

Kapitel 5

Wärmetransport

In Kapitel 2 hatten wir festgehalten, was wir unter dem Begriff **Wärme** verstehen wollen: *“Wärme ist der Übertrag an innerer Energie aufgrund eines Temperaturunterschieds zwischen zwei Körpern.”* Sind die Körper im thermischen Kontakt, so gibt der heissere innere Energie an den kälteren ab, bis beide Körper im thermischen Gleichgewicht sind.

In diesem Kapitel wollen wir diese **Übertragung von innerer Energie** ganz allgemein studieren und kategorisieren. Wir gehen folgender Frage nach:

“Wie kann überhaupt innere Energie von einem Ort A zu einem Ort B gelangen (qualitativ) und wie beschreiben wir diesen Wärmetransport quantitativ?”

Unter dem Begriff **Wärmetransport** verstehen wir also die **örtliche Verschiebung von innerer Energie**. Abb. 5.1 zeigt die **drei Möglichkeiten**, die es dafür gibt. Auf der nächsten Seite folgen erste kurze Erläuterungen dazu.

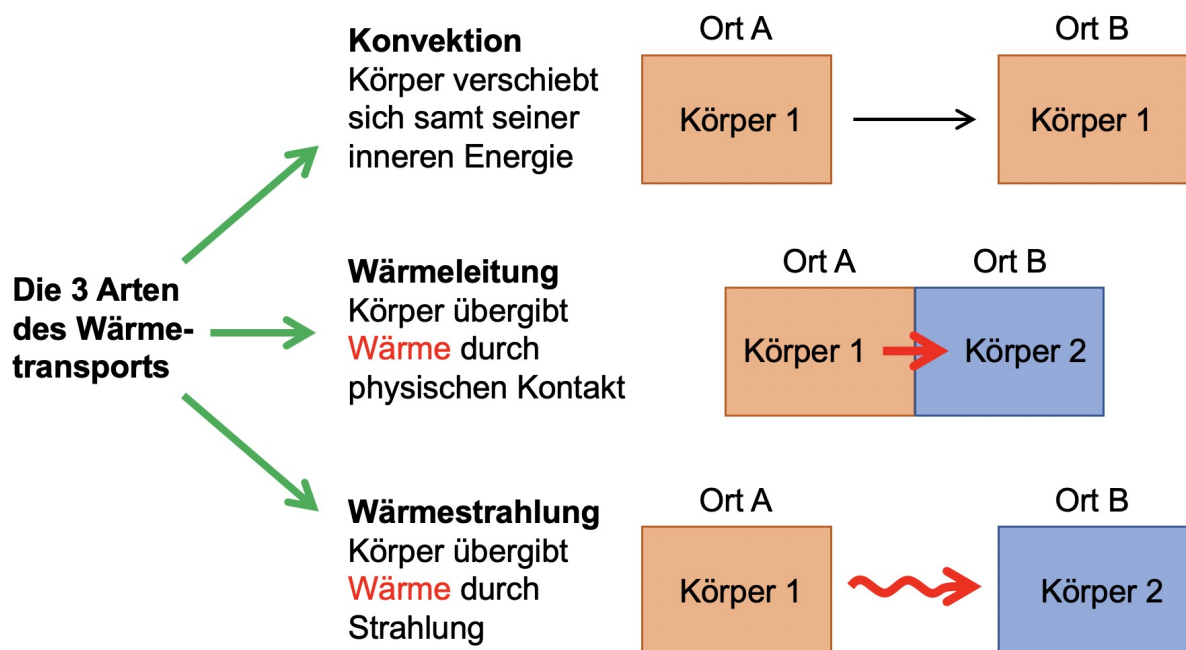


Abbildung 5.1: Die drei Arten des Wärmetransports.

- 1. Konvektion:** Die innere Energie gelangt an einen anderen Ort, weil der gesamte Körper inklusive der in ihm enthaltenen Energie verschoben wird.

In einer Kochpfanne steigt das heissere und dadurch weniger dichte Wasser in der Pfannenmitte auf, währenddem am Rand der Pfanne kälteres Wasser absinkt. Solche **Konvektionsströme** gibt es nicht nur in Flüssigkeiten, sondern auch in Gasen. So sorgen die Radiatoren (Heizkörper) in einem Zimmer für eine Luftumwälzung und in der Atmosphäre entstehen Auf- und Abwinde, die gleichzeitig innere Energie verschieben.

Im grossen Stil geschieht der Wärmetransport durch Konvektion z.B. beim **Föhn**, einem warmen Südwind, der uns im Norden der Schweiz hohe Temperaturen beschert, oder beim **Golfstrom**, der warmes Wasser aus der Karibik an die Westküste Europas bringt (vgl. 5.4).

- 2. Wärmeleitung:** Berühren sich zwei Körper physisch, so gibt der Wärmere aufgrund aufgrund der Stösse zwischen den Teilchen innere Energie an den Kälteren ab.

Diese Art der Übergabe von innerer Energie kennen wir bereits. An einer Heizung kann man sich durch Anfassen direkt die Hände wärmen. Im warmen Bad wird der ganze Körper aufgewärmt, während ein Bad in einem kalten See sehr rasch den Körper kühlt, ihm also durch den physischen Kontakt Wärme entzieht, etc.

- 3. Wärmestrahlung:** Jeder Körper sendet aufgrund seiner Temperatur elektromagnetische Strahlung aus und gibt dadurch innere Energie ab. Je heisser der Körper ist, desto stärker ist grundsätzlich die abgegebene Strahlungsleistung.

Umgekehrt kann ein Körper derartige Strahlung auch aufnehmen. Auf diese Weise kann also ebenfalls Wärme übertragen und ein thermisches Gleichgewicht mit einem anderen Körper erreicht werden.

Auch der menschliche Körper strahlt aufgrund seiner Körpertemperatur Wärme ab. Auch bei Zimmertemperatur verbraucht diese Körperabstrahlung viel Energie. Wir müssen uns also vor allem deswegen Nahrung zuführen, um nicht aufgrund der Aussendung von Temperaturstrahlung auszukühlen.

Global betrachtet ist der "Strahlungshaushalt" der Erde der entscheidende Faktor bei der Festlegung der mittleren Temperatur und somit bei der Festlegung des vorherrschenden Klimas. Strahlung aufzunehmen und abzugeben ist ein Grundprozess der Natur, der auch und gerade auf grosser Skala von zentraler Bedeutung ist.

Wie die erwähnten Beispiele zeigen, sind alle drei Arten des Wärmetransportes, also der Verschiebung innerer Energie, auf ihre Weise wichtig und wir werden uns in diesem Kapitel einzeln mit jeder von ihnen befassen. Dabei ist die Wärmestrahlung in der rechnerischen Behandlung am anspruchvollsten. Welche Körper Wärmestrahlung gut absorbieren oder emittieren, was die Temperatur des Körpers dabei für eine Rolle spielt und wie der Frequenzmix solcher Strahlungen aussieht, liefert uns ein wichtiges Puzzleteil für das Grundverständnis des Wärmehaushalts der Erde und dessen Beeinflussung durch den Menschen (anthropogener Klimawandel). Diesen Strahlungsgesetzen wollen wir aber im Kapitel 6 separat nachgehen. In diesem Kapitel werden erst ein paar allgemeine Aussagen zur Wärmestrahlung von Körpern gemacht.

5.1 Lernziele Kapitel 5

- Ich bin in der Lage, die drei verschiedenen Arten des **Wärmetransports**, also **Konvektion**, **Wärmeleitung** und **Wärmestrahlung**, in diversen Situationen zu erkennen und voneinander zu unterscheiden. Zu jeder Art kenne ich mehrere Beispiele aus Alltag und Technik.
- Ich bin mit den Definitionen von **Wärmestrom** J und **Wärmestromdichte** j so gut vertraut, dass ich sie auch selber erläutern kann. Aus entsprechenden Angaben resp. Daten kann ich Wärmeströme und ihre Dichten quantitativ bestimmen. Ich kenne die zu diesen Grössen gehörenden **SI-Einheiten** W und $\frac{W}{m^2}$ und gebe das Rechenresultat damit an.
- Ich kann erklären, wie sich die **Konvektion** in Flüssigkeiten und Gasen in manchen Fällen **“von alleine” ergibt**, weil sich Unterschiede in der Energiedichte eines Stoffes auch in unterschiedlichen Dichten manifestieren: Dort, wo ein Stoff wärmer ist, ist seine Dichte in der Regel geringer, sodass ein wärmeres Gebiet in einer kälteren Umgebung aufgrund des über die Gewichtskraft dominierenden Auftriebs aufsteigen wird.
- Mir ist bewusst, dass die **Temperatur** eines Körpers ein Mass für die **mittlere kinetische Energie** der Teilchen in diesem Körper ist. Daraus leite ich ab, dass bei zwei Körpern, die in direktem physischen Kontakt stehen, der Wärmere innere Energie an den Kälteren abgibt, weil kinetische Energie übergeben wird.
- Ich weiss, welche Überlegungen bei der Wärmeleitung zur Formulierung der **Wärmeleitungsgleichung** führen und kann die Proportionalitäten zum **Temperaturunterschied** und zur **Querschnittsfläche**, sowie die umgekehrte Proportionalität zur **Leiterlänge** auch plausibel machen. Zudem habe ich verstanden, wie die **Wärmeleitfähigkeit** λ eines Materials definiert wird. Den Ausdruck $\frac{\Delta\theta}{l}$ verstehe ich als **Temperaturgradienten**, der mir sagt, wie stark der Temperaturunterschied pro Längeneinheit den Wärmestrom antreibt.
- Mir ist klar, dass die Ausbreitung **elektromagnetischer Strahlung** als wellenartiges Phänomen beschrieben werden muss. Das bedeutet, dass solche **em-Strahlung** ganz verschiedene **Wellenlängen** λ resp. **Frequenzen** f aufweisen kann. So enthält das **elektromagnetische Spektrum** verschiedene **Wellenlängenbereiche**, die aufgrund ihres Vorkommens oder ihrer Anwendung unterschiedliche Namen erhalten haben. Die wichtigsten dieser Bereiche sind mir bekannt und ich kann sie im elektromagnetischen Spektrum einordnen: Gammastrahlung, Ultraviolettstrahlung, optische Strahlung (= sichtbares Licht), Infrarotstrahlung, Mikrowellenstrahlung, Rundfunkfrequenzen.
- Ich weiss, dass jeder Körper aufgrund seiner Temperatur einen Strahlungsmix aus verschiedenen Frequenzen resp. Wellenlängen aussendet. Dies bezeichnet man als die **Temperatur- oder Wärmestrahlung** des Körpers.
- Ich weiss, dass bei einer Wärmestrahlung der Wärmestrom J als **Strahlungsleistung** P_s und die Wärmestromdichte j als **Strahlungsintensität** I bezeichnet werden.

5.2 Wärmestrom und Wärmestromdichte

Bevor wir uns im Detail mit den verschiedenen Arten des Wärmetransports befassen, sei zunächst seine quantitative Behandlung dargelegt. Wie auch immer ein Wärmetransport stattfindet, sein Ausmass wird in der Regel stets in derselben Art beschrieben.

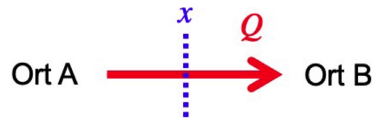


Abbildung 5.2: Der Wärmestrom zwischen A und B: Pro Zeitspanne Δt wird jede Stelle x zwischen A und B von einer bestimmten Wärmemenge Q passiert.

A sei der Ort, von dem die Wärme herkommt, B derjenige, wo sie hinget. Betrachte ich eine Stelle x zwischen A und B, so wird dort pro Zeitspanne Δt eine bestimmte Wärmemenge Q vorbeikommen (vgl. Abb. 5.2). Diese Angabe – übertragene Wärme pro Zeitspanne – bezeichnen wir als den **Wärmestrom** zwischen A und B:

Der Wärmestrom

Wird eine Stelle (Querschnitt) pro Zeitspanne Δt von der Wärmemenge Q passiert, so sprechen wir von einem **Wärmestrom** J :

$$J := \frac{Q}{\Delta t} \quad (5.1)$$

“Wärmestrom = Wärmemenge pro Zeitspanne”

Die physikalische Dimension des Wärmestroms entspricht einer **Leistung**, denn bei der Wärme handelt es sich ja um einen Energieumsatz ΔE : “Wärmestrom = Energieumsatz pro Zeit”. In manchen Betrachtungen werden wir für den Wärmestrom deshalb auch das Symbol P (für “power”) verwenden, wie wir das bei der Leistung getan haben.

