

## Was ist Wärmestrahlung?

F. Herrmann

### 1 Einleitung

Es geht in diesem Beitrag um zwei Fragen:

1. Was ist Wärmestrahlung?
2. Wie viel Wärme transportiert Wärmestrahlung?

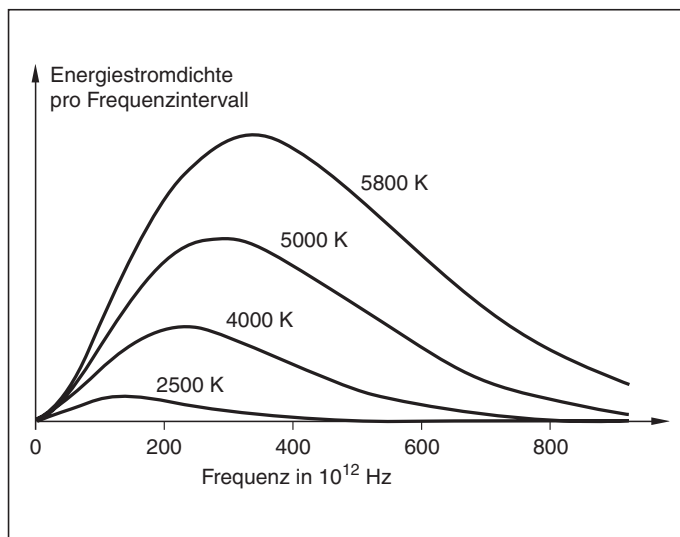
Auf den ersten Blick scheinen das keine schwierigen Fragen zu sein. Wärmestrahlung ist die elektromagnetische Strahlung, die zum Beispiel von einem heißen Ofen ausgeht. Und die mit der Wärmestrahlung transportierte Wärme ist einfach die mit der Strahlung übertragene Energie.

Diese Antworten sind aber noch nicht ganz befriedigend. Schließlich gibt es ja auch elektromagnetische Strahlung, die keine Wärmestrahlung ist, z. B. die Strahlung, die von einer Radio-Sendeantenne ausgeht, oder die, die ein Laser abstrahlt, oder die, mit der im Mikrowellenherd das Essen warm gemacht wird. Wo ist denn die Grenze zwischen Wärmestrahlung und Nicht-Wärmestrahlung? Oder gibt es vielleicht elektromagnetische Strahlung, die nur zum Teil Wärmestrahlung ist? Wenn ja, wie viel Wärme transportiert denn die? Wir werden beim Versuch, diese Fragen zu beantworten, zu dem Schluss kommen, dass beide Begriffe, nämlich Wärmestrahlung und Wärme, mit Vorsicht zu gebrauchen sind, ja dass man etliche Unstimmigkeiten am besten dadurch vermeidet, dass man die Begriffe gar nicht verwendet.

### 2 Was ist Wärmestrahlung?

Wir haben es mit einem Konzept zu tun, das eine ehrwürdige Tradition hat. „Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung“ ist der Titel eines Buchs von *Max Planck*

Abb. 1: Energiestromdichte pro Frequenzintervall für Schwarzkörperstrahlung verschiedener Temperaturen



aus dem Jahr 1906 [1], das wegweisend war und, wie wenige andere Bücher aus dieser Zeit, noch heute als Standardwerk betrachtet werden kann.

Wärmestrahlung wird auch „thermische Strahlung“ oder „Temperaturstrahlung“ genannt. Es ist diejenige Strahlung, die ein System auf Grund der Tatsache emittiert, dass es eine von null verschiedene Temperatur hat.

Ein Spezialfall der thermischen Strahlung ist die schwarze Strahlung oder Schwarzkörperstrahlung. Wenn ein Körper bei allen Wellenlängen absorbiert, also in einem verallgemeinerten Sinn „schwarz“ ist<sup>1)</sup>, so emittiert er auch bei allen Wellenlängen. Das Spektrum der emittierten Strahlung wird durch das *Planck'sche* Strahlungsgesetz beschrieben:

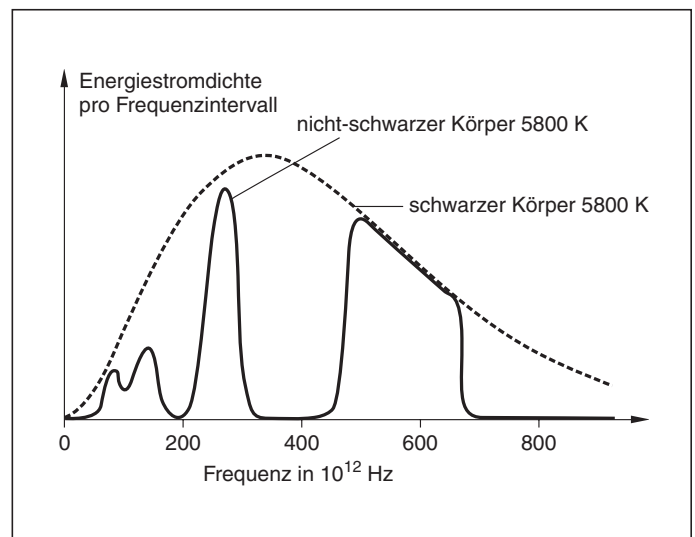
$$\frac{dj}{df} = \frac{2}{c^2} \frac{h}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} f^3.$$

