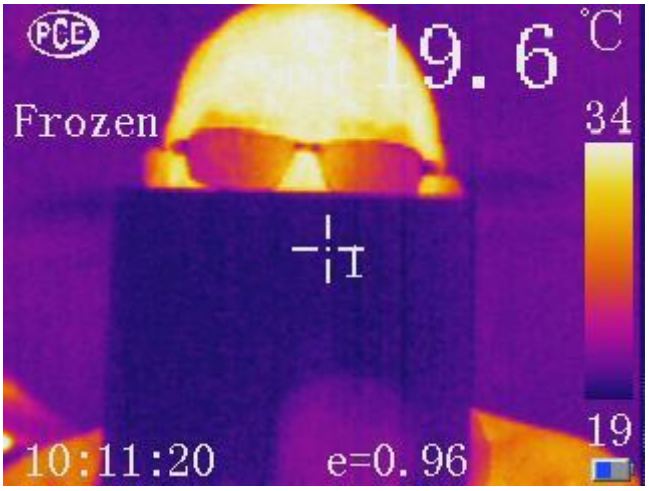
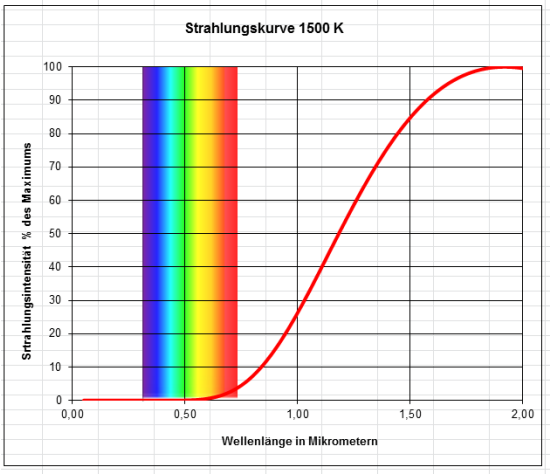
Landeshauptstadt Hannover

Schulbiologiezentrum



$$Q = e\sigma AT^4$$



19.91

Experimente mit Wärmebildkamera

Dezember 2015

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover/Energie-LAB

Titel:
Experimente mit der Wärmebildkamera

Titelbild: Ingo Mennerich

Arbeitshilfe 19.91

Verfasser: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info, www.energie-lab.de

Inhalt

Vorwort: 1

Wärmestrahlung: Unsichtbares "Licht" fühlbar gemacht 4

Phänomene 5

Eine „unanständige“ Geschichte als Einstieg? 7

Was ist eine Wärmebildkamera? 7

Temperatur, Wärmestrahlung und Strahlungskurven 8

Warum strahlt ein Körper nicht nur auf einer, sondern vielen Wellenlängen? 11

Glühlampen und Farbtemperatur 15
Planck´sches Strahlungsspektrum und T^4-Gesetz 16

Arbeitsblatt: Oberflächenbeschaffenheit und Wärmeabgabe 21

Arbeitsblatt: Theoretische und praktisch gemessene Wärmeverluste 22

Planck´sche Strahlungsverteilung zum Ausprobieren 23

Eine selbst gewickelte Glühwendel als Wärmequelle 24

Errötender Draht 24

Arbeitsblatt: Strahlungskurven und Wellenlängen bei verschiedenen Oberflächentemperaturen 26

Nachweis der Wärmestrahlung mit der Thermosäule 27

Die Glühwendel und die Thermokamera 28

Hinter die Dinge schauen: Ein schwarzer Müllsack ist durchsichtig 28

Wie genau misst die Wärmebildkamera? 30

Teewasser kochen 30

Restwärme einer Herdplatte 30

Experimente mit Wärmepumpe und Wärmebildkamera: 31

Die Vorher-Nachher-Show: Nachwärme 32

Infrarotstrahlung wird reflektiert: Spiegeleien mit unsichtbarem „Licht“ 33

Experimente mit der Glühwendel und verschiedenen "Spiegeln" 34

Experimente zum Treibhauseffekt 37

- Absorption durch Wasser bzw. Wasserdampf 39
- Experiment mit einem wasserdampfgesättigten Luftballon 42
- Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 und andere Gase 43
- Experiment mit einem CO_2-gefüllten Luftballon 44
- Unser Beitrag zur IdeenExpo 2007: CO_2 -Treibhauseffekt in der Röhre 47
- CO_2-Treibhauseffekt und von einer Modell-Erde emittierte Wärmestrahlung 49

Kurse im Energie-LAB und Ausleihmaterial des Schulbiologiezentrums 49

Vorwort:

Wer sich mit dem "Klimawandel" und dem vom Menschen verursachten CO_2-Anstieg beschäftigt, landet schnell beim Thema „Treibhauseffekt“ und der (vermeintlich durch menschliche Aktivitäten gestörten) Strahlungsbilanz der Erde. Eine ausgeglichene Strahlungsbilanz geht von dem hypothetischen Zustand aus, dass der Strahlungs-„Input“ in das System Erde dem „Output“ entspricht. Wären beide im Gleichgewicht, wäre das Klima „stabil“.

Bei einem nur von der Sonne beheizten Treibhaus gilt, dass es (tagsüber!) weniger Strahlung abgibt als es von außen empfängt. Umgangssprachlich heißt das: Das Treibhaus lässt die Sonne hinein, die Wärme aber nicht wieder hinaus.

Der eigentliche „Treibhauseffekt“ beruht in erster Linie darauf, dass die die durch Konvektion aufsteigende warme Luft an der Treibhausdecke am weiteren Aufstieg gehindert wird und die unter Glas „getriebenen“ Pflanzen bleiben daher in einer warmen Atmosphäre bleiben.

Glas ist für Licht durchsichtig, für Wärmestrahlung über weite Wellenlängenbereiche dagegen nicht. Das scheint insofern paradox, als das sich Licht und Wärmestrahlung qualitativ nicht unterscheiden. Beide sind Teilbereiche des elektromagnetischen Strahlungsspektrums und unterscheiden sich nur quantitativ in ihrer Energie und damit Wellenlänge.

Dieser Baustein, der sich mit der "Wärmestrahlung" und ihrer Visualisierung durch IR-Kameras im Unterricht beschäftigt soll Ihnen Anregungen geben, den physikalischen Hintergrund des auf den Strahlungsaspekt reduzierten "Treibhauseffektes" möglichst anschaulich und durch die Schüler einbeziehende Experimente zu untersuchen.

Mit "Strahlung" werden die meisten zunächst Radioaktivität, Handys oder der "Mikrowelle" assoziieren, vielleicht auch Röntgengeräte, Radar oder Radio/Fernsehen. Elektromagnetische Strahlen also, die von vielen pauschal als gesundheitlich problematisch oder gefährlich eingestuft werden.

Elektromagnetische Strahlung ist durch zwei Kenngrößen definiert: Die Wellenlänge und die Frequenz.

Unter Wellenlänge verstehen wir die Länge der als "Wellen" gedachten Schwingungen in Metern, wobei sich eine Welle aus einer über der Nulllinie liegende positiven und einer unter null liegenden negativen Halbwelle zusammensetzt.

Unter Frequenz ist die Schwingungshäufigkeit pro Sekunde zu verstehen. Sie wird in Hertz angegeben.

Je höher die Frequenz desto kürzer die Wellenlänge.

Je höher die Frequenz und je kürzer die Wellenlänge, desto größer ist die von der Strahlung transportierte Energie.

Licht und Wärme sind tendenziell eher positiv besetzt, vor allem, wenn sie von der "guten Sonne" stammen und nur wenige bringen sie mit dem Begriff "Strahlung" zusammen. Eher mit "Strahlen", also den "Sonnenstrahlen" mit denen die Sonne auf Kinderzeichnungen umgeben sind und die gelb und freundlich sind.

Unter physikalischer Perspektive gehört auch das Licht zur elektromagnetischen Strahlung und ist vom Wesen her nichts anderes als das, was vom Antennenmast ihres Lieblingssenders abgestrahlt wird.

Es hat nur eine andere (kürzere) Wellenlänge und eine andere (höhere) Frequenz und nimmt daher einen anderen Platz im über viele Zehnerpotenzen hinwegreichenden elektromagnetischen Spektrum ein.

Und es braucht andere Empfangseinrichtungen: Während Sie zum Rundfunkempfang im Auto ein Radio und eine heute meist kurze auf dem Dach montierte, an einen gummierten Bleistift erinnernde Antenne brauchen und ihr Radio nur "blind" rauscht, wenn Sie diese nach dem Besuch der Waschanlage nicht wieder einsetzen brauchen wir zum Empfang des Lichtes unsere Augen. In der Antenne wie im Auge löst elektromagnetische Strahlung elektrische Prozesse aus die vom Radio bzw. vom Gehirn übersetzt werden.

Wärmestrahlung ist "Licht" für die unsere Augen keine "Antennen" haben. Wir spüren sie aber auf der Haut wenn wir mit geschlossenen Augen in der Nähe eines Kamins sitzen. Wärmestrahlung wird auch Infrarotstrahlung genannt: Ihre Wellen sind länger als die des (roten) Lichtes, ihre Frequenz und damit ihr Energiegehalt geringer. Am anderen Ende des sichtbaren Spektrums steht das kurzwelligere, höherfrequente UV-Licht, dass uns obwohl "Licht" genannt, unsichtbar bleibt. Nur die Folgen (Sonnenbrand) sehen wir mit den Augen.

Hätten Sie gedacht, dass Sie selbst elektromagnetische Strahlung abgeben? Und dass man sogar angeben kann, in welchem Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich und mit welcher Intensität das geschieht? Letzteres lässt sich ermitteln, weil die, Wellenlänge bzw. Frequenz bestimmende Körpertemperatur bekannt ist.

Wenn nachts ein Polizeihubschrauber mit einer an Bord mitgeführten Wärmebildkamera in der Nähe eines Tatorts seine Kreise zieht, besteht die Chance, dass der Täter selbst in tiefdunkler Nacht aufgespürt wird. Weil er Strahlung emittiert und weil die Kamera diese Strahlung "sehen" kann.

Wärmestrahlung verhält sich physikalisch wie Licht. Sie wird an geeigneten Flächen wie von einem Spiegel reflektiert (Einfallswinkel = Ausfallswinkel), durchdringt bestimmte Stoffe oder wird von ihnen absorbiert.

Hier gibt es verblüffende Unterschiede zwischen Infrarot und dem sichtbaren Licht. Was im einen Fall durchsichtig, ist es im anderen Fall überhaupt nicht und umgekehrt.

Alien in dunkler Nacht…

Dieses "Selfie" wurde im vollständig abgedunkelten Raum mit der IR-Kamera gemacht.

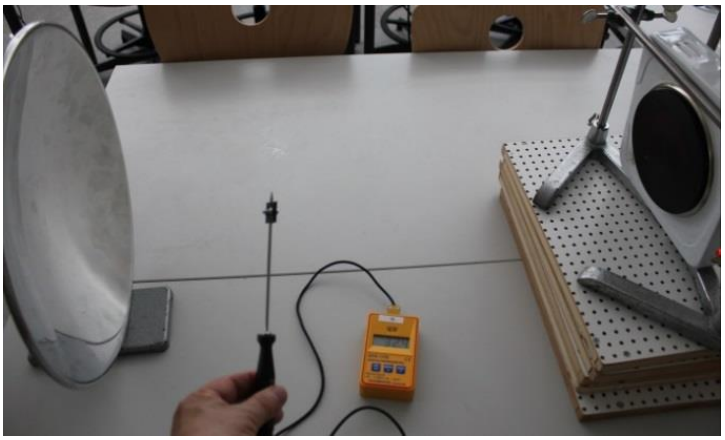
Wärmestrahlung: Unsichtbares "Licht" fühlbar gemacht

Dass im Brennpunkt eines Parabolspiegels Sonnenlicht so konzentriert werden kann, dass man damit kochen kann hat sich herumgesprochen.

Hier wird ein aus Papier gerollter "Fidibus" zum Brennen gebracht.

Klappt das auch mit dem "unsichtbaren Licht", der Wärmestrahlung?

Ein metallener Parabolspiegel wird in etwa einem Meter Abstand so positioniert, dass er die von der Herdplatte ausgehende Strahlung reflektiert und sie im Brennpunkt konzentrieren kann.



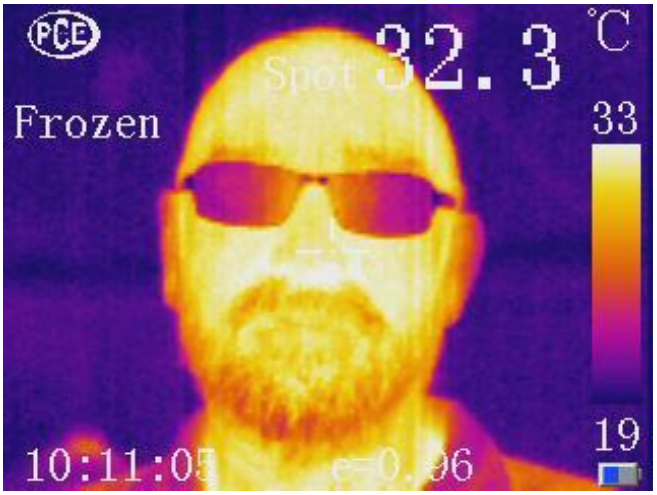
Wer mit dem Finger nach dem "Hotspot" suchen möchte sollte darauf eingestellt sein, dass es wehtun könnte:

Die im Brennpunkt gemessene Temperatur übersteigt leicht 80°C!

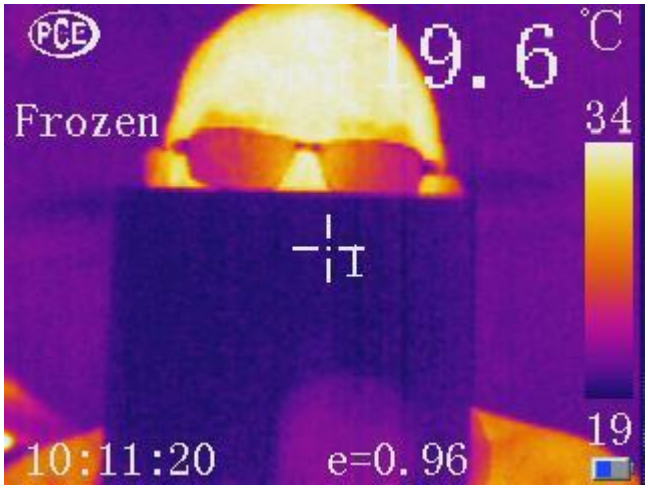
Mit etwas Geschick kann man so einen Streichholzkopf zur Selbstentzündung bringen.

Im Energie-LAB haben wir den Reflektor eines Autoscheinwerfers zu einem kleinen "Sonnenkocher" umgebaut. , z.B. der in dessen Brennpunkt (der noch innerhalb des Spiegels liegt) ein winziger "Kochtopf" hängt. Der Reflektor besteht aus poliertem Metall.
Im Brennpunkt des Reflektors wird es richtig heiß: Wenn man nur wenig Wasser in den Topf gibt kann man es mit etwas Geschick mit dem im Fokus gebündelten Sonnenlicht zum Kochen bringen.
Das Faszinierende unter dem Aspekt der Wärmestrahlung: Das funktioniert auch wenn man die Sonne durch eine Herdplatte ersetzt!

Phänomene



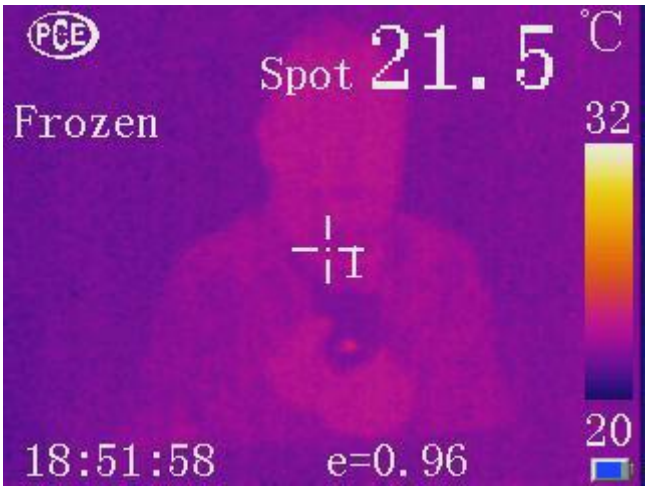
Keine Sonnenbrille!



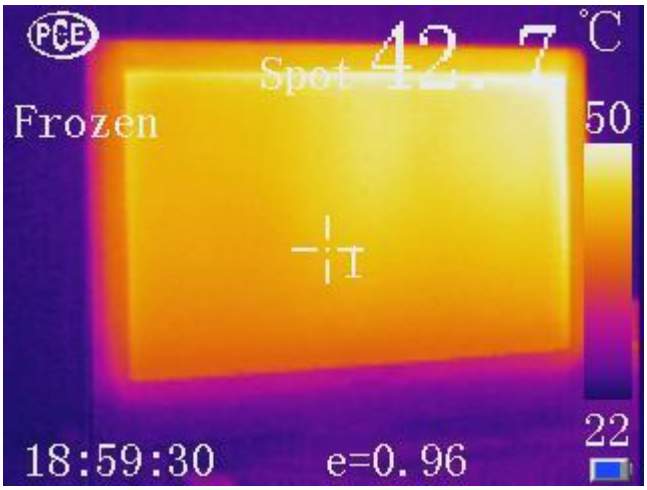
Man kann sich auch hinter Glas verstecken.

Nicht der Ajatollah und auch kein Heiliger:
Hier sieht die Wärmebildkamera durch einen aufgeblasenen und vor das Gesicht gehaltenen Luftballon.

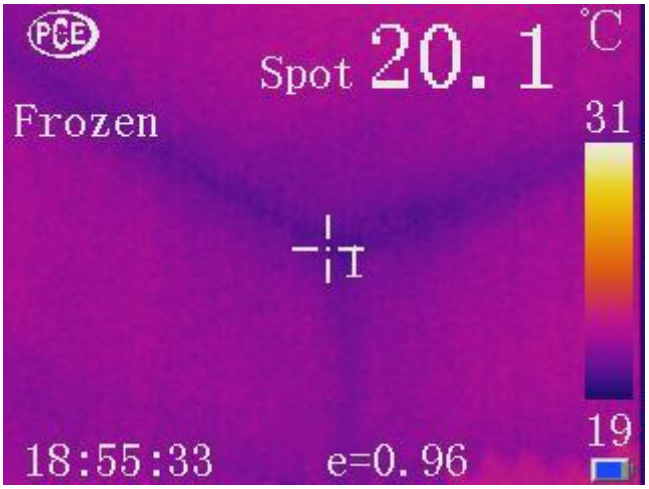
Für Infrarotlicht ist der Luftballon nahezu durchsichtig



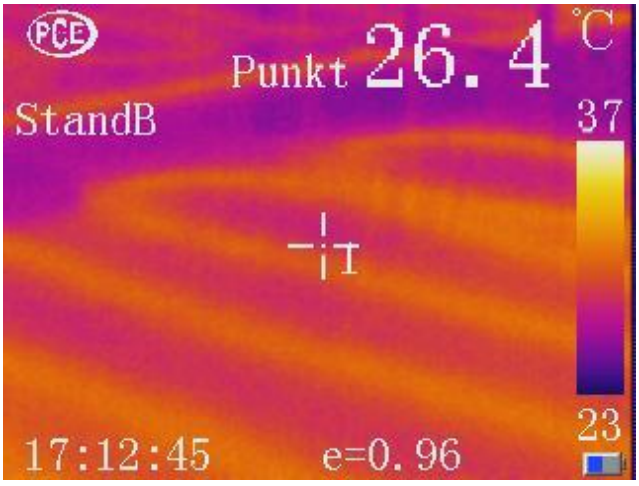
Mit einer Glasscheibe gemachtes "Selfie"



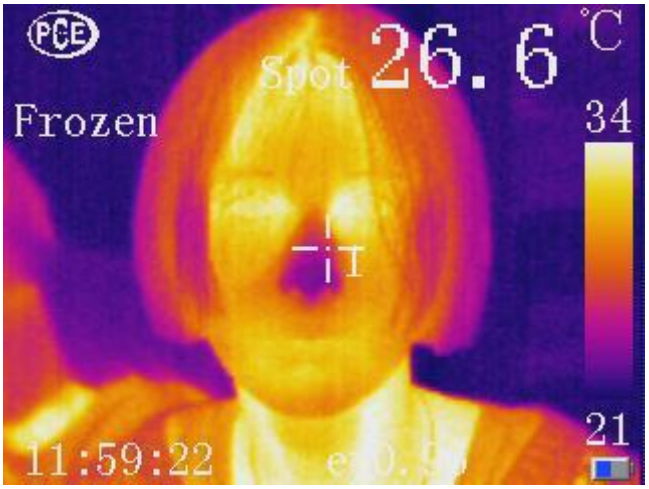
Kein Heizstrahler im Bad: Flachbildschirm



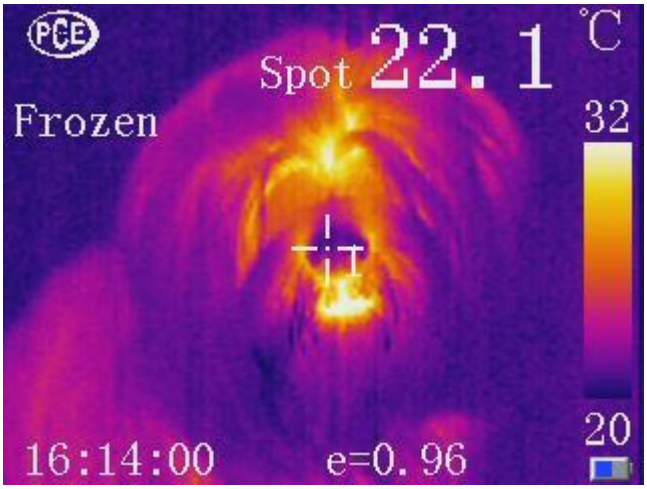
String-Tanga?
Nein: Zimmerdecke (Außenecke), dort auch gerne Schimmelbildung



Fußbodenheizung sichtbar gemacht:



Nicht der Clown: Nur eine kalte Nase!



Natürlicher Pullover: Tibet-Terrier „Fiene“

Eine „unanständige“ Geschichte als Einstieg?