Auch die **Wärmeleistung**, die wir im Abschnitt 2.1 definiert hatten, kann nun als Wärmestrom verstanden werden. Wir beschreiben quantitativ, wie viel Wärme ein Körper pro Sekunde erhält oder abgibt oder an einer Stelle vorbeikommt.

Die **SI-Einheit** des Wärmestroms ist folglich ebenfalls das **Watt** W:

$$[J] = \frac{[Q]}{[\Delta t]} = \frac{[\Delta E]}{[\Delta t]} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} = \text{Watt}$$

Mit dem Wärmestrom definieren wir weiter (vgl. Abb. 5.3):

Die Wärmestromdichte

Das Flächenstück A sei senkrecht zur Fliessrichtung eines Wärmestroms J ausgerichtet und werde in der Zeitspanne Δt von der Wärmemenge Q passiert. Dann ist die **Wärmestromdichte** j gegeben durch:

$$j := \frac{J}{A} = \frac{\frac{Q}{\Delta t}}{A} = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} \quad (5.2)$$

“Wärmestromdichte = Wärmestrom pro Flächeneinheit”

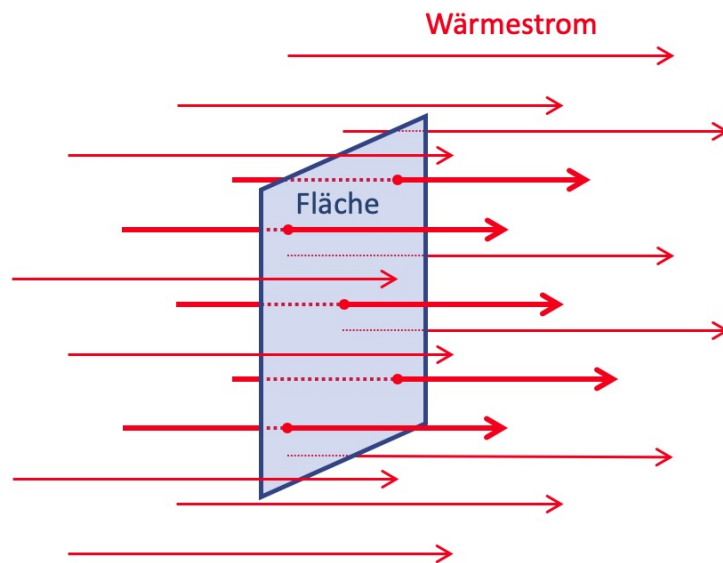


Abbildung 5.3: Die roten Pfeile symbolisieren den Wärmestrom J . Die fetten Pfeile durchqueren die blaue Fläche A . D.h., die zu diesen Pfeilen gehörende Leistung $\frac{Q}{\Delta t}$ verteilt sich auf A . Sie muss durch A geteilt werden, um die Wärmestromdichte $j = \frac{Q}{A \cdot \Delta t}$ zu erhalten.

Die Wärmestromdichte gibt an, wie viel Wärmeleistung der Wärmestrom pro Flächeneinheit transportiert. Für seine SI-Einheitenkombination folgt:

$$[j] = \frac{[Q]}{[A] \cdot [\Delta t]} = \frac{[\Delta E]}{[A] \cdot [\Delta t]} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ein Wert von $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ bedeutet, dass durch jeden Quadratmeter Fläche 5 W Leistung hindurchgehen, also 5 J Wärme pro Sekunde und pro Quadratmeter.

Diese Wärmestromdichte wird besonders bei der Wärmestrahlung wichtig. Z.B. ist die sogenannte **Solarkonstante** $S = 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ eine solche Wärmestromdichte. Sie besagt, dass im Weltall auf der Höhe der Erde jeder gegen die Sonne ausgerichtete Quadratmeter von der Sonnenstrahlung 1361 W Strahlungsleistung abbekommt.

5.3 Konvektion – Wärmetransport durch Verschiebung von Materie

Ein einführendes Beispiel: Im Keller eines Wohnhauses steht ein Heisswasserbehälter. Sobald wir einen Heisswasserhahn öffnen, strömt Wasser aus diesem Behälter durch eine Leitung und es kommt tatsächlich heisses Wasser aus dem Hahn. Dieses Wasser hat seine Temperatur und damit seine innere Energie zum Wasserhahn mitgenommen. Es hat folglich ein Transport von innerer Energie vom Heisswasserbehälter zum Wasserhahn stattgefunden.

Allgemein: Verschiebe ich einen Körper, so nimmt er die in ihm enthaltene innere Energie grundsätzlich mit sich – sonst würde er ja aufgrund der Verschiebung seine Temperatur oder seinen Aggregatzustand wechseln. Bei der Bewegung von Körpern findet ein Transport von innerer Energie von einem Ort A zu einem Ort B statt. Wir bezeichnen dies als **Konvektion**.

Kurze Begriffsverwirrung und -klärung: Der Begriff Wärme mag im Zusammenhang mit der Konvektion etwas irritierend sein, denn Wärme ist per Definition der Übertrag an innerer Energie von einem auf einen anderen Körper (vgl. Abschnitt 2.2). Bei der Konvektion gibt es aber gar keinen zweiten Körper, auf den innere Energie übertragen würde. Es geht um einen einzigen Körper, der bewegt wird. D.h., bei der Konvektion gibt es keine Wärme im strengen Sinne der Begriffsdefinition. Dennoch fassen wir die Konvektion als eine Form des Wärmetransports auf, denn diesen hatten wir zu Beginn des Kapitels ganz allgemein als die **örtliche Verschiebung von innerer Energie** deklariert.

Zurück zum anfänglichen Beispiel: Im Heisswasserbehälter herrscht eine Wassertemperatur von 65°C . Das sind 45°C Unterschied zur Zimmertemperatur, die in diesem Beispiel den Nullpunkt der inneren Energie definiert, weil diese Temperatur resp. Energie überall verfügbar ist. Jeder Liter Heisswasser ($m \approx 1.0\text{ kg}$) beinhaltet gemäss Gleichung (2.3) gegenüber diesem Nullpunkt eine zusätzliche innere Energie von $c \cdot m \cdot \Delta\vartheta = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 1.0\text{ kg} \cdot 45^\circ\text{C} = 188\,000\text{ J}$.

Fliesst pro 10 Sekunden 1.0 Liter Wasser aus dem Hahn, so wird diese Menge an innerer Energie in dieser Zeit aus dem Heisswasserbehälter abtransportiert. Der Behälter gibt somit einen **konvektiven Wärmestrom** ab von:

$$J = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{188\,000\text{ J}}{10\text{ s}} = 18\,800\text{ W} \approx \underline{19\text{ kW}}$$

Hat die Leitung selber eine Querschnittsfläche von 0.785 cm^2 – das entspricht einem Rohrdurchmesser von genau 1.0 cm – so folgt für die Wärmestromdichte in der Leitung:

$$j = \frac{J}{A} = \frac{18\,800\text{ W}}{0.785\text{ cm}^2} = 24\,000 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \approx \underline{24 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}}$$

Ein ganzer Quadratzentimeter Fläche innerhalb dieser Leitung würde also pro Sekunde von 24 kJ innerer Energie passiert. Allerdings ist die Querschnittsfläche der Rohrleitung in diesem Beispiel ja etwas kleiner als 1 cm^2 , sodass der Wärmestrom dieses konvektiven Wärmetransports insgesamt nur 19 kW beträgt.

Handelt es sich bei den Daten zu unserer Heisswasserleitung nun um grosse oder kleine Werte? Zunächst fällt es schwer diese Angaben einzuordnen. Daher ist es angebracht weitere Werte anzugeben und zu vergleichen.

Vergleich mit einem Stromkabel: Ein Stromkabel liefert zwar keine innere, sondern elektrische Energie. Die übertragene Leistung lässt sich trotzdem gut vergleichen. Bezieht ein elektrisches Gerät z.B. eine Leistung (= "Energiestrom") von $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = 1.0\text{ kW}$, so ist dieser Wert immer noch deutlich geringer als derjenige in der Wasserleitung ($J = 18.8\text{ kW}$). Das liegt vor allem daran, dass im heissen Wasser aufgrund der grossen spezifischen Wärmekapazität sehr viel innere Energie gespeichert ist.

Der Draht in einem typischen Stromkabel hat eine Dicke von vielleicht 2.0 mm . Damit ergibt sich im Stromkabel eine Leistungsdichte von $\frac{P}{A} = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = 32 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$ (vgl. $j = 24 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$ bei der Wasserleitung). Auf Ebene der Energiestromdichte sind das elektrische Kabel und die Heisswasserleitung einigermassen miteinander vergleichbar!

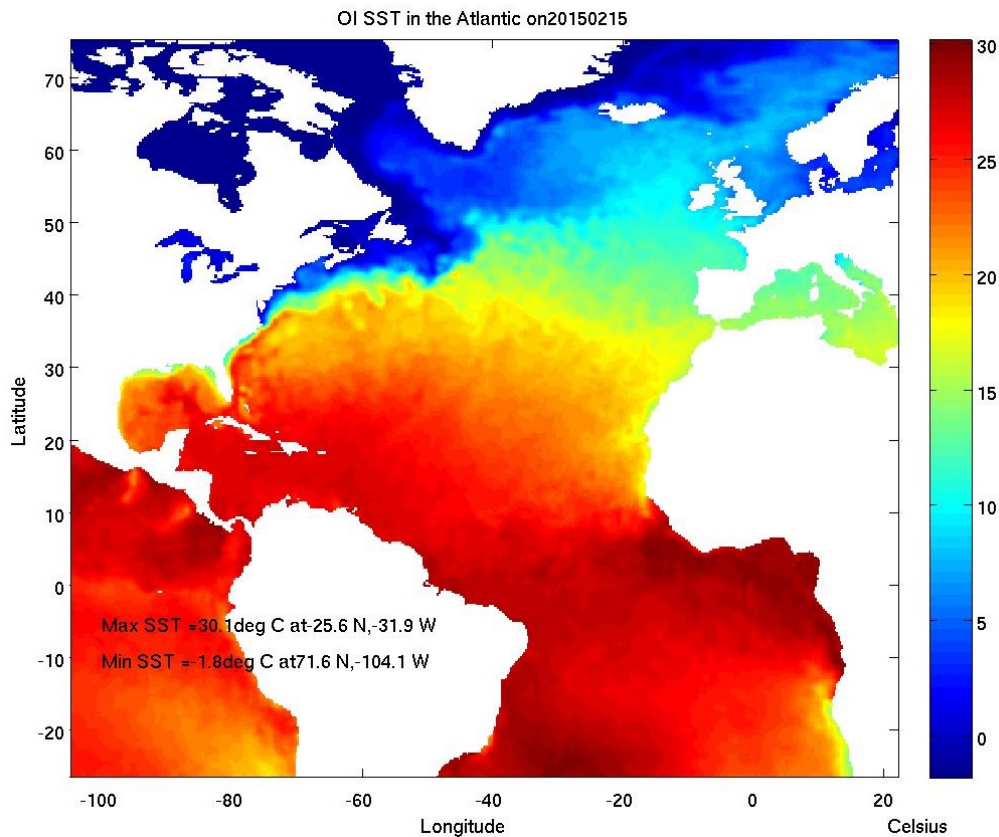


Abbildung 5.4: Der Golfstrom: Das milde Klima Westeuropas und Grossbritanniens basiert massgeblich auf dieser Warmwasseroberflächenströmung.

Vergleich mit dem Golfstrom: Der Golfstrom ist eine Meeresströmung im Atlantik, die warmes Wasser aus der Karibik gegen den Norden Europas führt und damit wesentlich dafür verantwortlich ist, dass z.B. Schottland ein milderes Klima geniesst, als dies aufgrund der geografischen Breite eigentlich der Fall sein müsste.

Der Wärmestrom des Golfstroms lässt sich auf etwa 1.5 PW beziffern.¹ Das entspricht etwa dem 500 000-Fachen der thermischen Leistung des Reaktors im KKW Gösgen – ein gigantischer Wert!

Betrachten wir die Wärmestromdichte des Golfstroms auf der Höhe von Neufundland. Der Golfstrom hat dort eine Breite von etwa 100 km und reicht bis in eine Tiefe von etwa 1 km. Das bedeutet, seine Querschnittsfläche beträgt etwa 100 km². Daraus folgt:

$$j = \frac{J}{A} = \frac{1.5 \text{ PW}}{100 \text{ km}^2} = \frac{1.5 \cdot 10^{15} \text{ W}}{100\,000\,000 \text{ m}^2} = 1.5 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \underline{\underline{1.5 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}}}$$

Die Wärmestromdichte des Golfstroms ist also kleiner als diejenige in einer Heisswasserleitung im Haus ($j = 24 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$). Das ist ja auch nicht überraschend. Für eine natürliche und dermassen riesige Wasserströmung ist der Wert aber dennoch bemerkenswert hoch.

