

**OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN  
Band 37**

---

**Reprint der Bände 37, 180 und 99**

---

**Betrachtungen über die  
bewegende Kraft des Feuers**

.

**Die Mechanik der Wärme**

.

**Über die bewegende Kraft  
der Wärme**

**Sadi Carnot · Robert Mayer  
Rudolf Clausius**

---

**Verlag Harri Deutsch**

**OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN  
Band 37**

**OSTWALDS KLASSIKER  
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN**

**Band 37**

**Reprint der Bände 37, 180 und 99**

**Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers**

**Sadi Carnot**

•

**Die Mechanik der Wärme**

**Robert Mayer**

•

**Über die bewegende Kraft der Wärme**

**Rudolf Clausius**

**Einleitung**

**Hermann Berg**



**Verlag Harri Deutsch**

*Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

**ISBN 978-3-8171-3411-3**

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und das Speichern und die Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

© Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH,  
Frankfurt am Main, 2009  
1. Auflage 2003, 2009

Druck: Rosch-Buch Druckerei GmbH, Scheßlitz  
Printed in Germany

H. Berg  
**Einführung**

In diesem Sammelband wurden wesentliche Publikationen des Triumvirats Sadi Carnot, Robert Mayer und Rudolf Clausius zusammengeführt, die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts die beiden Hauptsätze der Wärmelehre erkannt und als Basis der heutigen Thermodynamik formuliert haben. Darüber hinaus bestimmen der 1. Hauptsatz (Energieerhaltung) und der 2. Hauptsatz (Energieumwandlung) allgemein das fundamentale Geschehen unserer Erdenwelt.

Der Ingenieur Sadi Carnot (1796, Paris – 1832, Paris) erhielt seine Ausbildung an der berühmten Ecole Polytechnique bei seinen Lehrern S. D. Poisson, L. J. Gay-Lussac, A. M. Ampere und F. Arago.

Nach kurzem Militärdienst widmete er sich 1819 Studien in Mathematik, Physik und Chemie an der Sorbonne und nach erneutem Militärdienst blieben ihm nur vier Jahre zur Erweiterung seiner Erkenntnisse bis er mit 36 Jahren an Cholera verstarb.

Ihn interessierten in seinem einzigen Werk „Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines à développer cette puissance“, das 1824 erschien (1909 von Wilhelm Ostwald ins Deutsche übertragen), die Wärmekraftmaschinen. Obwohl er fälschlich von einem Wärmestoff ausging, erkannte er die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile und formulierte: „Überall, wo ein Temperaturunterschied besteht, kann die Erzeugung von bewegender Kraft stattfinden“. Daraus entwickelte er den nach ihm benannten Kreisprozess wobei alle vier Zustandsänderungen reversibel verlaufen bei maximalem Wirkungsgrad. Dabei ist die Arbeit zu gewinnen:

$$A = \frac{T_2 - T_1}{T_1} Q \quad (1)$$

wenn die Wärme  $Q$  von  $T_2$  nach  $T_1$  übergeht. Berechnungen und praktische Anwendungen für Dampfmaschinen bilden den Hauptteil seiner einzigen Abhandlung im Umfang von 60 Seiten.

Carnot gab 1834 auch den Anstoß für E. Clapeyron zur Berechnung der Verdampfungswärme (Verdampfungsenthalpie):

$$H = T(V_1 - V_2) \frac{dp_1}{dT} \quad (2)$$

mit  $V_1$  – Dampfvolumen,  $V_2$  – Flüssigkeitsvolumen,  $p_1$  – Dampfdruck.

Spätere Thermodynamiker [1, 2, 3], die Carnots Gedanken weiterführten, billigen ihm zu, dass die Grundlagen der beiden Hauptsätze nicht nur in dieser Publikation, sondern auch in seinem Nachlass bereits enthalten sind.

Den Lebensweg des Arztes Julius Robert Mayer (1814, Heilbronn – 1878, Heilbronn) hat A. v. Oettingen in den Anmerkungen zu den beiden Hauptveröffentlichungen ausführlich dargestellt. Sie enthalten erstmalig die umfassende Formulierung des Energieerhaltungssatzes (1. Hauptsatz) für alle damals bekannten Energieformen und die Berechnung des mechanischen

Wärmeäquivalents zu  $367 \frac{\text{mkg}}{\text{kcal}}$ , während die Experimente von J.