Die neue Nachbarin…

Otto K. war nicht dumm. Er wusste sich in den meisten Lebenslagen gut zu helfen. Aber er war einsam. Bis – direkt gegenüber - die neue Nachbarin einzog. Supersexy! Sie saß öfter auf dem Balkon und Otto K. konnte schon nach wenigen Tagen an nichts anderes mehr denken als an diese Frau…
Was sie wohl machte, nachdem spätabends das Licht in ihrem Fenster ausgegangen war?
Im Internet stieß er auf „Wärmebildkameras“. So eine heiße Frau müsste doch eine Menge Wärme abgeben. Nur: Solche Spezialkameras schienen sehr, sehr teuer zu sein.
Aber das war es ihm wert. Er Investierte in einen Traum und orderte per Mausklick eine IR-Kamera, die tags darauf durch einen schlecht bezahlten jungen Mann in einem gelbroten Lieferwagen direkt an seine Wohnungstür gebracht wurde.
Otto K. schraubte die Kamera auf ein Stativ und richtete sie auf das gegenüber liegende Fenster.
Und wartete….

Sandra P. saß blickte durch ihr Balkonfenster auf das Haus gegenüber und auf den unsympathischen Typ immer wieder herüberstarrte. Ihr Blick fiel auf eine, auf seinem Balkon installierte und offensichtlich auf ihre Wohnung gerichtete Art Videokamera. Plötzlich fühlte sie sich beobachtet. Was hatte diese Kamera gesehen und aufgezeichnet. Was hatte der Typ von gegenüber möglicherweise ins Netz gestellt?
Sandra P. beschloss, ihr Fenster, zumindest nachts, mit einer schwarzen Folie zu verdecken. Schwarze Mülltüten gab es in jedem Baumarkt und sie freute sich darauf, dem Typ von gegenüber eins auszuwischen. Nun, da es bald es bald Sommer wurde und sie gerne bei offenem Fenster schlief, war diese preiswerte Art von Jalousie wohl die optimale Lösung…

Was ist eine Wärmebildkamera?

Eine Wärmebild-, Thermo- oder Infrarot(IR)-Kamera ist ein mit tausenden von so genannten Mikrobolometern ausgestattetes Gerät dass die Temperaturverteilung an den Oberflächen von Objekten registriert. Bolometer verwandeln Strahlungsenergie in eine proportionale Spannung um. Wie bei einer Digitalkamera die Pixel sind die Mikrobolometer in einer Matrix angeordnet. Die Spannung jedes einzelnen Bildpunktes wird nach einem bestimmten Schema abgelesen und daraus auf einem Flüssigkeitskristall (LCD)-Bildschirm in so genannte „Falschfarben“ übersetztes ein Bild erzeugt. Jede Farbe repräsentiert eine bestimmte Temperatur, blau zeigt kalte, weiß heiße Flächen an. Der dazustellende Temperaturbereich lässt sich einstellen und wird mit den Maximal- und Minimalwerten sowie der passenden Farbskala ins das Display eingeblendet.

Temperatur, Wärmestrahlung und Strahlungskurven

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts (0 Kelvin = - 273°C) gibt Strahlung ab. Elektromagnetische Strahlung.

Das gilt nicht nur für Herdplatten, Wildkaninchen, Schneebälle oder Tiefkühlpizzen sondern für alle Objekte im Kosmos. Ob Sie es nun wollen oder nicht: Auch Sie strahlen!

Strahlung, das klingt für viele unheimlich und nach etwas, was man besser vermeiden sollte.

Strahlung klingt nach Atombomben, Tschernobyl, Handys, Röntgen-oder Radargeräten.

Auch an der Mikrowelle scheiden sich die Geister.

Hier gilt zu unterscheiden zwischen der Strahlung, die ein Mikrowellenherd erzeugt und der thermischen Mikrowellenstrahlung. Der Mikrowellenherd erzeugt, wie ein Rundfunk- oder Fernsehsender, elektromagnetische Strahlung von nur einer Frequenz. Während der NDR 2 in Hannover auf 96 Megahertz sendet, strahlt die Mikrowelle ihre Energie bei 2,45 Gigahertz (oder 2450 Megahertz) ab. Das entspricht einer Wellenlänge von 12,2 cm. Bei dieser Frequenz schwingen die zu „Clustern“ vereinigten Wassermoleküle am besten mit. Damit der Mikrowellenherd seine Aufgabe erfüllen kann muss ihm Energie in Form von elektrischem Strom zugeführt werden.

Was unterscheidet die Mikrowellenstrahlung von der thermischen Strahlung, die die noch nicht aufgetaute Pizza abgibt? Die Pizza strahlt auch ohne Energiezufuhr! Sie strahlt allein auf Grund der in ihr enthaltenen Wärme, wobei Wärme im relativen Sinne gemeint ist: Sie strahlt auch bei Minustemperaturen!

Würde man die Pizza immer weiter abkühlen, verlangsamt sich der Rhythmus der Schwingungen um schließlich, bei -273,15°C zum Stillstand zu kommen. Das ist der absolute Nullpunkt mit der absoluten Temperatur 0 Kelvin. Erst dann gäbe die Pizza keine Strahlung mehr ab.

Je wärmer die Pizza, desto stärker und schneller der Takt der Schwingungen.

Anders als der auf einer Frequenz bzw. Wellenlänge schwingende Oszillator eines Mikrowellenherdes oder eines Handys schwingt die Pizza auf einem ein breites Band von Wellenlängen bzw. Frequenzen überstreichenden Spektrum. Die Pizza hat also keine bestimmte Wellenlänge oder Frequenz.

Warum kann eine tiefgefrorene Pizza, der doch offensichtlich kein Strom zugeführt wird, elektromagnetische Strahlung abgeben? Und könnte man sie im Radio hören?

Die Pizza besteht aus vielen Molekülen die sich wiederum aus Atomen zusammensetzen. Diese Teilchen schwingen hin und her und mit ihnen die zu den Atomen gehörenden Elektronen. Diese geladenen Teilchen erfahren somit eine sich periodisch ändernde Beschleunigung. Werden geladene Teilchen beschleunigt oder abgebremst entsteht ein elektromagnetisches Wechselfeld, also elektromagnetische Strahlung.

Bei einem Rundfunk- oder Fernsehsender, bei Mikrowellenherden, aber auch bei unseren Handys werden Elektronen durch eine elektronische Schaltung, einem Oszillator, zum rhythmischen Richtungswechsel gezwungen. Die dabei entstehende Strahlung wechselt ihr Vorzeichen im selben Takt wie die hin und her

beschleunigten Elektronen. Schwingen diese 96 Millionen Mal pro Sekunde, dann strahlt der Sender auf der Frequenz 96000000 Hertz (Hz) oder 96 Megahertz (MHz). Ein Hz ist eine Schwingung pro Sekunde.

Der Begriff „elektromagnetisch“ impliziert, dass die Strahlung elektrischen und magnetischen Charakter hat.

Elektromagnetische Strahlung besteht je nach physikalischer Betrachtungsweise entweder aus

- Teilchen (Photonen)

oder

- Wellen (Schwingungen)

Betrachtet man die Strahlung unter dem Wellenaspekt ist sie durch folgende Parameter gekennzeichnet

- Wellenlänge λ (Lambda)
- Frequenz (*f*)
- Amplitude

Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei Wellenmaxima oder –minima. Sie wird in Metern (m) angegeben.

Die Frequenz ist die Häufigkeit der Schwingungen pro Zeit. Sie wird in (Schwingungen pro Sekunde (Herz, Hz) angegeben.

Wellenlänge und Frequenz sind über die Lichtgeschwindigkeit *c* miteinander gekoppelt.

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad f = \frac{c}{\lambda} \qquad c = f * \lambda$$

Der NDR mit der Frequenz 96 MHz sendet also auf der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{300000000\text{m/s}}{96000000\text{Hz}} = 3{,}1\text{m}$$

Die Mikrowelle ist mit 12,2 cm erheblich kurzwelliger und wird damit kaum als Störgeräusch beim Radiohören auffallen. Und was ist mit der Pizza? Strahlt sie in anderen Wellenlängenbereichen oder ist ihre Strahlung, d.h. die Amplitude der Strahlung einfach nur zu schwach?

Unter Amplitude verstehen wir die Höhe einer Welle, also die Höhendifferenz zwischen dem Wellenberg und dem Wellental. Je mächtiger die Welle, desto größer ihre Amplitude. Das gilt auf für elektromagnetische Strahlung: Das von der Antenne aufgefangene Signal muss eine bestimmte Amplitude besitzen, damit das Handy es verarbeiten kann. Liegt die Amplitude unter einem bestimmten Schwellenwert sitzen wir im "Funkloch".

Wie schon erwähnt „sendet“ ein thermisch strahlender Körper, anders als ein Radio- oder Fernsehsender, der seine Programme auf bestimmten, mit dem Tuner einstellbaren Wellenlängen abstrahlt, über einen

breiten Wellenlängenbereich hinweg. Schaut man sich die Stärke der Strahlung über alle Wellenlängen an, entsteht das Bild einer „Strahlungskurve“ mit einem Intensitäts-Maximum

Zwischen der Temperatur des strahlenden Körpers und der Wellenlänge des Intensitätsmaximums besteht eine einfache Beziehung: Je heißer der Strahler, desto kürzer die Wellenlänge. Mit dem Wien´schen Verschiebungsgesetz ist das Strahlungsmaximums leicht zu berechnen:

$$\lambda_{max} = \frac{2897{,}8\text{mm} * \text{K}}{T}$$

Oder nach der Temperatur aufgelöst:

$$T = \frac{2897{,}8\text{mm} * \text{K}}{\lambda_{max}}$$

Dabei ist λ_{max} (lambda) die Wellenlänge in Millimetern (mm) und T die Temperatur in Kelvin (K). Beide sind über die Konstante 2897,8mm*K miteinander verknüpft.

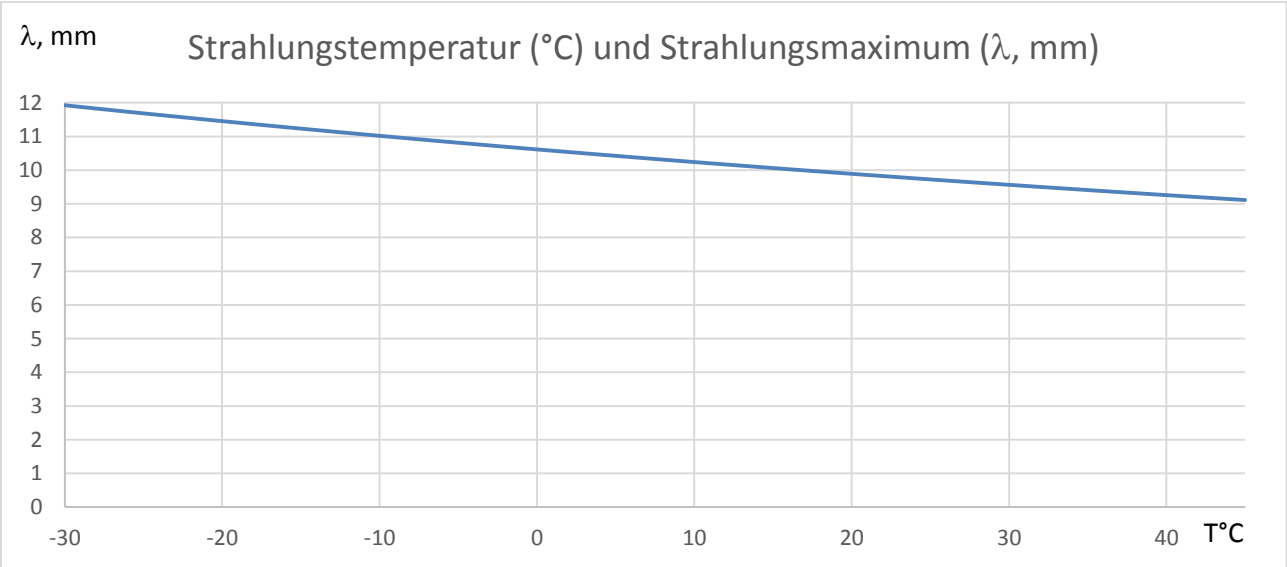
Ein Beispiel:

Bei welcher Wellenlänge liegt das Strahlungsmaximum eines Körpers mit einer Temperatur von 37°C?

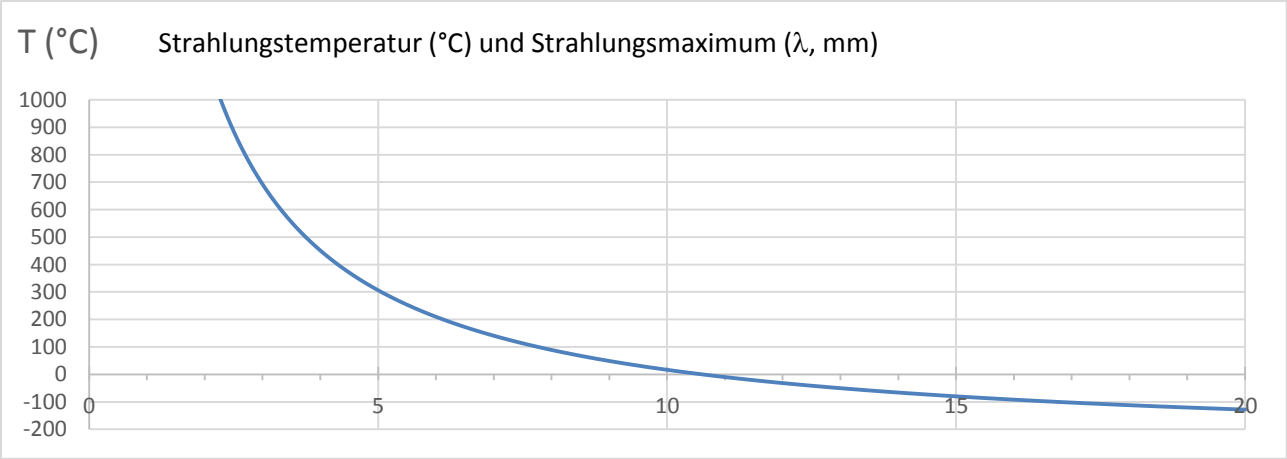
37°C entspricht 273K + 37K = 310 K.

$$\lambda_{max} = \frac{2897{,}8\text{mm} * \text{K}}{310K} = 9{,}347\text{mm}$$

Da im Infrarotbereich Wellenlängen üblicherweise in der Einheit Mikrometer angegeben werden multiplizieren wir das Ergebnis mit dem Faktor 1000 und erhalten 9347µm.



Ein Mensch strahlt (und das kann er nicht verhindern!) also Mikrowellen ab. Das allerdings ist nicht mit der „Mikrowelle“ gleich zu setzen, die ihre, auf die Pizza gestrahlte Energie nur auf einer Wellenlänge konzentriert abgibt.



Warum strahlt ein Körper nicht nur auf einer, sondern vielen Wellenlängen?

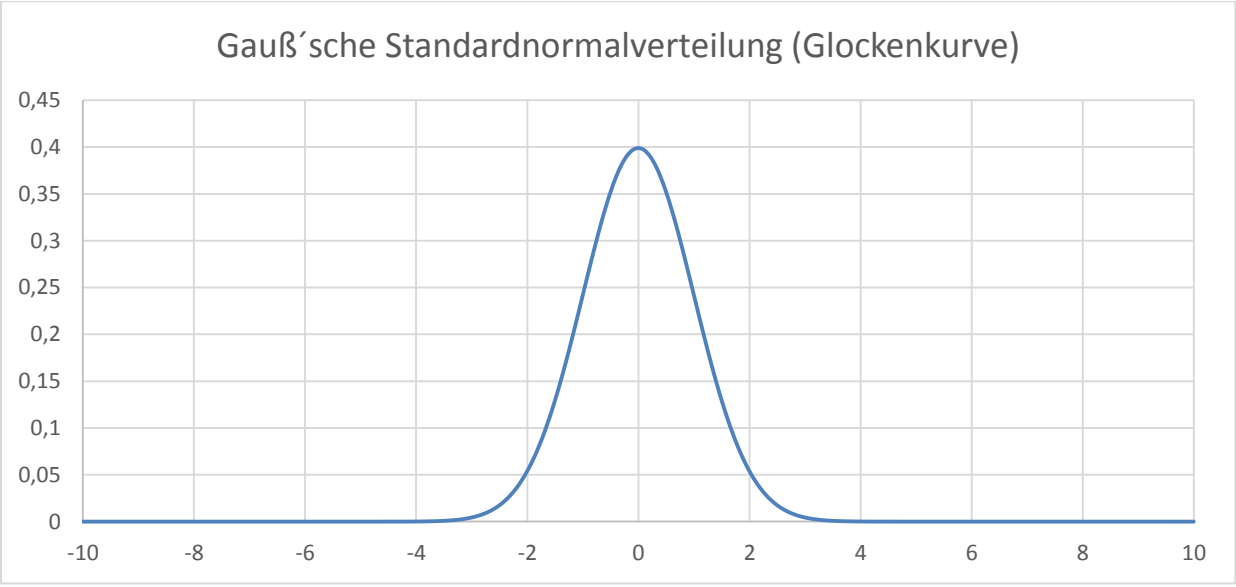
Ein Körper besteht aus vielen Teilchen, Atomen oder Molekülen, und diese Teilchen bewegen sich, je wärmer, desto stärker. Wärme ist, physikalisch gesehen der Ausdruck hin und herschwingender Teilchen und die Bewegung der Ausdruck kinetischer Energie. Die Teilchen eines Körpers bewegen sich nicht im gleichen Rhythmus und in gleicher Stärke : Das eine Teilchen schwingt stärker und schneller, das andere schwächer und langsamer. Die kinetische Energie ist aiso auf statistische Weise mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten über die Teilchenmenge verteilt.

Eine mögliche Analogie: Wenn viele Eurostücke auf einen Tisch geworfen werden, ist die Wahrscheinlichkeit, dass alle Münzen „Kopf“ (bzw. „Zahl“) zeigend liegen bleiben sehr gering, aber nicht gleich Null. Am wahrscheinlichten ist, dass „Kopf“ bzw, „Zahl“ jeweils die Hälfte ausmachen.

Wenn alle Ereignisse mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten würden ergäbe sich eine Gauß´sche Normalverteilungskurve, umgangssprachlich wegen ihrer Form auch Glockenkurve genannt.

Die Formel dazu ist

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$$



Dass, was wir als Temperatur messen, setzt sich aus der kinetischen Energie aller Teilchenbewegungen zusammen, also das statistische Mittel.

Warum ist die Strahlungskurve asymmetrisch?

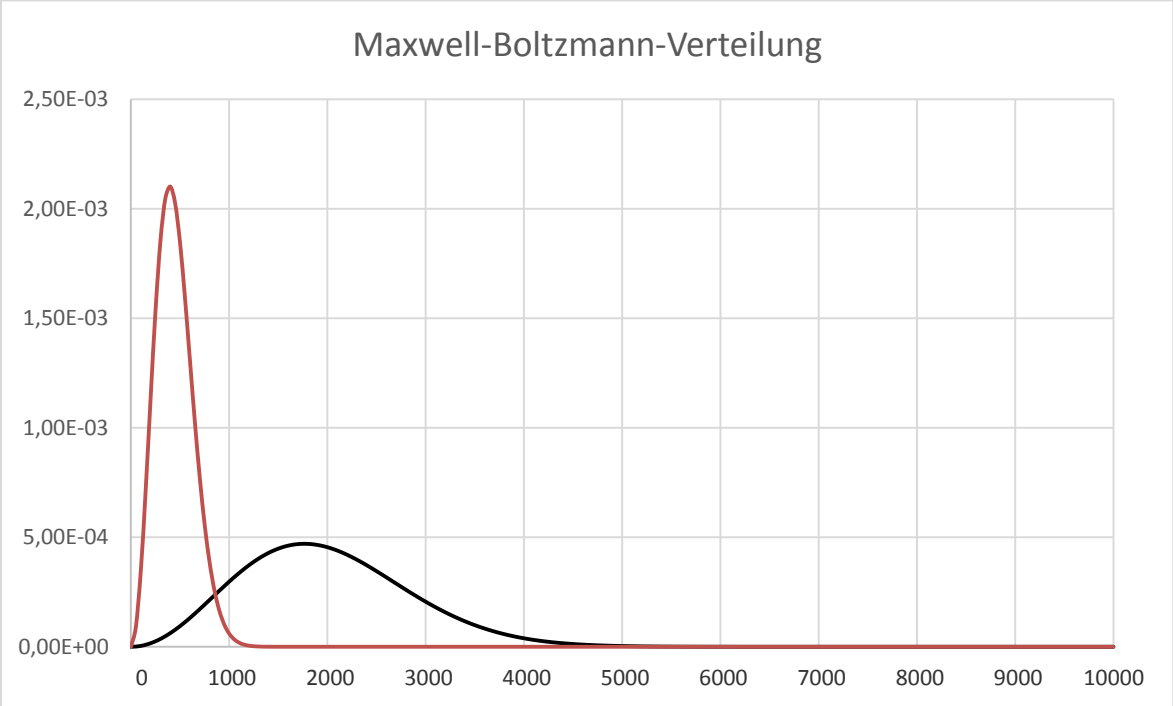
Die kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit der Teilchen folgt nicht in Form einer symmetrischen Glockenkurve sondern folgt der nach ihren Entdeckern Maxwell-Boltzmann-Verteilung.

Die dazugehörige Formel ist

$$f(v) = 4\pi v^2 n \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} * e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Die folgende Abbildung zeigt die Geschwindigkeitsverteilungen von Gasmolekülen (hier O_2) bei 300 K (rot) bzw. 6000 Kelvin (schwarz). Daraus ist zu ersehen:

- Die Geschwindigkeitsverteilung überstreicht beginnend mit Null einen nach oben offenen Bereich
- Der Anteil hoher Geschwindigkeiten ist gering aber es gibt keine höchste Geschwindigkeit
- Es gibt anteilig nur wenige Teilchen, die sich sehr schnmell bewewgen.
- Die Spitze der Kurve zeigt die wahrscheinlichste Teilchengeschwindigkeit.
- Die wahrscheinlichste Geschwindigkeit ist nicht die mittlere Geschwindigkeit, da die Kurve assymmetrisch ist.
- Je höher die Temperatur, desto höher ist die wahrscheinlichste Geschwindigkeit.
- Je höher die Temperatur, flacher ist die Spitze und desto desto breiter die Kurve.



Die Strahlungskurve zeigt beidseitig des Maximums eine steile kurzwellige, und eine flache langwellige Flanke. Es gilt: Je kurzwelliger die Strahlung, desto energiereicher die Photonen.