Hier ist  $j$  die Energiestromdichte,  $f$  die Frequenz,  $h$  die *Planck'sche* Konstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $k$  die *Boltzmann-Konstante* und  $T$  die absolute Temperatur. Als Spektrum bezeichnet man die Energiestromdichte pro Frequenzintervall  $dj/df$  als Funktion der Frequenz, Abb. 1. Die Gestalt des *Planck'schen* Spektrums ist insofern universell, als sie nur von der Temperatur abhängt<sup>2)</sup>. Man kann diese

<sup>1)</sup> Auch ein Körper, der bei allen Wellenlängen absorbiert, sieht nur dann schwarz aus, wenn er nicht glüht, wenn also seine Temperatur nicht zu hoch ist.

<sup>2)</sup> In einer allgemeineren Form enthält die Gleichung neben der Temperatur noch einen zweiten Parameter: Im Argument der Exponentialfunktion steht ein Summand, der proportional zum chemischen Potenzial ist. Die Strahlung, mit der wir es in diesem Artikel zu tun haben, hat aber das chemische Potenzial null.

Abb. 2: Das Spektrum eines nicht-schwarzen thermischen Strahlers liegt unterhalb des Spektrums eines schwarzen Strahlers derselben Temperatur.



Temperatur auch der Strahlung zuordnen. Man sagt, die schwarze Strahlung habe die entsprechende Temperatur. Ist der emittierende Körper nicht „schwarz“, so ist das Spektrum anders, aber es ist an keiner Stelle höher als das Planck'sche Spektrum, das zur Temperatur des Körpers gehört, Abb. 2.

Auch nicht-schwarzer Strahlung lässt sich oft noch eine Temperatur zuordnen, aber je stärker sich das Spektrum der Strahlung von dem eines schwarzen Körpers unterscheidet, desto weniger sinnvoll ist eine solche Zuordnung. Man kann, im Prinzip wenigstens, jedes beliebige Spektrum mit einem thermischen Strahler erzeugen. Das bedeutet, dass man einem Spektrum nicht ansehen kann, ob die Strahlung von einem thermischen Strahler kommt oder nicht. Außerdem kann man natürlich jedes beliebige Spektrum durch einen nicht-thermischen Strahler erzeugen, also zum Beispiel auch eines, das wie das Spektrum eines schwarzen Strahlers aussieht. Thermisch zu sein ist also keine Eigenschaft der Strahlung, sondern eine Eigenschaft der Strahlungsquelle. Planck drückt diesen Sachverhalt in seinem Buch so aus [2]:

*‘Ohne vorläufig auf eine speziellere Theorie der Wärmestrahlung einzugehen, werden wir stets von dem durch die mannigfaltigsten Erfahrungen bewährten Satze Gebrauch machen, daß die Wärmestrahlen, rein physikalisch betrachtet, nichts anderes sind als Lichtstrahlen von entsprechender Wellenlänge, und werden die Bezeichnung „Wärmestrahlung“ ganz allgemein für alle diejenigen physikalischen Vorgänge gebrauchen, welche zur Klasse der Lichtstrahlen gehören. Jeder Lichtstrahl ist demnach zugleich auch ein Wärmestrahle.’*

Das würde man heute nicht mehr so sagen. Man muss aber bedenken, dass es 1906 noch keinen Mikrowellenofen gab, und Radiosender noch recht exotische Einrichtungen waren. Deren Strahlung hätte Planck nach seiner Definition auch Wärmestrahlung nennen müssen.

Wir schlagen den folgenden sprachlichen Umgang mit diesen Begriffen vor: Wir benutzen weder die Bezeichnung „Wärmestrahlung“, noch „thermische Strahlung“. Wenn wir uns auf das thermische Erzeugungsverfahren beziehen wollen, so sagen wir, das Licht komme von einem „thermischen Strahler“. Um eine Strahlung, die durch die Plancksche Strahlungsformel beschrieben wird, zu charakterisieren, benutzen wir, wie es allgemein üblich ist, die Bezeichnung „Schwarzkörperstrahlung“.

