Habt ihr schon gewusst 572 Thermodynamisches Gleichgewicht

… was ich denke …

… was ich sagen will …

… was ich sagen …

… was die Schallwellen tragen …

… was an meinem Trommelfell ankommt …

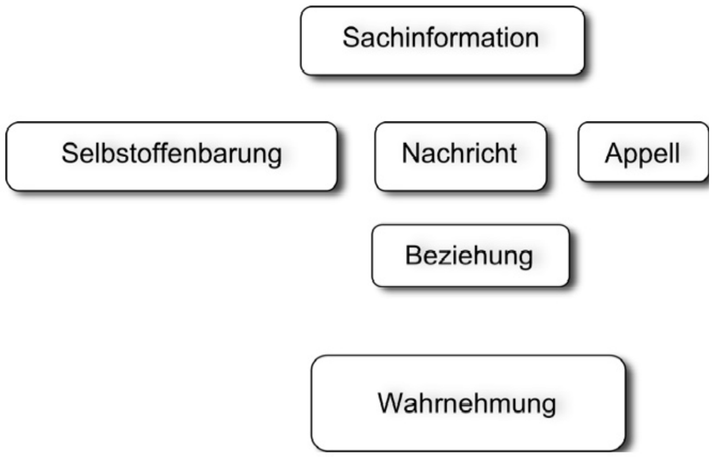
… was im Hörzentrum ankommt …

… was meine Wahrnehmungsmasken zulassen …

… sind völlig unterschiedliche Dinge …

Mit dieser Graphik sage ich ganz bestimmt nichts NEUES.

Wir wissen alle, dass unsere Wahrnehmungsmasken ganz massiv bestimmen, wie wir aufgenommene Nachrichten interpretieren. Unsere inneren Masken bestimmen, welche Sachinformation wir aus der „Nachricht“ aufnehmen. Ganz wesentlich bestimmen unsere Masken aber auch die Selbstoffenbahrung, den Appell und die Beziehungsinfo, die wir dem Gesprächspartner unterstellen.



Die „inneren Masken“, die unsere Wahrnehmung massiv einschränken, basieren auf den Präkonzepten, die wir bzgl. eines Phänomens oder einer Wahrnehmung aus den bisherigen Erfahrungen abgespeichert haben.

Bei Physik-Themen, in denen wir schon viele eigene Erfahrungen gesammelt haben, sind die vorhandenen Präkonzepte eventuell detailliert ausgeformt. So haben Kinder schon in früher Jugend tragfähige eigene Konzepte bzgl. dem Schwung und der Wärme, die man im Physikunterricht sinnvoll nutzen kann, um tragfähige Selbstkonzepte in Richtung einer korrekten Physikfachsprache zu wenden.

So vorteilhaft diese vorhandenen Präkonzepte im Unterricht genutzt werden können, so nachteilig sind Mechanik- und Wärmelehre-Präkonzepte in diesen für Schülerinnen und Schüler vertrauten Themenkomplexen, wenn das „Bauchgefühl“ zuschlägt und spontane – scheinbar (nicht anscheinend!) einfache, korrekte, selbstverständliche Aussagen im Widerspruch zur Physik stehen.

Hier Fragestellungen zur Wärmelehre, die bzgl. der inneren Masken zu scheinbar widersprüchlichen Aussagen führen.

Arbeitsauftrag

[01] **Frida** meint: Wenn man die Gegenstände im Physiksaal berührt, dann kann man sogar mit dem schlechten Temperaturgefühl ohne Probleme feststellen, dass die Metallstangen wesentlich kälter sind als die Holzstangen, die direkt daneben im Ständer stehen. Besonders warm bleibt ein Styroporklotz. Das konnte er gestern feststellen, als er die Styroporschachtel seiner Helikopter-Verpackung angefasst hat, die bei Kältegraden im Freien auf dem Mülleimer vor dem Haus lagen.

