

Spieglein, Spieglein an der Wand ...

Physikalisch fachwissenschaftliche und fachdidaktische Anmerkungen zu einem oftmals falsch dargestellten Sachverhalt

MARTIN BUCHHOLD

Bezogen auf die Wärmedämmung der Thermoskanne wird die in populärwissenschaftlichen Beiträgen und Schulbüchern häufig zu beobachtende, fehlerhafte Darstellung der Wirkungsweise metallisierter Oberflächen aufgezeigt. Die Reduktion auf das tradierte Erklärungsmuster Reflexion führt in vielen Anwendungsbereichen zu Falschaussagen. Der Artikel versucht den Sachverhalt differenziert darzustellen. Schulversuche werden vorgestellt, die die zentralen Aussagen untermauern. Didaktische Bemerkungen zur unterrichtlichen Umsetzung beschließen die Ausführungen.

1 Einleitung

Die böse Königin im Märchen reduzierte ihren Spiegel nicht auf die Wiedergabe ihres schönen Antlitzes, sie war vielmehr an dem interessiert, was vom Spiegel selbst kam. Will man die Wirkungsweise einer metallbeschichteten Oberfläche bei Wärmeschutzverglasungen, Rettungsdecken oder Thermoskannen richtig beschreiben, muss sorgsam zwischen Reflexion und Emission unterschieden werden, denn tatsächlich sind viele gegebenen Erklärungen entweder unvollständig, teilweise fehlerbehaftet oder sogar grob falsch. Speziell bei der Thermoskanne, einem nicht selten unterrichtlich thematisierten Gebrauchsgegenstand, dessen einfacher Aufbau scheinbar auch durch einfache physikalische Betrachtungen erklärt werden kann, hat der Autor bei seinen umfangreichen Recherchen nicht eine einzige vollständig plausible Erklärung gefunden. Grund genug also, zur Klärung beizutragen und einen Blick auf einen Sachbereich zu werfen, der sich durch ein zunehmendes Angebot preisgünstiger Messgeräte auch unterrichtlich experimentell erschließen und sich zu Themen wie Treibhauseffekt oder energieeinsparendem Wohnungsbau hin öffnen lässt (MENNERICH, 2016).

Im Folgenden geht es also um die Reduzierung des strahlungsbedingten Energieübertrages bei der Thermoskanne und damit um Emission, Absorption und Reflexion elektromagnetischer Strahlung. Die baulichen Maßnahmen zur Minimierung der Wärmeleitung (evakuierter bzw. gasgefüllter Innenraum) sind unbestritten und werden in diesem Artikel nicht betrachtet. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf andere Anwendungsfälle übertragen.

2 Geläufige Erklärungsmuster

RANGA YOGESHWAR erklärt, wie die Thermoskanne funktioniert: „Auffällig bei der Isolierkanne ist da noch die verspiegelte Oberfläche und auch sie hat einen Grund. Denn ein heißer Körper gibt nicht nur über den direkten Kontakt mit der Umgebungsluft Wärme ab, sondern strahlt auch einen Teil der Energie in Form von Wärmestrahlung ab. Die Innenverspiegelung wirkt dabei wie ein Gefängnis für die Wärmestrahlung.“ (YOGESHWAR, 2009)

Prof. Dr. MARCUS WOLFF, Institut für physikalische Sensorik, HAW Hamburg im Hamburger Abendblatt:

„Thermoskannen sind doppelwandige Gefäße, zwischen deren Wänden ein luftleerer Raum, also ein Vakuum herrscht. Dieses Vakuum wirkt als Wärmedämmung – so geht deutlich weniger Wärme verloren, als bei einer normalen Kanne. Die Spiegelung im Inneren einer Thermoskanne bewirkt zusätzlich, dass die abgestrahlte Wärme des heißen Getränks direkt wieder zurückgegeben wird. ...“ (WOLFF, 2011)

Lehrwerk „Gerthsen Physik“:

„Außerdem sind diese Glaswände metallisch verspiegelt, wodurch auch der dritte Austauschmechanismus, die Strahlung, weitgehend unterdrückt wird. Der heiße Kaffee strahlt natürlich nicht im Sichtbaren, sondern bei viel kleineren Frequenzen, im fernen Infrarot. Die Verspiegelung ist nur sinnvoll, wenn sie auch in diesem Frequenzbereich reflektiert.“ (MESCHÉDE, 2015, S. 590)