Für die Energie eines Photons gilt

$$E = \frac{h * c}{\lambda}$$

h →Planck´sches Wirkungsquantum (6,63*10^{-34} Js)

c →Lichtgeschwindigkeit (3*10^{8} m/s)

λ →Wellenlänge (m)

Photonen der Wellenlänge 500nm

$$E = \frac{6{,}63 * 10^{-34}\,\mathrm{Js} * 3 * 10^{8}\,\mathrm{m/s}}{500 * 10^{-9}\mathrm{m}}$$

$$E = = 3{,}98 * 10^{-19}\mathrm{J}$$

Photonen der Wellenlänge 10000nm

$$E = \frac{6{,}63 * 10^{-34}\,\mathrm{Js} * 3 * 10^{8}\,\mathrm{m/s}}{10000 * 10^{-9}\mathrm{m}}$$

$$E = = 1{,}99 * 10^{-20}\mathrm{J}$$

- Die kurzwelligen Photonen (500nm) haben die 20fache Energie der langwelligen (10000nm).
- Die kurwellige Flanke der Kurve (0, λ_{max}) enthalten ein Viertel der Gesamtenergie, die langwellige (λ_{max}, ∞) drei Viertel .

Sie als Mensch strahlen, wie oben bereits angedeutet, über einen breiten Wellenlängenbereich hinweg. Wie sieht die Strahlungskurve eines thermischen Strahlers aus? Wie stark ist die gesamte abgegebene Strahlung? Wie stark ist die Strahlung bei jeder der abgegebenen Wellenlängen?

Die Wellenlängen- und Intensitätsverteilung folgt dem Planck´schen Strahlungsgesetz:

Um es gleich vorwegzunehmen: Die Formel sieht kompliziert aus und mag manchen abschrecken.

Da sie aber viele Konstanten enthält, lässt sie sich erheblich vereinfachen!

$$\mathrm{I}(\lambda, T) = \frac{2 * \pi * \mathrm{h} * \mathrm{c}^2}{\lambda^5 * \left(\mathrm{e}^{\frac{\mathrm{h*c}}{\lambda * \mathrm{k} * \mathrm{T}}} - 1\right)}$$

Darin sind enthalten:

I → Intensität W/m^2

λ →Wellenlänge der Strahlung (m)

T →Absolute Temperatur (Kelvin)

h →Planck´sches Wirkungsquantum (6,63*10^{-34} Js)

c →Lichtgeschwindigkeit (3*10^{8} m/s)

k →Boltzmann-Konstante (1,38*10^{-23} J/K)

Die Intensität I ist eine Funktion der Wellenlänge λ und abhängig von der Temperatur *T*.

π, h, c und k sind Konstanten.

Der Zähler $2 * \pi * \mathrm{h} * \mathrm{c}^2$ kann vereinfachend auch durch das (auf zwei Nachkommastellen gerundete) Produkt ersetzt ($3{,}74*10^{-16}$) werden.

Der ebenso reduzierte Zähler h*c im Exponenten ist gleich $1{,}99*10^{-25}$, daraus folgt:

$$\mathrm{I}(\lambda, T) = \frac{3{,}74 * 10^{-16}}{\lambda^5 * \left(\mathrm{e}^{\frac{1{,}99*10^{-25}}{\lambda*1{,}38*10^{-23}*\mathrm{T}}} - 1\right)}$$

Wird der Zähler im Exponenten gegen die Konstante k im Nenner gekürzt wird die Formel noch einfacher:

$$\mathrm{I}(\lambda, T) = \frac{3{,}74 * 10^{-16}}{\lambda^5 * \left(\mathrm{e}^{\frac{0{,}0144}{\lambda*\mathrm{T}}} - 1\right)}$$

Mit dieser stark reduzierten, durch Runden allerdings auch weniger genauen Formel lässt sich, bei einer bestimmten Temperatur, die Strahlungsintensität einer bestimmten Wellenlänge errechnen.

Beispiel:

Temperatur T = 20°C (= 293K), Wellenlänge λ = 10000 nm (= 0,00001m)

$$\mathrm{I}(\lambda, T) = \frac{3{,}74 * 10^{-16}}{0{,}00001^5\mathrm{m} * \left(\mathrm{e}^{\frac{0{,}0144}{0{,}00001\mathrm{m}*293\mathrm{K}}} - 1\right)}$$

$$\mathrm{I}(\lambda, T) = \frac{3{,}74 * 10^{-16}}{1^{-25} * (\mathrm{e}^{4{,}91} - 1)}$$

Da das Ergebnis die Leistung pro Quadratmeter in Bezug auf die Wellenlänge in Nanometer sein soll muss es, da die Formel auf der Einheit „m“ basiert, noch durch 1000000000 geteilt werden, denn 1 Nanometer ist der Milliardste Teil eines Meters.

Im konkreten Fall erhalten wir bei einer Temperatur von 20°C bei einer Wellenlänge von 10000 nm eine Intensität von 0,0277 W/m^2.

Mit der Planck´schen Strahlungsformel lässt sich eine Excel-Datei programmieren deren Wertepaare λ (Wellenlänge) und I (Intensität) nach Eingabe der Temperatur *T* als Diagramm erscheinen.

Der physikalische Hintergrund und die mathematische Herleitung der Formel können hier außen vor gelassen werden.

Daher nur die für unser Thema notwendigen Zusammenhänge:

Die Strahlung eines Körpers setzt sich aus einem, sich über ein breites Wellenlängen- bzw. Frequenzspektrum hinwegziehenden Spektrum zusammen. Jeder Wellenlänge / Frequenz entspricht eine, von der Temperatur des Strahlers abhängige Strahlungsintensität.

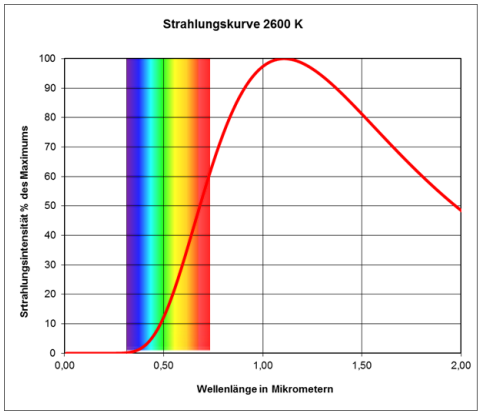
Die Intensitätskurve hat einen Scheitelpunkt, eine steile Flanke zur kurzwelligeren und eine sanft abfallende lange Flanke zur langwelligen Seite hin.

Das Maximum, also der Scheitelpunkt ist abhängig von der Temperatur des Strahlers.

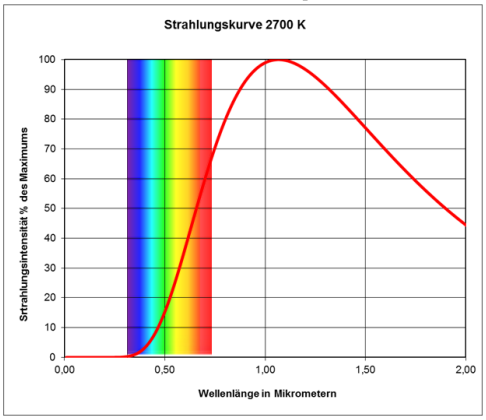
- Je heißer der Strahler, desto kurzwelliger die Strahlungsmaximum.
- Je heißer der Strahler, desto höher die Kurve und der Scheitelpunkt

Glühlampen und Farbtemperatur

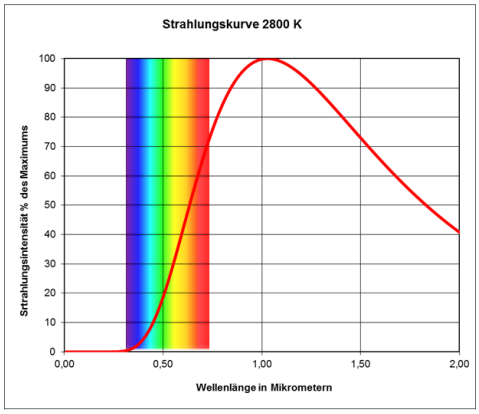
Die Farbtemperatur einer Glühlampe hängt von ihrer Leistung ab (Quelle Wikipedia, Farbtemperatur)
Beim Vergleich von Glühlampen wird deutlich, dass eine höhere Leistung nicht nur helleres sondern aufgrund der zunehmenden Verschiebung des Intensitätsmaximums zum kurzwelligen (blauen) Bereich ein immer weißeres Mischprodukt ergibt.



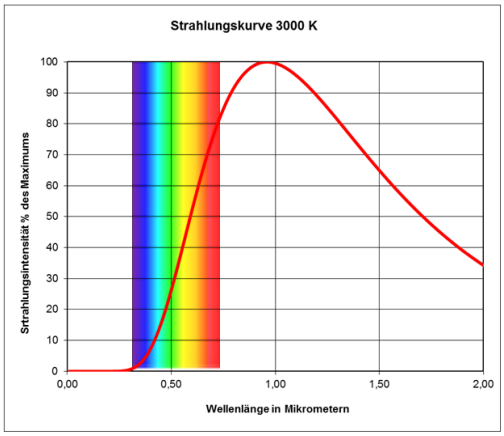
Glühlampe 40W, Farbtemperatur, 2600K, Strahlungsmaximum 1114 nm



Glühlampe 60W, Farbtemperatur, 2700K, Strahlungsmaximum 1073 nm



Glühlampe 100W, Farbtemperatur, 2800K, Strahlungsmaximum 1035 nm



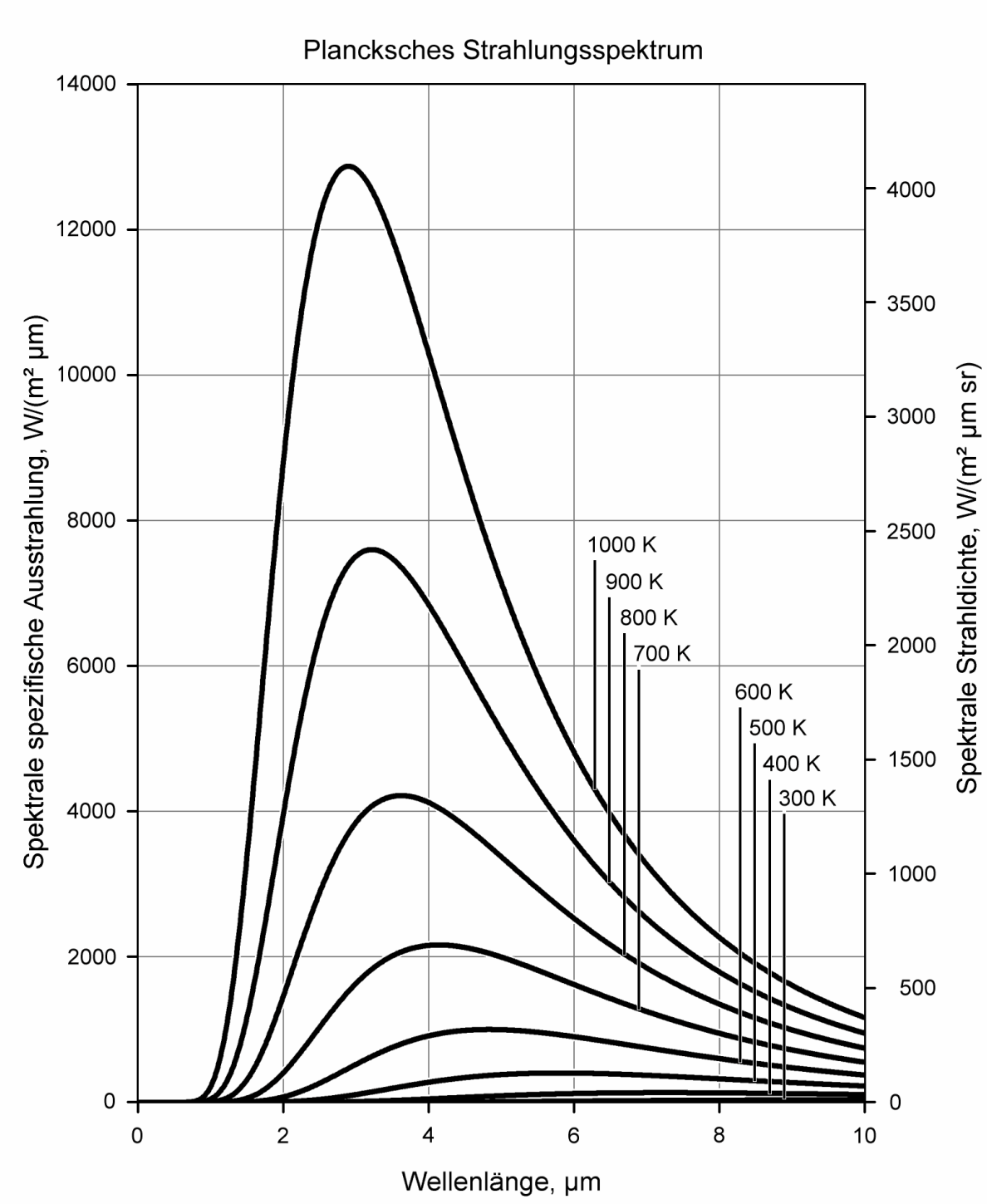
Glühlampe 200W, Farbtemperatur, 3000K, Strahlungsmaximum 966 nm

Aus Schulbiologiezentrum Hannover/Energie-LAB; „Deutschland sucht das Superlicht!“

Daraus folgt:

Je heißer der Strahler, desto energiereicher und damit kurzwelliger ist die Strahlung.

Planck´sches Strahlungsspektrum und T^4-Gesetz



Wikipedia, Planck´sches Strahlungsgesetz

Die Strahlungsintensität Q in Watt pro Quadratmeter lässt sich mit dem Stefan-Boltzmann -Gesetz berechnen.

Es wird umgangssprachlich auch „T^4“- oder „T-hoch-4“ Gesetz genannt, da die Intensitätszunahme der vierten Potenz der Temperatur folgt. Die Verdoppelung einer beliebigen Temperatur führt damit zu einer 16fachen Strahlungsintensität.

$$Q = \sigma A T^4$$

Q → Strahlungsintensität (W/m^2)

A → Strahlende Fläche (m^2)

σ (sigma) → Stefan-Boltzmann-Konstante: $5{,}67 * 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 * K^4}}$

Das „T^4“-Gesetz gilt nur für so genannte „Schwarze Strahler“, also (theoretische) Körper, die auf sie treffende Strahlung vollständig absorbieren. Nur „Schwarze Körper“ sind in der Lage, ihre Wärmeenergie vollständig abzustrahlen. Näherungsweise genügt im Experiment ein schwarzer Hohlraum mit einem Loch aus dem die Strahlung austreten kann.

Die Fähigkeit, die ausgekoppelte Strahlung zu emittieren wird durch den Emissionsgrad ε (epsilon) ausgedrückt. Er kann zwischen 1 (Schwarzer Strahler) und 0 (Spiegel) liegen.

Ein die Strahlung weitgehend oder gar vollständig reflektierender Körper wird durch Strahlung kaum bzw. nicht erwärmt. Die spiegelnden Innenflächen von Pizzakartons erfüllen genau diese Aufgabe. Die warme Pizza gibt Wärmestrahlung ab die den umgebenden Karton aber kaum erwärmen kann.

Die Thermographie stark reflektierender oder spiegelnder Körper wird Fehler erzeugen, solange der Emissionsgrad nicht korrekt eingestellt ist.

Das T^4-Gesetz muss daher um den Emissionsgrad erweitert werden:

$$Q = e\sigma A T^4$$

Mit sinkendem Emissionsgrad ε geht die abgestrahlte Intensität gegen Null.

Der abgestrahlten Energie steht die von der Umgebung absorbierte Energie gegenüber.

Beispiel:

Ein (unbekleideter) Mensch mit einer Hauttemperatur von 33°C gibt in einer Umgebung von 20°C etwa 160 W ab.

$$Q = \varepsilon\sigma A({T_S}^4 - {T_U}^4)$$

Wenn der Emissionsgrad des Menschen etwa 1 beträgt und seine Fläche etwa $2m^2$ ergibt sich:

$$Q = \varepsilon\sigma A(306\mathrm{K}^4 - 293\mathrm{K}^4) = 158{,}5\mathrm{W}$$

- Was gut absorbiert, strahlt (fast) immer gut ab
- Was gut strahlt wird (fast) immer gut absorbieren

Nach dem Kirchhoff´schen Strahlungsgesetz gilt, zumindest für ideale „Schwarze Strahler“:

Der Absorptionsgrad (a) ist dem Emissionsgrad (ε) proportional. Ein gut absorbierender Körper ist demnach auch ein guter Strahler und umgekehrt.

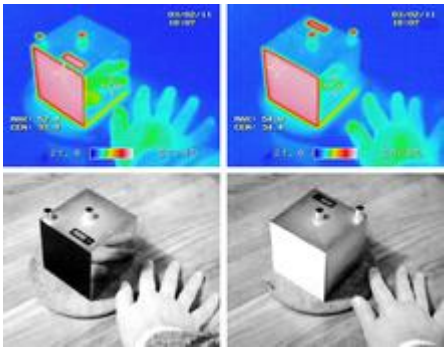
Hier gibt es aber Ausnahmen:

Das Absorptions- und Emissionsverhalten ist bei bestimmten Strahlern frequenzabhängig

Ein schwarzer Solarkollektor soll möglichst viel Sonnenlicht absorbieren und in Wärme umwandeln. Er soll die Wärme aber nicht wieder abstrahlen. Die Oberfläche des Absorbers muss daher einen hohen Absorptionsgrad, aber einen geringen Emissionsgrad aufweisen.

Heizkörper sollen Wärme möglichst gut abstrahlen. Die weiße Heizkörperfarbe reflektiert das Sonnenlicht (geringer Absorptionsgrad), hat aber einen hohen Emissionsgrad.

Ein Leslie-Würfel zeigt, dass die Wärmestrahlung eines Körpers von seiner Oberfläche abhängt.



Der mit Wasser gefüllte Messingwürfel hat je eine schwarze, weiße, polierte und raue Seite.

Obwohl der Würfel eine (!), vom Wasser bestimmte Temperatur hat, strahlt er die Wärme unterschiedlich ab.

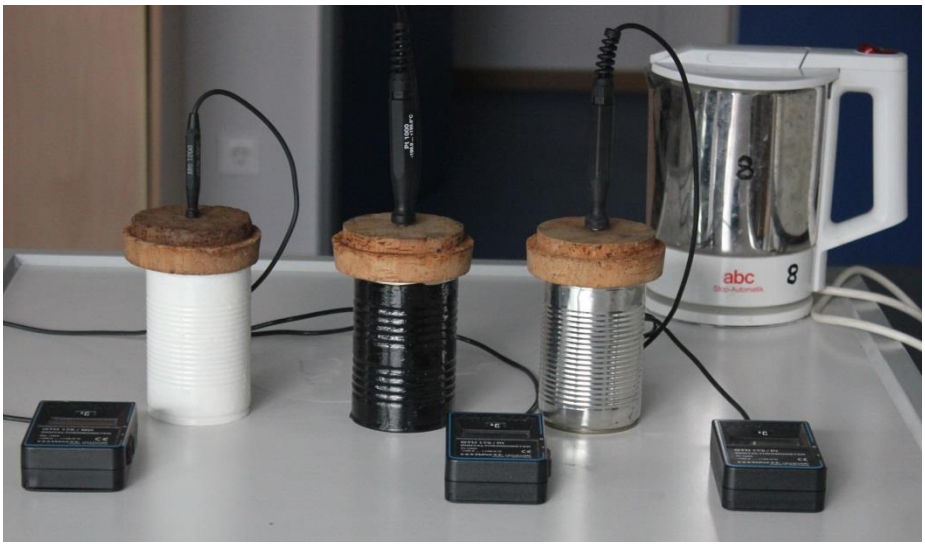
Wikipedia: Leslie-Würfel

Ein möglicher einfacher Ersatz für den Leslie-Würfel ist eine Reihe gleicher Konservendosen mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit:

- glänzend
- angeraut (Schmirgelpapier)
- angerostet
- verrostet
- schwarz lackiert
- weiß lackiert

Wenn man sie zeitgleich mit gleich viel heißem Wasser füllt wird das IR-Bild auf Grund der unterschiedlichen Emissivität uneinheitliche Temperaturen anzeigen.

Festzustellen ist auch, dass eine glänzende Dose die Wärme länger zu halten vermag als die angeraute oder gar verrostete Dose.



Versuch:

Dose 1 (weiß lackiert), Emissionsgrad ε ≈0,8

Dose 2 (schwarz lackiert), Emissionsgrad ε ≈0,8

Dose 3 (glänzend), Emissionsgrad ε ≈0,1

Inhalt V je 200ml Wasser mit T 80°C

Die Öffnungen der entdeckelten Dosen auf werden mit einem passenden, die Wärme nur geringfügig leitenden Schaumstoffstopfen (hier Korkdeckel mit Bohrung) verschlossen und auf einen dicken Styroporblock gestellt Die Dose ist damit ein Hohlzylinder, der nur über die Mantelfläche strahlt.

Maße der Dosen:

- 7,4 cm breit und 11 cm hoch
- Gesamtfläche A = $2\pi r^2 + 2\pi rh \approx 342\ cm^2$
- Mantelfläche = Gesamtfläche – 2x Grundfläche = 255 cm2
- Volumen $\pi r^2 h = 473\ cm^3$

Mit einem Wasservolumen von 400 ml, einer Starttemperatur von T_W 80°C und einer Umgebungstemperatur T_U von 20°C ergibt sich theoretisch:

$$Q = e\sigma A({T_W}^4 - {T_U}^4)$$

mit ε = 0,1

$$Q = 0{,}1 * \frac{5{,}67 * 10^{-8}\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}} * 0{,}0255\mathrm{m^2} * (353\mathrm{K^4} - 293\mathrm{K^4}) \approx 1{,}2\mathrm{W}$$

mit ε = 0,7

$$Q = 0{,}7 * \frac{5{,}67 * 10^{-8}\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}} * 0{,}0255\mathrm{m^2} * (353\mathrm{K^4} - 293\mathrm{K^4}) \approx 8{,}3\mathrm{W}$$

Daraus ließe sich der Temperaturabfall ΔT in Abhängigkeit der Zeit t berechnen:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta Q/\Delta t}{mc} = \frac{1{,}2\mathrm{W}}{(0{,}4\mathrm{kg}) * (4{,}19 * 10^3\mathrm{J/kg * K})} = 0{,}0007\mathrm{K/s}$$

bzw.:

$$\frac{8{,}3\mathrm{W}}{(0{,}4\mathrm{kg}) * (4{,}19 * 10^3\mathrm{J/kg * K})} = 0{,}005\mathrm{K/s}$$

Berechnungen nach Douglas C. Giancoli, Physik, Lehr- und Übungsbuch, Pearson-Verlag

Nach 10 Minuten (600s) wäre die Temperatur in der glänzenden Dose durch Abstrahlung um 0,4 K und in der angerosteten Dose um 3 K gefallen, also auf etwa 79,5 bzw. 77°C.

