

Sadi Carnot – ein Mitbegründer der technischen Thermodynamik

Dipl.-Ing. H.-J. Haase, Dr. K. Krug
Technische Hochschule „Carl Schorlemmer“
Leuna-Merseburg
Sektion Verfahrenstechnik

Sadi Carnots Name ist heute vielen Technikern und Naturwissenschaftlern geläufig im Zusammenhang mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und insbesondere mit dem Carnot-Faktor; dieser Wert gibt bekanntlich an, wieviel Arbeit man maximal aus einer bestimmten Wärmemenge (in einer definierten Umgebung) gewinnen kann.¹⁾

Weniger bekannt ist, daß Carnots entscheidende Arbeit (1) bereits 1824 erschien – also 26 Jahre bevor Clausius seine Formulierung des zweiten Hauptsatzes publizierte. Aber selbst für diejenigen, der sich intensiver mit Carnots Arbeiten befaßt hat, ergibt sich u. E. heute ein neues, umfassenderes Bild von den Leistungen des früh verstorbenen Ingenieurwissenschaftlers.

Nicolas-Léonard-Sadi Carnot wurde am 1. 6. 1796 in Paris geboren. Sein Vater Lazare bekleidete verschiedene Ministerposten und gilt als der „Organisator des Siegs“ in der bürgerlichen französischen Revolution. Er ist Mitbegründer der ersten Technischen Hochschule der Welt, der École Polytechnique, die ein wesentliches Vorbild für das höhere technische Schulwesen des 19. Jh. in Europa wurde.

Sadi Carnot trat 1812 in diese Lehranstalt ein, die er 1814 verließ, um als Unterleutnant bis 1819 seinen Militärdienst zu leisten. Ab 1821 lebte er bei seinem 1814 emigrierten Vater in Magdeburg. Nach dem Tod des Vaters (1823) kehrte er nach Frankreich zurück und veröffentlichte 1824 das Ergebnis seiner privaten Studien. Nach einer weiteren aktiven Dienstzeit von Ende 1826 bis 1828 nahm er seine wissenschaftliche Arbeit wieder auf. Am 24. August 1832 beendete ein Choleeraanfall sein Leben, ohne daß er eine weitere vollständige Arbeit vorlegen konnte.

Goethe und Carnot sind im gleichen Jahr verstorben; jedoch ist bei Carnot das aufklärerische Gedankengut bereits der Arbeit für die neuen bürgerlichen Zielstellungen gewichen. Als Ingenieur-Offizier und damit Vertreter der jungen technischen Intelligenz, die mathematisch und naturwissenschaftlich gut ausgebildet war, richtete er den Blick auf die Verbesserung der jungen Industrie.

Industriell und politisch waren England und Frankreich damals viel weiter fortgeschritten als beispielsweise das politisch und wirtschaftlich zerrissene Deutschland. Dieser Entwicklungsstand spiegelte sich auch im technischen Schulwesen.

In der Wissenschaftstheorie wich das metaphysische Dogma des beziehungslosen Nebeneinanders der Dinge und Erscheinungen dem naturphilosophischen Postulat von der Einheit und dem Zusammenhang. Zunehmend setzte sich die experimentelle Methode gegen den „hausbackenen Gesellen“, des „gesunden Menschenverstand“ durch. Diese Zeit, in der zunehmend Dampfma-



Der siebzehnjährige Carnot in der Uniform der École Polytechnique, der ersten technischen Hochschule der Welt

schinen zum Antrieb der Maschinerie eingesetzt wurden, charakterisierte Friedrich Engels folgendermaßen: „Die Praxis hatte also in ihrer Weise die Frage von den Beziehungen zwischen mechanischer Bewegung und Wärme gelöst. Sie hatte zuvörderst die erste in die zweite und dann die zweite in die erste verwandelt. Wie aber sah es in der Theorie aus? Kläglich genug!“ (2, S. 393).

Die Praktiker waren ebensowenig in der Lage, eine Theorie der Wärme zu entwickeln oder Anforderungen an die Naturwissenschaften zu artikulieren, wie die Naturwissenschaftler geneigt waren, sich diesem Objektbereich zuzuwenden.

