auch noch einige körperliche Aktivitäten vorhat, z.B. eine Wanderung durch den tropischen Regenwald, sollte also einen täglichen Wasserverbrauch von gut $5 \cdot \frac{\text{ltr}}{\text{d}}$ einplanen.

Aufgabe 19

Wir berechnen die Temperatur der durch Gravitation kollabierten Erde, indem wir die gegebenen Kennwerte bzw. die bekannten Naturkonstanten in die Gl. 3.607 einsetzen und erhalten

$$E_{\text{grav}} = 2,24 \cdot 10^{32} \cdot J \quad (15.159)$$

Wenn wir die spezifische Wärmekapazität der Einfachheit halber als temperatur- und druckunabhängig ansehen, dann erhalten wir die Temperatur, auf die sich die Erde bei diesem Prozess aufheizt, aus der Beziehung

$$E_{\text{therm}} = c \cdot M \cdot T = E_{\text{grav}} \Rightarrow \quad (15.160)$$

$$T = \frac{E_{\text{grav}}}{c \cdot M} = 5,68 \cdot 10^4 \cdot K \quad (15.161)$$

Diese Art der Berechnung setzt voraus, dass während dieses Vorgangs der fortschreitenden Verdichtung und Aufheizung der Materie keinerlei Energie verloren geht. Diese Annahme ist falsch, da die Emission thermischer Eigenstrahlung in keinem Fall behindert ist. Hierauf werden wir sogleich zurück kommen. Zunächst berechnen wir, wie angefragt, die Zeit, die die frühe Erde benötigte, wenn sie denn auf diese Temperatur aufgeheizt worden war, um sich auf etwa $1500 \cdot ^\circ C \approx 1800 \cdot K$ abzukühlen:

$$N_e = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d^2 \cdot T^4 = -\frac{dE_{\text{Erde}}}{dt} = -c \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} \quad (15.162)$$

$$-\int_{T_0}^{T_1} \frac{dT}{T^4} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{T_1^3} - \frac{1}{T_0^3} \right) = \frac{\varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d^2}{c \cdot M} \cdot (t_1 - t_0) \quad (15.163)$$

$$(t_1 - t_0) = \frac{c \cdot M}{3 \cdot \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{1}{T_0^3} \cdot \left(\frac{T_0^3}{T_1^3} - 1 \right) \quad (15.164)$$

$$\approx \frac{c \cdot M}{3 \cdot \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{1}{T_1^3} \quad (15.165)$$

D.h. bei der Berechnung der Abkühlzeit spielt die Ausgangstemperatur, sofern sie denn nur genügend hoch ist, nur eine verschwindende Rolle! Durch Einsetzen der angegebenen Kennwerte bzw. der bekannten Naturkonstanten erhalten wir

$$(t_1 - t_0) = 274 \cdot a \quad (15.166)$$

also eine in erdgeschichtlichen Zeiträumen bewertet extrem **kurze** Zeitspanne! Zur Abrundung dieser Ergebnisse berechnen wir noch die Abkühlzeit für eine Ausgangstemperatur, die gleich der aktuellen Temperatur im Zentrum der Erde ist von

$$T_{\text{Erddzentrum}} \approx 7 \cdot 10^3 \cdot K \quad (15.167)$$

Sodann verwenden wir die korrekte Berechnungsformel gem. Gl. 15.164 und erhalten nahezu denselben Zahlenwert:

$$(t_1 - t_0) = 269 \cdot a \quad (15.168)$$

Aus diesen Ergebnissen können wir insgesamt folgern: Die Energie, die bei der Bildung von Planeten aus kosmischem Staub auf dem Wege eines Gravitationskollapses (vgl. Abschnitt 10.2.2) frei wird, reicht grundsätzlich aus, um diesen Planeten auf einige $10^4 \cdot K$ aufzuheizen. Ohne weitere Energiezufuhr aus anderen Quellen als der Gravitation geht diese Energie aber auf dem Wege der elektromagnetischen Strahlung extrem schnell wieder verloren. Voraussetzung hierfür ist, dass der Planet (noch) keine feste Kruste oder gar eine ganze Mantelschicht erhalten hat, die einen effektiven Wärmetransport an die Planetenoberfläche auf dem Wege der Konvektion verhindert. Sofern man annimmt, dass außer der Gravitation keine weitere Energiequelle vorhanden war, kommt man zu dem Schluss, dass bei der Bildung der Erde die *heiße Phase*, die also zu einer signifikanten Erwärmung der entstehenden Erde geführt hat, höchstens einige $100 \cdot a$ gedauert haben kann. Anderenfalls hätte sich im Inneren der Erde keine Temperatur der Größenordnung $7 \cdot 10^3 \cdot K$ konservieren können.

Aufgabe 20

Der Energieeintrag in einen Solarkollektor beträgt unter optimalen Bedingungen (s. Gl. 8.577) pro Fläche δA

$$\frac{\langle N \rangle_d}{\delta A} = T_r^4 \cdot \sigma \cdot 4 \cdot \langle \sin \psi \rangle_d \approx T_r^4 \cdot \sigma \quad (15.169)$$

Der Energiebedarf zur Verdampfung eines Volumens V an flüssigem Wasser beträgt

$$E_{\text{evap.}} = V \cdot m \cdot \lambda \quad (15.170)$$

Innerhalb eines Jahres erzielt man so pro Flächeneinheit eine Wasserhöhe h von

$$h = \frac{T_r^4 \cdot \sigma \cdot 365 \cdot d}{m \cdot \lambda} = \frac{(279,2 \cdot K)^4 \cdot 5,67 \cdot 10^8 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot s}{1 \cdot \frac{kg}{dm^3} \cdot 2,26 \cdot 10^6 \cdot \frac{Ws}{kg}} \quad (15.171)$$

$$= 3,36 \cdot m \quad (15.172)$$

Da ein Niederschlag von $300 \cdot \frac{mm}{a}$ bereits für Klimazonen typisch ist, deren Bodenbeschaffenheit einem Übergang zwischen einem halbtrockenen und einem humiden Gebiet entsprechen, sollte eine ähnliche Menge für eine intelligente Bewässerung

landschaftlich genutzter Flächen ausreichen. M.a.W. mit einem solaren Meerwasser-entsalzungsmodul von $1 \cdot m^2$ Nutzfläche sollten etwa $10 \cdot m^2$ Ackerland bewässert werden können und zwar (in den für dieses Konzept relevanten Zonen mit hoher Anzahl von Sonnenscheinstunden pro Jahr) weitgehend autonom, d.h. ohne weiteren Energiebedarf. Durch konsequente Umsetzung des Konzeptes des Wärmeaustausches im Gegenstrom (in diesem Fall von zuströmendem Meerwasser und abfließendem Nutzwasser) sollte dieser Zahlenwert von ca. 10 : 1 sogar noch deutlich verbessert werden können.

Als bisher nicht berücksichtigter Energiebedarf verbleibt insbesondere der Energieaufwand zur Anhebung des Meerwassers auf die Höhe der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Dies sind etwa (s. Gl. 8.531)

$$\Delta E_{\text{grav.}} = 270 \cdot \frac{kWh}{m^3\text{-Wasser} \cdot 100 \cdot m} \quad (15.173)$$

Zusammenfassend stellt sich aus meiner Sicht die Frage, warum nicht schon heute mit derartigen dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden, in diesem Sinne also *konventionellen* solaren Entsalzungsanlagen große Teile der heute als Wüsten vorliegenden küstennahen Gebiete einer landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden, insbesondere in Nordafrika, auf der arabischen Halbinsel, in Südwestafrika und Westaustralien. Mir ist bekannt, dass die Aufgabe der Meerwasser-Entsalzung Gegenstand aktueller und intensiv betriebener Forschung und Geräte-Entwicklung ist. Ich habe allerdings den Eindruck, dass hierbei an wesentlich aufwändigeren und damit teureren Realisierungskonzepten gearbeitet wird als die hier diskutierte einfache Destillation.

