

Das Energiekonzept

Einführung

Aus pädagogischer Sicht scheinen drei Aspekte wesentlich für das Unterrichten von Energie in der Sekundarstufe I zu sein: Energie als Konzept in Zusammenhang mit der Energieerhaltung; erneuerbare Energien und die Energieeffizienz. Das Ziel dieses historischen Hintergrunds ist es, eine Grundlage für Geschichten zu bilden, die individuell oder in Kombination mit anderen Geschichten genutzt werden können, und es Lehrkräften ermöglichen, sich auf diese drei Aspekte zu beziehen.

Der Historiker und Wissenschaftstheoretiker Thomas S. Kuhn betonte, dass man bis zu 12 Forscher identifizieren könne, die an der Etablierung des Prinzips der Energieerhaltung beteiligt gewesen seien. (Kuhn 1959) Einer dieser Forscher, James Prescott Joule, kann in dieser Liste neben Robert Mayer als eine der zentralen Figuren gesehen werden, da er derjenige war, der den experimentellen Beleg für die Existenz des mechanischen Wärmeäquivalent erbrachte; zumindest lauten so die üblichen wissenschaftshistorischen Darstellungen. Bei näherer Betrachtung wird allerdings deutlich, dass nicht Joule allein dafür verantwortlich war, sondern auch William Thompson, der später als Lord Kelvin bekannt wurde. Joule selbst bezog sich auch auf die Arbeit anderer Forscher, insbesondere die von Benjamin Thompson, Count Rumford, der im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert Experimente über Wärme durchführte. Im Gegensatz zu Joule hatten diese Männer allerdings ein pragmatisches Interesse an Energie.

Die erste bedeutungsvolle Untersuchung im Bereich der regenerativen Energien ist in den Arbeiten des französischen Lehrers Augustin Mouchot zu finden, der in den 1870ern wichtige Forschungen über die Nutzung von Solarenergie für industrielle Maschinen betrieb.

Count Rumford und seine Arbeit über Wärme

Rumfords Arbeit über die Wärme deckt einen großen Forschungsbereich ab, da er etwa 25 Jahre an diesem Thema gearbeitet hatte. Seine ersten Forschungen über Wärme stellte er in militärischem Zusammenhang an: Er untersuchte

die Eigenschaften von Schießpulver (Thompson 1781). Rumford hängt sowohl Kanonen als auch ein Pendel (sog. ballistisches Pendel) freischwingend auf. Die durch das Zünden des Pulvers entstehende Schwingungsamplitude diente als Indiz für dessen Qualität.

Fig. 12.

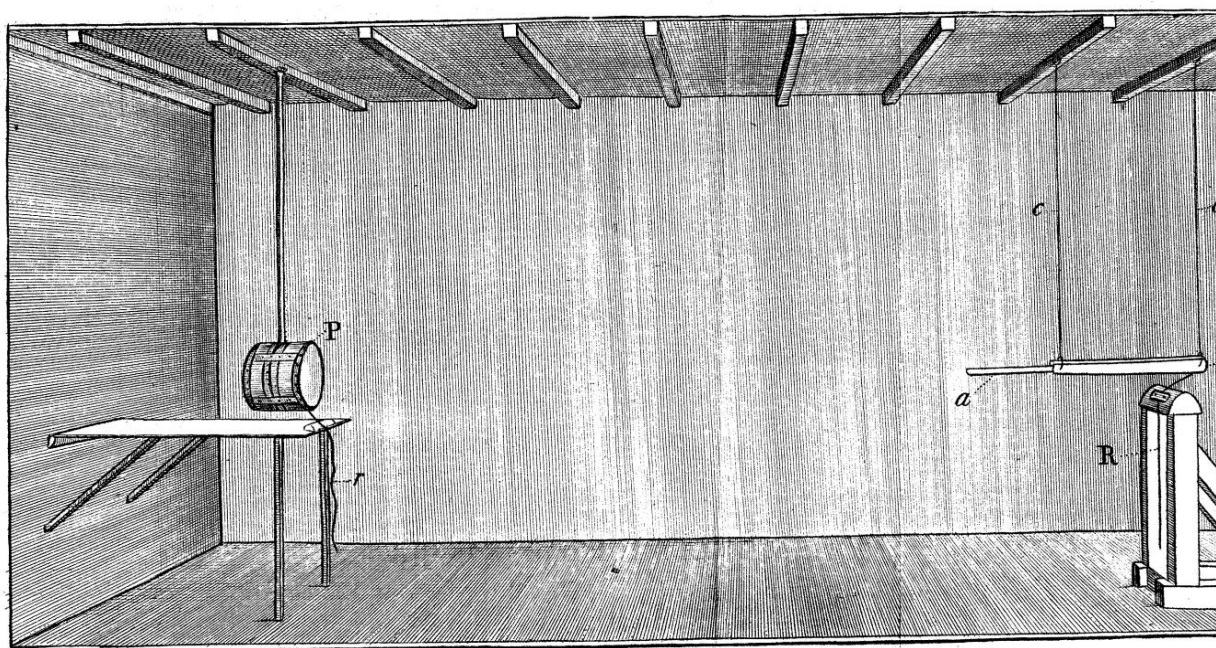


Abbildung 1 Rumfords Experiment zur Überprüfung von Schießpulverqualität (Thompson 1781)

