

Übungen zur Thermodynamik

Serie 6: Strahlungsgesetze

1. Strahlungseigenschaften eines Spiegels

- (a) Was kannst du über die **Albedo**, den **Absorptions-** und den **Emissionskoeffizienten** eines **idealen Spiegels** sagen.
- (b) Was nützt eine dünne **Rettungsdecke** (vgl. Bild rechts)?



2. UV-Lampen

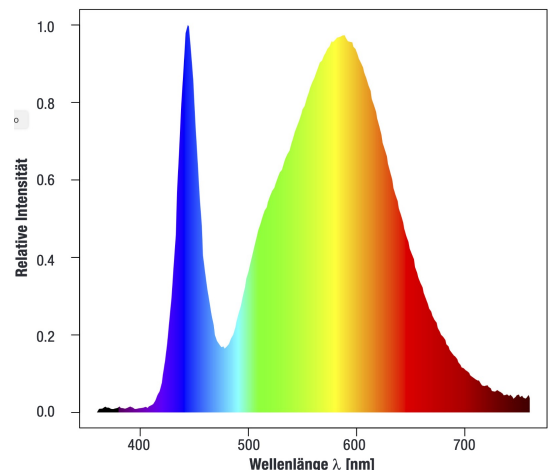
Künstliches UV-Licht wird nicht mit einer Glühlampe (Glühdraht) erzeugt. Kannst du das begründen? Wo läge die technische Schwierigkeit?

3. Temperaturen von Himmelskörpern und Straßenlampen

- (a) Das Lichtspektrum des Sterns **Altair** im Sternbild Adler hat sein Intensitätsmaximum bei einer Wellenlänge von 372 nm. Was schließt du daraus für die Oberflächentemperatur von Altair?
- (b) Beim Licht des Mondes liegt das Intensitätsmaximum bei 692 nm. Welche Schlüsse ziehst du daraus?
- (c) **Alnitak** ist ein blauer Überriese, dessen Oberflächentemperatur mit 25 000 K angegeben wird. Bei welcher Wellenlänge liegt das Intensitätsmaximum von Alnitaks Sternenlicht? Welcher Farbe entspricht das und in welchem Licht dürfte der Stern am Nachthimmel funkeln?

- (d) Rechts siehst du das Spektrum einer **Straßenlampe**.

Dazu lese ich in einem Fachartikel von Herrn Dr. L. Schuler (Präsident Dark-Sky Switzerland) die Legende: *“Spektrum einer öffentlichen Straßenlampe Jg. 2017, LED 4000 Kelvin. Der emittierende Peak ist blau (kurzwellig, links). Bei dieser Lampe beträgt der rechnerische Blauanteil 17.8 %. Das sekundäre Spektrum, welches durch eine Beschichtung mit Phosphor entsteht, erzeugt die wärmeren Farbanteile (langwellig, rechts). Diese Umwandlung geschieht heutzutage mit wenigen Prozent Verlust. Vor acht Jahren war der Effizienzverlust noch über 10 %.”*



Was verstehst du alles in diesem Artikel? Was erfährst du über die Straßenlampe?

Hinweis: Die relative Intensität ist das Verhältnis aus spektraler Intensität $I(\lambda)$ und Gesamtintensität I_{total} . Wenn man im Intensitätsdiagramm vertikal diese relative Intensität aufträgt, so beträgt die Gesamtfläche unter der Kurve automatisch 100 %.

4. Absorption und Emission von Strahlung beim menschlichen Körper

Unser Körper kann im Infrarotbereich in guter Näherung als schwarzer Körper angesehen werden.

- (a) Schätze deine eigene Körperoberfläche ab und berechne die von dir emittierte Strahlungsleistung, wenn du von einer mittleren Temperatur deiner Körperoberfläche von 35 °C ausgehst.
- (b) Die meiste Zeit lebst du in einem Strahlungsumfeld, das einer Schwarzkörperstrahlung von Zimmertemperatur entspricht. Berechne, welche Strahlungsleistung du von der Umgebung aufnimmst.
- (c) *“Die Abstrahlung eines Menschen aufgrund der Körpertemperatur entspricht etwa einer 100 W-Glühbirne.”* So liest man es in vielen Physikbüchern. Bestätigen deine Berechnungen diese Aussage?

