

Möglichkeiten zur Behandlung des Wärmeäquivalents im Unterricht - Erweiterte Vorschläge zur experimentellen Erfassung des Wärmeäquivalents -

Eduard Krause, Christian Deitersen

Didaktik der Physik, Universität Siegen, Adolf-Reichweinstraße 2, 57076 Siegen
krause@physik-uni-siegen.de, deitersen@physik.uni-siegen.de

Kurzfassung

Bekanntlich ist die Vernetzung der einzelnen Teilgebiete der Physik beim Lehren und Lernen von hoher Bedeutung. Zu den Schnittstellen zwischen Mechanik und Thermodynamik gehört die Beschäftigung mit dem Wärmeäquivalent, das in der Geschichte der Physik eine wichtige Rolle spielte. Welche Leistungen Meyer, Joule und Colding mit der Bestimmung des quantitativen Zusammenhangs zwischen Arbeit und Wärme erbracht haben, wird erst dann deutlich, wenn man selbst Experimente zur Findung des Wärmeäquivalents durchführt. Auf experimentellem Wege kann man für Lernende besonders gut verdeutlichen, dass Wärme eine Prozessgröße ist und keinesfalls mit stofflichen Vorstellungen (Stichwort Phlogiston) in Verbindung gebracht werden darf. Im vorliegenden Artikel sollen Möglichkeiten präsentiert werden, wie man das Wärmeäquivalent experimentell zugänglich machen kann.

1. Warum die geschichtliche Behandlung der Wärme

Der vorliegende Artikel stellt eine Erweiterung des in der MNU bereits publizierten Aufsatzes dar [1]. Dort wurde schon auf die Bedeutung des Wärmeäquivalents in der Geschichte der Physik hingewiesen. Diese findet im Physikunterricht meist wenig Beachtung. Für die Behandlung des Wärmebegriffs trifft wie für kaum einen anderen physikalischen Begriff zu, was Friedrich Hund schon 1972 am Lernen von Physik kritisiert hat:

»Man lernt Physik meist aus einem Lehrbuch, das auf kurzem Weg das für richtig gehaltene Wissen plausibel macht oder nur systematisch darstellt. Der Leser gewöhnt sich so an die Begriffe und an die Sätze ... So haben sich zum Beispiel die Physiker daran gewöhnt, dass das Licht auf elektromagnetischen Wellen beruht, dass die Wärme eine Energieform ist ... Die Gründe dafür, die Zweifel daran und viele Schwierigkeiten, die eine solche Vorstellung bot, werden nicht mehr diskutiert. So werden auch die grundlegenden Begriffe der Physik nicht mehr voll verstanden.« [2].

Dabei lohnt sich vor allem bei der Einführung des Wärmebegriffs der Blick in die Physikgeschichte. In der Historie der Thermodynamik ist man lange von der Wärme als stofflicher Zustandsgröße ausgegangen. Diese Vorstellung deckt sich auch mit der Fehlvorstellung der Schülerinnen und Schülern, für welche es intuitiv ist, einem Zustand einen bestimmten Wärmegehalt zuzuschreiben. Dass Wärme eine Prozessgröße ist, wird vor allem durch den Ver-

gleich zwischen Wärme und mechanischer Arbeit ersichtlich. Diese Erkenntnis, die im Begriff des Wärmeäquivalents¹ zum Ausdruck kommt, wurde geschichtlich nur mühsam errungen. Das Nachvollziehen der in diesem Zusammenhang diskutierten Fragen und der entscheidenden Experimente eröffnet Lernenden das Verständnis, was Wärme im physikalischen Sinne bedeutet.