Aufgabe 21

Wir stützen uns auf die Gl. 3.57

$$r = \frac{q^2}{p \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi)} \quad (15.174)$$

und berechnen die Geschwindigkeit, mit der sich dieser Abstand verändert:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{q^2 \cdot e \cdot \sin \varphi}{p \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi)^2} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = r \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{e \cdot \sin \varphi}{(1 + e \cdot \cos \varphi)} \quad (15.175)$$

Der Term $r \cdot \frac{d\varphi}{dt}$ ist aber identisch mit der pro Zeiteinheit von dem Fahrstrahl des Planeten überstrichenen Fläche. Gem. dem 2. Keplerschen Gesetz ist diese Größe eine (für jede Planetenbahn unterschiedliche) Konstante,

$$r \cdot \frac{d\varphi}{dt} = C_1 \quad (15.176)$$

Die Gl. 15.175 vereinfacht sich daher zu

$$\frac{dr}{dt} = C_1 \cdot \frac{e \cdot \sin \varphi}{(1 + e \cdot \cos \varphi)} \quad (15.177)$$

Verwenden wir nun die Näherung

$$e \ll 1 \quad (15.178)$$

so gilt in linearer Näherung bzgl. e

$$\frac{dr}{dt} \approx C_1 \cdot e \cdot \sin \varphi \quad (15.179)$$

Der Abstand r des Planeten von der Sonne führt also (in dieser Näherung) eine harmonische Oszillation um seinen Mittelwert aus.

Der zeitliche Mittelwert einer Größe X , die nicht direkt als Funktion $X(t)$ vorgegeben ist, sondern als Funktion der Größe $z(t)$, beträgt gem. Gl. 7.231

$$\langle X \rangle_t = \frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^T X(z) \cdot z(t) \cdot dt \quad (15.180)$$

Daher berechnet sich der zeitliche Mittelwert von $\frac{1}{r^2}$ gem.

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{1}{r^2} \right\rangle &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{1}{r^2} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^{-1} \cdot d\varphi \\ &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{p^2 \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi)^2}{q^4} \cdot \frac{q^2}{p \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi) \cdot C_1} \cdot d\varphi \\ &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{p \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi)}{q^2 \cdot C_1} \cdot d\varphi = \frac{1}{T} \cdot \frac{p}{q^2 \cdot C_1} \end{aligned} \quad (15.181)$$

Wir kommen also zu dem wichtigen Ergebnis, dass in linearer Näherung bzgl. der numerischen Exzentrizität e der Mittelwert des Abstandsquadrats der Erde von der Sonne, und damit der Mittelwert der solaren Einstrahlung **unabhängig ist von dieser Exzentrizität**.

Dieses Ergebnis wird uns insbesondere bei der Suche nach der Ursache für das Auftreten der fast periodisch wiederkehrenden Abfolge von Warm- und Kaltzeiten während der Erdneuzeit wichtige Dienste leisten.

Aufgabe

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Thermodynamik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.8 zu Heft 9: Kristallphysik (-/-)

Text

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Kristallphysik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.9 zu Heft 10: Elementarteilchen, Kosmologie (-/-)

Text

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen der Aufgaben zu Heft Elementarteilchen, Kosmologie* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.10 zu Heft 11: Optik (-)

Aufgabe 1

Wir beweisen sofort das Snellius-Gesetz, da - wie wir sehen werden - das Reflexionsgesetz als ein Sonderfall dieses Gesetzes angesehen werden kann, und verwenden die in der Abb. 1 des Abschnitt 11.2 angeführten Bezeichnungen. Dann betragen die Wegstrecken l_1 (von P_1 zum Auftreffpunkt S auf der Grenzfläche) und l_2 (von S zum Punkt P_2)

$$l_1 = \frac{h_1}{\cos \alpha_1} \quad ; \quad l_2 = \frac{h_2}{\cos \alpha_2} \quad (15.182)$$

Die Laufzeit des Lichtes von P_1 über S nach P_2 beträgt daher

$$t = c_1 \cdot l_1 + c_2 \cdot l_2 = \frac{c_1 \cdot h_1}{\cos \alpha_1} + \frac{c_2 \cdot h_2}{\cos \alpha_2} \quad (15.183)$$

Diese durch die Gl. 15.183 definierte Funktion gilt es zu minimieren unter der Nebenbedingung (Cosinussatz)

$$F(\alpha_1; \alpha_2) = \left(\frac{h_1}{\cos \alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{h_2}{\cos \alpha_2} \right)^2 - d^2 - 2 \cdot \frac{h_1}{\cos \alpha_1} \cdot \frac{h_2}{\cos \alpha_2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (15.184)$$

D.h. wir müssen die Funktion

$$\begin{aligned} \frac{dt(\alpha_1)}{d\alpha_1} &= \frac{\partial t(\alpha_1; \alpha_2)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial t(\alpha_1; \alpha_2)}{\partial \alpha_2} \cdot \frac{d\alpha_1(\alpha_2)}{d\alpha_2} \quad \text{mit} \quad (15.185) \\ \frac{d\alpha_1(\alpha_2)}{d\alpha_2} &= - \frac{\frac{\partial F(\alpha_1; \alpha_2)}{\partial \alpha_2}}{\frac{\partial F(\alpha_1; \alpha_2)}{\partial \alpha_1}} \end{aligned}$$

berechnen und $= 0$ setzen. Wir führen einige Zwischenergebnisse an:

$$\frac{\partial F(\alpha_1; \alpha_2)}{\partial \alpha_1} = \frac{2 \cdot h_1}{\cos^2 \alpha_1} \cdot \left(\frac{h_1 \cdot \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1} + \frac{h_2 \cdot \sin \alpha_2}{\cos \alpha_2} \right) \quad (15.186)$$

$$\frac{\partial t(\alpha_1; \alpha_2)}{\partial \alpha_1} = \frac{c_1 \cdot h_1 \cdot \sin \alpha_1}{\cos^2 \alpha_1} \quad (15.187)$$

Die Ableitungen nach α_2 ergeben sich einfach durch Austauschen der Indizes. Insgesamt folgt daraus

$$\frac{dl(\alpha_1)}{d\alpha_1} = \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot h_1}{\cos^2 \alpha_1} \cdot (c_2 \cdot \sin \alpha_1 - c_1 \cdot \sin \alpha_2) \quad (15.188)$$

$$\frac{dl(\alpha_1)}{d\alpha_1} = 0 \Rightarrow \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{c_2}{c_1} \text{ q.e.d.} \quad (15.189)$$

Zum Beweis des Reflexionsgesetzes müssen wir lediglich bedenken, dass jetzt beide Strahlen sich in demselben Medium ausbreiten; ansonsten sind die geometrischen Bedingungen völlig identisch. In diesem Fall gilt daher einfach

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = 1 \quad (15.190)$$

Aufgabe 2

(XXX: Der die Lösung dieser Aufgabe beschreibende Text ist noch nicht verfügbar. Das Ergebnis der Rechnung ist:)

$$\Delta = d \cdot \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \quad (15.191)$$

Aufgabe 4

Wir ersetzen zunächst den (absichtlich) etwas unscharf gewählten Begriff Helligkeit durch die Größe Beleuchtungsstärke E_v . Die beiden Aussentüren werden also gleichmässig mit Licht beschienen, das auf ihnen eine Beleuchtungsstärke E_v erzeugt. Demzufolge fällt in das Zimmer ein Lichtstrom ein von

$$J_v = E_v \cdot 2 \cdot (1,20 \cdot m \cdot 2,00 \cdot m) = E_v \cdot 4,8 \cdot m^2 \quad (15.192)$$

Dieser Lichtstrom trifft auf die umliegenden Wände und wird von diesen zu einem Anteil R reflektiert. Die gesamte Oberfläche des Zimmers beträgt

$$\begin{aligned} A_{ges} &= 2 \cdot (5 \cdot m + 8 \cdot m) \cdot 2,50 \cdot m + 2 \cdot 5 \cdot m \cdot 8 \cdot m \\ &= 145 \cdot m^2 \end{aligned} \quad (15.193)$$

Die Fläche der Türöffnungen beträgt

$$A_{Tür} = 4,8 \cdot m^2 \quad (15.194)$$

und das Verhältnis dieser beiden Flächen

$$\frac{A_{Tür}}{A_{ges}} = 0,033 \quad (15.195)$$

Für das weitere Schicksal des von einer Wand reflektierten Lichtes ist also folgende Näherung zulässig: Ein Anteil von 0,033 (Gl. 15.195) verlässt den Raum durch die Türöffnungen, der Rest wird erneut von einer Wand reflektiert. In der Bilanz verhält sich das System so, als ob der Lichtstrom J_v , um den Faktor

$$V = \sum_{i=0}^{\infty} (R \cdot 0,97)^i = \frac{1}{1 - R \cdot 0,97} \quad (15.196)$$

verstärkt, von sämtlichen Wänden gleichmässig verteilt abgestrahlt, danach aber von ihnen nicht mehr reflektiert wird. Die Beleuchtungsstärke an einem beliebigen Ort in dem Zimmer beträgt daher

$$XXX$$

Dieser Wert ist identisch mit der Beleuchtungsstärke im Inneren einer Ulbrichtkugel der inneren Oberfläche gem. Gl. 15.193.