Die tatsächlichen Wärmeverluste sind durch Wärmeleitung und Konvektion erheblich höher. Im Vakuum allerdings würde nur die Strahlung wirksam.

Im Experiment waren die Temperaturen nach zwei Stunden von 80°C auf 29°C (schwarze Dose), 31°C (weiße Dose) und 37°C (unbehandelte Dose) gefallen.

Im Display der Wärmebildkamera ist deutlich zu sehen, dass die rechte, nicht lackierte und glänzende Dose deutlich kühler erscheint und weniger Strahlung abgibt als die beiden links davon stehenden.

Der rechts im Hintergrund stehende Wasserkocher zeigt das gleiche Strahlungsverhalten.

ARBEITSBLATT

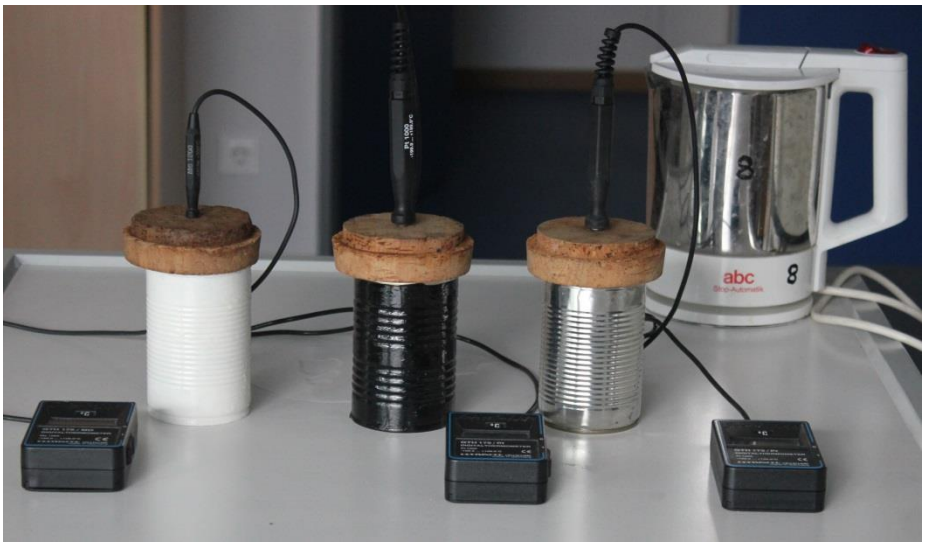
Problemstellung:

Hat die Oberflächenbeschaffenheit eines Gefäßes einen Einfluss auf die Wärmeabgabe?

- Bei diesem Experiment geht es um Wärmeverluste durch Strahlung.
- Konvektion und Wärmeleitung sollen daher unterdrückt werden.

Notiert die Umgebungstemperatur

Erhitze 1 Liter Wasser auf etwa 80°C und verteile es gleichmäßig und zügig auf die drei Dosen.



Dose 1 (weiß lackiert), Emissionsgrad ε ≈0,8

Dose 2 (schwarz lackiert), Emissionsgrad ε ≈0,8

Dose 3 (glänzend), Emissionsgrad ε ≈0,1

Inhalt V je 200ml Wasser mit T 80°C

Notiere die Wassertemperaturen im Abstand von 5 Minuten

t(min)	Dose I T °C	Dose 2 T °C	Dose 3 T °C	t(min)	Dose I T °C	Dose 2 T °C	Dose 3 T °C
0				25			
5				30			
10				35			
15				40			
20				45			

ARBEITSBLATT

Problemstellung:

In wie weit stimmen die theoretischen Wärmeverluste mit den in der Praxis gemessenen überein?

Berechnen Sie die theoretische Wärmeabgabe nach der Formel

$$Q = e\sigma A({T_W}^4 - {T_U}^4)$$

Q	→	Strahlungsintensität (W/m^2)
A	→	Strahlende Fläche (m^2)
σ (sigma)	→	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5{,}67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$
e	→	Emissionsgrad
T_W	→	Wassertemperatur
T_U	→	Umgebungstemperatur

Vergleichen Sie die theoretisch erwarteten Werte mit den praktisch gemessenen.

Wie erklären Sie mögliche Differenzen?

Planck´sche Strahlungsverteilung zum Ausprobieren

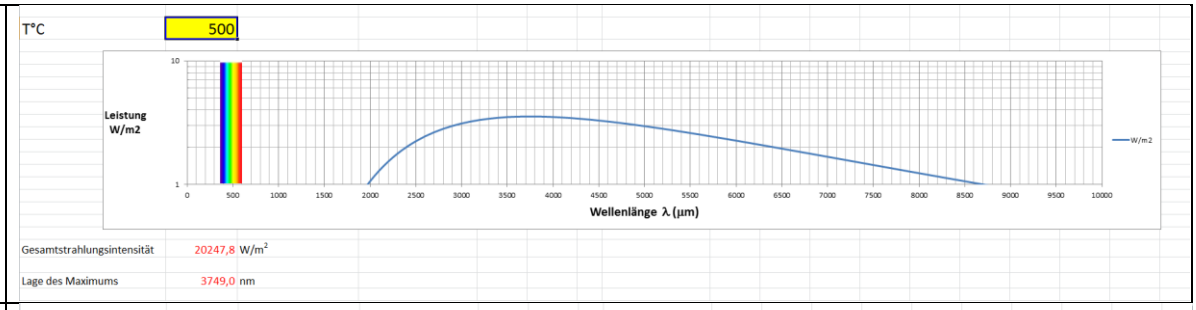
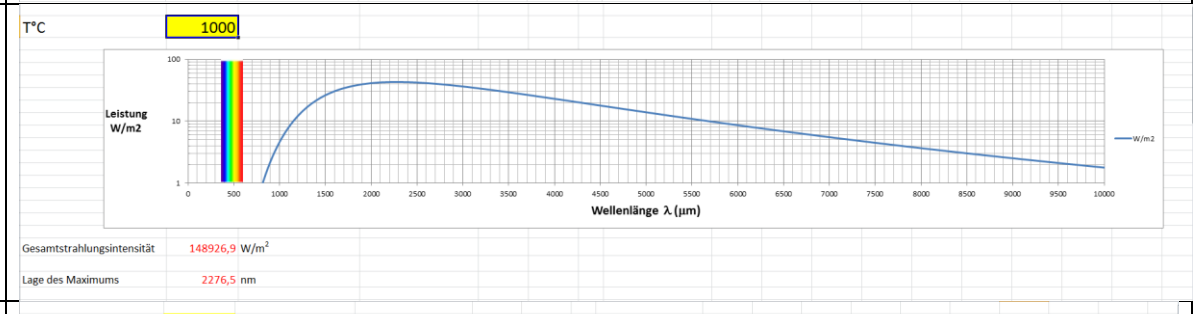
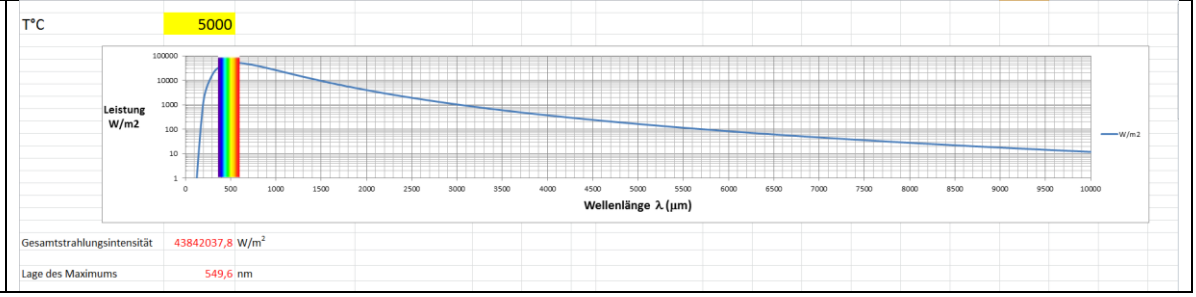
Auf der Basis der Planck´schen Strahlungsformel

$$I(\lambda, T) := \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)}$$

haben wir ein EXCEL-Programm erstellt, mit dem man ausprobieren kann wie sich die Temperatur eines Strahlers auf das Strahlungsmaximum und die Strahlungsverteilung auswirkt

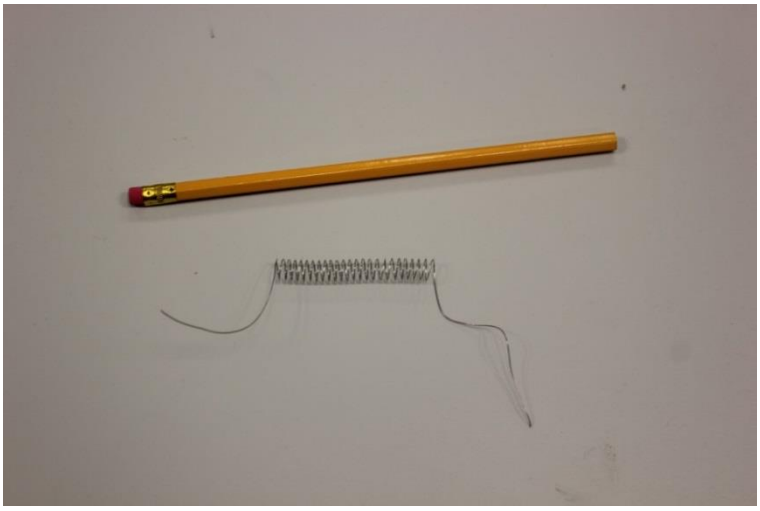
- Das Programm „Planck´sche Strahlungsverteilung“ zeichnet nach Eingabe der Temperatur in Grad Celsius den zwischen 0 und 10000 Nanometer liegenden Teil der Strahlungskurve.
- Zusätzlich wird die Gesamtstrahlung P_{ges} in Watt/Quadratmeter und die Wellenlänge des Scheitelpunktes (d.h. des Maximums) der Kurve angezeigt.

Der Vergleich der Kurven bei beispielsweise 500°C, 1000°C und 5000°C zeigt eine steigende Gesamtstrahlung und ein kurzwelligeres Maximum an.
Dabei nähert sich die kurzwellige steile Flanke der Kurve der langwelligen roten Seite des für unsere Augen sichtbaren Lichts.

500°C	
1000°C	
5000°C	

Eine selbst gewickelte Glühwendel als Wärmequelle

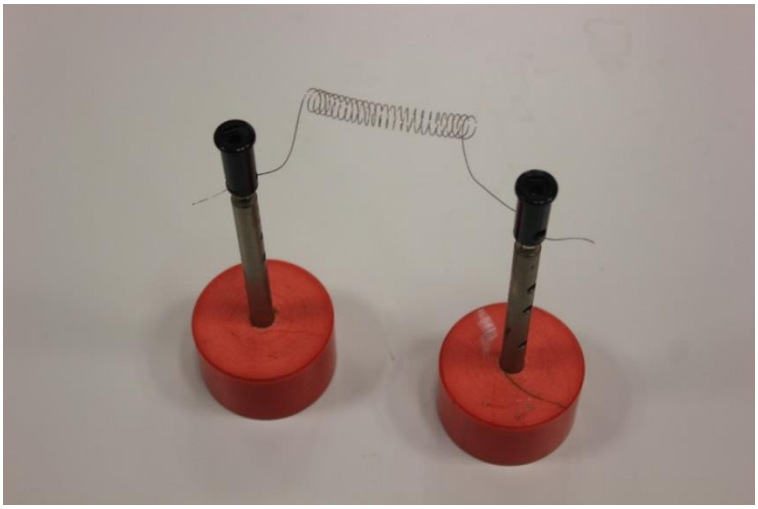
Eine selbst gewickelte Wendel aus Widerstandsdraht (Konstantan) liefert an einem spannungsstabilen Netzgerät eine Wärmequelle mit einstellbarer Temperatur.
Mit steigender Temperatur geht die zunächst unsichtbare Infrarot-Strahlung in den sichtbaren Bereich über und kann fast bis zur Weißglut gesteigert werden.
Mit einem Spektroskop kann man in dunkler Umgebung bei zunächst tiefroter, dann roter, gelber und schließlich fast weiß glühender Wendel anfangs nur den roten, dann zunehmend auch den orangen, gelben, grünen und blauen Spektralbereich erkennen.



Die Herstellung ist einfach: 30 – 40 cm Konstantandraht werden auf Bleistift gewickelt und abgezogen.

Bei der Wahl des Konstantandrahts gilt: Je dicker, desto höher muss die Spannung sein.

Dünner Draht glüht schon bei geringeren Spannungen, brennt dafür aber schneller durch.

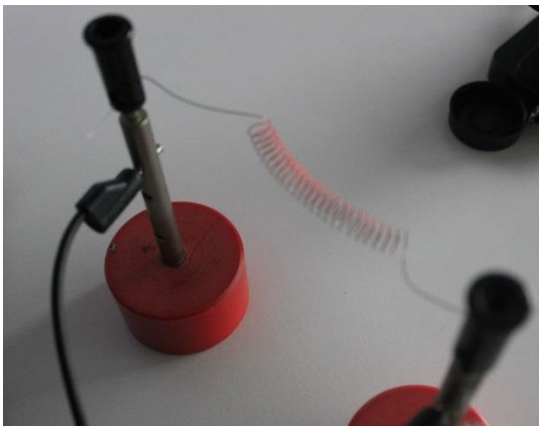


Die Wendel wird zwischen zwei Trägern eingespannt und mit Hilfe eines regelbaren Trafos unter Strom gesetzt.

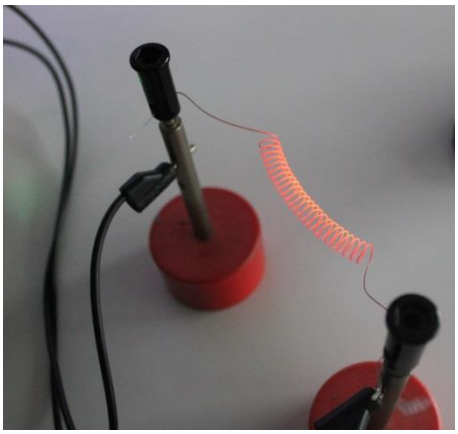
Eine Wendel wird wärmer als ein einfach gespannter Draht weil der Draht von einem kleineren Luftvolumen umgeben ist und die Windungen gegenseitig erwärmen.

Errötender Draht:

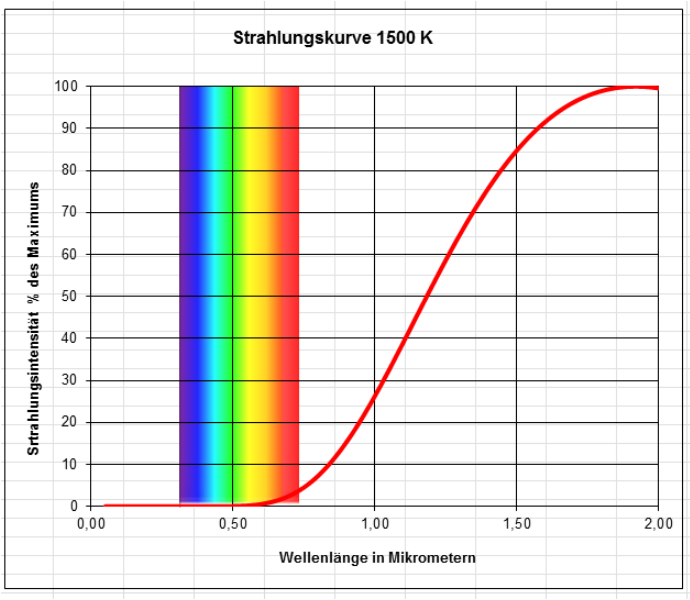
Unter Strom gesetzt entsteht mit steigender Spannung immer mehr Wärme. Hält man (Vorsichtig!) die Hand über die Wendel ist die Wärme deutlich zu spüren (Konvektion), bei steigender Spannung bald auch an der Seite und darunter (Wärmestrahlung)
Bei 12 Volt beginnt die Wendel schwach rötlich zu glühen, bei 14 Volt schon heller und orange.



12 Volt:
Rot



14 Volt:
Orange



Bei 1500 Grad hat die Konstantanwendel die Temperatur erreicht bei der die Strahlungskurve gerade in den sichtbaren Bereich hineinreicht.

Sie leuchtet daher schwach rötlich. Mit dem Spektroskop erkennt man im Dunkeln (!) nur den schwachen roten Rand des Spektrums.

ARBEITSBLATT

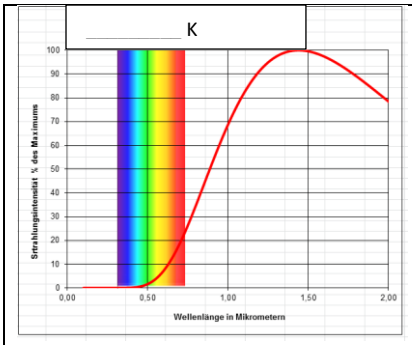
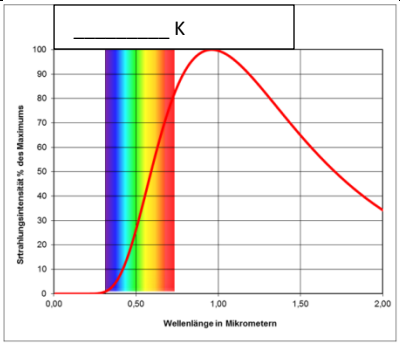
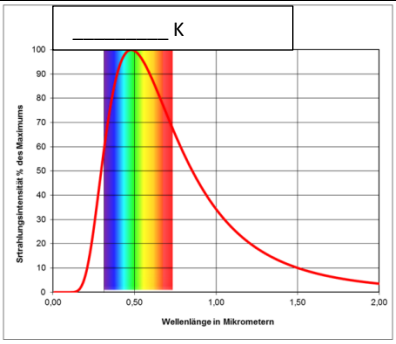
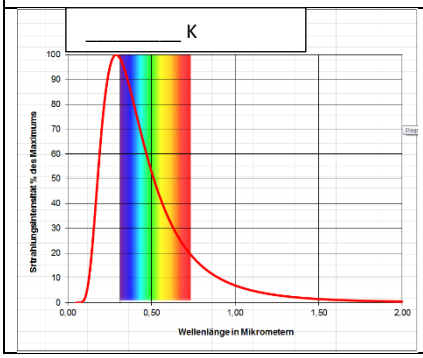
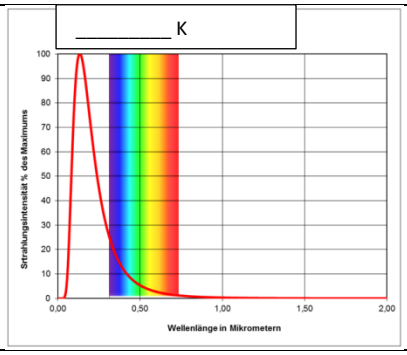
Strahlungskurven und Wellenlängen maximaler Emission bei verschiedenen Oberflächentemperaturen

Berechnen Sie nach dem WIENschen Verschiebungsgesetz die Wellenlängen (λ) der Emissionsmaxima von Objekte mit Temperaturen von zwischen 2000 Kelvin (Glühlampe) und 20000 Kelvin (Oberflächentemperatur des Sterns Beteigeuze)
Ordnen Sie den Objekten jeweils eine typische Strahlungskurve zu

WIENsches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{max} = \frac{2897{,}8\,\mu m \cdot K}{T}$$

→ vereinfacht: $\lambda_{max\ (\mu m)}$ = 2897,8 / T (Kelvin) (0 K = - 273,15°C)

<table>
<tr>
<td> 
</td>
<td> 
</td>
<td> 
</td>
</tr>
<tr>
<td> 
</td>
<td> 
</td>
<td>Tragen Sie jeweils oben links eine für die Strahlungskurve passende Temperatur (K) ein!</td>
</tr>
</table>

Bei welcher Wellenlänge liegt Ihr eigenes Strahlungsmaximum?

Nachweis der Wärmestrahlung mit der Thermosäule

Die Moll´dsche Thermosäule ist ein Detektor für Wärmestrahlung. Sie wandelt die Intensität der Wärmestrahlung in proportional in Spannungen im Millivoltbereich um. Im Falle der Glühwendel reicht ein einfaches Multimeter als Anzeigeinstrument.

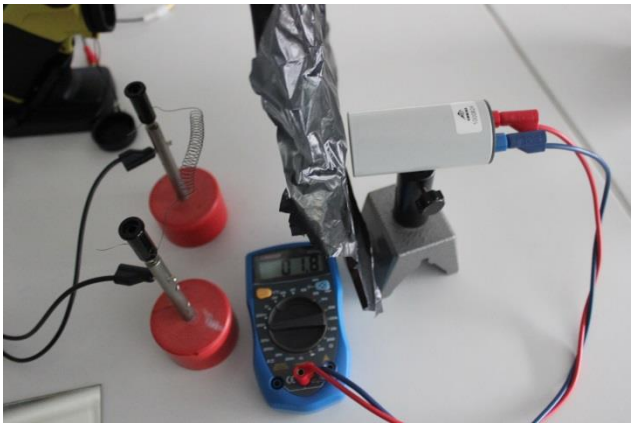
Glühwendel, Moll´sche Thermosäule und Multimeter (200mV DC)

Mit steigender Betriebsspannung erzeugt die Wendel immer mehr Wärme, was mit der darüber (!) gehaltenen Hand gut zu spüren ist. Achtung: Die Wendel nicht anfassen, Verbrennungsgefahr! Die so gefühlte Wärme ist größtenteils der erwärmten, konvektiv aufsteigenden Luft geschuldet.
Neben und unterhalb der Wendel wird man vor allem die auf die Haut treffende Wärmestrahlung wahrnehmen.

Das auf DC 200mV eingestellte Multimeter zeigt die mit wachsender Spannung steigende Intensität der Strahlung. Große Demonstrations-Messgeräte sind oft zu unempfindlich. Hier sollte ein Spannungsverstärker dazwischengeschaltet werden.