### 3 Die durch elektromagnetische Strahlung transportierte Wärme

Nun zu unserer zweiten Frage: Wie viel Wärme wird mit elektromagnetischer Strahlung transportiert? Um sie zu beantworten, müssen wir zunächst erklären, was wir unter Wärme verstehen wollen. Man könnte meinen, dass es hier keinen Klärungsbedarf gibt. Schließlich ist „Wärme“ ein wissenschaftlicher Begriff, der seit mehr als 200 Jahren benutzt wird, und der eigentlich klar definiert sein sollte. Eigenartigerweise ist das nicht der Fall. Die Bezeichnung „Wärme“ wird in verschiedenen Bedeutungen benutzt, die zwar alle miteinander verwandt, aber keineswegs deckungsgleich sind [3]. In einem Punkt stimmen die gebräuchlichsten Wärmedefinitionen überein: Wärme ist eine Art Energie.

Wir beziehen uns im folgenden auf die Wärmedefinition, die wahrscheinlich am meisten verbreitet ist, und derzufolge Wärme eine „Austauschform der Energie“ ist. Wir wollen sie kurz in Erinnerung bringen.

Wenn sich die Entropie eines Systems ändert, und die Werte aller anderen extensiven Größen festgehalten werden, so ist mit jeder Entropieänderung  $dS$  eine Energieänderung  $dE$  verbunden, und es gilt

$$dE = T dS. \quad (1)$$

Diese Energieänderung wird als Wärme bezeichnet. Man sagt, die Energie ändere sich in Form von Wärme. Also kurz:

$$\text{Wärme} = T dS.$$

Das Wort „Wärme“ bezieht sich damit auf den Vorgang der Änderung und nicht auf den Inhalt selbst, und auch nicht etwa auf die Differenz zwischen vorher und nachher. Wenn die Energie eines Systems in Form von Wärme zunimmt, so bedeutet das nicht, dass das System anschließend entsprechend mehr Wärme enthält. Das hört sich paradox an, liegt aber einfach daran, dass  $T dS$  nicht eine physikalische Größe im üblichen Sinn, sondern eine so genannte Differentialform ist. Diese merkwürdige Eigenschaft hat die Wärme gemeinsam mit anderen analogen Bildungen, nämlich der mechanischen Arbeit  $F ds$ , der elektrischen Energie oder Arbeit  $U dQ$  und der chemischen Energie oder Arbeit  $\mu dn$ .

Unter bestimmten Bedingungen kann man nun diesen Wärmebegriff auch auf Wärmetransporte übertragen. Wir dividieren dazu zunächst Gleichung (1) durch  $dt$ :

$$\frac{dE}{dt} = T \frac{dS}{dt}. \quad (2)$$

Da eine Energieänderung  $dE/dt$  nur durch einen Energiestrom  $P$  zu Stande kommen kann, gilt

$$\frac{dE}{dt} = P, \quad (3)$$

und wir können die linke Seite von Gleichung (2) durch den Energiestrom ersetzen.

Ähnlich können wir mit der rechten Seite verfahren. Es ist

$$\frac{dS}{dt} = I_S + \Sigma_S.$$

Eine Entropieänderung kann also auf zwei Arten zustande kommen: erstens durch einen Zu- oder Wegfluss  $I_S$ , und zweitens durch Erzeugung  $\Sigma_S$ .

Wenn wir nun dafür sorgen, dass keine Entropie erzeugt wird, so ist der Erzeugungsterm gleich null, und wir können ersetzen:

$$\frac{dS}{dt} = I_S. \quad (4)$$

Mit (3) und (4) folgt aus (2):

$$P = T I_S. \quad (5)$$

Man kann nun mit einem gewissen Recht sagen, dass der durch diese Gleichung beschriebene Energietransport ein

Energietransport in Form von Wärme ist, und das ist auch so üblich. Man legt also fest:

$$\text{Wärmestromstärke} = T I_S. \quad (6)$$

Anwendbar ist diese Gleichung sowohl auf die gewöhnliche Wärmeleitung als auch auf die Konvektion. Es kann auch sein, dass ein Energiestrom nur zum Teil ein Wärmestrom ist, und zu anderen Teilen ein mechanischer, elektrischer oder chemischer. Dann berechnet sich nur der Wärmeanteil nach dieser Formel.

So weit, so gut. Ein Problem tritt nun auf, wenn Gleichung (4) nicht gilt, wenn also die Bedingung nicht erfüllt ist, dass bei der Entropieänderung keine neue Entropie erzeugt wird: Genau das ist aber sowohl bei der Emission als auch bei der Absorption von Strahlung der Fall. Es führt dazu, dass für Strahlung auch Gleichung (5) nicht mehr gilt.

