

Spannende Versuche mit der Wärmebildkamera

Volkhard Nordmeier, Alexander Strahl, Jürgen Kirstein und Rainer Müller

Bereits in wenigen Jahren werden Wärmebildkameras zur Standardausstattung vieler physikalischer Schulsammlungen zählen (siehe auch Beitrag von *Grötzebauch et al.* in diesem Heft [1]). Um diese begrüßenswerte Entwicklung und die zukünftige breitere Implementierung dieser Technik im Physikunterricht zu unterstützen, sollen in diesem Beitrag anhand von (einfachen) Versuchen zahlreiche Beispiele und Anregungen eines didaktisch motivierten Einsatzes von Wärmebildkameras aufgezeigt werden. Alle Versuche thematisieren Aspekte der Wärmelehre, denn hier liegt ein besonderer Schwerpunkt des Einsatzes der Thermokamera: Mit ihrer Hilfe gelingt es, bislang ‚Unsichtbares‘ – die Wärmestrahlung – sichtbar zu machen. Gleichzeitig birgt dieses neuartige Lehrmittel aus didaktischer Perspektive interessante Möglichkeiten, tiefer in die Thermodynamik einzusteigen. Denn eine Wärmebildkamera ‚misst‘ die Temperatur eines Objektes nicht wie ein Thermometer, sondern registriert die ausgesendete elektromagnetische Strahlung in einem bestimmten infraroten Spektralbereich, die sogenannte Wärmestrahlung. Die Interpretation der aus den Strahlungsdaten generierten ‚Wärmebildern‘ in Form von Falschfarbendarstellungen erlauben Aussagen zum Temperaturprofil. Obwohl sich Wärmebilder sehr oft schon der einfachen Betrachtung erschließen, sind für ihre korrekte Deutung mitunter Kenntnisse zum Emissionsverhalten der strahlenden Objekte oder zum Reflexionsverhalten der Umgebung erforderlich (siehe auch Beitrag von *Vollmer et al.* in diesem Heft [2]).

Viele Aspekte der Wärmelehre und eine breite Palette alltagsbezogener Kontexte können mit Hilfe der Wärmebildkamera auf eine völlig neue Weise experimentell untersucht werden. Die Einsatzgebiete reichen von der Thematisierung verschiedener Messverfahren über die Beschäftigung mit Materialeigenschaften bis hin zu energie- und bautechnischen Verfahren. Die Wärmebildkamera erweist sich dabei als eine sehr sinnvolle Erweiterung der Sammlung, denn das Thema Thermografie bietet – nicht zuletzt auch durch die ästhetisch sehr ansprechenden und oftmals staunenswerten Wärmebilder – einen neuen Zugang zu diesen vielfältigen Phänomenen.

Die im folgenden vorgestellten Versuche bilden nur einen kleinen Ausschnitt aus den vielfältigen Möglichkeiten, die Wärmebildkamera im Unterricht einzusetzen – gerade auch in Alltagskontexten und mit Alltagsgegenständen.

1. Beobachten einer Kaffeemaschine im Wärmebild



Abb. 1: Eine Kaffeemaschine im Wärmebild (aus [3])¹.

Das Wärmebild einer Kaffeemaschine kann als Einstieg in die Diskussion um die Interpretation von Wärmebildern dienen (siehe Abb. 1): Was sieht man auf dem Foto? Was bedeuten die Farben? (Erlaubt die Kamera eine Auswahl unterschiedlicher Farbpaletten, kann auch darüber diskutiert werden, welche Farben wir mit ‚warm‘ oder ‚kalt‘ assoziieren.) Und: Wie wird die Temperatur abgelesen?

Parallel zur Messung mit der Thermokamera sollte auch die Temperatur der Flüssigkeit z.B. durch ein elektrisches Thermometer gemessen werden. Auf diese Weise können sich die Schülerinnen und Schüler die Arbeitsweise einer Kamera für Infrarotstrahlung durch den direkten Vergleich erschließen: Während das Thermometer aufgrund von Wärmeleitung misst, handelt es sich bei der Thermokamera um ein berührungsfreies Verfahren, das die Wärmestrahlung zur Temperaturmessung nutzt. Diese Methode wird ebenfalls bei modernen Fibrerthermometern benutzt.

Die Darstellung dieses Experiments zeigt den vollständigen Aufbau, einschließlich der Wärmebildkamera selbst. Das Wärmebild wird hierdurch im Kontext der experimentellen Anordnung sichtbar, was in vielen Fällen die Interpretation der Wärmebilder vereinfacht.

¹ Weitere Beschreibungen und Farbbilder zu den hier beschriebenen Versuchen eins bis fünf finden sich auch in der Experimentdatenbank DOPPLER [4]. Sollte noch keine Wärmebildkamera vorhanden sein, können diese Versuche alternativ auch als sog. Interaktive Bildschirmexperimente (IBE) durchgeführt werden [3].

2. Energietransport: Wärmeleitung durch Metall



Abb. 2: Wärmeleitung durch Metall (aus [3]). (Das Wärmebild wurde aus einem Farbbild mit Regenbogenskala gewonnen und zeigt daher in der Graustufendarstellung keine eindeutige Skala. Das Originalbild ist über die Experimentdatenbank DOPPLER [4] verfügbar.)

