

## 2.1 Technisch-wissenschaftliche Grundlagen

Bei der Erzeugung von elektrischem Strom mittels Wärmekraftmaschinen, wie sie von Edison in seinen ersten Zentralstationen durchgeführt wurde, tritt Energie in verschiedenen Formen auf. Zunächst wird chemisch gebundene Energie in Form eines Brennstoff-/Luft-Gemisches der Feuerung zugeführt. In der Feuerung findet eine chemische Reaktion statt: Der Brennstoff und der Sauerstoff der Luft reagieren und es entstehen heiße Rauchgase. Mit der Wärme der Rauchgase wird im Kessel Wasserdampf erzeugt. Die Energie des Dampfes wird sodann in der Maschine in mechanische Energie umgesetzt und schließlich im Generator in elektrische Energie umgewandelt.

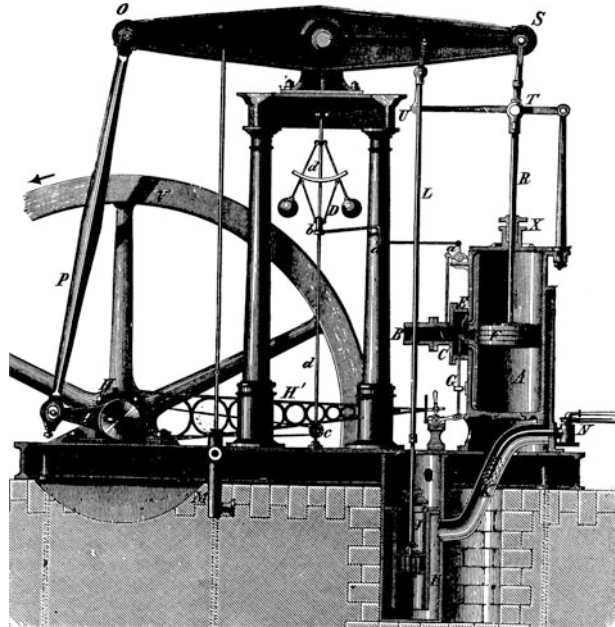
Bei der Einrichtung seiner Zentralstationen konnte Edison für die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie in Form einer drehenden Welle auf die Erfindung von James Watt<sup>1</sup> zugreifen. Watt hatte die von seinem Landsmann Thomas Newcomen<sup>2</sup> entwickelte Dampfmaschine wesentlich verbessert. Bei Newcomens Maschine wurde zunächst ein in einem Zylinder beweglicher Kolben durch Einbringen von Dampf angehoben. Danach wurde der Dampf innerhalb des Zylinders durch Einspritzen von kaltem Wasser kondensiert. Durch die Kondensation entstand im Zylinder ein Unterdruck, so dass der Kolben durch den äußeren Luftdruck wieder in seine Ausgangsposition zurückgeschoben wurde. Danach wurde die Maschine wiederum mit heißem Dampf beschickt. Allerdings ging dabei die für die neuerliche Aufheizung von Zylinder und Kolben erforderliche Wärme für die eigentliche Arbeitsleistung der Maschine verloren.

Um diesen Verlust zu vermeiden, führte Watt 1769 zur Niederschlagung des Dampfes einen separaten Kondensator ein, so dass bei seiner Maschine Zylinder und Kolben ständig die Dampftemperatur behielten und so Wärmeverluste vermieden wurden. Weiter setzte

<sup>1</sup> James Watt (1736–1819), schottischer Ingenieur und Erfinder.

<sup>2</sup> Thomas Newcomen (1663–1729) erfand 1712 die nach ihm benannte Dampfmaschine. Es war die erste Maschine, die zu einem kommerziellen Einsatz kam.

**Abb. 2.1** Doppelwirkende Balancier-Dampfmaschine mit Kurbeltrieb und Drehzahlregler von James Watt, um 1800



Watt mittels eines Kurbeltriebs die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens in die Drehbewegung eines Rades um. Damit ließ er es aber nicht bewenden. Er verschloss die Zylinder beidseitig mittels sich periodisch öffnender Ventile und ließ den Dampf abwechselnd auf der einen und der anderen Kolbenseite ein- bzw. ausströmen. Damit vergrößerte er die Leistung auf einen Schlag um das Doppelte. Watts Maschinen waren in Summe etwa 20 mal leistungsfähiger als die von Newcomen und ihr spezifischer Kohleverbrauch verminderte sich auf ein Viertel. Watt hat mit seinen Erfindungen die Dampfmaschine zu einem universell einsetzbaren Motor gemacht. Bereits 1800 waren in England mehr als 500 Dampfmaschinen in Betrieb.

Für uns, die wir das Wirtschaftswachstum seit Ende des Zweiten Weltkrieges vor Augen haben, ist es naheliegend zu glauben, dass Erfindergeist die Grundlage allen Fortschritts ist und deshalb die Erfindung der Dampfmaschine der Auslöser für die im 18. Jahrhundert von England ausgegangene industrielle Revolution war. Folgt man dagegen dem amerikanischen Historiker Brooks Adams<sup>3</sup>, so wurden die Voraussetzungen für die Industrialisierung zunächst durch machtmäßige Aneignung geschaffen. In der Schlacht bei Plassey 1767 gewann Britannien die Vorherrschaft über das durch die Produktion und Verarbeitung von Baumwolle zu großem Wohlstand gelangte Bengalen im Osten Indiens und erlangte in der Folge die Herrschaft über ganz Indien. Nach Brooks wurde durch die Plünderung Indiens das Kapital gewonnen, durch dessen Einsatz Erfindungen wie die der Dampfmaschine technisch so ausreifen konnten, dass eine ertragreiche industrielle Produktion möglich wurde. Andernfalls wären viele Erfindungen ungenutzt geblieben, da die Mittel fehlten, um sie in Bewegung zu setzen [1], vgl. auch [18].

<sup>3</sup> Brooks Adams (1848–1927), gesellschaftskritischer Historiker. Er war Urenkel von John Adams und Enkel von John Quincy Adams, die beide Präsident der Vereinigten Staaten waren.