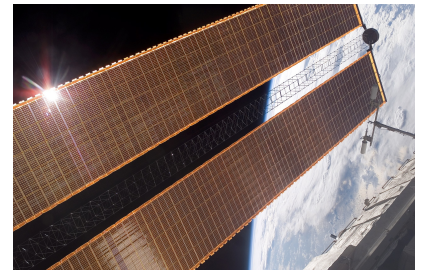
5. Solarkonstante und Solarzellen

Die **Solarkonstante** $S = 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ gibt an, wie stark die **Intensität** I der Sonnenstrahlung auf Höhe der Erde im Weltall ist: Jeder gegen die Sonne ausgerichtete Quadratmeter Fläche empfängt eine **Strahlungsleistung** von 1361 W, also 1361 J pro Sekunde.

- (a) An einem sonnigen Tag mit trockener Luft dringen am Mittag etwa 85 % der Sonnenintensität durch die Atmosphäre bis zum Erdboden. Derzeit auf Hausdächern verbaute polykristalline Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von z.B. 18 %. Das bedeutet, 18 % der ankommenden Strahlungsintensität werden zur Stromgewinnung verwendet.

Angenommen, die Solarzellen auf einem Dach seien momentan direkt gegen die Sonne ausgerichtet. Wie groß muss die Solarzellenfläche mindestens sein, damit sie unmittelbar die elektrische Leistung bereitstellen kann, die fürs Kochen des Mittagessens benötigt wird? (Wir nehmen an, die zwei Herdplatten schlucken zusammen 2300 W.)

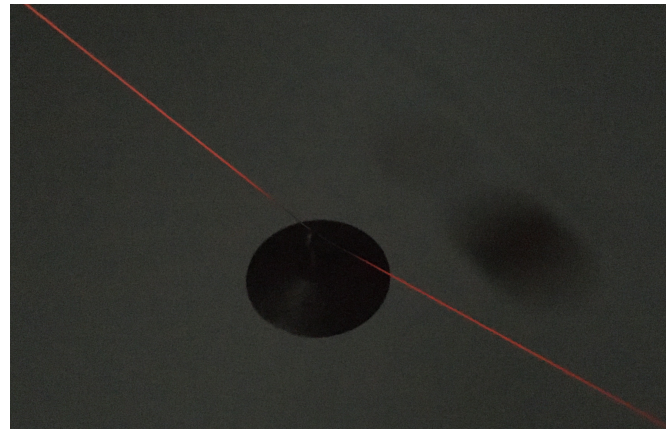
- (b) Jedes der anfänglich in der **internationalen Raumstation ISS** eingebauten Solarpaneele hatte eine Länge von 35 m und eine Breite von 4.8 m und lieferte eine elektrische Leistung von 16 kW, wenn es gegen die Sonne ausgerichtet war. Bestimme aus diesen Angaben den Wirkungsgrad der alten ISS-Solarzellen!



6. Ein glühender Draht im Leistungsgleichgewicht

Durch einen 0.50 mm dicken und 75 cm langen **Metalldraht** fließen bei 30.0 V angelegter Spannung 3.9 A Strom. Wie wir im Unterricht beobachtet haben, wird der Draht dabei so heiß, dass er **orange-rot** glüht (vgl. Bild).

Da das Glühen eine konstante Farbe und Helligkeit aufweist, schließen wir auf ein **Gleichgewicht** zwischen der zugeführten **elektrischen Leistung** und der vom Draht emittierten **Strahlungsleistung**.



- (a) Welche **Celsius-Temperatur** weist der Draht demnach auf?

Hinweis 1: Die Oberfläche des Drahtes beträgt $A = \pi \cdot d \cdot h$ (= Formel für die Zylinderoberfläche mit d = Durchmesser und h = Zylinderhöhe resp. Drahtlänge).

- (b) Die Tabelle rechts führt die Wellenlängen in einem Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums auf.
- In welchem **Farbbereich** liegt die **Wellenlänge maximaler Intensität**, die vom glühenden Draht ausgesendet wird?
 - Begründe knapp und präzise, weshalb die Antwort zu i. nicht im Widerspruch zum beobachteten orange-roten Glühen des Drahtes steht?