Joule  $425 \frac{\text{mkg}}{\text{kcal}}$  ergaben. Unter Einbeziehung weiterer Energien

(s. S. 32-33) gelten heute die folgenden Beziehungen:

$$1 \text{ kcal} = 426,9 \text{ kpm} = 4186,8 \text{ Joule} = 1,163 \cdot 10^3 \text{ kWh} = 2613,4 \cdot 10^{19} \text{ eV.}$$

Nachdem der Prioritätsanspruch Mayers geklärt war, erhielt er 1871 die Copley-Medaille (England), obwohl er ein Außenseiter war. Sein besonderes Verdienst für die heutige Physiologie besteht in der Einbeziehung der Energetik der Lebensprozesse: „...einzige Ursache der tierischen Wärme ist ein chemischer Prozess“. Hierdurch mögen auch W. Ostwalds Gedanken zur Biosphäre [4] angeregt worden sein, wodurch der Vitalismus endete.

Schließlich macht er sich Gedanken über die Ursache der Sonnenwärme, die H. v. Helmholtz, W. Thomson u.a. aufnahmen, aber erst durch H. Bethe und C.F.v. Weizsäcker kernphysikalisch geklärt wurden.

Der theoretische Physiker Rudolf Julius Clausius (1822, Köslin – 1888, Bonn) verknüpfte Mayers Wärmeäquivalent (1. Hauptsatz) mit dem Carnotschen Prinzip des Wärmeüberganges (2. Hauptsatz) in quantitativer Formulierung und führte den Entropiebegriff als neue Zustandsgröße ein. Clausius studierte Physik in Berlin bei P. Dirichlet, G. Ohm und H. Magnus, lehrte zunächst als Professor an der ETH Zürich, später Würzburg und leitete schließlich in Bonn ein führendes Zentrum der Physik. Von seinen breitgefächerten thermodynamischen und kinetischen Forschungen ist bisher nur das Erstlingswerk als schmales Bändchen: „Über die bewegende Kraft der Wärme“ in der Reihe „Ostwalds Klassiker“ aufgenommen worden. Später folgten die Bücher: „Der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie“ (Braunschweig 1867), „Die mechanische Wärmetheorie“ (Braunschweig 1876–1879), „Die kinetische Theorie der Gase“ (1889–1891).

Ausführlich wird der Carnotsche Kreisprozess quantifiziert und allgemein festgestellt:  $\frac{\text{die verbrauchte Waerme}}{\text{die erzeugte Arbeit}} = \text{Constant}$  und „Wärme geht niemals von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper über“ (Clausiussscher Satz). Die möglichen physikalischen Bestimmungen des Wärmeäquivalents werden abschließend kritisch verglichen. Aus dem Clausiussschen Satz ging 1865 die Definition der Entropie als neue Zustandsgröße von weitreichender Bedeutung hervor:

$$S = \frac{H}{T} \quad \text{mit } H = \text{Enthalpie,}$$

womit Gleichung (2) in

$$\frac{dp_1}{dT} = \frac{S}{(V_1 - V_2)} \quad (3)$$

übergeht.

Da für  $V_1$  gilt:  $p_1 V_1 = RT$  (mit  $R$  als Gaskonstante = erhält man aus (3):

$$\frac{1}{p_1} \cdot \frac{dp_1}{dT} \equiv \frac{d(\ln p_1)}{dT} = \frac{S}{RT} = \frac{H}{RT^2} \quad (4)$$

Den Übergang von der Thermodynamik zur kinetischen Gastheorie erfolgte durch Clausius mit der Einführung der mittleren freien Weglänge und der Stoßzahl. In diesem Zusammenhang beschäftigten ihn Diffusionsvorgänge und die Schallausbreitung. Diese Richtungen werden J. Maxwell und L. Boltzmann [5] später noch vertiefen. Auch W. Nernst leitet sein Wärmetheorem (3. Hauptsatz) aus  $S$  und der spezifischen Wärme her [6].

Aus dieser Fülle seiner Ergebnisse wird deutlich, daß M. Planck mit Bd. 99 in Ostwalds Klassikern nur einen Bruchteil des Lebenswerkes von Clausius, einem der herausragenden Physiker des 19. Jahrhunderts, einem größeren Interessenkreis zugänglich gemacht hat. Dennoch bildet diese vereinigte Neuauflage als Bd. 37 die Grundlage der klassischen Thermodynamik, einer der wenigen abgeschlossenen Leistungen menschlichen Geistes.