(XXX: Der weitere Text zur Lösung dieser Aufgabe ist noch nicht verfügbar. Danach folgt:)

Die Beleuchtungsstärke in dem Zimmer hängt also stark von Wert R ab. Sobald dieser deutlich kleiner ist als 1,0 (dunkler Fußbodenbelag,holzverkleidete Zimmerdecke, getönte Tapeten), kann auch eine breite Fensterfront den Raum nicht bis in die Tiefe gleichmässig ausleuchten.

Aufgabe 5

(XXX: Der Text zur Lösung der Aufgabe 5 ist noch nicht verfügbar.)

Aufgabe 9

(XXX: Der Text zur Lösung der Aufgabe 9 ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Lösungen zu den Aufgaben zu Heft Optik* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.11 zu Heft 12: *Materialwissenschaft (-/-)*

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen zu den Aufgaben zu Heft Materialwissenschaft* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.12 zu Heft 13: *Strukturanalyse (-/-)*

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen zu den Aufgaben zu Heft Strukturanalyse* ist noch nicht verfügbar.)

15.1.13 zu Heft 14: *Elektronik (-/-)*

(XXX: Der Text des Abschnitts *Lösungen zu den Aufgaben zu Heft Elektronik* ist noch nicht verfügbar.)

15.2 Literatur zur Physik insgesamt (-)

.

1. H. Kuchling, Taschenbuch der Physik, Verlag Harry Deutsch, Thun u. Frankfurt/Main 1985
2. <http://en.wikipedia.org>
3. International recommended value of the Fundamental Physical Constants; National Institute of Standards and technology Gaithersburg (ML) and Boulder (CO)(USA); <http://physics.nist.gov/cuu/constants/>
4. Brockhaus Enzyklopädie, Mannheim, 1991, 19. Auflage, Bd. 14, S. 303

(XXX: Die weiteren, an dieser Stelle vorgesehenen Literaturzitate sind noch nicht verfügbar.)

Stichwortverzeichnis

- Äquivalenz, topolog. v. Kurven, 382
Äquivalenzrelation, 131
Öffnungswinkel e. Objektivs, 1033
1-Stoff-Elektrolyt, 709
- Abbé, Ernst, 992
Abbildung e. Menge, 126
Abbildungsmaßstab (opt. Gerät), 1072
Abbildungsstrahlengang, 1074
Abel, Niels Hendrik, 510
Aberration, sphärische e. Linse, 1030
abgeschlossene Hülle e. Menge, 128
Abgeschlossenheit e. Menge, 128
Abgeschlossenheit eines Systems, 262
Abrasion, 1281
Abrieb, Def., 1277
Abriebkoeffizient, Def., 1281
Abriebrate, Def., 1280
Abrikosov, Aleksei Aleksejewitsch, 75
Absorption, optische, 1010
Absorptionskoeffizient, optischer, 1010
Absorptionskontrast b. opt. Abb., 1078
Absorptionsquerschnitt, Def., 1012
Absorptionsspektrum, optisches, 1010
Achromat, Def., 1032
Adaption d. menschlichen Auges, 1121
Adiabatische Zustandsänderung, 655
Adjungierter Operator, 529
Adresse e. elektron. Baugruppe, 1397
Äquivalentdosis, 616
Äquivalenz, logische, 1382
Aerosol, 697
Äther-Konzept d. klass. Mech., 205
Aggregatzustand e. Materials, 1226
Akkommodation d. Auges, 1116
Akkretionsscheibe, 923
- Aktivität, radioaktive, 615
Al-Chwarizmi, Abu Abdulla, 130
Albedo, 798
Algebra, moderne, 131
Algorithmus, 1392
Alhazen, eigl. Ibn al-Haitham, 991
aliasing-Effekte, 1421
Alterssichtigkeit, Def., 1116
Ampère, André Marie, 50
Amplitudenmodulation, 1402
anaerob (Def.), 847
Analogrechner, 1367
Analytische Fortsetzung, 383
Analytische Funktion, Def., 377
Anemometer, 294
Aphel e. Ellipse, 100
Apochromat, Def., 1032
Arbeitspunkt, elektronischer, 1306
Archimedes v. Syrakus, 82
Archimedessche Prinzip, 281
Area-sinus hyperbolicus Arsinh , 107
Arezzo, Guido von, 347
Aride Bereiche des Festlands, Def., 841
Armstrong, Edwin Howard, 1405
Astigmatismus e. Linse, 1031
astronomische Einheit, Def., 288
Asymptotische Freiheit d. Quarks, 917
Atmosphäre d. Erde, 820
Atompilz, 598
Aufenthaltswahrscheinlichkeit, 499
Auftrieb, hydrostatischer, 281
Aussagen, logische (Def.), 1381
Ausstrahlung, spez. e. opt. Qu., 1044
Austastlücke i. Fernsehsignal, 1409
Austauschprozess, 270

- Austrittspupille e. Linsensystems, 1033
Avalox, Avelox, 1094
Avogadro, Lorenzo R. A. C., 49
Avogadro-Konstante, 49
Azimut, Def., 182
- Bacon, Sir Francis, 952
Bardeen, John, 80
Barkhausen, Heinrich Georg, 1337
Barkhausenformel f. E-Roehren, 1337
Bartholin, Erasmus, 1020
Baryonen, Def., 905
Baryonenzahl e. Elementarteilchens, 905
BAS-Signal (Fernsehtechnik), 1408
Basis e. Vektorraums, 512
Basistransformation, 513
Bassow, Nicolaj Gennadjewitsch, 1062
Becquerel, Antoine Henri, 494
Beer, August, 1012
Beleuchtungsinvarianz d. Farbk., 1139
Beleuchtungsstrahlengang, 1074
Bell, Alexander Graham, 78
Beschleunigungsfeld, Def., 185
Bessel, Friedrich Wilhelm, 289
Bestrahlung, 1048
Bestrahlungsdichte, spezifische, 1048
Bestrahlungsstärke, 1048
Bestrahlungsstärke, Def., 1051
Bestrahlungsstrom, 1047
Bethe, Hans Albrecht, 927
Bethe-Weizsäcker-Zyklus, 927
Beton, 1260
Bewegungsgleichung i.d. Mechanik, 272
bijektive Abbildung, 126
Bildübertrager, 1087
Bildanalyse, Def., 1098
Bildfeldwölbung, 1031
Bildungs-Entropie, 670
Binomialverteilung, 544
Biot, Jean-Baptiste, 465
Biot-Savart-Gesetz d. Elektrodynamik, 466
bit error rate (Def.), 1398
Bitfehler-Rate, 1398
Blend (Def.), 1254
Blitz (Gewitter-), 442
Bode, Johann Elert, 356
Boltzmann, Ludwig, 715
Boltzmann-Faktor, 727
Boltzmann-Konstante, 721
Bosch, Carl, 671
Bosch, Robert, 79
Bose, Satyendra Nath, 572
Bose-Statistik, 734
Bose-Teilchen, Boson, 572
Bowler, mechanical, 1290
Bowling-Sport, 1288
Boyle, Robert, 657
Boyle-Mariott, Gesetz von, 657
Brahe, Tyge Ottesen, gen. Tycho, 194
Brattain, Walter Houser, 80
Braun, Karl Ferdinand, 674
Brechkraft e. Linse, 1027
Brechungsgesetz
 Snellius Gesetz, 1002
Bremsgitter e. E-Roehre, 1338
Brennweite e. Linse, 1026
Brewster, Sir David, 1006
Brewsterwinkel, 1006
Brillanz e. Farbortes, 1143
Broglie, Louis Victor de, 489
Bronze, 1251
Buchführung, doppelte, 360
Bus eines Digitalrechners, 1396
- Cantor, Georg Ferdinand Ludwig Phillipp,
 120
Carlisle, Anthony, 705
Carlson, Chester Floyd, 441
Carnot, Nicolas Léonard Sadi, 629
Carnot-Wirkungsgrad, 764
Carré, Ferdinand, 771
Cauchy-Folge, 135
Cauchy-Integralformel, 382
Cauchy-Integralsatz, 380