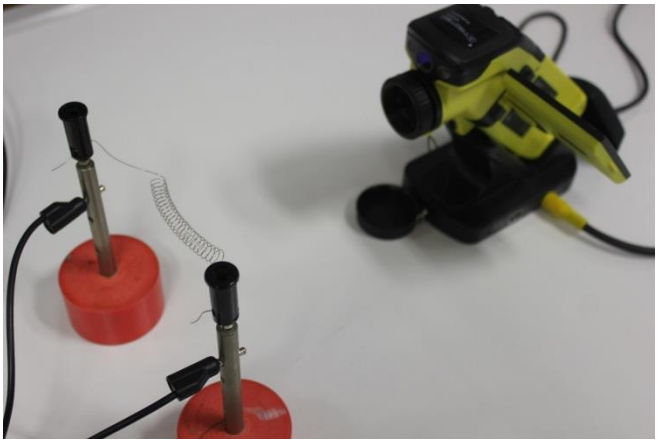
Hält man eine Glasscheibe zwischen die Wendel und die Thermosäule sinkt die Spannung am Multimeter. „Durchsichtiges“ Glas ist also „undurchsichtig“ für Wärmestrahlung.
Ganz anders eine schwarze, „undurchsichtige“ Folie aus Polyethylen (z.B. aus schwarzen Müllbeuteln): Hier geht die Mess-Spannung nicht oder nur geringfügig zurück. Sie ist also „durchsichtig“ für die für uns nicht sichtbare Wärmestrahlung.

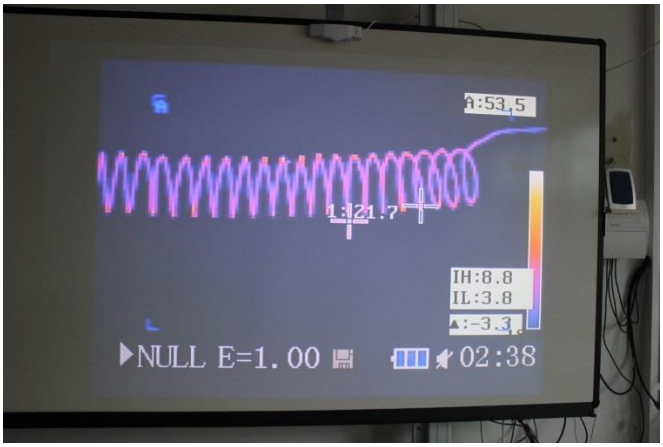
Wärmestrahlung einer Glühwendel wird mit der Thermosäule angezeigt.



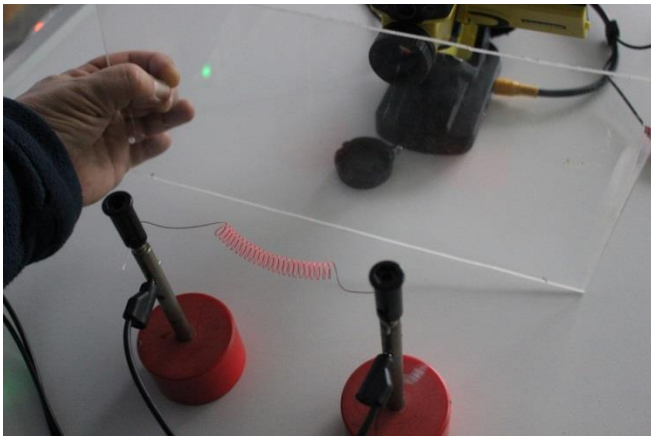
Wärmestrahlung wird von schwarzer Folie nur geringfügig zurückgehalten

Die Glühwendel und die Thermokamera

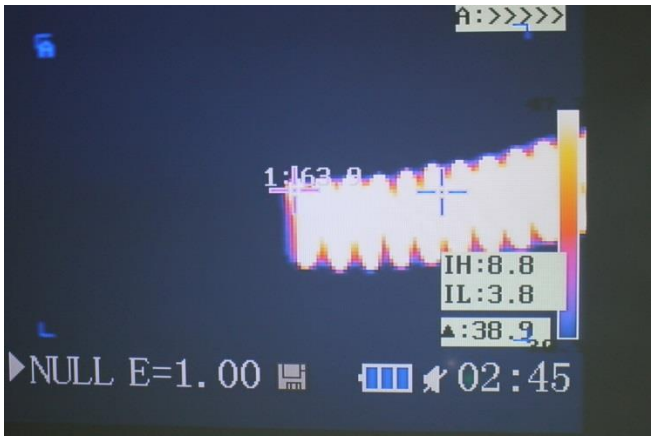




Glühwendel und Thermokamera:



Acrylplatte zwischen Glühwendel und IR-Kamera



Linke Seite der der Wendel durch Acrylplatte abgedeckt

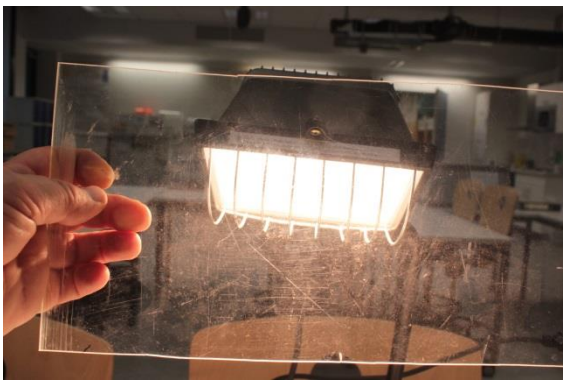
Hinter die Dinge schauen: Ein schwarzer Müllsack ist durchsichtig

Ein schwarzer „Geist“ in der Klasse?

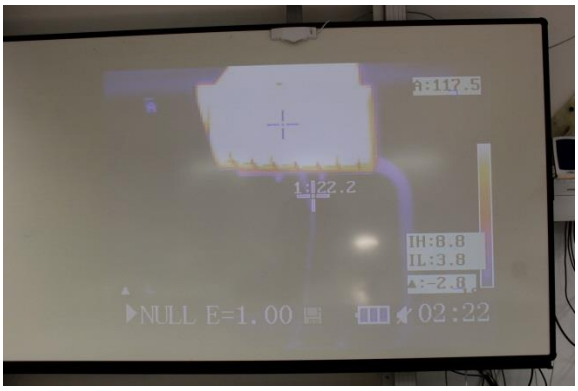
Keine Angst: Es ist nur der Physiklehrer…

Die IR-Kamera und der Beamer bringen es an den Tag wer sich unter dem Müllsack verbirgt.

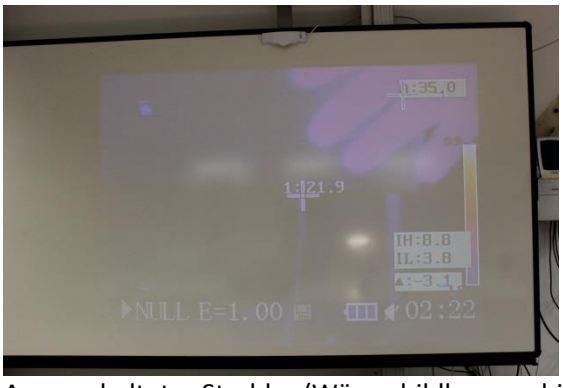
Eingeschalteter Strahler



Eingeschalteter Strahler hinter Glasscheibe



Ausgeschalteter Strahler (Wärmebildkamera)

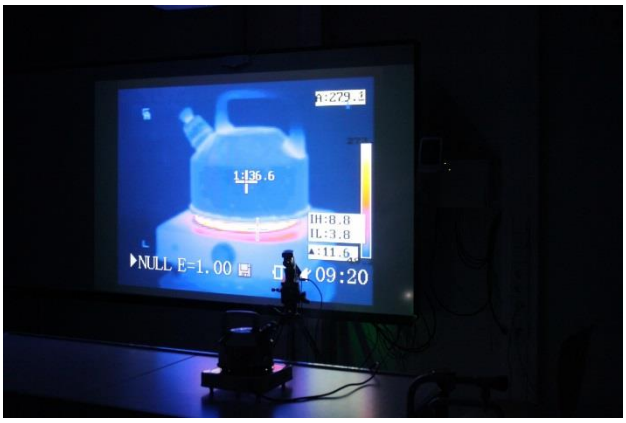


Ausgeschalteter Strahler (Wärmebildkamera hinter Glasscheibe)

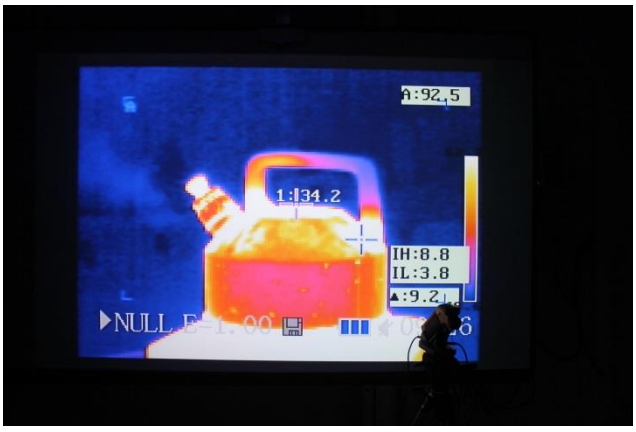
Wie genau misst die Wärmebildkamera?

Wie verlässlich erfasst die Kamera die Temperatur eines Spots? Wie verhält sie sich über einen größeren Temperaturbereich hinweg? Für eine konstante Referenz-Temperatur der Wendel sollte man ein Thermometer mit Drahtfühler, zum Beispiel ein Digitalthermometer GTH1150 von Greisinger, und ein stufenlos regelbares Netzgerät zum Nachregeln verwenden.
Stimmen die Werte nicht überein könnte es an einem falsch eingestellten Emissionsgrad liegen: Der frisch gewendelte, noch metallisch-blanke Konstantandraht hat eine geringe Emissivität die durch Oxidation beim Glühen deutlich steigt. Vergleiche dazu das Experiment mit den glänzenden bzw. angerosteten Dosen.
Eine konstante Temperatur ist auch erforderlich, wenn die Absorption z.B. durch ein Treibhausgas nachgewiesen werden soll.

Teewasser kochen

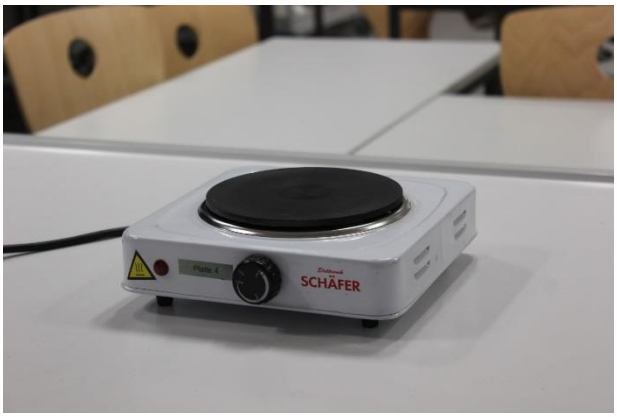


Die Herdplatte ist heiß, das Wasser im Kessel noch kalt

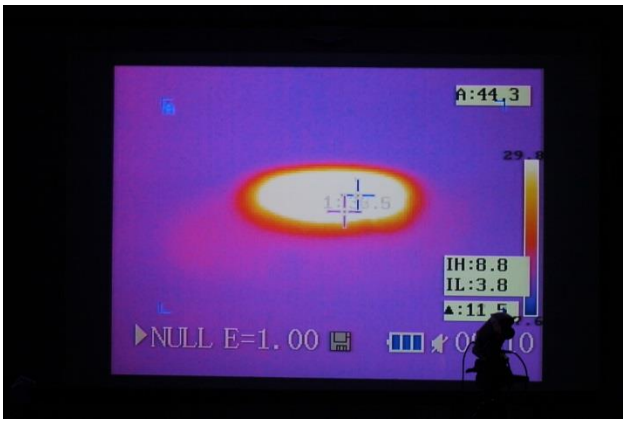


Das Teewasser ist am Sieden, Dampf tritt aus und der Kessel pfeift.

Restwärme einer Herdplatte



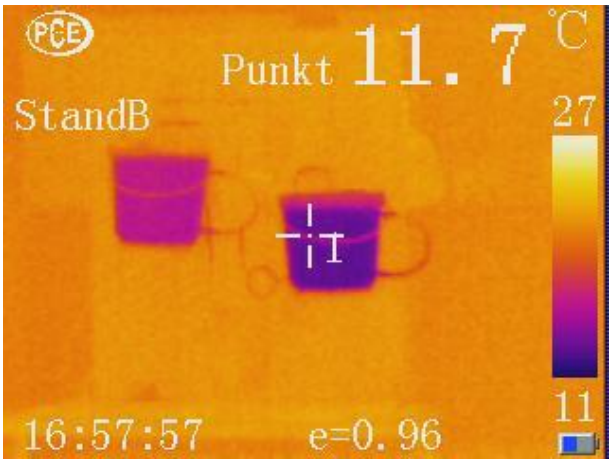
Die Herdplatte ist schon lange ausgestellt…



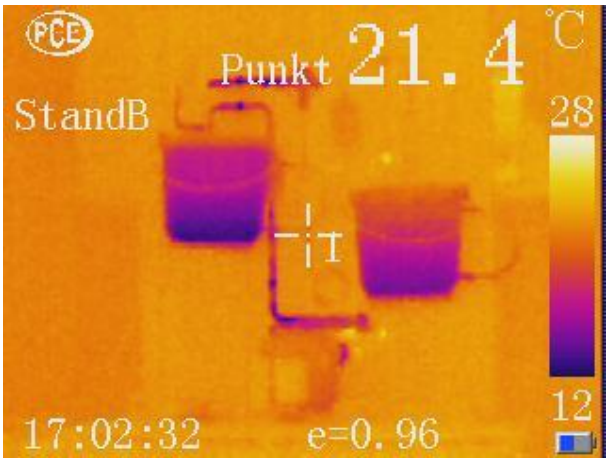
…aber immer noch warm

Experimente mit Wärmepumpe und Wärmebildkamera:

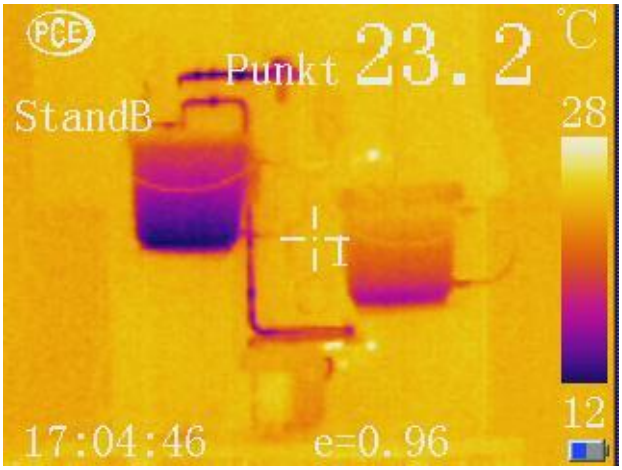
Mit der (bei uns ausleihbaren) Wärmebildkamera können Sie die für uns unsichtbare Wärmestrahlung (Infrarot-Strahlung) sichtbar machen und in Falschfarben verfolgen, wie Wärme von der "Kalten" Seite zur "warmen" gepumpt wird:



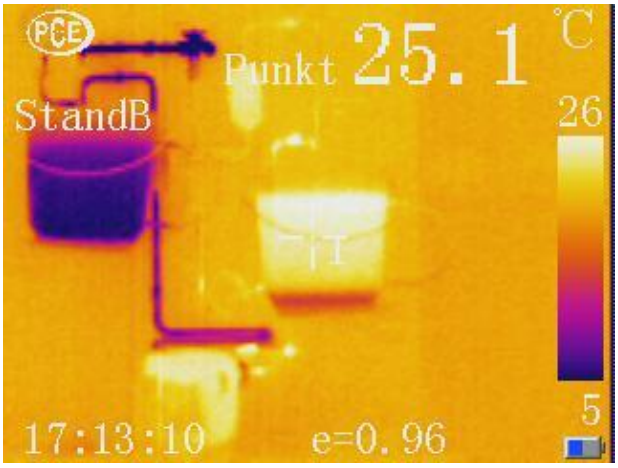
Versuchsbeginn
Das Wasser in beiden Eimern ist kalt. Das im rechte Eimer sogar noch kälter (11,7°C)
Alle Rohre haben Raumtemperatur.



Nach 5 Minuten
Das Wasser im rechten Eimer wird wärmer. In beiden Eimern ist eine Temperaturschichtung zu erkennen: Kaltes Wasser ist schwerer! Vom Expansionsventil bis zum Kompressor wird die Rohrleitung deutlich kälter.
Raumtemperatur (und Temperatur des Modells) 21,4°C



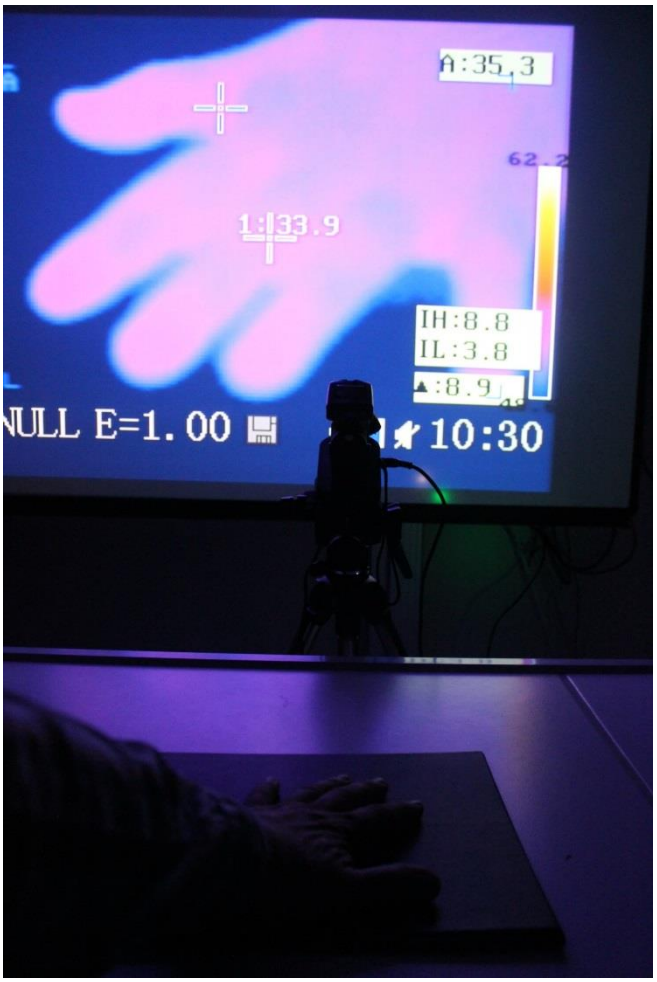
Nach 10 Minuten
Im rechten Eimer wird das Wasser immer wärmer

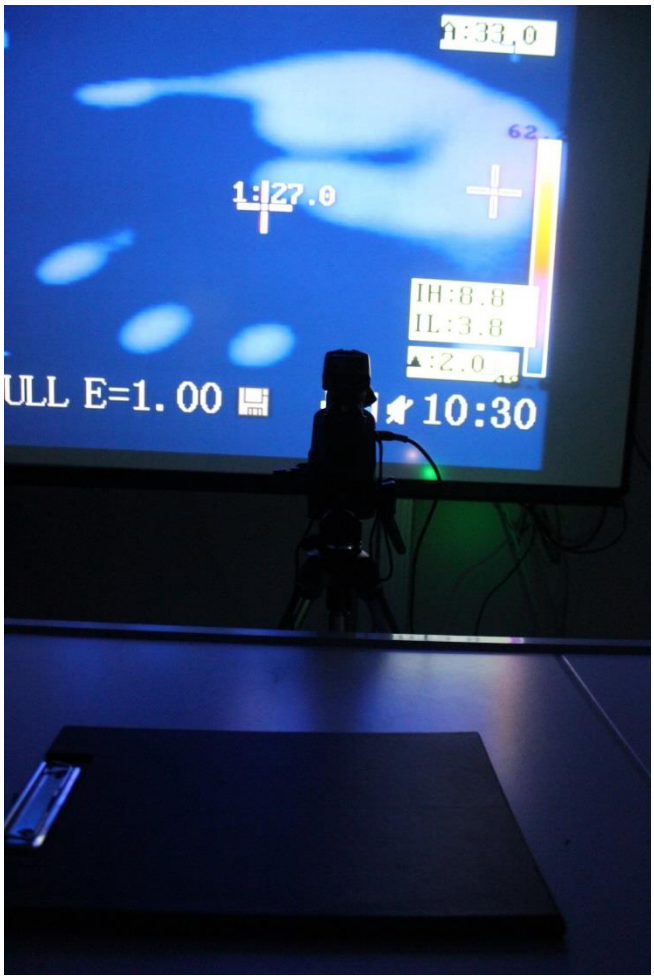


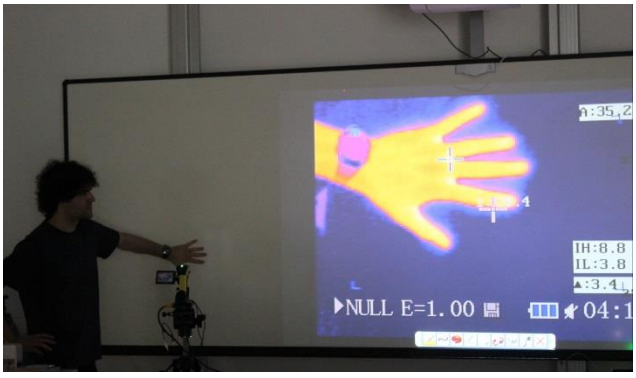
Nach 15 Minuten
Das Wasser im linken Eimer ist auf Temperaturen unter 10°C gesunken (siehe Farbskala). Das Wasser im rechten Eimer ist mehr als 25°C warm.

Die Vorher-Nachher-Show: Nachwärme

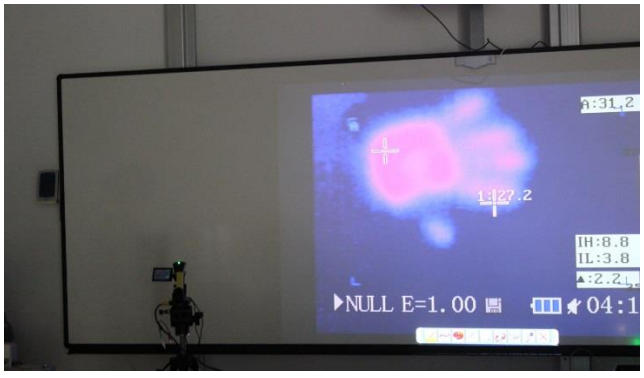
Im folgenden Versuch wurde die Hand auf eine Plastikunterlage gelegt und nach ein paar Sekunden weggezogen. Die IR-Kamera bildet die durch die Hand auf die Unterlage übertragene Wärme und den anschließenden Temperaturausgleich gut ab.