¹1 PW = 1 Petawatt = 10¹⁵ W.

Die thermische Leistung des KKWs Gösgen: Werfen wir zum Vergleich mit einem anderen Wärmestrom mit Wasser noch einen Blick in den Reaktorkreislauf des Kernkraftwerks Gösgen (KKG) (siehe Abb. 5.5). Dort werden bei einem Druck von 154 bar pro Sekunde 16 000 lit. Wasser von 292 °C in den Reaktor gepumpt. Ebenso viel Wasser verlässt den Reaktor, allerdings mit einer Temperatur von 325 °C. Der Wärmestrom aus dem Reaktor beträgt mit diesen Daten 3000 MW. Diesen Wert bezeichnet man als die **thermische Leistung** des Reaktors. Aufgrund der Verluste bei der Energieumwandlung in Turbine, Generator und Transformator können davon hinterher nur etwa 33 % in Form von elektrischer Leistung ins Stromnetz eingespeisen werden. Die **Nettoleistung** des KKGs beträgt also “nur” 1000 MW.

Das Rohr, in dem das Wasser aus dem Reaktor strömt, hat einen Durchmesser von 80 cm, also eine Querschnittsfläche von etwa 5000 cm². Somit beträgt die dortige Wärmestromdichte:

$$j = \frac{J}{A} = \frac{3000 \text{ MW}}{5000 \text{ cm}^2} = 0.6 \frac{\text{MW}}{\text{cm}^2} = \underline{\underline{600 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}}}$$

Das ist nun ein wesentlich grösserer Wert als bei der Heisswasserleitung im Haus ($j = 24 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$) oder beim Golfstrom ($j = 1.5 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$), was bei einem Kernkraftwerk ja nicht sonderlich erstaunt!

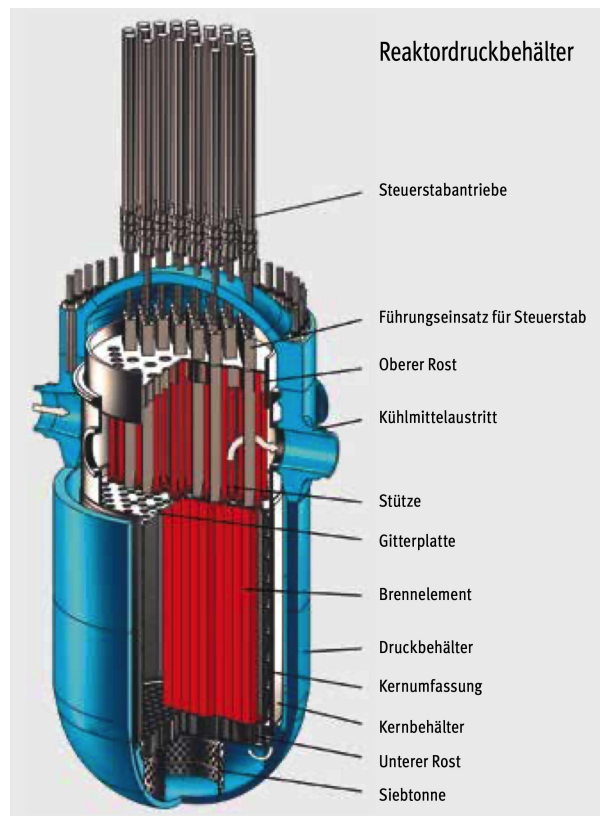


Abbildung 5.5: Das Reaktordruckgefäß des Kernkraftwerks Gösgen. Die Reaktionswärme wird via Kühlmittel (Wasser) aus dem Reaktor herausgeführt und dahinter via Wärmetauscher an den zweiten Kreislauf abgegeben.

5.4 Konvektion als Folge von Temperaturunterschieden

“Warme Luft steigt”: Oberhalb einer Kerze wird die Luft erwärmt. An der Flamme und ev. auch am Rauch können wir sehen, wie diese heisse Luft aufsteigt. Klar: die heisse Luft ist weniger dicht als die kalte in ihrer Umgebung, sodass sie in dieser kälteren Umgebung eine Auftriebskraft erfährt, die grösser als ihre Gewichtskraft ist.

Aufgrund des Temperaturunterschieds zwischen heisser und kalter Luft wird die heisse Luft bewegt. Dabei nimmt sie die in ihr enthaltene innere Energie mit. Die Folge des Temperaturunterschieds ist also eine **Konvektionströmung** – ein Transport von innerer Energie, einfach weil die Materie bewegt wird.

In der Luft gibt es dieses Phänomen auf ganz verschiedenen Grössenordnungen. So findet beispielsweise in einem Zimmer mit Heizung andauernd eine **Luftumwälzung** statt, weil die Luft bei den Heizkörpern (Ofen, Radiator o.Ä.) erwärmt wird (vgl. Abb. 5.6 links). Aber auch in der Natur wird Konvektion auf diese Weise angetrieben. Man spricht dort z.B. von der **Thermik**. Über einem sich gut erwärmenden Landstrich heizt sich auch die Luft in Bodennähe auf und steigt danach in Form eines Aufwindes in die Höhe. Damit können Gleitschirme und Segelflieger ohne Motorisierung trotzdem stundenlang in der Luft bleiben und an geeigneten Orten immer wieder an Höhe gewinnen. An anderen Orten muss es bei der Thermik aber auch Abwinde geben, denn am Boden muss dort, wo die Luft erwärmt wird, seitlich kältere Luft nachrücken. D.h., es muss an einem andern Ort kältere Luft von weiter oben nach unten strömen, sodass sich eine Art Kreislauf bilden kann.

Konvektionsströmung in der Pfanne: Konvektion kann bereits in einer Kochpfanne beobachtet werden (vgl. Abb. 5.6 rechts). Wird der Pfannenboden von der Herdplatte vor allem in der Mitte beheizt, so steigt dort das heissere, weniger dichte Wasser auf. Oben angekommen strömt das Wasser gegen aussen, also gegen den Pfannenrand, wobei es sich ein wenig abkühlt, und schliesslich fliesst es am Pfannenrand entlang gegen unten, um dort dann erneut erwärmt zu werden.

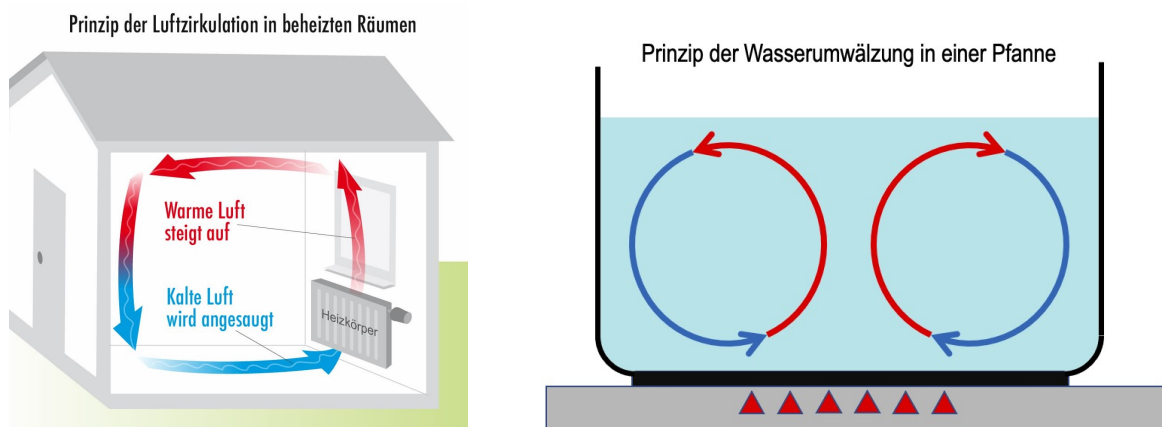


Abbildung 5.6: Beispiele von Konvektionsströmungen aufgrund von Temperaturunterschieden.

Ergänzung zum Namen “Konvektion”: In einigen – eher unphysikalischen – Quellen werden manchmal erst die durch einen Temperaturunterschied hervorgerufenen Materieströmungen als Konvektion bezeichnet. Der Warmluftstrom eines Haarföhns wäre in diesem Sinne keine Konvektion, denn die Bewegung der heissen Luft wird nicht aufgrund des Temperaturunterschieds, sondern aufgrund des Propellers im Föhn hervorgerufen.

Wir wollen uns aber selbstverständlich an das physikalische Verständnis halten. Konvektion ist per Definition die Form des Wärmetransports, bei dem innere Energie bewegt wird, indem sich der Körper bewegt, der diese innere Energie enthält. Die Ursache dieser Bewegung spielt für die Bezeichnung “Konvektion” keine Rolle.

5.5 Wärmeleitung – Wärmetransport durch Materie hindurch

Das mikroskopische Verständnis der Temperatur: Egal, ob ein Körper fest, flüssig oder gasförmig ist: Die Teilchen, die er enthält, sind in ständiger Bewegung.

Die Temperatur eines Körpers ist ein Mass für die mittlere Intensität dieser Bewegung resp. für die mittlere kinetische Energie $\overline{E}_{\text{kin}}$ pro Teilchen.

Im Körper wird Bewegung resp. kinetische Energie automatisch zwischen den Teilchen übertragen, denn es gibt unter ihnen verschiedene Arten von Kräften, die für diese Übertragung sorgen. So kann ich einen Körper zwar an einer Seite erwärmen, aber danach kann ich nicht verhindern, dass sich diese Erhöhung der Temperatur über den Körper verteilt und sich nach kürzerer oder längerer Zeit ein thermisches Gleichgewicht über den Körper hinweg einstellt. Nach hinreichend langem Warten hat der Körper überall dieselbe Temperatur, d.h., alle Teilchen haben im zeitlichen Mittel dieselbe kinetische Energie.

Wärmeleitung: Betrachte ich z.B. einen langen Metallstab, so führt die Erwärmung eines Endes automatisch dazu, dass im Stab Wärme, also eben innere Energie resp. Bewegungsenergie, von Teilchen zu Teilchen weitergegeben wird, sodass im Draht Wärme vom heissen zum kalten Ende geführt wird. Wir sprechen von einer **Wärmeleitung**. Die Temperatur am kalten Ende wird nach und nach zunehmen.

Wärmeleitung gibt es in allen Arten von Stoffen, einfach weil die Teilchen, die den Stoff ausmachen, Kräfte aufeinander ausüben und somit eben kinetische Energie weitergegeben werden kann. Wir nennen dies einen **thermischen Kontakt**.

Dynamisches Gleichgewicht: Auch in einem Körper, der makroskopisch bereits überall die gleiche Temperatur aufweist, wird zwischen den Teilchen kinetische Energie ausgetauscht, aber im Schnitt gleicht sich diese Übergabe immer wieder aus, sodass überall von einer gleich grossen mittleren kinetischen Energie pro Teilchen gesprochen werden kann. Das thermische Gleichgewicht ist also **auf mikroskopischer Ebene dynamisch**, auch wenn es uns makroskopisch als statisch erscheint.

Was beeinflusst, wie schnell die Wärmeleitung abläuft? Sobald ein Körper eine heisere und eine kältere Seite aufweist, wird Wärmeleitung stattfinden, d.h., im Material kommt es zu einem Wärmestrom $J = \frac{Q}{\Delta t}$.

Wovon hängt dieser Wärmestrom ab? Welche Umstände bewirken, dass pro Zeitspanne viel oder wenig Wärme an einer Stelle des Wärmeleiters vorbeikommt? Auf diese Frage gibt es klare und im Experiment gut messbare Antworten. Führen wir uns in Abb. 5.7 zunächst die Situation vor Augen, bei der wir den beobachteten Wärmestrom J in Kürze durch die sogenannte **Wärmeleitungsgleichung** (5.6) beschreiben werden:

- Der Wärmeleiter befinde sich zwischen zwei sogenannten **Wärme- oder Temperaturreservoirs**. Damit meint man einen hinreichend grossen Körper, der sehr viel Wärme aufnehmen oder abgeben kann, ohne dass sich dadurch seine Temperatur merklich verändert. Das Paradebeispiel hierfür wäre z.B. ein See.

In Abb. 5.7 sollen die Wärmereservoirs einfach so gross sein, dass sich über einen nicht allzu langen Zeitraum hinweg die Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 praktisch nicht verändern, sodass die Situation **quasi-statisch** ist, obwohl Wärme via Wärmeleitung vom einen ans andere Reservoir übergeben wird.