[02] **Hannes** erzählt von einem Film, den er kürzlich in N-24 gesehen hat. Dort wurde anschaulich gezeigt, dass sich die Erde durch den Treibhauseffekt erwärmt. Durch die Erwärmung schmilzt die Eisdecke am Nordpol, am Südpol und auf Grönland. Zudem schmelzen die Gletscher in hohen Bergregionen. Durch dieses Abschmelzen der „weißen Flächen" ändert sich das Absorptionsvermögen der Erde – d.h. die Erde reflektiert nicht mehr soviel Strahlungsenergie von der Sonne in das Weltall, die Erde nimmt mehr von der eingestrahlten Energie auf und weil sich das Emissionsvermögen nicht verändert, muss die auf der Erde aufgenommene Energie zunehmen und die Erde erwärmt sich.

[03] **Lore** hat folgende Vorstellung: Wenn ein schwarzes und ein silberfarbenes Auto in der Sonne steht, dann weiß sie aus Erfahrung, dass sich das schwarze Auto schneller erwärmt als ein silberfarbenes Auto. Ein schwarzes Auto hat ein höheres Absorptionsvermögen für die Sonnenstrahlung als ein silberfarbenes Auto. Das erklärt die schnellere Erwärmung. Ein silberfarbenes Auto nimmt bei gleicher Sonneneinstrahlung pro Sekunde und gleicher Fläche wesentlich weniger Energie auf als das schwarze Auto. Aber wenn man lange genug wartet, dann wird sich das silberfarbene Auto auf die gleiche Innentemperatur aufheizen, wie das schwarze Auto. Weil sich diese maximale Temperatur aber erst nach vielen Stunden einstellen würde und die Sonne vorher untergeht, bleibt im „real erlebten Fall" ein silberfarbenes Auto immer kälter als ein schwarzes Auto.

Lösungshinweis

[01] Frida meint: Wenn man die Gegenstände im Physiksaal berührt, dann kann man sogar mit dem schlechten Temperaturgefühl ohne Probleme feststellen, dass die Metallstangen wesentlich kälter sind als die Holzstangen, die direkt daneben im Ständer stehen. Besonders warm bleibt ein Styroporklotz. Das konnte er gestern feststellen, als er die Styroporschachtel seiner Helikopter-Verpackung angefasst hat, die bei Kältegraden im Freien auf dem Mülleimer vor dem Haus lagen.

Mit einer Temperaturmessung kann man leicht zeigen, dass die Gegenstände in einem Physiksaal, in dem sich die Luft in einem thermodynamischen Gleichgewicht befindet (keine Zugluft, nicht in der Nähe der Türe, Wände oder Fenster!) befindet, die gleiche Temperatur haben.

Die Begründung auf qualitativer Ebene: Die Temperaturdifferenz ist der Antrieb für einen Entropiestrom (der mit einem thermodynamischen Energiestrom verknüpft ist). Solange eine Temperaturdifferenz vorhanden ist, so lange fließt thermische Energie in den kälteren Körper ... bis alle Körper im Zimmer die gleiche Temperatur haben ... das nennt man thermodynamisches Gleichgewicht.

[02] Hannes erzählt von einem Film, den er kürzlich in N-24 gesehen hat. Dort wurde anschaulich gezeigt, dass sich die Erde durch den Treibhauseffekt erwärmt. Durch die Erwärmung schmilzt die Eisdecke am Nordpol, am Südpol und auf Grönland. Zudem schmelzen die Gletscher in hohen Bergregionen. Durch dieses Abschmelzen der „weißen Flächen“ ändert sich das Absorptionsvermögen der Erde – d.h. die Erde reflektiert nicht mehr soviel Strahlungsenergie von der Sonne in das Weltall, die Erde nimmt mehr von der eingestrahlten Energie auf und weil sich das Emissionsvermögen nicht verändert, muss die auf der Erde aufgenommene Energie zunehmen und die Erde erwärmt sich.