Ein schwarz lackierter Metallkörper (U-Kern eines Aufbautransformators) steht mit einem Schenkel auf einer Heizplatte (temperaturgeregelt). Der zweite Schenkel steht auf einem Metallblock. Die Heizplatte ist schaltbar, so dass nach dem Einschalten der Heizplatte per Wärmebildkamera sehr schön die Veränderung der Temperaturverteilung eines Körpers bei der Wärmeleitung beobachtet werden kann (Abb. 2).

Es wird sichtbar, dass sich Energie in Form von Wärme durch Stoffe hindurch transportieren lässt. Metalle, wie hier zum Beispiel Eisen, sind gute Leiter für thermische Energie. Der Energietransport erfolgt dabei, ohne dass sich der Stoff dabei selbst bewegt. Dieser Aspekt der Wärmeleitung lässt sich hier aufgrund der starken Temperaturänderungen und der damit verbundenen emittierten Wärmestrahlung mit einer Infrarotkamera sehr gut zeigen.

3. Dissipation elektrischer Energie: Parallelschaltung von Elektrogeräten



Abb. 3: Parallelschaltung von Elektrogeräten (aus [3]).

Drei Elektrogeräte (Kaffeemaschine, Kochplatte und Bügeleisen) werden über eine Mehrfachsteckdose parallel geschaltet. Je nach Zuschaltung der Geräte lassen sich per Wärmebild die Temperaturveränderungen in den Zuleitungen und insbesondere in der Steckdose sichtbar machen (Abb. 3). Wird in die Zuleitung zusätzlich ein Vielfachmessgerät als Stromstärkemessgerät geschaltet, lässt sich die Gesamtstromstärke messen und ein Zusammenhang zu den Energieströmen bzw. zur dissipierten Energie herstellen: Die Ladungsströme zu den einzelnen Elektrogeräten an der Mehrfachsteckdose erwärmen die Zuleitungen und andere Teile des Aufbaus. Mit der Infrarotkamera lassen sich die damit verbundenen Temperaturänderungen als Maß für den Energiestrom bzw. die dissipierte Energie direkt beobachten (s. in diesem Zusammenhang auch den Artikel von *Weichsel et al.* in diesem Heft [5]). Bei gleicher Energiequelle (Haushaltssteckdose) sind Energie- und Ladungsstrom proportional zueinander.

4. Energieumwandlung beim Aufprall einer frei fallenden Kugel



Abb. 4: Frei fallende Kugel (aus [3]). (Das Wärmebild wurde aus einem Farbbild mit Regenbogenskala gewonnen und zeigt daher in der Graustufendarstellung keine eindeutige Skala. Das Originalbild ist über die Experimentdatenbank DOPPLER [4] verfügbar.)

Mit der Thermokamera wird sogar die Energieumwandlung beim Aufprall einer fallen Kugel sichtbar! Lässt man eine Kugel aus unterschiedlichen Höhen (z.B. 30, 50, 70 cm; über einen elektromagnetischen Auslöser) fallen, so trifft sie auf die Tischoberfläche und führt dort Hüpfbewegungen aus. Beim jedem Aufprall wird je nach Fallhöhe unterschiedlich viel Energie dissipiert, und die jeweilige Temperaturänderung an der Aufprallstelle ist im Wärmebild deutlich erkennbar.

In ähnlicher Weise lassen sich aber auch die Energiedissipation beim Abbremsen eines Fahrrades auf dem Boden oder andere einfache mechanische Wechselwirkungen mit deutlicher Energiedissipation (wie das Herunterspringen von einem Tisch, Schlagen mit einem Hammer, Über-den-Boden-Ziehen eines schweren Körpers usw.) visualisieren.

