

Berührungslose Temperaturmessung im Physikunterricht

Raimund Girwidz

Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Reuteallee 46, 71634 Ludwigsburg
(Eingegangen: 04.01.2007; Angenommen: 24.01.2008)

Kurzfassung

Mit Infrarotthermometern lassen sich Oberflächentemperaturen berührungslos messen. Die Handhabung ist einfach und ermöglicht Experimente, die besonders für die Sekundarstufe I attraktiv sind. Hierzu werden in diesem Beitrag mehrere Beispiele vorgestellt. Außerdem wird ein Weg vorgeschlagen, wie sich Infrarotthermometer im Unterricht der Mittelstufe einführen lassen. Die Unterrichtssequenz besteht aus fünf Schritten und ist in dreißig Minuten zu realisieren. Zusätzlich gibt es für die Behandlung des Planck'schen Strahlungsgesetzes als Visualisierungshilfe ein Computerprogramm, das die spektrale spezifische Ausstrahlung des Planck'schen Strahlers grafisch darstellt, die entsprechende "Farbe" anzeigt und auch die Strahlungsleistung in einem ausgewählten Wellenlängenbereich berechnet.

1 Einführung

Infrarotthermometer sind heute auch für den Einsatz im Alltag ausgereift, lassen sich flexibel einsetzen und werden immer preiswerter.

Das klassische Flüssigkeitsthermometer muss auch weiterhin einen Platz im Unterricht behalten, in Alltag und Technik wird es aber immer seltener verwendet. Elektrische Thermometer messen schneller, sind leicht zu bedienen, und außerdem ist es einfacher, Messwerte über elektronische Schnittstellen auszulesen. Besonders praktisch sind speziell Infrarotthermometer zur Überprüfung von Heizungs- und Klimasystemen, zum Auffinden von Kältebrücken in der Wärmeisolation, bei Temperaturmessungen an rotierenden Teilen, an spannungsführenden Leitungen oder chemisch aggressiven Stoffen sowie bei der hygienischen und keimfreien Temperaturmessung von Lebensmitteln. Auch zum Fiebermessen gibt es mittlerweile in jeder Apotheke Ohr- oder Stirnthermometer.



Abb. 1: Ohr-Thermometer und ein Infrarotthermometer für den mobilen Einsatz.

Im Elektronikhandel gibt es Handgeräte (siehe Abb. 1 rechts) bereits für ca. 70 €, Kleingeräte in der Größe einer Streichholzschachtel schon für ca. 20 €. Damit sind die Geräte auch für Schulen finanzierbar.

Zunächst wird in einem kurzen Überblick das Messprinzip erläutert. Dann folgen Experimente für die Unterrichtspraxis. Wie bei vielen modernen Geräten ergibt sich die Frage, wie genau und damit zeitaufwändig die Erklärungen zu dem Gerät selbst sein müssen. Ein eigenes Kapitel stellt deshalb eine Einführung vor, die sich gut in einer Unterrichtsstunde realisieren lässt.

Eine ausführlichere Behandlung wird auch das Planck'sche Strahlungsgesetz einbeziehen. Als Visualisierungshilfe wird dazu ein Computerprogramm vorgeschlagen und eine Webseite mit grundlegenden Informationen angeboten.

2 Messtechnische Aspekte im Überblick

Hier kann nur in Kürze das Grundprinzip für sog. thermische Detektoren beschrieben werden. Weitere Details sind in Herrmann (1990), IMPAC (2004) und in den VDI/VDE Richtlinien (2001) zur Messung mit Infrarotthermometern zu finden. Außerdem sind Informationen zur Infrarotthermographie in Karstädt et al. (1999, 2001) zusammengestellt.

Die physikalische Grundlage für die Messung mit Infrarotthermometern ist das Stefan-Boltzmann-Gesetz bzw. das Planck'sche Strahlungsgesetz. Der schwarze Strahler ist natürlich eine Idealisierung und liefert für reale Bedingungen nur eine erste Näherungsformel.

Der Sensor

Die hier vorgestellten Geräte arbeiten nach folgendem Prinzip: Ein Messplättchen wird der Strahlung aus einem festgelegten Raumwinkel ausgesetzt (siehe Abb. 2). Dadurch wird es erwärmt (oder abgekühlt, je nach Temperatur des Messobjektes).

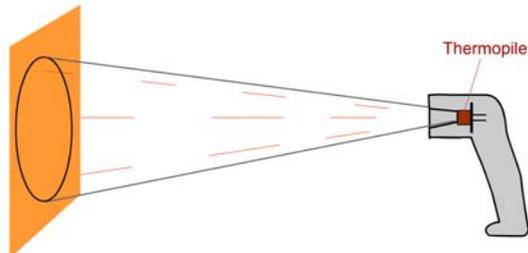


Abb. 2 : Grafik zur Funktionsweise von Infrarotthermometern.