Diese Aussagen sind nicht falsch ... Die durchschnittliche Temperatur der Erde wächst, wenn die Sonne stärker strahlt – und sie wächst, wenn die Gletscher schmelzen, denn dann wächst der Absorptionskoeffizient im optischen Spektralbereich ... und die durchschnittliche Temperatur der Erde wächst, wenn der Emissionskoeffizient der Erde im Infrarotbereich durch Treibhausgabe abnimmt. Man sollte dabei beachten, dass der Absorptionskoeffizient und der Emissionskoeffizient eines Körpers immer gleich groß ist – aber natürlich nur im gleichen Wellenlängenbereich! Der Absorptions- und Emissionskoeffizient kann aber in verschiedenen Wellenlängenbereich völlig unterschiedlich sein. Eine Fensterfläche lässt die Licht-Wellenbereiche im sichtbaren Spektrum fast vollständig durch (deshalb ist das Fenster im sichtbaren Bereich „durchsichtig“) – die Glasscheibe reflektiert aber den größten Teil der Infrarotstrahlung!.

[03] Lore hat folgende Vorstellung: Wenn ein schwarzes und ein silberfarbenes Auto in der Sonne steht, dann weiß sie aus Erfahrung, dass sich das schwarze Auto schneller erwärmt als ein silberfarbenes Auto. Ein schwarzes Auto hat ein höheres Absorptionsvermögen für die Sonnenstrahlung als ein silberfarbenes Auto. Das erklärt die schnellere Erwärmung. Ein silberfarbenes Auto nimmt bei gleicher Sonneneinstrahlung pro Sekunde und gleicher Fläche wesentlich weniger Energie auf als das schwarze Auto. Aber wenn man lange genug wartet, dann wird sich das silberfarbene Auto auf die gleiche Innentemperatur aufheizen, wie das schwarze Auto. Weil sich diese maximale Temperatur aber erst nach vielen Stunden einstellen würde und die Sonne vorher untergeht, bleibt im „real erlebten Fall“ ein silbernfarbenes Auto immer kälter als ein schwarzes Auto.

Lore hat Recht, dass sich ein schwarzes Auto schnelle erwärmt als ein silberfarbenes. Das silberfarbene Auto hat ein wesentlich kleineres Absorptionsvermögen im sichtbaren Spektralbereich. Es nimmt also pro Sekunde und Fläche wesentlich weniger Energie aus dem Spektrum der Sonne auf. Also erhöht sich die Temperatur im Autoinneren viel langsamer als im schwarzen Auto. Die Annahme, dass das silberfarbene Auto zwar weniger Energie pro Fläche und Zeiteinheit aufnimmt – ABER mit Blick auf Emissionskoeffizient = Absorptionskoeffizient auch weniger Energie pro Fläche und Zeiteinheit abgibt ... UND deshalb nach hinreichend langer Zeit genau die gleiche Temperatur wie das schwarze Auto annimmt ist leider falsch – denn die Energie wird weitgehend im sichtbaren Spektralbereich eingestrahlt – aber im Infrarotbereich abgestrahlt ... und die Emissions- und Absorptionskoeffizienten sind nicht in allen Wellenbereichen gleich groß.

Fachlicher Hintergrund

Selbstverständlich hängen die Antworten auf diese Fragestellungen / Problemstellung von der Klassenstufe ab, in der diese Diskussionen geführt werden.

Didaktische Reduktionen beginnen bei den fachwissenschaftlichen Darstellungen

Stefan-Boltzmann-Gesetz

Zunächst betrachten wir einen Körper, der sich auf der Temperatur T befindet. Die Umgebungstemperatur sei T_U.

Dieser Körper strahlt die Energiestromstärke (Leistung, Energie pro Zeiteinheit) P_K in die Umgebung ab. Wenn wir davon ausgehen, dass es ein „schwarzer Körper" ist, dann ergibt sich die Energiestromstärke zu:

$$P_K = A \cdot \sigma \cdot T_K{}^4$$

Der Proportionalitätsfaktor σ (Stefan-Boltzmann-Konstante) ist dabei eine Naturkonstante $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^8$ W / m^2 / K^4

Betrachten wir die Umgebung ebenfalls als „schwarzer Körper", dann gilt für die Energiestromstärke, die von der Umgebung in den Körper fließt (eingestrahlt wird, vom Körper absorbiert wird ...):

$$P_U = A \cdot \sigma \cdot T_U{}^4$$

Der Körper strahlt also folgende Energiestromstärke in die Umgebung:

$$P = P_K - P_U$$

Bei kleinen Temperaturdifferenzen: $\Delta T = T_K - T_U$, $(T_K - T_U) << T_U$ gilt: $T_K{}^4 \approx T_U{}^4 + 4 \cdot T_U{}^3 \cdot (T_K - T_U)$