MARTIN VIEWEG auf der Website von „Bild der Wissenschaft“:

„Vakuum und Spiegelung verhindern bei der Thermoskanne den Temperatureausgleich mit der Umwelt“, sagt Born. Sie besteht aus zwei verspiegelten Flaschen, die durch ein Vakuum getrennt sind und sich nur an der Öffnung berühren. Da Wärme ein Trägermedium benötigt, verhindert das Vakuum, dass die heiße Innenflasche Wärme abgibt. Ihre spiegelnde Oberfläche, sorgt außerdem dafür, dass die Wärmestrahlung nach innen reflektiert wird und somit im Kaffee bleibt. (VIEWEG, 2011)

Die Darstellung in Abbildung 1 ist an im Web gefundene angelehnt und gibt das durch die vorgenannten Zitate suggerierte, falsche Wirkungsprinzip wieder.

3 Eine differenziertere Betrachtung

Eine Thermoskanne soll gegen ein Temperaturgefälle zwischen Innenraum und Außenraum in den meisten Anwendungsfällen heiße Flüssigkeiten warm und bisweilen auch kalte Flüssigkeiten

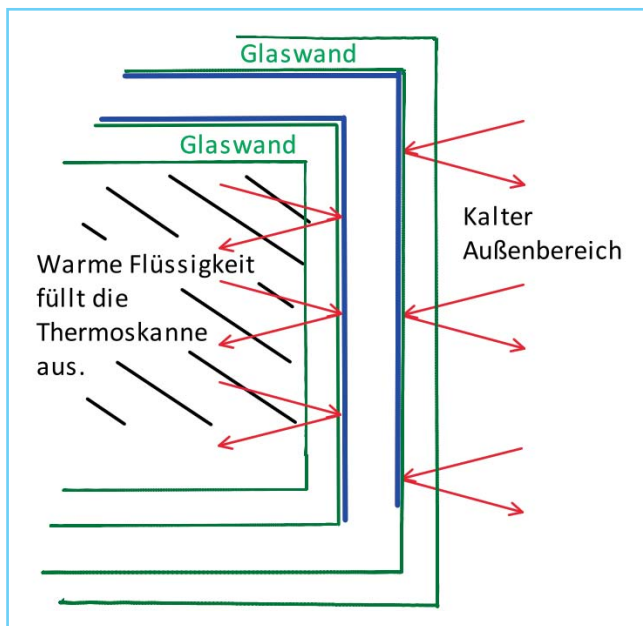


Abb. 1. Fehlvorstellung zur Reflexion infraroter Strahlung

kalt halten. Verbleiben wir für unsere weiteren Überlegungen beim ersten Fall: Frisch eingefüllter Kaffee der Temperatur 77°C soll bis zum Picknick in einigen Stunden schön heiß bleiben.

Gemäß dem PLANCK'schen Strahlungsgesetz sendet ein schwarzer Strahler der Temperatur von ca. 77°C , d. h. ca. 350K Strahlung der Wellenlänge von ca. 4 bis $30\ \mu\text{m}$ aus. Man spricht vom mittleren bis fernen Infrarotbereich.

Das LAMBERT-BEER'sche Gesetz $I(x) = I_0 \cdot e^{-kx}$ beschreibt die Abschwächung der Intensität elektromagnetischer Strahlung durch Absorption in einem Stoff in Abhängigkeit von der Schichtdicke x und der durch den Absorptionskoeffizienten k erfassten Stoffeigenschaft. Im betrachteten Wellenlängenbereich weist Wasser einen hohen Absorptionskoeffizienten k von ca. 10^2 bis $10^3\ \text{cm}^{-1}$ auf (DONGES, 2013, Abb. 1). Somit wird auf einer Strecke von einem Millimeter die Strahlung quasi völlig absorbiert. Wasser ist für Wärmestrahlung in diesem Wellenlängenbereich annähernd undurchdringlich. Daher ist es unmöglich, dass Wärmestrahlung aus den Inneren der Flüssigkeit an die Glaswand gelangt!