Es resultiert ein Temperaturunterschied zwischen dem Messplättchen und dem Gehäuse des Infrarotthermometers. Diese Temperaturdifferenz wird mit einer Thermosäule bzw. einer Thermopile gemessen. Letztere besteht aus mehreren Thermoelementen, die in Reihe geschaltet und beispielsweise in ein TO5-Gehäuse eingebaut sind (siehe Abb. 3). Die Messlötlstellen stehen auf der einen Seite in thermischem Kontakt mit dem Messplättchen; die Vergleichsmessstelle hat die Temperatur des Gehäuses. Somit liefert die Anordnung eine Spannung, die von der Temperaturdifferenz zwischen dem Messplättchen und dem Gehäuse abhängt. Dieses Prinzip wird schon bei der Thermosäule nach Moll verwendet.

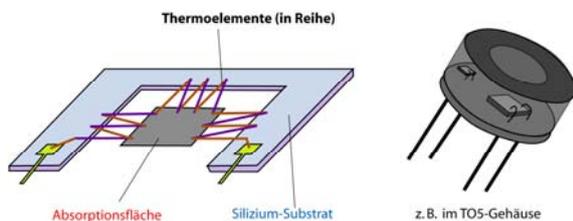


Abb. 3: Thermosäule bzw. Thermopile schematisch.

Damit absolute Temperaturwerte angegeben werden können, muss noch die Gehäusetemperatur bekannt sein. Sie wird in der Regel über ein eingebautes Widerstandsthermometer erfasst.

Die sog. thermischen Detektoren erwärmen sich aufgrund der eintreffenden Strahlung und nutzen temperaturabhängige Effekte, um dies über elektrische Spannungen anzuzeigen. Sie erfassen die Strahlung aus einem breiten Band des elektromagnetischen Spektrums. Daneben gibt es auch "photoelektrische Detektoren". Ihre Funktionsweise basiert auf dem Photoeffekt, und sie sind wellenlängenselektiv. Im Vergleich zu thermischen IR-Detektoren haben sie sehr kurze Reaktionszeiten von einigen μs (im Gegensatz zu 0,1 s bis 1,0 s bei thermischen Detektoren).

Erfassungsbereich und Raumwinkel

Bei einer Messung ist der erfasste Raumwinkel zu berücksichtigen, der den Messfleck des Infrarotthermometers festlegt. Das Messobjekt muss eine entsprechende Größe haben. Die ermittelte Temperatur ist ein Durchschnittswert für die gesamte erfasste Fläche. Für Infrarotthermometer ist deshalb das Verhältnis zwischen Entfernung und Durchmesser des Messflecks eine wichtige Angabe. (In der Preisklasse unter 200 € liegen die sog. Distance/Spot-Werte, abgekürzt die D/S-Werte, zwischen 1:1 und 12:1, siehe Abb. 4.) Dies ist bei kleinen Objekten oder Messungen an Randbereichen zu bedenken. In Abbildung 7 hat der Messfleck um die Markierung des Positionslasers etwa einen Durchmesser von 2 cm. Für eine Messung mit diesem Gerät dürfte die Entfernung zum Fingerkuppe maximal 10 cm betragen.

D/S-Verhältnis 8:1

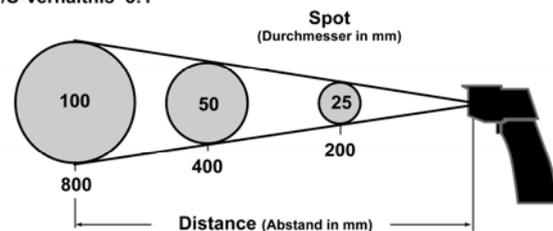


Abb. 4: Messfleck in Abhängigkeit von der Entfernung.

Bei den billigsten Geräten wird der erfasste Raumwinkel über Reflexionsflächen begrenzt (siehe Abb. 5a). Die D/S-Werte liegen dann etwa bei 1:1. Verhältnisse von 10:1 werden durch den Einsatz von Infrarotlinsen erreicht (siehe Abb. 5b).

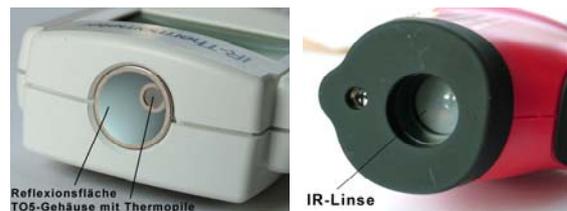


Abb. 5: a) IR-Thermometer mit Reflexionsflächen; (im Zentrum ist die vordere Seite eines TO5-Gehäuses mit Thermopile erkennbar). b) IR-Linse eines Infrarotthermometers.

Glas- oder Quarzlinsen eignen sich nur für Wellenlängen vom sichtbaren Bereich bis zu ca. $3 \mu\text{m}$. Calciumfluorid wird bis ca. $10 \mu\text{m}$ verwendet, Germanium und Silizium zwischen 2 und $20 \mu\text{m}$ und ein Mischkristall aus TiI_3 und TlBr_3 (KRS-5) von 1 bis $40 \mu\text{m}$ (Niebuhr & Lindner, 2001). Für den Wellenlängenbereich von 6 bis $16 \mu\text{m}$ eignen sich auch billigere Fresnellinsen aus Plastik. (In diesem Bereich wird mehr als 50 % der Strahlungsenergie eines Planck'schen Strahlers mit einer Temperatur zwischen 0°C bis 100°C ausgesandt.)