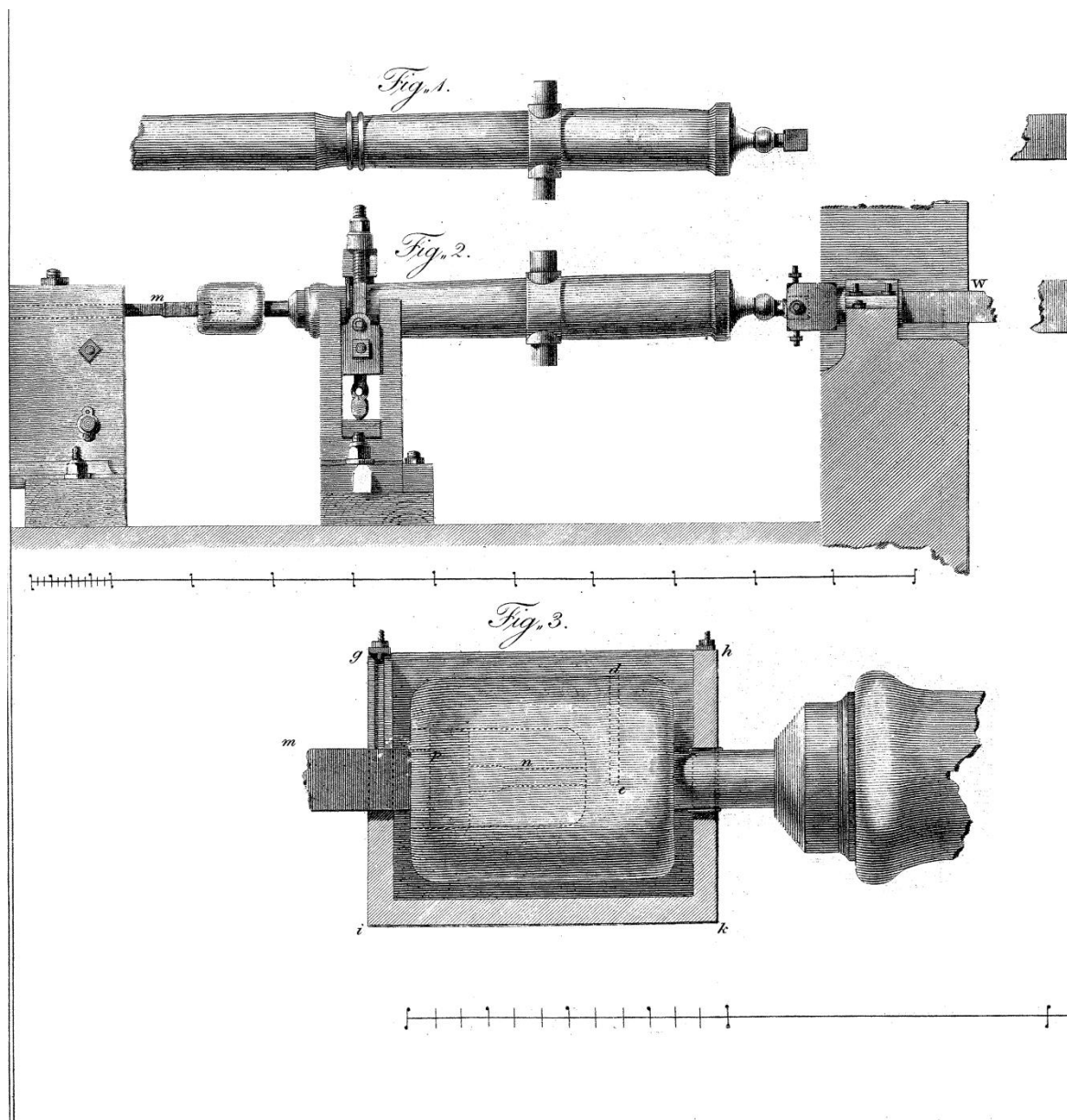


Abbildung 2 Rumfords Kanonenbohr-Experiment (Thompson 1781)

Während die anfänglichen Forschungsarbeiten im Hinblick auf die hier zu diskutierenden Arbeiten zum Themenfeld Energie nicht besonders wichtig waren, so war doch ein Detail von größerer Bedeutung: Rumford beobachtete, dass die Kanone sich geringer beim Abschießen einer Kugel erhitzte, als durch eine Zündung des Pulvers ohne Geschoss. Dies war zumindest erstaunlich, da nach seinem Verständnis die Pulverdämpfe durch die Kugel länger in der Kanone blieben und somit mehr Zeit für den Wärmeübertrag zur Verfügung gestanden hätte.

In München, wo Rumford für die Waffenherstellung verantwortlich war, machte er eine weitere Entdeckung: Beim Ausbohren der Kanonen erhitzte sich das Metall. Für dieses Experiment verwendete Rumford einen stumpfen Bohrer, um die Erzeugung von Wärme zu erhöhen. Dabei

schaffte er es sogar, eine Wassermenge von 26,58 lb, was etwa 12 l entspricht, die ursprünglich für die Kühlung des Experiments vorgesehen war, zum Kochen zu bringen.

Zur gleichen Zeit demonstrierte Rumford, dass sich die Wärmekapazität von Metallspänen, die bei Bohrarbeiten entstanden, nicht änderte. Aus diesem Experiment schloss er, dass nahezu unbegrenzte Mengen an Wärme mithilfe von mechanischer Arbeit erzeugt werden konnten. Da aber die Herstellung von Materialien nicht mit dem damals akzeptierten Verständnis übereinstimmte, musste er daraus schlussfolgern, dass Wärme nicht ein Stoff sei, sondern eher durch die Bewegung der kleinsten Teilchen der Materie beschrieben werden konnte.

Diese Überzeugung stand im Gegensatz zur akzeptierten Lehre von Lavoisier in Bezug auf die

Wärme. 1789 veröffentlichte der französische Chemiker Antoine Laurent Lavoisier sein berühmtes *Traité Élémentaire de Chimie*. Sowohl in dieser Monographie als auch in vielzähligen anderen Dokumenten nutzte er den Begriff Kalorik. Für Lavoisier war die Kalorik eine der einfachen Substanzen, die zum Naturreich gehörten, und konnte als Grundbestandteil aller Körper in Betracht gezogen werden. Diese Substanz wurde als gewichtslos beschrieben und könnte somit zu den Imponderabilien zählen. Andere Imponderabilien waren das Licht (*lumic* nach Lavoisier) und ein oder zwei elektrische und magnetische Fluida. Kalorik wurde zur Erklärung der Phänomene, die man der Wärme zuschrieb. Einige Eigenschaften der Kalorik hatten Ähnlichkeiten mit der älteren Substanz Phlogiston, obwohl es nennenswerte Unterschiede zwischen Lavoisiers System und dem von Becher und Stahl gab. Außerdem spielten die Merkmale der Kalorik auch eine Rolle in der Namensgebung jenes Instruments, das die Messung der Wärmemenge ermöglichte, das (Eis-)Kalorimeter.

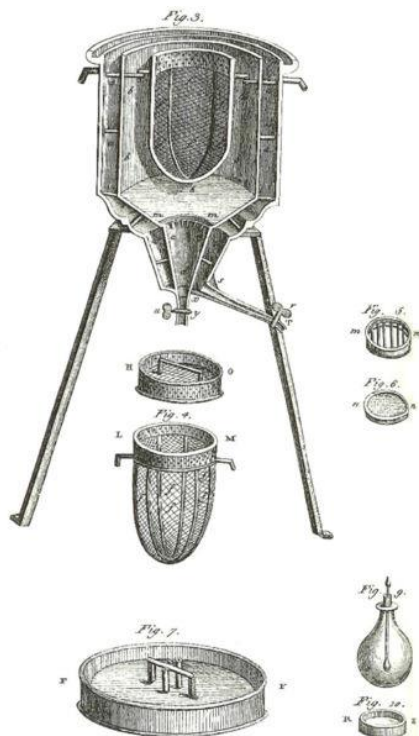


Fig 3 Eiskalorimeter von Lavoisier und Laplace (Lavoisier 1789), <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Ice-calorimeter.jpg>

Für die Diskussion von Rumfords Arbeit bezüglich der Energieerhaltung lag die Bedeutung von Lavoisiers Arbeit nicht darin, dass man dessen System als akzeptierte Theorie anerkannte. Tatsächlich hatte Rumfords Arbeit zur keiner wesentlichen Veränderung dieser Auffassung beigetragen. Im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts hatte man die Wärme für Materie gehalten und die

meisten Forscher identifizierten sie mit Lavoisiers Kalorik. Der Schwerpunkt von Rumfords Arbeit lag viel mehr bei der postulierten Unzerstörbarkeit der Elemente. Da Kalorik zu Lavoisiers Elementen zählte (zwar imponderabel, dennoch in seinem System aufgelistet, wie Sauerstoff oder Eisen) war es offensichtlich, dass diese Substanz weder zerstört noch erzeugt werden konnte. Folglich wurde die Idee der Erhaltung in der Wärmetheorie etabliert.