5. Reibungswärme bei der Pendelschwingung

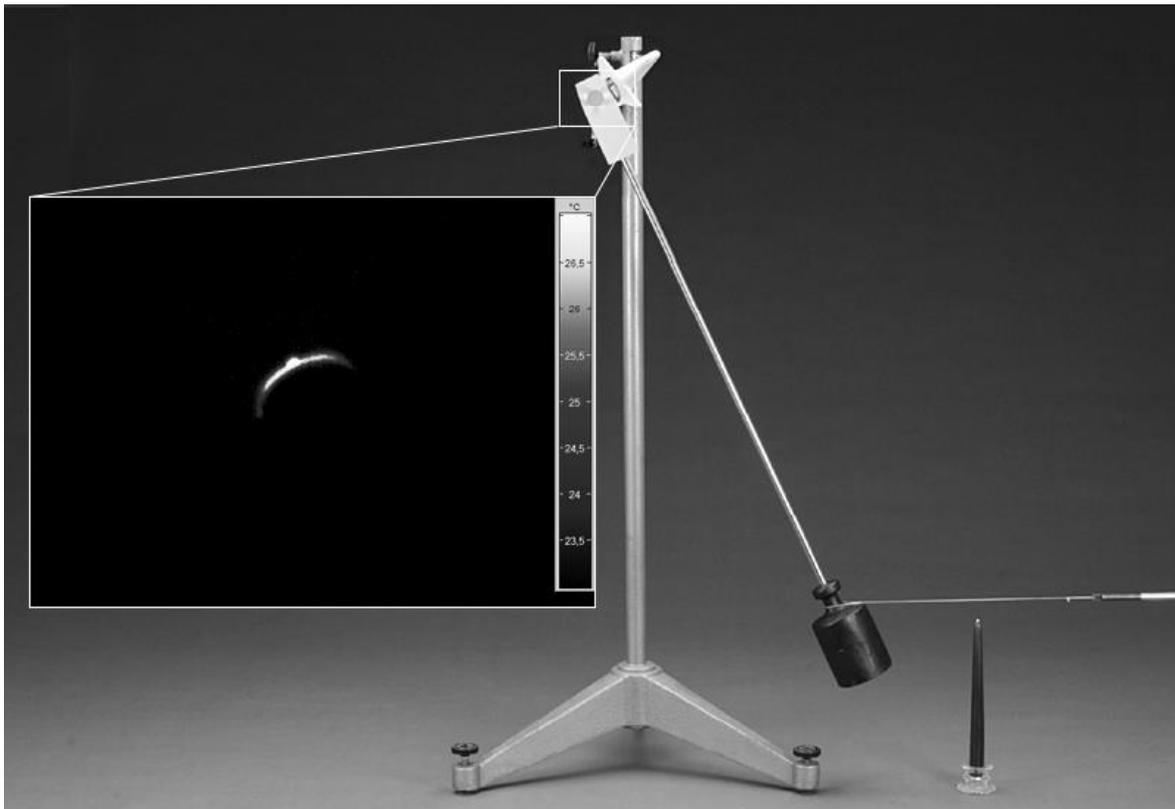


Abb. 5: Reibungswärme in Gelenken (aus [3]).

Die gedämpfte Schwingung eines Pendels (mit großer Lagerreibung) ist ein weiteres Beispiel für die Dissipation mechanischer Energie (Abb. 5). Von Schwingung zu Schwingung liegt der Umkehrpunkt immer tiefer, bis das Pendel schließlich stehen bleibt. Das erklärt sich dadurch, dass ein Teil der mechanischen Energie des Pendels als thermische Energie unter anderem in der Aufhängung des Pendels verloren geht. Aufgrund der Reibung im Lager nimmt die Temperatur der Pendelaufhängung während der Pendelschwingung zu. Die Temperaturerhöhung im Lager bzw. der Aufhängung lässt sich per Wärmebildkamera sehr eindrucksvoll beobachten.

(Tipp: Um die Temperaturzunahme in der Pendelaufhängung mit der Infrarot-Kamera gut sichtbar zu machen, sollte eine Aufhängung mit besonders großer Reibung gewählt werden. Dazu eignet sich als Material Kunststoff sehr gut, denn er leitet die thermische Energie schlecht, speichert sie aber gut, so dass die Infrarot-Kamera die Erwärmung gut

„~~sieht~~“ messen kann.)

6. Wärmeleitung beim Kochen

Die Wärmebildkamera lässt sich nicht nur bei den klassischen Inhalten des Physikunterrichts einsetzen. Auch Alltagsphänomene lassen sich in eindrucksvollen Bildern schnell erfassen. Die folgenden Versuchsbeschreibungen geben Anregungen dafür.

Der Gänsebraten im Ofen und das Frühstücksei im siedenden Wasser erwärmen sich nicht gleichmäßig, sondern schichtweise von außen nach innen (vgl. Beiträge im PRAXIS-Themenheft „Physik in der Küche“ [4]). Die instationäre Wärmeleitung beim Kochen kann man mit folgendem Versuch verdeutlichen: Ein Kohlrabi wird in zwei Hälften zerschnitten. Die beiden Hälften werden lose wieder zusammengefügt, das Ganze in einen Ofen gelegt. Im Abstand von einigen Minuten wird der Kohlrabi aus dem Ofen geholt, auseinandergeklappt und die Temperaturverteilung im Innern mit der Wärmebildkamera aufgenommen. Anschließend werden die beiden Hälften zusammengefügt und wieder in den Ofen gelegt. Abb. 6 zeigen die Temperaturverteilung nach 3 min und nach 9 min. Man erkennt die allmähliche Erwärmung von außen nach innen.

Die theoretische Temperaturverteilung bei der instationären Wärmeleitung in einer Kugel ist auf den Bildern im Rezeptvorschlag „Nilpferd in Burgunder“ im erwähnten Heft ([4], S. 11) gezeigt. Der Kohlrabi-Versuch kann als Modellversuch für diesen Kontext dienen.