Fehlinterpretationen ...

Die Theorie von Carnot gehört heute zum Bestand der thermodynamischen Fachliteratur. Über seine wissenschaftlichen Ansichten, über die Herleitung seiner Theorie und über die Art der Beweisführung in der Originalarbeit (1) wird demgegenüber meist ein falsches Bild vermittelt. Eine gute Zusammenfassung typischer Fehlinterpretationen wird aus (4) ersichtlich.

Sie bestehen in folgendem:

1. Carnot habe den Versuch unternommen, die zweifellos vorhandene metaphysische Trennung zwischen der hochentwickelten Mechanik und der Wärmelehre auf dem Niveau der Kalorimetrie zu überwinden (4, S. 242). Tatsächlich ging es Carnot aber einzig um Grundlagen, mit deren Hilfe man Wärmemaschinen bewerten und verbessern kann. Er formulierte sein Problem aus technischer Sicht, und der Lösungsweg mit seinen Abstraktionen muß dementsprechend an Hand dieser Ziele beurteilt werden.

2. Carnot sei bei der Herleitung seiner Theorie, „wie es uns weiter nicht überrascht, ein Mißgeschick“ unterlaufen. „Eine Arbeit vom Betrage

$$W = Qf(t_{\text{oben}}, t_{\text{unten}})$$

wird geleistet, wenn eine Menge Q des Wärmestoffes von der höheren Temperatur t_{oben} auf die niedrige t_{unten} „herunterfällt““ (4, S. 242).

Diese Interpretation ist recht einseitig; denn die aus der Mechanik stammende Analogie ist zunächst legitim und darüber hinaus von Carnot nicht zur Identität geführt worden. Als pädagogisches Hilfsmittel war sie sogar recht geschickt: Wasserkraft spielte damals in Frankreich eine wesentlich größere Rolle als in anderen Industrieländern. Wasserräder und -turbinen waren daher der technischen Intelligenz Frankreichs (an die sich Carnot in erster Linie wendete) besonders gut vertraut.

3. Für Carnot sei es weiterhin „das vergleichsweise kleinere Mißgeschick“ gewesen, daß er „seinen Betrachtungen die Stofftheorie der Wärme zu Grunde“ gelegt habe; das kleinere Mißgeschick deshalb, weil es „alsbald durch das Energieprinzip überwunden“ worden sei (4, S. 243). Durch das Studium der Originalarbeit drängt sich gerade der Gedanke auf, daß Carnot nicht mehr konsequenter Anhänger der Wärmestofftheorie war. Zum anderen war das „Energieprinzip“ nicht sein Ziel.

4. Carnot wird vorgeworfen: Dadurch daß er die Reversibilität als Voraussetzung für seinen Kreisprozeß formulierte, habe er die „absonderliche Entwicklung“ der klassischen Thermodynamik durch die „Zufälligkeit seines persönlichen Denkstils“ initiiert, dessen Ergebnis seither als „kodifizierte Absonderlichkeit“ (4, S. 247) fortbestehe. Der reversible Kreisprozeß liefert aber den Maximalbetrag an Arbeit, der unter den jeweiligen Bedingungen gewonnen werden kann. Damit wird dieser ideale Prozeß zum universellen Etalon für die Güte jeder Wärmemaschine.¹⁾

¹⁾ Siehe Fratzscher, W.: „Die Qualität der Energie“, *Wiss. u. Fortschr.* 32 (1982) 9, S. 328; Ders.: „Die energetische Qualität von Stoffströmen“, ebenda H. 12, S. 470

5. Die Konservierung des von Carnot geschaffenen „bizarren Denkschemas weit über das Ende seiner Periode der theoretischen Schwäche hinaus“ (4, S. 245) wird in die von Engels in weiterem Zusammenhang gesehene „Zerfahrenheit und Verworrenheit des. theoretischen Denkens“ (2, S. 332) dieser Periode eingeordnet. Carnots Schrift gehört aber keinesfalls zu den spekulativ-naturphilosophischen Produkten dieser Zeit; sie beruht auf experimentellen Ergebnissen der Physik und empirischen Vorstellungen in der Technik (3, S. 36 ff).