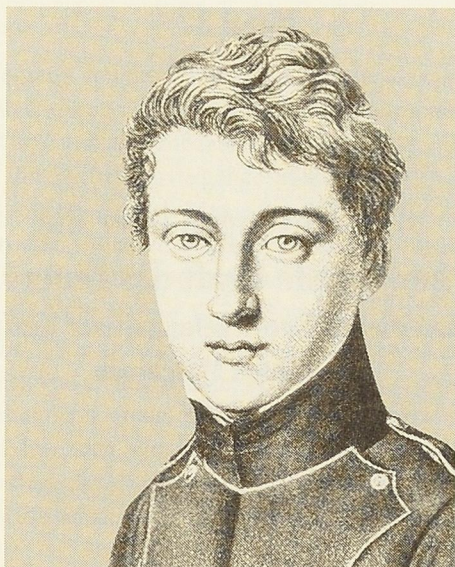
- [1] G. Lewis, M. Randall: Thermodynamics, and the Free Energy of Chemical Substances, Mc Graw-Hill, N.Y. 1923.
- [2] O. Sackur: Lehrbuch der Thermochemie und Thermodynamik, J. Springer, Berlin 1928.
- [3] M. Planck: Vorlesungen über Thermodynamik. W. de Gruyter, Berlin 1930.
- [4] W. Ostwald: Gedanken zur Biosphäre, Ostwalds Klassiker Bd. 257, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M. 1996.
- [5] L. Boltzmann: Entropie und Wahrscheinlichkeit. Bd. 286 Ostwalds Klassiker, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M. 2000.
- [6] W. Nernst: Begründung der Theoretischen Chemie. Ostwalds Klassiker Band 290, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M. 2003.

**Band 37**

**Betrachtungen über die  
bewegende Kraft des Feuers  
und die zur Entwicklung dieser Kraft  
geeigneten Maschinen  
(1824)**

von  
**Sadi Carnot**

übersetzt und herausgegeben von  
**W. Ostwald**



Sadi Carnot  
1796 -1832

# Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers.

---

Jedermann weiss, dass die Wärme die Ursache der Bewegung sein kann, dass sie sogar eine bedeutende bewegende Kraft besitzt: die heute so verbreiteten Dampfmaschinen beweisen dies für jedermann sichtbar.

Der Wärme müssen die grossen Bewegungen zugeschrieben werden, welche uns auf der Erdoberfläche ins Auge fallen; sie verursacht die Strömungen der Atmosphäre, den Aufstieg der Wolken, den Fall des Regens und der anderen Meteore, die Wasserströme, welche die Oberfläche des Erdballes furchen und von denen der Mensch einen kleinen Theil für seinen Gebrauch nutzbar zu machen gewusst hat; auch Erdbeben und vulkanische Ausbrüche haben gleichfalls die Wärme zur Ursache.

Aus diesem ungeheuren Reservoir können wir die für unsere Bedürfnisse erforderliche bewegende Kraft schöpfen; [2] indem die Natur uns allerorten Brennmaterial liefert, hat sie uns die Möglichkeit gegeben, stets und überall Wärme und die aus dieser folgende bewegende Kraft zu erzeugen. Der Zweck der Wärmemaschinen ist, diese Kraft zu entwickeln und sie unserem Gebrauch anzupassen.

Das Studium dieser Maschinen ist vom höchsten Interesse, denn ihre Wichtigkeit ist ungeheuer, und ihre Anwendung steigert sich von Tag zu Tag. Sie scheinen bestimmt zu sein, eine grosse Umwälzung in der Culturwelt zu bewirken. Schon beutet die Wärmemaschine unsere Minen aus, bewegt unsere Schiffe, vertieft unsere Häfen und Flüsse, schmiedet das Eisen, gestaltet das Holz, mahlt das Getreide, spinnt und webt unsere Stoffe,

schleppt die schwersten Lasten u. s. w. Sie scheint eines Tages der allgemeine Motor werden zu sollen, welcher den Vorzug über die Kräfte der Thiere, den Fall des Wassers und die Ströme der Luft erhält. Dem erstgenannten Motor gegenüber hat sie den Vorzug der Wohlfeilheit, den anderen gegenüber den unschätzbaren Vorzug, immer und überall anwendbar zu sein und niemals ihre Arbeit zu unterbrechen.

Werden einst die Verbesserungen der Wärmemaschine weit genug gediehen sein, um sie wenig kostspielig in der Anlage und bezüglich des Brennmaterials zu machen, so wird sie der Industrie [3] einen Aufschwung ermöglichen, dessen ganze Ausdehnung schwer vorauszusehen ist.

Denn es wird nicht nur für die jetzt gebräuchlichen Motoren ein kraftvoller und bequemer Motor eintreten, den man überall erlangen und hinschaffen kann, sondern derselbe wird den Gewerben, in denen er angewendet wird, eine rapide Entwicklung verschaffen, ja er kann ganz neue Gewerbe entstehen lassen.

Der ausgezeichnetste Dienst, welchen die Wärmemaschine England geleistet hat, ist zweifelsohne die Wiederbelebung der Ausbeutung seiner Steinkohlenbergwerke, welche dahinsiechte und infolge der stets wachsenden Schwierigkeiten der Wasserhaltung und -Förderung unterzugehen drohte\*). In zweiter Linie müssen die der Eisenindustrie geleisteten Dienste erwähnt werden, sowohl bezüglich des reichlichen Ersatzes des Holzes, das soeben [4] anfang, sich zu erschöpfen, wie auch bezüglich der Kraftmaschinen aller Art, deren Anwendung die Wärmemaschine erleichtert oder ermöglicht hat.