2. Die Bedeutung des Wärmeäquivalents in der Physikgeschichte²

Wie schon erwähnt, ging man anfänglich bei der Wärme noch von einer stofflichen Größe aus, die man „Calorium“ oder „Phlogiston“ nannte. Bei der Wärmestofftheorie wurde angenommen, dass dieses Phlogiston beim Verbrennen freigesetzt werde. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts mehrten sich aber die Zweifel an dieser Theorie. Die Entscheidung in der Frage, ob Wärme nun eine stoffliche Größe ist oder nicht, brachte das Experiment von Benjamin Thompson (1753–1814), auch bekannt als Graf

¹ Beim Begriff der Äquivalenz ist jedoch Vorsicht geboten, da niemals die Wärme gänzlich in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Außerdem wird durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik deutlich, dass diese Umwandlungen meist nur in eine Richtung gehen.

² Für eine ausführlichere Darstellung des historischen Kontextes und der technischen Umsetzung (vor allem bei Joule) sei auf [3] verwiesen. Die Genesis des Wärmebegriffs allgemein kann in der Dissertation von Norbert Schirra (1989) [4] oder auch in der didaktisch aufbereiteten Darstellung der Physikgeschichte von Wilfried Kuhn [5] nachgelesen werden.

Rumford. Er konnte durch das Bohren eines Kanonenrohrs mit einem stumpfen Bohrer nachweisen, dass die freigesetzte Wärme proportional zur Dauer der Reibungswirkung ist und damit aus dem Prozess des Bohrens herrührt und nicht als stoffliche Substanz dem Metall innewohnt. Nach der Wärmetheorie müsste ein Wärmestoff irgendwann verbraucht sein, was durch Graf Rumford widerlegt wurde, da mit beliebiger Dauer des Reibungsprozesses entsprechend viel Wärme erzeugt werden kann. Die Wärme in Graf Rumfords Experiment wurde durch mechanische Arbeit an einem durch Pferde angetriebenem Rad erzeugt. Rumford zeigte damit, dass mechanische Arbeit in Wärme umgewandelt werden kann, die quantitative Umrechnung der beiden Größen war damit aber noch nicht gegeben. Unabhängig von Rumford ist auch der deutsche Arzt Julius Robert Meyer (1814-1878) auf den qualitativen Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit gekommen. Ihm ist als Schiffsarzt in Indonesien aufgefallen, dass das Blut der Matrosen in warmen Gebieten eine hellere Farbe hat, als das Blut der Matrosen, die frisch aus den kälteren Regionen angereist waren. Das bedeutet, dass Oxidationsprozesse in wärmeren Gegenden langsamer ablaufen. Er erkannte darin den Zusammenhang zwischen der Energie im Blut und der Wärme in der Umgebung. Dieser Vermutung folgend, versuchte er den Zusammenhang von Wärme und der „greifbarsten“ Form der Energie, der verrichteten mechanischen Arbeit, zu quantifizieren. Er kam zu dem Ergebnis, dass 1 Kalorie äquivalent zu 360 kpm^3 sein muss. Wie er zu diesem Ergebnis gekommen ist, hat er nicht näher erläutert. Seine Publikationen fanden in der Fachphysik allerdings keinen Anklang. Die fachlich sauberere Bestimmung des Wärmeäquivalents mit einem ähnlichen Resultat geht auf James Prescott Joule (1818–1889) zurück. Sein Versuchsaufbau bestand im Wesentlichen darin, dass durch das Fallenlassen eines Gewichtes ein Rührwerk angetrieben wird, welches Wasser erwärmt (siehe Abbildung 1). Unabhängig von Meyer und Joule hat auch der dänische Ingenieur Ludwig August Colding (1815–1888) an der Bestimmung des Wärmeäquivalents geforscht. Diese Bemühungen der drei Forscher mündeten in der Formulierung des allgemeinen Energieerhaltungssatzes, den Hermann von Helmholtz (1821–1894) in der Mitte des 19. Jh. in seinem Werk „Über die Erhaltung der Kraft“ formulierte und der als eine der fundamentalsten Gesetzmäßigkeiten der Physik anzusehen ist.

Das Befassen mit der Geschichte des Wärmeäquivalents ermöglicht Lernenden nicht nur tieferes Verständnis über den physikalischen Begriff der Wär-

me, es ermöglicht auch das tiefere Erfassen der Energieerhaltung und seiner Geschichte. Außerdem wird durch das modellhafte Nachstellen historischer Experimente die Leistung bedeutender Physiker deutlich, da man feststellt, dass selbst mit modernen Messmethoden oft nur ungenaue Ergebnisse erzielt werden.

