

Entwerfen einer Physik-Show zum Thema „Licht jenseits des Sichtbaren“



Abschlussbericht der Kooperationsphase 2016/17

Durchgeführt am Institut für Theoretische Festkörperphysik,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Betreuerin: Dr. Antje Bergmann

Jonas Klausmann

Meret Grube

Inhalt

Abstract.....	2
1. Einleitung.....	3
1.1. Zielsetzung	3
1.2. Herausforderungen	3
1.2 Theorie der Infrarotstrahlung.....	4
1.2.1 Emission, Transmission und Reflexion.....	5
1.2.2 Plancksches Strahlungsgesetz und Schwarzer Strahler	6
2. Materialien & Methoden	8
2.1 Die Wärmebildkamera.....	8
2.2 Versuche.....	8
2.2.1 Konvektion	8
2.2.2 Wärmeleitung	10
2.2.3 Verdunstungskälte	11
2.2.4 Vergleich Glühbirne/Energiesparlampe – Energieproblematik.....	11
2.2.5 Widerstände und LEDs.....	12
2.2.6 Leslie-Würfel	13
2.2.7 Transmissionsvergleich	14
2.2.8 Absorptionsunterschiede.....	15
2.2.9 Emission am Bügeleisen.....	17
3. Diskussion.....	17
4. Danksagung	20
5. Quellen	21
6. Selbstständigkeitserklärung	22

Abstract

Our project “Physik-Show” obviously aimed at creating and staging a show about physics, more precisely infrared radiation, a scientific topic that, to our advantage, does not only consist of pure theories but also a wide spectrum of practical applications. That faced us with the challenge of covering both aspects equally in a way that awakes interest in our diverse audience of experts and amateurs. Trying to solve this problem, we started by working with our most important tool, the thermal camera. After finding out how it works and how it can be used, we first informed us about the facts and after that how these facts are visualized best. When we finally had determined how far we should go scientifically and which experiments work well explaining and backing up our theoretical knowledge, the next step was to take all that knowledge and form it into a show worth watching. But creating such a show is a task not as easy as it might sound, even after arranging all the information into a logical order, only half the work is done. The other half means writing a script and then practicing it to perfection.

1. Einleitung

1.1. Zielsetzung

In unserem Projekt ging es um das Erstellen einer Physik-Show, die unserem Publikum die Theorie und Praxis von Infrarotstrahlung näherbringen soll. Ziel der Show ist es, die trockene Theorie mit interessanten Anwendungen und den ungewöhnlichen Eigenschaften von Infrarotstrahlung zu kombinieren. Durchgeführt wurden die Versuche am Institut für theoretische Festkörperphysik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Die von uns konzipierte Show soll im Rahmen des Abschlusskolloquiums am 20. Oktober 2017 gezeigt werden. Damit wollen wir sowohl interessierte Laien als auch Experten, die mit der Materie der Infrarotstrahlung vertraut sind, ansprechen und begeistern.

1.2. Herausforderungen

Neben der selbstverständlichen Herausforderung jeder Physik-Show, Interesse zu wecken, stehen wir mit der Infrarotstrahlung vor zwei zusätzlichen Problemen:

- (a) Infrarot ist für das menschliche Auge nicht sichtbar. Deshalb müssen unsere Versuche mit einer Wärmebildkamera durchgeführt werden.
- (b) Infrarotstrahlung verhält sich nicht wie sichtbares Licht, viele Eigenschaften sind grundlegend verschieden.

Die individuelle Strahlung eines Körpers ist nicht nur, wie es auf den ersten Blick scheinen mag, von der Temperatur abhängig, sondern vor allem auch von der Oberfläche. Jedes Material besitzt einen eigenen Emissionsgrad, dieser ist konstant und wird im Vergleich zu einem idealen thermischen Strahler, dem sogenannten schwarzen Körper bestimmt. Um mit einer Wärmebildkamera die tatsächliche Temperatur eines Objekts zu messen, muss man erst einmal den Emissionsgrad wissen. Aber nicht nur bei der Ausstrahlung gibt es Unterschiede. Absorption, Reflektion und Transmission verlaufen bei Infrarot ebenfalls anders als bei sichtbarem Licht. Während ein Spiegel Licht reflektiert und eine Mülltüte als Blockade dienen kann, geht Infrarot durch besagte Tüte durch und wird dafür von Glas blockiert und beispielsweise an matten Metallplatten eins zu eins reflektiert. Diese Besonderheiten zu veranschaulichen und zu erklären gehört zu unseren Hauptaufgaben.

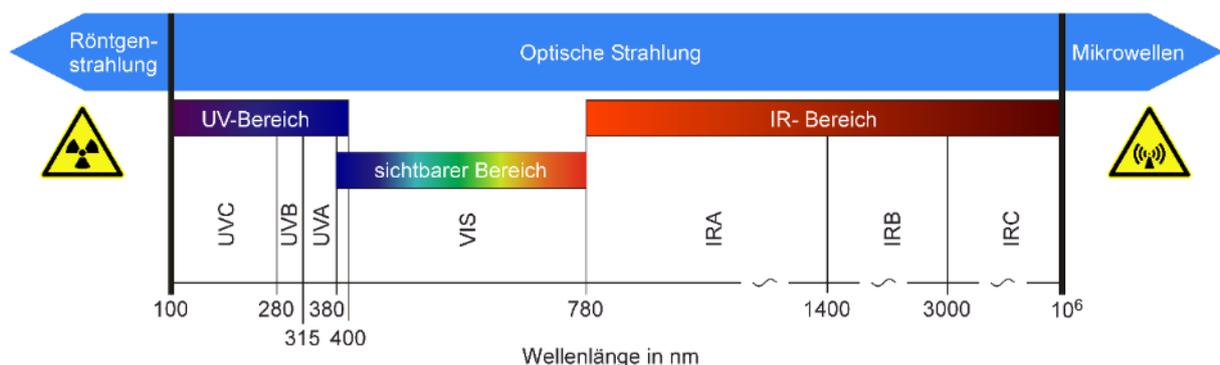


Abb. 1: Die Infrarotstrahlung wird unterteilt in nahes Infrarot (IRA), mittleres Infrarot (IRB) und fernes Infrarot (IRC).

1.2 Theorie der Infrarotstrahlung

Infrarotstrahlung (oft auch als Wärmestrahlung bezeichnet) ist Teil der optischen, elektromagnetischen Strahlung und umfasst einen Wellenlängenbereich von ca. 780 nm bis zu 1 mm (siehe Abb. 1). Die größte natürliche Quelle für Infrarotstrahlung ist unsere Sonne. Etwa die Hälfte ihrer Strahlung, die uns erreicht, ist Infrarotstrahlung.

Der Astronom und Musiker Wilhelm Herschel (siehe Abb. 3) entdeckte im Jahre 1800 durch Zufall die thermische Strahlung. Sein eigentliches Ziel war es, die Temperaturen der verschiedenen Spektralfarben zu messen, um herauszufinden, ob sich die Farben in ihrer Temperatur unterscheiden. Dazu brach er das Sonnenlicht mithilfe eines Prismas und benutzte Quecksilberthermometer, um die einzelnen Temperaturen der Farben des Lichtspektrums zu messen. Dabei stellte er fest, dass das Violett-Rot-Spektrum eine höhere Temperatur aufwies bzw. dass je höher die Wellenlänge, desto höher auch die angezeigte Temperatur war. Erstaunlicherweise konnte er aber im Bereich jenseits des roten Lichts, der für unsere Augen unsichtbar ist, die höchste Temperatur messen (siehe Abb. 2). Er hatte die **Infrarotstrahlung** entdeckt.

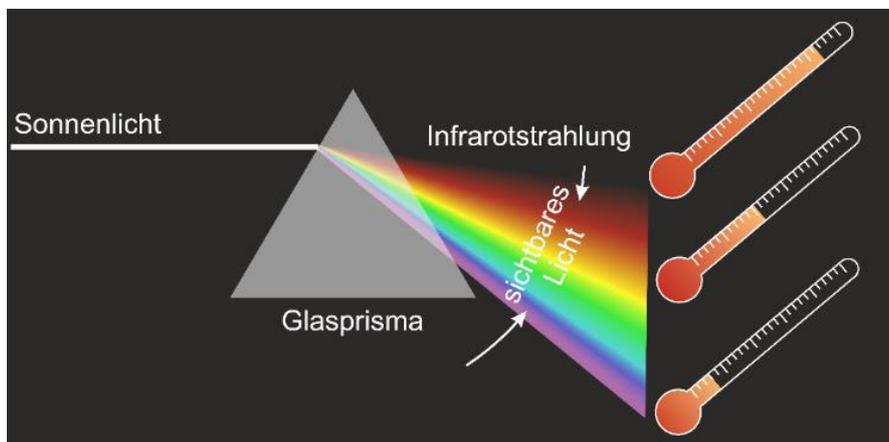


Abb. 2: Wilhelm Herschel zerlegte das Sonnenlicht in die Spektralfarben und versuchte ihre Temperatur zu bestimmen. Die höchste Temperatur fand er jenseits des roten Lichts in der Infrarotstrahlung.