Eisen und Feuer sind bekanntlich die Nahrung und Stütze der mechanischen Gewerbe. In England ist vielleicht keine einzige Fabrik, deren Bestehen nicht auf den Gebrauch dieser Agentien begründet wäre, und in welcher sie nicht reichlichst zur Verwendung kämen. Entzöge man England heute seine Dampfmaschinen, so raubte man ihm Kohle und Eisen, man

---

\*) Man darf behaupten, dass seit der Erfindung der Wärmemaschinen sich die Förderung der Steinkohle in England verzehnfacht hat. Ungefähr das Gleiche gilt für die Gewinnung des Kupfers, Zinns und Eisens. Die vor einem halben Jahrhundert durch die Wärmemaschine auf die Minen Englands hervorgebrachte Wirkung wiederholt sich heute an den Gold- und Silberminen der neuen Welt, deren Ausbeutung von Tag zu Tag sich namentlich infolge der ungenügenden Beschaffenheit der Wasserhaltungs- und Förderungsmaschinen verminderte.

hemmte alle Quellen seines Reichthums und vernichtete alle Mittel seiner Entwicklung; es hiesse dies, diese colossale Macht vernichten. Die Zerstörung seiner Marine, welche es als seinen sichersten Schutz betrachtet, würde für England vielleicht weniger tödtlich sein.

Die schnelle und sichere Schifffahrt mittelst der Dampfschiffe kann als eine völlig neue, durch die Wärmemaschinen bedingte Kunst angesehen werden. Bereits hat dieselbe über die Meeresarme, die grossen Flüsse des alten und neuen Continents die Einrichtung schneller und regelmässiger Verbindungen ermöglicht. Sie hat das Durchmessen noch wilder Gebiete ermöglicht, in die man früher kaum hat eindringen können; sie hat gestattet, die Früchte der Cultur an Orte des Erdballes zu tragen, wo sie sonst noch [5] viele Jahre hätten auf sich warten lassen. Die Dampfschifffahrt nähert in gewissem Sinne die fernsten Nationen einander. Sie verbindet die Völker der Erde, als bewohnten sie dasselbe Land. Ist in der That die Verminderung der Dauer, der Anstrengungen, der Unsicherheit und Gefahren der Reisen nicht gleichbedeutend mit einer bedeutenden Verkürzung der Entfernungen?\*)

Die Entdeckung der Wärmemaschinen dankt ihre Entstehung wie die meisten menschlichen Erfindungen unförmlichen Vorversuchen, welche verschiedenen Männern zugeschrieben worden sind, und deren wahren Urheber man nicht kennt. Auch besteht der wesentliche Theil der Entdeckung nicht sowohl in diesen ersten Versuchen als in den folgweisen Verbesserungen, welche die Wärmemaschinen in den Zustand gebracht haben, in welchem wir sie heute sehen. Zwischen den ersten Vorrichtungen, mittelst deren man die Ausdehnungskraft des [6] Dampfes entwickelt hat, und den gegenwärtigen Maschinen besteht vielleicht ein nicht geringerer Unterschied, wie zwischen dem ersten Floss, welches die Menschen gebaut haben, und einem Dreidecker.

Wenn die Ehre einer Entdeckung derjenigen Nation zukommt, bei welcher sie ihr Wachsthum und ihre Entwicklung

---

\*) Wir sagen Verminderung der Gefahren des Reisens: denn wenn auch die Anwendung einer Wärmemaschine auf einem Schiffe einige, übrigens sehr übertriebene Gefahren mit sich bringt, so sind diese mehr als aufgewogen durch die Möglichkeit, sich stets auf einem regelmässig befahrenen und wohlbekannten Wege zu halten und der Wirkung des Windes zu widerstehen, wenn diese das Schiff gegen Küsten, Untiefen und Klippen treiben.

erfahren hat, so kann hier diese Ehre England nicht versagt werden: *Savery, Newcomen, Smeathon*, der berühmte *Watt, Woolf, Trevetick* und einige andere englische Techniker sind die eigentlichen Schöpfer der Wärmemaschine; aus ihren Händen hat sie die folgeweisen Stufen ihrer Vervollkommnung erlangt. Es ist übrigens naturgemäss, dass eine Erfindung dort entsteht und namentlich sich entwickelt, wo das Bedürfniss nach ihr sich am zwingendsten geltend macht.

Trotz der mannigfaltigen Arbeiten über die Wärmemaschinen, trotz des befriedigenden Zustandes, zu dem sie gegenwärtig gelangt sind, ist ihre Theorie doch sehr wenig fortgeschritten, und die Versuche zu ihrer Verbesserung sind fast nur vom Zufall geleitet.