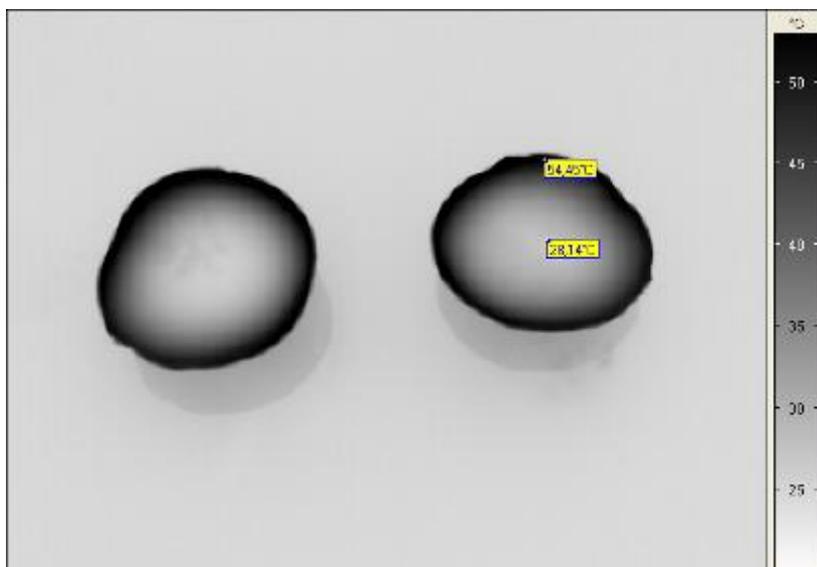
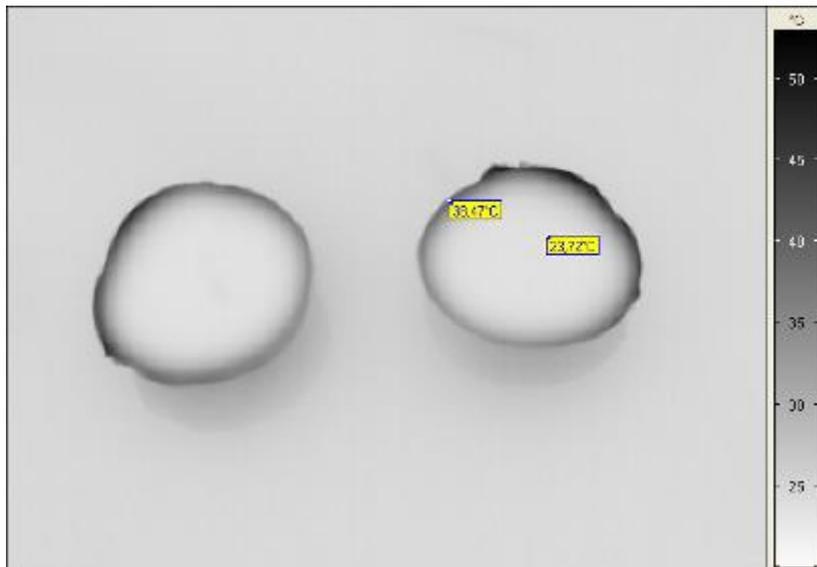


Abb.6: Wärmeverteilung in einem Kohlrabi nach unterschiedlichen Zeiten.

7. Temperaturverteilung auf einer Pizza

Abbildung 7 zeigt in der oberen rechten Ecke eine offenfrische Pizza, links ist das dazugehörige (etwas vergrößerte) Wärmebild dargestellt. Ausgangspunkt interessanter Diskussionen ist z.B. die Frage: Woran verbrennt man sich am ehesten den Mund?

Die Wärmebildkamera lässt sich mit einer solchen Fragestellung gewinnbringend in einer kontextorientierten Unterrichtseinheit zur Pizzaphysik verwenden (z. B. [5]).

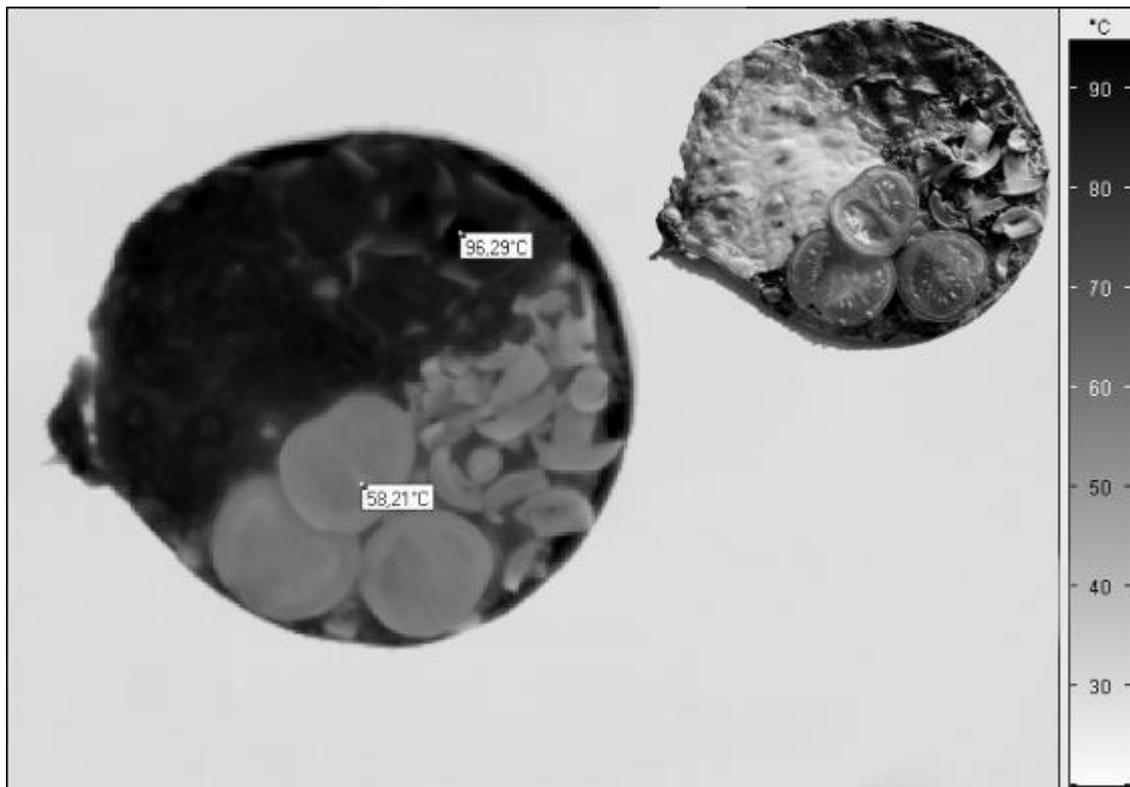


Abb. 7: Wärmeverteilung in einer offenfrischen Pizza (rechts oben Real-Foto)