## 2.2 Thermodynamik

Watts Dampfmaschine war zwar besser als alle vorhergehenden, aber immer noch wenig effektiv. Noch um 1880 war ein Nutzungsgrad von ca. 7 % für die Umsetzung des Brennstoffes in mechanische Energie alles, was man erwarten konnte. Das bedeutete, dass 93 % der eingesetzten Brennstoffenergie verloren gingen. Dies veranlasste namhafte Naturwissenschaftler und Ingenieure dazu darüber nachzudenken, wie die Effektivität der Dampfmaschinen verbessert werden könnte. Einer der Ersten war Carnot<sup>4</sup>. Im Jahr 1824 veröffentlichte er sein Buch, dessen Untertitel lautet:

*Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers* [4]

Er eröffnete seine Arbeit mit den Worten:

*Das Studium dieser Maschinen ist von höchstem 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 Kulturwelt zu bewirken.*

Carnot konnte zeigen, dass der von der zugeführten Wärme in mechanische Arbeit umgewandelte Anteil nur von der Temperaturdifferenz zwischen der zugeführten ( $T_1$ ) und abgeführten ( $T_2$ ) Wärme abhängt, d. h. der Wirkungsgrad ist gegeben durch:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2.1)$$

In der Formel sind  $T_1$  und  $T_2$  absolute Temperaturen; dies wurde allerdings erst etwa 15 Jahre nach Carnots Tod von Kelvin<sup>5</sup> herausgearbeitet [11]. Carnot war der erste, der den Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit erkannte. Bei der Herleitung der nach ihm benannten Formel ging Carnot allerdings von einer falschen Vorstellung aus. Er glaubte der von Lavoisier<sup>6</sup> entwickelten Theorie von einem Wärmestoff, einer Art gewichtslosen Flüssigkeit. So wie sich die Wassermenge bei der Strömung durch ein Wasserrad nicht ändert, glaubte Carnot auch, dass der Wärmestoff beim Durchströmen der Dampfmaschine erhalten bleibt. Nach Carnots Vorstellung konnte die Maschine Arbeit leisten, weil der Wärmestoff von der heißen Quelle zum kühlen Kondensator fließt.

Die Äquivalenz von Wärme und mechanischer Arbeit war damals noch nicht erkannt, sie wurde erst von den Forschern der nächsten Generation formuliert. 1842 haben Mayer<sup>7</sup>

---

<sup>4</sup> Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832), französischer Physiker.

<sup>5</sup> Lord Kelvin of Largs, vorher Sir William Thomson (1824–1907), schottischer Physiker.

<sup>6</sup> Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794), französischer Chemiker.

<sup>7</sup> Julius Mayer (1814–1878) präsentierte eine Abschätzung des mechanischen Wärmeäquivalents und formulierte noch vor Joule und Helmholtz den Satz von der Erhaltung der Energie. In Anerkennung seiner Leistung wurde ihm vom württembergischen König der Adelstitel „von“ verliehen, vgl. [12], [14].

und Joule<sup>8</sup> experimentell bewiesen, dass Wärme nicht erhalten bleibt, sondern z. B. in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann.

Nachdem die Stofftheorie der Wärme widerlegt war, trat an ihre Stelle zunächst die *mechanische Wärmetheorie*. Diese Theorie gründete auf der Annahme, dass die ganze Physik auf die Mechanik zurückzuführen sei. Einen wesentlichen Beitrag dazu und gleichzeitig eine Anregung zu ihrer Überwindung gab 1847 Helmholtz mit seiner Arbeit: „*Über die Erhaltung der Kraft*“ [7]. Darin stellt er den Ansatz dar, mit dem sich die Phänomene Wärme, Licht, Elektrizität und Magnetismus durch Wirkung einer *lebendigen Kraft* erklären lassen, die später als Energie bezeichnet wurde. Im Rückblick wird deutlich, dass die Entwicklung auf den Energieerhaltungssatz zusteuerte.

Bemerkenswert ist, dass zwischen 1842 und 1854 die Hypothese von der Energieerhaltung von zwölf in weiter Entfernung voneinander arbeitenden Wissenschaftlern öffentlich geäußert wurde und dass sechs von diesen Pionieren aus dem Gebiet des 1871 gegründeten Deutschen Reiches stammten, neben zweien aus deutsch beeinflussten Regionen. Der amerikanische Wissenschaftshistoriker Thomas Kuhn [10] verweist zur Erklärung dieser Häufung auf den Philosophen Schelling<sup>9</sup>, der bereits 1799 in seinen Vorlesungen an der Universität Jena

*ein einigendes Prinzip aller Naturvorgänge hervorhob und behauptete, dass die magnetischen, elektrischen, chemischen und endlich auch die organischen Erscheinungen in einem großen Zusammenhang verflochten (sind), ... der sich über die ganze Natur (erstreckt).*

Noch vor der Erfindung der Akkumulatoren behauptete Schelling, dass

*ohne Zweifel ... im Licht, in der Elektrizität usw. nur eine Kraft als in ihren verschiedenen Erscheinungen hervortritt.* [15]

Der Widerspruch zwischen Carnot und den experimentellen Ergebnissen von Mayer und Joule wurde von Clausius<sup>10</sup> aufgelöst. In einer präzisen Analyse befreite er Carnots Argumentation von der Annahme eines Wärmestoffs und zeigte Wege auf, um Wärme mit dem Verhalten von Materieteilchen zu erklären [5]. Er leitete damit die Entwicklung der modernen Thermodynamik ein, er gilt zusammen mit Carnot, Mayer, Joule und Kelvin als deren Begründer. Unter dem merkwürdigen Namen Thermodynamik verbirgt sich einer der fruchtbarsten Zweige der Physik. Sie ist nach Einstein „*die einzige physikalische*

<sup>8</sup> James Prescott Joule (1818–1889), englischer Physiker, er bestimmte das Wärmeäquivalent experimentell fundiert, so dass die wissenschaftliche Welt es anerkennen musste. Er hat 1840 die Formel für die Wärmeentwicklung durch elektrischen Strom gefunden, heute „Joulesche Wärme“ genannt. Joule zu Ehren wird die Einheit der Energie „Joule (J)“ genannt.

<sup>9</sup> Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (1775–1854), als Philosoph Hauptvertreter des Deutschen Idealismus.

<sup>10</sup> Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822–1888), als Rudolf J. E. Gottlieb geboren, nahm er im Trend seiner Zeit den klassischen Namen Clausius an. Er war einer der ersten theoretischen Physiker. Er stellte mathematische Theorien auf, die die Beobachtungen und Experimente anderer Wissenschaftler erklären konnten.

*Theorie allgemeinen Inhalts, von der er überzeugt ist, dass sie im Rahmen der Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe niemals umgestoßen werden wird“ [16]. Die Aussagen der Thermodynamik lassen sich in vier Erfahrungssätzen zusammenfassen, die das Verhalten thermodynamischer Systeme beschreiben und Hauptsätze heißen.*

Der **nullte Hauptsatz**, der erst nach den drei übrigen formuliert wurde, aber von grundlegender Bedeutung ist, begründet das Konzept der Temperatur. Er besagt, dass jeder Körper eine Eigenschaft besitzt, die wir Temperatur nennen, und dass zwei Körper, die sich berühren, einem Gleichgewicht zustreben, in dem ihre Temperaturen sich ausgleichen. Damit wird die Temperatur als eine Größe definiert, die das thermische Gleichgewicht zwischen zwei Körpern feststellt, mag es sich dabei um ein bestimmtes Volumen Wasser oder einen Metallblock handeln. Denn so verschieden die sich im thermischen Gleichgewicht befindlichen Körper auch sein mögen, ihre Temperatur ist dieselbe.