Infrarotstrahlung macht man sich in vielen Bereichen zunutze, z. B. in der Medizin in Form von Infrarotlampen oder bei der thermischen Prozesstechnik (Materialtrocknung). Sie findet in Form von Wärmebildern auch in der Thermographie z. B. bei der Identifikation von Wärmeverlusten von Gebäuden Anwendung. Im Alltag wird sie für Fernbedienungen (Fernseher, Fotokamera) eingesetzt. Besonders wichtig ist sie jedoch im Bereich der Chemie zur Analyse und Bestimmung chemischer Substanzen (Infrarotspektroskopie). Mit der Infrarotreflektographie können die Vorzeichnungen von Bildern sichtbar gemacht werden und so Kunstfälschungen aufgedeckt werden. In der Astronomie wird sie verwendet, um „kältere“ Objekte im Weltraum ($< 700^{\circ}\text{C}$) aufzuspüren oder um durch interstellare Wolken hindurchzusehen.



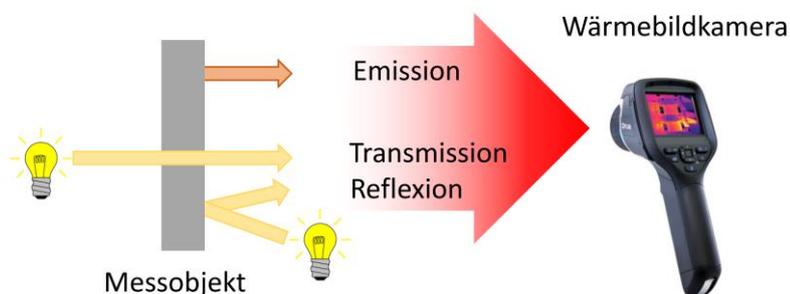
Abb.3: Wilhelm Herschel, Gemälde von Lemuel Francis Abbott 1785 (NPG 98, © National Portrait Gallery, London).

1.2.1 Emission, Transmission und Reflexion

Das Wort **Emission** kommt vom lateinischen Wort *emittere*, was so viel wie „aussenden“ bedeutet. In der Physik versteht man darunter das Abgeben von Strahlung bzw. die Eigenstrahlung von Materie. **Transmission** beschreibt die Durchlässigkeit eines Mediums in Bezug auf Strahlung. **Reflexion** ist die Eigenschaft von Materialien, Strahlung zu reflektieren. Die Strahlung, die von einem Objekt unser Auge erreicht, setzt sich immer aus diesen drei Komponenten zusammen. Beispielobjekte im sichtbaren Bereich sind Glühlampen (Emission), (Acryl-)Glas (Transmission) oder Metalloberflächen (Reflexion).

Was haben diese Begriffe mit Infrarotstrahlung zu tun? Da Infrarotstrahlung auch eine elektromagnetische Strahlung ist, kann sie sowohl von außen auf das Messobjekt scheinen oder vom Objekt selbst emittiert werden (siehe Abb. 4). Die Transmission und Reflexion von Infrarotstrahlung hängt von den Materialeigenschaften des Messobjekts ab und können zur Materialanalyse verwendet werden. Die meisten Festkörper absorbieren Infrarotstrahlung unter Erwärmung, da sie z.B. Kristallgitterschwingungen anregt.

Beispiele für Objekte, die einen hohen Transmissionsgrad für Infrarotstrahlung haben, sind bestimmte Salzkristalle und Diamanten, für einen hohen Reflexionsgrad sind dies Metalloberflächen mit einem geringen elektrischen Widerstand (Kupfer, Aluminium) und matte oder dunkle Oberflächen haben einen hohen Emissionsgrad.



$$\text{Emissionsgrad} + \text{Transmissionsgrad} + \text{Reflexionsgrad} = 1$$

Abb. 4: Veranschaulichung des Emissions-, Transmissions- und Reflexionsverhaltens eines Messobjektes. Die einzelnen Anteile werden auf die gesamte ausgehende Strahlung bezogen.

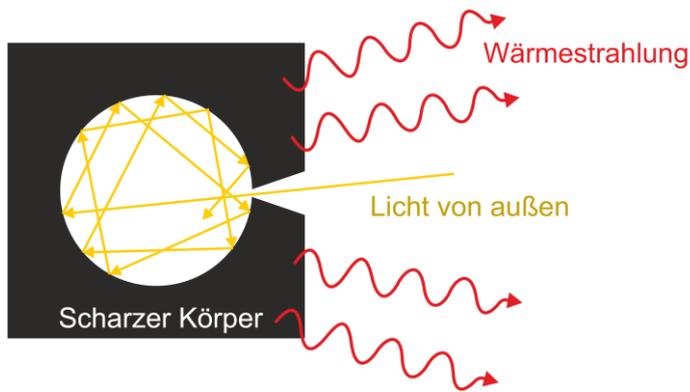


Abb. 5: Der Schwarze Strahler absorbiert alles Licht, das von außen auf ihn fällt. Er emittiert ausschließlich Wärmestrahlung, die durch seine Temperatur bestimmt wird (Planck'sches Strahlungsgesetz).

1.2.2 Planck'sches Strahlungsgesetz und Schwarzer Strahler

Jedes Objekt oberhalb des absoluten Nullpunktes ($-273,15^{\circ}\text{C}$) emittiert elektromagnetische Strahlung, die sogenannte Wärmestrahlung (Emission). Die Temperatur des Objekts bestimmt dabei die abgestrahlte Energiemenge und die Wellenlängenverteilung. Je wärmer ein Körper ist, desto mehr Strahlung gibt er ab und desto kürzer ist die Wellenlänge der Strahlung. Diesen Sachverhalt beschreibt das Planck'sche Strahlungsgesetz, das sich auf einen idealen schwarzen Strahler bezieht. Ein schwarzer Strahler ist ein idealisiertes Objekt, das jegliche elektromagnetische Strahlung absorbiert und damit kein äußeres Licht transmittiert bzw. reflektiert (angenähert: schwarzer Innenraum mit rauer Oberfläche und kleiner Öffnung nach außen, siehe Abb. 5). Ein schwarzer Körper emittiert ausschließlich die Wärmestrahlung: Emissionsgrad = 1.

Diese Wärmestrahlung wird nur durch die Temperatur bestimmt und nicht durch die Oberfläche des Strahlers. Für Temperaturen unterhalb von 700°C liegt das Maximum der Planck'schen Verteilung im Wellenbereich der Infrarotstrahlung. Die Infrarotstrahlung ist damit besonders für die Temperaturmessungen in diesem Bereich geeignet.

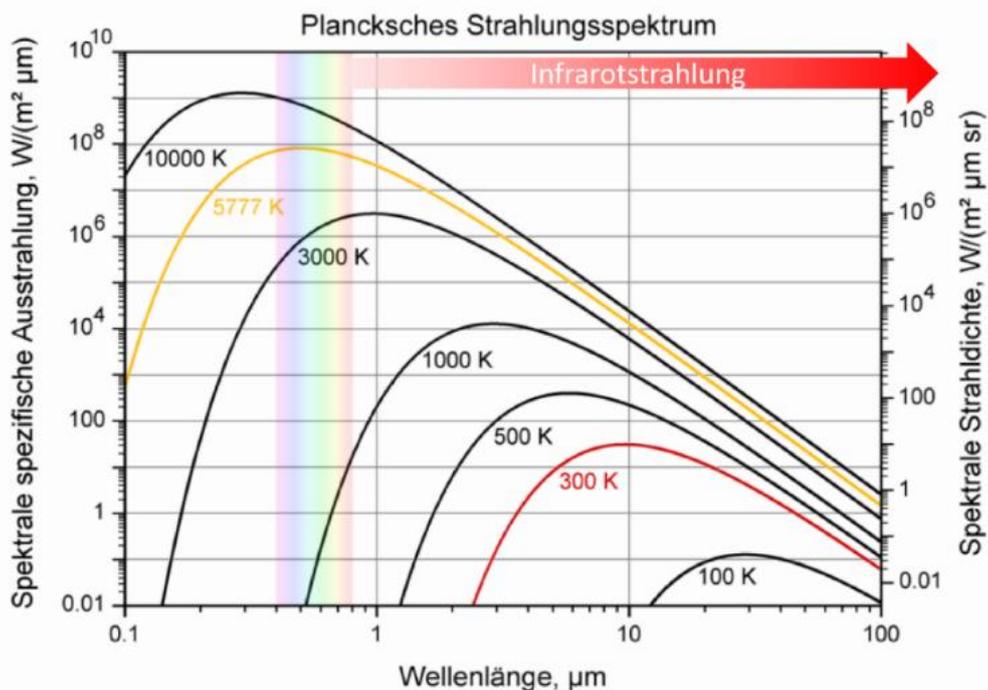


Abb. 6: Planck'sches Strahlungsgesetz für Schwarze Körper mit unterschiedlichen Temperaturen.

Bei Gegenständen, die keine schwarzen Strahler sind, wird zusätzlich Strahlung transmittiert und reflektiert. Dadurch ist der Emissionsgrad für die Wärmestrahlung kleiner als 1 und muss bei der Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera einbezogen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass infrarotes Licht auf andere Weise transmittiert und reflektiert wird.