3. Ausgewählte Schulexperimente zum Wärmeäquivalent

Die Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme wird in der Schule meist nur rein qualitativ be-



Abb. 1: Beim Bohren von Holz mit einem Steinbohrer kann man schon nach kurzer Zeit die Wärme an der Rauchentwicklung erkennen.

handelt. Dazu seien beispielsweise das Aneinanderreiben der Hände oder das Bohren in Holz (siehe Abbildung 1) genannt. Wie bereits erwähnt umfasst der Begriff des Wärmeäquivalents nicht nur den



Abb. 2: Durch das Bohren mit einer Bohrmaschine in Sand kann das Wärmeäquivalent auch quantitativ bestimmt werden.

qualitativen, sondern auch den quantitativen Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit, also der Umwandlung der beiden Größen ineinander. Im Folgenden sollen einige Schulexperimente vorgestellt werden, welche zunächst nur eine rein qualitative Beobachtung zulassen. Diese können jedoch so modifiziert werden, dass die Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme auch quantitativ erfasst werden kann.

³ Die Einheit Kilopondmeter (kpm) ist eine veraltete Einheit der Energie. 1 kpm entspricht der Energie, die nötig ist, um ein Kilopond einen Meter weit zu verrichten. Das Pond wiederum ist die eine veraltete Kraft einheit, wobei 1 Pond der Gewichtskraft eines Gramms im Schwerfeld der Erde entspricht.

In Anlehnung an das Experiment von Joule kann man Schülerinnen und Schülern den Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit durch die Erwärmung eines Mediums mittels eines Rührwerks verdeutlichen. Dazu spannt man einen Rühraufsatz eines Handmixers in eine Akkubohrmaschine und rührt damit in einem mit Sand gefüllten Becher⁴. Schon nach relativ kurzer Zeit lässt sich im Sand ein deutlicher Temperaturanstieg feststellen. Dieser Versuch ist in dieser Ausführung allerdings nicht für eine quantitative Auswertung geeignet. Diese erfordert ein paar Modifikationen des Versuchsaufbaus. Hierzu benötigt man statt eines Akkuschaubers eine elektrische Bohrmaschine mit Netzkabel, eine Sicherheitssteckdose und zwei Messgeräte (siehe Abbildung 2). Um die durch die Bohrmaschine verrichtete Arbeit zu ermitteln, misst man die Differenz der Leistungsaufnahme der Bohrmaschine, die sich als Produkt der gemessenen Stromstärke und Spannung ergibt. Diese muss dann noch um die Leistung im Leerlauf reduziert werden. Damit gilt für die verrichtete Arbeit:

$$W = \Delta P \cdot t = (P_{\text{Sand}} - P_{\text{Leerlauf}}) \cdot t \quad \{1\}.$$

Diese Arbeit müsste der dem System zugefügten Wärme entsprechen, wenn man davon ausgeht, dass die Leistungsaufnahme proportional zum Rührwiderstand ist. Damit gilt die Bilanzgleichung

$$Q = (m_{\text{Sand}}c_{\text{Sand}} + m_{\text{Rührer}}c_{\text{Rührer}})\Delta T \quad \{2\}.$$

Nach der Zeit $t = 30$ s lässt sich im Sand eine Temperaturerhöhung von $\Delta T = 5,1$ K feststellen. Bei einer Masse des Sandes von $m_{\text{Sand}} = 462$ g und der des Rührbesens⁵ von $m_{\text{Rührer}} = 59$ g ergibt sich eine zugefügte Wärme von $Q = 2115$ J.

Für die verrichtete Arbeit erhält man mit Gleichung {1}

$$W = (253 \text{ W} - 156 \text{ W}) \cdot 30 \text{ s} = 2910 \text{ W}.$$

Im Rahmen der Messgenauigkeit kann man sagen, dass die Wärme und die Arbeit ungefähr gleich groß sind.