- Zwischen den beiden Reservoirs herrscht ein Temperaturunterschied $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$, der als Ursache für den Wärmestrom angesehen werden kann. Messungen zeigen: Der Wärmestrom $J = \frac{Q}{\Delta t}$ ist proportional zu diesem Temperaturunterschied:

$$J \sim \Delta\vartheta \quad (5.3)$$

“Je grösser der Temperaturunterschied, desto grösser der Wärmestrom!”

Das kennen wir bestens aus dem Alltag: An einer heissen Herdplatte verbrennen wir uns genau deshalb die Finger, weil zwischen ihr und unserer Hand ein grosser Temperaturunterschied besteht und deswegen bei direktem physischen Kontakt in kurzer Zeit viel Wärme übertragen wird.

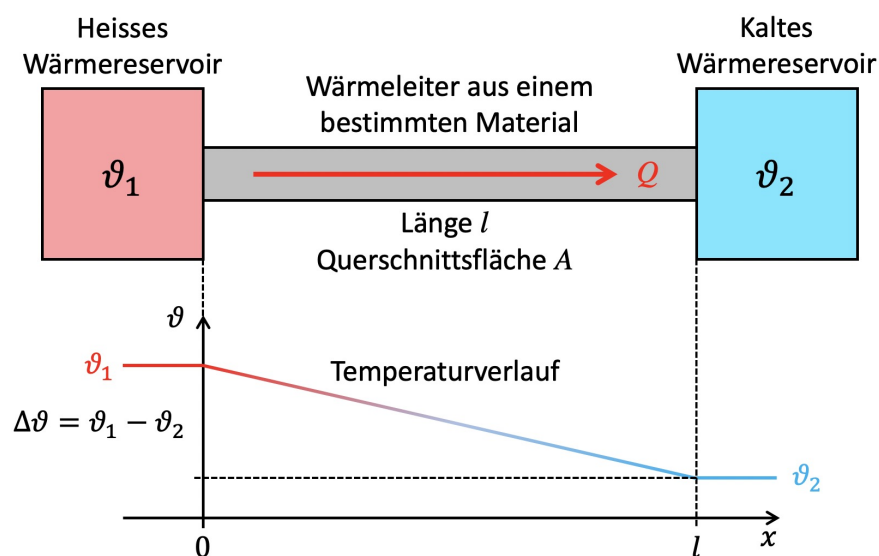


Abbildung 5.7: Wärmeleitung zwischen zwei Temperaturreservoirs.

- Der Wärmeleiter kann umso mehr Wärme pro Zeitspanne übertragen, je grösser seine Querschnittsfläche A ist. Der Wärmestrom ist direkt proportional zu dieser Fläche:

$$J \sim A \quad (5.4)$$

“Je grösser der Leiterquerschnitt, desto grösser der Wärmestrom!”

Diese Proportionalität ist nicht sonderlich erstaunlich: Bringen wir in Gedanken einen zweiten, identischen Leiter zwischen den beiden Reservoirs an, so würden die beiden Leiter zusammen sicher einen genau doppelt so grossen Wärmestrom transportieren wie einer alleine. Andererseits könnte ich diese beiden Leiter aber auch zusammenlegen, sodass sich einfach ein Leiter mit doppelt so grosser Querschnittsfläche ergäbe – und der sollte doch immer noch doppelt so viel Wärmestrom leiten wie der ursprüngliche einzelne Leiter!

- Weiter ist es für den Wärmestrom nicht förderlich, wenn der Leiter eine grosse Länge aufweist. Der Wärmestrom ist umgekehrt proportional zur Leiterlänge l :

$$J \sim \frac{1}{l} \quad (5.5)$$

“Je länger der Wärmeleiter, desto kleiner der Wärmestrom!”

Diesen Zusammenhang werden wir in Kürze besser verstehen, nachdem wir die vollständige Wärmeleitungsgleichung (5.6) gesehen haben.

- Die Gleichungen (5.3), (5.4) und (5.5) können wir nun als eine einzige Proportionalität notieren. Insgesamt gilt für die Wärmeleitung:

$$J \sim \frac{\Delta\vartheta \cdot A}{l}$$

Wie immer lässt sich aus der Proportionalitätsbeziehung durch Einfügen einer **Proportionalitätskonstante** eine Gleichung herstellen. Hier wollen wir die Proportionalitätskonstante mit dem Symbol λ versehen und schreiben:

$$J = \frac{Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{\Delta\vartheta \cdot A}{l}$$

Wie schon in Kapitel 2 oft gesehen, so steht auch hier die Proportionalitätskonstante für eine Materialeigenschaft. λ bezeichnen wir als **Wärmeleitfähigkeit** des Materials. Jeder Stoff besitzt eine bestimmte Wärmeleitfähigkeit λ . Je grösser deren Wert ist, desto besser leitet der Stoff die Wärme. In Tab. B.1 auf Seite 73 sind die Wärmeleitfähigkeiten einiger Stoffe aufgeführt.

Damit haben wir die Wärmeleitung eines Körpers zwischen zwei Temperaturreervoirs quantitativ vollständig erfasst. Oben auf der nächsten Seite findet sich der zugehörige Merkkasten.

Die Wärmeleitungsgleichung

Liegt über einem Wärmeleiter eine Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ an, so wird die Folge davon ein Wärmestrom $\frac{Q}{\Delta t}$ von der höheren zur niedrigeren Temperatur sein. Die Stärke dieses Wärmestroms hängt von der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$, von der Länge l des Leiters (längs des Wärmestroms), von dessen Querschnittsfläche A (senkrecht zum Wärmestrom) und von der Beschaffenheit des Materials ab. Es gilt die sogenannte **Wärmeleitungsgleichung**:

$$J = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{\lambda \cdot \Delta\vartheta \cdot A}{l} \quad (5.6)$$

Dabei bezeichnet λ die **Wärmeleitfähigkeit** des Materials. Sie wird in $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ oder $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot^\circ\text{C}}$ angegeben.

Näheres zur Wärmeleitfähigkeit λ : Die Wärmeleitungsgleichung (5.6) kann als Definition der Wärmeleitfähigkeit λ verstanden werden: Gegeben sei ein Körper aus einem bestimmten Material mit Länge l und Querschnittsfläche A . Etablieren wir über der Länge dieses Körpers die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$, so wird sich nach hinreichender Zeit ein konstanter Wärmestrom $J = \frac{Q}{\Delta t}$ einstellen. Die Wärmeleitfähigkeit λ des Leitermaterials ist dann gegeben durch:

$$\lambda := \frac{J \cdot l}{A \cdot \Delta\vartheta} \quad (5.7)$$

Aus dieser Definitionsgleichung für die Wärmeleitfähigkeit von Materialien lässt sich auch rasch die Einheitenkombination dieser Materialkonstanten bestimmen:

$$[\lambda] = \frac{[J] \cdot [l]}{[A] \cdot [\Delta\vartheta]} = \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Für das Verständnis von λ aufgrund der Einheitenkombination ist der vorletzte Bruch $\frac{\text{W}\cdot\text{m}}{\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}}$ geeignet: Besitzt ein Material z.B. die Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot^\circ\text{C}} = 15 \frac{\text{W}\cdot\text{m}}{\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}}$, so beträgt der Wärmestrom durch einen 1 m langen Leiter pro 1 m² Querschnittsfläche und pro 1 °C Temperaturdifferenz 15 W. Ein halb so langer Leiter führt einen doppelt so grossen Wärmestrom, ein doppelt so langer Leiter nur einen halb so grossen, etc.

Der Temperaturgradient $\Gamma = \frac{\Delta\vartheta}{l}$ längs des Leiters: Wir wollen uns jetzt noch überlegen, weshalb die Länge l des Wärmeleiters den Wärmestrom abschwächt, wie dies die Wärmeleitungsgleichung (5.6) besagt.

Je länger der Leiter ist, desto grösser ist die Distanz, über die hinweg sich die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ verteilt. Im quasi-statischen Zustand hat sich zwischen den beiden Temperaturreservoiren längs des Leiters ein konstantes **Temperaturgefälle** eingestellt. Dieses wird im unteren Teil von Abb. 5.7 in einem l - ϑ -Diagramm dargestellt. Wir bezeichnen es als den **Temperaturgradienten** $\Gamma = \frac{\Delta\vartheta}{l}$ längs des Leiters.

Je länger der Leiter, umso kleiner wird der Temperaturgradient. Über jedem einzelnen Zentimeter des Leiters ist der Temperaturunterschied geringer! So können wir verstehen, weshalb im einzelnen Leiterabschnitten weniger Wärmestrom stattfindet, was folglich auch für den gesamten Leiter gelten muss. Der Temperaturgradient Γ ist als Antrieb des Wärmestroms zu verstehen, sowohl insgesamt, wie auch für Teilstrecken.

Der Wärmedurchgangskoeffizient U : Die Wärmeleitungsgleichung (5.6) beschreibt den Wärmetransport durch ein Material hindurch sehr gut. In der Realität hat man es aber – besonders in der Bauphysik – kaum je mit einem einzelnen Material, sondern mit Verbundstoffen zu tun, die sich aus mehreren Materialkomponenten zusammensetzen. Die Rechnung mit Wärmeleitfähigkeiten wäre deshalb unpraktisch.

Der sogenannte **Wärmedurchgangskoeffizient U** , manchmal auch einfach als **U -Wert** bezeichnet, fasst die Wärmedurchlassfähigkeit eines Bauteils in einer Zahl zusammen. In seiner Definition ist er eng mit der Wärmeleitfähigkeit verknüpft, denn auch damit notieren wir eine Form von Wärmeleitungsgleichung:

$$J = U \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad (5.8)$$

Die Einheit des U -Wertes ergibt sich folglich zu:

$$[U] = \frac{[J]}{[\Delta\vartheta] \cdot [A]} = \frac{\text{W}}{^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2}$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient U eines Bauteils beschreibt demnach, wie viele Watt Wärmestrom pro Quadratmeter Fläche durch ein Bauteil hindurchgehen, wenn darüber 1°C Temperaturdifferenz herrscht. Tab. 5.1 listet die U -Werte einiger Bauteile auf.

Gerade in der Bauphysik sucht man natürlich nach Materialien resp. Kompositionen von Schichten verschiedener Materialien, die einen möglichst geringen U -Wert aufweisen, denn die **Wärmedämmung** resp. **Isolation** eines Hauses ist von zentraler Bedeutung.

Wärmedurchgangskoeffizienten U verschiedener Bauelemente	
Bauelement	$U \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$
30 cm Backsteinmauer, beidseitig verputzt	1.15
Fenster	
Einfachfenster	5.9
Doppelverglasung	2.5
Isolierverglasung	1.1
25 cm Leichtbetonwand mit 15 cm Aussenisolation	0.2
20 cm Massivholzwand	0.5
0.5 cm Plexiglasscheibe	5.3
15 cm + 15 cm Zweischalenmauer mit 10 cm Isolation	0.30

Tabelle 5.1: Wärmedurchgangskoeffizienten einiger Bauelemente.

5.6 Wärmestrahlung – Wärmetransport losgelöst von Materie

Energietransport ohne Materie: Neben der Konvektion, die für den Wärmetransport mit Materie steht, und der Wärmeleitung, bei der die Wärme durch die Materie hindurch transportiert wird, gibt es auch noch eine von der Materie unabhängige Art des Wärmetransports: die **Wärmestrahlung**. Sie funktioniert selbst durch ein Vakuum hindurch. Zwei Körper können innere Energie in Form von Strahlung miteinander austauschen. Körper senden aufgrund ihrer Temperatur elektromagnetische Strahlung aus und können solche Strahlung mehr oder weniger gut auch wieder aufnehmen. Wärmestrahlung ist also **elektromagnetische Strahlung**.



Abbildung 5.8: James Clerk Maxwell (1831 – 1879).

Elektromagnetische Strahlung und elektromagnetisches Spektrum: Die Theorie der **(klassischen) Elektrodynamik** wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879, Abb. 5.8) zum Abschluss gebracht. Sie beschreibt, wie sich eine wellenartige Kombination aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld losgelöst von Materie im Raum ausbreiten kann. Wir sprechen von einer **elektromagnetischen Welle** (kurz: **em-Welle**) resp. von **elektromagnetischer Strahlung (em-Strahlung)**. Ihre Ausbreitung im Raum erfolgt mit **Lichtgeschwindigkeit** ($c \approx 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$).