Spektrale Wellenlängenbereiche	
ultraviolett	3.9 nm – 390 nm
violett	390 nm – 430 nm
blau	430 nm – 490 nm
grün	490 nm – 570 nm
gelb	570 nm – 600 nm
orange	600 nm – 620 nm
rot	620 nm – 780 nm
infrarot	780 nm – 30 000 nm

7. Eliminierung systematischer Messfehler

Weshalb wird die Temperatur der Luft nur im Schatten richtig gemessen? Erläutere!

8. Das Abstandsgesetz und die Leuchtkraft der Sonne

Aus Aufgabe 5 kennen wir die Solarkonstante S (= Strahlungsintensität der Sonne auf Höhe der Erde). Den mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne bezeichnen wir als eine **Astronomische Einheit (AE)** mit einem Wert von 149.6 Mio. km.

- (a) Die von einem Stern ausgesandte Strahlungsleistung P_S wird in aller Regel als dessen Leuchtkraft L bezeichnet. Bestimme nun die Leuchtkraft der Sonne in Watt.
- (b) Wie groß sind die "Solarkonstanten" der Planeten Merkur und Neptun, wenn deren Abstände zur Sonne $r_M = 0.38 \text{ AE}$ und $r_N = 30.05 \text{ AE}$ betragen?

9. Ein Gedankenexperiment im Weltraum – ein erstes Beispiel für ein Strahlungsgleichgewicht

In den vorangegangenen Aufgaben gaben verschiedene Körper Temperaturstrahlung ab (Mensch, Draht, Sonne). Nur aufgrund einer gleichzeitigen Energiezufuhr konnte dabei die Temperatur konstant gehalten werden.

- (a) Wie versorgen sich Sonne, Draht und Mensch mit Energie zur Aufrechterhaltung ihrer Temperatur?
- (b) Nun wollen wir einen Körper betrachten, der über keine zusätzliche Energiequelle verfügt. Wir werden sehen, dass sich seine Temperatur über das **Gleichgewicht aus abgegebener und aufgenommener Strahlung** definiert.

Eine Raumfähre habe ein pechschwarz eingefärbtes, flaches, quadratisches Blech mit einer Fläche von 2.5 m^2 in eine Umlaufbahn um die Erde gebracht. Es sei stets so ausgerichtet, dass die eine Seite direkt gegen die Sonne zeigt.

"Pechschwarz" bedeutet, die gegen die Sonne ausgerichtete Blechseite absorbiert sämtliche ankommende Strahlung (die Albedo des Blechs ist also gleich 0).

Berechne zunächst die vom Blech aufgenommene Strahlungsleistung.

Hinweis: Solarkonstante $S = 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

- (c) Würde das Blech weniger Strahlung emittieren als es absorbiert, so würde es insgesamt Energie aufnehmen und wärmer werden. Dadurch würde sich seine Abstrahlung verstärken (Stefan-Boltzmann-Gesetz)! Im umgekehrten Fall würde die Temperatur aufgrund der stärkeren Abstrahlung sinken. Wir folgern, dass sich beim Blech auf Dauer ein **Strahlungsgleichgewicht** (absorbierte Strahlungsleistung = emittierte Strahlungsleistung) auf einer ganz bestimmten Blechtemperatur einstellt.
Berechne aufgrund dieses Strahlungsgleichgewichts die Celsius-Temperatur des Blechs.
- (d) Die unter (c) errechnete Temperatur ist nicht gerade günstig, wenn man bedenkt, dass dann ja wohl auch Objekte wie Raumkapseln, in denen sich Menschen befinden, solche Temperaturen annehmen.
Schlage eine sinnvolle und technisch machbare Maßnahme vor, die für akzeptable Temperaturen an resp. in einer Raumkapsel sorgen könnten.