- Cauchy-Riemannschen Diff.-Gl., 376
 Cauchy-Schwarzsche Ungleichung, 518
 Cavendish, Henry, 296
 Celsius, Anders, 631
 cgs-System d. Grundeinh., 50
 Chatelier, Henry Louis le, 674
 Chatelier-Braun-Prinzip, 674
 Chauchy, Augustin Louis Baron, 135
 Chemische Energie, Def., 632
 Chemisches Potenzial, Def., 632
 chirale Symmetrie, 1021
 Chromatische Aberration e. Linse, 1032
 Cladding e. opt. Faser, 1036
 Clapeyron, Benoit Pierre Emile, 629
 Clausius, Rudolf Julius Emanuel, 229
 Clausius-Clapeyron-Gleichung, 679
 CNO-Zyklus, 926
 Columbia (Super-Kontinent), 856
 Compiler (Def.), 1395
 Composite, 1257
 Compoundierung von Polymeren, 1257
 Condon, Edwin Uhler, 494
 confinement , 913
 Cosinussatz, 104
 Coulomb, Charles August de, 47
 Coulomb, Charles Augustin de, 369
 Cumuluswolken, 826
 Curie, Jacques, 433
 Curie, Marie, 590
 Curie, Pierre, 430, 590
 Curie-Gesetz, 430

 Daansgard-Oeschger-Zyklen, 852
 Daguerre, Louis Jacques Mandré, 1107
 Dampfdruckkurve, 677
 Dansgaard, Willi, 852
 Daumensprungverfahren, 287
 Davenport, Thomas, 78
 Davisson, Clinton Joseph, 488
 Davy, Humphry, 705
 Debye, Peter Joseph Wilhelmus, 431
 Debye-Gleichung, 431
 Debye-Hückel-Onsager-Theorie, 709
 deckende Farbschicht, 1153
 Deformationstensor, 1203
 Dehnung e. Festkörpers, 1203
 Dehnung, bleibende, eines Materials, 1221
 Demokrit, 903
 Densitometer, Def., 1088
 Descartes, René, 178
 Determinante e. Matrix, 115
 Diapositiv-Projektor, 1086
 Dichroismus (Polarisationseffekt), 1017
 Dichte einer Variablen, 640
 Dichte, optische, 1011
 Dielektrische Funktion, 431
 Dielektrische Verschiebungsdichte, 426
 Dielektrisches Materialverhalten, 428
 Dielektrizitätskonstante (Vakuum-), 406
 Dielektrizitätskonstante, relative, 426
 Differential scanning calorimetry, 1283
 Differenzierbarkeit e. Funktion, 141
 Dimension eines Vektorraums, 512
 Diode, elektron. Bauelement, 1325
 Diode, Elektronenröhre, 1335
 Dioptrie, Def., 1027
 Dirac, Paul Adrien Maurice, 63
 direktes Produkt v. Untervektorr., 515
 Disjunktion, logische, 1382
 Dispersion, 697
 Dissoziation i. Elektrolyten, 706
 Dissoziationsgrad, 707
 Distributionen, mathem., 63
 Divergenz eines Vektorfeldes, 163
 Doppler, Christian Johann, 219
 Doppler-Effekt, 219
 Doppler-Effekt, transversaler, 224
 Drahtwiderstand, el. Bauteil, 1318
 Drehimpuls, Definiton, 255
 Drehkondensator, el. Bauteil, 1323
 Druck (Definition), 261
 Dschunkensegel, 333
 Duisberg, Friedrich Carl, 79
 Duktilität von Materialien, 1222

- Dunlop, John Boyd, 1238
Dur-Tonleiter, 343
Durchflutungsgesetz, 467, 469
Durchgriff e. Elektronenroehre, 1337
Durchschnittsmenge, 124
Dynamisch-mech. Analyse (Def.), 1210
Dynamische Variablen, 249
Dynamo, Gen elektr. Energieströme, 472
- Eötvös, Lorand Baron, 242
Eastman, George, 1107
Eddington, Arthur Stanley, 976
Edison, Thomas Alva, 1059
Edukt e. chem. Reaktion, 663
Ehrenfest, Paul, 508
Ehrenfest-Theorem, 508
Eich-Transformation (Elektrodyn.), 477
Eigenvektoren eines Operators, 527
Eigenwerte eines Operators, 527
Einfach zusammenhängendes Gebiet, 380
Einstein, Albert, 487
Eintrittspupille e. Linsensystems, 1033
Eiszeitalter (Def.), 845
Elastizitätsmodul, 1230
Elastizitätsmodul (Def.), 1207
Elastizitätstensor, 1206
Elastomer, Definition, 1233
electronic balance, (Messprinzip), 296
Elektrochemisches Potenzial, 705
Elektrode, elektrochemische, 713
Elektrolyt (Def.), 707
Elektrolyt, starker bzw. schwacher, 707
Elektrolytkondensator, el. Bauteil, 1324
Elektronendurchmesser, 909
Elektronenvolt (Def.), 403
Elektromog, 618
Elektrostriktion, 433
Elementarladung, 401
Elementarteilchen (Def.), 903
Elevationswinkel, Def., 182
Ellipse, Def., 100
Emissionsvermögen, 742
- Empfindlichkeit e. Detektors, 1064
Emulsion, 697
Enantiomer (Def.), 1022
Endoskop, 1087
Energiedichte des Gravitationsfeldes, 265
Energiedosis radioaktiver Bestr., 616
Energieformen, 251
Ensemble-Mittelwert, 717
Ent-Elektrisierungsfaktor, 427
Entartung, 528
Enthalpie, Def., 270, 639
Entropie (statistische Definition), 720
Entropieartige Gibbs-Funktion, 641
Entropieformen, Def., 641
Erathostenes von Kyrene, 287
Erdkern, 942
Erdkruste, kontinentale, 943
Erdkruste, ozeanische, 944
Erdmantel, oberer, 943
Erdmantel, unterer, 942
Ereignis, relativistische Def., 207
Ereignis, wahrscheinlichkeitstheor., 534
Ergebnis, wahrscheinlichkeitstheor., 534
Ersatzschaltung, elektronische, 1308
Erwartungswert einer Zufallsgröße, 540
Erwartungswert, mathem. Def., 539
Erythemische Empfindlichkeit, 1051
Euklid, 120
Euler, Leonhard, 269
Eulersche Formel, 374
Eulerscher Satz, 269
Eutektikum, 686
Exergie, Def., 785
Extensive Variablen, 249
Extinktion, optische, 1011
- Förster, Heinz v., 68
Fahrenheit, Daniel Gabriel, 631
Falk, Gottfried, 94
Falschlicht, Def., 1083
Faltengebirge (Def.), 950
Faltungintegral, 386

- Faraday, Michael, 172
 Faradayscher Käfig, 414
 Farbe, Def., 1129
 Farbladung e. Quarks, 912
 Farbmischung, additiv, subtraktiv, 1139
 Farbort e. Messstrahlung, 1134
 Farbrezeptur, 1155
 Farbsättigung, 1138
 Farbtemperatur e. opt. Strahlung, 1054
 Farbtemperatur einer Lichtquelle, 1137
 Farbton, 1138
 Fay, Francois de Cistenay du, 369
 Fehler einer Messung, Def., 85
 Fehler, systematische, Def., 86
 Fehlerfortpflanzung, Def., 87
 Fehlerfortpflanzungsgesetz, 89
 Fehlerrechnung, Def., 84
 Fehlsichtigkeit, Def., 1116
 Feinstrukturkonstante, 57
 Feldenergie d. Gravitation, 265
 Feldlinien (Def.), 172
 Feldlinse, 1087
 Feldstärke, elektrische, 407
 Feldstärke, magnetische, 451
 Feldstaerke, allgem. Def., 197
 Fermat, Pierre de, 998
 Fermatsches Prinzip, 998
 Fermi, Enrico, 495
 Fermi-Statistik, 732
 Fermi-Teilchen, Fermionen, 572
 Fernrohr, 1123
 Feststoff-Aerosol, 697
 Feuchte, relative z.B. von Luft, 678
 Feuchtgebiet, Def., 841
 Feynman, Robert, 53
 Filter, elektronische, 1346
 Fläche im Raum (Def.), 139
 Flaschenzug, 324
 Fleming, Sir John Ambrose, 1334
 Fluchtpunkt, 108
 Fluss, magnetischer (Def.), 459
 Folge v. Zahlen, Def., 135
 Folienkondensator, el. Bauteil, 1323
 Ford, Henry, 79
 Forest de, Lee, 1334
 Fortpflanzungskonstante e. Vierpols, 1318
 Fossil (Def.), 844
 Fourier-Theorem, 153
 Fovea d. Auges, 1115
 Fowler, Sir Ralph Howard, 494
 Franklin, Benjamin, 369
 Fraunhofer, Josef von, 566
 Freie Energie, Def., 639
 Freie Enthalpie, Def., 639
 Frequenz e. period. Beweg., 189
 Frequenzmodulation, 1406
 Fresnel, August Jean, 992
 Fresnelsche Gleichungen, 1005
 Frisch, Otto, 622
 Fundamentalsatz der Algebra, 375
 Funktionentheorie, Def., 370
 Gödel, Kurt, 122
 Günz-Eiszeit, 850
 Güte e. Schwingkreises, 1343
 Galilei, Galileo, 204
 Galilei-Transformation, 204
 Galvani, Luigi, 705
 galvanische Trennung, Def., 1331
 Ganze Zahlen, Def., 133
 Gaschromatographie, 1296
 Gasgleichung, allgemeine, 656
 Gastheorie, kinetische, 657
 Gatter, elektronische, 1383
 Gauss, Carl Friedrich, 85
 Gauss-Ebene, Def., 374
 Gauss-Verteilung, Def., 548
 Gausscher Satz, 163
 Gay-Lussac, Gesetze von, 657
 Gay-Lussac, Joseph Louis, 657
 Gay-Lussac-Humboldt-Gesetz, 671
 Gay-Lussac-Koeffizient, 647
 Gebrauchsverhalten eines Werkstoffs, 1192
 Gel, 697