Während man Rumfords Kanonen-Bohr-Experiment in direkter Beziehung zur Etablierung der Wärmetheorie betrachten kann, sind auch zwei weitere seiner Forschungsprojekte von Bedeutung für den Gesamtkontext. Er analysierte zum einen die Strahlungswärme. Diese wurde zum Hauptthema der Naturphilosophie, als William Herschel (der fernab seiner eigentlichen Arbeit bekannt für die Entdeckung des Uranus ist) nach einer Reihe von Messungen zu dem Ergebnis kam, dass die Strahlung der Sonne nicht nur aus Licht, sondern auch aus Wärmestrahlung bestand, welche ihre höchste Intensität außerhalb des roten Spektrum erreichte.

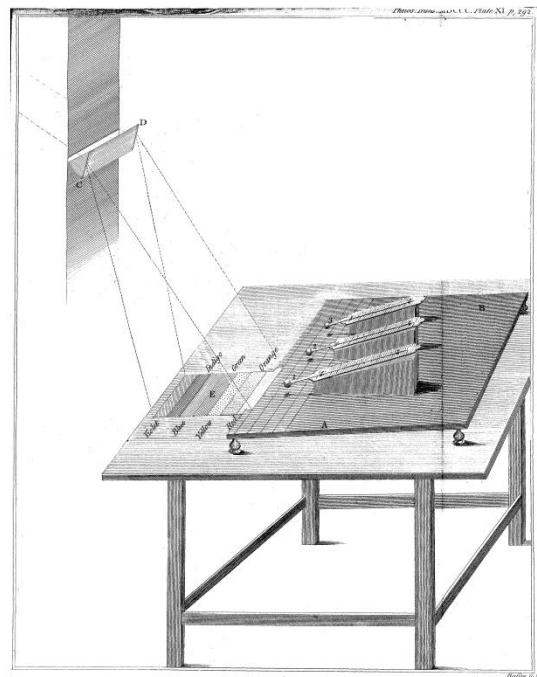


Fig 4 Herschels experimentelle Anordnung bei der Entdeckung der Infrarotstrahlung, Herschel 1800

Diese „neuen Strahlen“ wurden zum Schwerpunkt von Untersuchungen zahlreicher Forscher, insbesondere von John Leslie, der 1804 eine Monographie veröffentlichte, in der er sich mit dieser Angelegenheit auseinandersetzt. Interessanterweise veröffentlichte auch Rumford 1804 eine Untersuchung, in der er die Fähigkeit diverser Materialien, Strahlungswärme abzugeben, analy-

sierte.¹ Während diese Nachforschung als fundamentale Untersuchung angesehen werden könnte, sind außerdem Aspekte der Verwendbarkeit enthalten: Die Nachforschung war relevant für die Verbesserung der Effizienz von Öfen. Diese Angelegenheit stand Jahrzehnte lang im Mittelpunkt von Rumfords Forschung.

Rumford entwickelte eine Apparatur, die er Thermoskop nannte. Sie besteht aus einem Glasröhrchen in U-Form mit jeweils einer Hohlkugel an den Enden. Diese Kugeln sind aus sehr dünnem Glas gefertigt und außerdem geschwärzt, was dazu führt, dass das Glas die Strahlungswärme absorbiert. Aufgrund der Dünne des Glases, wird die Wärme schnell an die Luft im Inneren der Kugeln weitergeleitet. Da das Glasröhrchen geschlossen ist, erhöht sich der Druck mit dem Temperaturanstieg. Infolgedessen steigt der Druck in Beziehung zur absorbierten Strahlungswärme.

In der Mitte des horizontalen Bereichs des Glasröhrchens ist ein eingefärbtes Alkoholtröpfchen platziert. Ist der Druck auf beiden Seiten unterschiedlich, so bewegt sich der Tropfen zu der Seite mit niedrigerem Druck. Folglich wird Gas mit weniger Druck komprimiert, während sich das Gas mit hohem Druck so lange ausdehnt, bis auf beiden Seiten der gleiche Druck erreicht ist. Zwischen den beiden Kugeln ist eine Kupferplatte befestigt, weshalb eine Wärmequelle, die geometrisch zwischen den Kugeln angeordnet ist, nur auf eine der beiden eine Auswirkung hat.

Das Thermoskop ist auf einem Holzrahmen befestigt. Auf beiden Seiten können Wärmequellen (Metallkannen mit heißem Wasser gefüllt) platziert werden; die Entfernung zum Thermoskop ist dabei veränderbar. Zu Beginn jedes Experiments werden beide Wärmequellen in gleichem Abstand platziert. Aufgrund der Absorption der Strahlungswärme und dem daraus resultierenden Druckunterschied, beginnt der Alkoholtröpfchen sich zu bewegen. Der Experimentator erhöht nun den Abstand zwischen der stärkeren Wärmequelle und dem Thermoskop bis sich der Alkoholtröpfchen wieder in seinem ursprünglichen Gleichgewichtszustand befindet. Vergleicht man die Abstände beider Quellen, so dienen diese als Indikator für die Menge der Emission von Strahlungswärme. Rumford nahm als selbstverständlich an, dass die von der Quelle abgegebene Wärme mit dem Quadratabstand abnimmt. Diese Beziehung zwischen der Abnahme der Lichtintensität und der Strecke wurde bereits vom Schweizer Mathematiker

Johann Heinrich Lambert bewiesen. Mit jener Arbeit machte sich Rumford bereits durch seine eigene Arbeit über die Lichtmessung vertraut. Lamberts Beobachtungen über die Strahlungswärme schienen plausibel, da auch die isotrope

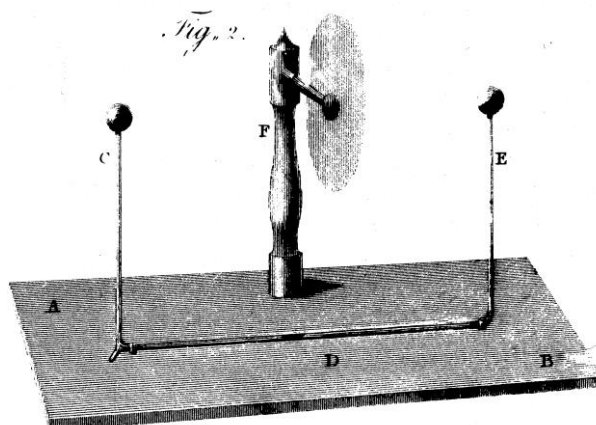


Fig 3 Rumfords Thermoskop, Thompson 1804

Strahlung, welche der Wärmestrahlung sehr ähnlich ist, mit dem Quadratabstand abnimmt.