8. Wie viel Milch ist in der Packung?

Tetrapaks sind lichtundurchlässig und schützen dadurch die in den Getränken enthaltenen lichtempfindlichen Vitamine ([6], S. 3).⁺ Sie bestehen aus drei Schichten Polyethylen-Karton-Polyethylen mit einer dünnen Aluminiumschicht, um das Getränk gegen Luft und Licht zu versiegeln und einer weiteren Polyethylenschicht für eine sichere Abdichtung ([6], S. 8). Durch die kalte Milch im Inneren des Getränkekartons bleibt das Verpackungsmaterial um die Milch herum kalt. Der obere Teil des Tetrapaks erwärmt sich auf Zimmertemperatur. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass der Getränkekarton etwa zu einem Drittel mit Milch gefüllt ist. Wird der Karton nun gekippt, ist nach wenigen Sekunden die neue Lage der Milch über die Wärmestrahlung der Verpackung sichtbar.

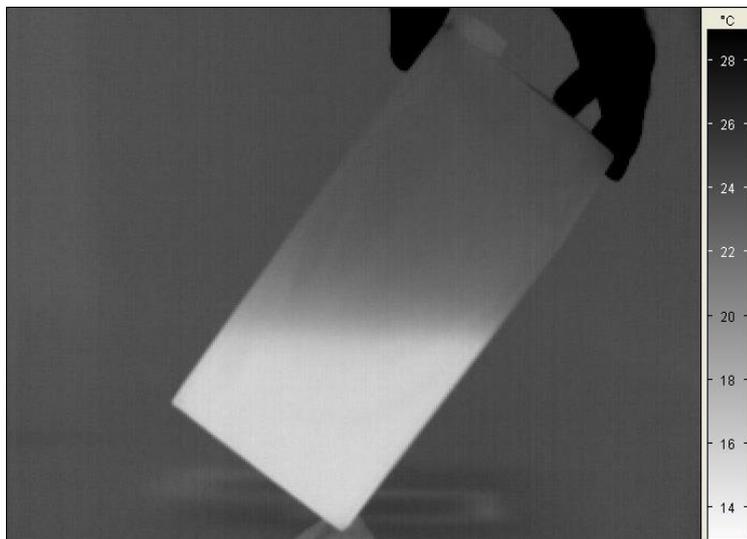
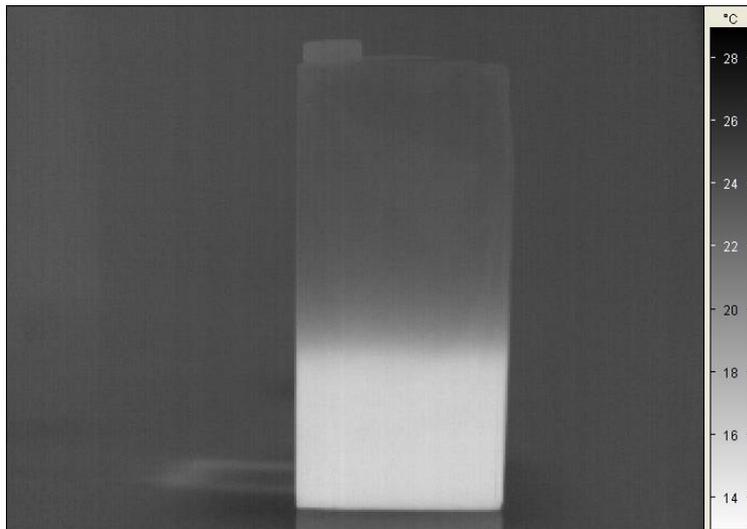


Abb. 8: Füllstand einer Milchpackung

9. Schreiben mit Kälte



Abb. 9a: ‚Physik‘ und ein Handabdruck im Wärmebild.

Mit bloßem Auge ist auf der Pappscheibe gar nichts zu sehen. Der Schriftzug wurde mit einem Eiswürfel aufgebracht und ist – wie der ‚nasse‘ Handabdruck – nur im Wärmebild zu sehen.

Eine einfache und zugleich eindruckvolle Alternative bietet die Verwendung einer OH-Folie, die mit Wasser (bei Zimmertemperatur) ‚beschriftet‘ wird. Hierbei beruht die Sichtbarkeit der ‚Geheimtinte‘ im Wärmebild auf der Verdunstungskälte. Wasser als ‚Geheimtinte‘ ist für Schülerinnen und Schüler sicherlich eine reizvolle Alternative zu den üblichen Rezepten aus der Chemie, sofern im Unterricht eine Wärmebildkamera zur Verfügung steht.



Abb. 9b: Die Abbildung wurde einem Video entnommen, das zur Demonstration derartiger Experimente für die ‚Lange Nacht der Wissenschaften‘ hergestellt wurde. Dieses Video ist über die Experimentdatenbank DOPPLER [4] verfügbar.