- Gell-Mann, Murray, 910
Gemässigte Breiten, klimabezogen, 834
Gennes, Pierre-Gilles de, 52
Geräusch, akustisches (Def.), 338
Gerade, Def., 95
Germer, Lester Halbert, 488
Gibbs, Josiah Willard, 250
Gibbs-Funktion, Def., 250
Gibbssche Phasenregel, 678
Giessen e. Formteils, 1272
Gilbert, William, 369
Glühemission, 1334
Glasübergang, 1211
Glastemperatur eines Materials, 1211
Gleichgewicht, dynamisches, 271
Gleichheit v. Mengen, 124
Gleiten e. Schiffs, 336
Gleitmodul (Def.), 1207
Gluehlampe, 1059
Gluon, 916
Godfrey, Thomas, 1127
Goethe, Johann Wolfgang von, 1129
Gondwana (südl. Super-Kontinent), 856
Goodwin, Hannibal, 1107
Grünling b. Sinterprozess, 1273
Gradient eines skalaren Feldes, 163
Gram, Hans Christoph Joachim, 1094
Gram-positive Bakterien
 Gram-negative Bakterien, 1094
Gravitations-Schwerpunkt, 235
Gravitationskonstante, 243
Gray, Harold, 616
Greenberg, Oscar Wallace, 912
Gregorianischer Kalender, 300
Grenzflächenenergie, spezifische, 695
Grenzflächenphysik, 695
Grenzwert e. Folge, 135
Gross, David J., 917
Grundeinheiten der Physik, 50
Gruppe, kommutative, 510
Guericke, Otto von, 369
Guldberg, Cato Maximilian, 671
Gummielastizität von Materialien, 1233
Gurney, Ronald Wilfried, 494
Höhenformel, barometrische, 328
Hückel, Erich Armand A. J., 705
Haas, de Wander Johannes, 470
Haber, Fritz, 671
Haber-Bosch-Verfahren, 671
Hadley, Georges, 834
Hadley, John, 1127
Hadley-Zelle, 834
Hadronen (Def.), 912
Haerte fester Materialien, 1224
Haertezahl n. Mohs, 1225
Haertezahl n. Vickers, 1225
Halban, Hans v., 488
Hall, Asaph, 964
Halley, Edmond, 289
Halogen-Glühlampe, 1060
Hamilton, Sir William Rowan, 485
Han, Moo-Young, 912
Hardware (Def.), 1395
Harmonische Bewegung, Def., 190
Hasselbalch, Karl Albert, 713
Hauptebene e. dicken Linse, 1030
Hauptreihe des HRD, 930
Hauptsatz der Diff. u. Integralr., 144
Hayashi-Linie, 931
Heisenberg, Werner Karl, 492
Helligkeitsinvarianz der Farbkennung, 1133
Helmholtz, Herm. Ludw. Ferd. v., 171
Helmholtz-Satz, 171
Henderson, Lawrence Joseph, 713
Henderson-Hasselbalch-Gl., 713
Henry, Joseph, 464
Herapath, William Bird, 1018
Herapathit (Iodchininsulfat), 1018
Hermite, Charles, 525
Hermite-Polynome, 525
hermitesche Operatoren, 530
Hertz, Heinrich, 189
Hertzprung, Ejnar, 929

- Hertzprung-Russell-Diagramm (HRD),
 930
 Hilbert, David, 518
 Hilbert-Raum, 518
 Himmelsäquator, 183
 hinreichende Bedingung, 122
 Hochsegel o. Bermudasegel, 333
 Hohlspiegel, opt. Bauelement, 1035
 Holozän (Erdzeitalter), 850
 homöomorphe Mengen, 130
 Homodyn-Verstärker, 1419
 Homogenität, physikalische, 673
 Hooke, Robert, 1206
 Hooke-sches Gesetz, 1206
 Hubble, Edwin Powell, 978
 Huygens, Christiaan, 998
 Huygens-Prinzip, 998
 Hydronium-Ion, 707
 Hydrostatik, Def., 280
 Hyperbel , 105

 Identische Teilchen, 495
 Imaginäre Zahlen, Def., 373
 Impedanz, elektrische, 1305
 Implikation, logische, 1382
 Impuls (Definition), 251
 Induktion, elektromagnetische, 464
 Induktion, magnetische (Def.), 459
 Induktion, vollständige, 123
 Induktivität, Def., 471
 Induktivität, elektron. Bauelement, 1320
 injektive Abbildung, 126
 Innere Transmission, 1012
 Innere Variablen, 687
 Inneres einer Menge, Def., 129
 Integration e. Funktion, Def., 141
 Intensive Variablen, 249
 Inter instrument agreement, 1169
 Inter instrument agreement, Def., 1084
 Interferenz, 486
 Interferenz von Teilchen, 488
 Interpenetrating network, 697

 Intertialsystem, Def., 202
 Inverse e. Matrix, 114
 Inverter (elektronischer) , 1350
 Irisblende, 1037
 Irrationale Zahlen, Def., 134
 Irreversible Prozesse, 638
 Ives, Herbert Eugene, 224

 Jacobi, Moritz Hermann, 473
 Jakobusstab, 1127
 Jeans, James Hopwood, 737
 Jeans-Kriterium, 922
 jet stream, 822
 Jones, R. Clark, 996
 Jones-Matrix, 997
 Jones-Vektor, 996
 Josephson, Brian David, 74
 Joule, James Prescott, 251
 Joule-Thomson-Expansion, 649
 Joule-Thomson-Koeffizient, 649
 Junktoren, logische (Def.), 1381

 Köhler, August Karl Johann Valentin,
 1075
 Köhler-Anordnung, 1075
 Körper, mathem. , Def., 372
 Kühlmaschine, 771
 Kaempfe, Hermann Anschütz, 293
 Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, 79
 Kalorische Zustandsgleichung, 652
 Kaltzeit, Eiszeit (Def.), 847
 Kammerton (Musik), 346
 kanonisch konjugierte Variablen, 492
 Kapazität, elektrische, 403
 Kapazität, verallgemeinerte, Def., 260
 kartesisches Koordinatensystem, 178
 Kausalität i.d. Rel.-theorie, 213
 Kausalitätsbedingung eines Systems, 386
 Kelvin, Lord of Largs, 50
 Kenorland (Super-Kontinent), 856
 Kepler, Johannes, 52
 Kettenmatrix e. lin. Vierpols, 1312
 Kettenregel d. Diff.-rechng., 141