Tatsächlich findet man für den Spezialfall der schwarzen Strahlung (siehe Kasten A: Schwarze Strahlung):

$$P = \frac{3}{4} T I_S. \quad (7)$$

Die Gleichung sieht Gleichung (5) ähnlich, nur steht hier vor dem Produkt aus  $T$  und  $I_S$  der Faktor  $3/4$ . Man beachte, dass  $P$  der Gesamtenergiestrom ist. Wie groß der Wärmestrom ist, wissen wir zunächst noch nicht. Wir haben also immer noch nicht die Antwort auf unsere Frage: Wie viel Wärme transportiert die Strahlung? Tatsächlich gibt die Physik auf diese Frage gar keine Antwort. Wir können bestenfalls eine Festlegung treffen. Wir diskutieren im Folgenden mehrere Versuche einer solchen Festlegung.

## 1. Versuch

Wir legen fest, dass auch für elektromagnetische Strahlung die Definition (6) gilt, also

$$\text{Wärmestromstärke} = T I_S.$$

Man sieht sofort, dass eine solche Festlegung sinnlos wäre, denn dann würde die Strahlung mehr Wärme transportieren als sie insgesamt an Energie transportiert.

## 2. Versuch

Wir legen für die elektromagnetische Strahlung fest:

$$\text{Wärmestromstärke} = 3/4 T I_S.$$

Das würde bedeuten, dass wir für unterschiedliche Transporte unterschiedliche Wärmedefinitionen verwenden. Abgesehen von der Willkürlichkeit des Verfahrens, verschieben wir damit aber nur das Problem. Denn was sollen wir machen, wenn die Strahlung nicht mehr schwarz und das Verhältnis zwischen Energie- und Entropiestrom wieder ein anderes ist?

## 3. Versuch

Wir nennen immer die ganze Energie, die mit elektromagnetischer Strahlung transportiert wird, Wärme, egal wie sie mit dem Entropiestrom zusammenhängt. Damit kämen wir aber vom Regen in die Traufe, denn dann würde schließlich auch völlig entropiefreie Strahlung Wärme heißen müssen, also zum Beispiel die Strahlung eines Fern-

## Schwarze Strahlung

Die Beziehung

$$P = \frac{3}{4} T I_S \quad (A1)$$

lässt sich mit rein thermodynamischen Argumenten gewinnen. Die Energiedichte im Strahlungshohlraum ist

$$\rho_E = a T^4,$$

die Entropiedichte ist [5]

$$\rho_S = \frac{4}{3} a T^3.$$

Aus den beiden Gleichungen folgt

$$\rho_E = \frac{3}{4} T \rho_S.$$

Die Stromdichte von Energie und Entropie am Ort einer Öffnung im Strahlungshohlraum erhält man durch Multiplikation mit  $c/4$ . Es ist also

$$j_E = \frac{c a}{4} T^4 \quad (A2)$$

und

$$j_S = \frac{c a}{3} T^3. \quad (A3)$$

Damit gilt für den Zusammenhang der Stromdichten von Energie und Entropie:

$$j_E = \frac{3}{4} T j_S.$$

Multiplikation mit der durchströmten Fläche ergibt Gleichung A1.

### Kasten A: Schwarze Strahlung

sehsenders, und das wollen wir ja sicher nicht.

Wir sehen, dass wir es hier mit einem fundamentalen Problem zu tun haben, als es zunächst den Anschein hatte. Es stimmt etwas nicht mit dem zu Grunde liegenden Wärmebegriff.

## 4 Die Entropie als Wärme

Es steht außer Frage, dass die Naturwissenschaft ein Wärmemaß braucht. Glücklicherweise hat sie das aber auch, und zwar ein viel besseres, als das, welches wir gerade diskutiert haben, und das wir versucht haben, auf die Strahlung anzuwenden. Es ist die Entropie. Die Entropie ist eine sehr gutmütige Größe. Sie ist eine Zustandsgröße, wie es sich für ein Wärmemaß gehört, im Gegensatz zu der gerade diskutierten Energieform. Außerdem besteht eine sehr

gute Übereinstimmung mit dem, was der Normalbürger Wärme nennt, was man von der Energieform desselben Namens auch nicht behaupten kann. Die Entropie leistet alles das, was man von einem Wärmemaß erwartet, und was zum großen Teil von der Energieform Wärme nicht geleistet wird. Bei geeigneter Einführung ist die Entropie eine sehr anschauliche Größe. Hat man sich einmal daran gewöhnt, die Entropie als Wärmemaß zu benutzen, so empfindet man die Energieform Wärme als ganz und gar überflüssig.

Wenn man nun danach fragt, ob und wie viel Wärme von elektromagnetischer Strahlung transportiert wird, so kann man diese Frage auch als Frage nach der transportierten Entropie auffassen oder umdeuten, und diese Frage hat immer eine eindeutige Antwort. Es mag im Einzelfall schwierig sein, die Entropie zu berechnen oder zu messen. Einen bestimmten Wert hat sie aber immer.