Hierzu ein kleines Beispiel: Stellen Sie sich vor, Sie nehmen eine Wärmebildkamera zur Hand, die Infrarotstrahlung mittels empfindlicher Sensoren messen und anschließend sichtbar machen kann. Sie richten nun die Kamera auf eine Fensterglasscheibe mit einer Gardine dahinter. Dann werden Sie sich selbst darin sehen und zwar auch die Temperaturverteilung Ihrer Körperoberfläche. Das lässt sich wie folgt erklären: Die Infrarotstrahlung Ihres Körpers erreicht die Glasscheibe, wird an dieser teilweise reflektiert und erreicht die Sensoren der Wärmebildkamera. Die Messdaten werden von der Elektronik in der Wärmebildkamera ausgewertet und ein Thermobild erstellt. Auf dem Wärmebild sind die Gardine und alles hinter der Glasscheibe jedoch nicht zu sehen. Das liegt daran, dass die Infrarotstrahlung das Glas nicht durchdringen kann. Ein weiteres Beispiel für dieses Phänomen wird in den Abbildungen 7 und 8 gezeigt.



Abb. 7: Fotografie eines Heizkörpers im Winter im sichtbaren Wellenbereich.

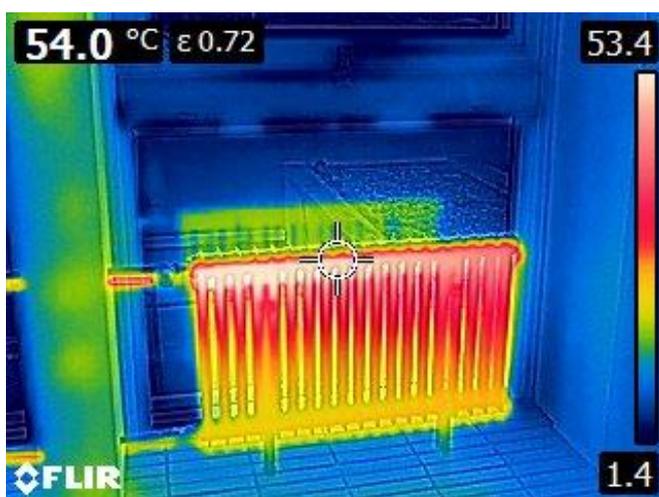


Abb. 8: Der gleiche Bildausschnitt wie in Abb. 7, aber diesmal aufgenommen mit einer Wärmebildkamera im Infrarotbereich. Die Wärme des Heizkörpers und seiner Zuleitungen sind deutlich erkennbar. Im Vergleich zu Abb. 7 wird die Wärmestrahlung der Heizung stärker von dem dahinterliegenden Fenster reflektiert als im sichtbaren Wellenbereich.

2. Materialien & Methoden

2.1 Die Wärmebildkamera

Ohne geeignete Darstellungsmethode wäre eine Show zum Thema Infrarotstrahlung nicht sehr interessant. Die E5 Wärmebildkamera der Firma FLIR liefert uns viele verschiedene Möglichkeiten, Licht im Infrarotbereich für das menschliche Auge erkennbar zu machen. Neben der klassischen Temperatur-Farbe-Zuordnung kann diese Kamera gleichzeitig optische Bilder zum Vergleich zeigen oder Formen und Linien im Hintergrund verdeutlichen (MSX-Modus).

Hinzu kommt die Funktion, materialspezifische Emissionsgrade und Reflexionsparameter manuell einzugeben. Durch die so gegebene Messgenauigkeit und übersichtliche Veranschaulichung eignet sie sich sehr gut für Shows vor – unterschiedlich mit der Thematik vertrautem – Publikum.



Abb. 9: FLIR E5 Wärmebildkamera. Die Kamera zeichnet die Intensität der Infrarotstrahlung im Infrarotbereich zwischen 7.5 und 13 μm auf. Sie wandelt die Infrarotstrahlung in ein sichtbares Bild um. Dabei werden den unterschiedlichen Intensitäten bestimmte Farben zugewiesen. Diese Falschfarbendarstellung soll die Identifizierung kleiner Temperaturunterschiede erleichtern. Der erfassbare Temperaturbereich der Kamera reicht von -20°C bis $+250^{\circ}\text{C}$ mit einer absoluten Genauigkeit von ca. $\pm 2\%$. Der kleinste auflösbare Temperaturunterschied ist 0.1°C .

2.2 Versuche

2.2.1 Konvektion

Konvektion beschreibt eine zirkuläre Strömungsbewegung, bei der thermische Energie (Wärme) in flüssigen oder gasförmigen Stoffen transportiert und verteilt wird. Sie ist für das Klima auf der Erde und die Magmaströme des Erdinnern von zentraler Bedeutung (siehe z.B. Golfstrom, Passatwinde oder Plattentektonik).

Anhand von zwei anschaulichen Experimenten kann man mit der Wärmebildkamera den Wärmetransport sehr gut sichtbar machen. Der erste Versuch besteht aus einer Kerze, die angezündet und durch die Wärmebildkamera hindurch betrachtet wird. Man erkennt deutlich, dass die höchste Temperatur in der Mitte der Kerzenflamme herrscht, während die Luft über der Flamme nach oben hin abkühlt. Rechts und links der Flamme wird die Luft nicht erhitzt. Das liegt daran, dass die Kerzenflamme nur die Luft direkt über ihr erwärmt. Die erwärmte Luft steigt aufgrund ihrer geringeren Dichte nach oben, kühlt dort ab und sinkt an beiden Seiten der Kerze wieder nach unten, da kühlere Luft schwerer ist. Die so entstehenden Luftwirbel sind die Konvektionsströme.

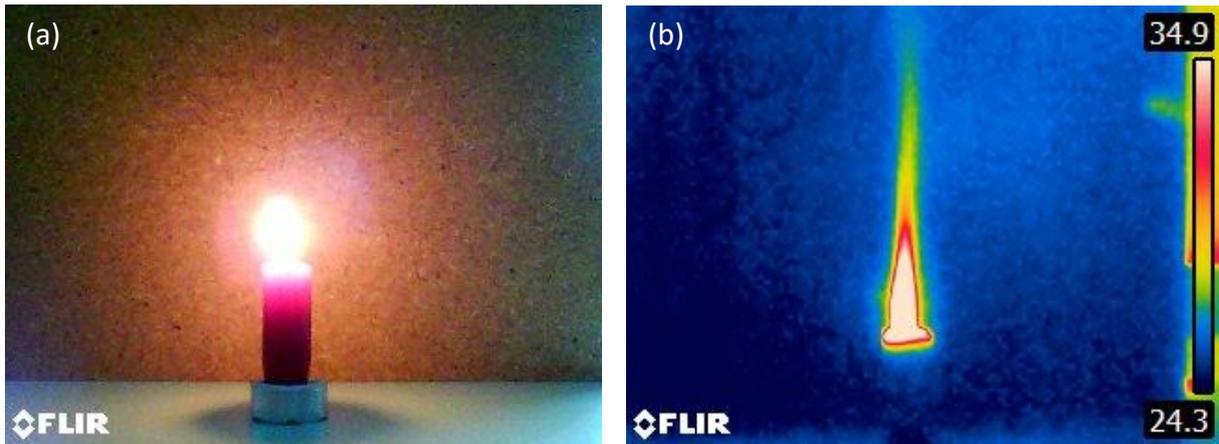


Abb. 10: (a) Bild einer Kerze im sichtbaren Wellenbereich. (b) Die gleiche Kerze im Infraroten Bereich. Die warme Luft oberhalb der Kerze ist Teil der Konvektionsströmung.

Im zweiten Versuch wird eine Plastiktüte mit kaltem Wasser etwa zur Hälfte gefüllt, anschließend gibt man warmes (nicht heißes, sonst würde das Plastik schmelzen!) Wasser hinein. Der sich ergebende Effekt wird im Folgenden an einem zeitlichen Verlauf von Wärmebildkamerabildern im Abstand von wenigen Sekunden gezeigt. Man sieht sehr deutlich, dass das warme Wasser anfangs auf den Boden der Plastiktüte absinkt. Nach kurzer Zeit kann man erkennen, dass fast das gesamte Wasser die gleiche Temperatur angenommen hat, da sich die Wärme aufgrund der Zirkulation des Wassers im gesamten Plastikbeutel verteilt hat.