- Kinetische Energie, 259
Kirchhoff, Gustav Robert, 356
Kirchhoffsche Regeln, 1303
Kirchhoffsches Strahlungsgesetz, 742
Klang (Def.), 340
Klang, reiner, 340
Kleinsignalverhalten, elektron., 1306
Klimamodell, lokales, 806
Klystron, 1334
Knickspannung einer Diode, 1326
Kodaly Zoltan, 347
Koexistenzbereich von Phasen, 676
Kohärenz von Wellen, 1000
Kohärenz, räumliche, 1000
Kohaesionsdruck realer Gase, 660
Kolmogorov, Andrej Nikolajewitsch, 534
Koma (Linsenfehler), 1032
Kombinationen, kombinatorische, 544
Kombinatorik, 542
kombinatorische Wahrscheinlichkeit, 533
Kommutator von Operatoren, 531
Komplement e. Menge, 124
Komplementärer Farbton, 1139
Kompressibilität, adiabatische, 651
Kompressibilität, isotherme (Def.), 650
Kompressionsmodul, Def., 650
Kondensator, elektron. Bauelement, 1322
Kondensierte Materie, 1227
konfokale Raman-Mikroskopie, 1176
Konfokales Lichtmikroskop, 1093
konjugiert komplexe Zahl, Def., 372
Konjunktion, logische, 1381
Konstantan, 1319
kontinentaler Graben (Def.), 949
Kontinuitätsgleichung, 164
konventionelle Sehweite, Def., 1116
Konvergenz e. Zahlenfolge, 135
Konvergenz, absolute, 150
Koordinatenflächen, Def., 179
Kopernikus, Nikolaus, 52
Kopplungskonstante e. WW, 406
Korrespondenzprinzip der QM, 496
Korrespondenzprinzip, Rel.-Theorie, 208
kosmische Strahlung, 981
Kosmologische Konstante, 266
Kovolumen realer Gase, 660
Kraft, Definition, 258
Kramers, Hendrik Anton, 389
Krebsnebel, 934
Kreis, Def., 99
Kreisfrequenz e. period. Beweg., 189
Kreislauf, 68
Kriechen eines Materials, 1229
Kristall, Def., 899
Kronecker, Leopold, 519
Kronecker-Symbol, 519
Kronig, Ralph de Laer, 389
Kubelka, Paul, 1151
Kubelka-Munk-Theorie, 1151
Kugelfunktionen, 233
Kugelstrahler, idealer, 1055
Kurve i. Raum (Def.), 139
Kurzsichtigkeit, Def., 1116
Kybernetik, Def., 68
längssymmetrischer Vierpol, 1315
Lösung v. Stoffen, 690
Lévy, Lucien, 1405
Lack (Beschichtungsmaterial), Def., 1147
Ladung, elektrische, 401
Lageenergie, Def., 257
Lagrange, Josef Louis de, 94
Lambda-Viertel-Plättchen, 1019
Lambert, Johann Heinrich, 1012
Lambert-Beer, Gesetz von, 1012
Lambertscher Strahler, 1056
Landau, Lew Davidowitsch, 75
Langmuir, Irving, 695
Laplace, Pierre Simon Marquis de, 167
Laplace-Operator, 167
Lateinersegel, 333
Latentes Bild e. fotogr. Films, 1107
Laufbild-Kamera, 1110
Laurasia (nördl. Super-Kontinent), 856

- Laurent, Pierre Alphonse, 378
Laurent-Reihe, Def., 378
Legendre, Adrien-Marie, 233
Legendre-Differenzialgl., 524
Legendre-Polynome, 233, 523
Legendre-Transformation, 267
Leibnitz, Gottfried Wilhelm, 135
Leichtwasser-Reaktor, 607
Leipniz, Gottfried Wilhelm, 127
Lenard, Philipp, 486
Leonardo da Vinci, 83
Leptonen, Def., 905
Leptonenzahl, 909
Leptonenzahl e. Elementarteilchens, 905
Libby, William F., 986
Lichtausbeute e. Strahlers, 1054
Lichtschacht, 1167
Lieben, R. von, 1334
Limes, thermodynamischer, 719
Linear polarisierte Strahlg., 996
Linear response, 385
Linearer Raum, 511
Linsenfehler, 1030
Lissajous, Jules Antoine, 190
Lissajous-Figuren, 190
Listing, Johann Benedikt, 127
Lock-In-Verstärker, 1419
Lokalisationsenergie, 491
Lorentz, Hendrik Antoon Lorentz, 210
Lorentz-Kontraktion, 217
Lorentz-Lorenz-Gleichung, 429
Lorentzkraft, 473
Lorenz, Ludvig Valentin, 429
Lorenz-Eichung, 478
Luftspule, elektron. Bauelement, 1320
Lumen, Def., 1051
Lumineszenz, 1013
Lupe, 1122
Lyell, Charles, 952

Mächtigkeit v. Mengen, 126, 127
Macula d. Auges, 1115
Magnetschwebebahn, 792
Maiman, Theodore Harold, 1062
Makrozustand, Def., 717
Manhattan-Projekt, 605
Marconi, Marchese Guglielmo, 1355
Mariotte, Edme Sgn. de Chazeuil, 328
Martin, Archer John, 1296
Maschinensprache (Def.), 1394
Masse, schwere, Def., 229
Masse, träge, 253
Massendefekt, 591
Massenwirkungsgesetz, 666
Masstheorie, Def., 533
Master batch, 1156
Materialparameter (Def.), 644
Materialwissenschaft, Definition, 1191
Matrix, Definition, 512
Maximum e. Funktion, 175
Maxwell, James Clerk, 229
Maxwell-Gleichungen, 476
Mayer, Julius Robert von, 629
Meissner, Alexander, 1359
Meissner-Oszillator, 1359
Melodie (Def.), 342
Messier, Charles, 934
Metamerie, 1132
Metrischer Raum, 516
Michelson, Albert Abraham, 205
Mid Pleistocene Transition (Def.), 850
Mikroskop, 1124
Mikroskop, inverses, 1126
Milankovic, Milutin, 860
Milankovic-Zyklen, 860
Millikan, Robert Andrews, 438
Mindel-Eiszeit, 850
Minimum e. Funktion, 175
Minkowski, Hermann, 227
Minkowski-Raum, 227
Minsky, Marvin, 76
Mischungsentropie, 694
Mischungslücke v. Loesungen, 692
Mises, Richard Edler von, 534

- mittelatlantischer Rücken, 951
 Mittelwert, gleitender e. Signals, 1358
 Mittelwertsatz d. Diff.-Rechnung, 148
 Moderator, (Kerntechnik), 607
 Mohs, Friedrich, 1225
 Molekular-disperse Mischung, Def., 690
 Moll-Tonleiter, 343
 Moment, magnetisches, 451
 Momente, höhere e. Zufallsgrösse, 540
 Mondfinsternis, 313
 Mondphase, 309
 Monier, Joseph, 1270
 Monotonie e. Funktion, 138
 Morley, E.W., 205
 Morphologie eines Materials, 1192
 Mossotti, Ottavio Fabrizio, 429
 Mueller, Hans, 1015
 Mueller-Matrix, 1015
 Multiplexing-Verf., Datenübertrg., 1397
 Munk, Franz, 1151
 Musik (Def.), 338
- Nabla-Operator, Def., 163
 Nambu, Yoichiro, 912
 Natürliche Zahlen, Def., 132
 Naturton e. Instrumentes, 350
 Navigation (Ortung), 315
 Ne'eman, Juval, 910
 Negation, logische, 1381
 Neigungskontrast b. opt. Abb., 1080
 Nernst, Walther Hermann, 723
 Nernstsches Waermetheorem, 723
 Netzstellen e. Polymer-Netzwerks, 1255
 Neumond, 310
 Newton, Sir Isaac, 50
 Newtonscher Reibungsansatz, 1279
 Nichtgleichgewichtszustand e. Systems,
 700
 Nickolson, William, 705
 Niepce, Joseph Nicéphore, 1107
 Nordheim, Lothar Wolfgang, 494
 Nordpol e. rotierenden Körpers, 187
 Nordpol, magnetischer, Def., 450
 Norm eines Vektors, Def., 516
 Norm-Atmosphäre, 823
 Normfarbtafel, 1149
 notwendige Bedingung, 122
 Nullfolge, Def., 135
 Nullmenge, 124
 Nullvektor, Definition, 511
 numerische Apertur e. Objektivs, 1033
 Nutzbrumm, elektronischer, 1398
 Nyquist, Harry, 1353
- Oberflächenphysik, 695
 Oberflächenspannung, 695
 Objektgesetz, Def., 253
 Octave (Def.), 341
 Oersted, Hans Christian, 465
 Oeschger, Hans, 852
 Offene Menge, Def., 128
 Operator in e. Vektorraum, 526
 Operator, quantenmech. (Def.), 502
 Optical sectioning, 1094
 Optische Aktivität, opt.Drehung, 1020
 Optische Weglänge, 1003
 Optokoppler (elektronischer), 1331
 Ordnungsparameter, 688
 Orientierungs-Polarisation, 430
 orthogonale Abbildung, 117
 Orthogonalität v. Vektoren, 518
 Ortsvektor, 111
 Ostafrikanischer Graben, 950
 Ostwald, Wilhelm, 712
 Ostwaldsches Verdünnungs-Gesetz, 712
 Oszillator, elektron., 1357
 Oszilloskop, 1413
 ozeanischer Rücken, 950
- Pacioli, Luca, 360
 Pangäa (Super-Kontinent), 856
 Parallaxenverfahren (Abstandsmessg), 286
 Parallelprojektion (Elementargeom.), 108
 Paramagnetische Materialien, 461
 Partialdruck e. Gases, 678