Wie steht es um das Absorptionsverhalten von Glas? Ein allgemeiner Absorptionskoeffizient ist aufgrund der Vielzahl der Gläser nicht angebar. Schaut man auf den Seiten der Glashersteller wie z. B. Schott (Schott, 2018) oder Präzisions Glas & Optik GmbH (Präzisions Glas- und Optik GmbH, 2018) nach, so zeigt sich, dass ab einer Wellenlänge von ca. $5\ \mu\text{m}$ aufwärts, d. h. im Bereich der von heißem Kaffee ausgehenden Strahlung, die Transmission bei Schichtdicken von $0,7\ \text{mm}$ praktisch gleich Null ist. Abbildung 3 ist ein rein qualitativ zu wertender Verlauf der Transmission durch ein fiktives Glas der Stärke $0,7\ \text{mm}$, frei erstellt auf der Grundlage von Abbildungen der in der Literaturangabe genannten Glashersteller. Der Energie-transport vom Wasser zur Verspiegelung erfolgt demnach (fast) ausschließlich durch Wärmeleitung vom Wasser zur Glasschicht und von der Glasschicht zur Verspiegelung und nicht bzw. kaum durch Strahlung. Somit ist belegt, dass die modellhafte Darstellung des Reflexionsverhaltens in Abbildung 1 nicht korrekt ist.

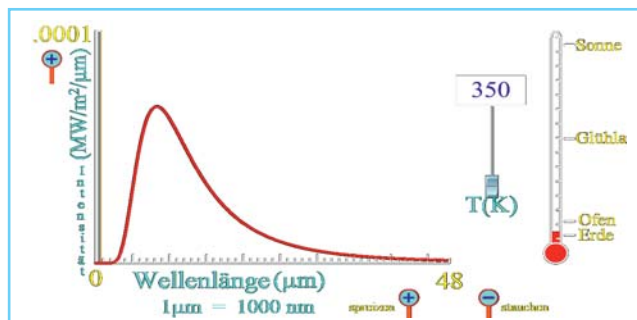


Abb. 2. Spektrum eines schwarzen Strahlers der Temperatur 350K . Die Grafik wurde mit einem Applet der Sammlung Phet der University of Colorado Boulder erzeugt. (https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_de.html)

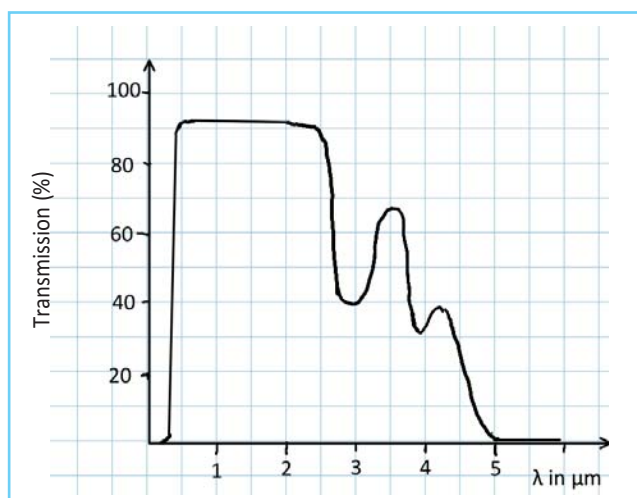


Abb. 3. Transmission elektromagnetischer Strahlung bei Glas

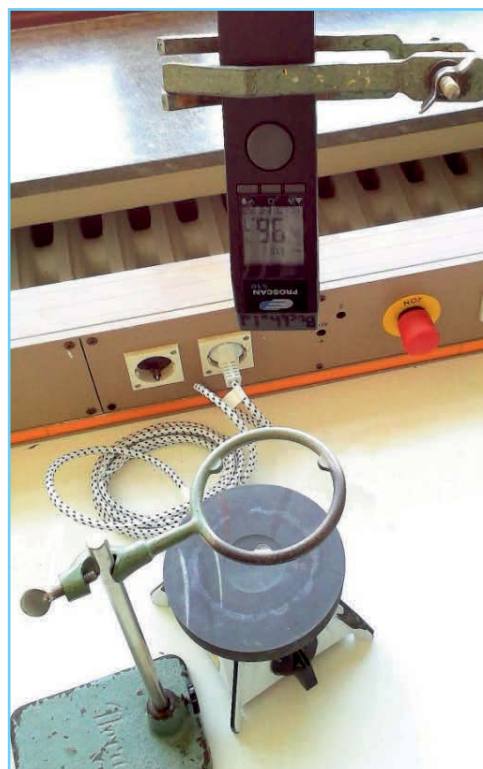


Abb. 4. Direktes Anvisieren der warmen Heizplatte (Anzeige 96°C)

Einfache Versuche mit Schulmitteln belegen qualitativ die vorgenannten Aussagen. Die Abbildungen 4, 5 und 6 zeigen einen Versuch zur Absorption infraroter Strahlung durch Wasser, die Abbildungen 7, 8, 9 und 10 Versuche zur Reflexion von Infrarotstrahlung durch Glas (verglaster Spiegel), Metalle und Wasser.