Man hat oft die Frage erwogen, ob die bewegende Kraft \*) der Wärme [7] beschränkt ist, oder unendlich; ob die möglichen Verbesserungen eine angebbare Grenze haben, welche durch irgendwelche Mittel zu überschreiten durch die Natur der Sache unmöglich gemacht ist, oder ob im Gegentheile die Verbesserungen einer unbegrenzten Ausdehnung fähig sind. Auch hat man seit langem nach Agentien gesucht, und sucht sie noch heute, welche dem Wasserdampf zum Zwecke der Entwicklung der bewegenden Kraft des Feuers vorzuziehen sind, und sich beispielsweise gefragt, ob nicht die Luft in dieser Beziehung grosse Vortheile biete. Wir beabsichtigen, diese Fragen hier einer eingehenden Betrachtung zu unterziehen.

Das Phänomen der Erzeugung von Bewegung durch Wärme ist nicht unter einem hinlänglich allgemeinen Gesichtspunkt betrachtet worden. Man hat es nur an Maschinen untersucht, deren Wirkungsweise ihm nicht die ganze Entwicklung gestattet hat, deren es fähig ist. An derartigen Maschinen zeigt sich das Phänomen sozusagen verstümmelt und unvollständig, so dass es schwierig wird, seine Grundlagen zu erkennen und seine Gesetze zu studiren.

[8] Um das Princip der Erzeugung von Bewegung durch Wärme in seiner ganzen Allgemeinheit zu betrachten, muss man es sich unabhängig von jedem Mechanismus und jedem beson-

---

\*) Wir brauchen hier den Ausdruck bewegende Kraft, um die nutzbare Wirkung zu bezeichnen, welche ein Motor hervorbringen kann. Diese Wirkung kann stets der Hebung eines Gewichtes auf eine bestimmte Höhe gleichgesetzt werden, und hat, wie bekannt, das Produkt aus dem Gewicht und der Höhe, auf die dieses erhoben ist, zum Maass.

deren Agens vorstellen; man muss Ueberlegungen durchführen, welche ihre Anwendung nicht nur auf Dampfmaschinen\*) haben, sondern auf jede denkbare Wärmemaschine, welches auch der angewandte Stoff sei, und in welcher Art man auf ihn einwirkt.

Die Maschinen, welche ihre Bewegung nicht von der Wärme empfangen, wie die, deren Antrieb die Kraft der Menschen oder Thiere, der Fall des Wassers, die Strömung der Luft etc., ist, können bis in ihre kleinsten Einzelheiten mittelst der theoretischen Mechanik studirt werden. Alle Fälle sind vorgesehen, alle möglichen Bewegungen sind allgemeinen festbegründeten Principien unterworfen, welche unter allen Umständen Anwendung finden. Das ist das Kennzeichen einer vollständigen Theorie. Offenbar fehlt eine ähnliche Theorie bei den Wärmemaschinen. Man wird sie erst besitzen, wenn die Gesetze der Physik genügend ausgedehnt und verallgemeinert sind, um [9] von vornherein alle Wirkungen festzustellen, welche die Wärme ausübt, wenn sie sich in bestimmter Weise an einem beliebigen Körper bethätigt.

Wir setzen bei dem Folgenden eine wenigstens annähernde Kenntniss der verschiedenen Theile voraus, aus denen eine gewöhnliche Dampfmaschine besteht. Daher erachten wir es als überflüssig, hier auseinanderzusetzen, was eine Feuerung, ein Dampfkessel, ein Dampfcyylinder, ein Kolben, ein Condensator u. s. w. ist.

Die Erzeugung von Bewegung ist bei den Dampfmaschinen stets an einen Umstand geknüpft, auf welchen wir die Aufmerksamkeit lenken müssen. Dieser Umstand ist die Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffs, <sup>1)</sup> d. h. ein Uebergang von einem Körper mit mehr oder weniger erhöhter Temperatur auf einen anderen, wo sie niedriger ist. Was geschieht denn thatsächlich in einer in Thätigkeit befindlichen Dampfmaschine? Der in der Feuerung durch die Verbrennung entwickelte Wärmestoff durchdringt die Wände des Kessels, und erzeugt den Dampf, indem er sich sozusagen demselben einverleibt. Dieser nimmt ihn mit sich, führt ihn zum Cylinder, wo er irgend einen Dienst thut, und von dort in den Condensator, wo er sich in Berührung mit dem dort vorhandenen kalten Wasser

---

\*) Wir unterscheiden hier die Dampfmaschine von der Wärmemaschine im Allgemeinen; letztere kann von jedem beliebigen Agens, Wasserdampf oder jedem anderen, Gebrauch machen, um die bewegende Kraft der Wärme zu gewinnen.

verflüssigt. In letzter Linie bemächtigt sich daher das kalte Wasser des Condensators des durch die Verbrennung entwickelten Wärmestoffs. [10] Es erwärmt sich durch Vermittelung des Dampfes, wie wenn es unmittelbar über die Feuerung gebracht worden wäre. Der Dampf ist hier nur ein Mittel, den Wärmestoff fort zu schaffen; er thut dasselbe, wie bei der Erwärmung der Bäder durch Dampf, nur dass in unserem Falle die Bewegung nutzbar gemacht wird.