Damit bekommen wir für P: $P = 4 \cdot A \cdot \sigma \cdot T_U{}^3 \cdot (T_K - T_U)$ oder $\frac{P}{A} = 4 \cdot \sigma \cdot T_U{}^3 \cdot (\Delta T)$

oder $\frac{P}{A} = \alpha \cdot A \cdot (T_K - T_U)$ [01] oder $\frac{P}{A} = \alpha \cdot (\Delta T)$ mit $\alpha = 4 \cdot \sigma \cdot T_U{}^3$

Zusammen mit der thermischen Energiestromstärke P (pro Flächeneinheit) fließt auch eine Entropiestromstärke (pro Flächeneinheit; $\Delta E = \Delta S \cdot T$) nach folgender Beziehung:

$$\frac{I_{Entropie}}{A} = 4 \cdot \sigma \cdot T_U{}^2 \cdot (\Delta T)$$

Für die vom Körper abgestrahlte Energiestromstärke gilt damit:

- $I_{Entropie} \sim A$ und $P \sim A$ ... je größer die Körperoberfläche, desto größer ist die Energie- und Entropiestromstärke
- $I_{Entropie} \sim \Delta T$ und $P \sim \Delta T$ ... je größer die Temperaturdifferenz, desto größer ist die Entropie- und Energiestromstärke
- Sowohl die Entropie-Stromstärke als auch die Energiestromstärke hängen von der Temperaturniveau ab, auf dem sich dieser Vorgang abspielt.
- Für ein Temperaturniveau von 300 K ergibt sich für $\alpha = 4 \cdot \sigma \cdot T^3 \approx 6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ also ergibt sich eine Energiestromstärke pro Flächeneinheit von $\frac{P}{A} = 6 \frac{W}{m^2 \cdot K} (\Delta T)$;
- für die Entropiestromstärke erhalten wir $4 \cdot \sigma \cdot T^2 \approx 0{,}02 \frac{W}{m^2 \cdot K^2}$ also ergibt sich eine Entropiestrom pro Flächeneinheit von $\frac{I_{Entropie}}{A} = 0{,}02 \frac{W}{m^2 \cdot K^2} (\Delta T)$ oder $\frac{I_{Entropie}}{A} = 0{,}02 \frac{Ct/s}{m^2 \cdot K} (\Delta T)$

Thermodynamisches Gleichgewicht

Wir betrachten den oben beschriebenen Körper bei der Temperatur T_K in der Umgebung mit der Temperatur T_U. Wenn der Körper die Energiestromstärke P (Energie pro Zeiteinheit) abgibt, dann kühlt er ab; der Zusammenhang zwischen der abgegebenen Energie, der Masse des Körpers, der Temperaturänderung wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$P = \frac{dE}{dt} = c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} \quad [02]$$

Aus [01] und [02] folgt

$$c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} = \alpha \cdot A \cdot \left(T - T_U\right) \Rightarrow \frac{dT}{dt} = \frac{\alpha \cdot A}{c \cdot m} \cdot \left(T - T_U\right) \Rightarrow \frac{1}{\left(T - T_U\right)} dT = \frac{\alpha \cdot A}{c \cdot m} \cdot dt$$

$$\int \frac{1}{\left(T - T_U\right)} dT = \int \frac{\alpha \cdot A}{c \cdot m} dt \Rightarrow \quad T = T_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit } \tau = \frac{\alpha \cdot A}{c \cdot m} \text{ und } T(t=0s) = T_0$$

Freihand-Experiment

Man steckt den Temperatursensor, der mit dem XplorerGLX mitgeliefert wird, in den XplorerGLX ein und nimmt ihn die Hand. Der e-förmige Verlauf des T-t-Diagramms liefert bei diesen Randbedingungen das zugehörige τ.