- a) Ein Strahlungsthermometer wird auf eine zuvor erwärmte, dann abgeschaltete Heizplatte gerichtet. Die Ausgangstemperatur beträgt 96°C . (Abb. 4; man beachte bei der Ablesung bei diesem und den Folgebildern, dass das Display auf dem Kopf steht.)
- b) Auf ein Stück grobmaschigen Drahtgeflechts wird Frischhaltefolie gelegt, diese Kombination wiederum auf eine Halterung (Abb. 5). Die Stellung des Thermometers wird nicht verändert. Die angezeigte Temperatur 85°C weist auf nur geringe Absorption durch die Folie hin.



Abb. 5.
Geringe Absorption durch Frischhaltefolie (Anzeige 85°C)

- c) Auf die Folie wird ein wenig Wasser aufgebracht. Die angezeigte Temperatur sinkt auf 29°C ab, was der Raumtemperatur von 25°C nahe ist und für starke Absorption spricht (Abb. 6)

Den Verdacht, dass Reflexion an der unterseitigen Rundung der Wasserlache für das Ergebnis verantwortlich ist, kann folgende Versuchsreihe widerlegen:

- d) Die Heizplatte wird schräg aufgehängt, die Anfangstemperatur nach kurzem Heizen durch direktes Anvisieren mit dem Thermometer gemessen: Die Anfangstemperatur beträgt 113°C (Abb. 7).

Da sich die Heizplatte mit der Zeit abkühlt, muss zügig experimentiert werden.

- e) Es wird untersucht, ob ein herkömmlicher Glasspiegel (Glas mit rückseitig aufgedampfter Metallschicht) außer dem sichtbaren Licht auch IR-Strahlung reflektiert.



Abb. 6.
Starke Absorption durch Wasser (Anzeige 29°C)



Abb. 7.
Direktes Anvisieren der erwärmten Heizplatte zur Feststellung der Anfangstemperatur (Anzeige 113°C)

Hierzu wird auf dem Tisch ein Spiegel platziert und das Strahlungsthermometer so auf den Spiegel gerichtet, dass über den Spiegel die Heizplatte anvisiert wird (Abb. 8). Beim genauen Ausrichten leistet der im Thermometer integrierte Laserpointer einen guten Dienst. Das Thermometer zeigt 41°C an, was für geringe Reflexion spricht.

- f) Der Spiegel wird zunächst durch eine matte Kupferplatte ausgetauscht, dann durch eine matte Aluplatte. Temperaturen von 76°C und 77°C weisen jeweils auf ein erhöhtes Reflexionsvermögen hin (Abb. 9). Interessant wären weitere Versuche mit gut polierten Platten.
- g) Statt der Platten wird eine wassergefüllte Schale verwendet. Der Temperaturwert von 28°C zeigt, dass Wasser im mittleren IR-Bereich trotz perfekter Planheit kaum reflektiert, sondern den größten Teil absorbiert (Abb. 10).



Abb. 8. Geringe Reflexion infraroter Strahlung durch den Glasspiegel (Anzeige 41 °C)