Im folgenden wollen wir untersuchen, wie weit sich Carnots Ansichten mit unseren heutigen Erkenntnissen und den genannten Interpretationen vereinbaren lassen. Als Grundlage dient uns W. Ostwalds (mit Anmerkungen versehene) Übersetzung (3) von Carnots wichtigster Schrift (1).

Zunächst müssen wir die wesentlichen Begriffe bei Carnot in die heute gebräuchliche Nomenklatur übersetzen. Zentrale Begriffe sind bei Carnot die „bewegende Kraft der Wärme“, die sich als Volumenänderungsarbeit äußert, und die „bewegende Kraft“; das ist die mechanische Energie. Carnot verwendet darüber hinaus die Begriffe „chaleur“ und „calorique“ — wie er in einer Fußnote betont — „ohne Unterscheidung“ (3, S. 10). Ostwald hat jedoch „um den Wortlaut festzuhalten, regelmäßig chaleur durch Wärme und calorique durch Wärmestoff wiedergegeben“ (3, S. 70).

Carnots Begriffsgefüge ist (im Gegensatz zur heutigen Vielfalt) einerseits leicht überschaubar; andererseits ist es oft schwierig, seine Begriffe den heutigen Fachtermini eindeutig zuzuordnen. Nach heutigem Verständnis wäre es z. B. berechtigt, „chaleur“ mit „Wärme“ und „calorique“ mit „Wärmestrom“ zu übersetzen. Carnot ist sich der Problematik durchaus bewußt.

Carnots technikwissenschaftliches Modell

Wegen des erwähnten Widerspruchs — zwischen der massenhaften Anwendung von Wärmemaschinen einerseits und den geringen Fortschritten der Theorie andererseits — leitete zu Beginn des 19. Jh. der Zufall fast alle Versuche, diese Maschinen zu verbessern. Aus diesem Widerspruch leitete Carnot die Ziele seiner Schrift ab; er suchte Antworten auf folgende Fragen:

1. Ist die bewegende Kraft (d. h. die „nutzbare Wirkung . . . , welche ein Motor hervorbringen kann“) der Wärme beschränkt oder unendlich?

2. Haben die Verbesserungen der Arbeitsmaschinen eine angebbare Grenze?

3. Gibt es „Agentien“ — etwa die Luft —, die dem Wasserdampf „zum Zwecke der Entwicklung der bewegenden Kraft des Feuers vorzuziehen sind . . .“ (3, S. 6)

In diesen Fragen äußert sich die prozeßorientierte Vorgehensweise eines Ingenieurs: Sie berücksichtigt einerseits die Einheit von technischem Mechanismus und stofflicher Zustandsänderung; andererseits bedient Carnot sich eines naturwissenschaftlichen Instrumentariums, indem er sich das Umwandlungsprinzip zunächst in „einer ganzen Allgemeinheit“ unabhängig von jedem Mechanismus und jedem besonderen Agens vorstellt. An den bisher zur Unter-

suchung des Phänomens herangezogenen Maschinen zeigt es sich „sozusagen verstümmelt und unvollständig“ (3, S. 6).

Das Ergebnis dieser Abstraktionen ist die Erkenntnis der Äquivalenz von Wärme und Arbeit und das Maß der Umwandelbarkeit von Wärme in Arbeit in Form des Wirkungsgrades. Der gleichfalls nach Carnot benannte thermodynamische Kreisprozeß aus je zwei isothermen und adiabatischen Zustandsänderungen (der augenscheinlich auf den „Takten“ der Dampfmaschine beruht) dient ihm als technikwissenschaftliches Modell.

Abbildung 2a zeigt die Darstellung des Kreisprozesses in der Originalarbeit; die Abb. 2b bis d sind heute gebräuchliche Diagramme.