Allerdings waren Rumfords Bemühungen zu Effizienzverbesserungen nicht auf Strahlungswärme und Öfen begrenzt. Weiterhin befasste er sich mit der Analyse von Isolationseigenschaften verschiedener Materialien. Diese Untersuchung wurde ebenfalls zu seiner Zeit als Kriegsminister in Bayern durchgeführt. Sein Ziel war es, die Basis für das am besten passende Material für die Uniformen der bayrischen Soldaten zu bestimmen, die sowohl im Winter als auch im Sommer nutzbar sein sollten. Wie auch im Experiment zur Strahlungswärme, nutzte Rumford hier mit heißem Wasser gefüllte Metallkannen als Wärmequellen. Diese umhüllte er mit verschiedenen Bekleidungsstoffen und beobachtete die sinkenden Wassertemperaturen. So konnte er schließlich die wirksamste Methode, den menschlichen Körper zu wärmen, bestimmen.

Zusammenfassend können Rumfords Experimente im Nachhinein als Beginn von diversen Entwicklungen in der Energiewissenschaft bezüglich der Formulierung des Prinzips der Energieerhaltung und auch in dem Bereich, den wir heute als Energieeffizienz bezeichnen, angesehen werden, insbesondere in Bezug auf seiner Untersuchungen verschiedener Materialien.

Formulierung des Prinzips der Energieerhaltung

Joule begann seine Nachforschungen mit der Analyse elektrischer Motoren.² Diesbezüglich gab es eine direkte Verbindung zur Arbeit in der

¹ Vergl. Leslie (1804) und Rumford (1804). Eine Diskussion dieser Untersuchungen findet sich bei Olson (1970).

² Zur Entwicklung früher Elektromotoren siehe Schiffer (2008)

Brauerei seines Vaters. Damals nutzte man Dampfmaschinen, doch nach der Entwicklung des elektrischen Motors schien dieser das größere Potential zu bieten. Infolgedessen bestand Joules Ziel wohl darin, einen sparsamen elektromagnetischen Motor einzusetzen. Dies lässt sich aus dem Folgenden sehen: „Ich kann kaum bezweifeln, dass der Elektromagnetismus schlussendlich den Dampf für den Antrieb von Maschinen ersetzen wird. ... Die Ersparnis [eines Motors] wird im direkten Verhältnis zur Quantität der Elektrizität stehen, und die Kosten, um den Motor in Gang zu setzen, können vielleicht ad infinitum/dauerhaft gesenkt werden“ (Joule 1884, S. 14, Übers. V.S.). Diese Vorstellung von einem „ökonomischen perpetuum mobile“ ist nicht nur in Joules Schriften zu finden, denn auch viele Wissenschaftler teilten zur damaligen Zeit seine Meinung.³ Joule kam schlussendlich, wie auch andere Wissenschaftler, zu dem Ergebnis, dass das im galvanischen Bauteil umgesetzte Zink deutlich teuer ist, als die für die Dampfmaschinen benötigte Kohle, wenn beide Geräte eine vergleichbare Arbeit (nicht unbedingt im physikalischen Sinne) leisten.

In den folgenden Jahren gehörte es zu Joules Hauptbeschäftigung, die Erzeugung von Wärme zu erforschen, zum einen mithilfe von galvanischer Elektrizität in Batterien und zum anderen bei der chemischen Verbrennung. Diese Untersuchungen waren dabei quantitativer Natur. Nachdem er sie abgeschlossen hatte, wandte Joule sich einem neuen Thema zu. 1843 präsentierte Joule bei der Versammlung der British Association for the Advancement of Science eine Arbeit, die ihm später hohes Ansehen brachte. Joule beschrieb das neue Thema seiner Nachforschungen so, dass er, „nachgewiesen hatte, dass Wärme von elektromagnetischen Maschinen erzeugt wird, und dass wir anhand des induktiven Stroms von Magnetismus die Wärme aufgrund von chemischen Veränderungen verringern oder erhöhen können, wie es uns gefällt, dies zum großen Interesse daran führte, herauszufinden, ob zwischen dem oben genannten und der mechanischen Energie, die entweder verloren geht oder gewonnen wird, ein konstantes Verhältnis existiert“ (Joule 1884, Übers. V.S.). Joule führte neue Experimente aus, um die Existenz eines mechanischen Wärmeäquivalents zu demonstrieren und dessen numerischen Wert zu bestimmen. In einer ersten Serie von Experimenten kam er auf einen Koeffizienten von

838 ft-lb/BTU; in einer zweiten Serie, die im gleichen Artikel veröffentlicht wurde, bestimmte er einen Wert von 770 ft-lb/BTU.

Betrachtet man Joules veröffentlichte Daten näher, so bringen diese Erkenntnis über seinen theoretischen Hintergrund. Die Werte, die er in seinem Artikel, basierend auf seinen Daten berechnet sehen wie folgt aus (in ft-lb/BTU):

896; 1001; 1040; 910; 1026; 587; 742 (Mittelwerte aus von Experimenten); 860 (Mittelwert von zwei Experimenten); 770. Die beiden fett gedruckten Daten stammen aus zwei Experimenten, die „exakt in der gleichen Art und Weise durchgeführt wurden“ (Joule 1884, Übers. V.S.). Es erscheint aus heutiger Sicht gewagt, diese Daten als Beweis für die Existenz irgendeines Gegenwerts zu nutzen; mit anderen Worten, Joule musste an die Existenz eines mechanischen Wärmeäquivalents glauben, um dieses Ergebnis aus seinen Daten formulieren zu können. Die Daten könnten auch als Indikator dafür interpretiert werden, dass die Wärmemenge, die durch dieselbe mechanische Arbeit produziert wurde, erheblich variiert, was auf einen unbekanntem oder zumindest unklaren Parameter zurückzuführen wäre. Joule kam jedoch zu dem Ergebnis, dass ein mechanisches Wärmeäquivalent existiere und dass die Abweichungen seiner Daten durch die begrenzte Genauigkeit des Ablesens der Messergebnisse verursacht wurde: „Ich gebe zu, dass zwischen einigen Ergebnissen eine nennenswerte Abweichung herrscht, ich denke allerdings nicht, dass diese größer sind, als die angemessen angenommenen Fehler“ (Joule 1884, Übers. V.S.).