10. Telefonieren mit dem Handy

Wer gern lange telefoniert, kennt das Problem: Das Ohr wird warm, und scheinbar auch die ganze Kopfhälfte. Liegt das nun an der elektromagnetischen Strahlung? Ein Wärmebild lässt zumindest daran zweifeln – der Hauptschuldige scheint der sich erwärmende Handy-Akku zu sein (s. Abbildungen 10a und 10b).



Abb. 10a: Temperatur vor dem Telefonieren (linker Messpunkte 26,74°C zeigt das Handy).



Abb. 10b: Temperatur nach dem Telefonieren.

11. Motherboard eines Computers

Das Motherboard eines Computers produziert im Betrieb ‚Abwärme‘. Wärmebildaufnahmen können hier sehr gut zeigen, welche Bauteile eine hohe Leistungsaufnahme haben und welche nicht (Abb. 11a).

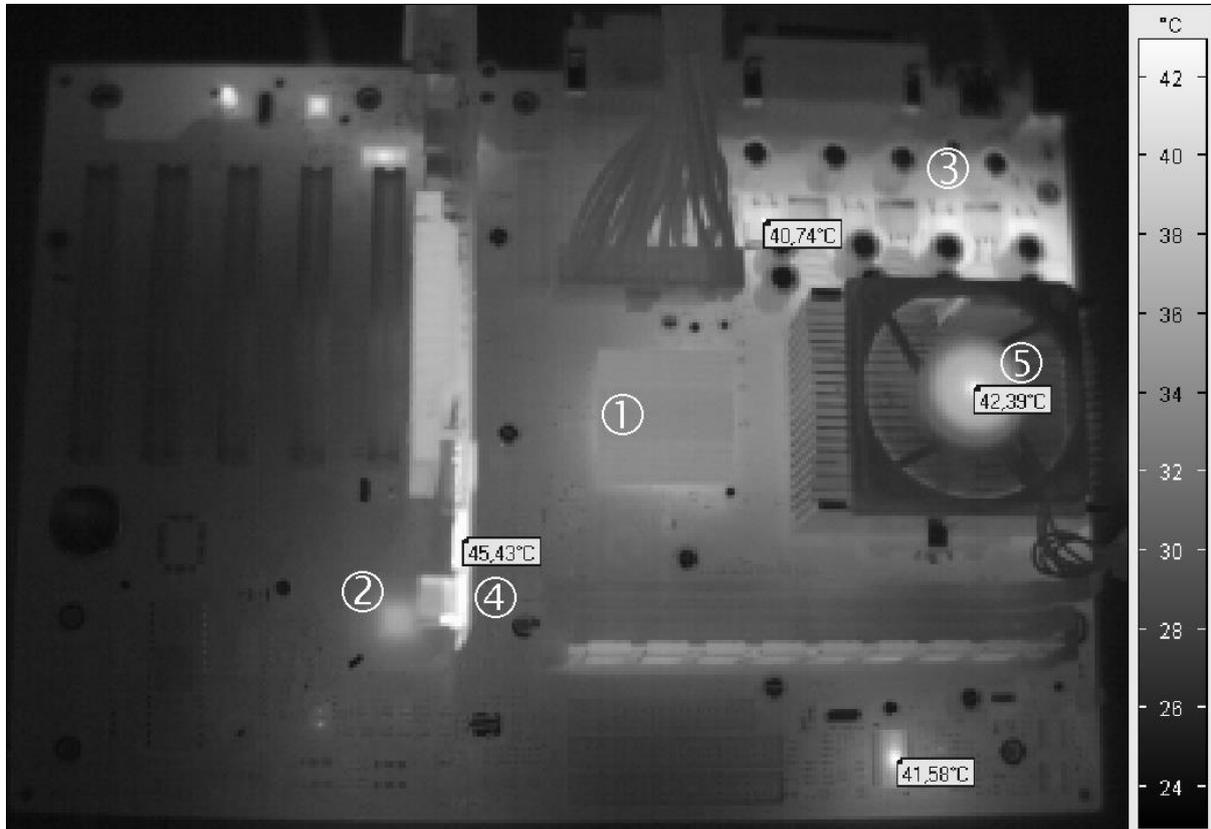


Abb. 11a: Motherboard in Betrieb: Vor allem die North- ① und Southbridge ②, die Spannungswandler ③, die Speicher der Grafikkarte ④ und der Motor des Lüfters ⑤ werden warm.

Dramatisches geschieht, wenn man absichtlich eine Überhitzung des Prozessors herbeiführt (Abb. 11b). Nach dem Abmontieren von Ventilator und Kühlrippen erhitzt sich der Prozessor sehr stark (auf 250 °C). Im Versuch wurde nach einigen Minuten ein Pfeifton hörbar, der abrupt mit dem Ableben des Prozessors und anschließender Abkühlung endete.