- partielle Ableitung, 156
 Pascal, Blaise, 262
 Passatwind, 834
 Patterson, Clair Cameron, 985
 Pauli-Prinzip der QM, 572
 Peano, Guiseppe, 132
 Peierls, Rudolf Ernst, 622
 Pentode, E-Roehre, 1338
 Perihel e. Ellipse, 100
 Perihel-Drehung, 246
 Perkins, Donald H., 904
 Permeabilität, magnetische Vakuum-, 453
 Permeabilität, relative magnetische, 459
 Permutationen, kombinatorische, 543
 pH-Wert (Def.), 710
 Phase, thermodynamische, 673
 Phasenübergang (Def.), 687
 Phasenübergang 1. Art, 687
 Phasenübergang 2. Art, 687
 Phasendiagramm, 684
 Phasenkontrast b. opt. Abb., 1081
 Phosphoreszenz, 1013
 Photometer, 1088
 Photomultiplier, 1069
 Piezo-Effekt, 433
 Pixel, Def., 1091
 Planck, Max Karl Ernst Ludwig, 493
 Plancksche Strahlungsformel, 744
 Plastische Materialien, Def., 1238
 plastische Zone, 1223
 Plastische Zone e. Risses, 1196
 Plattenkondensator, el. Bauteil, 1322
 Plattentektonik, 952
 Pleistozän (Erdzeitalter), 849
 Pockels, Agnes, 695
 Poincaré, Jules Henri, 228
 Poisson, Siméon Denis, 167
 Poisson-Gleichung, 167
 Poisson-Verteilung, 546
 Polarisierung elektromagn. Strhlg., 994
 Polarkreis, 303
 Polarlichter, 982
 Polarstern, 318
 Politzer, Hugh David, 917
 Polstärke, magnetische, 453
 Polymerphysik, Definition, 1193
 Polynomialverteilung, 546
 Potenzial, elektrisches, 402
 Potenzial, skalares, 168
 Potenzielle Energie, 259
 Potenzmenge, 125
 Preiswerk, Peter, 488
 Pressen e. Formteils, 1272
 Priestley, Joseph, 405
 Prochorow, Aleksandr Michailowitsch, 1062
 Produktmenge v. Mengen, 125
 Projektionsoperator, 530
 Proportionalabweichung, 1373
 Proton-Proton-Zyklus, 925
 Ptolemaeus, Claudius, 1127
 Pull-out-Prozess b. Composites, 1246
 pyro-elektrisch, 434
 Pyrolyse (Def.), 1297
 Pythagoras von Samos, 104
 Pythagoras, Satz des, 104
 Quantenausbeute e. Detektors, 1064
 Quantenchromodynamik, 917
 Quantisierung der Strahlung, 486
 Quantisierung, 2. der QM, 573
 Quark-Modell, 910
 Quark-Teilchen, 910
 Quasiteilchen (Def.), 586
 Quellendichte e. extensiven Grösse, 161
 Quotientenkriterium, 149
 Rückkopplung von Systemen, 68
 Racemat-Mischung, 1022
 Radioaktivität, natürliche, 589
 Rahsegel, 333
 Randpunkt e. Menge, 129
 Rasterelektronenmikroskop, 1092
 Ratiendetektor (Demodulator), 1407
 Rationale Zahlen, Def., 133
 Raumartiger Abstand, 213

- Raumbestrahlungsstärke, 1049
Rauschen, elektronisches, 1352
Rayleigh, John William Strutt, 737
Rayleigh-Streuung v. Licht, 1013
Reaktions-Entropie, 670
Reaktionslaufzahl e. chem. Reaktion, 664
rechts- (links-)drehendes opt. Mat., 1021
rechtshändig, 178
Reelle Zahlen, Def., 134
Reelles Bild e. opt. Abb., 1028
Reflexionsgesetz, 1002
Regelung, Def., 1371
Reguläre komplexe Funktion, Def., 377
Reibung, Def., 1277
Reibungskoeffizient, 1279
Reibungsschicht, Peplosphäre (Def.), 823
Reihe, mathem. Def., 137
Reintransmission, 1012
Relais, elektrisches, 1332
Relais-Optik, 1086
Relais-Optik, wiederholte, 1087
Reproduzierbarkeit e. Messgerätes, 1084
Reservoir e. extensiven Grösse, 267
Response eines Systems, 67
Retina (Netzhaut), 1119
Reversible Prozesse, 638
Reynold, Osborn, 47
Richter, Burton, 904
Richtungscosinus, Def., 109
Riemann, Georg F.B., 135
Riemann-Integral, Def., 143
Riss, materialwissenschaftl. Def., 1195
Riss-Eiszeit, 850
Rodinia (Super-Kontinent), 856
Rodrigues, Benjamin Olinde, 523
Rodrigues-Formel, 523
Roemer, Ole, 202
Rosse, Lord (Parsons, William), 934
Rotation eines Vektorfeldes, 165
Rotationsenergie, 255
Ruhemasse e. Teilchens, 254
Russell, Henry Norris, 929
Säkulargleichung, 528
Sacharov, Andrej Dmitrijewitsch, 600
Sampling-Oszilloskop, 1418
Sarrus, Pierre Frédéric, 115
Sarrussche Regel, 115
Savart, Felix, 465
Scanning-Konzept der Bilderzeugung, 1091
Schadenstoleranz (Def.), 1222
Schaum, 697
Schawlow, Arthur Leonard, 1062
Scherung e. Festkörpers, 1203
Schichtwiderstand, el. Bauteil, 1319
Schirmgitter e. E-Roehre, 1338
Schlicht e. Faser, 1243
Schmelzprozeß kristall. Materialien, 1211
Schmidt, Erhard, 519
Schmidtsches Orthogonal.-verf., 519
Schmiegeebene, Def., 185
Schmitt, Otto Herbert, 1385
Schmitt-Trigger, 1385
Schneeball-Erde, 874
Schott, Friedrich Otto, 992
Schrägseilbrücke, 1196
Schrödinger, Erwin, 505
Schrödinger-Gleichung, zeitabh., 506
Schrödinger-Gleichung, zeitunabh., 505
Schwämme, Def., 697
Schwartz, Laurent, 63
Schwarz, Karl Herrmann Amandus, 516
Schwarzer Körper, Def., 742
Schwarzsche Ungleichung, 516
Schwerpunkt e. Bewegung, 188
Sehfähigkeit Sehvermögen, 1119
Selbstinduktion, 471
Sextant, 1126
Sheffer, Henry Maurice, 1382
Shefferscher Strich, 1382
Shockley, William Bradford, 80
SI-System der Basiseinheiten, 50
Siderisches Jahr, 298

- Sieden einer Flüssigkeit, 679
 Siemens, Ernst Werner v., 79
 Siemens, Werner v., 1059
 Sievert, Rolf, 616
 Sigma-Ring, 535
 Signaldynamik, 1065
 Sintern e. Formteils, 1273
 Sinus hyperbolicus, 105
 Skalarprodukt (elementarmath.), 111
 Skalarprodukt 2-er Vektoren, Def., 516
 Slipper, Vesto Melvin, 978
 Snel, Willibrord van Royen, 1002
 Software (Def.), 1395
 Sol, 697
 Sol-Gel-Übergang, 698
 Solmisation (Musiklehre), 348
 Sommerfeld, Arnold, 57
 SONAR, 433
 Sonnenfinsternis, 312
 Sonnenspektrum, 1130
 Sonnenwind, 981
 Spambeton, 1269
 Spannung, elektrische, 402
 Spannungsüberhöhung (Schwingkr.), 1345
 Spannungsregler, elektronischer, 1377
 Spannungstensor, 1204
 Speichermodul eines Materials, 1209
 Spiegel (opt. Bauelement), 1033
 Sprödes Materialverhalten, 1222
 Spritzgiessen e. Formteil), 1273
 Spritzguss, 1249
 Sprungfunktion, 393
 stöchiometrische Koeffizienten, 663
 Stabilität v. Dispersionen, 698
 Stabilität, absolute, von Phasen, 683
 Stabilitätsgrenze, 675
 Stabilitätsbedingung f. Phasen, 673
 Stahlbeton, 1269
 Stahlkonstruktionen, 1267
 Stammfunktion, Def., 144
 Standardmodell (El.-teilchen), 914
 Starrer Körper (Def.), 186
 Stefan, Josef, 745
 Stefan-Boltzmann-Gesetz, 745
 Stehbildkamera, 1110
 Steife Materialien (Def.), 1207
 Steifigkeit, mechanische, 1230
 Steilheit einer Elektronenroehre, 1337
 Stern, Otto, 488
 Stetigkeit e. Funktion, 138
 Stetigkeit e. topolog. Abb., 129
 Steuerung, Def., 1371
 Stichprobenraum, 534
 Stilwell, G.R., 224
 Stimmen e. Instrumentes, 349
 Stimmung e. Tonleiter, 345
 Stoersignalabstand, 1397
 Stokes, George Gabriel, 166
 Strahl, geometr. Def., 96
 Strahlengang, vollständiger, 1075
 Strahlungsdichte, 1047
 Strahlungsdruck, 740
 Strahlungsfläche, effektive, 1046
 Strahlungsfluss, 1044
 Strahlungsfrost, 883
 Strahlungshohlraum, 740
 Strahlungsstärke, 1045
 Strahlungswichtungsfaktor (Def.), 616
 Streuquerschnitt, 580
 Streuung e. Zufallsgrösse, 541
 Streuung v. elektromagn. Strahlg., 1013
 Streuungskontrast b. opt. Abb., 1079
 Stromüberhöhung (Schwingkr.), 1345
 Stromdichte, Def., 161
 Strukturformel (chem.), 582
 Summenformel e. Moleküls, 582
 Superpositionsprinzip der QM, 498
 surjektive Abbildung, 126
 Suspension, 697
 Suszeptibilität, dielektrische, 427
 Suszeptibilität, magnetische, 459
 Suszeptibilität, verallgemeinerte, 385
 Symmetriebruch, 831
 Synchronisation e. Oszilloskops, 1414