Obwohl Joule die Abweichungen seiner Daten einsah, behauptete er dennoch, das mechanische Wärmeäquivalent nachgewiesen zu haben. Daher erscheint es plausibel, dass er nicht aufgrund seiner Experimente an die Existenz des Äquivalents glaubte, sondern andere Gründe dafür hatte. Gegen Ende seiner Forschung an diesem Thema, gab Joule selbst einen Einblick in die Gründe, indem er verkündete, dass er „befriedigt [war], dass die großen Kräfte der Natur, die der Schöpfer eingerichtet hat, unzerstörbar sind; und egal welche mechanische Kraft man aufwendet, es bleibt immer ein exaktes Wärmeäquivalent erhalten“ (Joule 1884, Übers. V.S.). Diese Aussage ist ein Indiz für Joules Vorstellungen über den theoretischen Hintergrund, als er versuchte, das mechanische Wärmeäquivalent zu ermitteln. Diese waren allerdings nicht kompatibel mit seiner Naturauffassung, dass alles erschaffen oder zerstört werden könnte. Er hatte einen Gedanken über die Erhaltung begrifflich gemacht, der es unmöglich machte auch nur irgendeine Ausnahme zu akzeptieren. Trotzdem

³ Dies sollte nicht mit einem wissenschaftlichen Perpetuum Mobile verwechselt werden, wie dies z.B. Breger tut: „Obviously Joule has no principal objection to a perpetuum mobile at this time; obviously he thinks that an inexhaustible source of power is practicable“ (Breger 1982, p.194).

schien es einige Ausnahmen zu geben, beispielsweise die Erzeugung von Wärme durch einen elektromagnetischen Motor. Daher hielt er es für nötig, ein neues Konzept zu entwickeln, die Idee der äquivalenten Umwandlung der, wie er sie nannte, großen Kräfte der Natur. Diese Idee der äquivalenten Umwandlung ist einer der großen konzeptionellen Schritte, der nötig war, um von dem Prinzip der Wärmeerhaltung nach Lavoisier (Kalorik) zum Prinzip der Energieerhaltung zu kommen.

Die naturwissenschaftliche Welt hatte der Untersuchung, die Joule 1843 präsentierte, kaum Beachtung geschenkt. In den nachfolgenden Jahren stellte Joule diverse weitere Arbeiten vor, in denen er seine zahlreichen Experimente beschrieb, mithilfe derer er den Wert des mechanischen Wärmeäquivalents mit einer zunehmenden Genauigkeit bestimmt hatte. Zwei dieser Dokumente sind aus ganz unterschiedlichen Gründen nennenswert. Eines der beiden, das den Titel „On the Mechanical Equivalent of Heat“ trägt, wurde 1850 in den Transactions veröffentlicht. In diesem Dokument beschrieb Joule detailliert seine berühmten Experimente mit dem Schaufelradexperiment. Es beinhaltet nicht bloß seine Versuchsdaten und die Berechnung des mechanischen Äquivalents, sondern außerdem eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus. Des Weiteren beschrieb er seine Experimente über die innere Reibung von Quecksilber und Gusseisen. In gewisser Hinsicht kann die Publikation dieser Arbeit in den renommierten Philosophical Transactions of the Royal Society of London als wichtiger Indikator für die Akzeptanz von Joules Arbeit unter britischen Wissenschaftlern angesehen werden.

Joule stellte seinen anderen wichtigen Artikel beim all-jährlichen Treffen der British Society vor. Sein Biograph D. Cardwell betonte: „Joule glaubte, sein Dokument wäre ohne weitere Beachtung vorüber gegangen, wenn nicht ein junger Mann im Hintergrund des Saals aufgestanden wäre und mit Nachdruck Fragen gestellt hätte, die ein lebhaftes Interesse an der Arbeit weckten“ (Cardwell 1989, Übers. V.S.). Dieser junge Mann war William Thomson, später bekannt als Lord Kelvin. Er war einer der ersten bedeutsamen und einflussreichen Wissenschaftler, der sich für Joules Ergebnisse interessierten. Obwohl er zu Beginn nicht Joules Meinung teilte, ließ er sich später davon überzeugen und unterstützte nicht nur Joules Theorie, sondern begann auch mit ihm erfolgreich zusammen zu arbeiten.

Thomson, der zumindest teilweise in Frankreich ausgebildet wurde und mit der Arbeit von Victor Regnault und Sadi Carnot vertraut war, sah

Joules experimentelle Behauptungen eher skeptisch. Carnot hatte demonstriert, dass die Leistung einer Dampfmaschine vom Temperaturunterschied abhängt, daher war diese Arbeit nicht gleichbedeutend mit einer spezifischen Wärmemenge. Erst mit der Entwicklung des Energiekonzepts und der Energieentwertung (im Sinne der Entropie) widersprachen sich Joules und Carnots Ergebnisse nicht weiter. In gewisser Hinsicht hat der zunächst vorhandene Widerspruch gemeinsam mit der wachsenden Akzeptanz des Energiekonzepts die Entwicklung angestoßen. Erst bei der Zusammenarbeit konnte Thomson sich überzeugen lassen, dass Joules Ergebnisse korrekt und wichtig waren, woraufhin er Joule gegenüber anderen Wissenschaftlern unterstützte.

Diese Anerkennung ist von Bedeutung für die Akzeptanz von Joules Arbeiten in der britischen scientific community. Das ursprüngliche Ignorieren von Joules Entdeckungen könnte zum einen damit erklärt werden, dass Joule der Besitzer einer Brauerei in Manchester war. Jedoch stellte sich genau diese Brauerei als entscheidend für seine experimentellen Hilfsmittel (die später erörtert werden) heraus, allerdings verringerte dies seinen sozialen Status als Forscher. Er war kein ausgebildeter Wissenschaftler, sondern eher ein „Gentleman, der sich mit Wissenschaft beschäftigte“, ohne jegliches wissenschaftliches Ansehen oder eine akademische Position. Während dies im 18. und frühen 19. Jahrhundert gängig war, änderte sich die Situation bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Die Naturwissenschaften wurden in Großbritannien mehr und mehr professionalisiert. Ein Teil davon war die daraus resultierende Unzugänglichkeit der Naturwissenschaften für Laien. Es gab natürlich Ausnahmen, besonders nennenswert ist hier bei Michael Faraday; dennoch war Joules sozialer Status gewiss ein Thema, als er damit begann, Artikel über das mechanische Wärmeäquivalent zu veröffentlichen. Auf der anderen Seite stand William Thomson, ein gut ausgebildeter Wissenschaftler, junger Professor an der Universität in Glasgow und trotz seines Alters bereits gut in der wissenschaftlichen Gesellschaft integriert. Somit war es nicht bloß der individuelle Thomson selbst, der Joules Arbeiten unterstützte, sondern auch der professionelle Wissenschaftler, der zur Anerkennung der Arbeiten Joules beitrug.