10. Frühlingszeit = Tauzeit

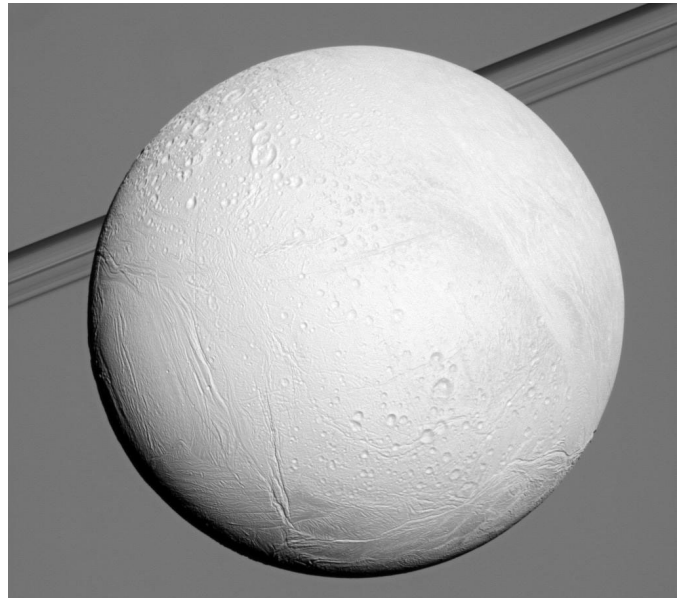
Weshalb schmilzt eine geschlossene Schneedecke in der Landschaft zuerst an den dunklen Stellen des Bodens? Begründe!

11. Enceladus

Rechts siehst du den Mond **Enceladus** vor dem Hintergrund des Planeten Saturn (Bild der Raumsonde **Cassini**). Er scheint eine Art Eiskugel zu sein, aus dessen Innerem Vulkane und Geysire hohe Fontänen aus Wassereispartikeln spucken. Zusammen mit Saturn befindet er sich in einer mittleren Distanz von etwa 9.5 AE von der Sonne.

Enceladus weist mit $\beta = 0.99$ eine sehr hohe Albedo auf. Bestimme die Temperatur an seiner Oberfläche, wobei du davon ausgehen darfst, dass Enceladus keine Atmosphäre hat.

Hinweis: Die Leuchtkraft der Sonne haben wir in Aufgabe 5, die astronomische Einheit AE in Aufgabe 8 kennengelernt.



12. Spektrale Entfernungsbestimmung eines Sterns

Der Stern **Fomalhaut** ist Teil des Sternbildes **südlicher Fisch** (*piscis austrinus*). Hier ein paar Daten:

- Aufgrund einer Spektralanalyse stellt man fest, dass Fomalhaut ein Temperaturstrahler ist und sein Intensitätsmaximum bei etwa 312 nm liegt.
- Weiter schließt man aus der Spektralanalyse, dass es sich bei Fomalhaut um einen sogenannten **Hauptreihenstern** der Spektralklasse A3 handelt. Wie man weiß, besitzen solche Sterne einen Radius von ca. 1.1 Millionen Kilometer.
- Auf der Erde empfangen wir von Fomalhaut eine Strahlungsintensität von $8.9 \frac{\text{nW}}{\text{m}^2}$.

Bestimme aus diesen Angaben die **Entfernung von Fomalhaut** in Lichtjahren.

13. Gute Thermosflaschen

Rechts siehst du den Aufbau einer guten **Thermosflasche**.

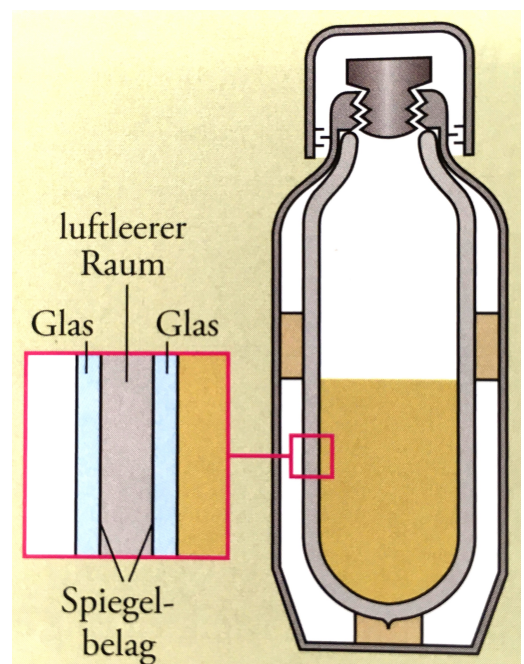
Erläutere, weshalb diese Flasche so gut ist.