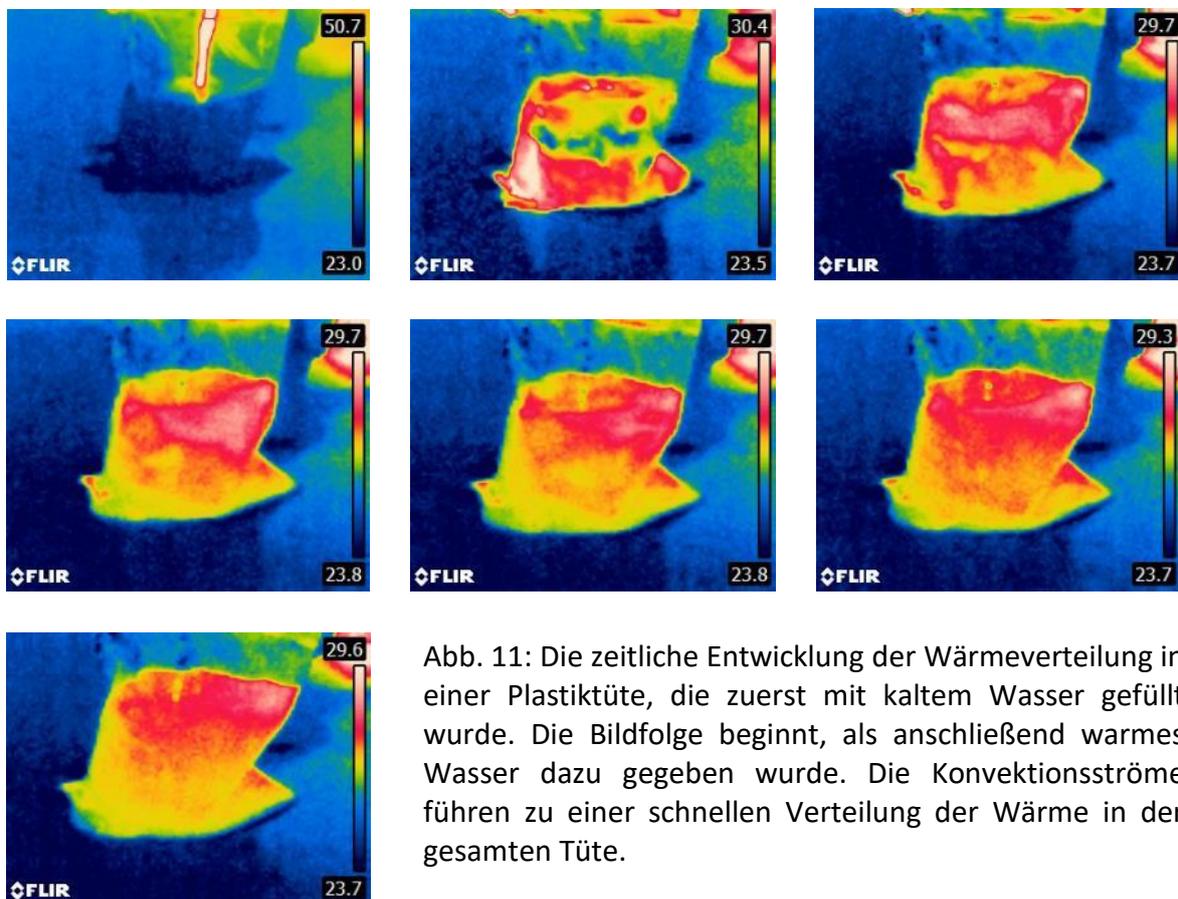


Abb. 11: Die zeitliche Entwicklung der Wärmeverteilung in einer Plastiktüte, die zuerst mit kaltem Wasser gefüllt wurde. Die Bildfolge beginnt, als anschließend warmes Wasser dazu gegeben wurde. Die Konvektionsströme führen zu einer schnellen Verteilung der Wärme in der gesamten Tüte.

2.2.2 Wärmeleitung

Unser nächster Versuch beschäftigt sich mit dem Thema Wärmeleitung. Man kann die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Isolatoren auch mit der Wärmebildkamera sichtbar machen. Dazu benötigt man ein Holzbrett, eine Metallplatte und die eigene Körperwärme. Zuerst drückt man seine Hand 30 Sekunden lang mit der geöffneten Handfläche nach unten auf die Holzplatte und hebt die Hand anschließend ab. Der Handabdruck kurz nach dem Hochheben der Hand ist deutlich auf dem Holz durch die Wärmebildkamera hindurch sichtbar. Selbst nach einer Minute kann man die Umrisse noch deutlich erkennen (siehe Abb. 12).

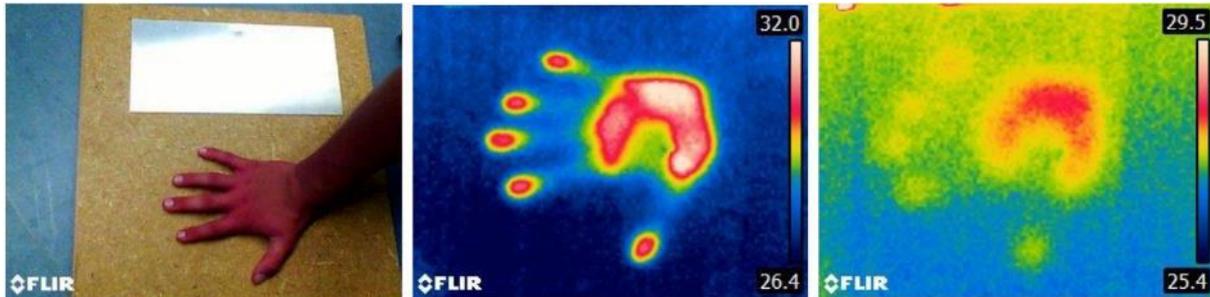


Abb. 12: Im ersten Teil unseres Versuches pressen wir eine Hand auf die Holzplatte. Die Wärme des Handabdrucks ist noch lange mit Hilfe der Wärmebildkamera sichtbar.

Nun führt man den Versuch auf dieselbe Weise auf der Metallplatte durch. Doch wenn man die Hand von der Platte anhebt, sieht man keinen Handabdruck auf der Platte. Lediglich die Reflexion der Wärmebildkamera ist in Abb. 13 zu sehen. Das liegt zum einen daran, dass der Emissionsgrad der Metallplatte klein ist und deshalb nur wenig Wärmestrahlung von der Metallplatte emittiert wird. Zum anderen ist dafür die hohe Wärmeleitfähigkeit von Metallen verantwortlich. Sie führt zu einer schnellen Verteilung der Wärme, sodass schon nach kurzer Zeit der Handabdruck verschwindet. Aufgrund der beweglichen Leitungselektronen kann die thermische Energie in Metallen viel besser und effektiver weitergegeben werden als in Isolatoren. In den zuletzt genannten wird die Wärme nur über die sehr viel langsameren Gitterschwingungen, sogenannte Phononen, weitergegeben und kann deshalb nicht so schnell abtransportiert werden wie in Metallen. Um diesen Effekt in der Metallplatte zu verdeutlichen, werden wir in unserer Show den Emissionsgrad der Metalloberfläche durch einen Klebstreifen dem der Holzplatte angleichen (zusätzlich stoppen wir die Reflexion).

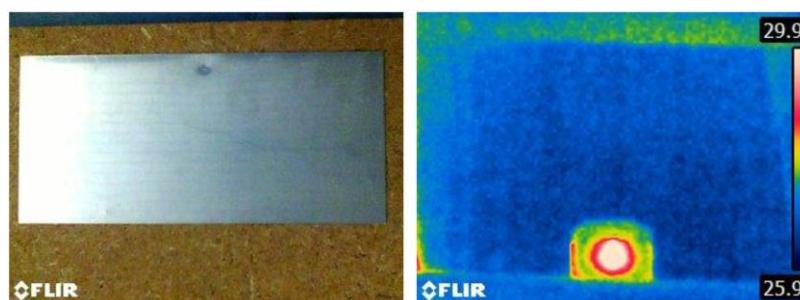


Abb. 13: Der gleiche Versuch diesmal mit einer Metallplatte. Wegen ihres geringen Emissionsgrades wird in erster Linie die Infrarotstrahlung der Umgebung reflektiert. Am unteren Bildrand kann man die Wärmebildkamera erkennen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Platte wird die Wärme des Handabdrucks in kurzer Zeit verteilt.

2.2.3 Verdunstungskälte

Verdunstungskälte entsteht, wenn man z. B. etwas Alkohol auf seine Hand träufelt. Der flüssige Alkohol braucht Energie, um in den gasförmigen Zustand überzugehen, bzw. zu verdunsten. Diese Energie entzieht er folglich dem menschlichen Körper in Form von Wärme. Als Resultat bleibt ein kühles Gefühl auf der Haut zurück (siehe Abb. 14).

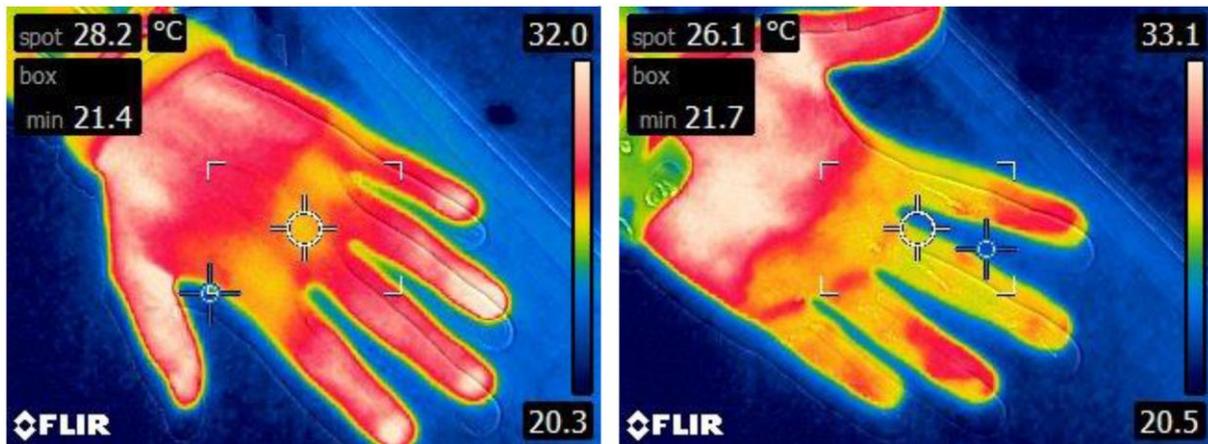


Abb. 14: Die Handaußen- und Innenseite kurz nachdem sie mit Alkohol betupft wurde. Die kühlende Wirkung kann an den gelben Flächen beobachtet werden.