Wir betrachten ein Beispiel: Das Sonnenlicht transportiert in der Nähe der Erde pro Quadratmeter etwa 1000 W. Da Sonnenlicht näherungsweise Schwarzkörperstrahlung ist, können wir Gleichung (7) anwenden, und es folgt

$$I_s = \frac{4}{3} \frac{P}{T}$$

$$= \frac{4}{3} \cdot \frac{1000 \text{ W}}{6000 \text{ K}} = 0,22 \frac{\text{Ct}}{\text{s}}$$

Hier wurde als Maßeinheit der Entropie 1 Carnot (Ct) = 1 J/K benutzt.

Den Entropiestrom, der zur Strahlung eines Fernsehsenders gehört, lässt sich mit dieser Formel nicht berechnen, denn die Strahlung ist keine Schwarzkörperstrahlung und hat keine Temperatur. Die statistische Physik sagt uns aber in diesem Fall, dass die Strahlung praktisch keine Entropie transportiert.

## 5 Warum Strahlung wärmt

Wir haben bisher versucht zu zeigen, wie problematisch der Begriff der Wärmestrahlung ist. Nun muss man aber doch zugeben, dass das Konzept plausibel ist. Wie kommt man denn überhaupt auf die Idee, dass es so etwas wie Wärmestrahlung gibt? Ganz einfach: Man spürt sie. Man braucht dazu nur die Hand über die eingeschaltete Herdplatte zu halten.

Aber schon haben wir das nächste Problem. Woher kommt denn die Wärme, die man spürt? Unser Gefühl lässt uns vermuten, dass sie mit der Strahlung kommt, und tatsächlich ist die Strahlung auch der Energielieferant. Das heißt aber noch nicht, dass die Strahlung auch die Wärme liefert. Nehmen wir, da es nicht anders geht, die Entropie als Maß für die Wärme. Woher kommt die Entropie, die wir spüren? Auf Grund unseres Gefühls können wir nun gar nicht entscheiden, ob die Entropie mit der Strahlung herbeigetragen oder ob sie beim Absorptionsprozess erzeugt wird. (Wir erinnern uns, dass bei der Absorption stets Entropie erzeugt wird.) Welcher Anteil der Entropie, die im absorbierenden Körper auftaucht, wird durch die Strahlung angeliefert, und welcher Anteil wird erst bei der Absorption, also beim „Aufprall“ der Strahlung, erzeugt?

Bevor wir die Frage beantworten, betrachten wir zum Vergleich einen Elektronenstrahl. Wenn ein Elektronenstrahl

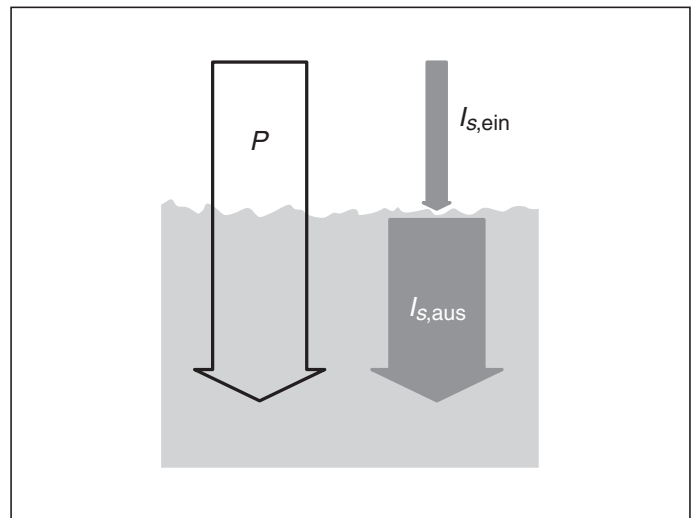


Abb. 3: Absorption von Strahlung im stationären Zustand. Der Energiestrom  $P$  ist vor und nach der Absorption derselbe, der Entropiestrom  $I_s$  nimmt beim Absorptionsvorgang zu.

hoher Intensität auf ein Material auftrifft, wird das Material heiß. Man benutzt diesen Effekt zum Schweißen. Woher kommt in diesem Fall die Wärme? Hier sagt uns unser physikalisches Gespür sofort, dass sie zum allergrößten Teil beim Aufprall der Elektronen auf das Material erzeugt wird, und das ist auch richtig. Nur ein winziger Anteil wird von den Elektronen bereits von der Quelle, die ja heiß ist, mitgebracht.

Wie steht es nun in dieser Hinsicht mit der elektromagnetischen Strahlung? Die Antwort lässt sich leicht geben, wenigstens so lange es sich um schwarze Strahlung handelt. Wir stellen uns Sonnenlicht vor, das auf eine schwarze Fläche auftrifft. Alles Licht werde absorbiert. Um den Anteil der bei dem Vorgang erzeugten Entropie zu berechnen, nehmen wir an, der Vorgang sei stationär, Abb. 3. Der Energiestrom  $P$  kommt von oben mit dem Sonnenlicht, und er fließt im Material nach unten weiter.