Emissionsgrade

Das Emissionsvermögen realer Oberflächen ist geringer als das eines idealen schwarzen Strahlers. Die Relation wird durch den (wellenlängenabhängigen) Emissionsgrad beschrieben. Einfache Geräte sind fest auf Emissionsgrade zwischen 0,9 und 0,95 eingestellt. Mit solchen Geräten kann man die Temperaturen für viele rauen Oberflächen bestimmen, nicht aber für metallische und gut polierte Flächen. (Zur Orientierung ist im Anhang eine Übersichtstabelle angegeben.)

Teurere Geräte bieten die Möglichkeit, unterschiedliche Emissionsgrade einzustellen. Eine einfache Alternative ist, die Messfläche mit einem Lack- oder Graphit-Spray zu belegen oder mit einer Folie zu bekleben. Beispielsweise hat ein Tesafilm einen Emissionsgrad von 0,9.

Stellt man im Schulbereich aber keine zu hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit und misst man nicht gerade an unlackierten, blanken Metalloberflächen, kommt man auch mit den einfachen Geräten gut zurecht. Eine kurze Zusatzprüfung mit dem Klebstreifen ist im Zweifelsfall immer schnell durchgeführt. Oft sind auch nur Temperaturänderungen an einem Objekt von Interesse.

Bevor im Kapitel 4 eine schülernahe Einführung des Infrarotthermometers diskutiert wird, folgen zunächst einige Beispiele, die das Einsatzspektrum in Schulversuchen für die Sekundarstufe I aufzeigen.

3 Interessante Temperaturmessungen im Physikunterricht

Infrarotthermometer sind einfach zu bedienen, die Messwerte liegen in weniger als einer Sekunde vor und die Geräte sind insbesondere für die Messung von Oberflächentemperaturen geeignet. Dies macht sie auch für den Unterricht in der Sekundarstufe I attraktiv. Speziell Oberflächentemperaturen, die mit Flüssigkeitsthermometern nur sehr schwer zu erfassen sind, spielen für viele Naturphänomene eine wichtige Rolle. Nachfolgend einige Beispiele für einfache Schalexperimente:

3.1.1 Kleidung und Wasser auf der Haut

Interessanten Diskussionsstoff kann die folgende Messreihe bieten: Gemessen werden die Oberflächentemperaturen a) von unbedeckter, trockener Haut, b) von feuchter Haut, c) von einem feuchten T-Shirt, das auf der Haut anliegt, d) von einem trockenen T-Shirt auf der Haut (siehe Abb. 6). Die Messungen erfolgen in einer ersten Messreihe bei ruhender Umgebungsluft, dann im Luftstrom eines Ventilators. Insbesondere können die Messwerte unmittelbar mit dem subjektiven Temperaturempfinden verglichen werden.

Auch die Oberflächentemperaturen einer trockenen und einer nassen Schultafel lassen sich mit dem Infrarotthermometer in Sekunden bestimmen.

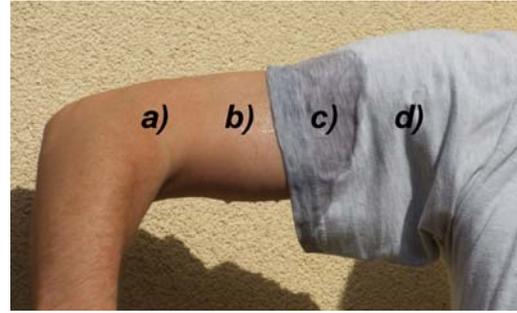


Abb. 6: Vier Messstellen. (Die Temperaturen bei b) und c) hängen besonders stark von der Luftströmung ab.)

Diese Messungen bieten experimentelle Einstiege zum Thema Verdampfungswärme, zur Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe und können auch auf die Funktion des Schwitzens bei der Thermoregulation des Menschen hinführen.

3.1.2 Temperatur der peripheren Körperteile

Beim Menschen wird nur die Kerntemperatur des Körpers konstant gehalten. Die Durchblutung der Peripherie und damit auch die Temperatur der Körperextremitäten hängen maßgeblich von der Umgebungstemperatur und den körperlichen Aktivitäten ab. Messungen am eigenen Körper können die Zusammenhänge deutlich machen. Dabei sind Infrarotthermometer speziell für die Messung von Hauttemperaturen besser geeignet als Berührungsthermometer, bei denen Kontakt- und Isolationsprobleme zu bedenken sind.

Beispielsweise lässt sich untersuchen, wie sich die Hauttemperaturen von Finger und Hand ändern, wenn man diese zunächst nach einer Ruhephase misst und dann nach einer sportlichen Aktivität, z. B. nach einem zügigen Treppenlauf durch das Schulhaus (siehe Abb. 7).



Abb. 7: Strahlungsthermometer (Achtung: Bei der Messung der Fingertemperatur ist der D/S-Wert des Gerätes zu beachten).