In den Abbildungen 3 und 4 sind zwei weitere Experimente zum Wärmeäquivalent dargestellt. Die mechanische Arbeit beim Schlagen eines Hammers auf eine PET-Flasche (Abbildung 3) wird dabei in Wärme umgewandelt, was zu einem Temperaturanstieg der Luft in der Flasche führt. Diese Umwandlung lässt sich ebenfalls beim Hämmern auf ein Bleiplättchen feststellen. Die Temperaturerhöhung kann mit einem selbst gebautem Thermoelement⁶ erfasst werden, denn aufgrund des Seebeck-Effekts

entsteht durch die Erhöhung der Temperatur eine



Abb. 3: Das Draufhauen auf eine leere PET-Flasche führt zu einer messbaren Temperaturerhöhung der Luft in der Flasche.

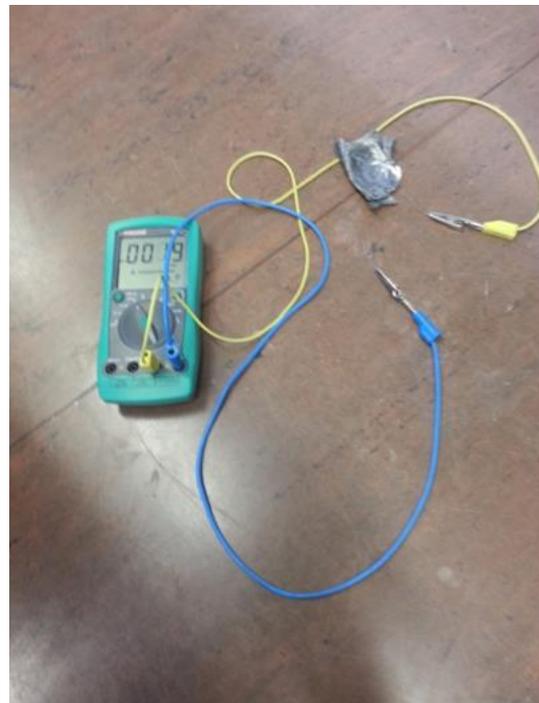


Abb. 4: Die Erwärmung eines behauenen Bleiplättchens kann mit einem selbstgebauten Thermoelement festgestellt werden.

Spannung, welche mit einem Voltmeter sichtbar gemacht werden kann (Abbildung 4).

Um die verrichtete Arbeit beim Schlagen mit dem Hammer und den Anstieg der Temperatur genauer zu quantifizieren, sind wiederum einige Modifikationen notwendig. Die Geschwindigkeit mit welcher der Hammer auf das Bleiplättchen trifft, lässt sich mit Hilfe von Lichtschranken und einer geeigneten Messwerterfassungssoftware, wie etwa CASSY, ermitteln (Abbildung 5). Ist die Masse des Hammers bekannt, so ergibt sich daraus die kinetische Energie der einzelnen Schläge, welche der Hammer beim

⁴ Mit Sand gelingt dieser Nachweis einfacher als mit Wasser, da die spezifische Wärmekapazität geringer ist.

⁵ Diese Masse entspricht dem Anteil des Rührers, der in den Sand eingetaucht ist.

⁶ Um ein Thermoelement zu bauen, wickelt man zwei Drähte unterschiedlicher Materialien an einem Ende umeinander. An den losen Enden kann die Spannung abgegriffen werden.

Aufprall auf das Blech besitzt. Die Summe dieser Energien entspricht der verrichteten Arbeit. Bei 16 Schlägen mit einem Hammer der Masse von 1 kg ergibt sich die geleistete Arbeit von ca. $W = 544 \text{ J}$ (siehe Tabelle 1). Sieht man von Energieverlusten,



Abb. 5: Versuchsaufbau zur quantitativen Bestimmung des Wärmeäquivalents mit einem Hammer.