Der mit dem Licht ankommende Energiestrom  $P_{\text{ein}}$  berechnet sich nach Gleichung (7), wo man für  $T$  die Temperatur der Strahlung  $T_{\text{Strahlung}}$ , die gleich der Temperatur der Sonne ist, einsetzen muss. Den Entropiestrom, der mit dem Licht fließt, nennen wir  $I_{S,\text{ein}}$ . Es ist also:

$$P_{\text{ein}} = \frac{3}{4} T_{\text{Strahlung}} I_{S,\text{ein}}$$

Der im Material nach unten abfließende Energiestrom  $P_{\text{aus}}$  berechnet sich nach Gleichung (5), wo man für  $T$  die Temperatur des Absorbers  $T_{\text{Absorber}}$  einzusetzen hat. Den zugehörigen Entropiestrom nennen wir  $I_{S,\text{aus}}$ . Es ist also:

$$P_{\text{aus}} = T_{\text{Absorber}} I_{S,\text{aus}}$$

Da die beiden Energieströme  $P_{\text{ein}}$  und  $P_{\text{aus}}$  gleich groß sein müssen, haben wir

$$\frac{3}{4} T_{\text{Strahlung}} I_{S,\text{ein}} = T_{\text{Absorber}} I_{S,\text{aus}} \quad (8)$$

Als Maß für die Entropieerzeugung nehmen wir den Quotienten  $I_{S,\text{erz}}/I_{S,\text{aus}}$  aus pro Zeit erzeugter und wegfließender Entropie, wo

$$I_{S,\text{erz}} = I_{S,\text{aus}} - I_{S,\text{ein}}$$



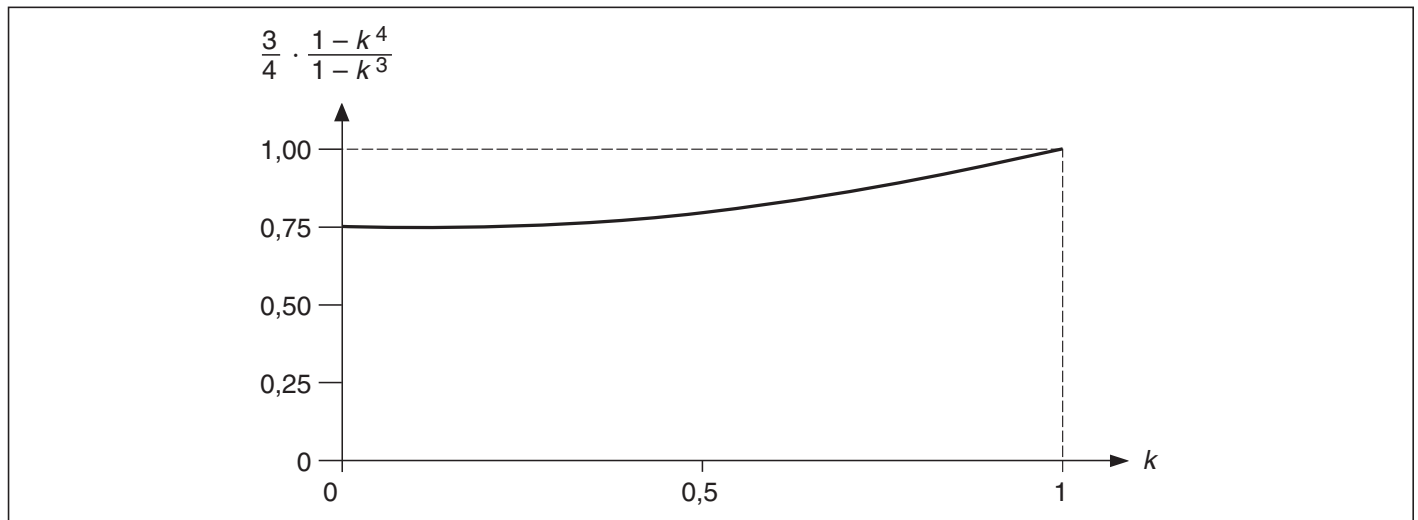


Abb. 4: Der Faktor, in der Beziehung zwischen  $P$  und  $T I_S$  als Funktion des Quotienten  $k$  aus niedrigerer und höherer Temperatur

ist. Damit folgt aus Gleichung (8):

$$\frac{I_{S, \text{erz}}}{I_{S, \text{aus}}} = 1 - \frac{4 T_{\text{Absorber}}}{3 T_{\text{Strahlung}}}$$