- Synge, Richard L.M., 1296
Syperheterodyn-Empfänger, 1405
System, physikalisches (Definition), 66
Systemantwort, 67
- Talbot, William Henry Fox, 1107
Tamm, Igor Jewgenewitsch, 600
Tautologie, 122
Tautologien, logische, 1381
Taylor, Brook, 148
Taylorscher Satz, 148
Teilchen, klassisches, 484
Temperatur (statistische Definiton), 720
Temperatur, Def., 631
Tesla, Nicola, 459
Thermische Zustandsgleichung, 651
thermokalorischer Effekt, 434
Thomson, Sir Joseph John, 904
Thomson, William, 50
Tiefpass-Filter, 1346, 1348, 1350
Tiefsee-Rinne (Def.), 950
Tierkreiszeichen, 320
Ting, Samuel Chao Chung, 905
Titius, Johann Daniel, 356
Titius-Bodesche Reihe, 356
Tokamak- Fusions-Reaktor, 600
Tonart, Def., 343
Tonintervall (Def.), 341
Tonleiter (Def.), 342
Topologie, Def., 127
topologischer Raum, 128
Totalreflexion, 1009
Townes, Charles Hard, 1062
Trägheitstensor, Def., 257
Trübungsmessung, Def., 1172
Transformierte e. Matrix, 114
Transienten-Recorder, 1416
Transit eines Planeten, 312
Transmission, optische, 1011
Transmutation, 613
Transponierte Matrix, 514
Treibhauseffekt, 803
- Tribologie, Def., 1277
Triggerung e. Oszilloskops, 1414
Triode, elektr. Bauteil, 1336
Tripelpunkt e. Einteilchensystems, 679
Tripelpunkt v. Wasser, 685
Tropisches Jahr, 298
Tropopause, 822
Troposphäre, 822
Tubuslänge e. Mikroskops, 1125
Tunneleffekt, 494
- Ueberlagerungs-Empfänger, 1405
Uebertragungsfunktion, 1373
Ulbricht, Fritz Richard, 1039
Umgebung e. Punktes; Def., 129
Umkehrfunktion, 139
Umsatzvariable e. chem. Reaktion, 664
Unabhängigkeit, wahrsch.-theor., 535
Unbestimmter Ausdruck, 151
Unschärferelation, 493
Untermenge, 124
Untervektorraum, 515
Uran-Blei-Methode (Altersbest.), 984
UV-Katastrophe, 737
- Vakuum-Energiedichte, 266
Varianz einer Zufallsgroesse, 540
Variationen, kombinatorische, 543
Vektorpotenzial, Def., 171
Verdränger (Schiffstyp), 336
Vereinigungsmenge, 124
Verfärbungsinvarianz, Farbkennung, 1133
Verformbarkeit eines Materials, 1233
Verlustmodul eines Materials, 1209
Verschiebungspolarisation, 429
Verstärkung v. Materialien, 1241
Verstimmung, reduzierte, 1343
Verteilungsfunktion, 536
Verträglichkeit z.B. von Polymeren, 1212
Verzeichnung e. Linse, 1032
Vierpol, elektronischer (Def.), 1310
Vignettierung, 1075
Villard, Paul Ulrich, 590

- Vinci, Leonardo da, 1129
 Virialentwicklung (Zustandsfkt.), 660
 Virtuelles Bild e. opt. Abb., 1122
 Visko-Elastizität von Materialien, 1208
 Visus (Def.), 1119
 Vollmond, 310
 Vollständigkeit (mathem.), 518
 Volta, Alessandro Guiseppe Graf, 402
 Volumenausdehnungskoeff., therm., 647
 Vulkanisierung v. Kautschuk, 1255

 Wärmeübergang, Def., 751
 Wärmeübergangskoeffizient, 751
 Wärmekapazität, spez.(konst. Vol.), 645
 Wärmekapazität, spez.(konst.Druck), 645
 Wärmekonvektion, 750
 Wärmekraftmaschine, 758
 Wärmeleitfähigkeit, Def., 750
 Wärmepumpe, 775
 Wärmereservoir, 639
 Würm-Eiszeit, 850
 Wüste, Def., 841
 Waage, Peter, 671
 Waals, Johannes Diderik van der, 660
 Waermeschutzfilter, 1038
 Wahrscheinlichkeitsdichte, 537
 Wahrscheinlichkeitsmass, 535
 Wahrscheinlichkeitsrechnung, 532
 Walker, Sir Gilbert Thomas, 835
 Walker-Zirkulation, 835
 Wankel, Felix, 77
 Warmzeit (Def.), 847
 Watt, James, 629
 Weber, Wilhelm Eduard, *see d*
 Wechselwirkung, starke, 915
 Wegener, Alfred, 953
 Weißpunkt, 1137
 Weichmacher, 1212
 Weizsäcker, Carl Friedrich v., 927
 Welle, klassische, 485
 Welle-Teilchen-Dualismus, 489
 Wellenfunktion (Quantenmech.), 500
 Wellenlänge, Def., 153
 Wellenwiderstand e. Vierpols, 1318
 Wendekreis, 303, 304
 Werkstoffe vom Typ 1, 1249
 Widerspruchsbeweis, 123
 Widerstand, elektrischer (ohmscher), 1318
 Widerstand, innerer, e. El.-Rohre, 1337
 Widerstandsrauschen, 1353
 Wien, Wilhelm Karl Werner, 737
 Wiener, Norbert, 68
 Wiensches Verschiebungsgesetz, 745
 Wilczek, Frank, 917
 Wilson, John Tuzo, 954
 Wilson, Kenneth G., 65
 Wilson-Zyklus, 954
 Winkelbeschleunigung, Def., 187
 Winkelfunktionen, Def., 101
 Winkelgeschwindigkeit, Def., 187
 Winkelvergrößerung, optische, 1119
 Wirbelfelder, reine, 171
 Wirkungsgrad, allgem. Def., 762
 Wolke, Def., 825
 Wollaston, William Hyde, 566

 Young, Thomas, 992
 Yukawa, Hideki, 915
 Yukawa-Potenzial, 915

 Zähigkeit eines Materials, 1223
 Zeiss, Carl, 79
 Zeitartiger Abstand, 213
 Zeitdilatation, 215
 Zenerdiode, 1326
 Zentralbewegung, 192
 Zentralprojektion (Elementargeom.), 108
 Zernike, Frits, 1081
 Zewail, Ahmed H., 993
 Zufallsgrösse, 536
 Zufallsvektor, 536
 zusammenhängend, topologisch, 129
 Zuse, Konrad Ernst Otto, 1333
 Zustands-Verteilungsfunktion, 718
 Zustandsdichte, 733

Zustandssumme, 727
Zustandssumme, grosskanonische, 729
Zweig, George, 910
Zweipol, elektronischer, 1304
Zweistoffsystem, Def., 686
Zweistrahl-Oszilloskop, 1414
Zwillingsparadoxon, 216