Interessant an Joules Arbeit sind allerdings nicht die Dinge, welche seinen sozialen Status betreffen, sondern seine bemerkenswerten Experimente, wie beispielsweise die Untersuchungen mithilfe des Schaufelradapparates. Abbildung 7 zeigt eine perspektivische Ansicht des Aufbaus

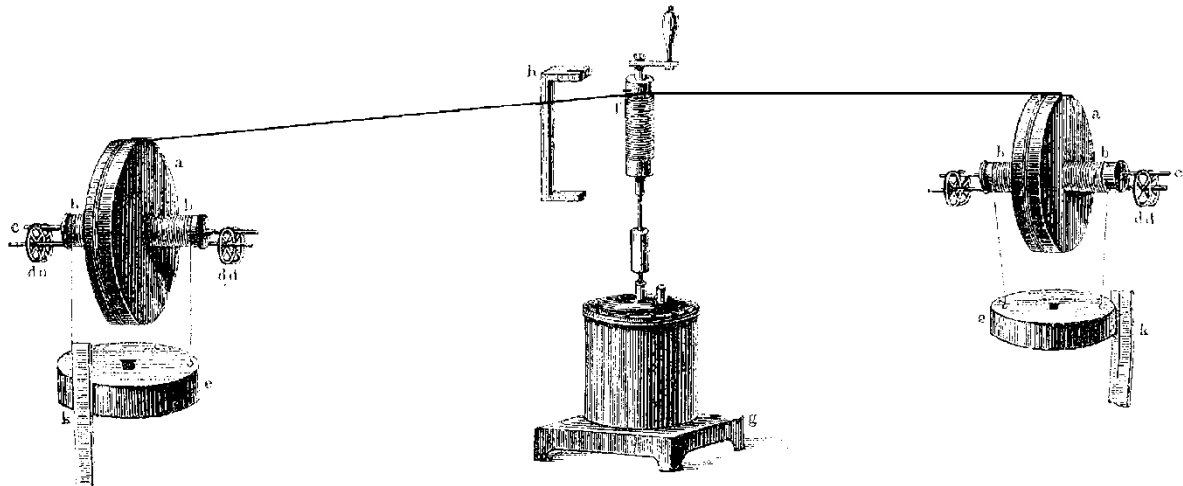


Fig 4 Joules Schaufelradapparatur, Joule 1872

aus Joules Artikeln; aa sind Holzscheiben, 1 Fuß im Durchmesser und 2 inches dick, mit Holzrollen daran, bb, bb, 2 inches Durchmesser, und Stahlachsen, cc, cc, mit $\frac{1}{4}$ inch Durchmesser. Die Scheiben wurden exakt ausgewuchtet und sind vollkommen gleich. Die Achsen wurden von auf Metallrädern dddd, dddd gelagert, deren Achsen in Messingplatten liefen, die wiederum an einem stabilen Holztisch, der an der Kellerwand befestigt war, angebracht waren. Die Gewichte e, e, hingen an einem Seil von den Rollen bb, bb, herab und feiner Bindfaden, der an den Scheiben aa angebracht war, verband diese mit der Hauptrolle f, die mithilfe einer Nadel leicht an der Achse der Schaufelradapparatur angebracht oder von ihr entfernt werden konnte. Diese Apparatur wird in Abbildung 8 (links) vertikal und in Abbildung 8 (rechts) horizontal dargestellt. Sie bestand aus einem Messingschaufelrad, das mit 8 Sätzen mit jeweils 4 drehbaren Armen und 4 Sätzen mit jeweils 4 feststehenden Schaufeln versehen war. Die Blechachse arbeitete ungehindert und war bei d geteilt, um in diesem Bereich jegliche Wärmeleitung zu vermeiden. Das Schaufelrad war fest in einem Kupferkessel angebracht, mit zwei Löchern im Deckel, eines für das Einsetzen der Achse und eines, um ein Thermometer einführen zu können. Während der Durchführung des Experiments wurde eine große Holzwand am Tisch befestigt, um jegliche Auswirkungen der Wärme-strahlung die vom Experimentator ausgehen könnte fernzuhalten.

Zu Beginn des Experiments ist der Kessel mit Wasser gefüllt. Man benötigt etwa 6l, um ihn vollständig zu füllen. Wenn die Wärme gleichmäßig verteilt ist, werden die Temperatur des Wassers und die des Raumes gemessen, und das Thermometer wird aus dem Kessel entfernt. Anschließend werden Gewichte von insgesamt 26 kg gut einen

Meter hoch-gezogen und wieder herabgelassen, wobei sie das Schaufelrad antreiben, das das Wasser durchmischt. Diese Prozedur wird zwanzig Mal wiederholt, was etwa 35 Minuten dauert. Joules Werten zufolge kann am Ende eine Erhöhung der Wasser-temperatur um etwa $0,5^{\circ}\text{C}$ gemessen werden.

Eine Analyse dieses Experiments deckt einige Details auf, die erwähnenswert sind und zeigen, dass Joule in einer außergewöhnlichen Lage war. Es war ihm möglich einige der am besten ausgebildeten Instrumentenmacher, die in einer Industriestadt wie Manchester verfügbar waren, zu beschäftigen. Der Instrumentbauer – John Benjamin Dancer – war überaus kompetent und konnte besonders sensible Thermometer bauen, die folgendermaßen in der Literatur beschrieben werden: „Die zwei Thermometer, die er [Joule] 1844 erworben hatte, waren, wie er behauptete, die ersten exakt geeichten Thermometer in Großbritannien ...“ (Cardwell 1989, 234, Übers. V.S.). Das Thermometer, das genutzt wurde, um die Temperatur des Wassers zu bestimmen, hatte eine Länge von 87cm und einen Messbereich vom Gefrierpunkt bis etwa 85°F (Ashworth 1930). Joule schrieb, dass „[die] ständige Übung mir ermöglichte, mit dem bloßen Auge $1/20$ eines Bereichs abzulesen, woraus sich eine akzeptable Temperatur von $1/200$ eines Grads Fahrenheit ergab“ (Joule 1884, 303, Übers. V.S.). Bei so einem Grad der Genauigkeit ist Wasser sehr weit davon entfernt, eine konstante Temperatur zu haben, was den Vorgang der genauen Temperaturbestimmung schwierig macht. Anstatt zu warten, bis die Quecksilbersäule zum Stillstand kam, um dann die Temperatur abzulesen, musste Joule andere Bestimmungsmittel finden bis Thermometer und Wasser im Wärmegleichgewicht waren. Sibum konnte zeigen, dass die Temperaturmessung zur

Brauerkultur gehörte. Joule besaß daher die entsprechenden Kompetenzen, um Messungen durchführen zu können.