Bei den geschilderten Vorgängen erkennt man leicht die Herstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffs, seinen Uebergang von einem mehr oder weniger erhitzten Körper auf einen kälteren. Der erste dieser Körper ist hier die in der Feuerung verbrannte Luft, der zweite ist das Condensationswasser. Die Herstellung des Gleichgewichts erfolgt zwischen beiden wenn auch nicht vollständig, so doch theilweise: denn einerseits entweicht die verbrannte Luft, nachdem sie den Dampfkessel umspült und das Ihrige gethan hat, bei einer Temperatur, die weit unterhalb der ist, die sie durch die Verbrennung erlangt hatte, andererseits tritt das Wasser des Condensators, nachdem es den Dampf verflüssigt hat, aus der Maschine mit einer höheren Temperatur, als die war, welche es mitgebracht hatte.

Die Erzeugung von bewegender Kraft ist daher bei den Dampfmaschinen nicht sowohl auf einen wirklichen Verbrauch des Wärmestoffs zurückzuführen, sondern auf seinen Uebergang von einem heissen Körper zu einem [11] kalten,\*) d. h. auf die Herstellung seines Gleichgewichtes, welches durch irgend eine Ursache, eine chemische Wirkung, wie die Verbrennung, oder irgend eine andere, gestört worden war. Wir werden bald sehen, dass dieses Princip auf alle Maschinen Anwendung findet, welche durch die Wärme in Bewegung gesetzt werden.

Nach diesem Princip genügt es zur Gewinnung bewegender Kraft nicht, Wärme hervorzubringen: man muss sich auch Kälte verschaffen; ohne sie wäre die Wärme unnütz. In der That, wären um die Feuerung nur Körper vorhanden, welche ebenso heiss sind, wie diese, wie könnte man die Verdichtung des Dampfes erlangen? wo würde man ihn hinbefördern, nachdem er einmal entstanden ist? Man darf nicht glauben, dass man ihn, wie dies bei gewissen Maschinen geschieht\*), in die Luft

---

\*) Gewisse Maschinen mit hohem Druck entladen den Dampf in die Luft statt in einen Condensator; man verwendet sie insbesondere

treiben könnte: die Luft würde ihn nicht aufnehmen. Sie nimmt ihn unter den gegenwärtigen Verhältnissen nur auf, weil sie ihm gegenüber wie ein ungeheurer Condensator wirkt, weil sie sich bei niedrigerer Temperatur [12] befindet; sonst wäre sie bald gesättigt, oder vielmehr, sie wäre es von vornherein\*).

Ueberall, wo ein Temperaturunterschied besteht, und wo daher die Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffs eintreten kann, kann auch die Erzeugung von bewegender Kraft stattfinden. Der Wasserdampf ist ein Mittel zur Erlangung dieser Kraft, aber er ist nicht das einzige; alle Stoffe der Natur können zu diesem Zwecke benutzt werden; [13] alle sind fähig, Volumänderungen, folgeweise Zusammenziehungen und Ausdehnungen durch den Wechsel der Wärme und Kälte zu erfahren; alle sind fähig, bei ihren Volumänderungen bestimmte Widerstände zu überwinden, und auf diese Weise bewegende Kraft zu entwickeln. Ein fester Körper, beispielsweise ein metallener Stab vermehrt und vermindert seine Länge, wenn er abwechselnd erwärmt und abgekühlt wird, und vermag Körper zu bewegen, die an seinen Enden befestigt sind. Eine abwechselnd erwärmte und abgekühlte Flüssigkeit vermehrt und vermindert ihr Volum, und kann mehr oder weniger erhebliche Hindernisse überwinden, die sich ihrer Ausdehnung entgegenstellen. Eine gasförmige Flüssigkeit kann durch Temperaturänderungen erhebliche Aenderungen des Volums erfahren, wenn sie sich in einem ausdehnbaren Raume befindet, wie in einem

---

an Orten, wo es schwierig ist, sich eine zur Condensation genügende Menge kalten Wassers zu verschaffen.