2.2.4 Vergleich Glühbirne/Energiesparlampe – Energieproblematik

Da der Klimawandel, der unser Leben auf der Erde bedroht, gerade ein sehr aktuelles Thema ist, sind wir der Meinung, dass ein Versuch zur Energieproblematik bei unserer Physik-Show nicht fehlen darf. Aus diesem Grund haben wir uns einen Versuch überlegt, bei dem wir zeigen wollen, wie sich die Wirkungsgrade einer Glühlampe und einer Energiesparlampe unterscheiden. Dazu betrachten wir die beiden Lampen mit der Wärmebildkamera. Es ergibt sich folgendes Bild (Abb. 15):



Abb. 15: Das linke Bild zeigt die Lampen im sichtbaren Licht im ausgeschalteten Zustand, um eine Überbelichtung des Fotos zu vermeiden. Im rechten Bild sind die Lampen im angeschalteten Zustand im Infrarotbereich zu sehen. Der Übergang von Rot zu Weiß zeigt, dass die Glühlampe heißer als die Energiesparlampe wird.

Man sieht, dass die Energiesparlampe insgesamt weniger Wärmestrahlung abgibt, wohingegen die Glühlampe deutlich heißer wird (erkennbar vor allem am oberen weißen

Bereich, der besonders heiß ist). Auf diese Weise ist es uns gelungen, bildlich zu veranschaulichen, dass die Glühlampe mehr elektrische Leistung in Infrarotstrahlung als in sichtbares Licht umsetzt. Energiesparlampen können die elektrische Energie effizienter nutzen, haben aber dennoch keinen optimalen Wirkungsgrad. Momentan wandeln sie nur 12 % der Energie in sichtbares Licht um, Glühlampen nur ca. 2,2 %. In beiden Fällen wird der Großteil der hineingesteckten elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. In der Show werden wir diesen Versuch auch mit einer etwas sparsameren LED-Lampe durchführen.

2.2.5 Widerstände und LEDs

Nicht nur die Glühwendeln in Lampen werden durch den elektrischen Strom erhitzt. Auch mit ganz gewöhnlichen Widerständen kann veranschaulicht werden, welchen Einfluss die Größe des Widerstandes (Einheit in Ohm) auf die Emission von Infrarotstrahlung hat. Dazu haben wir zwei verschiedene LEDs (eine rote und eine grüne) mit jeweils einem Vorwiderstand (vor Rot: 910Ω , vor Grün: 82Ω) parallelgeschaltet, sodass die Spannung in jedem Zweig der Schaltung gleich ist. Nach dem Anschließen an ein Netzgerät wird die Spannung langsam auf ca. 12 Volt hochgedreht. Es ergibt sich folgendes Bild mit der Wärmebildkamera (Abb. 16):

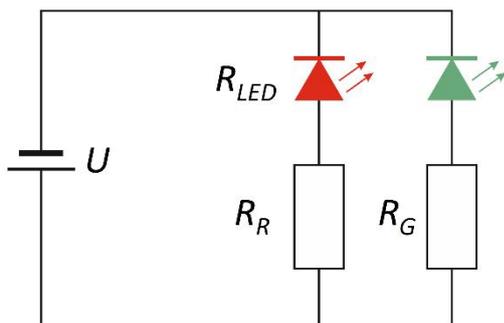
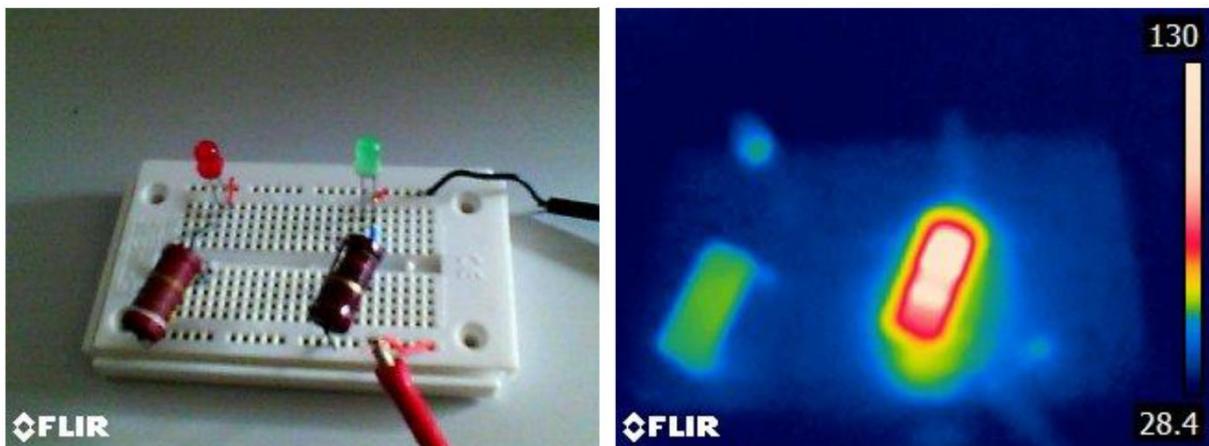


Abb. 16: Links die Schaltung im sichtbaren und rechts im infraroten Licht, darunter ein Prinzipschaubild der aufgebauten Schaltung. Der kleinere Vorwiderstand R_G der grünen LED führt dazu, dass durch diesen Teil des Stromkreises mehr Strom fließt und sich der Widerstand damit stärker erhitzt.

Sofort sticht einem der Vorwiderstand R_G der grünen LED ins Auge, der hellrot bis weiß leuchtet, da er sehr heiß ist und somit viel Infrarotstrahlung abgibt. Auffällig ist zudem, dass der Vorwiderstand R_R der roten LED kaum erhitzt wird, aber die rote LED etwas wärmer als die grüne LED ist, die auf dem Thermobild kaum erkennbar ist. Die erste Beobachtung kann wie folgt erklärt werden: In einer Parallelschaltung addieren sich die Stromstärken der einzelnen Zweige, d. h. der Strom, der fließt, bzw. die Elektronen teilen sich auf die beiden Zweige in $I = I_R + I_G$ auf. Das kann man sich wie eine Wasserleitung vorstellen, die sich verzweigt. Dabei nehmen die Elektronen den Weg, der ihnen am wenigsten Widerstand entgegenbringt oder anders gesagt, anhand des Wasserbeispiels, wo mehr Wasser in kürzerer

Zeit hindurchfließen kann. Deshalb wählen die Elektronen den Zweig mit der grünen LED, da der Vorwiderstand R_G deutlich kleiner als R_R ist. Damit ist die Stromstärke I_G im grünen LED-Zweig höher, es fließt mehr Ladung pro Zeitintervall hindurch. Rein rechnerisch ergibt sich für die elektrische Leistung, die in Wärme (und LED-Licht) umgewandelt wird:

$$P_G = U \cdot I_G = U^2 / (R_G + R_{LED}) \text{ und } P_R = U^2 / (R_R + R_{LED}).$$

Hierbei wird angenommen, dass in beiden Fällen der Widerstand der LEDs gleich groß ist. Da R_R ungefähr 10-mal größer als R_G ist, wird im Zweig der grünen LED je nach R_{LED} bis zu 10-mal mehr Wärmeenergie pro Zeit erzeugt: $\frac{P_G}{P_R} = \frac{R_R + R_{LED}}{R_G + R_{LED}} < \frac{R_R}{R_G}$.

Etwas rätselhaft ist, warum die rote LED, die von einem kleineren Strom durchflossen wird, mehr Infrarotstrahlung emittiert. Das liegt wahrscheinlich daran, dass der Spektralbereich dieser LED bis in den infraroten Bereich hineinreicht. Es könnte auch daran liegen, dass die Widerstände der LEDs doch unterschiedlich sind.

Wenn unsere Show in geschlossenen Räumen stattfindet, kann man auch sehr schön elektrische Leitungen, Steckdosen und Netzteile mit der Wärmebildkamera sichtbar machen (siehe Abb. 17).

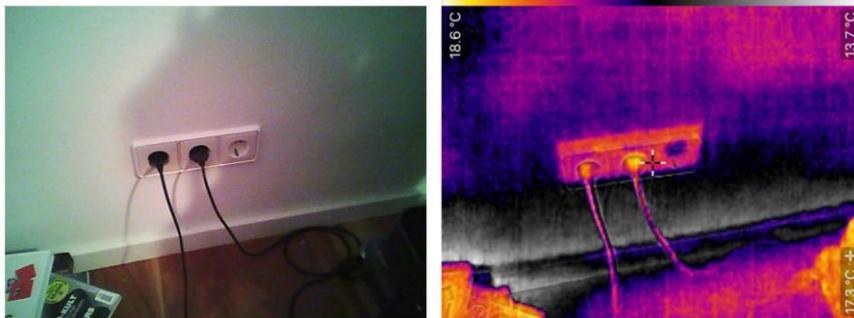


Abb. 17: Steckdosen im sichtbaren und infraroten Wellenbereich. Durch die angeschlossenen Geräte fließt Strom und es entstehen Wärmeverluste.