Es gibt noch andere Aspekte, die ein Indiz dafür sind, dass dieses Experiment auf die Brauerkultur zurückzuführen ist: Joule nutzte einen Kupferkessel ohne jegliche Isolation, obwohl der Raum keine Auswirkungen auf den Wärmezustand des Wassers haben sollte. Dies erscheint einem eher ungewöhnlich, insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass Joule tatsächlich eine Holzwand nutzte, um den Kessel vor der Wärmestrahlung des Körpers des Experimentators zu schützen. Der Kupferkessel ist eine Vorrichtung, die man normalerweise für das Brauen von Bier nutzt und Joule war sehr gut darin, die thermischen Bedingungen eines solchen Kessels zu kontrollieren. Mit einem gedämmten Kessel (den man eigentlich nicht perfekt isolieren kann) war Joule nicht vertraut.

Des Weiteren gab es materielle Aspekte in der Manchester Brauerei, die es Joule ermöglichten, seine Experimente erfolgreich durchzuführen. Er benötigte einen Raum mit einer großen Wärmekapazität; andernfalls würde die Wärme, die ein Mensch während des Hochziehens der Gewichte erzeugt, die Raumtemperatur beeinflussen und somit auch erheblich die experimentellen Ergebnisse. So ein Raum existierte in der Brauerei; es war der Keller, in dem das Bier gelagert wurde. Dieser hat eine große Wärmekapazität und folglich eine beinahe einheitliche Temperatur. Seine physikalischen Gegebenheiten machten diesen Raum ideal für die Erzeugung von verlässlichen Daten. Zusätzlich ist zu sagen, dass Joule einen Brauereimitarbeiter dafür einsetzen konnte, die Gewichte hochzuziehen. Dies setzte wichtige Fähigkeiten voraus, da die Gewichte schwer waren, und diese Person musste die Arbeit schnell und

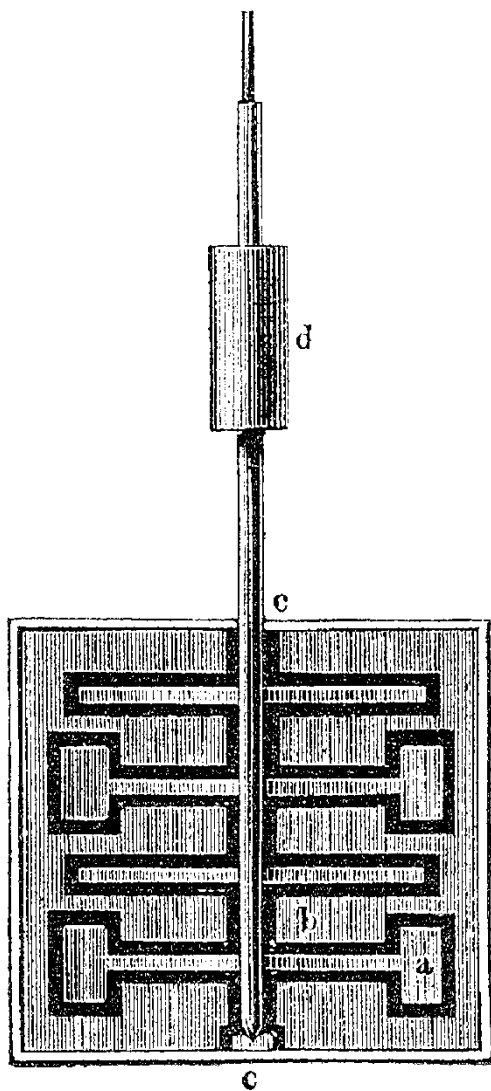


Fig 8 Joules Schaufelrad, Längsschnitt, aus Joule 1872

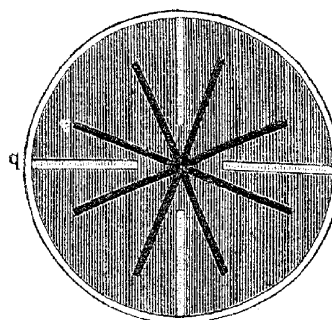


Fig 9: Joules Schaufelrad, Querschnitt, aus Joule 1872

kontrolliert ausführen. Joule selbst war hingegen nicht in der körperlichen Verfassung, um diese Arbeit auszuüben; darüber hinaus war er ein Gentleman und jene Art von Arbeit auszuüben ließ sich nicht mit seinem sozialen Status vereinbaren.⁴

Der Beginn der Nachforschung über erneuerbare Energien

In der Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte sich die Industrialisierung in hohem Tempo weiter. Eine Randbedingung war die Kohleversorgung für die Dampfmaschinen, die die Hauptenergiequelle in den Fabriken darstellten. In Frankreich stellte dies ein großes Problem dar, da die nationalen Kohlevorkommen weitgehend aus-

⁴ In ähnlicher Weise erwähnt Joule die Person nicht, die die körperliche Arbeit bei der Durchführung derjenigen Experimente erbringt, die zum heute so genannten Joule-Thomson-Effekt führen. (Vergl. Sichau 2000) .

geschöpft waren; darüber hinaus konnten die möglichen Importe nur aus England kommen – dem traditionellen (wirtschaftlichen) Rivalen von Frankreich. Infolgedessen versprach die französische Regierung finanzielle Unterstützung für alle Forscher, die viel versprechende Konzepte vorstellten, um Frankreichs Abhängigkeit von der englischen Kohle zu verringern.

Dies war der Moment, als der französische Sekundarschullehrer Augustin Mouchot die Bühne betrat. Mouchot kombinierte zwei Geräte, die bereits bekannt waren: ein geschwärtzter hohler Zylinder, der Wasser beinhaltet – eine ähnliche Vorrichtung hatte schon Horace Benedict de Saussure gegen Ende des 18. Jahrhunderts genutzt, um Experimente über Wärmestrahlung zu machen – und ein Hohlspiegel, um Sonnenstrahlen auf den Zylinder zu konzentrieren. Bereits 1861 konnte Mouchot mit seinem Gerät Dampf erzeugen. In den nachfolgenden Jahren beabsichtigte er, seine Apparatur zu verbessern, um sie für technische Zwecke brauchbar zu machen. Diese Unternehmungen wurden von der französischen Regierung finanziell unterstützt.