Tipp: Denke über die verschiedenen Arten des Wärmetransports nach!

14. Cosmic Background Radiation

Im Jahre 1965 entdeckten **A. Penzias** und **R.W. Wilson** eine allgegenwärtige em-Strahlung, die aus allen Richtungen des Weltraums zu kommen scheint. Ihre spektrale Intensität $I(\lambda)$ entspricht einer Temperaturstrahlung mit maximaler Intensität bei 1.063 mm. Welche Temperatur kann dieser sogenannten **kosmischen Hintergrundstrahlung** zugeordnet werden?

Nebenbei: Penzias und Wilson wurden für die Entdeckung dieser Kosmischen Hintergrundstrahlung im Jahr 1978 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.



15. Schwarz-Planeten-Temperaturen

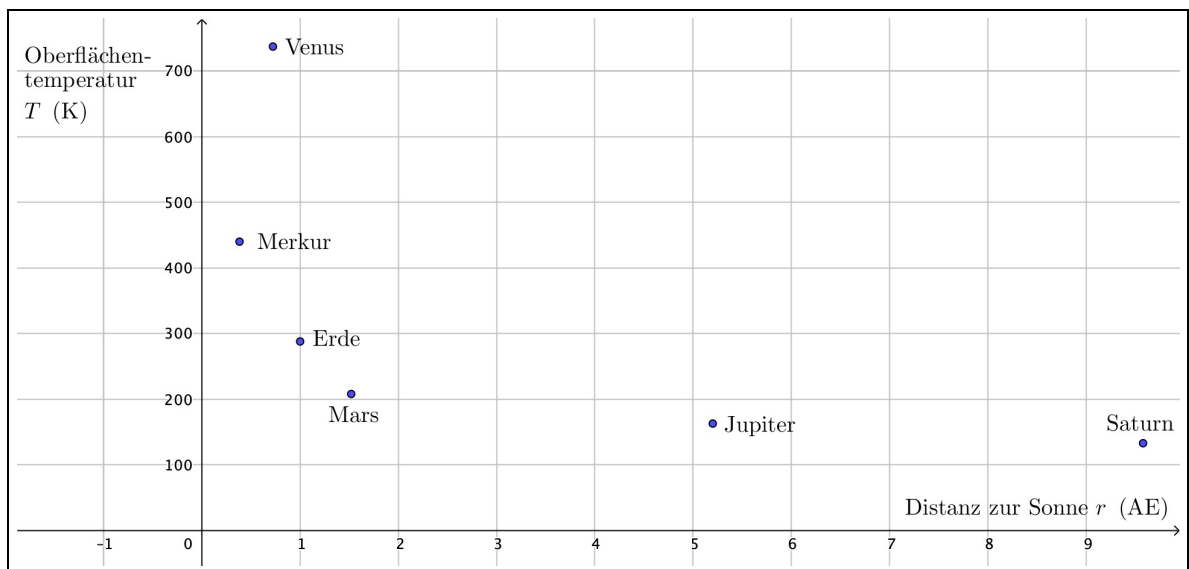
Annahme: Die Erde sei ein **schwarzer Körper**, habe also die Albedo $\beta = 0$, besitze keine Atmosphäre ($\Rightarrow$ kein Treibhauseffekt!) und das Erdinnere habe keinen Einfluss auf die Oberflächentemperatur.

Aus der **Leuchtkraft der Sonne** $L_{\odot}$ und ihrer **Distanz zur Erde** ($r = 1 \text{ AE}$) ergibt sich für die Temperatur an der Erdoberfläche ein Wert von $T = 279 \text{ K} \approx 5^{\circ}\text{C}$.