Reale Körper

Die Definition eines schwarzen Körpers ergibt sich als ε_a=1 – d.h. der Absorptionskoeffizient ε_a hat seinen maximalen Wert – alle auftreffende Strahlungsenergie wird absorbiert. Handelt es sich um einen „normalen Körper“, dann liegt der Absorptionskoeffizient bei ε_a zwischen 0,1 und 1.

Absorptions- und Emissionskoeffizient

Bei realen Körpern mit einem Absorptionskoeffizienten ε_a und einem Emissionskoeffizienten ε_e ergibt sich folgende Darstellung:

Wir betrachten wieder einen Körper, der sich auf der Temperatur T befindet. Die Umgebungstemperatur sei T_U.

Dieser Körper mit dem Emissionskoeffizienten ε_e strahlt die Energiestromstärke (Leistung, Energie pro Zeiteinheit) P_K in die Umgebung ab. Wenn wir davon ausgehen, dass es ein „schwarzer Körper“ ist, dann ergibt sich die Energiestromstärke zu:

$$P_K = \varepsilon_e \cdot A \cdot \sigma \cdot T_K^{\ 4}$$

polierte Silberoberfläche	0,13
polierte Kupferoberfläche	0,18
frisch gefallener Schnee	0,20 ...
poliertes Aluminium	0,20
weißes Zink	0,22
polierte Goldoberfläche	0,29
weißer Marmor	0,46
oxidierte Kupferoberfläche	0,70
Grüne Blätter	0,7 ... 0,8
rote Ziegeloberfläche	0,72 ... 0,78
raue Eisenoberfläche	0,75
verzinkte, graue Eisenoberfläche	0,38
Asphalt	0,90
Rußoberfläche	größer 0,95

Der Proportionalitätsfaktor σ (Stefan-Boltzmann-Konstante) ist dabei eine Naturkonstante $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{8}$ W / m² / K⁴

Betrachten wir die Umgebung ebenfalls als „schwarzer Körper“, dann gilt für die Energiestromstärke, die von der Umgebung in den Körper mit dem Absorptionskoeffizienten ε_a fließt (eingestrahlt wird, vom Körper absorbiert wird):

$$P_U = \varepsilon_a \cdot A \cdot \sigma \cdot T_U^{\ 4}$$

Der Körper strahlt also folgende Energiestromstärke in die Umgebung:

$$P = P_K - P_U$$

Damit bekommen wir für P: $P = \left(\varepsilon_e \cdot A \cdot \sigma \cdot T_K^{\ 4}\right) - \left(\varepsilon_a \cdot A \cdot \sigma \cdot T_U^{\ 4}\right)$ oder $P = A \cdot \sigma \cdot \left(\varepsilon_e \cdot T_K^{\ 4} - \varepsilon_a \cdot T_U^{\ 4}\right)$

Im thermodynamischen Gleichgewicht, wenn $T_K = T_U$ gilt P=0 ... daraus ergibt sich $\varepsilon_e = \varepsilon_a$ ... d.h. der Absorptionskoeffizient eines Körpers ist identisch mit dem Emissionskoeffizienten. Ein schwarzer Körper absorbiert also viel Strahlungsenergie – und emittiert auch viel Strahlungsenergie - im Vergleich zu einem silberfarbenen Körper.

Thermodynamisches Ungleichgewicht der Erde

Betrachten wir unsere Erde im Weltall, dann liegt diese Erde ganz sicher nicht in einem Wärmebad bei einem thermodynamischen Gleichgewicht. Die Sonnentemperatur liegt bei ca. 5600 K und die durchschnittliche Temperatur der Erde über dem Nullpunkt.