Die em-Strahlung erhält, je nach **Wellenlänge** λ resp. **Frequenz** f , ganz verschiedene Namen. Abb. 5.9 zeigt das sogenannte **elektromagnetische Spektrum**, in dem sich die verschiedenen Arten von em-Strahlung wiederfinden. Dazu gehört auch das für uns Menschen **sichtbare Licht** (optisches Fenster). Dieses macht aber nur einen relativ kleinen Bereich aus in der ganzen Vielfalt unterschiedlicher Arten von em-Wellen.

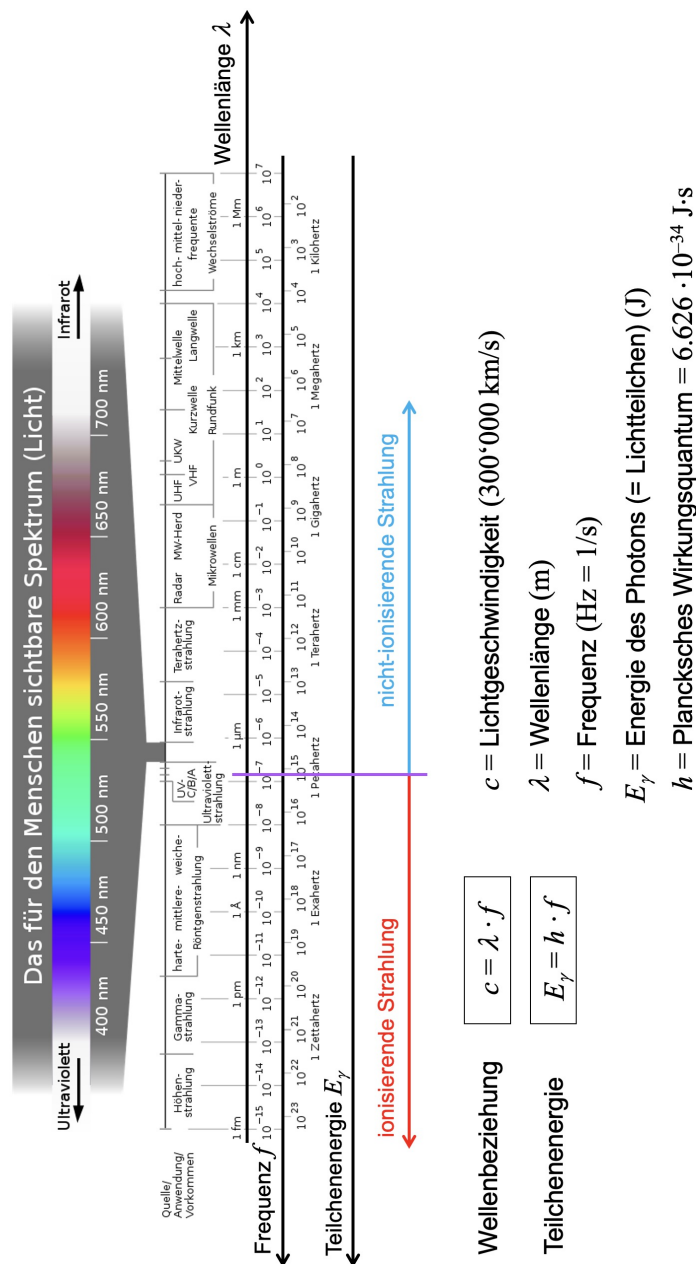


Abbildung 5.9: Das Spektrum elektromagnetischer Strahlungen.

Wärme- resp. Temperaturstrahlung? Im em-Spektrum sucht man vergeblich nach der Temperatur- oder Wärmestrahlung, obwohl es sich auch dabei um em-Wellen handelt. Es ist damit aber eben etwas anderes gemeint als ein bestimmter Wellenlängenbereich. Mit der Temperaturstrahlung bezeichnet man den **“Strahlungsmix”**, den ein Körper aufgrund seiner Temperatur aussendet. Temperaturstrahlung enthält viele verschiedene Frequenzen und Wellenlängen, aber mit einer ganz bestimmten Zusammensetzung.

Welche Wellenlängenbereiche in der Temperaturstrahlung eines Körpers vorkommen, hängt direkt von dessen Temperatur ab. Darauf werden wir im nächsten Kapitel näher eingehen, wenn es um die **Strahlungsgesetze** geht. Grundsätzlich gilt: Je heisser der Körper, desto kürzer sind im Schnitt die Wellenlängen in der ausgesendeten Strahlung. Das einzelne **Photon** (= Strahlungsteilchen) ist im Schnitt hochenergetischer.

Die quantitativen Grössen zur Wärmestrahlung: Sobald Energietransport via Strahlung stattfindet, bezeichnen wir den Energieumsatz pro Zeit, also $\frac{\Delta E}{\Delta t}$, als **Strahlungsleistung** P_S . Bei der Wärmestrahlung sprechen wir demnach nicht mehr vom Wärmestrom J , sondern von der **(Wärme-)Strahlungsleistung** P_S .

Die Energie- oder Wärmestromdichte j wird im Zusammenhang mit Strahlung nun zur **Flächenstrahlungsleistung**, die man auch einfach als **(Strahlungs-)Intensität** bezeichnet und mit dem Symbol I abkürzt.

Strahlungsleistung und Intensität

*Sendet eine Quelle in der Zeitspanne Δt die Energie ΔE in Form von Strahlung aus, so ist ihre **Strahlungsleistung** P_S gegeben durch:*

$$\text{Strahlungsleistung} \quad P_S := \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (5.9)$$

Natürlich kann sich eine solche Strahlungsleistung P_S auch auf eine Stelle beziehen, an der die Strahlung vorbei kommt, oder auf einen Körper, bei dem sie ankommt.

*Kennen wir die Strahlungsenergie ΔE , die pro Zeitspanne Δt eine Fläche A durchquert, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung steht, so ist die **Intensität** I dieser Strahlung gegeben durch:*

$$\text{Strahlungsintensität} \quad I := \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot A} = \frac{P_S \text{ (auf } A)}{A} \quad (5.10)$$

*Die Intensität wird auch als **Flächenstrahlungsleistung** bezeichnet.*

Beispiel Laserstrahl: Der Helium-Neon-Laser unserer physikalischen Sammlung weist nominell eine Strahlungsleistung von 0.5mW (Milliwatt) auf. Das scheint vergleichsweise wenig und effektiv ist es auch ungefährlich die Hand in diesen Laserstrahl zu halten. Betrachten wir aber auch noch die Strahlungsintensität innerhalb dieses Laserstrahls. Der Strahl hat einen relativ kleinen Durchmesser von vielleicht 1.0 mm. Dann beträgt seine Querschnittsfläche 0.79 mm^2 , sodass folgt:

$$I = \frac{P_S \text{ (auf } A)}{A} = \frac{1 \text{ mW}}{0.79 \text{ mm}^2} = 1.3 \frac{\text{mW}}{\text{mm}^2} = 130 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} = \underline{\underline{0.13 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}}}$$

Das ist effektiv ein kleiner Wert, wenn wir ihn mit den Grössenordnungen der konvektiven Wärmeströme, z.B. mit der Heisswasserleitung im Haus vergleichen ($j = 24 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$).

Beispiel Solarkonstante: Als zweiten Referenzwert ziehen wir die **Solarkonstante** S heran. Das ist nichts anderes als die Strahlungsintensität der Sonnenstrahlung im Weltall auf Höhe der Erde. Sie beträgt $S = 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \underline{\underline{0.1361 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}}}$. Damit ist dieser Wert ziemlich vergleichbar mit der Intensität meines Schullasers.

Kapitel 6

Strahlungsgesetze

In diesem Kapitel wollen wir die sogenannten **Strahlungsgesetze** näher beleuchten. Dabei sprechen wir einerseits über Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung allgemein, andererseits geht es im Speziellen um Aussagen über die Temperaturstrahlung, also über den Strahlungsmix, den ein Körper aufgrund seiner Temperatur aussendet.

Diese Zusammenhänge sind von zentraler Bedeutung innerhalb der Physik, aber auch darüber hinaus. Die Überlegungen, die zur Strahlung allgemein und zur Temperaturstrahlung im Speziellen angestellt wurden, haben die theoretische Physik anfangs des 20. Jahrhunderts auf ganz neue und enorm wichtige Wege geführt. So bildete **Max Plancks** Vortrag zur Erklärung der Wellenlängenzusammensetzung der Temperaturstrahlung eines **schwarzen Körpers** im Jahre 1900 den Startschuss zur Entwicklung eines modernen Verständnisses der Funktionsweise kleiner Teilchen, das wir heute als **Quantenmechanik** bezeichnen.¹

Wir wollen in diesem Kapitel aber vor allem erfahren, wie Strahlung mit Materie interagiert, wie sich die Temperaturstrahlung eines Körpers zusammensetzt und wie der quantitative Zusammenhang zur Strahlungsleistung hergestellt wird.

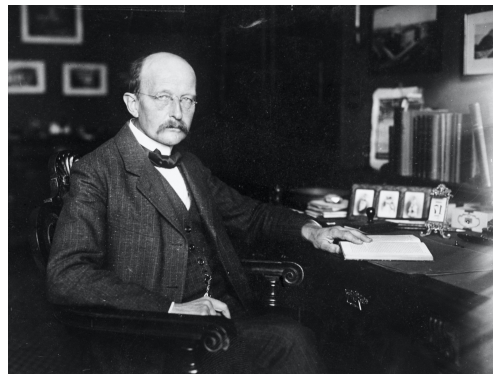


Abbildung 6.1: Max Planck (1858 – 1947).

¹Die Bedeutung der Quantenmechanik ist kaum zu überschätzen. Mit ihr lässt sich die ganze Chemie auf eine theoretische, physikalische Basis stellen, denn die Quantenmechanik erklärt, wie Atome, also positiv geladene Atomkerne und negative geladene Elektronen, die sich um sie ansammeln, funktionieren. So kann die Physik chemische Bindungen und all die Eigenschaften erklären, die wir bei verschiedenen Stoffen beobachten. Weiter hat uns die Quantenmechanik erlaubt eine moderne Elektronik zu entwickeln, auf der die gesamte heutige IT basiert. Computer oder Händys, wie wir sie kennen und als selbstverständlich erachten, gibt es nur dank der Entdeckung resp. der Entwicklung der Quantenphysik.

6.1 Lernziele Kapitel 6

- Ich kenne die in Abschnitt 6.2 vorgestellten Möglichkeiten, wie Materie mit Strahlung wechselwirken kann. Zu **Emission, Absorption, Transmission, Reflexion** und **Streuung** vermag ich verschiedene Beispiele anzuführen und daran zu erläutern, worum es bei diesen Wechselwirkungen geht.
- Das Konzept des **schwarzen Körpers** ist mir vertraut. Ich kann erklären, weshalb es für die Strahlungsphysik von Interesse ist Objekte zu betrachten, die sämtliche einfallende Strahlung zu absorbieren vermögen. Zudem verstehe ich, weshalb ein **Hohlraum** mit kleiner Öffnung die beinahe perfekte reale Umsetzung eines schwarzen Körpers darstellt.
- Ich vermag den Verlauf der **spektralen Intensität** $I_T(\lambda)$ eines schwarzen Temperaturstrahlers in Abb. 6.3 zu erläutern. Dazu gehört die Erklärung der Achsen dieses Diagramms (inkl. Einheiten), der qualitative Zusammenhang zwischen Temperatur T und Wellenlänge maximaler Intensität λ_{\max} (**Wiensches Verschiebungsgesetz**), sowie die Bedeutung der Fläche unter der Kurve in diesem Diagramm als Gesamtintensität der ausgesendeten Strahlung (**Stefan-Boltzmann-Gesetz**). Ich weiss, dass diese Kurve der spektralen Intensität durch das **Plancksche Strahlungsgesetz** (6.1) gegeben ist.
- Anhand Abb. 6.3 kann ich erläutern, weshalb bei einem Temperaturstrahler immer mehr **kurzwelligere Strahlung** hinzukommt, wenn die Temperatur erhöht wird.
- Ich kenne das **Wiensche Verschiebungsgesetz** als den quantitativen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge maximaler Intensität λ_{\max} und der Temperatur T eines Temperaturstrahlers und habe verstanden, dass bei einem heisseren Körper im Schnitt mehr kurzwellige Strahlung im Emissionsspektrum enthalten ist.
- Ich weiss, dass die totale Strahlungsleistung eines Temperaturstrahlers stark von der Temperatur des Körpers abhängt. Beim schwarzen Körper ist P_S proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur T und es gilt das **Stefan-Boltzmann-Gesetz** (6.3).
- Ich kann erklären, was man unter einem **grauen Körper** versteht, nämlich ein Objekt, das nur einen bestimmten Prozentsatz der einfallenden Strahlung aufnimmt.
Auf dem Vergleich zwischen dem grauen und einem gleich grossen und gleich heissen schwarzen Körper fassen die Definitionen des **Absorptionskoeffizienten** α und des **Emissionskoeffizienten** ε .
- Gemäss dem **Kirchhoffschen Strahlungsgesetz** sind der Absorptions- und der Emissionskoeffizient beliebiger Körper in der Regel etwa gleich. Ich habe also verstanden, dass gute Absorber typischerweise auch gute Emittier sind!
- Ich kenne das durch (6.7) gegebene **Abstandsgesetz** für die Abnahme der Strahlungsintensität bei punktförmigen Strahlern und kann Beispiele anführen, wo dieses zur Anwendung kommt.
- Die **Albedo** eines Körpers oder einer Oberfläche verstehe ich als das Verhältnis aus reflektierter zu einfallender Strahlungsleistung. Ich weiss, dass die Albedo insbesondere bei den Oberflächen von Planeten und Monden zur Anwendung kommt.