2.2.6 Leslie-Würfel

Der sogenannte Leslie-Würfel ist ein professionelleres Versuchsobjekt. Er ist innen hohl und besitzt an der Außenseite vier verschiedene Oberflächen (eine schwarze, eine raue, eine weiße und eine Fläche aus Metall). Wenn man den Würfel mit heißem Wasser befüllt, heizen sich die einzelnen Oberflächen gleichmäßig auf. Die Wärmebildkamera zeigt jedoch unterschiedliche Temperaturen an den vier Außenseiten an (siehe Abb. 18). Die gemessenen Temperaturen sind falsch, da die verschiedenen Oberflächen auch unterschiedliche Emissionsgrade haben. Somit müsste man erst den richtigen Emissionsgrad einer Oberfläche wissen, um die exakte Temperatur messen zu können. Umgekehrt kann auf diese Weise der Emissionsgrad der Oberflächen bestimmt werden.

Die schwarze Fläche zeigt die höchste Temperatur an, die weiße eine geringfügig schwächere und die spiegelglatte eine völlig falsche, nämlich die Reflektion der Umgebung statt der eigentlichen Würfeltemperatur, welche nur dann sichtbar wird, wenn man jede Seite mit einem schwarzen Streifen Klebeband versieht (Abb. 18(c, f, i, l), die rechte Spalte) welcher anzeigt, dass tatsächlich jede Seite bei gleichem Emissionsgrad gleiche Wärmestrahlung abgibt.

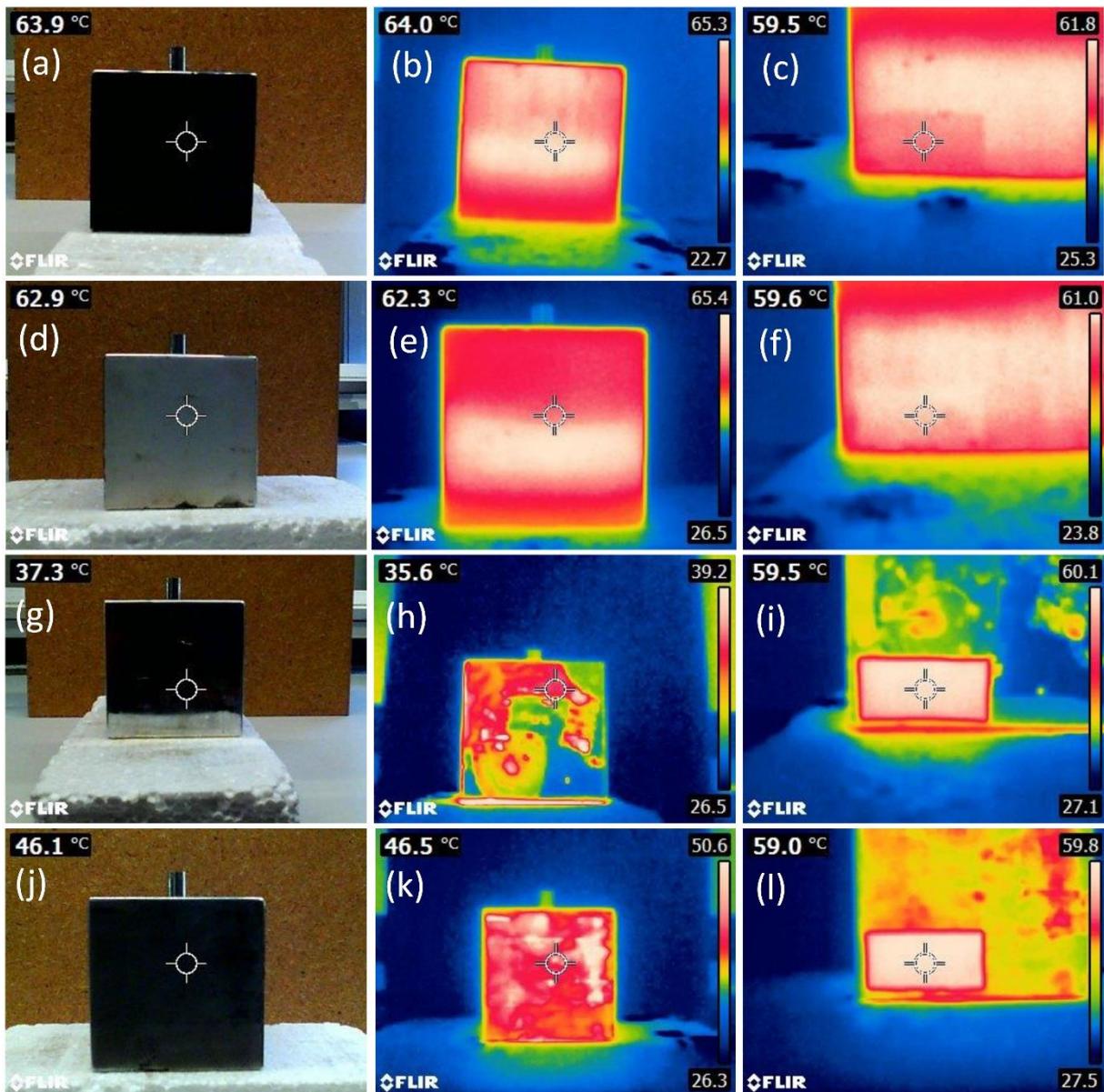


Abb. 18: Der Leslie-Würfel mit (a-c) der schwarzen Oberfläche, (d-f) die weiße Oberfläche, (g-i) die Metallplatte und (j-l) die raue Oberfläche. Neben der Ansicht im sichtbaren und infraroten Bereich, zeigt die rechte Spalte (c, f, i, l) die Infrarotansicht mit dem Klebestreifen (siehe Text).

2.2.7 Transmissionsvergleich

Die vier Bilder in Abbildung 19 sind unser Versuch zu den Transmissionseigenschaften von Infrarotstrahlung. Sie sollen die überraschenden Unterschiede im Vergleich zu sichtbarem Licht veranschaulichen. Zunächst sieht es so aus, als ob man die Bilder falsch zugeordnet hätte, aber menschliches Versagen spielt bei dieser Anordnung keine Rolle. Die Mülltüte lässt tatsächlich beinahe jegliche Infrarotstrahlung durch, während Glas infrarotes Licht blockiert. Umgekehrt verhält es sich bei Licht im sichtbaren Bereich.

Das gleiche Prinzip werden wir auch in größerem Maße bei unserer Show anwenden, indem wir ein paar interessante Versuche hinter einem „Vorhang“ aus Müllfolien durchführen werden. Dadurch wird der Effekt verstärkt und das Publikum muss rätseln, was eigentlich passiert, schließlich sieht das Auge nichts durch den Müllvorhang. Spannend wird es dann,

wenn man sich unter einer Rettungsdecke versteckt. Diese verzerrt durch ihre starke Reflexion das Bild der Person so stark, dass sie beinahe unsichtbar erscheint.