Die Unterschiede sind in der Regel bei kühler Witterung sehr deutlich messbar. Die Temperatur der Finger kann von 20 °C auf über 30 °C ansteigen. Wird die Umgebungstemperatur subjektiv als kühl empfunden, verengen sich die Blutgefäße der Extremitäten. Dies führt zu einer relativ schwachen

Durchblutung der Finger. Bei körperlicher Belastung gehört dann die Aufweitung der peripheren Blutgefäße zu den ersten Maßnahmen der Thermoregulation beim Menschen.

Auch Genussmittel und Reizstoffe beeinflussen die Temperaturregulation der Extremitäten. Gut messbar sind Änderungen der Hauttemperatur der Finger, beispielsweise beim Rauchen. Die Temperatur kann in einer Minute um 2 °C absinken, wobei natürlich auch die Umgebungstemperatur eine Rolle spielt und individuelle Unterschiede zum Tragen kommen. Die Temperatur der Peripherie sinkt auch durch ein kaltes Wasserbad messbar ab. Anschließend kann gemessen werden, wie schnell die Ausgangstemperatur wieder erreicht wird, wie sich ein sofortiges Abtrocknen auswirkt oder wie im Vergleich dazu der Temperaturanstieg bei feuchter Haut erfolgt.

3.1.3 Temperatur von Speisen und Getränken

Im Kühlregal, beim Auftauen, im Kochtopf – die Temperatur von Speisen oder Getränken lässt sich mit dem Infrarotthermometer in Sekunden und zudem hygienisch unbedenklich messen. Besonders interessant ist auch der Vergleich mit dem Temperaturempfinden beim Verzehr, z. B. von Speiseeis bis hin zu einer heißen Suppe.

Nicht zuletzt lassen sich auch Wassertemperaturen (Wasseroberfläche) schnell und "trocken" messen. Hier sind auch Kontrollmessungen mit anderen Thermometern gut möglich und die Genauigkeit der Messverfahren wird diskutierbar. (Wasser hat einen Emissionsgrad von etwa 0,95. Allerdings stört bei sehr starker Dampfentwicklung die Wärmestrahlung des Wasserdampfes.)

3.1.4 Oberflächentemperaturen in Gebäuden

Wie verhalten sich die Temperaturen von Fensterscheiben und Wandflächen? (Glas ist im Infrarotbereich "undurchsichtig", und für Temperaturen von 0 °C bis 100 °C ist ein Emissionsgrad von 0,91 bis 0,94 anzusetzen, Goratec, 2004.) Welche Bauteile isolieren am besten, wo sind Kältebrücken aufzuspüren? Hier können einfach zu realisierende Messungen mit dem Infrarotthermometer bei einem entdeckenden Lernen helfen. Auch die Temperaturen von Heizkörpern lassen sich an unterschiedlichen Stellen messen und vergleichen.

3.1.5 Unterschiedliche Emissionsgrade aufdecken

Für unlackierte Heizkörper oder bei Kachelöfen sind allerdings unterschiedliche Emissionsgrade zu berücksichtigen. Bei Temperaturen unter 70 °C sind die Unterschiede schnell aufgedeckt, wenn man einfach kurzzeitig einen Klebestreifen aufbringt.

Ein weiteres Experiment zum Thema Emissionsgrad sind Vergleichsmessungen an einem Porzellanteller und an einem polierten Messingblech unmittelbar nachdem sie zusammen aus einem heißen Wasserbad entnommen wurden. Der Messwert für den Teller ist dabei um einiges höher, als der für das

Messingblech. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Emissionsgraden (poliertes Messing: $\epsilon < 0,1$ und glasiertes Porzellan: $\epsilon > 0,85$; bei Temperaturen von 0 °C bis 100 °C).

Genauere Infrarotthermometer sind deshalb auf unterschiedliche Emissionsgrade einstellbar. Damit lassen sich umgekehrt auch Emissionsgrade experimentell bestimmen, wenn man bei bekannter Oberflächentemperatur das Gerät auf den Emissionsgrad einstellt, der die korrekte Temperaturanzeige liefert.

3.1.6 Transmission und Reflexion von IR-Strahlung

Zu beachten ist, dass IR-Thermometer nur die Oberflächentemperatur der nächsten Oberflächen messen, wobei allerdings auch Transmission und Reflexion bei realen Oberflächen zu bedenken sind. Dies wird umso wichtiger, je stärker die Absorptions- bzw. Emissionsgrade von 1 abweichen. Die Reflexion von Infrarotstrahlung ist besonders an glatten Oberflächen und Metallen zu berücksichtigen (siehe Beispiele in Henke et al. 2004). Auch das optische Verhalten von Glas unterscheidet sich im Infrarotbereich deutlich von seinen optischen Eigenschaften im sichtbaren Bereich. Zu Transmission und Reflexion zwei einfache Experimente für die Schule:

a) Ein Infrarot-Thermometer wird etwa 10 cm vor eine Fensterscheibe gehalten und eine Messung durchgeführt. Dann wird ein Objekt mit höherer Temperatur, am einfachsten eine Hand, direkt hinter die Scheibe gehalten. Der Messwert ändert sich dadurch nicht. Glas ist für diese Infrarotstrahlung praktisch undurchlässig.

b) Die silbrige, metallbedampfte Seite einer Rettungsfolie (erhältlich in jeder Apotheke) wirkt in Infrarotbereich wie ein Spiegel. Unter Berücksichtigung des Reflexionsgesetzes lässt sich über die silbrige Seite sogar annähernd die Temperatur anderer Objekte vor der Folie bestimmen (siehe Abb. 8). Die goldene Seite der Rettungsfolie hat dagegen einen deutlich geringeren Reflexionsgrad.