Der **erste Hauptsatz** sagt:

*Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, die Größe Energie erfüllt einen Erhaltungssatz.*

Wenn z. B. ein Gummiball der Masse  $m$  mit der Geschwindigkeit  $v$  zu Boden geworfen wird, kommt er nach einiger Zeit zur Ruhe. Dabei wird seine kinetische Energie  $\frac{1}{2}mv^2$  infolge der inneren Reibung des Ballmaterials in „innere Energie“ umgewandelt, die um  $\Delta Q = \frac{1}{2}mv^2$  zunimmt. Die innere Energie des Balls ist über die chaotische Wärmebewegung seiner Moleküle mit seiner Temperatur  $\vartheta$  verknüpft:  $Q = cm\vartheta$ ; so dass sich schließlich eine Erhöhung der Balltemperatur um

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta Q}{cm} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{cm}$$

ergibt.  $c$  steht für die spezifische Wärme des Materials, aus dem der Ball besteht.

Die ursprünglich kinetische Energie des Balls wurde in fühlbare Wärme umgewandelt, womit der Energieerhaltungssatz erfüllt ist.

Der **zweite Hauptsatz** gibt trotz seines Alters immer noch Anlass zu Diskussionen. Er basiert auf der Erfahrung, dass es zwar für die Umwandlung von Arbeit in Wärme keine Grenzen gibt, wohl aber für den umgekehrten Vorgang. Aufgrund der Asymmetrie zwischen Wärme und Arbeit privilegiert der zweite Hauptsatz unter den Vorgängen, die nach dem ersten Hauptsatz möglich wären, jene, die in eine bestimmte Richtung verlaufen und trägt somit der Erfahrung Rechnung, dass zahlreiche physikalische Vorgänge offenbar nicht umkehrbar sind. Es wäre z. B. ein bisher noch nie beobachtetes Wunder, wenn der auf dem Boden liegende Ball in unserem vorstehenden Beispiel sich spontan abkühlen und wieder mit der Geschwindigkeit  $v$  in die Höhe springen würde.

Eine quantitative Formulierung des Satzes ist durch Einführung des thermodynamischen Begriffs der Entropie  $S$  möglich:

*Natürliche Vorgänge innerhalb eines geschlossenen Systems sind stets mit einer Zunahme der Entropie verbunden.*

Die Entropieänderung eines Systems  $\Delta S$  infolge einer infinitesimalen Wärmezufuhr  $\vartheta Q_{rev}$ , die reversibel<sup>11</sup> bei einer Temperatur  $T$  vor sich geht, ist definiert als:

$$\Delta S = \frac{\vartheta Q_{rev}}{T} \quad (2.2)$$

Im Unterschied zur Energie gilt für die Entropie kein Erhaltungssatz; ihr Wert kann sich bei Abnahme nur durch Austausch mit einem anderen System verringern, bei Zunahme aber auch durch Erzeugung erhöhen. Die Entropie erfüllt damit sozusagen nur einen halben Erhaltungssatz in Richtung der Abnahme: Nimmt in einem System beim Übergang von einem Zustand in einen anderen die Entropie um  $\Delta S$  ab, muss gleichzeitig in einem anderen System, z. B. seiner Umgebung, die Entropie um  $\Delta S$  zunehmen. Clausius hat das so formuliert:

*Die Energie der Welt ist konstant – die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.*

Der **dritte Hauptsatz**<sup>12</sup> betrifft Systeme mit sehr niedrigen Temperaturen. Er sagt aus, dass es unmöglich ist, den absoluten Nullpunkt der Temperatur ( $-273,15^\circ\text{C}$ ) in einer endlichen Zahl von Schritten zu erreichen.

### Energie

Der Energiebegriff in seiner heutigen Bedeutung wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts eingeführt, um eine Reihe von scheinbar unzusammenhängenden Erscheinungen einer gemeinsamen Beschreibung und quantitativen Berechnung zugänglich zu machen. Dazu wurden die verschiedenen Energieformen, die einem materiellen System zukommen können, additiv zu seiner Gesamtenergie  $E$  zusammengefasst:

$$E = E_{kin} + E_{pot} + U + E_{chem} + E_{nuk} + E_{el} + E_{mag} \quad (2.3)$$

Die Gesamtenergie eines materiellen Systems setzt sich damit additiv zusammen aus:

- der *kinetischen Energie*  $E_{kin}$  aufgrund seiner Bewegung
- der *potentiellen Energie*  $E_{pot}$  aufgrund seiner Lage
- der *inneren Energie*  $U$  aufgrund der thermischen Bewegung seiner Moleküle
- der *chemischen Energie*  $E_{chem}$  seiner Moleküle, die mit einer Veränderung der Molekülstruktur verbunden ist
- der *nuklearen Energie* seiner Atomkerne, die bei Kernspaltungen bzw. Kernfusionen frei wird
- der elektrischen  $E_{el}$  und magnetischen  $E_{mag}$  Energie. Moleküle mit einem elektrischen oder einem magnetischen Dipol können Energie speichern, wenn sie sich in elektrischen oder magnetischen Feldern befinden. Diese Energieformen resultieren aus der Wechselwirkung der molekularen Dipole mit den elektrischen Ladungen und Strömen, die die externen elektrischen und magnetischen Felder hervorrufen.

<sup>11</sup> Die reversible Zufuhr von Wärme zu einem System ist als Grenzfall denkbar, aber in der Wirklichkeit nur in großer Annäherung realisierbar.

<sup>12</sup> Der 3. Hauptsatz wurde von dem Physikochemiker Walter Ernst (1864–1941) entdeckt.

Die Energieformen sind Zustandsgrößen in dem Sinne, dass ihr Zahlenwert nur von dem momentanen Zustand des betrachteten Objekts abhängt und nicht davon, wie es in diesen Zustand gelangt ist.