In unserem Fall ist die Temperatur des Absorbers die der Erde, und die Temperatur der Strahlung die der Sonne:

$$\begin{aligned} \frac{I_{S, \text{erz}}}{I_{S, \text{aus}}} &= 1 - \frac{4 T_{\text{Erde}}}{3 T_{\text{Sonne}}} \\ &= 1 - \frac{4 \cdot 300 \text{ K}}{3 \cdot 6000 \text{ K}} = 0,93 = 93\%. \end{aligned}$$

Also: 93 % der Entropie, die bei der Absorption auftaucht, wird beim Absorptionsvorgang erzeugt. Nur die restlichen 7 % bringt das Licht von der Sonne mit. Was wir als Wärme spüren, kommt zum größten Teil nicht von der Sonne, sondern wird beim „Aufprall“ des Lichts erzeugt, ähnlich wie beim Elektronenstrahl.

Man sieht, dass der Prozentsatz der erzeugten Entropie so hoch ist, weil die Temperatur der Sonne und damit des Sonnenlichts, so viel höher ist als die der Erde.

Bei der Herleitung von Gleichung (7) wurde angenommen, dass der schwarze Strahler „ins Vakuum“ strahlt, d. h. dass keine Rückstrahlung stattfindet. Für unser Beispiel von Sonne und Erde bedeutet das, dass wir die Rückstrahlung von der Erde zur Sonne gegen die von der Sonne kommende Strahlung vernachlässigen. Das ist gerechtfertigt, da

$$T_{\text{Erde}} \ll T_{\text{Sonne}}, \text{ bzw. } T_{\text{Absorber}} \ll T_{\text{Strahlung}}.$$

Stehen sich zwei schwarze Strahler gegenüber, deren Temperaturen sich nicht mehr so stark unterscheiden, so ist Gleichung (7) zu ersetzen durch

$$P = \frac{3}{4} \left( \frac{1-k^4}{1-k^3} \right) T_2 I_S, \quad (9)$$

siehe Kasten B. Hier ist

$$k = \frac{T_2}{T_1},$$

der Quotient aus der Temperatur  $T_1$  des kälteren und der Temperatur  $T_2$  des wärmeren Strahlers. Es ist also  $0 \leq k \leq 1$ .  $P$  ist der Nettoenergiestrom und  $I_S$  der Nettoentropiestrom. Für  $k \rightarrow 1$ , d. h. in dem Maß, wie sich die beiden Temperaturen näher kommen, geht Gleichung (9) in Gleichung (5) über, Abb. 4. Für  $k \rightarrow 0$ , d. h. wenn die niedrige gegen die hohe Temperatur vernachlässigbar wird, geht Gleichung (9) in Gleichung (7) über.

Wir betrachten den Fall, dass  $T_2 = 600 \text{ K}$  und  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Das entspricht etwa der Situation, dass wir uns die Hände (300 K) an einem Ofen (600 K) wärmen. Mit  $k = T_1/T_2 = 0,5$  wird aus Gleichung (9)

$$P = 0,804 T_2 I_S.$$

Entsprechend Gleichung (8) wird jetzt:

$$0,804 T_2 I_{S, \text{ein}} = T_1 I_{S, \text{aus}}.$$

Damit wird der Quotient aus erzeugter und insgesamt wegfließender Entropie

$$\begin{aligned} \frac{I_{S, \text{erz}}}{I_{S, \text{aus}}} &= 1 - \frac{1}{0,804} \frac{T_1}{T_2} \\ &= 1 - \frac{1}{0,804} \frac{300 \text{ K}}{600 \text{ K}} = 0,38 = 38\%. \end{aligned}$$

Hier stammen also nur noch 38% der auftauchenden Entropie aus der Erzeugung, 62% kommen vom Ofen.

Wir betrachten schließlich noch den Mikrowellenofen. Die Strahlung ist praktisch entropiefrei. Die ganze im Kochgut auftauchende Entropie, also 100%, wird bei der Absorption der Mikrowellen erzeugt.

## 6 Infrarotstrahlung als Wärmestrahlung

Manchmal wird die Wärmestrahlung mit Infrarotstrahlung identifiziert. Diese Festlegung hat historische Ursachen und ist aus modernerer Sicht sicher ungeschickt, denn sie legt ja nahe, nur Infrarotstrahlung transportiere Wärme, oder Infrarotstrahlung transportiere besonders viel Wärme, also zum Beispiel mehr als sichtbares Licht und

## Kasten B

Zwei Körper 1 und 2 stehen sich gegenüber. Körper 1 hat die niedrigere Temperatur  $T_1$ , Körper 2 die höhere Temperatur  $T_2$ .

Die Strahlung, die von Körper 1 ausgeht, transportiert einen Energiestrom der Stromdichte

$$j_{E1} = \frac{ca}{4} T_1^4,$$

und einen Entropiestrom mit

$$j_{S1} = \frac{ca}{3} T_1^3,$$

siehe Gleichungen (A2) und (A3).