- (a) Bestätige diese **Schwarz-Planet-Temperatur** der Erde durch eine entsprechende Rechnung. Leite dabei ein formales Resultat her, das zeigt, dass diese Temperatur nur von der Leuchtkraft der Sonne und von Distanz des Planeten zur Sonne abhängt (für $L_{\odot}$ vgl. Aufgabe 5 und für AE Aufgabe 8).
- (b) **Technisch anspruchsvoll:** Skizziere den Verlauf der absoluten Schwarz-Planet-Temperatur T als Funktion der Distanz r zur Sonne im folgenden Diagramm, das du als GeoGebra-File auch auf agertsch.ch findest. Täte eine entsprechende Funktionseingabe in der Eingabezeile!

Tipp 1: Vor der Eingabe die Zehnerpotenzen kürzen und teilweise radizieren!

Tipp 2: Ist x die Distanz zwischen Planet und Sonne in astronomischen Einheiten AE, so ist $r = x \cdot 1.496 \cdot 10^{11}$ dieselbe Distanz in Metern.



- (c) Die reale mittlere Temperatur der Erde beträgt $\vartheta_{\text{E,real}} = +16^{\circ}\text{C}$. Das liegt nicht besonders viel, aber doch deutlich über ihrer Schwarz-Planet-Temperatur von $+5^{\circ}\text{C}$. Diese geringe Temperaturdifferenz ist aber eher Zufall, wenn wir bedenken, dass die Erde sowohl eine nicht vernachlässigbare Atmosphäre, als auch eine deutlich von 0 verschiedene Albedo hat, also Strahlung reflektiert. In welche Temperaturrichtungen "arbeiten" Albedo und Atmosphäre? Begründe deine Aussagen. Welcher Effekt dominiert offenbar bei der Erde?
- (d) Bestimme die Schwarz-Planet-Temperaturen von Venus und Mars ($r_V = 0.72 \text{ AE}$, $r_M = 1.52 \text{ AE}$). Auch bei diesen beiden Planeten weichen die mittleren realen Temperaturen von den Schwarz-Planet-Temperaturen ab: $\vartheta_{\text{V,real}} = +464^{\circ}\text{C}$ und $\vartheta_{\text{M,real}} = -65^{\circ}\text{C}$. Erkläre auch hier die Herkunft dieser Differenzen.
- (e) Die **Lebenszone** unseres Sonnensystems ist der Bereich, in dem Wasser in flüssiger Form auf Dauer bestehen kann. Grob können wir annehmen, dass dafür die Schwarz-Planet-Temperatur zwischen -50°C und 50°C liegen muss. Rechne diese Grenzen der Lebenszone in Entfernungen zur Sonne um und schaue, wie weit daneben resp. darin Venus und Mars sind.

16. **Ziemlich herausfordernd!** *Strahlungsabgabe einer Glühlampe*

Eine Glühlampe gibt die aufgenommene elektrische Leistung praktisch ganz als Wärmestrahlung wieder ab. (Allerdings liegt nur ein geringer Teil dieser emittierten Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich.)

- (a) Eine 60 W/230 V-Lampe glüht mit einer Temperatur von gerade etwa 2000 °C (Umgebungstemperatur: 20 °C). Berechne für diese Lampe die Länge und den Radius des Drahtes aus Wolfram.

Hinweis: Für den Widerstand des Glühdrahtes gilt einerseits: $R = \frac{U}{I}$, andererseits kann er in Abhängigkeit von Länge l und Querschnittsfläche Q ausgedrückt werden durch: $R = \frac{\rho \cdot l}{Q}$. Dabei ist ρ der sogenannte **spezifische Widerstand** des Materials. Für Wolfram gilt: $\rho_W = 5.28 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

- (b) Berechne näherungsweise, wie schnell der Glühdraht aus Wolfram nach dem Ausschalten des Stromes auf 500 °C abkühlt und das Licht somit "ausgeht". Zerlege dazu den Abkühlungsvorgang in 100 °C-Schritte und berechne jeweils die Dauer der Wärmeabgabe mit der mittleren Temperatur.

Tipp: Verwende ein **Tabellenkalkulationsprogramm**, z.B. Excel!

- (c) Mache dasselbe nochmals, aber jetzt mit 10 °C-Schritten. Was fällt dir beim Vergleich der Resultate von (b) und (c) auf? Was kann man über die Güte dieser Schritt-Methode folgern, die ja ganz offensichtlich nicht exakt sein kann?