Nach dem ersten Hauptsatz gilt für die Energie ein Erhaltungssatz. Wenn wir z. B. dem in Rede stehenden System die Wärmemenge  $\Delta Q$  zuführen und das System die Arbeit  $\Delta W$  an seine Umgebung abgibt, verlangt der erste Hauptsatz unter Berücksichtigung von Gl. 2.3 eine Änderung seiner Gesamtenergie um

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta W. \quad (2.4)$$

Alle Energieformen werden in der Einheit *Joule* (J) angegeben; diese ist definiert als

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}.$$

---

## 2.3 Kreisprozesse zur Umwandlung von Wärme in Arbeit

Größte Herausforderung bei der Herstellung von Dampfmaschinen war bis ins 19. Jahrhundert die maßgenaue Fertigung der Dampfzylinder und Kolben. Maßdifferenzen von bis zu 2 % des Zylinderdurchmessers waren nicht ungewöhnlich. Das Bedürfnis für die Erkundung der Vorgänge bei der Energiewandlung entstand erst, nachdem es Wilkinson<sup>13</sup> um 1800 gelungen war, Dampfzylinder mit einer Genauigkeit von 0,1 % des Zylinderdurchmessers herzustellen. Zur weiteren Verbesserung der Dampfmaschinen trat danach die von Carnot begonnene Erforschung der Energiewandlung in den Vordergrund.

Die Umwandlung von Wärme in Arbeit wird mit Hilfe von thermodynamischen Kreisprozessen durchgeführt. Dabei wird einem Arbeitsmittel, etwa einem Dampf oder Gas, das sich in einer Maschine befindet, zunächst Hochtemperaturwärme zugeführt. Im daran anschließenden Schritt leistet das Arbeitsmittel in der Maschine mechanische Arbeit, die als Nutzarbeit entnommen werden kann, und gibt schließlich Niedertemperaturwärme ab. Ein Kreisprozess ist dadurch ausgezeichnet, dass der Endzustand des Arbeitsmittels wieder mit dem Ausgangszustand identisch ist.

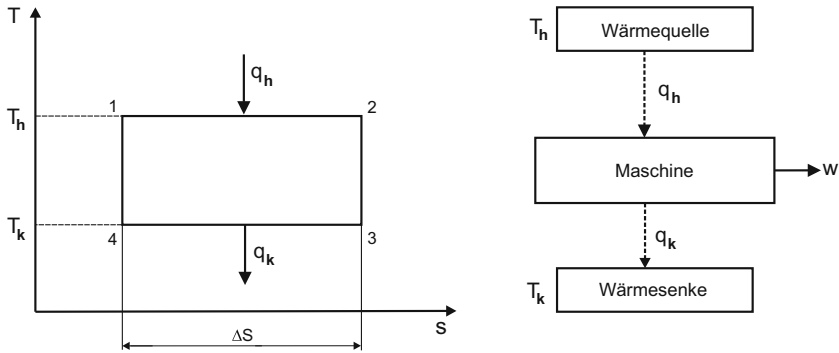
**Carnot-Prozess** Unter den Kreisprozessen nimmt der von Carnot 1824 eingeführte eine besondere Rolle ein. Er hat zwar nur eine geringe praktische Bedeutung, illustriert aber in klarer Weise die durch den zweiten Hauptsatz gesetzten Grenzen für die Umwandlung von Wärme in Arbeit.

Für die Durchführung nehmen wir an, dass die Carnot-Maschine ihren Zustand nur reversibel verändert und den Prozess zyklisch durchläuft, vgl. Abb. 2.2. Die Maschine entnimmt aus einer Wärmequelle der Temperatur  $T_h$  die Wärmemenge  $q_h$ , erzeugt daraus die Arbeit  $w$  und gibt die Differenzwärme  $q_k = q_h - w$  an eine Wärmesenke der Temperatur  $T_k$  ab. Damit folgt aus dem Erhaltungssatz der Energie für die aus dem Prozess entnehmbare mechanische Arbeit  $w$ :

$$w = q_h - q_k \quad (2.5)$$

---

<sup>13</sup> John Wilkinson (1728–1808) gilt als Erfinder der Zylinderbohrmaschine.



**Abb. 2.2** Carnot-Prozess mit einem idealen Gas als Arbeitsmittel. Der Prozess setzt sich zusammen aus einer isothermen (1–2) und einer isentropen (2–3) Expansion sowie einer isothermen (3–4) und einer isentropen (4–1) des Gases. Während der isothermen Expansion wird die Wärme  $q_h$  aus einer Quelle zugeführt und bei der isothermen Kompression die Wärme  $q_k$  in eine Wärmesenke abgegeben

Aus dem Temperatur-Entropie Diagramm Gl. 2.1 folgt, dass der Carnot-Prozess nur dann geschlossen, d. h. das Arbeitsmittel wieder in seinen anfänglichen Zustand gebracht werden kann, wenn der Anstieg der Entropie des Arbeitsmittels  $\Delta S$  infolge der Wärmezufuhr  $q_h$  durch eine gleichgroße Entropieabnahme infolge Abgabe der Wärme  $q_k$  vom Arbeitsmittel an die Umgebung ausgeglichen wird; damit gilt:

$$\frac{q_h}{T_h} = \frac{q_k}{T_k} \quad (2.6)$$

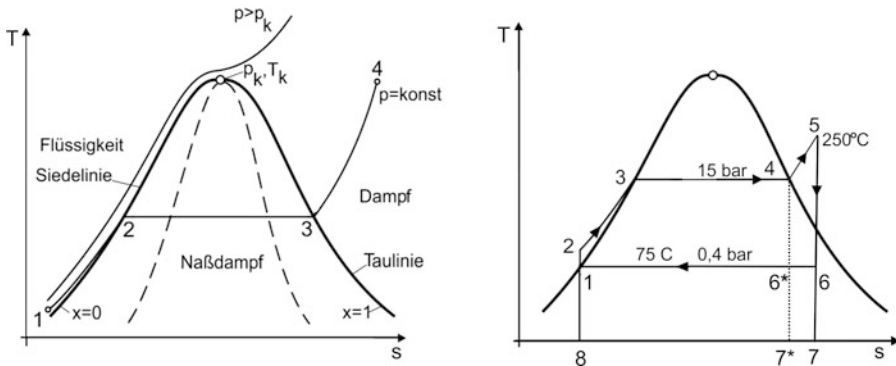
Gl. 2.5 sagt, dass Wärme und Arbeit gleichwertige Energieformen sind und aus Gl. 2.6 folgt, dass es unmöglich ist, mit einer Maschine verfügbare Wärme vollständig in Arbeit umzuwandeln: immer muss dazu als Tribut ein Teil der zugeführten Wärme in eine Senke abgegeben werden.