Die geschlossene Folge von Zustandsänderungen kann man folgendermaßen beschreiben (Abb. 2b):

1. *isotherme Expansion*: Das Arbeitsmittel expandiert unter Wärmezufuhr bei der Temperatur T vom Zustandspunkt 1 (p₁, V₁) zum Zustandspunkt 2 (p₂, V₂).
2. *adiabate Expansion*: Das nach außen wärmeisolierte Arbeitsmittel expandiert von 2 auf 3 (p₃, V₃) und kühlt sich dabei auf die Temperatur T_u ab.
3. *isotherme Kompression*: Das Arbeitsmittel wird bei der Temperatur T_u unter Wärmeabgabe von 3 auf 4 (p₄, V₄) komprimiert.

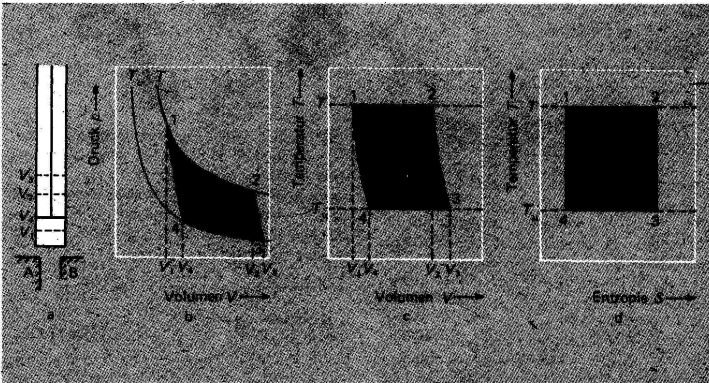


Abb. 2 Darstellungen des Carnotschen Kreisprozesses: a — in Originalarbeit; b — im Druck/Volumen-Diagramm; c — im Tem-

peratur/Volumen-Diagramm; d — im Temperatur/Entropie-Diagramm (nähere Erläuterungen im Text)

$$A = A_1 + A_2 = R (T - T_u) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

peratur/Volumen-Diagramm; d — im Temperatur/Entropie-Diagramm (nähere Erläuterungen im Text)

Damit formuliert Carnot — zwar nicht in dieser analytischen Form, aber ebenso eindeutig —, daß die gewinnbare Arbeit endlich ist. Er gibt die thermodynamische Grenze an — die maximal gewinnbare Arbeit. Einzig dieser Kreisprozeß beantwortet seine ersten beiden Fragen, und die Bedingungen waren so festzulegen, daß sich dieser und nur dieser Kreisprozeß ergeben konnte.

Carnots Analogien zwischen Mechanik und Wärmelehre

Als Antwort auf die dritte Frage beweist Carnot, daß „die bewegende Kraft der Wärme . . . unabhängig von dem Agens, welches zu ihrer Gewinnung benutzt wird“, ist (3, S. 23).

Carnots Analogien zwischen Mechanik und Wärmelehre

Um das Ursache-Wirkungs-Verhältnis zwischen Wärme und Arbeit zu beschreiben, verwendet Carnot die Analogie zur Mechanik. Diese Arbeitsweise ergibt sich aus dem qualitativ hohen Entwicklungsstand der Mechanik im allgemeinen, der (bereits erwähnten) großen technischen Bedeutung der Wasserkraft im zeitgenössischen Frankreich und dem besonderen Stellenwert von theoretischer Mechanik und höherer Mathe-

matik an der École Polytechnique im besonderen. Carnot schreibt: „Nach den bisher festgestellten Begriffen kann man sehr angemessen die bewegende Kraft der Wärme mit der des fallenden Wassers vergleichen: Beide haben ein Maximum, welches man nicht überschreiten kann . . . Die bewegende Kraft des fallenden Wassers hängt von seiner Höhe und der Menge der Flüssigkeit ab; die bewegende Kraft der Wärme hängt gleichfalls von der Menge des Wärmestoffes“ (des Wärmestroms) „ab und dem, was man seine Fallhöhe nennen könnte, und was wir in der Tat so nennen wollen, nämlich den Temperaturunterschied der Körper, zwischen denen der Austausch des Wär-

4. *adiabate Kompression*: Das Arbeitsmittel wird wärmeisoliert von 4 auf den ursprünglichen Zustandspunkt 1 komprimiert, wobei die Temperatur auf T steigt.