6.2 Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie

Stoffe können mit elektromagnetischer Strahlung interagieren – das muss ja so sein, denn wie sonst könnten wir z.B. sehen?! Beim Sehen muss das Licht, das in unseren Augen ankommt, physikalisch etwas in unseren Augen auslösen. Die Strahlung muss erstmal “bemerkt” werden, damit unser Hirn aus dieser Information dann ein Bild der Welt erzeugen kann.

Wir unterscheiden bei der Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung verschiedene Arten. Die im Folgenden beschriebenen fünf solchen Interaktionsarten prägen unseren Alltag und decken auch in der Physik eine Vielzahl von Phänomenen ab.

Emission: Überall dort, wo elektromagnetische Strahlung ausgesendet wird, sprechen wir von **Emission**. Eine Lampe **emittiert** sichtbares Licht, der menschliche Körper emittiert unsichtbare Temperaturstrahlung, etc.

Bei der Emission verliert der aussendende Körper zwangsläufig Energie, denn Strahlung beinhaltet ja Energie – sie ist eine Form von Energie!

Absorption: Umgekehrt kann ein Körper Strahlung aufnehmen. Dies wird als **Absorption** bezeichnet. Dabei nimmt der absorbierende Körper Energie auf.

Das beste Beispiel für die Strahlungsabsorption erleben wir an einem sonnigen Tag, wenn wir mit einem schwarzen Pullover in den Sonnenschein stehen. Der schwarze Pullover **absorbiert** die Strahlung sehr gut und so wird mir darin sehr rasch heiss.

Transmission: Manche Materialien lassen Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich einfach passieren. Glas ist z.B. **transparent** im optischen Bereich, d.h., es ist fast komplett durchlässig für Wellenlängen im sichtbaren Bereich. Dieses Hindurchgehen der Strahlung durch Materie bezeichnen wir als **Transmission**.

Luft ist für viele Wellenlängen transparent – für manche aber auch nicht! Im Übrigen ist Glas nicht einfach für alle Strahlungsarten transparent. So sind wir beispielsweise hinter einer Glasscheibe vor Sonnenbrand geschützt, weil die Ultraviolett Komponente des Sonnenlichts, die diesen Sonnenbrand hervorrufen würde, das Glas nicht durchdringt.

Reflexion: Trifft em-Strahlung auf die Grenzfläche zweier Medien, so kann sie in aller Regel nicht vollständig ins neue Medium eintreten. Ein Teil wird zurückgeworfen. Wir sprechen von **Reflexion**. Spiegel sind Objekte, bei denen die Reflexion besonders gut funktioniert.

Streuung: Elektromagnetische Strahlung kann an Objekten auch einfach **gestreut**, also in verschiedene Richtungen abgelenkt werden.

Unsere optische Wahrnehmung basiert auf dieser Lichtstreuung: Im Zimmer emittiert eine Lampe Licht in alle möglichen Richtungen. Dieses wird von einem Gegenstand wiederum in alle möglichen Richtungen gestreut, sodass von dort Licht in mein Auge gelangt, egal wo ich im Zimmer stehe. Im Licht der Lampe das Zimmer zu sehen bedeutet also, Streulicht von allen Gegenständen darin zu empfangen. Natürlich spielen dabei auch Absorption und Reflexion eine Rolle. Ein grüner Gegenstand streut z.B. das grüne Licht gut, währenddem er andere Wellenlängen gut absorbiert, etc.

Transmission, Reflexion und Streuung von elektromagnetischer Strahlung verändern die Ausbreitungsrichtung des Lichts, stehen also für Ablenkungen. Bei Emission und Absorption geht es hingegen um die Erzeugung oder Vernichtung der Strahlung durch Materie. Die Materie gibt Energie ab oder nimmt sie auf.

6.3 Das theoretische Konzept des schwarzen Körpers

Die Theorie der **Elektrodynamik** und damit des Verhaltens elektromagnetischer Strahlung wurde im Laufe des 19. Jahrhunderts durch Physikerinnen und Physiker erforscht und entwickelt und durch **Maxwell** bis 1870 zu einem vorläufigen Abschluss gebracht wurde. 1886 wurde diese ganze Theorie durch **Hertz** experimentell untermauert, denn er konnte aufgrund der Gesetze der Elektrodynamik gezielt elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Frequenz (Radar) aussenden und andernorts wieder empfangen.

Damit war aber auch klar, dass es im Zusammenhang mit dieser Strahlung noch viel herauszufinden gab. Während in Hertz' Sendeantenne ein ständiger Wechselstrom für die Emission verantwortlich war, verstand man überhaupt nicht, wie genau die Aussendung der Strahlung bei einem warmen Körper funktioniert. Man konnte diese Strahlung zwar beobachten und ausmessen, aber es gab keine Theorie, die die Zusammensetzung solcher **Temperaturstrahlung** gut und vor allem vollständig erklärt hätte. Den führenden Wissenschaftlern war aber klar, dass in der weiteren experimentellen und vor allem theoretischen Behandlung von Emission und Absorption von Strahlung der Schlüssel zu einem tieferen Verständnis des Aufbaus von Materie an sich lag. Was sendet denn da genau Strahlung aus oder empfängt sie? Wie hängt das mit der Temperatur zusammen? Welche Rolle spielt das Material? Wie wird Energie in der Materie gespeichert? Etc.

Ganz am Ende des 19. Jahrhunderts stellten sich in diesem Zusammenhang viele Theoretiker die Frage, welche **Emissionseigenschaften** denn ein Körper aufweist, der sämtliche einfallende em-Strahlung (alle möglichen Wellenlängen) aufzunehmen, also zu absorbieren vermag. Ein solcher Körper wurde sinngemäss als **schwarzer Körper** bezeichnet, denn ein realer Körper, der uns schwarz erscheint, hat ja zumindest im optischen Wellenlängenbereich die Eigenschaft praktisch alle Strahlung aufzunehmen, die auf ihn trifft.

Definition des schwarzen Körpers

*Ein **schwarzer Körper** ist ein Objekt, das sämtliche einfallende elektromagnetische Strahlung absorbiert.*

Der schwarze Körper ist somit eine theoretische Idealvorstellung für ein bestimmtes Absorptionsverhalten von Materie. Wie sich zeigt, hängt damit dann auch ein idealisiertes Emissionsverhalten zusammen.

Zunächst mag das verwirren: Weshalb stellte man eine Forderung an das Absorptionsverhalten eines Objektes, wo man doch Aussagen über seine Emissionseigenschaften machen wollte? Diese Frage kann aber sehr rasch und verständlich beantwortet werden: Bei einem Körper, der sämtliche eintreffende Strahlung einfach absorbiert, wird die Zusammensetzung der emittierten Strahlung nicht durch Reflexions- oder Streueigenschaften verfälscht. Sie muss folglich einzig vom inneren Zustand des Körpers, also von seiner Temperatur abhängen.

Die Zusammensetzung der von einem schwarzen Körper emittierten Strahlung hängt ausschliesslich von dessen Temperatur ab.

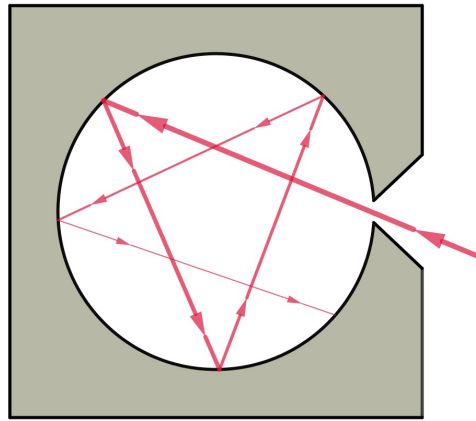


Abbildung 6.2: Der Hohlraum – die beste Realisierung des schwarzen Körpers.

Der Hohlraum – die Realisierung eines schwarzen Körpers

Die beste Realisierung eines schwarzen Körpers besteht in einem **Hohlraum**, der eine kleine Öffnung hat, durch die Strahlung einfallen und austreten kann (vgl. Abb. 6.2).

Im Inneren des Würfels wird die Strahlung von den Wänden andauernd reflektiert, gestreut und insbesondere auch absorbiert und wieder emittiert, sodass sie mit diesen im thermischen Gleichgewicht steht. D.h., die aus der Öffnung austretende und somit vom Hohlraum emittierte Strahlung hängt nicht mehr von der einfallenden Strahlung ab. Vielmehr ist sie charakteristisch für die Temperatur der Wände im Innern des Hohlraums. Die von einem schwarzen Körper emittierte Strahlung wird deshalb nicht nur als **Schwarzkörper-**, sondern auch als **Hohlraumstrahlung** bezeichnet.

6.4 Die spektrale Intensität der Schwarzkörperstrahlung

Da sich die Temperatur der Wände eines Hohlraums durch Heizung oder Kühlung steuern lässt, kann man damit die Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Temperaturen untersuchen. Dabei stellt man fest, dass diese Strahlung einen kontinuierlichen Wellenlängenmix enthält, der sich bei Erhöhung der Temperatur im Schnitt zu kürzeren Wellenlängen resp. höheren Frequenzen verschiebt.

Abb. 6.3 zeigt diesen Strahlungsmix für verschiedene absolute Temperaturen T . Die Kurven beschreiben für jede Temperatur die sogenannte **spektrale Intensität** I_T in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ . Das will gut verstanden sein. Hier die Erläuterung:

- Auf der horizontalen Achse sind die Wellenlängen λ in Nanometern (nm) aufgetragen. D.h., hier ist das elektromagnetische Spektrum aus Abb. 5.9 wiedergegeben. Gegen links gehen wir zu kürzeren Wellenlängen, also zu höheren Frequenzen und somit hoch-energetischeren Photonen (= Strahlungsteilchen), gegen rechts wird es langwelliger, niederfrequenter resp. niederenergetischer.

Extra mit den entsprechenden Farben gekennzeichnet ist der Bereich des **sichtbaren Lichts** mit den **Spektralfarben** von violett (380 nm) links bis rot (750 nm) rechts. Links dieses Bereichs findet sich die **Ultraviolettstrahlung** (UV) und rechts davon die **Infrarotstrahlung** (IR).

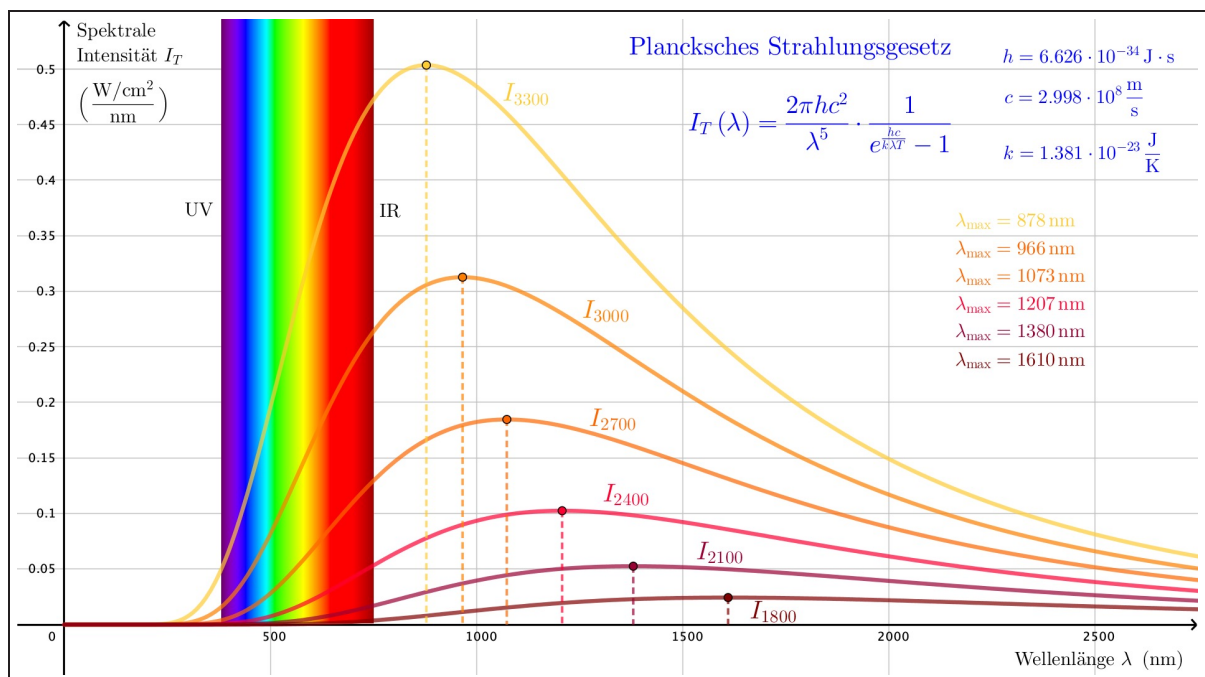


Abbildung 6.3: Die Verteilung der spektralen Intensität $I_T(\lambda)$ der Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen absoluten Temperaturen T .