Eine wichtige Größe für die Bewertung eines Prozesses zur Energiewandlung ist der Wirkungsgrad. Darunter versteht man das Verhältnis zwischen der vom Prozess abgegebenen Arbeit zu der dem Prozess zugeführten Wärme. Durch Kombination der beiden Relationen Gl. 2.5 und 2.6 folgt für den thermischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses:

$$\eta_{th} = \frac{w}{q_h} = 1 - \frac{q_k}{q_h} = 1 - \frac{T_k}{T_h} \quad (2.7)$$

Der Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  der reversiblen Carnot-Maschine hängt weder von deren Konstruktion noch vom verwendeten Arbeitsmittel ab, sondern nur von den Temperaturen der beiden Wärmespeicher. Es kann gezeigt werden, dass es keine Maschine gibt, die die reversible Carnot-Maschine im Wirkungsgrad übertrifft.





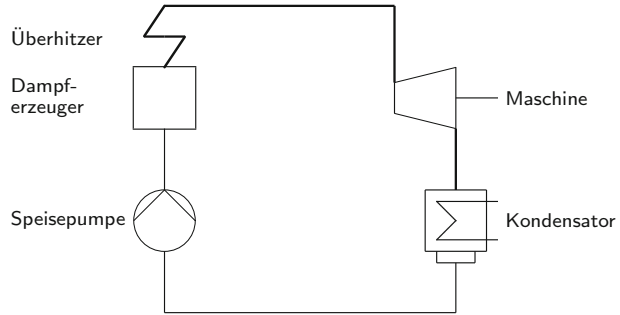
**Abb. 2.3** a Das linke Teilbild zeigt das  $T$ - $s$ -Diagramm für Wasser; ( $p_k = 221,20 \text{ bar}$ ,  $T_k = 374,15^\circ\text{C}$ ) ist der kritische Punkt, in dem die gasförmige und flüssige Phase in all ihren Eigenschaften übereinstimmen. Oberhalb seiner kritischen Temperatur lässt sich ein Gas nicht verflüssigen. b Das rechte Teilbild zeigt einen Sattdampfprozess (1–2–3–4–6\*–1) und einen Dampfprozess mit Überhitzung (1–2–3–4–5–6–1). Beide Prozesse wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts bei Kolbendampfmaschinen angewandt. Die Überhitzung wird mit zunehmendem Frischdampfdruck notwendig, weil dann der Endpunkt der Entspannung mehr und mehr im Nassdampfgebiet endet. Die im rechten Teilbild eingetragene Überhitzung auf  $250^\circ\text{C}$  bringt einen Anstieg des Wirkungsgrades von den 21,1 % des Sattdampfprozesses auf 23,5 %. (1–2) isentrope Verdichtung, (2–3–4–5) isobare Wärmezufuhr im Kessel, (5–6) isentrope Expansion in der Maschine, (6–1) isobare Kondensation

**Dampfkraftprozess** Bei der Realisierung von Dampfprozessen wird mit einer heterogenen Substanz gearbeitet, die im Verlauf des Prozesses als Flüssigkeit und als Dampf auftritt. In den Anwendungen wird als Arbeitsmittel fast ausschließlich Wasser verwendet. Für die Durchführung des Prozesses wird der Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur des gesättigten Wasserdampfes genutzt. Dazu wird Wasser im Kessel bei der Temperatur  $T_1$  und dem zugehörigen Siededruck  $p_1$  durch Wärmezufuhr verdampft und, nach der Arbeitsleistung in der Maschine, bei geringerem Druck und niedrigerer Temperatur  $T_2$  kondensiert.

Im rechten Teilbild von Abb. 2.3 ist mit dem Linienzug (1–2–3–4–6\*–1) ein Prozess dargestellt, wie er um 1890 in Dampfmaschinen durchgeführt wurde. Die hier noch geringen Abweichungen zum Idealprozess, dem Carnot-Prozess, bestehen darin, dass die Kompression nicht im Nassdampfgebiet durchgeführt wird und so die Wärmezufuhr bei einer niedrigeren Temperatur als der oberen Prozesstemperatur beginnt. Noch deutlicher sind die Abweichungen für den Prozess mit Überhitzung, vgl. Linienzug (1–2–3–4–5–6–1) in Abb. 2.3.

Dem ersten Anschein nach war die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften des Wasserdampfes keine Voraussetzung für die ersten Schritte der Dampftechnik. Für die Dimensionierung der größer werdenden Maschinen wurde die Kenntnis der thermischen

**Abb. 2.4** Notwendige Komponenten einer Dampfkraftanlage



und stofflichen Eigenschaften des Wasserdampfes aber unerlässlich. Deshalb führte Watt selbst im Jahr 1764 Versuche aus, um den Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur des gesättigten Wasserdampfes festzustellen [2]. Seine Ergebnisse aus dem Jahr 1764 erfassten den Druckbereich zwischen 0,01 ata und 4 ata<sup>14</sup>. Die Dampftechnik und die Wasserdampfforschung waren so von Anfang an miteinander verknüpft.

Die Einführung der Temperatur-Entropie Diagramme ( $T$ - $s$ -Diagramme) für Wasserdampf zur Darstellung des Prozessverlaufes wurde 1874 von Belpaire<sup>15</sup> eingeführt [17], vgl. Abb. 2.3. Das  $T$ - $s$ -Diagramm war für die Technik ein großer Fortschritt, weil sich die dem Dampfprozess zu- und abgeführten Wärmemengen als Flächen darstellen ließen. Eine große Verbesserung brachte dann 1904 die Einführung des Begriffs Enthalpie als Variable zur Beschreibung der Zustandsänderungen durch Mollier<sup>16</sup> und des Enthalpie-Entropie Diagramms ( $h$ - $s$ -Diagramm) [13]. Die Entropie  $h$  ist definiert als:

$$h = u + pv \quad (2.8)$$

Hierbei ist  $u$  die *innere Energie*<sup>17</sup> pro Masseneinheit,  $p$  der Druck und  $v$  das spezifische Volumen des Arbeitsmittels.

Das in Abb. 2.3 beispielhaft für einen Dampfprozess mit Überhitzung dargestellte  $h$ - $s$  Diagramm ist eines der gebräuchlichsten Hilfsmittel für die thermodynamische Berechnung und die Darstellung von Dampfkraftprozessen. Der sich aus der Nutzung ergebende Vorteil liegt darin, dass sich sowohl die isobar im Kessel zugeführten und im Kondensator abgegebenen Wärmemengen als auch die in der Turbine entnommene und die in der Speisepumpe zugeführte Arbeit als Längen abgreifen lassen.