Abb. 8: Reflexion von Infrarotstrahlung an einer Rettungsdecke.

3.1.7 Temperatur von beweglichen Werkzeugteilen, Maschinen und elektronischen Bauteilen

Reibungsversuche, die Erwärmung von Feilen oder rotierenden Maschinenteilen sowie die Temperaturzunahme bei elektronischen Bauteilen ermöglichen weitere interessante Messungen mit dem Infrarotthermometer.

3.1.8 Wärmespuren verfolgen

Messungen an Motorhauben identifizieren Fahrzeuge, die erst vor kurzer Zeit abgestellt wurden. "Thermische Spuren" zeigen auch an, ob ein Sitzplatz noch vor kurzer Zeit belegt war, oder ob elektrische Geräte wie Fernseher oder Computer erst kürzlich ausgeschaltet wurden. Auch die Polizei führt Kontrollmessungen mit Strahlungsthermometern an den Bremsscheiben von LKWs durch, um die gleichmäßige Wirkung der Bremsen an allen Rädern zu prüfen, bzw. Defekte aufzudecken.

4 Eine einfache Hinführung zur IR-Temperaturmessung in der Sekundarstufe I

Die physikalischen Grundlagen zur Infrarot-Sensorik sind für die Sekundarstufe I so zu elementarisieren, dass sie auch in dieser Altersstufe nicht überfordert und dennoch tragfähig für eine sinnvolle Verständniseinheit sind.

Nachfolgend wird eine Unterrichtseinheit von etwa 30 Minuten vorgestellt. Jeder Schritt knüpft an Alltagskenntnisse oder physiologische Wahrnehmungen an, um die physikalischen Aussagen an eigenen Erfahrungen zu verankern. Herausgearbeitet wird:

- Jeder Körper sendet (elektromagnetische) Strahlung aus.
- Die Abstrahlung erfolgt nur zum Teil im sichtbaren Bereich.
- Die Strahlung ist temperaturabhängig.
- Mit der Strahlung wird Energie transportiert.
- Der Sensor des IR-Thermometers reagiert auf Energieströme.

4.1 Zu a) Jeder Körper sendet (elektromagnetische) Strahlung aus

Der erste Schritt vertieft Alltagserfahrungen. Schülerinnen und Schüler kennen leuchtende Ceran-Kochfelder und glühende Grillkohlen.



Abb. 9: Strahlung von Kochfeldern sehen und fühlen.

Wärmestrahlung wird aber auch bei Körpern spürbar, die noch nicht glühen, z. B. wenn man die Hand

vor eine eingeschaltete Heizplatte hält. In Abb. 9 wurde eine Heizplatte vertikal aufgestellt, um auszuschließen, dass die thermische Luftbewegung als Übertragungsmechanismus in Frage kommt. Nach den Betrachtungen soll als Aussage festgehalten werden: Es gibt eine Form von Energieübertragung ohne direkten Kontakt. Sie wird Wärmestrahlung genannt.

4.2 Zu b) Die Abstrahlung erfolgt nur zum Teil im sichtbaren Bereich

Speziell für junge Schüler sind Aussagen und Vorstellungen über einen unsichtbaren Strahlungsbereich nicht trivial. Die CMOS-Technik macht ein einfaches Experiment (für ca. 20 €) möglich, das die Strahlungsaktivität heißer Körper speziell im Grenzbereich von sichtbarem Licht und Infrarotstrahlung zeigt (Girwidz, 2006). CMOS-Kameras sind (ohne Filter) infrarotempfindlich. Einfache Kameramodule ohne Filter eignen sich daher für das nachfolgende Experiment besonders gut. Das hier vorgeschlagene Kameramodul (detaillierte Angaben im Anhang) hat nach Herstellerangaben eine maximale Empfindlichkeit bei 800 nm. Besonders vorteilhaft für Demonstrationsversuche ist, dass es direkt an den Videoeingang eines Fernsehgerätes oder eines Beamers anschließbar ist.