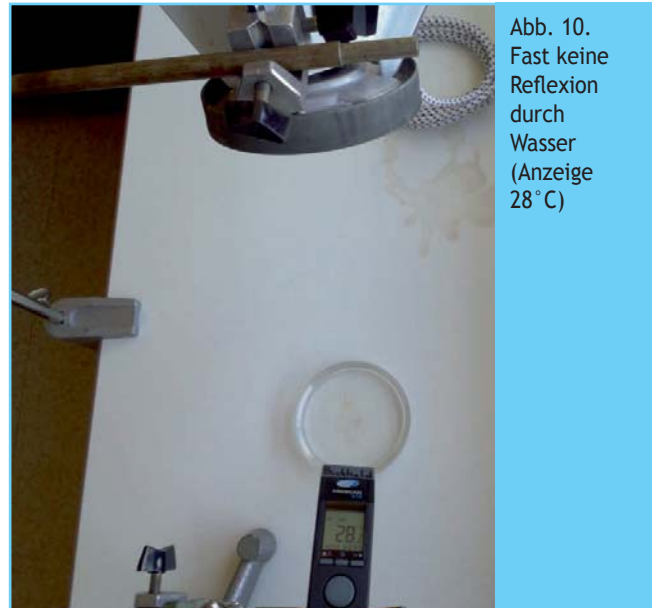


Abb. 10. Fast keine Reflexion durch Wasser (Anzeige 28 °C)



Abb. 9. Erhöhte Reflexion durch die Kupfer- und Aluminiumplatte (Anzeige 76 °C bzw. 77 °C)

Es wurde bei allen Versuchen darauf geachtet, dass die emittierenden und reflektierenden Flächen deutlich größer als der in der Bedienungsanleitung des Thermometers angegebene Eintrittskegel des Thermometers waren.

Wozu dient nun die Verspiegelung, wenn es keine Reflexion sein kann? Dass die Verspiegelung einen großen Nutzen hat, belegt ein eindrucksvolles Infrarotvideo einer mit heißem Wasser gefüllten unverspiegelten und einer verspiegelten Thermoskanne.

Es ist Bestandteil des eingangs genannten, von RANGA YOGESHWAR moderierten Fernsehbeitrags, der sich heute aber nur noch auf Youtube findet (YOGESHWAR, 2009).

Da ein Spiegel im Alltag zur Reflexion elektromagnetischer Strahlung des sichtbaren Spektralbereichs genutzt wird, verleitet schon allein die Begrifflichkeit „Spiegel“ dazu, auch nur seine reflektiven Eigenschaften zu betrachten. Im Folgenden wird daher statt von Verspiegelung, wie schon zu Beginn, allgemeiner von Metallbeschichtung gesprochen. Der bedeutsame physikalische Effekt ist die in den populärwissenschaftlichen Darstellungen völlig außer Acht gelassene Emission von Strahlung: Die in Richtung Außenseite metallbeschichtete Innenwand emittiert weniger Energie als eine unbeschichtete Glaswand (Abb. 11)! Entscheidend ist, dass die in den Versuchen f) angedeutete starke Reflexion von IR-Strahlung durch Metalle gemäß dem KIRCHHOFF'schen Strahlungsgesetz einher geht mit einer geringen Emission von IR-Strahlung. Berechnen lässt sich die Intensität der emittierten Strahlung eines sogenannten grauen Strahlers gemäß $S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$, wobei $S = \sigma \cdot T^4$ das Gesetz von STEFAN-BOLTZMANN ist mit $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Der Emissionsgrad ε ist im betrachteten Temperaturbereich eine Materialkonstante, die bei einem schwarzen Strahler den Wert 1 und für die meisten Stoffe Werte zwischen ca. 0,7 und 0,98 annimmt. Polierte Metalle hingegen haben weit geringere Emissionsgrade von ca. 0,02 bis 0,20. Weniger Emission bedeutet weniger Energieverlust. Damit ist auch klar, weshalb eine lange in Gebrauch befindliche Thermoskanne mit deutlich erkennbarem Belag auf der Kanneninnenseite (bei vorhandenem Vakuum) nicht in ihrem Wärmedämmvermögen beeinträchtigt ist, denn zur Kanneninnenseite bleibt die Metallisierung unbeschadet und somit das Emissionsvermögen konstant.

Eine Fläche strahlt nun nicht nur ab, sie absorbiert auch Strahlung aus der Umgebung. Stehen sich zwei gleich große Flächen gegenüber, so gilt für die Abstrahlungsleistung der Fläche mit höherer Temperatur T_1 und Emissionsgrad ε_1 : $P_{1,\varepsilon} = A\varepsilon_1\sigma T_1^4$. Die Wand mit der niedrigeren Temperatur T_2 habe den Emissionsgrad $\varepsilon_2 = 1$, sei also ein schwarzer Strahler. Die Wand emittiert