- Über jeder Wellenlänge wird vertikal die zugehörige spektrale Intensität $I_T(\lambda)$ in $\frac{\text{W/cm}^2}{\text{nm}}$ abgetragen.

Betrachten wir dazu ein Beispiel aus Abb. 6.3. Die Kurve I_{2700} , die zur absoluten Temperatur $T = 2700 \text{ K}$ gehört, passiert über $\lambda = 1500 \text{ nm}$ gerade etwa den Wert $I_T(1500 \text{ nm}) \approx 0.15 \frac{\text{W/cm}^2}{\text{nm}}$. Das bedeutet, dass ein schwarzer Körper von 2700 K Temperatur im Wellenlängenbereich zwischen 1500 nm und 1501 nm eine Strahlungsintensität von knapp $0.15 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ emittiert. Der Wert gibt also die Strahlungsintensität pro Nanometerabschnitt auf der Wellenlängenachse an.

Im Prinzip kann man von den Stellen 1500 nm und 1501 nm auf der Wellenlängenachse λ je eine vertikale Linie bis zum Graphen nach oben ziehen. Die Fläche, die durch diese beiden Linien links und rechts, die λ -Achse unten und den Graphen oben eingegrenzt wird, steht für die in diesem Wellenlängenabschnitt ausgesendete Strahlungsintensität. Im Beispiel oben beträgt sie, wie gesagt, $0.15 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$.

- Die ganze Fläche unter einer solchen Kurve steht für die Gesamtintensität I der Schwarzkörperstrahlung bei der jeweiligen Temperatur. Die Strahlung eines heißeren Körpers weist insgesamt ganz offensichtlich die höhere Intensität auf als jene eines kälteren. Darauf werden wir im Abschnitt 6.6 näher eingehen.
- Wir bemerken, dass es bei jeder Temperatur T eine Wellenlänge λ_{max} gibt, bei der die spektrale Intensität I_T am grössten ist. Dieser Wert verschiebt sich bei Erhöhung der Temperatur zu immer kleineren Werten. Tatsächlich erlaubt dieser Zusammenhang den Rückschluss auf die Temperatur des Strahlers, wenn wir wissen, wo λ_{max} liegt. Dazu mehr im Abschnitt 6.5.

- Weiter fällt uns auf, dass bei einer Temperatur von 1800 K ($\approx 1527^\circ\text{C}$) nur verhältnismässig wenig Intensität im Bereich sichtbarer Wellenlängen vorhanden ist. Ein Körper dieser Temperatur glüht in leicht rötlichem Orange.

Steigern wir die Temperatur, so kommen immer mehr kurzwelligere Spektralfarben hinzu. In unserer Wahrnehmung wird der Strahler immer weisser. Die höchste in Abb. 6.3 enthaltene Temperatur beträgt 3300 K ($\approx 3027^\circ\text{C}$). Das entspricht etwa der Temperatur des Glühdrahts einer 100 W-Glühbirne, deren Licht uns bereits sehr weiss erscheint, weil es effektiv alle Spektralfarben enthält.

Würden wir die Temperatur noch weiter erhöhen, so wird der Lichteindruck zunächst noch weisser, bis er bei weiterer Temperatursteigerung langsam ins Bläuliche geht.

Man erkennt weiter, dass etwa ab 2700 K ($\approx 2427^\circ\text{C}$) Wellenlängen im UV-Bereich auftreten. Bei z.B. 5800 K ($\approx 5527^\circ\text{C}$) wären noch kurzwelligere Ultraviolett Komponenten dabei, die bei uns Menschen Sonnenbrand hervorrufen können. Die Sonnenoberfläche, von wo die Sonnenstrahlung emittiert wird, weist ungefähr diese Temperatur auf.

Frage: Woher kommen eigentlich diese Kurven der spektralen Intensität $I_T(\lambda)$ bei verschiedenen Temperaturen T ? Woher weiss man das?

Antwort: Die Zusammensetzung der Hohlraumstrahlung wurde Ende des 19. Jahrhunderts experimentell erforscht. Es war die Zeit, in der die **Photometrie**, also die energetische Ausmessung von Licht entwickelt wurde. Die Messkurve wurde zunächst aber nicht gut verstanden. Erst **Max Planck** legte im Jahr 1900 eine Theorie vor, die sich sehr genau mit den Daten deckte. Er vermochte den Verlauf der spektralen Intensität $I_T(\lambda)$ durch eine Formel auszudrücken, die heute als **Plancksches Strahlungsgesetz** bekannt ist.

Das Plancksche Strahlungsgesetz

*Ein schwarzer Körper der absoluten Temperatur T weist ein wohldefiniertes Emissionsspektrum auf, dessen spektrale Intensität $I_T(\lambda)$ durch das **Plancksche Strahlungsgesetz** gegeben ist:*

$$I_T(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad (6.1)$$

Darin sind h , c und k die folgenden physikalischen Konstanten:

h = Plancksches Wirkungsquantum = $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = $2.998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

k = Boltzmann-Konstante = $1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

Planck musste allerdings eingestehen, dass er zwar auf das richtige Resultat kam, dabei aber gewisse Schritte in seiner Herleitung nicht befriedigend begründen konnte. Heute verstehen wir das besser, denn Planck verwendete Gesetzmässigkeiten einer neuen, damals noch zu entdeckenden Physik namens **Quantenmechanik**. Sie beschreibt z.B., welche Energiezustände die Teilchen in einem Körper einnehmen können – ein essentielles Wissen für das Verständnis des Strahlungsmixes, der von diesen Teilchen bei einer bestimmten mittleren kinetischen Energie ($\hat{=}$ Temperatur) ausgesendet wird!

6.5 Das Wiensche Verschiebungsgesetz

Wir haben gesehen, dass sich bei der Schwarzkörperstrahlung die Wellenlänge maximaler Strahlintensität λ_{\max} mit zunehmender Temperatur T immer weiter zu kleineren Werten verschiebt. Dieser Zusammenhang wurde bereits 1896 vom deutschen Physiker **Wilhelm Wien** (1864 – 1928) aufgrund der experimentellen Daten wie folgt formuliert.

Das Wiensche Verschiebungsgesetz

Das Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers der absoluten Temperatur T weist bei einer bestimmten Wellenlänge λ_{\max} seine höchste Intensität $I_T(\lambda)$ auf. Dabei gilt:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} \quad (6.2)$$

“Die Wellenlänge maximaler Intensität verschiebt sich mit steigender Temperatur zu immer kleineren Werten.”

Anmerkungen zum Wienschen Verschiebungsgesetz

- Da sich das Spektrum vieler realer Temperaturstrahler in seinem Verlauf nicht von demjenigen eines schwarzen Körpers unterscheidet, lässt sich durch Spektralanalyse und durch Anwendung des Wienschen Verschiebungsgesetzes sehr einfach auf die Temperatur des Strahlers schliessen.

Ein ganz typisches Anwendungsbeispiel hierfür ist die Bestimmung der Oberflächentemperatur von Sternen, deren Emissionseigenschaft fast komplett mit derjenigen eines schwarzen Strahlers übereinstimmen (eine Sternoberfläche absorbiert ankommende Strahlung praktisch zu 100 %).

Beispiel: Das Spektrum des Sonnenlichts hat sein Intensitätsmaximum bei einer Wellenlänge von $\lambda_{\max} \approx 500 \text{ nm}$ ($= 0.50 \mu\text{m}$). Daraus folgt:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\max}} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{0.50 \mu\text{m}} = 5800 \text{ K}$$

Damit weist die Sonne also eine Oberflächentemperatur von etwa 5500°C auf.

- Der im Verschiebungsgesetz (6.2) enthaltene Wert von $\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ wurde von Wien empirisch, also durch Analyse der Messdaten bestimmt. Natürlich muss er sich aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ergeben und mit den dortigen Konstanten h , c und k zusammenhängen. Mit entsprechender Mathematik² leitet man her:

$$\lambda_{\max} \cdot T \approx \frac{hc}{4.965k} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2.998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4.965 \cdot 1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}} = 0.002898 \text{ m} \cdot \text{K} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

²Dazu muss die Ableitung der Funktion $I_T(\lambda)$ gebildet und anschliessend gleich 0 gesetzt werden, um einen Ausdruck für λ_{\max} in Abhängigkeit von der Temperatur T zu bestimmen.

6.6 Das Stefan-Boltzmann-Gesetz

Die gesamte von einem schwarzen Körper emittierte Strahlungsleistung P_S hängt ganz wesentlich von dessen Temperatur T ab. Bei Untersuchungen zur Lichtausbeute von Lichtquellen entdeckte der österreichische Physiker **Josef Stefan** (1835 – 1893) im Jahre 1879 einen Zusammenhang, der von dem deutschen Physiker **Ludwig Boltzmann** (1844 – 1906) theoretisch begründet wurde und deshalb als **Stefan-Boltzmann-Gesetz** bezeichnet wird.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz

Die gesamte von einem schwarzen Körper emittierte Strahlungsleistung P_S hängt von der Grösse seiner Oberfläche A und von seiner absoluten Temperatur T ab. Es gilt:

$$P_S = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (6.3)$$

*Dabei steht σ für die sogenannte **Stefan-Boltzmann-Konstante** mit einem Wert von:*

$$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

“Die ausgesendete Strahlungsleistung hängt sehr stark (T^4) von der absoluten Temperatur des Strahlers ab.”

Anmerkungen zum Stefan-Boltzmann-Gesetz

- Man kann fast nicht genug darauf hinweisen, wie stark die im Stefan-Boltzmann-Gesetz enthaltene Temperaturabhängigkeit ist (Veranschaulichung in Abb. 6.4 auf der nächsten Seite). Eine vierte Potenz – das ist sozusagen einmalig in einem fundamentalen Naturgesetz! Als Folge davon führen bereits geringe Temperaturunterschiede eines Körpers zu grossen Änderungen in der abgestrahlten Leistung. Eine Verdoppelung der absoluten Temperatur hat eine Versechzehnfachung der Strahlungsleistung zur Folge. Umgekehrt muss man die absolute Temperatur T nur um den Faktor $\sqrt[4]{2} \approx 1.189$ vergrössern, um eine Verdoppelung der Strahlungsleistung zu erhalten.
- Auch die im Stefan-Boltzmann-Gesetz enthaltene Konstante σ war zunächst ein von Stefan empirisch bestimmter Wert. Da aber die Gesamtintensität $I_{\text{total}} = \frac{P_S}{A}$ der von einem schwarzen Körper emittierten Strahlung der Fläche unter dem Graphen im Diagramm der spektralen Intensität $I_T(\lambda)$ entspricht (Abb. 6.3), konnte Planck sofort zeigen, dass das Stefan-Boltzmann-Gesetz im Planckschen Strahlungsgesetz enthalten ist. Für die Stefan-Boltzmann-Konstante findet man:³

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = \frac{2\pi^5 \cdot (1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}})^4}{15 \cdot (6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})^3 \cdot (2.998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = 5.670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

³Hier muss mit einer mathematischen Technik namens **Integralrechnung** die Fläche unter dem Graphen von $I_T(\lambda)$ bestimmt werden.