In diesem Fall haben wir die größte Energiestromstärke von der Sonne in den Wellenbereichen des Sonnen-Spektrums auf die Erde. Die Solarkonstante liegt hierbei die Energiestromstärke pro Flächeneinheit (Energie pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit):

$$S_{Solar} = 1367 \frac{W}{m^2}$$

Die Erde absorbiert im Wellenbereich des Sonnenspektrum diese Energiestromstärke pro Flächeneinheit auf der Querschnittsfläche unserer Erde, die der Sonne zugewandt ist. Wenn wir davon ausgehen, dass die Sonne die Energiestromstärke P_{Sonne}/A (Enerige pro Zeit und pro Flächeninhalt) in Richtung der Erde abstrahlt, dann ergibt sich:

$$P_{eingestrahlt} = \varepsilon_{opt-Spektrum} \cdot P_{Sonne} \cdot A_{Querschnitt-Erde}$$

Diese Energiestrahlung wird von der Erde absorbiert und dann im Infrarotbereich (also bei einer wesentlich kleineren Wellenlänge) wieder abgestrahlt. Die abgestrahlte Energiestromstärke ergibt sich aus:

$$P_{abgestrahlt} = \varepsilon_{e-Infrarot} \cdot A_{Obefläche-Erde} \cdot \sigma \cdot T_{Erde}^{\;4} \quad \text{..... mit } \sigma = 5,7 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Die von der Sonne eingestrahlte Energiestromstärke (Energie pro Sekunde) heizt die Erde so lange auf, bis die von der Erde abgestrahlte Infrarotstrahlung genau so groß ist, wie die eingestrahlte Energiestromstärke von der Sonne.

$$\varepsilon_{opt-Spekrum} \cdot P_{Sonne} \cdot A_{Querschnitt-Erde} = \varepsilon_{e-Infrarot} \cdot A_{Oberfläche-Erde} \cdot \sigma \cdot T_{Erde}^{\;4}$$

Damit bekommen wir eine Erd-Temperatur von:

$$T_{Erde} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{opt-Spektrum} \cdot P_{Solar} \cdot A_{Querschnitt}}{\varepsilon_{e-Infrarot} \cdot \sigma \cdot A_{Oberfläche}}}$$

Aus dieser Gleichung ablesen:

- Die durchschnittliche Temperatur der Erde wächst, wenn die Sonne stärker strahlt.
- Die durchschnittliche Temperatur der Erde wächst, wenn die Gletscher schmelzen, denn dann wächst ε im optischen Spektrum.
- Die durchschnittliche Temperatur der Erde wächst, wenn das Emissionsvermögen ε im Infrarot-Bereich abnimmt – d.h. die Atmosphäre für die Infrarotstrahlung undurchlässig wird ... wenn also ε-Infrarot abnimmt.

Thermodynamisches Ungleichgewicht eines Autos

Wir stellen uns das Auto als Kugel vor – auch wenn es nicht „rotationssymmetrisch" rund ist. Wir können uns das Auto aber auch gerne als Quader vorstellen – das ändert nur wenig am qualitativen Ergebnis.

Wie im oben diskutierten Fall der Erde wird eine bestimmte Energiestromstärke in das Auto im sichtbaren Bereich eingestrahlt und das Auto strahlt je nach Aufheizungsgrad mehr oder weniger Infrarotstrahlung in die Umgebung ab.

Unterstellen wir diesen prinzipiellen Ansatz, dann bekommen wir auch bei einem Auto folgende Zusammenhänge:

- Die durchschnittliche Temperatur des Autos wächst, wenn die Sonne stärker strahlt – also liegt die Autotemperatur an einem wolkenlosen Sonnentag wesentlich höher als bei einem Regentag.
- Die durchschnittliche Temperatur des Autos wächst mit dem ε im optischen Spektrum. Das heißt ein schwarzes Auto heizt sich auf eine wesentlich höhere Temperatur auf als ein silbefarbenes Auto.
- Die durchschnittliche Temperatur des Autos wächst, wenn das Emissionsvermögen ε im Infrarot-Bereich abnimmt – d.h. wenn die Hülle des Autos für die Infrarotstrahlung undurchlässig wird ... wenn also ε-Infrarot abnimmt. Ungünstig wäre also ein Auto, das im sichtbaren Bereich „schwarz" ist (also das sichtbare Spektrum sehr gut absorbiert) und im Infrarotbereich gut isoliert ist ... also negativ wirken Scheiben, die im sichtbaren Bereich durchlässig sind, die aber im Infrarotbereich extrem gut isolieren ... was bei „normalen Autoscheiben" tatsächlich der Fall ist ... wie man mit einer Infrarotkamera leicht nachweisen kann.