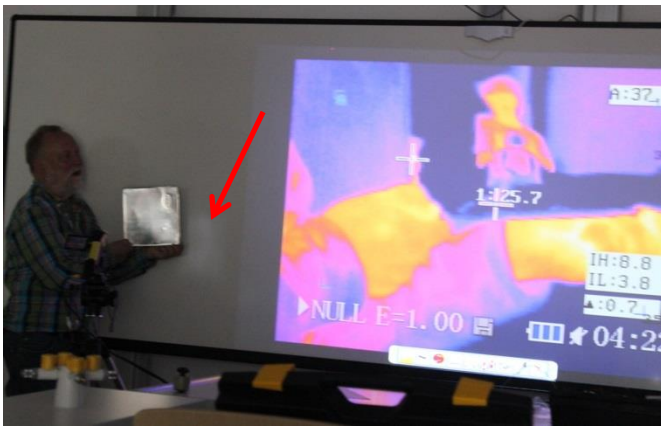
Hand auflegen…



…und wegziehen:

Infrarotstrahlung wird reflektiert: Spiegeleien mit unsichtbarem „Licht“

Wärmestrahlung lässt sich, hier zum Beispiel mit einem Keksdosendeckel, wie Licht spiegeln. Mit einem herkömmlichen Spiegel gelingt das nicht oder (winkel- und temperaturabhängig) nur sehr eingeschränkt weil er aus Glas besteht.

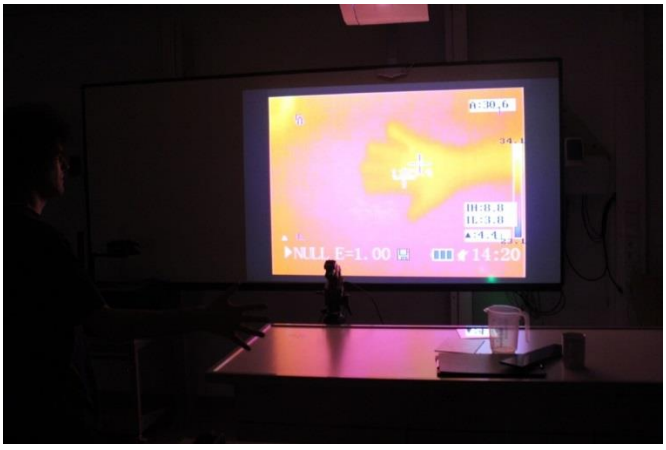


Die IR-Kamera ist auf die spiegelnde Metallplatte (Pfeil) gerichtet.

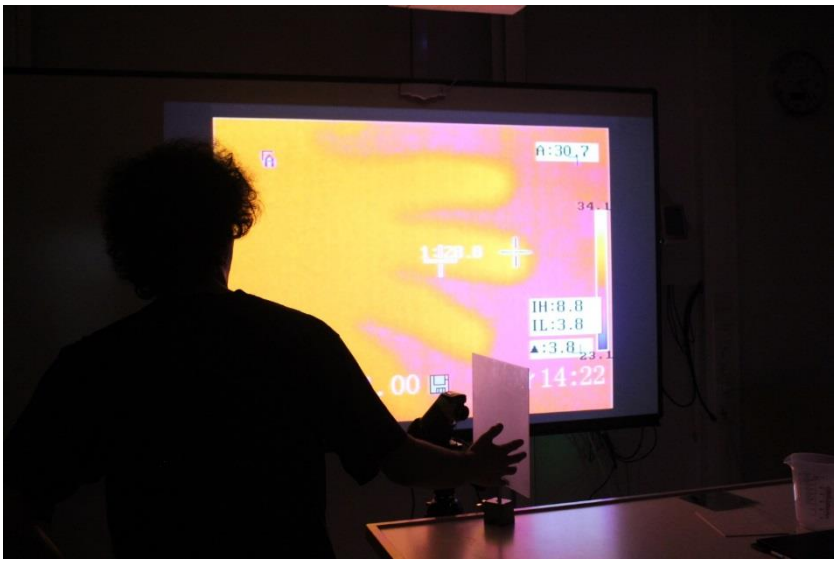
Darin erscheint ein etwa fünf Meter entfernt stehender Kollege.

Bei den folgenden Versuchen wurde die IR-Kamera (Pfeil) schräg nach unten auf die Tischplatte gerichtet und jeweils eine Hand eingespiegelt

Eine glatte, im optischen Bereich nicht spiegelnde weiße Plastikplatte reflektiert die warme Hand des Kollegen



Auch die Tischplatte ist ein "Wärmespiegel"



Die glatte, aber im optischen Bereich nicht spiegelnde Plastikscheibe erzeugt ein scharfes Bild der davor gehaltenen Hand:

Anregungen zum Experimentieren:

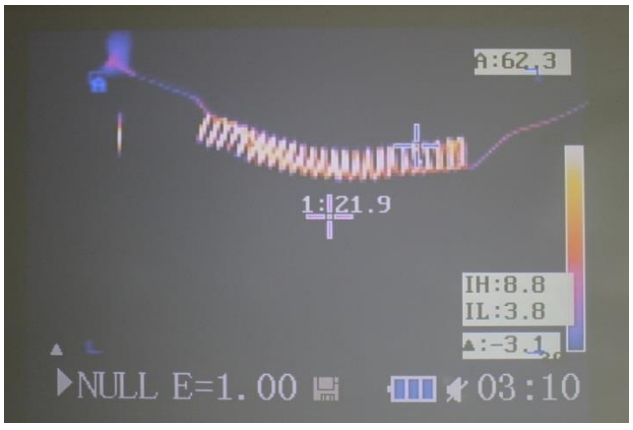
- Spiegeln Wasseroberflächen? Und wenn ja, welche Winkel sind dann optimal?
- Bei welchen Winkeln spiegeln Glasflächen und gläserne Spiegel?

Experimente mit der Glühwendel und verschiedenen "Spiegeln"

Bei den folgenden Experimenten wurde die von einer nicht leuchtenden Glühwendel ausgehende Wärmestrahlung mit unterschiedlichen Materialien auf die Wärmekamera gespiegelt.
Dabei wird deutlich, dass die uns vom optischen Spiegel bekannten Gesetze wie "Einfallswinkel = Ausgangswinkel " auch für die Wärmestrahlung gelten.

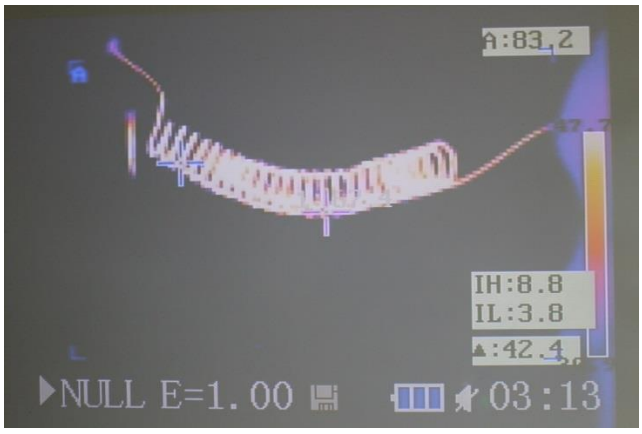
Interessant sind auch - hier nicht dokumentiert - Versuche mir konvexen und konkaven Spiegeln die die Strahlung entweder zerstreuen oder bündeln.

Messingplatte zwischen Glühwendel und IR-Kamera

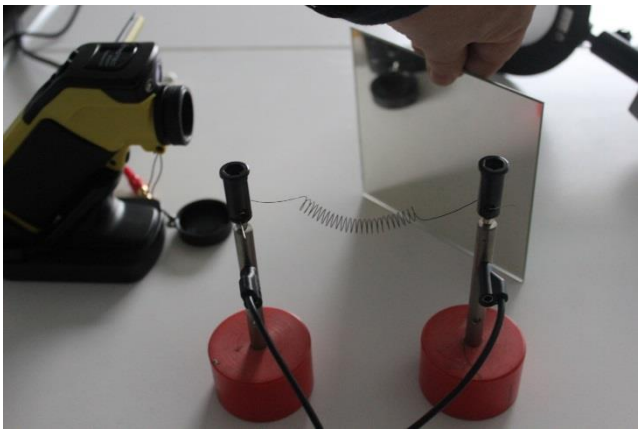


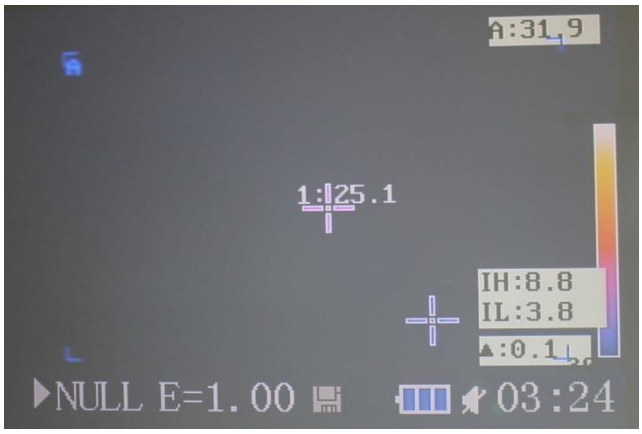
Nicht leuchtende warme Glühwendel

Deckelunterseite einer Keksdose als Spiegel



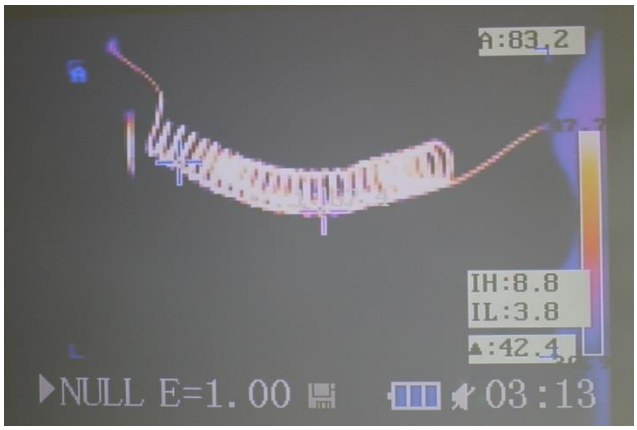
Das gespiegelte Bild ist etwas unschärfer


Versuch mit einer Spiegelfliese



Ergebnis: Keine Reflektion

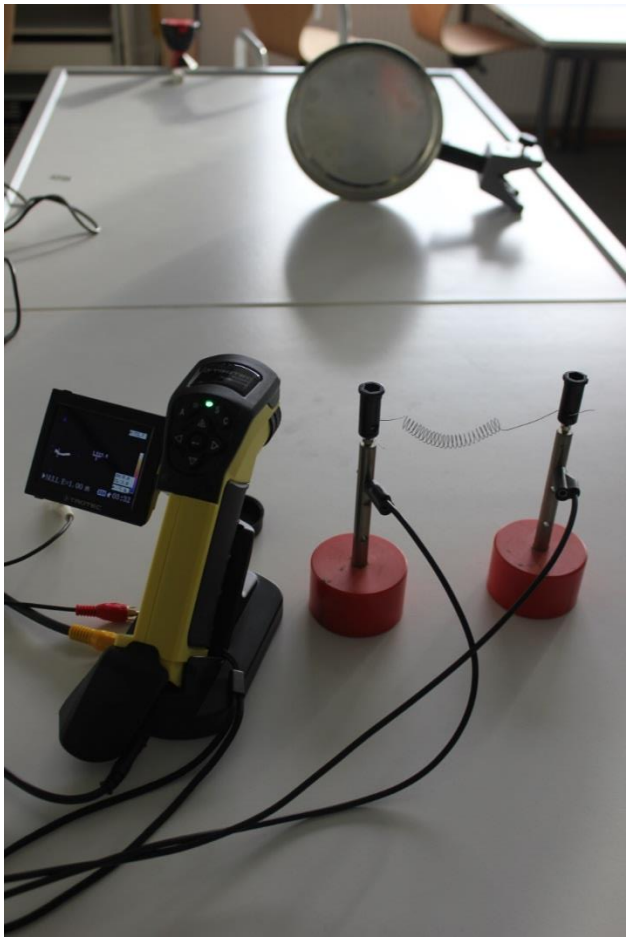
Metallspiegel als Reflektor

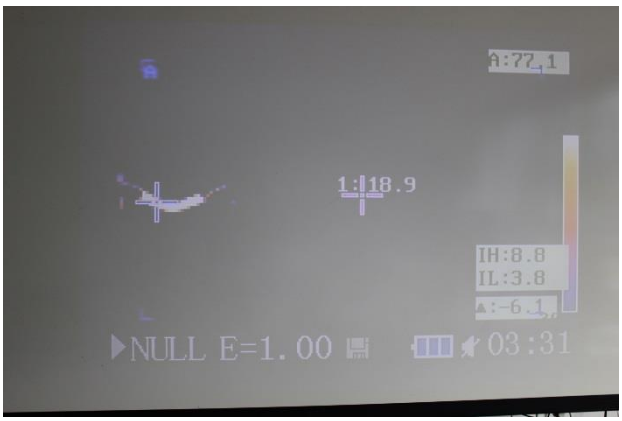


Spiegelversuche gelingen auch über eine größere Strecke hinweg:

Metallspiegel

Keksdosendeckel





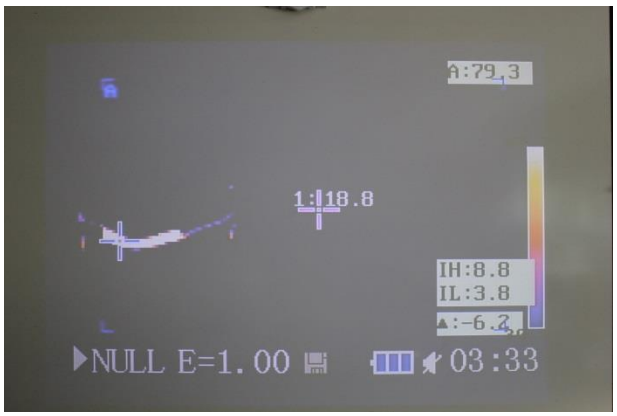


Abbildung in der IR-Kamera

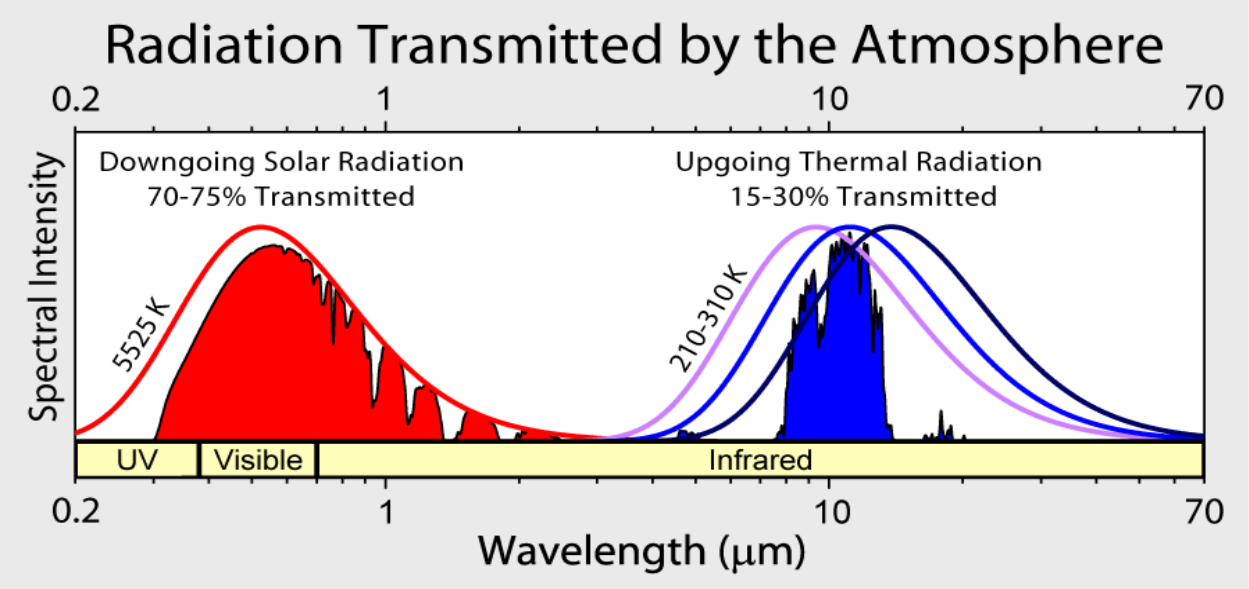
Experimente zum Treibhauseffekt

Zunächst einige Grundlagen:

Der Treibhauseffekt in der Atmosphäre beruht auf der Absorption und Streuung langwelliger Wärmestrahlung durch Wasser (Wolken / Nebel) und so genannte Treibhausgase wie Wasserdampf, CO_2, Ozon, Methan oder Di-Stickstoffoxid (Lachgas).

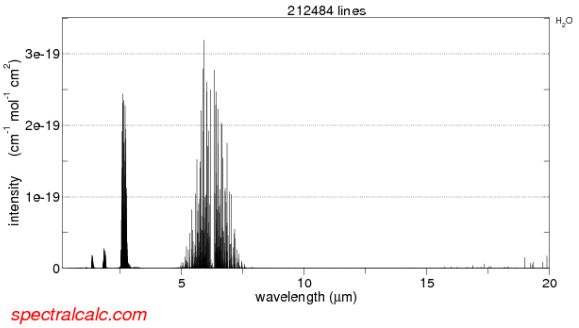
Die folgende Grafik zeigt die Intensitätsverteilung der auf die Erde treffende kurzwelligen solaren Strahlung im sichtbaren Fenster sowie in den unsichtbaren UV- und relativ kurzwelligen IR-Bereichen.
Die Hüllkurve entspricht der spektralen Strahlungsverteilung eines Strahlers mit der Temperatur 5525K.
25 - 30% der Strahlung wird durch die Atmosphäre zurückgehalten.

Die globale, von der Erde bei einer Temperatur von 210 - 310 K zurück ins All emittierte Gegenstrahlung umfasst das langwellige ("ferne") Infrarot.

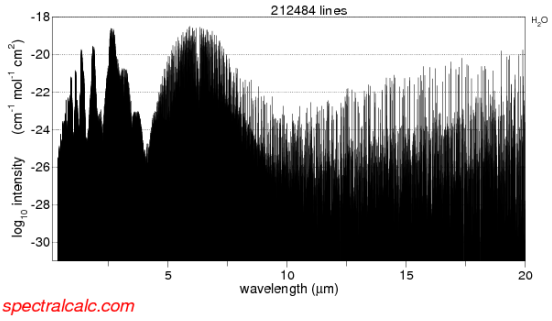


http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmosphere_Transmission_Blackbody_Only_png

Die Absorptionskurven einzelner Gase kann man im Internet abrufen, beispielsweise unter
http://www.spectralcalc.com/spectral_browser/db_intensity.php

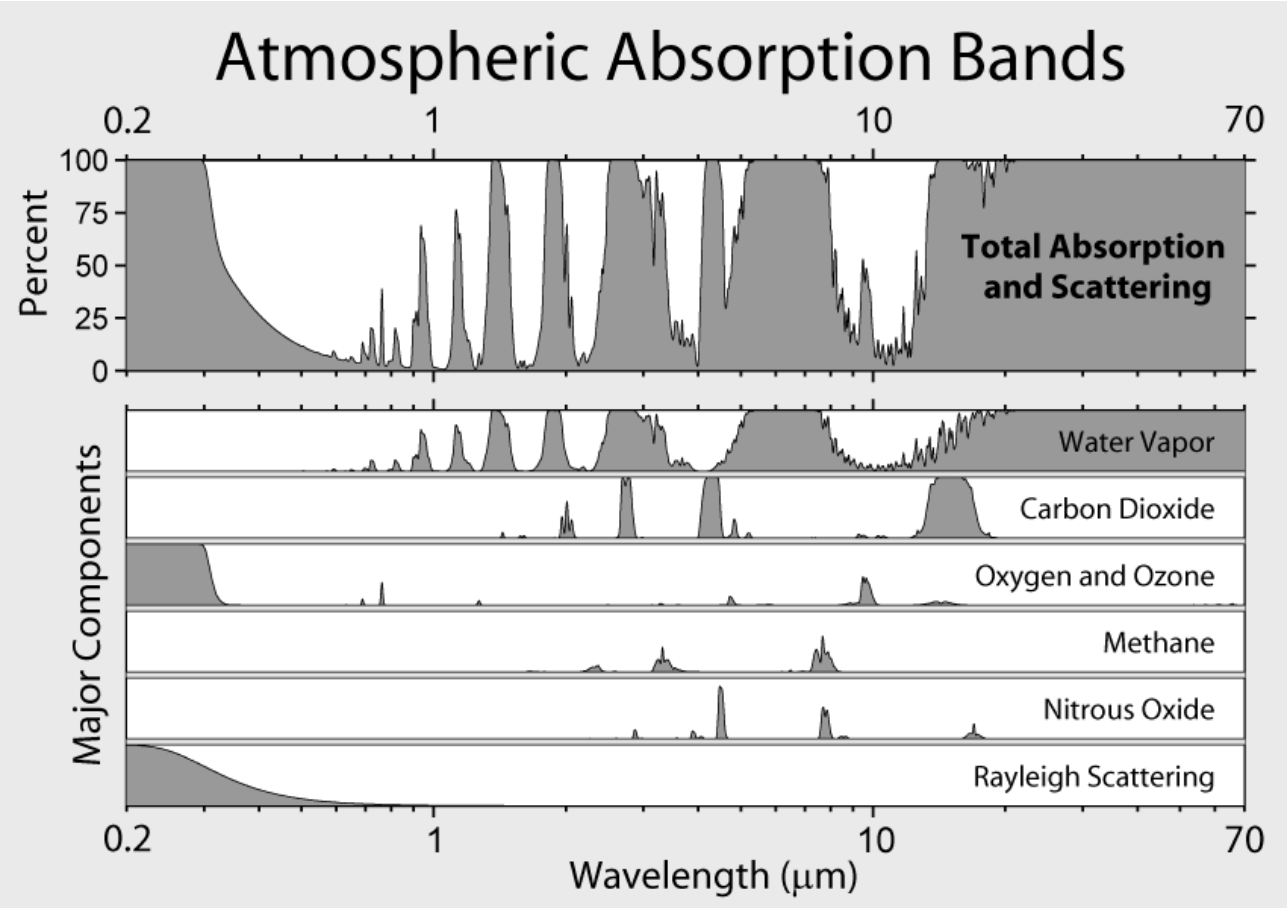


Strahlungsabsorption durch Wasserdampf (Lineare Darstellung)



Strahlungsabsorption durch Wasserdampf (Logarithmische Darstellung)