wie etwa der Dissipation durch Schall, ab, so entspricht die verrichtete Arbeit der zugeführten Wärme

$$W = Q = m_{pb} \cdot c_{pb} \cdot (T_{pb2} - T_{pb1}) \quad \{3\}.$$

Um diese Wärme zu bestimmen, wird das Blech in ein mit Wasser gefülltes Kalorimeter gegeben und gewartet, bis diese im thermischen Gleichgewicht sind und sich eine Mischtemperatur T_m eingestellt hat. Das Blech gibt dabei Wärme an das Wasser und das Kalorimeter ab, sodass gilt:

$$Q = m_{pb} \cdot c_{pb} \cdot (T_M - T_{pb1}) + m_W \cdot c_W \cdot (T_M - T_{W2}) + C_G \cdot m_G \quad \{4\}$$

Das kalte Blech und das Wasser hatten eine Temperatur von $T_{pb1} = 293,05 \text{ K}$ bzw. $T_{W1} = 294,05 \text{ K}$. Mit der Mischtemperatur von $T_M = 294,35 \text{ K}$ und den restlichen Werten ergibt sich eine Wärme von ca. $Q = 373 \text{ J}$, was im Rahmen der Messgenauigkeit und den weiter nicht berücksichtigten Fehlern, wie der Erwärmung des Hammers und der Unterlage, ein zufriedenstellendes Ergebnis darstellt.

Weiterhin lohnt sich bei diesem Experiment das Ausprobieren verschiedener Materialien. So lässt sich je nach Materialeigenschaften mehr oder weniger Arbeit in Wärme umwandeln. Führt man denselben Versuch mit einem Eisennagel durch, wird der Anteil der Arbeit, der in Wärme umgewandelt wird, geringer, da mehr Energie in Form von Schall verloren geht und diese nicht in die Verformung des relativ starren Nagels eingeht und somit nicht als Wärme hinzugeführt wird [vgl.1].

Lernende lassen sich so gewinnbringend in die Diskussion über verschiedene Materialien und bei der Fehleranalyse einbringen.

Tab. 1: Messwerte zur Bestimmung des Wärmeäquivalents mit einem Hammer.

n	Δt [s]	v [ms^{-1}]	E_{kin} [J]
1	0,0095	4,76	12,49
2	0,0072	6,22	21,30
3	0,0065	6,90	26,24
4	0,0052	8,60	40,76
5	0,006	7,51	31,08
6	0,0057	7,91	34,49
7	0,0055	8,23	37,35
8	0,0053	8,56	40,37
9	0,0057	7,92	34,56
10	0,0062	7,23	28,84
11	0,0055	8,15	36,58
12	0,0052	8,72	41,91
13	0,0052	8,68	41,52
14	0,0051	8,91	43,74
15	0,0053	8,43	39,21
16	0,0058	7,80	33,50

4. Zusammenfassung

Der qualitative Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit kann recht einfach demonstriert werden. Schwieriger ist die Bestimmung des quantitativen Zusammenhangs. Die vorgestellten Experimente weisen einige Möglichkeiten auf, die auch im Unterricht umzusetzen wären. Sie erfordern experimentelles Geschick und eröffnen interessante Diskussionen um mögliche Fehlerquellen. Durch das Nachstellen solcher geschichtsträchtiger Versuche wird nicht nur die Leistung bedeutender Physiker gewürdigt, sondern auch ein tieferes Verständnis der zugrundeliegenden Begriffe ermöglicht.

5. Literatur

- [1] Krause, E. (2014): Möglichkeiten zur Behandlung des Wärmeäquivalents im Unterricht, MNU
- [2] Hund, F. (1972). Geschichte der physikalischen Begriffe. Mannheim: Bibliographisches Institut AG.
- [3] Heering, P. (2013): Historische Experimente in neuem Licht betrachtet. Teil 2: James Prescott Joules Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents. MNU 66, S. 132–136.
- [4] Schirra N. (1989). Die Entwicklung des Energiebegriffs und seines Erhaltungskonzepts. Dissertation an der Universität in Gießen.
- [5] Kuhn W. (2001). Ideengeschichte der Physik. Braunschweig: Vieweg Verlagsgesellschaft