Mit dieser Kamera wird in der Videoprojektion und parallel dazu mit dem bloßen Auge ein Objekt betrachtet, das bis zum Glühen erhitzt werden kann (siehe Abb. 10). Geeignet ist für den Versuch ein elektrischer Heizstrahler, eine Kohlenfadenlampe an einem regelbaren Trafo, oder einfach ein Teelöffel, der mit einem Gasbrenner erhitzt wird. Das Objekt wird aufgeheizt, bis es im sichtbaren Bereich zu glühen beginnt. In der Videoprojektion leuchtet der Gegenstand dann bereits extrem hell und das Bild wird regelrecht überbelichtet (siehe Abb. 10). Lässt man den Gegenstand wieder abkühlen, leuchtet er in der Videoprojektion noch lange weiter, während er für das bloße Auge schon längst wieder seine Ausgangsfarbe angenommen hat.

Als Resultat lässt sich festhalten, dass mit der Kamera der registrierte Strahlungsbereich erweiterbar ist. Deutlich wird dabei, dass Objekte auch in Bereichen strahlen, die für das Auge nicht mehr sichtbar sind (wobei die Kameraaufnahme die Bezeichnung "Strahlung" durchaus rechtfertigt; siehe Abb. 10).



Abb. 10: Ein Heizstrahler, bei dem die Heizdrähte im sichtbaren Bereich schwach glühen und parallel dazu die Aufnahme mit der CMOS-Kamera.

4.3 Zu c) Die Strahlung ist temperaturabhängig

Ein Ceran-Kochfeld leuchtet heller und ändert die Farbe von dunkelrot zu hellrot, wenn seine Temperatur ansteigt. Dies gilt auch für Metallteile, die man in einer Flamme erhitzt. Die Aufnahme mit der CMOS-Kamera zeigt, dass sie bereits bevor sie dunkelrot glühen schon intensiv in einem Bereich strahlen, den unsere Augen nicht wahrnehmen. Mit einer graphischen Darstellung zum elektromagnetischen Spektrum (z. B. wie in Abb. 11) lässt sich die Strahlungsart einzuordnen.

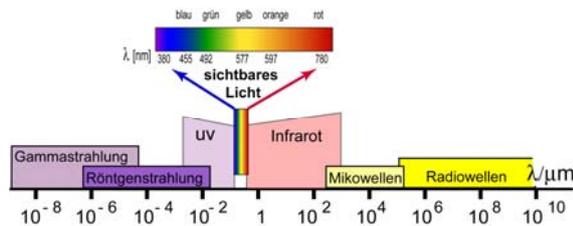


Abb. 11: Spektrum elektromagnetischer Wellen.

Weitere Vertiefungen, bis hin zum Planck'schen Strahlungsgesetz sind natürlich möglich, wünschenswert, aber bei der begrenzten Unterrichtszeit nicht immer möglich. Wenn man dennoch die Temperaturabhängigkeit zeigen möchte, kann man ein Computerprogramm nutzen, das unter <http://www.physikonline.net> (-> Computer) zu finden ist (siehe auch Abb. 12 und Abschnitt 4.6).

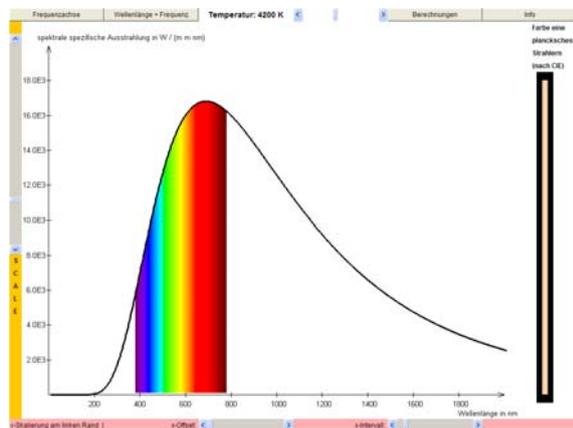


Abb. 12: Spektrale spezifische Ausstrahlung nach Planck (Strahlungsleistung pro Sendefläche und Wellenlängenintervall) bei einer bestimmten Temperatur.

4.4 Zu d) Mit der Strahlung wird Energie übertragen

Ein Anknüpfungspunkt für den Unterricht ist die wärmende Wirkung von Sonnenstrahlung, die alle Schülerinnen und Schüler kennen. Der Ausdruck "Energie tanken" beim Sonnenbaden bietet weiteren Diskussionsstoff (siehe Abb. 13).

Daran anknüpfend wird festgestellt, dass Wärme-strahlungsquellen Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung abgeben. Trifft die Strahlung auf einen Körper, wird sie zum Teil absorbiert und in innere Energie umgewandelt.



Abb. 13: "Energie tanken" im Sonnenlicht.

4.5 Zu e) Der Sensor des IR-Thermometers reagiert auf den Energiestrom

Aus eigenen Erfahrungen ist Schülerinnen und Schülern bekannt, dass Sonnenlicht Gegenstände aufwärmen kann (insbesondere schwarze Körper). Dies funktioniert allgemein mit elektromagnetischer Strahlung und dieser Effekt wird auch bei dem Strahlungsthermometer ausgenutzt. Mit Hilfe der Animation nach Abbildung 2 wird verdeutlicht, dass die Strahlung ein geschwärztes Plättchen in dem Infrarotthermometer erwärmt. Der Temperaturunterschied dieses Plättchens zu unbestrahlten Flächen wird von einem elektrischen Thermometer (Thermoelemente) gemessen (siehe Abbildung 3). Noch einsichtiger wird das Messverfahren durch eine phänomenologische Einführung der Thermospannung im Schülerexperiment. Kupfer- und Konstantandrahte werden als Thermoelemente verlötet und als Thermosäule in Serie geschaltet. Dies lässt sich besonders einfach mit einer Lochrasterplatine realisieren, die Schülerinnen und Schüler selbst verlöten (siehe Abb. 14.). Damit lassen sich auch Thermospannungen mit Multimetern im mV-Bereich messen und das Phänomen wird mit einer selbst gefertigten Anordnung direkt erfahrbar.