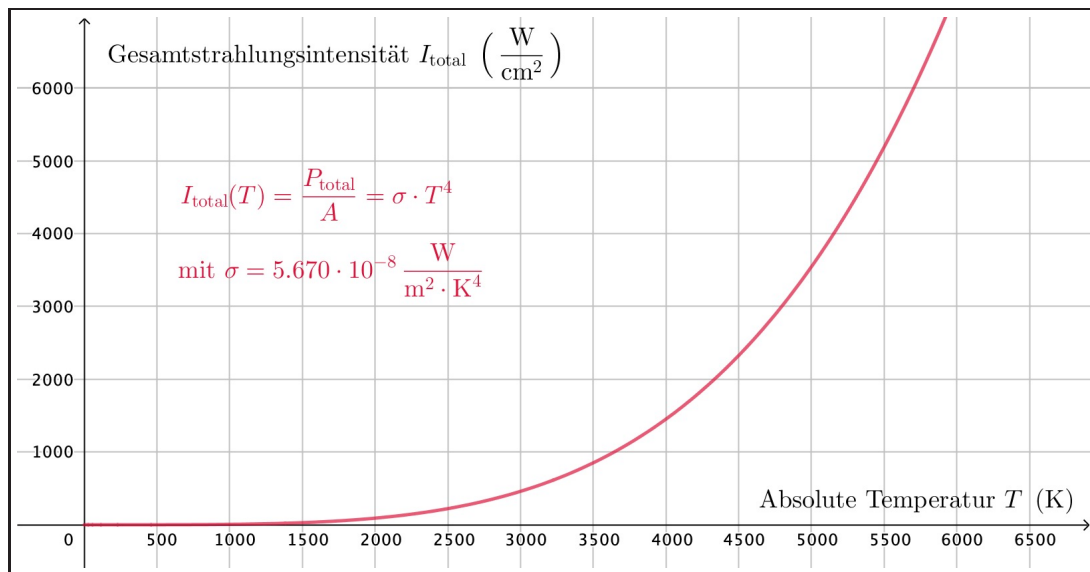


Abbildung 6.4: Das Stefan-Boltzmann-Gesetz grafisch. Die Kurve für die ausgesendete Flächenstrahlungsleistung I_{total} verläuft mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur T !

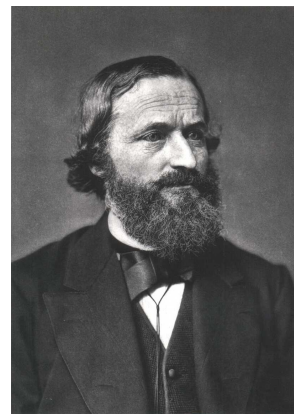
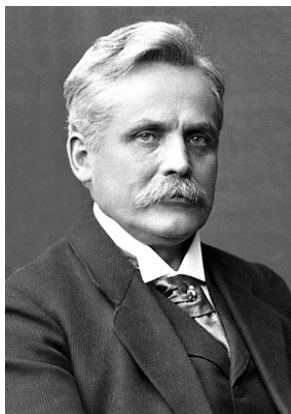


Abbildung 6.5: Oben: Wilhelm Wien (1864 – 1928), Josef Stefan (1835 – 1893) und Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887). Unten: Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) und ein Besuch an seinem Grab auf dem Wiener Zentralfriedhof (Herbst 2019).

6.7 Graue Körper – reale Temperaturstrahler

Bisher haben wir Aussagen über schwarze Körper gemacht. In der Realität ist aber kein Körper vollständig schwarz, im Gegenteil! Eher wenige Körper absorbieren Strahlung beliebiger Wellenlängen zu annähernd 100 %. Es gibt zudem Reflexion und Streuung, und im Falle von Absorption kann diese auch selektiv, also für verschiedene Wellenlängen unterschiedlich gross sein. Manchmal ist es auch so, dass sich ein Objekt einfach in einem bestimmten Wellenlängenbereich wie ein schwarzer Körper verhält.

Dennoch lassen sich viele Objekte gut mit einem schwarzen Körper vergleichen. Sie absorbieren nicht ganz so vollständig wie ein schwarzer Körper, aber diese reduzierte Absorption ist dafür wieder über praktisch alle Wellenlängenbereiche hinweg gleich. Wir sprechen von einem **grauen Körper**. Zu dessen Beschreibung definiert man einen **Absorptionskoeffizienten** α und einen **Emissionskoeffizienten** ε .

Definition von Absorptions- und Emissionskoeffizient

Ist $P_{S,\text{total}}$ die gesamte auf einen grauen Körper einfallende Strahlungsleistung und $P_{S,\text{absorbiert}}$ die von diesem absorbierte Strahlungsleistung, so ist der **Absorptionskoeffizient** α des Körpers gegeben durch:

$$\alpha := \frac{P_{S,\text{absorbiert}}}{P_{S,\text{total}}} \quad (6.4)$$

Emittiert der graue Körper die Strahlungsleistung $P_{S,\text{emittiert}}$ und würde ein gleich grosser schwarzer Körper derselben Temperatur die Strahlungsleistung $P_{S,\text{schwarz}}$ aussenden, so ist der **Emissionskoeffizient** ε des grauen Körpers gegeben durch:

$$\varepsilon := \frac{P_{S,\text{emittiert}}}{P_{S,\text{schwarz}}} \quad (6.5)$$

Der Absorptionskoeffizient α beschreibt also, welcher Anteil der ankommenden Strahlung vom grauen Körper absorbiert wird, während der Emissionskoeffizient ε angibt, wie gut der graue Körper im Vergleich mit dem schwarzen Körper Strahlung aussendet.

Für schwarze Körper ist der Absorptions- und der Emissionskoeffizient offensichtlich je gleich 1, denn es wird sämtliche einfallende Strahlung absorbiert ($\alpha = 1$) und die emittierte Leistung ist ja eben diejenige eines schwarzen Körpers ($\varepsilon = 1$).

Interessant ist nun aber vor allem das oben auf der nächsten Seite vorgestellte Kirchhoffsche Strahlungsgesetz, das die Verwandtschaft zwischen Absorptions- und Emissionseigenschaften von Körpern erklärt.

Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz

Das Verhältnis aus Absorptionskoeffizient α und Emissionskoeffizient ε ist in aller Regel unabhängig von der Art des Strahlers:

$$\frac{\alpha}{\varepsilon} \approx \text{konstant für alle Strahler}$$

Da die Aussage auch für schwarze Körper mit $\alpha = \varepsilon = 1$ gilt, muss somit allgemein gelten:

$$\alpha \approx \varepsilon \quad \text{für alle Strahler} \quad (6.6)$$

“Gute Absorber sind gute Emittter.”

Das ist doch eine sehr interessante Aussage. Auf eine nähere Begründung werden wir allerdings verzichten. Sie würde für uns an dieser Stelle zu weit führen.

6.8 Intensitätsabnahme bei punktförmigen Strahlern

Egal, ob es sich um einen schwarzen oder einen grauen Körper handelt, die emittierte Strahlung verteilt sich in aller Regel auf eine immer grössere Fläche, je weiter man sich von ihm entfernt.

Der einfachste Fall ist eine punktförmige Strahlungsquelle, die in alle Raumrichtungen gleich stark abstrahlt. Man nennt dies eine **isotrope Abstrahlung**. Im Abstand r verteilt sich die ausgesendete Strahlungsleistung P_S folglich auf eine Sphäre (= Kugeloberfläche) mit Radius r und Oberfläche $A = 4\pi r^2$. Das folgende Abstandsgesetz wird in Abb. 6.6 illustriert.

Abstandsgesetz zur Verteilung von Strahlung

Emittiert eine Strahlungsquelle ihre Strahlungsleistung P_S isotrop, also gleich stark in alle Raumrichtungen, so ist die Strahlungsintensität $I(r)$ im Abstand r zur Quelle gegeben durch:

$$I(r) = \frac{P_S}{A} = \frac{P_S}{4\pi r^2} \quad (6.7)$$

“Die Strahlungsintensität nimmt mit zunehmendem Abstand quadratisch ab.”

Handelt sich nicht um eine punktförmige Strahlungsquelle, so kann eine andere Geometrie trotzdem darüber Auskunft geben, welche Strahlungsintensität in einer bestimmten Entfernung zur Quelle zu erwarten ist. So lässt sich beispielsweise gut beantworten, wie gross die Strahlungsintensität in der nicht allzu grosser Entfernung von einem längeren, glühenden Draht ist o.Ä.

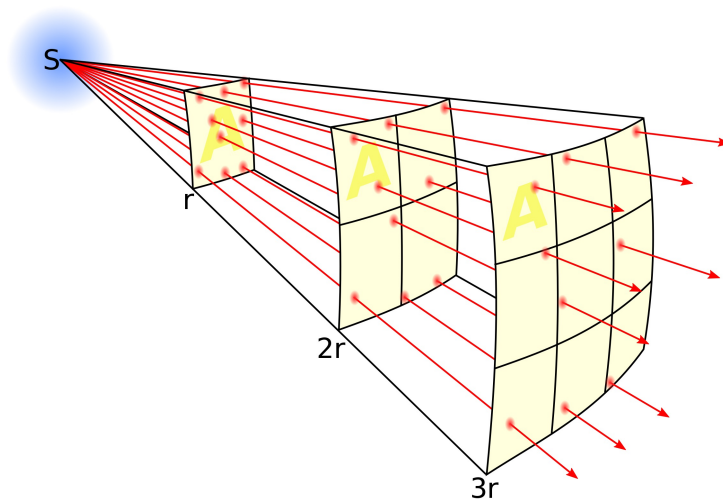


Abbildung 6.6: Die grafische Erläuterung zum quadratisch abfallenden Abstandsgesetz für die Strahlung aus einer punktförmigen Quelle.

6.9 Die Albedo

Absorbiert ein Körper nicht alle Strahlung, so streut oder reflektiert er sie. Gerade wenn es um Planeten geht, werden unter dem Begriff Reflexion typischerweise beide Effekte verstanden resp. zusammengefasst. Im Zuge davon wird die **Albedo** β eingeführt, die ein Mass für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden Körpern darstellt.⁴ Sie wird als dimensionslose Zahl angegeben und entspricht dem Verhältnis von rückgestrahltem zu einfallendem Licht.

Definition der Albedo

Empfängt ein Körper die Strahlungsleistung P_S und steht $P_{S,\text{reflektiert}}$ für die reflektierte oder gestreute Strahlungsleistung, so ist die **Albedo** β des Körpers definiert durch das Verhältnis dieser beiden Leistungen:

$$\text{Albedo: } \beta := \frac{P_{S,\text{reflektiert}}}{P_S} \quad (6.8)$$

Die Albedo lässt sich auch schreiben in der Form $\beta = 1 - \alpha$, wobei α der Absorptionskoeffizient des Körpers ist.

Anmerkungen zur Albedo

- Die Albedo kann für ganze Körper, aber auch nur für verschiedene Arten von Oberflächen angegeben werden. Im letzteren Fall muss sie als Verhältnis von eingestrahelter und reflektierter Strahlungsintensität verstanden werden, also als Verhältnis der Strahlungsleistungen pro Fläche.

⁴Lat. *Albedo* = die "Weisse" oder "Weissheit", von lat. *albus* = weiss.

- Die Albedo hängt bei einer gegebenen Oberfläche von der Wellenlänge des einstrahlenden Lichtes ab und kann für Wellenlängenbereiche – z.B. das Sonnenspektrum oder das sichtbare Licht – angegeben werden. Vor allem in der Meteorologie ist sie von Bedeutung, da sie Aussagen darüber ermöglicht, wie stark sich eine Oberfläche erwärmt – und damit auch die Luft in Kontakt mit der Oberfläche.
- Tab. 6.1 listet die Albedo-Werte verschiedener Himmelskörper als Ganzes und von spezifischen Oberflächenarten auf.

Albedowerte im Sonnensystem	
Himmelskörper	Albedowert
Merkur	0.119
Venus	0.77
Erde	0.306
Mars	0.025
Jupiter	0.343
Saturn	0.342
Uranus	0.30
Neptun	0.29
Pluto	0.72
Erdmond	0.11
Encelados (Jupitermond)	0.99

Albedowerte verschiedener Oberflächen	
Material	Albedowert
Frischer Schnee	0.80 – 0.90
Alter Schnee	0.45 – 0.90
Wolken	0.60 – 0.90
Wüste	0.30
Savanne	0.20 – 0.25
Felder (unbestellt)	0.26
Rasen	0.18 – 0.23
Wald	0.05 – 0.18
Asphalt	0.15
Wasserfläche	
Neigungswinkel > 45°	0.05
Neigungswinkel > 30°	0.08
Neigungswinkel > 20°	0.12
Neigungswinkel > 10°	0.22

Tabelle 6.1: Albedowerte für verschiedene Himmelskörper und Oberflächenarten.