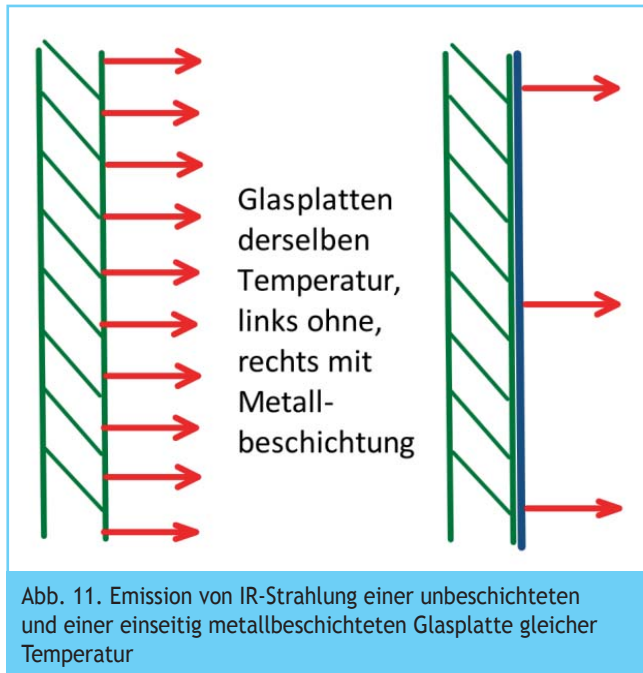


Abb. 11. Emission von IR-Strahlung einer unbeschichteten und einer einseitig metallbeschichteten Glasplatte gleicher Temperatur

somit mit $P_{z,E} = A\epsilon_2\sigma T_2^4 = A\sigma T_2^4$. Da der Absorptionskoeffizient gleich dem Emissionskoeffizient ist, ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= P_{1,E} - P_{1,A} = P_{1,E} - \epsilon_1 P_{2,E} = A\epsilon_1\sigma T_1^4 - \epsilon_1 P_{2,E} \\ &= A\epsilon_1\sigma T_1^4 - \epsilon_1 A\sigma T_2^4 = \epsilon_1 A\sigma(T_1^4 - T_2^4) \end{aligned}$$

Man erkennt in dieser Gleichung, die in fast allen von Studienanfängern genutzten Standardlehrwerken aufgeführt ist, gut den Einfluss der Metallisierung. Mit dieser Gleichung könnte man z. B. die Wärmeabstrahlung einer an der Außenseite metallbeschichteten Teekanne in einem Zimmer näherungsweise berechnen. Eine nicht metallisierte Teekanne (ϵ ca. 0,9) hätte demnach gegenüber einer außen metallisierten (ϵ ca. 0,09) ca. zehnmal mehr Strahlungswärmeverluste.

Bei einer Thermoskanne ist nun die zweite Wand genau wie erste metallbeschichtet, sie hat denselben kleinen Emissionsgrad wie die gegenüberliegende, weshalb die obige Gleichung nicht angewendet werden kann. Die von der Metallschicht der Innenwand ausgehende Strahlung wird vielfach im evakuierten Innenraum reflektiert, sodass die Strahlungsdichte einen Wert erreicht, bei der die von beiden Flächen fortlaufend emittierte Strahlung auch wieder von den beiden Flächen absorbiert wird (Abb. 12). Für diesen Fall ergibt sich gemäß SPINDLER & FRANK (2018, S. 27) vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart:

$$\Delta P_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} A\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Für $\epsilon_2 = 1$ geht diese Gleichung in die zuvor genannte über. Bei der Thermoskanne ist $\epsilon_1 = \epsilon_2$ und somit ergibt sich:

$$\Delta P_1 = \frac{\epsilon_1^2}{2\epsilon_1 - \epsilon_1^2} A\sigma(T_1^4 - T_2^4).$$