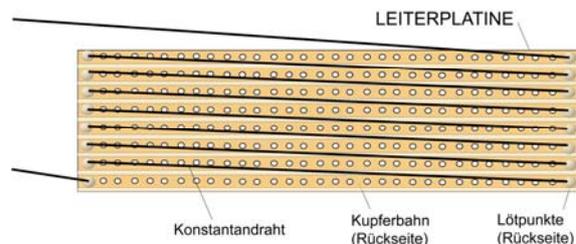


Abb. 14: Bauvorschlag für eine vereinfachte Thermosäule.

4.6 Weitere Ergänzungen und Vertiefungen

Grafiken zum elektromagnetischen Spektrum und zusätzliche Informationen zum Planck'schen Strahlungsgesetz sind auf der Internetseite: www.physikonline.net (-> Computer) zu finden. Ein Computerprogramm zeigt die spektrale spezifische Ausstrahlung eines Planck'schen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur an (siehe z. B. Abb. 12). Auch ein direkter Vergleich von Frequenz- und Wellenlängenauftragung ist möglich. Das Integral über die Planck'sche Strahlungskurve und damit die spezifische Ausstrahlung in einen bestimmten Wellenlängenbereich ist nicht ganz einfach zu berechnen. Deshalb bietet das Programm auch die Möglichkeit, den Anteil der Strahlungsleistung berechnen zu lassen, der in einem bestimmten Wellenlängen- bzw. Frequenzbereich von einem Planck'schen Strahler ausgesandt wird (z. B. im sichtbaren Bereich). So lässt sich beispielsweise anzeigen, dass bei 100 °C nicht einmal $2 \cdot 10^{-16}$ % der Leistung im sichtbaren Bereich ausgestrahlt wird. Weitere Hinweise zum Planck'schen Strahlungsgesetz sind u. a. bei Vollmer (2001) und Roedel & Löhken (2002) zu finden.

Allgemein erfordert der Stand der Technik immer häufiger, dass wir Geräte als Funktionseinheiten betrachten. Mit ihrem inneren Aufbau kann man sich nicht immer im Detail befassen. Computer und Autos sind zwei Musterbeispiele, an die wir uns längst gewöhnt haben. Der Physikunterricht allerdings sollte für Schülerinnen und Schüler auch einen Erklärungswert für Sachverhalte ihrer modernen Lebenswelt bieten.

Grundsätzlich stellt sich dabei natürlich die Frage, wie ausführlich und detailliert die einzelnen Informationseinheiten sein müssen bzw. sein dürfen, um nicht zu überfordern. Die didaktische Herausforderung wird immer größer, je mehr moderne Inhalte in immer kürzerer Unterrichtszeit behandelt werden sollen. Moderne Technologien auszuklammern ist aber keine Alternative. Zielsetzung in diesem Kapitel war es, in einer kurzen Sequenz auf ein ausbaufähiges Gerüst hinzuführen, das nur die wichtigsten Informationen liefert, aber eine Perspektive für weitere Vertiefungen offen hält. Das Vorgehen orientiert sich dabei an einem einfachen Modell der didaktischen Rekonstruktion mit den Komponenten Elementarisierung und Aufbau einer Verständniseinheit aus elementaren Wissensbausteinen (siehe Abb. 15). Es sollen in wenigen Schritten die Grundlagen der Infrarot-Temperaturmessung in der Sekundarstufe I erläutert werden. Die Anknüpfung an eigene Erfahrungen und Beobachtungen soll dabei helfen, ein (zunächst grob strukturiertes) Gedankengebäude aufzubauen, das an Primärerfahrungen verankert ist. Die Feinstruktur der Verständnisblöcke kann bei Interesse bzw. in der weiteren Ausbildung noch weiter präzisiert werden und dann zu einem tieferen Verständnis führen, ohne dass ein Umlernen nötig wird.

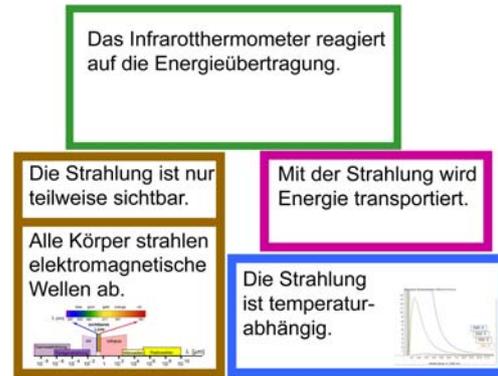


Abb. 15: Schema: Blöcke für ein Verständnisgerüst. Angedeutet sind die oben genannten fünf Informationsblöcke.