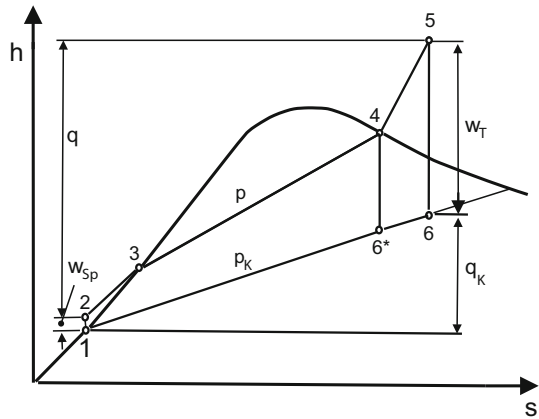
<sup>14</sup> ata ist eine veraltete, nicht SI-konforme Druckeinheit und steht für Technische Atmosphäre; 1 ata war definiert als Druck einer 10 m hohen Wassersäule.

<sup>15</sup> Alfred Belpaire (1820–1903), belgischer Eisenbahningenieur.

<sup>16</sup> Richard Mollier (1863–1935), Professor für Maschinenbau an der TH Dresden, war Pionier der modernen Wasserdampf-Forschung.

<sup>17</sup> Für Anwendungen in der Dampftechnik ist die innere Energie nur eine Funktion der Temperatur. Es gilt  $u = c_v T$ ,  $c_v$  ist die spezifische Wärme.

**Abb. 2.5** Clausius-Rankine-Prozess für überhitzten Dampf im Mollier  $h$ - $s$ -Diagramm. Die Wärmezufuhr im Kessel und die Wärmeabgabe im Kondensator erfolgen längs der Isobaren  $p = \text{konst}$  bzw.  $p_o = \text{konst}$



### Enthalpie

Für den Begriff Enthalpie gibt es eine einfache physikalische Interpretation. Wir betrachten dazu als System die Einheitsmasse eines Fluids in einer Umgebung mit einem konstanten Druck, der gleich dem Druck  $p$  im Fluid sei. Wenn eine kleine Wärmemenge  $dq$  dem System zugefügt wird, erhöht sich seine Temperatur um  $dT$ , weiter vergrößert sich sein Volumen infolge der Wärmeausdehnung um  $dv$ . Zur Zunahme des Volumens muss gegen den Umgebungsdruck die Arbeit  $p dv$  geleistet werden. Nach dem ersten Hauptsatz gilt für die Änderung der inneren Energie  $e$ :

$$de = dq - p dv$$

Wegen  $p = \text{konst}$  ist auch:

$$dq = de + p dv = de + d(pv) = d(e + pv) = dh$$

Die einem System unter konstantem Druck zugeführte Wärme  $dq$  entspricht der Änderung der Enthalpie des Systems.

Im allgemeinen Fall gilt:

$$dq = de + p dv = de + d(pv) - p dv = dh - v dp$$

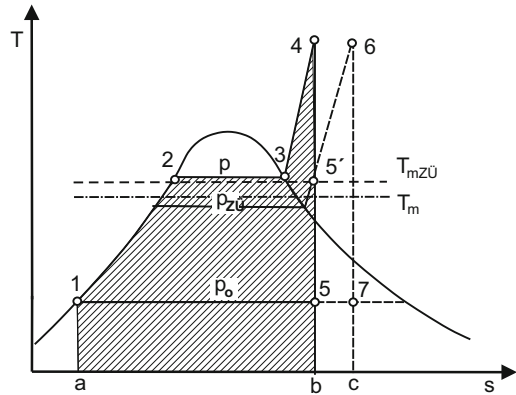
und in integraler Form:

$$\Delta q = \Delta h - \int_1^2 v dp = \Delta h - \Delta w$$

Hierbei ist  $\Delta w$  die dem System an der Welle der Dampfmaschine bzw. Turbine entnehmbare Arbeit. Bei einer isentropen Zustandsänderung ( $s = \text{konst}$ ,  $\Delta q = 0$ ) gilt:

$$\Delta h = \Delta w$$

**Abb. 2.6**  $T$ - $s$ -Diagramm eines Prozesses mit Zwischenüberhitzung (ZÜ). *Schraffierte Fläche*: Einfacher Prozess ohne ZÜ.  $T_m$ : Mittlere Temperatur der Wärmezufuhr des einfachen Prozesses,  $T_{mZÜ}$ : Mittlere Temperatur des Prozesses mit ZÜ



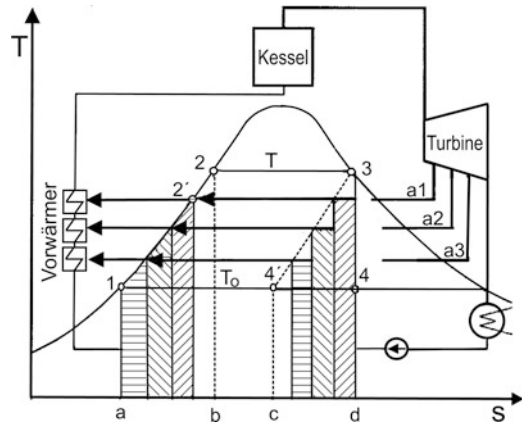
Angeregt durch die Arbeiten von Joule beschäftigte sich William Siemens<sup>18</sup> mit der Erhöhung des Wirkungsgrades von Dampfmaschinen und allgemein der Umsetzung von Wärme in Arbeit. Er baute eine Regenerativ-Dampfmaschine, bei welcher der Dampf vor Eintritt in die Maschine überhitzt wurde. Nach dem Ausströmen aus dem Expansionszylinder wurde der austretende Sattdampf in einer anschließenden Stufe durch Zumischen von überhitztem Dampf erneut überhitzt und wieder zur Arbeitsleistung herangezogen. Siemens hat seine Regenerations-Dampfmaschine auf der Pariser Weltausstellung 1855 vorgestellt [3]. Er hat damit als einer der ersten die Überhitzung und Zwischenüberhitzung in die Dampftechnik eingeführt. Allerdings konnten die Ideen von William Siemens erst mittels der Dampftafel begründet werden.

Nach Gl. 2.7 ist klar, dass zur optimalen Gestaltung des Wirkungsgrades die zugeführte Wärmemenge möglichst groß und die abgeführte möglichst klein gehalten werden muss. Aus Abb. 2.3 ist zu erkennen, dass die zugeführte Wärmemenge sowohl mit der Temperatur als auch dem Druck des Frischdampfes zunimmt. Das gilt auch für den Wirkungsgrad, der sich aus dem Verhältnis der Flächen (1–2–3–4–5–6–1) und (8–1–2–3–4–5–6–7–8) ergibt.