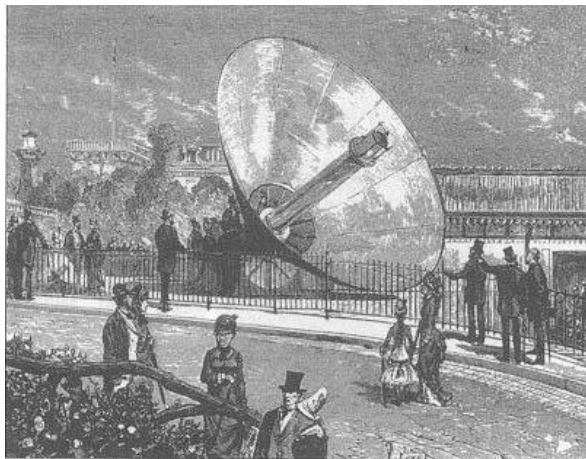


Figure 10: Mouchots Apparatur auf der Pariser Weltausstellung, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Mouchot1878x.jpg>

Zwei Folgen können als direkte Ergebnisse genannt werden. Zum einen war Mouchot in der Lage, einen Solarkocher zu entwickeln, der von der französischen Armee in den nordafrikanischen Kolonien genutzt wurde. Diese Geräte ermöglichten den Soldaten, heiße Mahlzeiten zubereiten zu können ohne dabei Rauch zu erzeugen, was aus militärischer Perspektive von großer Bedeutung war. Diese Kocher wurden bis ins 20. Jahrhundert genutzt.

Mouchots zweites Ergebnis war eine Dampfmaschine, die mit Dampf arbeitete, der durch seine Solarapparatur erzeugt wurde. Mouchot entwickelte diverse Maschinen wie diese, die Größte

hiervon wurde auf der Weltausstellung 1878 in Paris vorgestellt. Der kegelförmige Spiegel hatte einen Durchmesser von etwa fünf Metern, und der Motor konnte zum einen als Druckvorrichtung genutzt werden, war aber auch in der Lage, Eis zu produzieren.

Mouchot wurde für diese Maschine mit einer Goldmedaille ausgezeichnet. Doch die Dinge hatten sich wieder einmal geändert. Ein großes Problem von Mouchots Maschine war die Silberbeschichtung auf dem Spiegel, die dazu neigte zu oxidieren, was die Leistung der Maschine reduzierte und permanentes Säubern des Spiegels erforderte. Eine weitere Entwicklung stellte sich für Mouchot ebenfalls als viel problematischer als gedacht heraus: Bergarbeiter hatten neue Kohlevorkommen in Ostfrankreich entdeckt, wodurch sich die Suche nach einer alternativen Energiequelle für Dampfmaschinen erübrigte. Darüber hinaus wurde Mouchots Maschine in einem Bericht als ökonomisch ertragsarm bezeichnet. Als Folge stellte die französische Regierung die finanzielle Unterstützung von Mouchots Forschungen ein, was auch seine Arbeit selbst beendete.

Bibliographie

- Ashworth JR (1930): Joule's Thermometers in the Possession of the Manchester Literary and Philosophical Society (Journal of Scientific Instruments Vol 7, No. 11, London) pp 361 - 363.
- Ashworth JR (1931): A List of Apparatus now in Manchester which belonged to Dr. J.P. Joule, F.R.S., with Remarks on his M.S.S., Letters, and Autobiography. In: Manchester Memoirs Vol 75, No 8, 105.
- Beretta M. H. (2005). Lavoisier in Perspective. München, Deutsches Museum.
- Breger H (1982). Die Natur als arbeitende Maschine.
- Brown SC (1979): Benjamin Thomson, Count Rumford (MIT Press, Cambridge, Mass., London).
- Goldfarb SG (1977) Rumford's Theory of Heat: A Reassessment. In: British Journal for the History of Science Band 10:S. 25 - 36.
- Heering P (1992) On J.P. Joule's Determination of the Mechanical Equivalent of Heat. In: Hills, Skip (Ed.): The History and Philosophy of Science in Science Education Vol.1, Kingston, Ontario), pp 495-505.

- Herschel, W. (1800). Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of the Sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 90, 284-292
- Joule JP (1850): On the Mechanical Equivalent of Heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 140, 61-82. Reprinted in Joule JP (1884): *The Scientific Papers*.
- Joule, JP (1872). Das mechanische Wärmeäquivalent. Braunschweig, Vieweg
- Kuhn, TS (1959): Energy conservation as an example of simultaneous discovery. In: M. Clagett (ed.): *Critical Problems in the History of Science*. University of Wisconsin Press, Madison, 321 - 356.
- Leslie, J. (1804): An experimental inquiry into the nature and propagation of heat. London, Printed for J. Mawman.
- Mouchot, Augustin (1869), La chaleur solaire et ses applications industrielles. Paris.
- Olson RG (1970) Count Rumford, Sir John Leslie, and the Study of the Nature and Propagation of Heat at the Beginning of the Nineteenth Century. In: *Annals of Science* Band 26: 273 - 304.
- Roberts L. (1991). A Word and the World: –The Significance of Naming the Calorimeter. *ISIS* 82: 198 - 222.
- Schiffer MB (2008): *Power struggles: scientific authority and the creation of practical electricity before Edison*. Cambridge, Mass., The MIT Press.
- Sibum HO (1995): Reworking the Mechanical Value of Heat: Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England. *Studies in the History and Philosophy of Science* 26, 73 - 106.
- Sichau C (2000): Die Joule-Thomson-Experimente: Anmerkungen zur Materialität eines Experiments. In: *NTM* 8:223-243.
- Smith C & Wise MN (1989): *Energy and Empire: A biographical study of Lord Kelvin* (Cambridge University Press, Cambridge - New York - Port Chester - Melbourne - Sydney
- Thompson, B (1781): New Experiments upon Gun-Powder, with Occasional Observations and Practical Inferences; To Which are Added, an Account of a New Method of Determining the Velocities of All Kinds of Military Projectiles, and the Description of a Very Accurate Eprouvette for Gun-Powder. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 71, 229-328
- Thompson, B. (1798). "An Inquiry concerning the Source of the Heat Which is Excited by Friction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 88: 80-102.
- Thompson, B (1804): An Enquiry concerning the Nature of Heat, and the Mode of Its Communication. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 94, 77-182.

Das Energiekonzept was translated by Vanessa Schmid.

Das Energiekonzept was written by Peter Heering with the support of the European Commission (project 518094-LLP-1-2011-1-GR-COMENIUS-CMP) and The University of Flensburg, Germany. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.