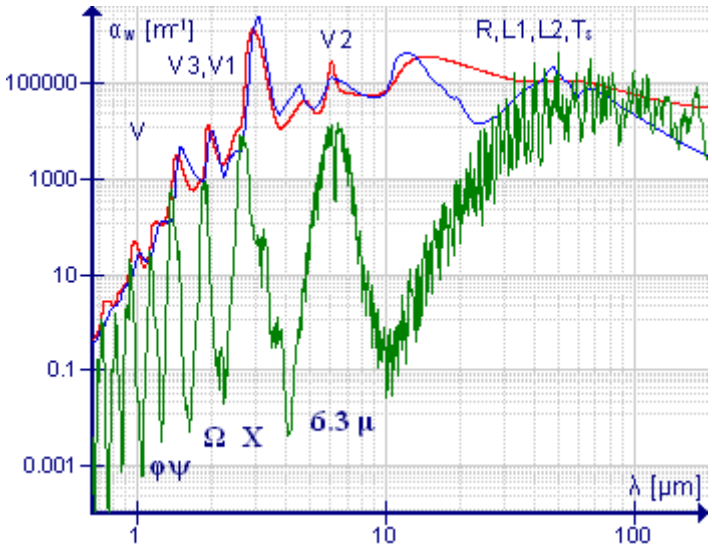
Die Absorptionskurven der einzelnen Treibhausgase unterscheiden sich, so wie auch ihr Beitrag zum gesamten Treibhauseffekt:



http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Absorption_Bands_png

Absorption durch Wasser bzw. Wasserdampf

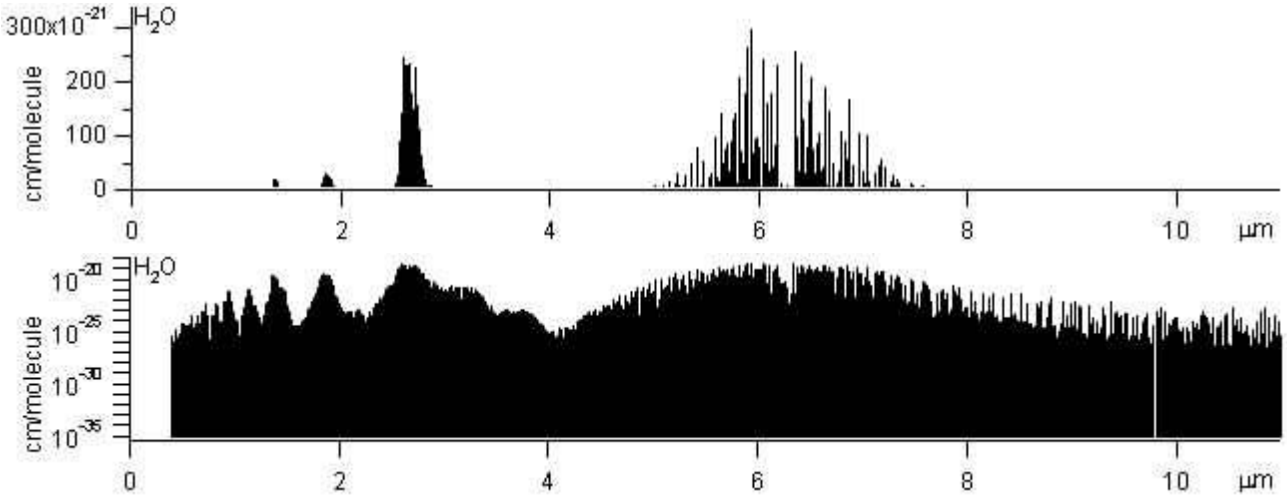
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/18/Absorption_spectrum_of_liquid_water.png



Das nebenstehende Diagramm zeigt die Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Wasser im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich.

- Eis (blaue Kurve)
- Flüssiges Wasser (rote Kurve)
- Wasserdampf (grüne Kurve)

In der Atmosphäre trägt Wasser zu 60% des Treibhauseffektes bei, sowohl in Form von kondensiertem Wasser (Wolken, Kondensstreifen) als auch gasförmigem Wasserdampf.



Strahlungsabsorption durch Wasserdampf (HITRAN, *https://www.cfa.harvard.edu/**hitran***)

Nach dem Lambert-Beerschen-Gesetz wird die Intensität der elektromagnetischen Strahlung durch Absorption entlang einer Wegstrecke exponentiell geschwächt.

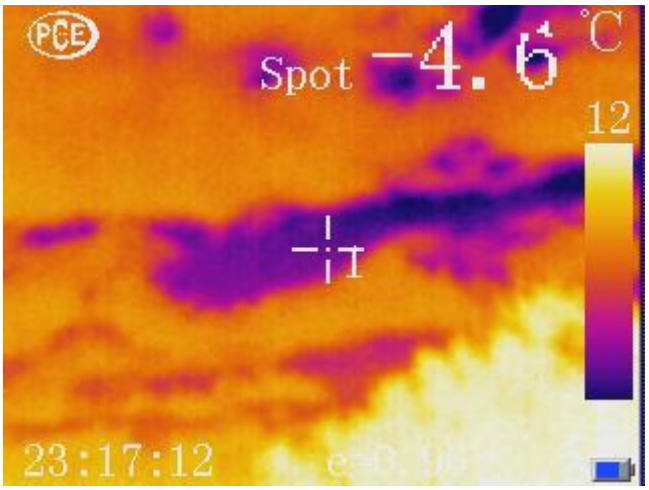
$$\frac{I}{I_0} = e^{-a_\lambda L}$$

$$I_0 = I * e^{-a_\lambda L}$$

I → Strahlungsintensität vor Absorption
I_0 → Strahlungsintensität nach Absorption
a_λ → Absorptionskoeffizient (cm^{-1})
L → Wegstrecke im absorbierenden Gas (cm)

Der von der Wellenlänge abhängige Absorptionskoeffizient a_λ hat die Einheit cm^{-1} (= 1/cm)

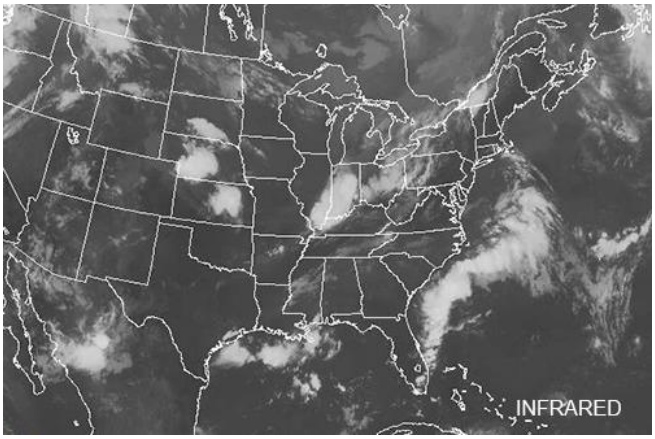
Das Strahlungsspektrum bei 20°C liegt im Infrarot mit einem Maximum bei 9891 nm.
Für einen Strahler mit typischer Erdatmosphärentemperatur ist H_2O im flüssigen Zustand (Wolken, Kondensstreifen) oder gasförmiger Phase nahezu undurchsichtig.
Eine Alltagserfahrung sagt, dass in klaren Nächten leichter Frost auftritt als bei Wolkenbedeckung. Welche Rolle spielen die sich am Himmel flächig ausbreitenden Kondensstreifen in der Strahlungsbilanz?



Himmel im Winter

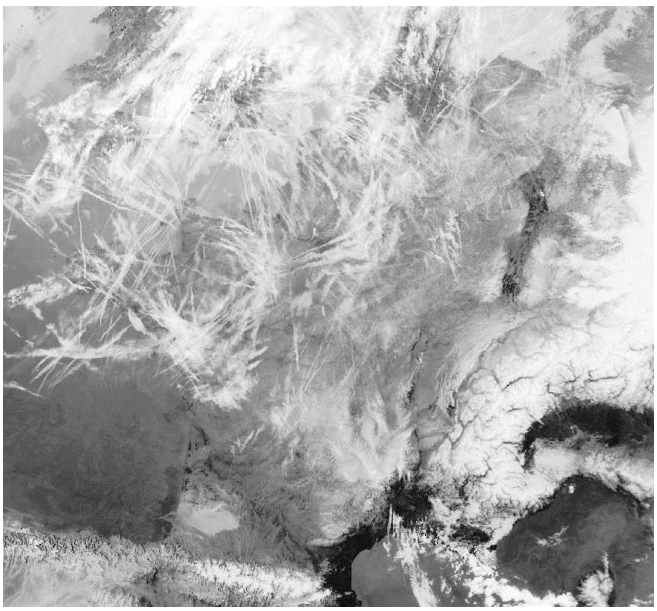
Der winterliche dunkle Nachhimmel im Infrarotlicht zeigt, dass die Wolken die am Tage aufgenommene Wärmestrahlung der Erde reflektieren.
Die Wolkenlücken dagegen sind deutlich kälter.

Achtung:
Lichtquellen auf der Erde emittieren auch im IR-Bereich. Kann die reflektierte Strahlung auch diesen Quellen geschuldet sein?
Für solche Aufnahmen sollte man einen stadtfernen, lichtarmen Ort aufsuchen.



Satellitenbild im Infrarot:
Die Erde strahlt die am Tage absorbierte Sonnenenergie sowohl am Tag als auch in der Nacht als Wärmestrahlung ab.
Wolken absorbieren weniger Sonnenlicht und halten die Wärmestrahlung zurück.
Sie erscheinen als weiße Areale.
Solche Aufnahmen haben den Vorteil, dass man sie auch nachts machen kann.

Die Rolle des in großer Höhe Wasserdampf ausstoßenden Flugverkehrs in Bezug auf den Klimawandel wird kontrovers diskutiert weil er sowohl die kurzwellige Sonneneinstrahlung als auch die langwellige Gegenstrahlung mindert.

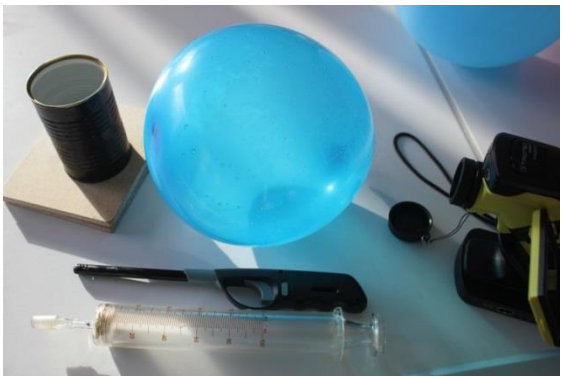


Kondensstreifen über Frankreich und der Biskaya m Infrarot-Satellitenbild
25. April 2004, 7:03 UTC, NOAA 15 IR
http://imkhp2.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Sat/satsp183.htm

Der Effekt der Strahlungsabsorption lässt sich mit einem, mit Wasser gefüllten und zwischen IR-Kamera und Glühwendel gehaltenen Ballon gut zeigen. Dazu wird die Glühwendel zunächst nur etwas über die Umgebungstemperatur erwärmt. Die IR-Kamera wird sie mit dem, im fernen Infrarot liegenden Strahlungsmaximum nicht sehen. Erhöht man die Temperatur bis zur Rot- und Gelbglut, verschiebt sich das Maximum soweit in den Bereich hinein, wo die Flanke der Absorptionskurve steil zum sichtbaren Fenster abfällt.
Um in einem weiteren Ballon eine nahezu gesättigte Wasserdampfatmosphäre herzustellen haben wir ihm vor dem Aufpumpen mit trockener Luft (35% r.F.) etwas angefeuchtete Watte (große Oberfläche) hinzugegeben.

Experiment mit einem wasserdampfgesättigten Luftballon

Absorption von Wärmestrahlung durch Wolken bzw. Nebel



Einem innen mit etwas Wasser angefeuchteten Ballon wird etwas Rauch hinzugegeben.
Die Rauchpartikel dienen als Kondensationskeime.
Dazu wird etwas Papier entzündet und in einen mit dem Daumen verschlossenen Kolbenprober geschoben. Nach dem Erlöschen wird der Prober-Inhalt in den Ballon gedrückt und der Ballon mit dem Mund aufgeblasen. Durch den erhöhten Druck steigt die Temperatur so dass ein Teil des Wassers verdunsten kann. Kühlt der Inhalt ab bildet sich ein feiner Nebel.
Einfacher geht es natürlich, wenn eine willige Raucherin ihre Lungen direkt in den feuchten Ballon entleeren mag.
Zur Kontrolle wird ein zweiter, aber trockener Ballon auf die gleiche Größe aufgeblasen. Damit wird deutlich, dass es nicht die Rauchpartikel sind, die die Wärmestrahlung absorbieren, sondern die Wassertröpfchen.

Ergebnis:

Trockener Ballon

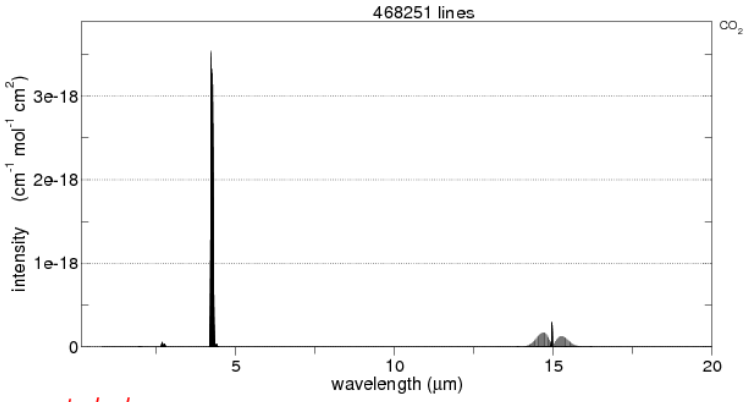
Feuchter Ballon (Nebel)

Die Temperaturspanne der Kamera ist hier so schmalbandig wie möglich eingestellt.

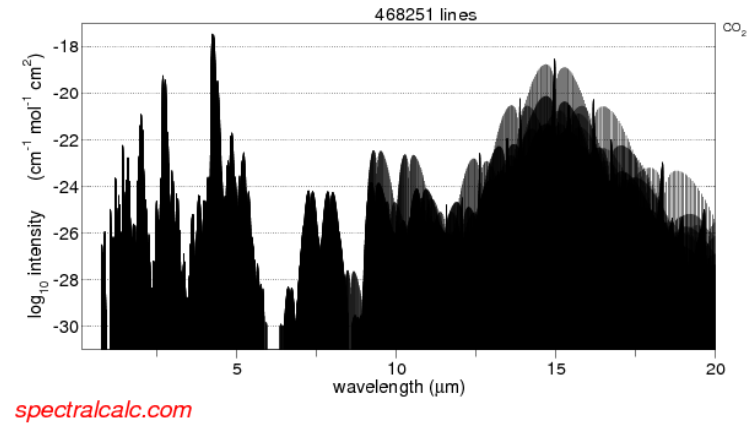
Alternativ zu diesem Experiment lässt sich auch eine "Nebelkammer" bauen:
Dazu werden zwei Fenster in eine große transparente Plastikflasche geschnitten und mit dünner Haushaltsfolie überklebt.

Geben Sie dann etwas warmes Wasser in die Flasche, schwenken sie das Wasser vorsichtig so um, dass die beiden Fenster nicht benetzt werden.
Dann entzünden Sie einen Holzstab, stecken ihn tief in die Flasche bis die Flamme verlöscht.
Gemessen wird durch die Fenster hindurch.
Wenn keine gleichartige und trockene "Kontroll-Kammer" vorhanden sein sollte empfehlen wir, den Versuch erst "trocken" und dann "feucht" durchzuführen.

Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 und andere Gase



Lineare Darstellung



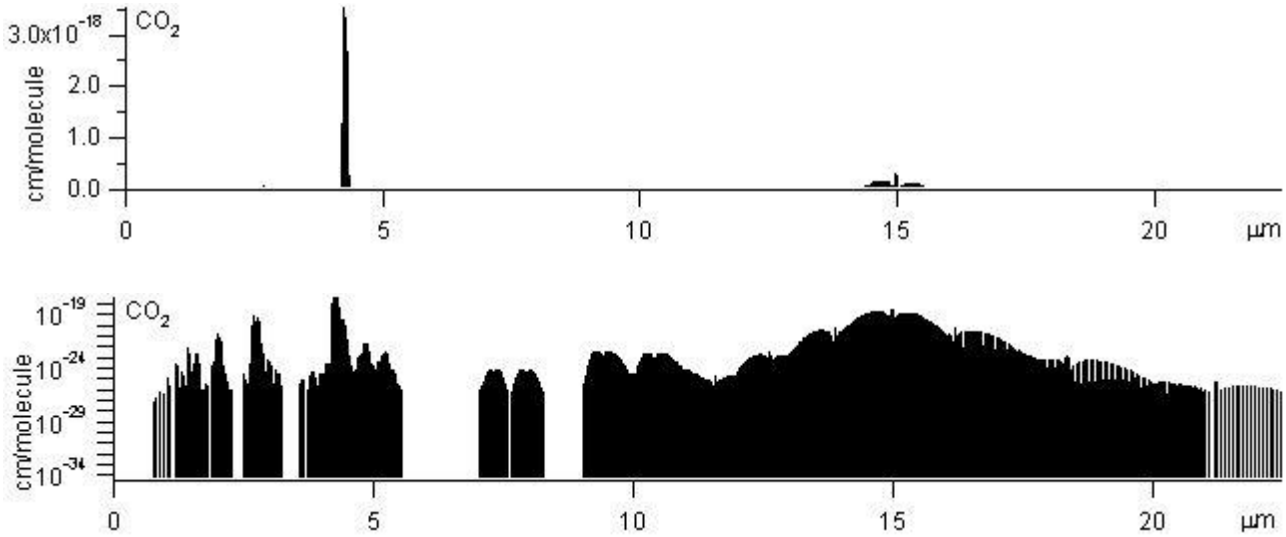
Logarithmische Darstellung:

http://www.spectralcalc.com/spectral_browser/db_intensity.php

Absorptionsbereiche von CO2 nach HITRAN

*hi*gh-resolution *trans*mission molecular absorption database, www.hitran.org

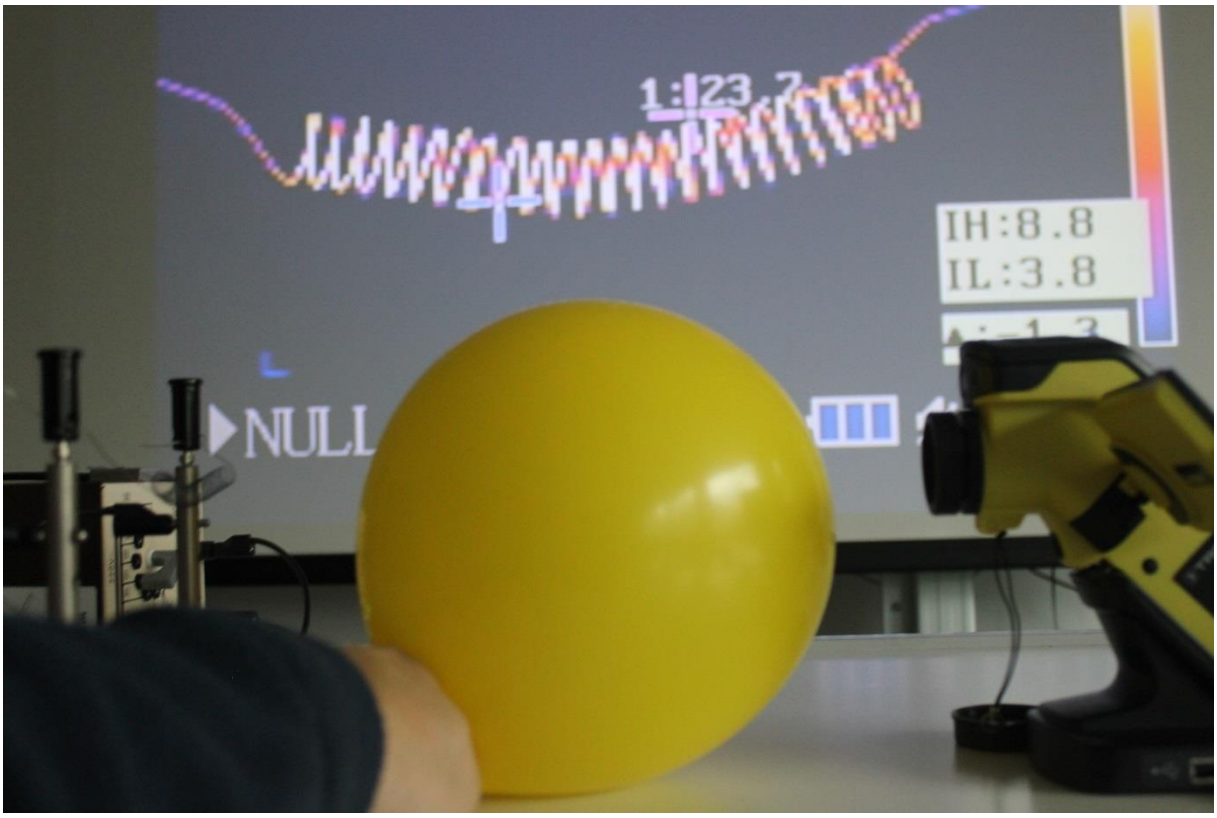
λ (µm)	Absorption (nach HITRAN)	T (K)	T °C
15	$300*10^{-21}$	193,2	-80
10,4	$25*10^{-24}$	278,6	+5,5
9,4	$35*10^{-24}$	308,3	+35,2
4,3	$3*10^{-18}$	673,9	+400,8



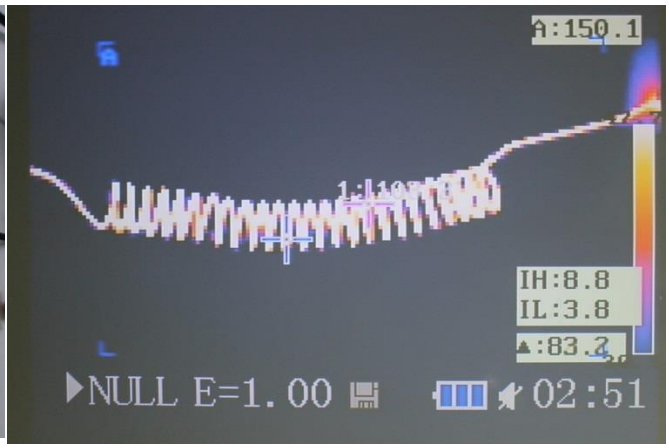
Strahlungsabsorption durch CO_2 (HITRAN, *https://www.cfa.harvard.edu/**hitran***)

Experiment mit einem CO_2-gefüllten Luftballon

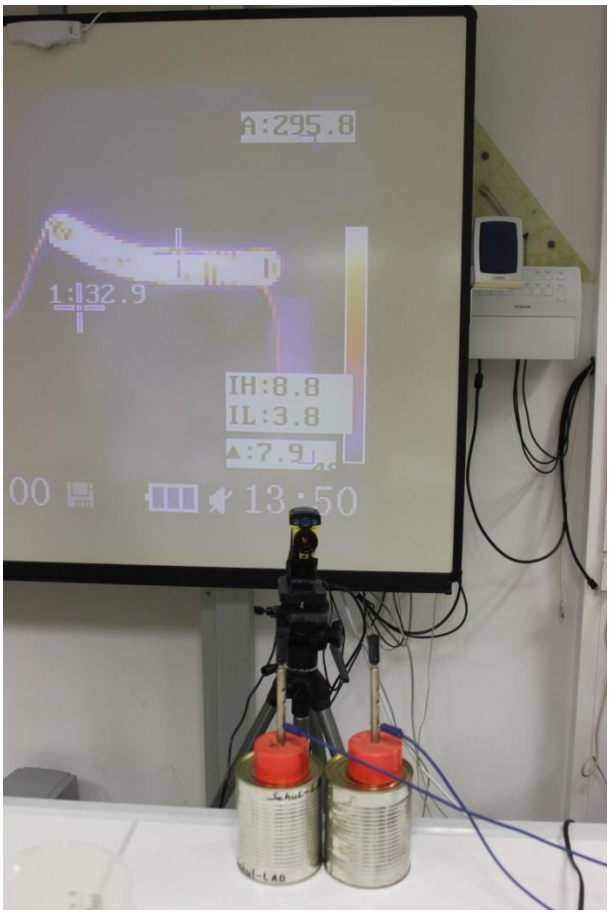
Bei den folgenden Versuchen werden Luftballons mit unterschiedlichen Gasen gefüllt. Ein mit "normaler " Luft auf gleiche Größe aufgeblasener Ballon dient zum Vergleich.
Wird die Strahlung durch die Treibhausgase reduziert?