Der Erhöhung der Wärmezufuhr durch Anhebung der Frischdampf Temperatur sind Grenzen gesetzt, da die Festigkeit der Werkstoffe die zulässige Dampftemperatur begrenzt. Bei einem vorgegebenen Arbeitsdruck  $p$  kann pro Masseneinheit des Arbeitsmittels nur eine Wärmemenge entsprechend der Fläche a–1–2–3–4–b zugeführt werden, vgl. Abb. 2.6. Diese Beschränkung lässt sich durch die Zwischenüberhitzung umgehen. Aufgrund der Zwischenüberhitzung erhöht sich die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr

<sup>18</sup> Karl Wilhelm (Sir William) Siemens (1823–1883) gehörte zu einer deutsche Erfinderdynastie, deren Anfang auf seinen älteren Bruder Werner Siemens zurückgeht. Er ging 1842 nach England, um ein neuartiges Verfahren zur Elektrobeschichtung von Metallen einzuführen, das er zusammen mit seinem Bruder Werner entwickelt hatte. Dabei stellte er fest, dass das englische Patentrecht schützender war als das deutsche. Er blieb deshalb in England, erhielt 1859 die englische Staatsbürgerschaft und wurde 1862 in die Royal Society gewählt.

**Abb. 2.7** Regenerative Speisewasservorwärmung und Carnotisierung des Clausius-Rankine-Prozesses im  $T$ - $s$ -Diagramm. Das Bild zeigt eine dreistufige Anzapfung. Dampf wird mittels der Anzapfungen a1 bis a3 entnommen und den Vorwärmern zugeführt



und damit auch der Wirkungsgrad. Die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr ist dabei nichts anderes als die obere Temperatur eines dem Clausius-Rankine-Prozess gleichwertigen Carnot-Prozesses.

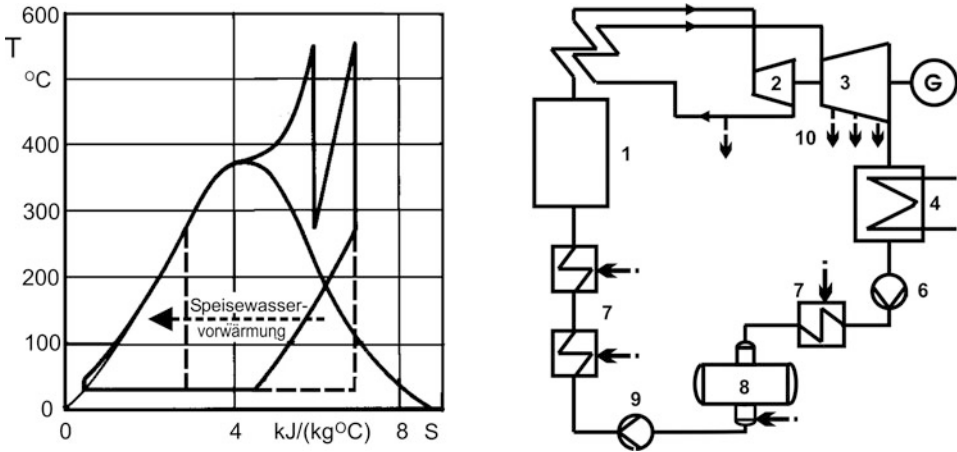
Eine weitere Möglichkeit zur Annäherung an den Carnot-Prozess ergibt sich durch die Vorwärmung des Speisewassers. Dieses Verfahren ist für einen Sattdampfprozess in Abb. 2.7. Bei diesem Verfahren wird ein Teil des Arbeitsdampfes aus der Maschine entnommen und zur Vorwärmung des Speisewassers benutzt. Die Kondensationswärme des Anzapfdampfes wird dabei dem Speisewasser als Flüssigkeitswärme zugeführt und bleibt daher im Prozess enthalten. Bei theoretisch unendlich vielen Anzapfstufen wird die gestrichelte Linie  $4'-3$  verwirklicht und damit eine vollkommene Carnotisierung mit Erreichen des Carnot-Wirkungsgrades erzielt.

Aus der regenerativen Speisewasservorwärmung resultieren Sekundärwirkungen, die zu einer zusätzlichen Verbesserung des Prozesses bei mit Turbinen betriebenen Anlagen führen. So kommt es durch die Anzapfung zu einer Verminderung des Dampfstroms im Niederdruckteil der Turbine und zu einer Erhöhung im Hochdruckteil. Damit verbunden ist eine Verringerung der sogenannten Spaltverluste. Ferner kommt es zu einer Verminderung der Kondensatdampfmenge, was zu einer Verkleinerung des Kondensators führt.

Die genannten Prozessverbesserungen:

- Erhöhung des Frischdampfzustandes
- Zwischenüberhitzung des Arbeitsmittels
- Regenerative Speisewasservorwärmung

wurden von Anfang an zusammen angewandt und aufeinander abgestimmt. In Abb. 2.8 ist das Schema eines Dampfprozesses mit Zwischenüberhitzung und regenerativer Speisewasservorwärmung dargestellt. Praktisch geht man wegen der Komplizierung der technischen Durchführung nicht über 9 Vorwärmstufen hinaus.



**Abb. 2.8** a Das linke Teilbild zeigt das  $T$ - $s$ -Diagramm für einen Prozess mit Zwischenüberhitzung und regenerativer Speiswasservorwärmung. b Rechts das Schaltschema des Prozesses mit den notwendigen Komponenten. 1: Kessel, 2: Hd-Turbine, 3: ND-Turbine, 4: Generator, 5: Kondensator, 6: Kondensatpumpe, 7: Vorwärmer, 8: Entgaser/Speiswasserbehälter, 9: Speisepumpe, 10: Anzapfungen

Damit bestehen zur Anhebung des Wirkungsgrads drei Möglichkeiten:

- Anhebung der Dampfparameter
- Zwischenüberhitzung
- regenerative Speiswasservorwärmung

Für die Beurteilung der Güte der Energiewandlung in einem Kraftwerk ist in der Energiewirtschaft der Begriff des Wärmeverbrauchs  $w$  gebräuchlich. Für die Umrechnung gilt die Beziehung:

$$w = 1/\eta$$

Wird der Wärmeverbrauch in kJ/kWh und der Wirkungsgrad in Prozent angegeben, lautet die Zahlenwertgleichung

$$w = 3600 \cdot 100/\eta$$

Der Nettowirkungsgrad  $\eta_N$  eines Kraftwerkes errechnet sich nach:

$$\eta_N = \eta_{DK} \cdot \eta_K \cdot \eta_G \cdot \eta_T \cdot \left[ 1 - \frac{P_{EB}}{P_G} \right]$$

Hierbei sind:

$\eta_{DK}$  Wirkungsgrad des Dampfkreislaufs

$\eta_K$  Wirkungsgrad des Kessels

$\eta_G$  Wirkungsgrad des Generators

$\eta_T$  Wirkungsgrad des Transformators

$P_{EB}$  Eigenbedarf des Kraftwerks für den Betrieb der Hilfsmaschinen

$P_G$  Generatorleistung

Die Nettowirkungsgrade moderner Kraftwerke betragen im Auslegungspunkt 40 bis 45 Prozent, entsprechend liegt der Wärmebedarf für eine kWh erzeugtem Strom zwischen 8000 und 9000 kJ.