\*) Das Vorhandensein des Wassers in flüssigem Zustande, welches hier nothwendig anzunehmen ist, da sonst die Dampfmaschine nicht betrieben werden könnte, setzt das Bestehen eines genügenden Druckes voraus, um das Wasser an der Verdampfung zu hindern, und daher eines Druckes, der dem Dampfdrucke des Wassers bei dieser Temperatur gleich oder überlegen ist. Wäre dieser Druck seitens der Luft nicht vorhanden, so würde sich sofort Wasserdampf in genügender Menge entwickeln, um ihn seinerseits auszuüben, und um den Dampf der Maschine in die neue Atmosphäre auszustossen, müsste stets dieser Druck überwunden werden. Dies wäre aber offenbar gleichwerthig mit der Ueberwindung des Druckes, welcher dem Dampf bei seiner Condensation in der gebräuchlichen Weise verbleibt.

Bestände auf der Erdoberfläche eine hohe Temperatur, wie sie unzweifelhaft im Inneren der Erde besteht, so würde alles Wasser des Weltmeeres in Gestalt von Dampf sich in der Atmosphäre befinden, und kein Tropfen wäre als flüssiges Wasser vorhanden.

mit einem Kolben versehenen Cylinder, kann sie sehr ausgedehnte Bewegungen hervorbringen. Die Dämpfe aller Stoffe, welche in den Gaszustand übergehen können, des Alcohols, Quecksilbers, Schwefels, etc. könnten denselben Dienst thun, wie der Wasserdampf. Dieser bringt, wenn er abwechselnd erhitzt und abgekühlt wird, bewegendende Kraft nach Art der permanenten Gase hervor, d. h. ohne jemals in den flüssigen Zustand überzugehen. Die Mehrzahl dieser Mittel ist vorgeschlagen; mehrere sind selbst [14] versucht worden, wenn auch bisher ohne erheblichen Erfolg.

Wir haben gezeigt, dass bei den Dampfmaschinen die bewegendende Kraft von der Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffs herrührt; dies gilt nicht nur für die Dampfmaschine, sondern auch für jede Wärmemaschine, d. h. für jede Maschine, deren treibende Kraft der Wärmestoff ist. Die Wärme kann offenbar die Bewegung nur dadurch hervorrufen, dass sie Aenderungen des Volums oder der Gestalt in den Körpern erzeugt; diese Aenderungen rühren nicht von der Constanz der Temperatur, sondern im Gegentheil von Abwechselungen der Wärme und Kälte her; denn um einen Körper zu erwärmen, braucht man einen anderen, der wärmer ist als er, und um ihn abzukühlen, einen kälteren Körper. Man entnimmt nothwendigerweise Wärmestoff dem ersten Körper, um ihn mittelst der Zwischensubstanz auf den zweiten zu übertragen. Das bedeutet die Wiederherstellung, oder wenigstens eine theilweise Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffs.

Es drängt sich hier die gleich interessante wie wichtige Frage auf: Ist die bewegendende Kraft der Wärme der Grösse nach unveränderlich oder wechselt sie mit dem Agens, dessen man sich bedient, um sie zu erlangen, mit der Zwischensubstanz, [15] die man als der Wirkung der Wärme unterworfen wählt?

Es ist klar, dass diese Frage nur in Bezug auf eine gegebene Menge von Wärmestoff gestellt werden kann\*), wobei der Temperaturunterschied gleichfalls gegeben ist. Man verfügt bei-

---

\*) Wir halten es für überflüssig, hier auseinanderzusetzen, was eine Wärmemenge oder Menge von Wärmestoff ist (wir brauchen beide Ausdrücke ohne Unterscheidung), oder zu beschreiben, wie man sie mittelst des Calorimeters misst. Auch werden wir nicht auseinanderzusetzen, was latente Wärme, Temperaturgrad, spezifische Wärme etc. ist; der Leser muss mit diesen Ausdrücken durch das Studium elementarer Lehrbücher der Physik oder Chemie vertraut sein.

spielsweise über einen Körper  $A$ , der bei der Temperatur  $100^{\circ}$ , und einen anderen, der bei der Temperatur  $0^{\circ}$  erhalten wird, und es wird gefragt, welche Menge bewegender Kraft durch den Uebergang einer gegebenen Menge Wärmestoff (z. B. derjenigen, welche zum Schmelzen eines Kilogramms Eis erforderlich ist) von dem ersten Körper auf den zweiten erzeugt wird; es wird gefragt, ob diese Menge bewegender Kraft nothwendig beschränkt ist, ob sie mit dem Stoffe wechselt, welcher zu ihrer Erzeugung angewendet wird, ob der Wasserdampf in dieser Beziehung mehr oder weniger Vortheile bietet, als der Dampf [16] des Alcohols, des Quecksilbers, als ein permanentes Gas oder irgend ein anderer Stoff.

Wir werden versuchen, diese Fragen unter Anwendung der vorher festgestellten Sätze zu beantworten.