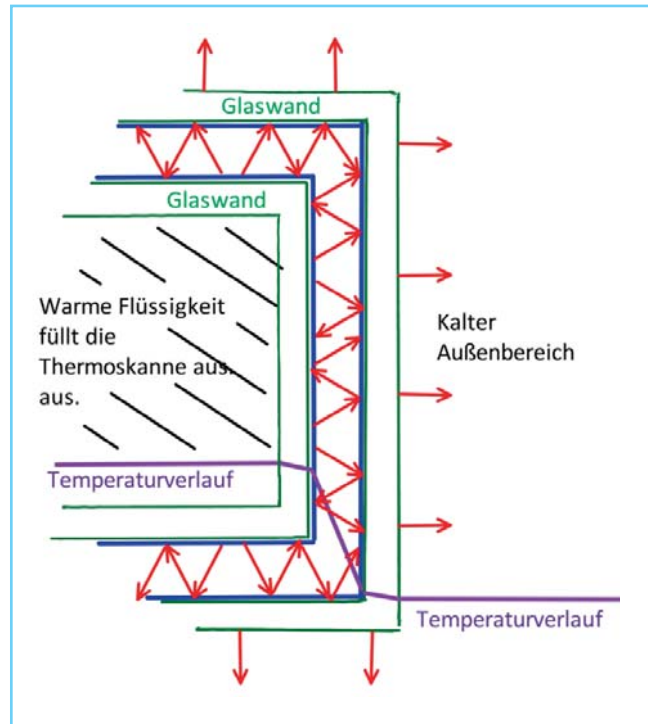


Abb. 12. Emission, Absorption und Reflexion von IR-Strahlung in der Thermoskanne. Zusätzlich eingetragen wurde der Temperaturverlauf von der Innen- zur Außenseite (rein qualitativ)

Für sehr kleine Werte für ϵ geht der Vorfaktor in $\epsilon/2$ über. Somit wäre der strahlungsbedingte Energieverlust der beidseitig metallisierten Thermoskanne nochmals um annähernd die Hälfte geringer als der einer Kanne mit nur an der Innenseite metallisierter Oberfläche.

4 Fazit

Ganz so einfach wie in fast allen populärwissenschaftlichen Beiträgen dargestellt, ist der Sachverhalt nicht. Ohne die Betrachtung der wellenlängenabhängigen Absorptionsprozesse in Wasser und Glas und der Emissions- und Absorptionseigenschaften von Oberflächen kann eine physikalische Erklärung der Wirkungsweise nicht gelingen. Betrachten wir rückblickend die eingangs erwähnten Zitate, so sind RANGA YOGESHWARS Ausführungen durchaus richtig, aber in Bezug auf die Wechselwirkungen nicht gerade aufschlussreich (was vermutlich auch nicht intendiert war uns somit auch außerhalb der Kritik steht). Die drei nachgenannten Zitate stellen den Sachverhalt allerdings unscharf bzw. falsch dar.

Ohne die Betrachtung der Emission von Strahlung sind auch viele andere Phänomene nicht erklärbar, wie z. B. die Funktion von Rettungsdecken oder Wärmeschutzverglasungen. Interessant ist, dass selbst manche Glashersteller (nicht die Glashersteller) falsche Erklärungen zur physikalischen Wirkungsweise ihrer Produkte geben, vermutlich weil für die Dokumentation zuständige Abteilungen das eingangs beschriebene Erklärungsmuster (Reflexion von IR-Strahlung) in ihren Texten und Grafiken schematisch übernehmen. Tatsächlich

ist aber für den winterlichen Wärmeschutz bei Doppelverglasungen nur die verminderte Emission relevant, die von der Metallbeschichtung der raumseitigen Scheibe ausgeht, denn die Außenscheibe trägt in der Regel keine entsprechende Beschichtung (vgl. FEIST, 2007). Anders ist es bei der Dreischeibenverglasung, die von daher dem Aufbau der Thermoskanne ähnelt.

Auch manche aktuellen Physiklehrwerke für die Mittelstufe beschreiben Strahlungsphänomene nicht immer fehlerfrei, weshalb die Lehrkraft die Buchtexte kritisch prüfen sollte. Insbesondere bleibt mitunter unbeachtet, dass die relativ kurzwellige IR-Strahlung einer Rotlichtlampe oder des Sonnenlichts mit Objekten anders wechselwirkt, als die relativ langwellige IR-Strahlung eines Mediums im Temperaturbereich kleiner 80°C. Heizkörper dürfen daher auch weiße Farbe tragen und müssen nicht aus energetischen Gründen schwarz lackiert sein. In Bezug auf Absorption und Emission von Strahlung des mittleren bis fernen Infrarotbereichs sind beide Lackierungen gleich „dunkel“.

5 Bedeutung für den Unterricht

Zunächst einmal soll dieser kleine Beitrag der Information des Physiklehrers und somit der individuellen Expertise dienen. Insbesondere die eingangs aufgeführten Zitate zeigen auf, wie problematisch Arbeitsaufträge sein können, in denen ganz allgemein ohne Webseitenempfehlungen von den Schüler/innen verlangt wird, im Internet bezüglich eines physikalischen Sachverhaltes zu recherchieren. Da sie die Verlässlichkeit der Quelle nicht einschätzen kann, ist die Gefahr der Aufnahme von Fehlinformationen sehr groß.