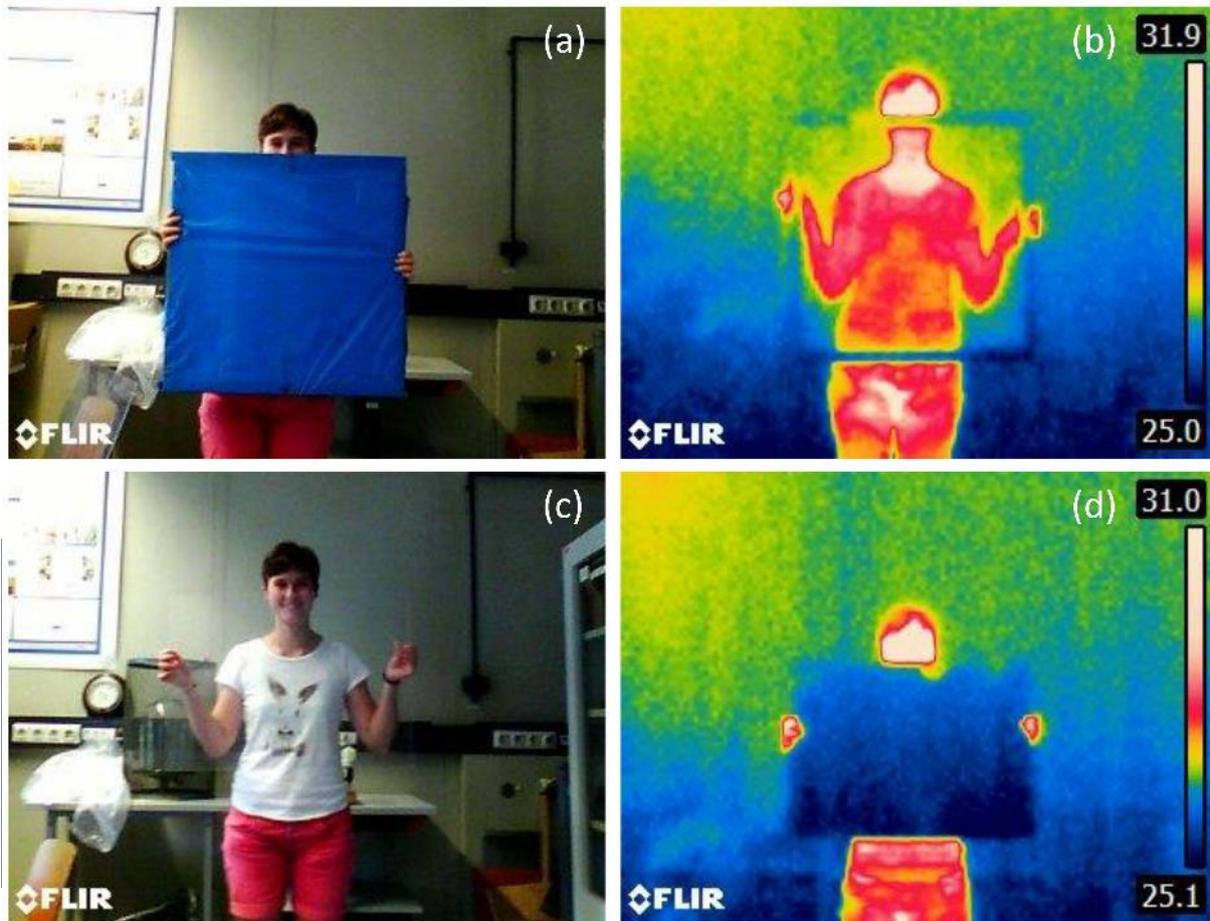


Abb. 19: (a, b) Das Transmissionsverhalten an einer aufgespannten Mülltüte und (c, d) einer Glasplatte. Infrarotstrahlung und sichtbares Licht verhalten sich genau umgekehrt.

2.2.8 Absorptionsunterschiede

Absorption beschreibt die Eigenschaft von Körpern, Strahlung aufzunehmen. Der Grund aus dem wir unter einer Infrarotlampe Wärme spüren ist, dass unser Körper weder völlig durchlässig, noch komplett reflexiv aufgebaut ist. Die Energie muss also irgendwie aufgenommen beziehungsweise absorbiert werden. Wärme entsteht aber nicht durch die Kollision von Strahlung und Oberflächen, sondern hauptsächlich dann, wenn die Atome eines Körpers durch die Strahlung in Schwingung versetzt werden, d.h. Gitterschwingungen (Phononen) des Kristallgitters angeregt werden. Diese quantenmechanische Bedingung lässt sich vereinfacht mit einem Molekül in einem Kondensator darstellen (Abb. 20):

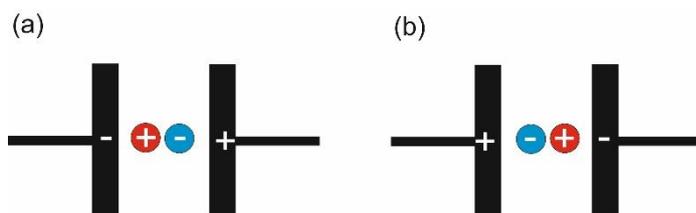


Abb. 20: Molekül mit zwei unterschiedlich geladenen Atomen im elektrischen Wechselfeld eines Plattenkondensators.

Auf die unterschiedlich geladenen Atome eines Moleküls (unterschiedliche Elektronegativität) wirkt das Licht wie das Wechselfeld eines Plattenkondensators, an dem eine Wechselspannung angelegt wurde. Da die Massen der Atome vergleichsweise groß sind, reagieren sie träge. Aus diesem Grund kann oft nur langwellige Strahlung sie zu Schwingungen anregen. Materialien, die aus polaren Bindungen aufgebaut sind, absorbieren daher meistens Infrarotstrahlung (z.B. Glas), während kovalente Bindungen zwischen gleichen Atomen meist im infraroten Bereich durchlässig sind (z.B. Kohlenstoffbindungen in Diamant, Mülltüten). Während in Isolatoren die Infrarotstrahlung über die Schwingungsenergie in Wärme umgewandelt wird, werden in Metallen die beweglichen Elektronen hin- und her bewegt. Dabei wird ein kleiner Teil, wie in einem elektrischen Widerstand, in Wärme umgewandelt und der große Rest reflektiert.

Die Absorption von Licht hat sich die Natur zunutze gemacht, um die Körpertemperatur anzuheben. Das Eisbärenfell bedeckt beispielsweise eine schwarze, gut absorbierende Haut. Die Haare wirken als Lichtleiter, die das Licht zur Haut transportieren und verhindern, dass der Eisbär Wärmestrahlung emittiert. Dieses Prinzip wird heute in der sogenannten transparenten Wärmedämmung verwendet.

Die Infrarotabsorption lässt sich sehr gut in einem technikfernen Fachbereich anwenden: der Gemäldeprüfung. Je nachdem, welche chemische Zusammensetzung die Farbe einer Fälschung hat, reagiert sie anders auf Infrarotstrahlung als das Original (Abb. 21). Das liegt daran, dass früher andere Farbpigmente und Bindemittel als heute verwendet wurden. Oft kann mit Hilfe der Infrarotstrahlung eine Vorzeichnung sichtbar gemacht werden, die, wie eine Unterschrift, Rückschlüsse auf die wahre Urheberschaft zulässt. Die Infrarotabsorption stellt damit eine sehr sinnvolle, schadenlose Methode zur Untersuchung von Gemälden dar.



Abb. 21: Infrarotbilder eines Originals und einer Fälschung. Wie man anhand des Pflanzenstiels erkennen kann, wurden für beide unterschiedliche Farbpigmente verwendet.

Für unsere Physik-Show wollten wir diesen Versuch nachstellen, aber bisher ist es uns nicht gelungen, vorzeigbare Ergebnisse zu erzielen (Beispiel siehe Abb. 22). Vermutlich sind die Auflösung und der Spektralbereich unserer Kamera für diese Anwendung ungeeignet.

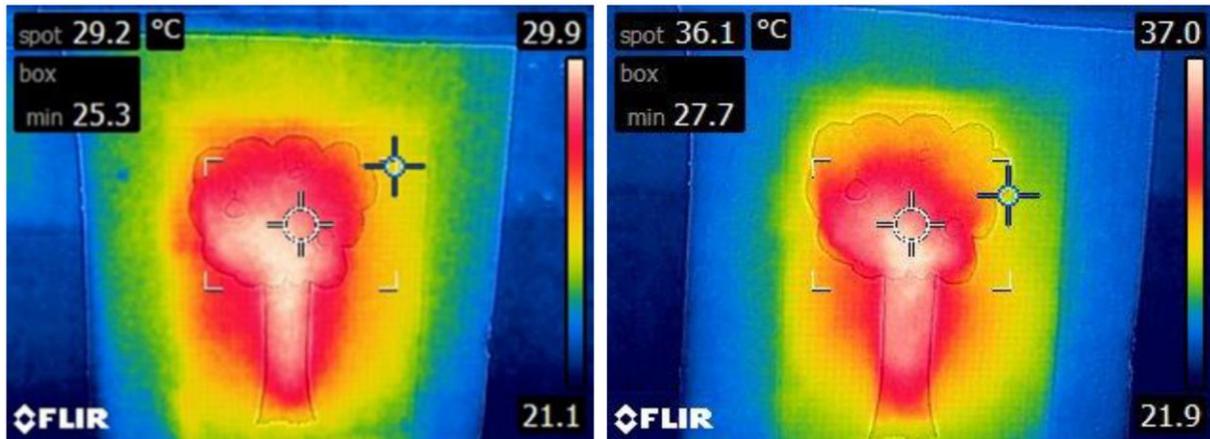


Abb. 22: Unser Versuch, zwei Bilder mit unterschiedlichen Farbpigmenten zu malen und mit Infrarotlicht zu unterscheiden.

2.2.9 Emission am Bügeleisen

Die Temperatur dieses Bügeleisens müsste nach der Anzeige der Wärmebildkamera in etwa bei Raumtemperatur liegen. Bei unserer Show wollen wir eine Person aus dem Publikum darum bitten, die Hand daraufzulegen. Leider nur scherzhaft, das Bügeleisen ist trotz der blauen Farbe, d. h. niedrigen Temperatur, angeschaltet und damit sehr heiß. Dieses Problem entsteht durch die glatte Metalloberfläche des Bügeleisens, welche einen sehr geringen Emissionsgrad hat. Das Bügeleisen reflektiert daher sehr viel mehr Licht von außen, als es entsprechend seiner hohen Temperatur emittiert.

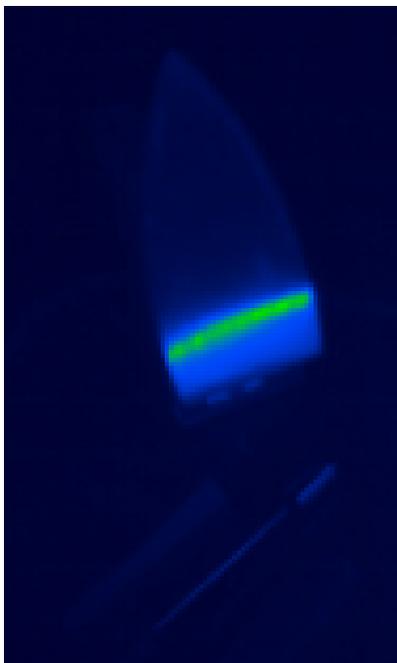


Abb. 23: Ein heißes Bügeleisen aufgenommen mit der Wärmebildkamera. Die blaue Farbe steht für niedrige Temperaturen. Dieser scheinbare Widerspruch entsteht durch den geringen Emissionsgrad der Metalloberfläche.