**Wasserdampfforschung** Die Bedeutung der Wasserdampfforschung für die Dampftechnik wurde bereits früh erkannt und zunächst unabhängig voneinander von Wissenschaftlern verschiedener Länder betrieben. Gründer dieser Forschungsrichtung in Deutschland waren Richard Mollier von der TH Dresden [13] und Oscar Knoblauch<sup>19</sup> vom Laboratorium für technische Physik der TU München [9]. Ziel der frühen Forschungen war es, experimentell den Zusammenhang zwischen Enthalpie, Druck und Temperatur im thermodynamischen Gleichgewicht zu ermitteln. Wegen der internationalen Verflechtung der Wissenschaft und Wirtschaft war ein Abgleich der in verschiedenen Ländern entwickelten Diagramme und Tabellen wichtig, denn die Abweichung der einzelnen Dampftafeln untereinander war so groß, dass sich die thermischen Wirkungsgrade ein und derselben Maschine um bis zu 5 % unterscheiden konnten.

Die erste internationale Dampftafelkonferenz, an der Forscher aus Kanada, England, Deutschland, den USA und der damaligen Tschechoslowakei teilnahmen, fand 1929 in London statt [6]. Die heutige Nachfolgerin dieser Konferenz ist die „International Association for the Properties of Steam“, kurz „IAPWS“ genannt, die sich als „non-profit“-Zusammenschluss der nationalen Komitees der Wasserdampf-Forschung versteht<sup>20</sup>. In Deutschland ist dies die VDI-Gesellschaft für Energie und Umwelt. Die 15. IAPWS Konferenz fand im Herbst 2008 in Berlin statt.

---

## 2.4 Resümee

Durch den kommerziellen Erfolg der Dampfmaschine wurden Mitte des 19. Jahrhunderts zahlreiche Untersuchungen zur Analyse der dabei ablaufenden mechanischen Vorgänge und der thermischen Prozesse angeregt. Obwohl die Beherrschung der mechanischen Abläufe noch in den Anfängen steckte, rückte die Untersuchung ihres Grundprinzips, die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie, in den Vordergrund. Es kam zu einem intensiven Austausch von Erkenntnissen zwischen Forschern, die sich mit der naturwissenschaftlichen Begründung der Vorgänge befassten, und Ingenieuren, die sich mit der Entwicklung einer technischen Wärmelehre beschäftigten. Herausragende Beiträge

---

<sup>19</sup> Oscar Knoblauch (1862–1946) war ab 1910 Professor für technische Physik an der damals Königlich Technischen Hochschule München.

<sup>20</sup> iapws.com

kamen von William Rankine<sup>21</sup> und Rudolf Zeuner<sup>22</sup>. Für die Beschreibung des Dampfkraftprozesses verwendete Rankine den von Clausius in die Thermodynamik eingeführten Begriff des Kreisprozesses.

---

## Literatur

1. Adams, B.: The Law of Civilization and Decay. S. 259 f. Swan Sonnenschein & Co, London (1895). Reprint: British Library (2010). Deutsch: Das Gesetz der Zivilisation und des Zerfalls. Akademie Verlag, Wien/Leipzig (1907)
2. Bonin, H.: Die Entwicklung der wärmewirtschaftlichen Grundlagen des Kesselbaus. Archiv Wärmewirtschaft **13**, 57–68 (1932)
3. Brockhaus Enzyklopädie, Bd. 2, S. 122 (1967)
4. Carnot, N. L. S.: Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen. In: Ostwald, W. (Hrsg.) Ostwald's Klassiker der exakten Naturwissenschaften, Bd. 37. Engelmann, Leipzig (1892)
5. Clausius, R.: Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. Poggendorffs Annalen **79**, 368–397, 500–524 (1850)
6. Die erste internationale Dampftafelkonferenz. VDI-Zeitschrift **73**, 1856–1858 (1929)
7. von Helmholtz, H.: Über die Erhaltung der Kraft. In: W. Ostwald (Hrsg.) Ostwald's Klassiker der exakten Naturwissenschaften, Bd. 1. Engelmann, Leipzig (1847). Reprint: Deutsch, Frankfurt am Main (1996)
8. Hoffmann, D. (Hrsg.): Max Planck und die moderne Physik, S. 52–56. Springer, Berlin (2010)
9. Knoblauch, O., Raisch, E., Hausen, H.: Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. Oldenbourg, München (1932)
10. Kuhn, T. S.: Die Entstehung des Neuen, S. 146 f. Suhrkamp (1978)
11. Lord Kelvin of Largs (William Thomson): On an absolute thermometric scale. Philosophical Magazine, London, October 1848
12. Mayer, R.: Bemerkungen über die Kräfte in der unbelebten Natur. Annalen der Chemie und Pharmacie, Leipzig (1842)
13. Mollier, R.: Neue Diagramme zur technischen Wärmelehre. VDI-Zeitschrift **48**, 271–275 (1904)
14. Müller, I.: A history of Thermodynamics: the Doctrine of Energy and Entropy. Springer, Berlin (2007)
15. Schellings Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie (1799), Werke, Bd. 3, Stuttgart/Augsburg (1858). Zitiert nach Kuhn, T. S.: Die Entstehung des Neuen. Suhrkamp (1978)
16. Schlipp, P. A. (Hrsg.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist. The Library of Living Philosophers, Bd. VII. Evanston, IL (1949)

---

<sup>21</sup> Rankine, William John Macquorn (1820–1872) war ein schottischer Ingenieur. Er hat zur Beschreibung des Dampfkraftprozesses eine Kreisprozess vorgeschlagen. Mit einem solchen Prozess hatte Clausius den Begriff Entropie eingeführt, vgl. [5], [8].

<sup>22</sup> Zeuner, Gustav Anton (1828–1907) war ein deutscher Ingenieur und Hochschullehrer. Mit seinem Lehrbuch „Grundzüge der Wärmetheorie“ aus dem Jahr 1858 begründete er die Technische Thermodynamik in Deutschland.



- 
17. Schmidt, E.: Einführung in die technische Thermodynamik, 2. Aufl., S. 93. Springer, Berlin (1944)
  18. von Tunzelmann, Alex: Indian Summer. Simon and Schuster, New York (2007)

Wärme­kraftwerke

Von den Anfängen im 19. Jahrhundert bis zur Endphase  
ihrer Entwicklung

Strauss, K.

2016, XI, 216 S. 89 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-50536-6