Noch kürzer wäre die Alternative, das Gerät über eine reine Funktionsprüfung einzuführen. Auch ohne genaue Kenntnis des Aufbaus lässt sich prüfen, ob ein Gerät den gestellten Anforderungen entspricht. Ein Test bei Referenztemperaturen (Messung der Temperatur von Eiswasser und von siedendem Wasser) ist schnell durchgeführt. Wurden bereits andere Thermometer eingeführt, sind Vergleichsmessungen bei anderen Temperaturen ein weiterer Test.

Ein solches Vorgehen zur Einführung des Strahlungsthermometers kann durchaus auch einen exemplarischen Charakter für das Prinzip funktioneller Prüfungen im Unterricht erhalten.

5 Schlussbemerkung und Ausblick

Mit dem Infrarotthermometer bieten sich neue Möglichkeiten für Messungen in der Wärmelehre. Die Notwendigkeit, auf die Infrarotsensorik einzugehen lässt sich mit wenigen, durchaus auch attraktiven Informationseinheiten und Experimenten abdecken.

Derzeit wird auch in einer empirischen Studie im Rahmen des BMBF-Projektes "piko" untersucht, inwieweit die vorgeschlagene kurze Einführung für Schülerinnen und Schüler als ausreichend wahrgenommen wird oder bei welchen Aspekten ein zusätzlicher Erklärungsbedarf bestehen kann.

6 Literatur:

Girwidz, R. (2006). Ich sehe was, das ihr nicht seht. Einblicke in den nahen Infrarotbereich mit einer Kamera für 20 €. In: Unterricht Physik, 17, Nr. 94.

GORATEC Engineering GmbH (2004). Thermographie online. <http://www.thermographie-online.com/emissionsgrad.htm>. (Stand: 21.6.2007)

Herrmann, K, (Hrsg.) (1990). Wissensspeicher Infrarottechnik, Fachbuchverlag Leipzig.

IMPAC Infrared GmbH (Hrsg.) (2004). Pyrometer-Handbuch. Frankfurt, IMPAC Infrared GmbH

Henke, S., Karstädt, D., Möllmann, K.-P., Pinno, F. & Vollmer, M. (2004). Identification and suppression of thermal reflections in infrared thermal imaging. In: InfraMation 2004, Proceedings Volume 5, 287-298 (2004).

siehe auch: http://www.fh-brandenburg.de/~piweb/mitarbeiter/papers/InfraMation_Polarization.pdf

Karstädt, D., Pinno, F., Möllmann, K.P., Vollmer M. (1999). Anschauliche Wärmelehre im Unterricht: ein Beitrag zur Visualisierung thermischer Vorgänge. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 5/48, 24-31.

Karstädt, D., Möllmann, K.P., Pinno, F., Vollmer, M. (2001). There is more to see than eyes can detect: visualization of energy transfer processes and the laws of radiation for physics education. In: The Physics Teacher 39, 371-376.

Niebuhr & Lindner, 2001. Physikalische Meßtechnik mit Sensoren. Oldenbourg-Verlag.

Roedel, W., Löhken, R. (2002). Die Gesetze der Wärmestrahlung. In: MNU 55/5. S. 279-283.

VDI/VDE (2001). Technische Temperaturmessungen - Spezifikation von Strahlungsthermometern. VDI 3511 Blatt 4.1.

Vollmer M. (2001). Strahlungsgesetz und Augenempfindlichkeit. In: MNU 54/4. S. 196-200.

7 Anhang:

Tabelle 1: Emissionsgrade *

Oberfläche	Temperatur	Emissionsgrad
Aluminium (poliert)	20 °C	0,02 – 0,04
Eisen (poliert)	100 °C	0,20
Eisen (angerostet)	20 °C	0,65
Beton	20 °C	0,9
Glas	20 °C	0,9
Holz	20 °C	0,9
Kunststoff	20 °C	0,9
Wasser	20 °C	0,9
Lacke	100 °C	0,90 – 0,97

* Die Angaben sind nur als Orientierungswerte anzusehen und hängen insbesondere stark von der Oberflächenbeschaffenheit, aber auch vom Spektralbereich ab. Genauere Übersichten sind z. B. in IMPAC (2004) zu finden.

Geräte:

Infrarotthermometer:

Infrarotthermometer gibt es praktisch in jedem Elektronikhandel. Einfache Geräte gibt es bereits ab 20 €, Handgeräte ab ca. 70 €.

CMOS-Kamera:

Die Kamera mit einer maximalen Empfindlichkeit bei ca. 800 nm ist mit den entsprechenden Steckkontakten bei Conrad Elektronik bestellbar:

C-MOS-Kameramodul / C-Cam-A	150001
Anschlussplatine	150325
Adapter Cinch & Power	150361

Die Kamera kann insbesondere auch mit einer einfachen 9 V – Blockbatterie betrieben werden.