Vorher ist bereits die selbstverständliche, oder wenigstens beim Nachdenken über die von der Wärme verursachten Volumänderungen einleuchtende Thatsache erwähnt worden: Ueberall, wo ein Temperaturunterschied besteht, kann die Erzeugung von bewegender Kraft stattfinden<sup>3)</sup>. Umgekehrt ist es stets möglich, wo man solche Kraft anwenden kann, Temperaturunterschiede entstehen zu lassen, eine Störung des Gleichgewichtes des Wärmestoffs zu verursachen. Der Stoss, die Reibung der Körper, sind sie thatsächlich nicht Mittel, ihre Temperatur zu erhöhen, sie auf einen Grad zu bringen, der höher als der der Umgebung, und folglich eine Störung des Gleichgewichtes des Wärmestoffs dort hervorzubringen, wo bis dahin solches Gleichgewicht bestand? Es ist eine experimentelle Thatsache, dass die Temperatur der Gase durch Verdichten höher und durch Verdünnen niedriger wird. Es ist dies ein sicheres Mittel, an demselben Object die Temperatur der Körper zu ändern und das Gleichgewicht des Wärmestoffs zu stören, so oft als man will. Wird der [17] Wasserdampf auf eine Weise benutzt, die der in den Dampfmaschinen gebräuchlichen entgegengesetzt ist, so kann man ihn gleichfalls als ein Mittel ansehen, das Gleichgewicht des Wärmestoffs zu stören. Um sich davon zu überzeugen, genügt es aufmerksam die Art und Weise zu betrachten, wie sich die bewegende Kraft durch die Wirkung der Wärme auf den Wasserdampf entwickelt. Wir denken uns zwei Körper  $A$  und  $B$ , welche beide auf constanter Temperatur erhalten werden, wobei die von  $A$  höher ist, als die von  $B$ : diese zwei Körper, denen man Wärme zu- oder abführen kann, ohne ihre Temperatur zu ändern, dienen als zwei unbegrenzte

Reservoirs von Wärmestoff. Wir nennen den ersten die Heizung und den zweiten den Kühler.

Will man bewegende Kraft durch die Ueberführung einer gewissen Menge Wärme aus  $A$  nach  $B$  erzeugen, so kann man folgendermaassen verfahren:

1. Dem Körper  $A$  wird Wärmestoff entzogen, um mittelst desselben Dampf zu erzeugen, d. h. man lässt diesen Körper die Thätigkeit des Heizraums oder vielmehr des Metalles ausüben, aus welchem bei den gewöhnlichen Maschinen der Kessel besteht; wir setzen dabei voraus, dass der Dampf gerade bei der Temperatur des Körpers  $A$  entsteht.

2. Nachdem der Dampf in einen ausdehnbaren Behälter, wie ein Cylinder nebst [18] Kolben, eingetreten ist, wird das Volum dieses Behälters vergrößert, und daher auch das des Dampfes. Bei dieser Verdünnung wird der Dampf freiwillig seine Temperatur erniedrigen, wie dies bei allen elastischen Flüssigkeiten stattfindet: wir nehmen an, dass die Ausdehnung so weit getrieben wird, bis die Temperatur des Dampfes der des Körpers  $B$  genau gleich geworden ist.

3. Der Dampf wird verdichtet, indem man ihn mit dem Körper  $B$  in Berührung setzt und gleichzeitig auf ihn einen constanten Druck ausübt, bis er vollkommen flüssig geworden ist. Der Körper  $B$  spielt hier die Rolle des Injectionswassers bei den gewöhnlichen Maschinen, nur mit dem Unterschiede, dass er den Dampf verdichtet, ohne sich mit ihm zu mischen, und ohne selbst eine Temperaturänderung zu erfahren\*).

---

\*) Man wird vielleicht erstaunt sein, dass der Körper  $B$  bei derselben Temperatur, wie sie der Dampf hat, diesen verdichten kann: dies ist zweifellos streng genommen nicht möglich; da aber die kleinste Temperaturverschiedenheit die Condensation hervorrufen wird, so reicht dies aus, um die Richtigkeit unserer Betrachtung zu bewähren. Ganz ähnlich genügt es in der Differentialrechnung, dass man sich die vernachlässigten Grössen als ins Unendlichkleine abnehmend im Verhältniss zu den in den Gleichungen beibehaltenen Grössen denken kann, um die Gewissheit eines endgiltigen Resultats zu erhalten.

Der Körper  $B$  verdichtet den Dampf, ohne seinerseits seine Temperatur zu ändern: dies folgt aus unserer Voraussetzung. Denn wir haben angenommen, dass dieser Körper bei constanter Temperatur erhalten wird. Man entzieht ihm den Wärmestoff in dem Maasse, wie der Dampf ihn ihm zuführt. In diesem Falle befindet sich das Metall des Condensators, wenn die Condensation des Dampfes durch äusserliche Zuführung kalten Wassers erfolgt, wie das früher bei mehreren Maschinen geübt wurde. Ebenso kann das Wasser in einer Stauung