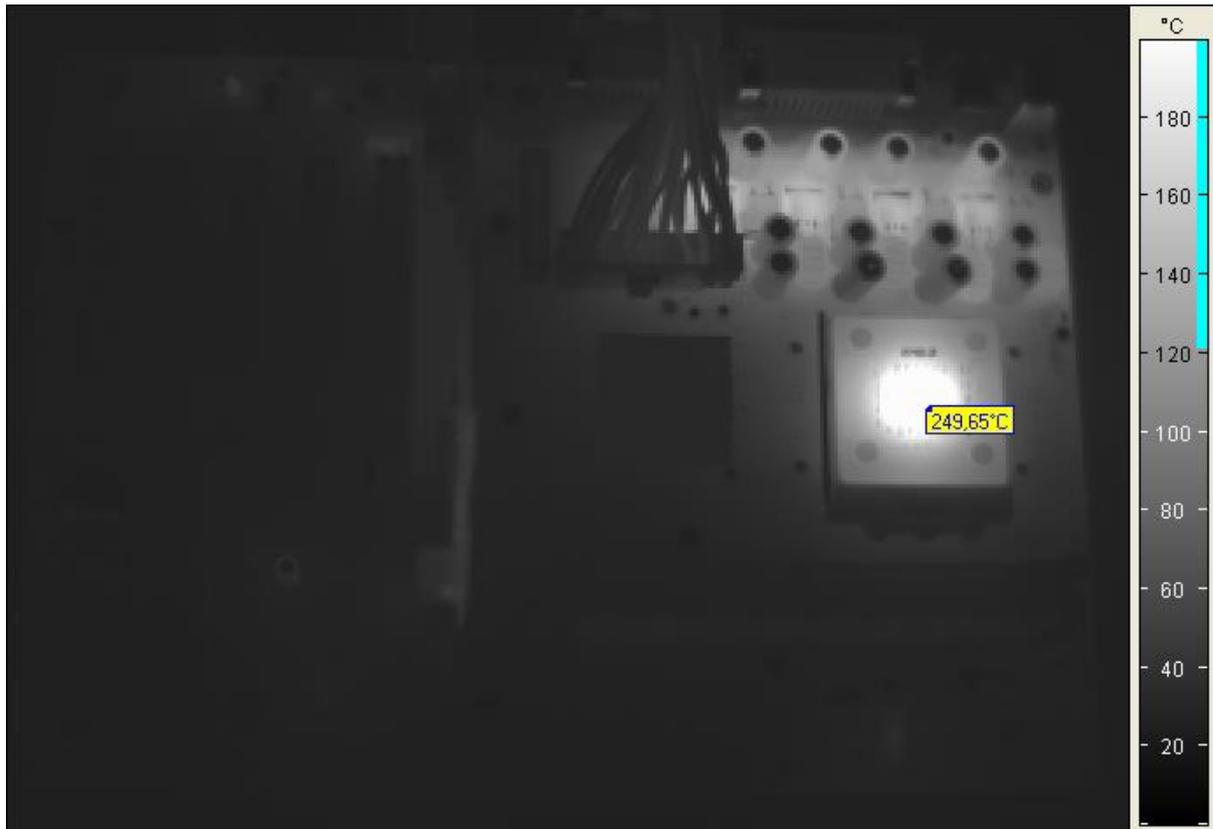


Abb. 11b: Motherboard ohne Lüfter, unmittelbar vor dem Durchbrennen des Prozessors.

12. Bild einer Flamme

Abbildung 12 zeigt das Wärmebild der Flamme eines Gasbrenners. Die Temperaturskala wurde weggelassen, da hier ein Gas aufgenommen wurde. Gasen werden bei Wärmebildaufnahmen u.a. aufgrund der komplexen Emissionseigenschaften falsche Temperaturwerte zugeteilt (siehe auch Beitrag von *Vollmer et al.* in diesem Heft [2]). Der Wärmeverlauf lässt sich hier dennoch gut erkennen: Es ist z.B. gut zu erkennen, dass die Flamme bei geöffneter Luftzufuhr oberhalb des Kegels am heißesten ist.



Abb. 12: Die Flamme eines Gasbrenners, einmal mit geschlossener (oben) und geöffneter Luftzufuhr (unten).

13. Transmission: Undurchsichtiges wird durchsichtig – und umgekehrt

Luftballons wie auch Kunststofffolien (Einkaufstaschen) und ähnliche Materialien, die im sichtbaren Spektralbereich undurchsichtig sind, werden im Wärmebild transparent. Im Unterricht kann dieses Phänomen der Anlass dafür sein, die Grenzen unseres Sehens zu verdeutlichen (vielleicht auch als Analogie zu den Frequenzgrenzen der auditiven Wahrnehmung). Das Materialien frequenzabhängige Transmissionseigenschaften haben, zeigt sich besonders auch in der Umkehrung dieses Versuchs: Die (in der Regel) im Sichtbaren transparenten Gläser einer Brille erscheinen im Wärmebild als schwarze, undurchsichtige Flächen.