Die von Körper 2 ausgehende Strahlung transportiert entsprechend die Ströme

$$j_{E2} = \frac{ca}{4} T_2^4$$

und

$$j_{S2} = \frac{ca}{3} T_2^3.$$

Vorzeichenrichtig addiert ergeben sich die Gesamtströme:

$$j_E = \frac{ca}{4} (T_2^4 - T_1^4)$$

und

$$j_S = \frac{ca}{3} (T_2^3 - T_1^3).$$

Eine etwas mühsame Umrechnung ergibt

$$j_E = \frac{3}{4} \frac{1-k^4}{1-k^3} T_2 j_S,$$

wo  $k = T_1/T_2$  gesetzt wurde. Wenn man von den Stromdichten zu den Stromstärken übergeht, erhält man schließlich

$$P = \frac{3}{4} \frac{1-k^4}{1-k^3} T_2 I_S.$$

### Kasten B: Energiestrom und Entropiestrom

mehr als Mikrowellenstrahlung. Wenn man diese drei Strahlungsarten miteinander vergleichen will, so sollte man gleich viel von jeder Strahlung nehmen. Wie viel ist aber gleich viel? Ein plausibles Maß ist wohl der Energiestrom. Um die Sache nicht unnötig kompliziert zu machen, nehmen wir an, dass es sich bei den drei Strahlungen um Schwarzkörperstrahlung handelt. Wir vergleichen also einen Strahl von jeweils 100 W Mikrowellenstrahlung, Infrarotstrahlung und sichtbarem Licht. Welcher Strahl transportiert die meiste Wärme?

Nimmt man als Wärmemaß die Energie, so kommt trivialerweise heraus, dass alle drei Strahlungen gleich viel Wärme transportieren. Nimmt man die Entropie als Wärmemaß, so transportiert wegen Gleichung (7) die Strahlung mit der niedrigsten Temperatur, also die Mikrowellenstrahlung, die meiste Wärme. In keinem Fall zeichnet sich also die Infrarotstrahlung aus.

## 7 Die Herkunft der Unstimmigkeiten

Wie ist das Konzept der Wärmestrahlung überhaupt in die Welt gekommen? Die Antwort ist nicht schwer zu finden. Sie beruht auf einer Vorstellung, die in einer längst vergangenen Zeit einmal sinnvoll zu sein schien. Lange bevor man elektromagnetische Wellen kannte, wusste man, dass von heißen Körpern eine Art Strahlung ausgeht. Der Name „strahlende Wärme“ stammt wahrscheinlich von *Scheele* (1742-1786), demselben, der 1774 den Sauerstoff als einen der Bestandteile der Luft entdeckt hatte.

Es gab zu dieser Zeit keinen Grund anzunehmen, dass Licht und Wärme derselben Natur sind. Vielmehr schien es so, dass Licht und Wärme zwei verschiedene Strahlungen sind, die zwar manchmal zusammen auftreten, aber bei anderen Gelegenheiten durchaus auch getrennt. Von der Sonne zum Beispiel kommen beide, von einem Ofen kommt nur Wärme, und vom Mond, so glaubte man [4], kommt nur Licht.

In den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wuchs die Überzeugung, dass Licht- und Wärmestrahlen derselben Natur sind. Zur endgültigen Klärung der Frage bedurfte es aber noch zweier großer Theorien: der Elektrodynamik von *Maxwell* und der Thermodynamik des Lichts von *Planck*.

## 8 Schlussbemerkungen

Wir haben gesehen, dass die Bedeutung des Begriffs Wärmestrahlung so wenig eindeutig ist, dass er als wissenschaftliches Konzept nicht taugt. Viel besser als die Energieform Wärme ist als Wärmemaß der Strahlung die Entropie geeignet. Man kann verschiedene Strahlungen, was den Entropietransport betrifft, miteinander vergleichen, und man kann klar sagen, bei welchen Prozessen Entropie erzeugt wird. Außerdem stimmen die entsprechenden Aussagen mit denen überein, die man machen würde, wenn man den entsprechenden Vorgang mit Hilfe des umgangssprachlichen Wärmebegriffs beschreibt.

### Literatur

- [1] *Planck, M.*: Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung, 2. Aufl., Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1913.
- [2] ebd. S. 2
- [3] *Job, G.*: Äquivalenz von Wärme und Arbeit, in *Altlasten der Physik*. Aulis Verlag Deubner, Köln 2002, S. 77.
- [4] *Pictet, M. A.*: *Essai sur le feu*. Genève, 1790.
- [5] *Planck, M.*: Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung, 2. Aufl., Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1913, S. 62-64.

### Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe; [friedrich.herrmann@physik.uni-karlsruhe.de](mailto:friedrich.herrmann@physik.uni-karlsruhe.de)