2.3 Ablaufplan:

Eine erfolgreiche Show bedeutet eine gut geplante Show. Damit also keine Sprünge, Wiederholungen oder sonstige Fehler entstehen, braucht es einen Ablaufplan. Da unser Thema aber Infrarotstrahlung im Gesamten war, mussten wir viele verschiedene Bereiche abdecken. Trotzdem haben wir uns um eine möglichst sinnvolle Struktur bemüht und kamen auf folgendes Ergebnis:

Begrüßung

Einleitung Infrarotstrahlung:

Versuchsaufbau William Herschel

Infrarotstrahlung Definition und Unterteilung (780 nm – 1400 nm nahes Infrarot, 1400 nm – 3000 nm mittleres Infrarot, 3000 – 1000000 nm fernes Infrarot)

Hauptteil (Show):

Fragestellung: Wieso gibt es eine Unterteilung? → unterschiedliche Eigenschaften

Infrarotkamera hilft uns bei der Beantwortung

Versuch Mülltüte Glasscheibe

Beweis Nützlichkeit der Infrarotkamera

Welche Eigenschaften unterscheiden sich noch?

Definierend sind dabei Transmission, Absorption, Emission und Reflektion (Wirkung auf Materie)

1 Transmission:

Mülltüte Glasscheibe

2 Reflektion:

Wachmann und Rettungsdecke

Oberflächenstruktur und Dichte abhängig.

3 Emission & Absorption:

Lesliewürfel

Schwarzer Strahler & Plank'sches Strahlungsgesetz

Emission am Bügeleisen

Sinnfrage: „Was bringt uns das jetzt?“

Anwendungen in verschiedenen Bereichen

Lampenvergleich, Widerstände

Konvektion

Gemäldefälschung

Eisbärenfell

Fazit

Danksagung

3. Diskussion

Im Laufe unseres Projekts fiel uns auf, wie schwer es sein kann, die Kernaufgabe der Übersetzung von Fachsprache in Show und Entertainment zu bewerkstelligen. Nachdem wir uns einigermaßen eingelese und ein tieferes Verständnis für Infrarotstrahlung erlangt haben, begann der eigentliche und viel wichtigere Teil der Arbeit. Die Relevanz unseres Projektes ist an sich durch unsere geringe öffentliche Wirksamkeit nicht wirklich hoch, es schneidet aber trotzdem eine große Problematik der Wissenschaft an: die Distanz zwischen Forschern und Laien. Zwar wird jede neue Erkenntnis meistens direkt in neuen Produkten für den öffentlichen Markt verarbeitet, dabei wird aber weniger die Funktion als die Wirkung klar. Kaum ein Handynutzer wird tatsächlich detailliert erklären können, wie genau Anrufe oder Nachrichten weitergeleitet werden. Da diese Distanz aber in so gut wie in jedem Bereich besteht, mussten wir uns auf ein Thema beschränken, das sich besonders für die Vermittlung komplexer Sachverhalte eignet. Die Infrarotstrahlung bietet, in Kombination mit der passenden Kamera, interessante und vor allem sehr anschauliche Einblicke in die Welt außerhalb des sichtbaren Spektrums. Durch die Neugierde auf Neues kann die Aufmerksamkeit des Publikums gefesselt werden.

Führt man spannende Versuche durch, stellt sich der Zuschauer selbstverständlich Fragen. Wie funktioniert das? Warum ist das Fell jetzt kalt und nicht warm? An genau diesem Punkt ist das oben beschriebene Problem gelöst. Ein themenfremder Laie möchte mehr wissen, und Antworten lassen nicht lange auf sich warten. Ziel der Show ist es, Interesse zu wecken und aufkommenden Wissensdurst zu stillen. Dabei sollen Experimente und Fachwissen, Praxis und Theorie abwechslungsreich gemischt werden. Auch für diesen Zweck scheint Infrarotstrahlung als Thema gut geeignet zu sein, da die gezeigten Effekte für viele neu und überraschend sind, aber auch die breit gefächerten Anwendungen viele Möglichkeiten bieten, Wissen Stück für Stück zu vermitteln. Das bedeutet aber nicht, dass wir den alltäglichen Schulunterricht kopieren und unseren Zuschauern am Ende des Programms noch Hausaufgaben mit auf den Weg geben wollen. Unsere Show soll die trockene Theorie von 780 Nanometern bis 1 Millimeter Wellenlänge interessierten Laien und Experten erfassbar machen. Unsere spektakulären Experimente gewähren einen spannenden Einblick in die ungewöhnlichen Eigenschaften der Infrarotstrahlung.

Im Endeffekt bot das Projekt also nicht nur einen guten Einblick in die Theorie der elektromagnetischen Strahlung und der Thermodynamik, sondern auch die Herausforderung, diese Sachverhalte in genau die Mischung aus Entertainment und Theorie umzuwandeln, die unser Publikum benötigt. In nicht weit zurückliegender Vergangenheit hat das Internet dafür gesorgt, dass Wissenschaftler und Laien sich näherkommen, dennoch gibt es noch sehr wenige, für diese Aufgabe spezialisierte, Plattformen oder Institutionen. Mehr Öffentlichkeitsarbeit wäre aber nötig, gerade bei den rasanten Fortschritten, die heute in der Wissenschaft stattfinden. Von elementarer Bedeutung wird die Vermittlung und Aufklärung von Problemen wie dem Klimawandel. Ob man dafür nun Shows veranstaltet, Filme dreht oder Magazine druckt ist egal, es ist für uns alle und unseren ganzen Planeten wichtig, entscheidende, wissenschaftliche Ergebnisse verständlich zu vermitteln.

4. Danksagung

Wir möchten uns auf diesem Wege bei allen recht herzlich bedanken, die uns auf dem Weg zu unserem Projekt unterstützt haben.

Vielen Dank an Dr. Antje Bergmann für ihr großes Engagement, uns beim Testen und Verbessern der Versuche immer tatkräftig zur Seite zu stehen und ihre Ideen einzubringen. Ohne sie wäre dieses Projekt nicht möglich gewesen.

Unser Dank geht auch an Thomas Knecht, unseren Kursleiter und Betreuer während der gesamten Kooperationsphase, der uns bei Problemen und Fragen immer mit Rat und Tat zur Seite stand, sowie an Anke Richert und den restlichen Hector-Seminar-Kursleitern.

Nicht vergessen wollen wir außerdem Dr. Hans-Werner Hector und Josephine Hector, ohne die wir niemals die großartige Förderung im Rahmen des Hector-Seminars über all die Jahre in Anspruch hätten nehmen können.

5. Quellen

Quellen zur Theorie der Infrarotstrahlung (alle Internetquellen entnommen am 26.07.17):

Allgemein:

Vollmer, Michael; Möllmann, Klaus-Peter: *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, Deutschland (2010)

Einführung:

http://www.bfs.de/DE/themen/opt/ir/einfuehrung/einfuehrung_node.html;

<http://www.infrarot-thermometer.info/wissen/entdeckung/>;

https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Herschel;

Emission, Transmission und Reflexion:

http://www.thermotemp.de/thermografie/thermografie_grundlagen.php

<http://www.orglmeister.de/index.php/thermografie/technologie>

Material und Methoden, die Wärmebildkamera

<http://www.flir.de/instruments/ex-series/>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Konvektion>

<https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitung>

<https://www.leifiphysik.de/warmelehre/warmetransport>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChlampe>

<https://didaktik.physik.fu-berlin.de/home/download/TD/Thermodynamik.html>

Wirkungsgrad von Lampen:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChlampe>

http://www.energieinfo.de/energiesparen/energiespartipps_wirkungsgrad_leuchtmittel.html

Eisbärenfell:

ständige Ausstellung des Staatlichen Museums für Naturkunde Karlsruhe (März 2017)

Abbildungen (entnommen am 26.07.17):

Abb.1:

https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physikalische-Faktoren-und-Arbeitsumgebung/Optische-Strahlung/_functions/BereichsPublikationssuche_Formular.html?nn=8630236

Abb.2:

Gemälde von Lemuel Francis Abbott 1785 (NPG 98, © National Portrait Gallery, London)

Abb.3, 4, 5, 21:

Originale von uns erstellt.

Abb.6:

https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_K%C3%B6rper

Abb.9:

<http://www.flir.de/instruments/ex-series/>

Abb. Frontbild, 7,8, 10-19, 22

Unsere Bilder mit der Wärmekamera FLIR E5

Abb. 20, 23

<https://didaktik.physik.fu-berlin.de/home/download/TD/Thermodynamik.html>

6. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir diese Dokumentation nur unter Beratung von Dr. Antje Bergmann und den angegebenen Quellen angefertigt haben, sowie Zitate kenntlich gemacht haben.

.....
Ort, Datum

.....
Jonas Klausmann

.....
Ort, Datum

.....
Meret Grube