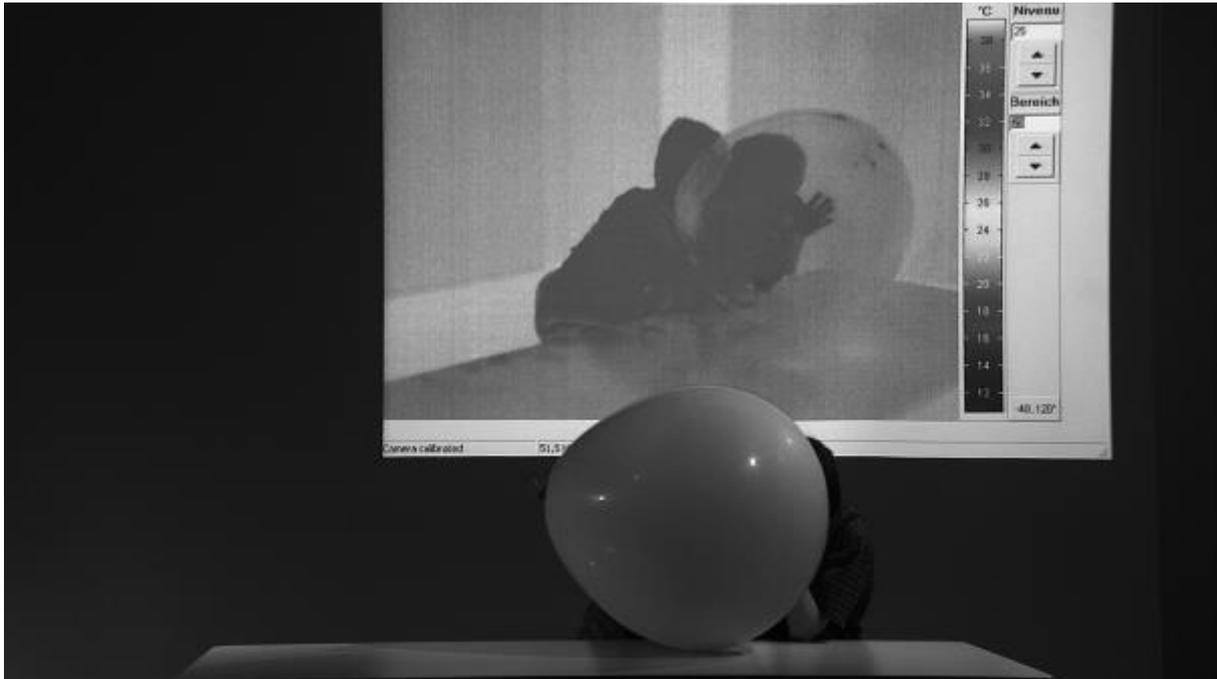


Abb. 13: Ein Luftballon ist kein gutes Versteck, da man mit der Wärmebildkamera durch ihn hindurch sehen kann.

14. Weitere Experimente

Die Liste der hier skizzierten Versuche mit der Wärmekamera lässt sich nahezu beliebig fortsetzen, denn thermodynamische Effekte lassen sich bei vielen Prozessen in Natur und Technik beobachten. Sehr interessant sind z.B. auch Versuche zur Emission: Versuche mit dem Lesley-Würfel (vgl. z.B. [7]) zeigen deutlich, dass die emittierte Wärmestrahlung nicht nur von der Temperatur des Körpers, sondern in sehr starkem Maße auch von Material- und Oberflächeneigenschaften bestimmt wird. Dies wird durch den sog. Emissionsgrad ausgedrückt. Wird dieser Effekt nicht beachtet, so können Wärmebilder eben auch recht irreführend sein. Ein weiterer interessanter Bereich für Versuche betrifft die thermische Reflexion: Dass auch Wärmestrahlung wie ‚Licht‘ reflektiert wird, zeigen die Spiegelungen z.B. an einer Metallfolie. Während im sichtbaren Spektralbereich nichts zu erkennen ist (bzw. diffuse Streuung stattfindet), offenbart das Wärmebild, dass die Wärmestrahlung z.B. eines erwärmten Gegenstandes oder eines Gesichts recht gut reflektiert wird (vgl. z.B. [2], [7]). Hinweise und Anregungen zu weiteren Versuchen mit der Wärmekamera finden sich auch in der ausführlichen Literaturliste im Beitrag von *Vollmer et al.* in diesem Heft [2].

Literatur

- [1] Grötzebauch, H.; Nordmeier, V.: Marktübersicht Wärmebildkameras. In: PdN-Ph. 8/57 (2008).
- [2] Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.: Thermographie. Grundlagen, Forschung und moderne Anwendungen in Industrie und Technik. In: PdN-Ph. 8/57 (2008).
- [3] Muckenfuß, H.; Nordmeier, V.: CD-ROM zur Schulbuchreihe ‚Physik interaktiv‘ (7./8. Schuljahr). Berlin: Cornelsen Verlag (ab 2007). (Und: CD-ROM zur Cornelsen-Schulbuchreihe ‚Focus‘)
- [4] DOPPLER: Datenbank mit digitalen Medien zur Experimentalphysik. URL: <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/doppler/Beschreibung/> (Stand: 01.10.2008).
- [5] Weichsel, Y.; Strahl, A.; Müller, R.: Die Wärmebildkamera in der Elektrizitätslehre. In: In: PdN-Ph. 8/57 (2008).
- [4] Mennerich, C.; Müller, R.; Süllo, S.: Physik in drei Gängen. Das Kochen als Kontext zum Thema Wärmeübertragung. In: PdN-PhiS 3/57 (2008). Und: Berger, R.; Schwarz, D.: Wie lange muss ein Ei kochen. In: PdN-PhiS 3/57 (2008).
- [5] Schwarzenberger, P.: Physik der Pizza. In: Unterricht Physik 19 (2008).
- [6] Informationen zu Tetrapacks. URL: http://www.tetrapak.de/imperia/md/content/deutschland/fuer_verbraucher/kartonsvonderrolle/markenlehrbrief_final_version_061103_rz.pdf (Stand 01.10.2008).
- [7] Karstädt, D.; Möllmann, K.-P.; Pinno, F. und Vollmer, M.: Anschauliche Wärmelehre im Unterricht. In: PdN-Ph. 5/48. (1999).