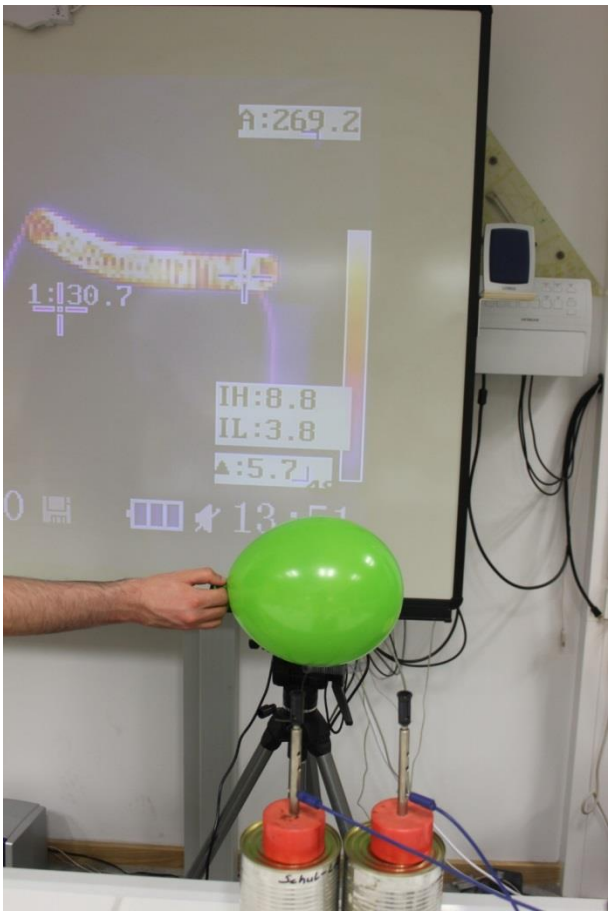
Ballonhaut ist durchsichtig für IR-Strahlung



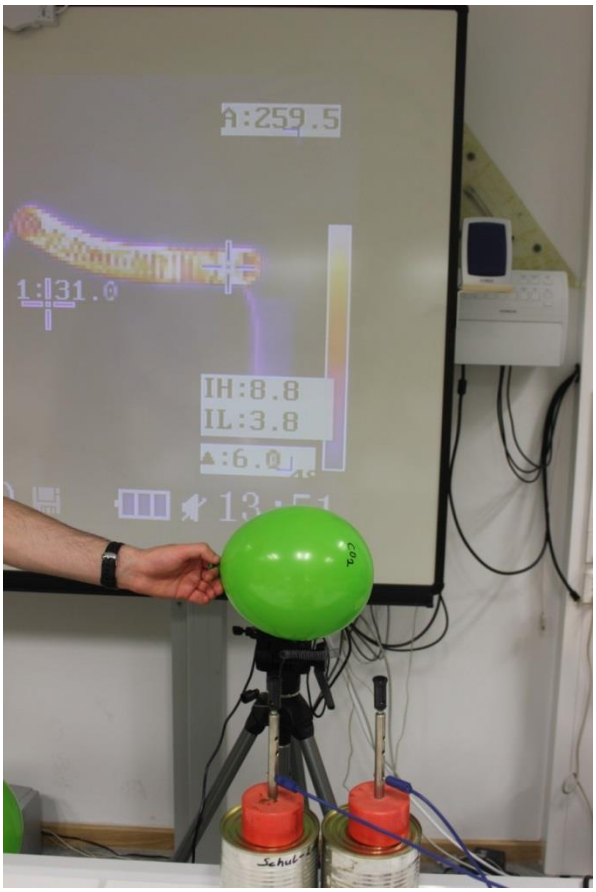
Die Strahlungsintensität ist nur geringfügig gemindert



Die IR-Kamera ist auf die Glühwendel gerichtet und misst eine Temperatur von 295,8°C.



Ein zwischen IR-Kamera und Glühwendel gehaltener, mit der Luftpumpe aufgeblasener Ballon reduziert die gemessene Temperatur auf 269,2°C.



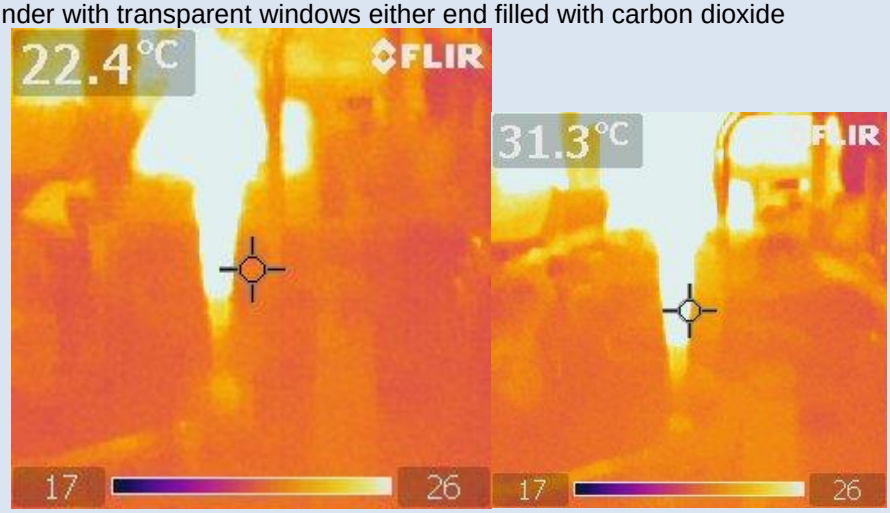
Ein zweiter, mit CO_2 gefüllter, gleich großer Ballon setzt die Temperatur um etwa 10°C auf 259,5°C herab.

Der Spot „A“ hat ein beiden Fällen (Luft bzw. CO_2) die gleiche Position.

Mehrere Wiederholungen dieses Versuches haben gezeiugt, dass das Ergebnis nicht immer so eindeutlig und überzeugend ausfällt.

Im Internet findet man viele Referenzen zu diesem Versuch. Wir haben eine ausgewählt, bei der der Unterschied in der Absorption von Kohlenstoffdioxid und Stickstoff zwischen augenfällig groß ist.
Wir haben diese Differenzen nicht reproduzieren können.

Dr. Short's Homepage | Thermal Imaging Project
http://faculty.rmu.edu/~short/research/thermal-imaging/
2. Heat absorption by carbon dioxide gas (the atmospheric greenhouse effect)
Apparatus – cylinder with transparent windows either end filled with carbon dioxide

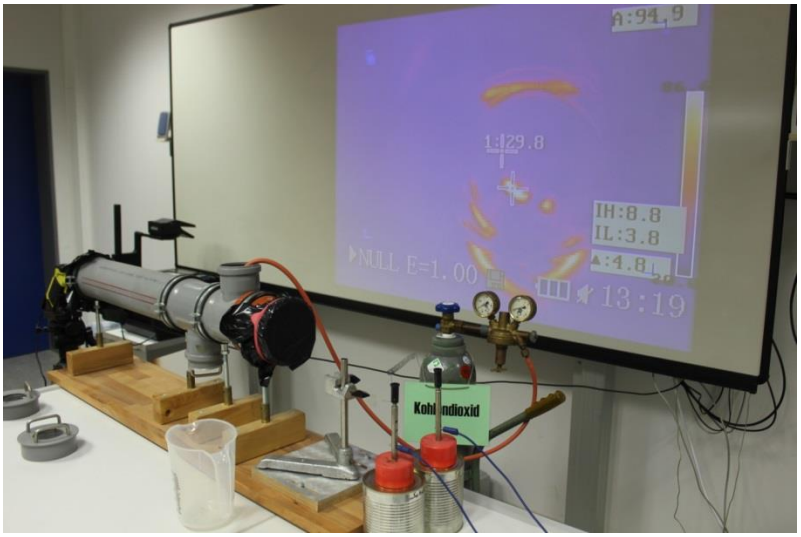


Carbon dioxide filled balloon, nitrogen filled balloon.

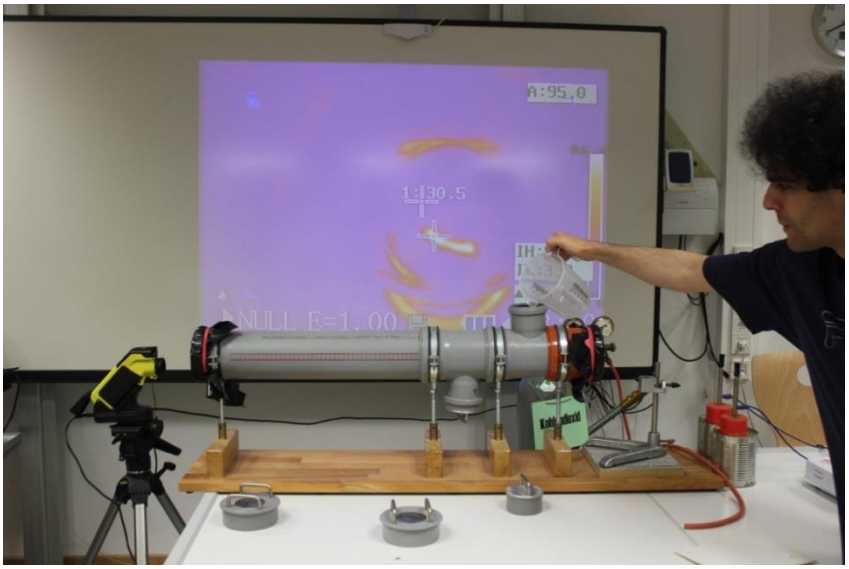
Leider ist die hinter der das Gas enthaltenden Kammer stehende Wärmequelle nicht beschrieben oder zu erkennen. Der Spot auf den sich die angezeigten Temperaturen beziehen ist unterschiedlich positioniert.

Unser Beitrag zur IdeenExpo 2007: CO_2 -Treibhauseffekt in der Röhre

Die folgende Versuchsanordnung folgt einer Idee die wir vor mehr als 10 Jahren in „Experimente zum CO_2-Treibhauseffekt“ vorgeschlagen und auf der IdeenExpo 2007 in Hannover präsentiert haben. Damals benutzten wir eine Moll´sche Thermosäule, einen empfindlichen Messverstärker und ein Demonstrations-Messgerät. Funktioniert das auch mit einer IR-Kamera?

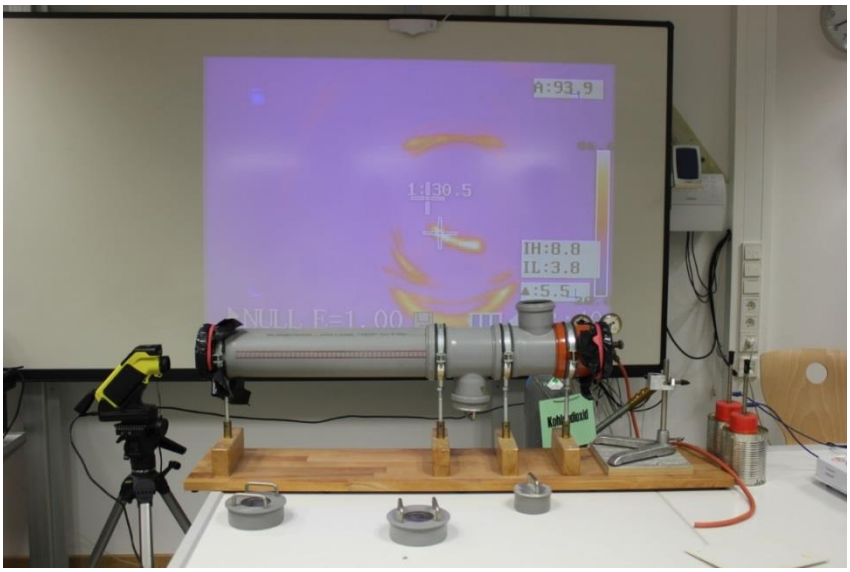


Als Heizquelle verwenden wir eine Glühwendel aus Konstantan deren Temperatur mit Hilfe eines stufenlos regelbaren Netz-gerätes eingestellt und mit einem, mit einem Drahtfühler versehenen Digitalthermometer kontrolliert wird. Ein HT-Rohr mit 2 Abzweigen nimmt das zu untersuchende Gas auf, z.B. CO_2. Das Gas wird durch den oberen Stutzen eingefüllt und später durch den unteren wieder entlassen.
Das Rohr wird vorne und hinten mit schwarzer Folie abgeschlossen.
Die Auf einem Stativ stehende IR-Kamera „sieht“ auf die Glühwendel.



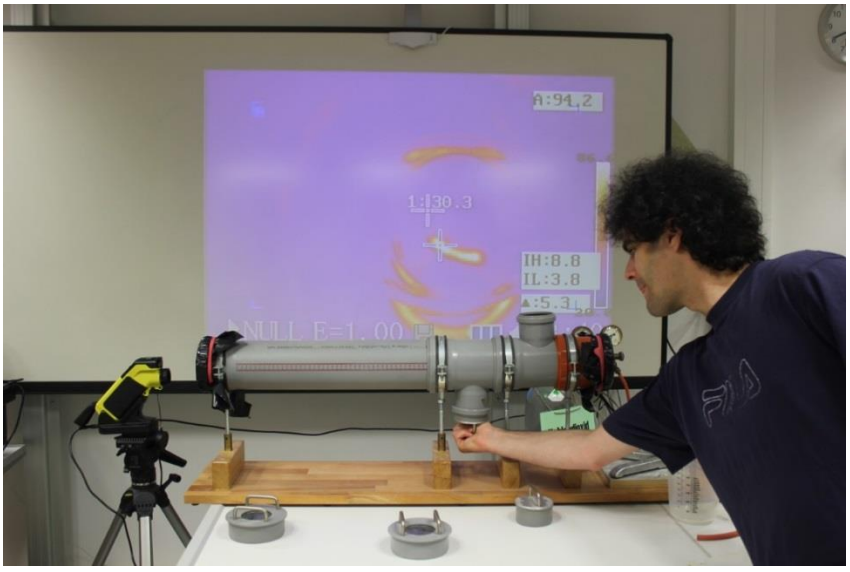
Sobald die Glühwendel eine konstante Temperatur erreicht hat wird langsam CO_2 in den oberen Stutzen gefüllt.

Das CO_2 hat im Becher Raumtemperatur angenommen.



Die Absorption von Wärmestrahlung durch das Treibhausgas sollte sich dahingehend auswirken, dass die von der IR-Kamera wahrgenommene Temperatur der Glühwendel gegenüber dem ursprünglichen Wert sinkt.

Tatsächlich gemessener Wert: - 1,1°C



Beim Herauslassen des CO_2 steigt die Temperatur wieder etwas an.

Die bei diesem Experiment von der Strahlung durchlaufende Strecke ist im Vergleich zur Mächtigkeit der Erdatmosphäre natürlich nur sehr klein. Dafür ist die CO_2-Konzentration in der Röhre viel höher als in der Lufthülle der Erde.
Insgesamt konnte uns dieser vielfach durchgeführte Versuch nicht vollständig überzeugen. Zwar fiel eine ganze Anzahl Ergebnisse deutlich höher aus als der hier dokumentierte, dafür gab es auch einige negative "Ausreißer" die den Durchschnitt wieder herunterdrückten.

Verstehen Sie die Experimente zum Treibhauseffekt daher bitte nur als Anregung diese Versuche mit Ihren Schülern vielleicht unter realitätsnäheren Bedingungen zu wiederholen.
Vielleicht liegt der pädagogische Wert hier mehr in der Versuchskritik und weniger in der Beweisführung der erwarteten Mechanismen.

CO_2-Treibhauseffekt und von einer Modell-Erde emittierte Wärmestrahlung

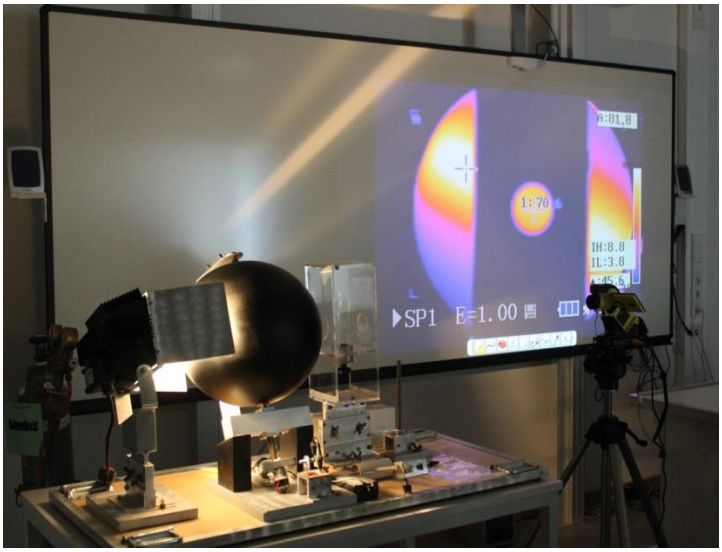
Fragestellung:

Lässt sich der CO_2-Treibhauseffekt mit einer Thermokamera demonstrieren?

Experiment:

- Rotierender schwarzer Metallglobus
- "Sonne", 500 W Strahler
- "Erdatmosphäre", Acrylgehäuse mit 2 Fenstern aus weitgehend IR-transparenter Folie
- Wärmebildkamera TROTEC EC060V
- CO_2-Flasche
- Beamer

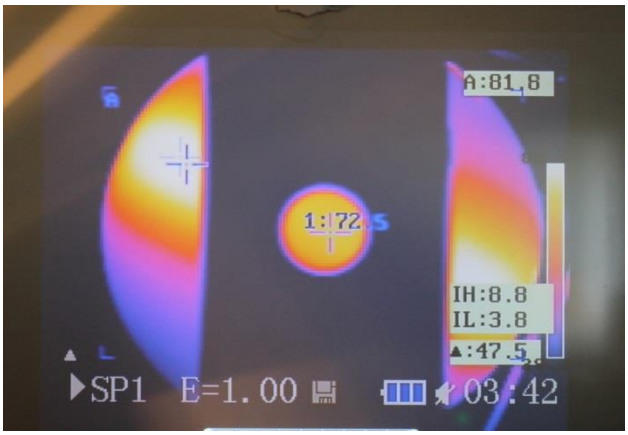
Versuchsaufbau



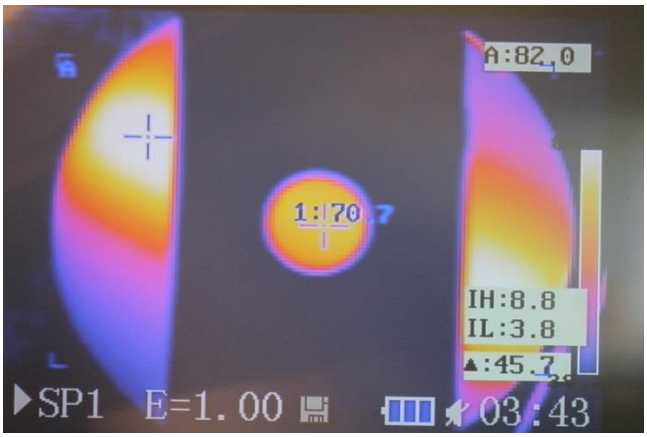
Der "Globus" wird in Betrieb genommen und aufgeheizt (ca. 80°C)
Die Wärmebildkamera wird auf das IR-Fenster gerichtet.
Der durch Absorption an der Folie entstehende Temperaturverlust beträgt ca. 10°C

Hypothese:

Durch das Einfüllen von raumwarmem CO_2 wird die gemessene "Atmosphären"-Temperatur sinken da ein Teil der Strahlung vom Treibhausgas zurückgehalten wird.



Vor Zugabe von CO_2



Nach Zugabe von CO_2

Ergebnis: Temperaturminderung (SPOT1, "Atmosphäre") um etwa 1,8°C,
Temperaturerhöhung im SPOT2 (Globus) um 0,2°C
Saldo: - 2,0°

Kurse im Energie-LAB und Ausleihmaterial des Schulbiologiezentrums

Im Energie-LAB der IGS Mühlenberg können Sie Kurse zu diesen Themen buchen wobei wir die Inhalte auf die konkrete Lerngruppe mit Ihnen abstimmen werden. Es gibt also keine Angebote "von der Stange"

Alles was hier dargestellt wurde lässt sich dort durchführen.

Des Weiteren bietet das Schulbiologiezentrum folgende Materialien zur Ausleihe an Schulen an:

- Schwarzer rotierender Globus zur Demonstration des Treibhauseffektes
- PT-Rohr, Moll´sche Thermosäule, Spannungsverstärker, Demonstrations-Messgerät
- IR-Kamera

Mehr dazu:

www.energie-lab.de

www.schulbiologiezentrum.info

Ingo Mennerich,
Schulbiologiezentrum Hannover/
Energie-LAB der IGS Mühlenberg
September 2016