In Bezug auf eine unterrichtliche Einbindung der Thematik ist festzustellen, dass die Beobachtung völlig unterschiedlichen Absorptions- und Emissionsverhaltens in Abhängigkeit von Wellenlänge und Material durchaus interessant und mit einfachen schulischen Mitteln erkundbar ist. Stativmaterial sollte in jeder Schule vorhanden sein. Metallplättchen sind relativ einfach und billig zu beschaffen; sie können sowohl als Reflektoren dienen, als auch durch Teelichter beheizt als Strahlungsquellen. Strahlungsthermometer können in Internetshops zu Preisen ab 30 Euro bezogen werden.

Die Verortung in Curricula ist selbstverständlich bundeslandabhängig. Im rheinland-pfälzischen Lehrplan ließe sich die Thematik der Jahrgangsstufe 10 im Themenfeld 12 „Praxis und Forschung – Selbstständig und fragengeleitet experimentieren“ zuordnen. Dieses zeitlich am Ende der Mittelstufe liegende Themenfeld zielt schwerpunktmäßig darauf ab, experimentelle Kompetenz anzusteuern. Kenntnisse aus den Themenfeldern 2 „Optische Phänomene an Grenzflächen – Licht im Basiskonzept Wechselwirkung“ und 8 „Wärmetransporte und ihre Beeinflussung – Thermische Energieströme im Basiskonzept System“ müssten reaktiviert und ausgebaut werden. Der experimentelle Anspruch wäre es, Versuche zu planen, durchzuführen und reproduzierbare Ergebnisse bei wiederholenden Messungen zu erhalten, die in Einklang mit der Theorie stehen.

Literatur

DONGES, A. (2013). Die Wechselwirkung eines Er:YAG-Laserstrahls mit Wasser. <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/laserzahnmedizin/eryag/die-wechselwirkung-eines-er-yag-laserstrahls-mit-wasser> (12.02.2018)

FEIST, W. (2007). Wärmeschutzverglasung – eine geniale Erfindung. http://passiv.de/former_conferences/Passivhaus_D/Waermeschutzverglasung.htm (12.02.2018)

Heraeus Noblelight GmbH. Infrarot-Wärme für die Kunststoffverarbeitung, Abb. Seite 5. https://apps.heraeus.com/Infrared_for_plastics_DE/infrared_heat_for_plastics_de_epaper.html#p=1 (12.02.2018)

MENNERICH, I. (2016). Experimente mit der Wärmebildkamera. Hannover <http://www.schulbiologiezentrum.info/AH%2019.91%20%20Experimente%20mit%20der%20W%E4rmebildkamera.pdf> (12.02.2018)

MESCHÉDE, D. (2015), Gerthsen Physik, Berlin: Springer.

Präzisions Glas- und Optik GmbH (2018). https://www.pgo-online.com/de/kurven/1737_kurve.html (12.02.2018)

Schott (2018). <http://www.schott.com/borofloat/german/success-stories/optical-mirror.html> (12.02.18)

SPINDLER, K. FRANK, A. (2018). Grundlagen der Wärmeübertragung. http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/waermeuebertragung/7_Waermestrahlung.pdf (12.03.2018)

VIEWEG, M. (2011). Wissenswert: Wie halten Thermoskannen Kaffee heiß und Limonade kalt? http://www.wissenschaft.de/home/-/journal_content/56/12054/939618/ (12.02.2018)

WOLFF, M. (2011). Hamburger Abendblatt <https://www.abendblatt.de/ratgeber/wissen/article108184938/Wie-funktioniert-eine-Thermoskanne.html> (12.02.2018)

YOGESHWAR, R. (2009). Das Erste, Wissen vor 8; Warum bleibt in der Isolierkanne Heißes heiß? <https://www.youtube.com/watch?v=DNM08Zemaro> (12.02.2018)

StD MARTIN BUCHHOLD, Martin.Buchhold@beratung.bildung-rp.de, ist Regionaler Fachberater Physik und Physiklehrkraft am Kurfürst-Balduin-Gymnasium Münstermaifeld. ■