Die bei diesem Kreisprozeß abgegebene Arbeit ergibt sich als Summe der bei den Zustandsänderungen auftretenden Arbeiten. Die in Abb. 2b bis d eingeschlossenen Flächen sind ein Maß für die maximal gewinnbare Arbeit bei reversibler Prozeßführung:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$\text{und wegen } A_2 + A_4 = 0 \text{ sowie } \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

matik an der École Polytechnique im besonderen. Carnot schreibt: „Nach den bisher festgestellten Begriffen kann man sehr angemessen die bewegende Kraft der Wärme mit der des fallenden Wassers vergleichen: Beide haben ein Maximum, welches man nicht überschreiten kann . . . Die bewegende Kraft des fallenden Wassers hängt von seiner Höhe und der Menge der Flüssigkeit ab; die bewegende Kraft der Wärme hängt gleichfalls von der Menge des Wärmestoffes“ (des Wärmestroms) „ab und dem, was man seine Fallhöhe nennen könnte, und was wir in der Tat so nennen wollen, nämlich den Temperaturunterschied der Körper, zwischen denen der Austausch des Wär-

mestoffes stattfindet. Beim Fall des Wassers ist die bewegende Kraft in aller Strenge dem Höhenunterschied . . . proportional. Bei dem Fall der Wärme nimmt zweifellos die bewegende Kraft mit dem Temperaturunterschied zu; wir wissen aber nicht, ob sie diesem Unterschied proportional ist . . . Es ist dies eine Frage, welche wir später zu untersuchen vorhaben“ (3, S. 18). Dieses Problem wird von Carnot gelöst, indem er den Satz formuliert: „Der Fall des Wärmestoffes bringt bei niedrigeren Graden der Temperatur mehr bewegende Kraft hervor als bei höheren Graden“ (3, S. 42). Er erkennt also bereits, daß der Wirkungsgrad nicht nur durch die Temperaturdifferenz, sondern durch den Quotienten aus Temperaturdifferenz und absoluter Temperatur bestimmt wird.

Carnot beschreibt ferner ein wesentliches Merkmal aller technischen Prozesse: das Erzeugen und Erhalten einer Triebkraft (vgl. 5, 6). Er benutzt dazu eine ebenfalls der Mechanik entlehnte Gleichgewichtsvorstellung und bemerkt: „Der chemische Vorgang in der Feuerung ist sozusagen ein vorläufiger Vorgang, welcher nicht zur unmittelbaren Erzeugung bewegender Kraft benutzt wird, sondern um das Gleichgewicht des Wärmestoffes“ (das thermische Gleichgewicht) „zu stören und einen Temperaturunterschied hervorzubringen, aus welchem alsdann die Bewegung hervorgeht“ (3, S. 15). Diese Formulierung des Gesetzes des thermischen Gleichgewichts, das heute auch als nullter Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet wird, geht auf den wissenschaftlichen Partner von James Watt zurück, auf den schottischen Arzt, Chemiker und Physiker J. Black (1728–1799).

Mit dieser Betrachtung trennt Carnot die Vorgänge im Dampfkessel von den für die Dampfmaschine charakteristischen im Arbeitszylinder und öffnet somit den Zugang zu deren quantitativer Analyse (7). Bis dahin war eine integrale Betrachtungsweise üblich gewesen, bei der man jede Maschine bewertete nach dem Verhältnis von verbrauchter Brennstoffmenge zu erzeugter mechanischer Arbeit.

Eine weitere Anleihe aus der Mechanik nimmt Carnot auf, indem er die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile auf thermische Prozesse überträgt. Insbesondere berücksichtigt er hier das Unerschaffbarkeitsprinzip, nämlich die Vorstellung von „der Wirkung einer Vorrichtung . . . welche fähig ist, in unbegrenzter Menge bewegende Kraft zu schaffen, . . . fähig endlich, aus sich selbst die Kräfte zu schöpfen, um das ganze Weltall in Bewegung zu setzen . . . und unangesetzt zu beschleunigen. Dies wäre eine wirkliche Erschaffung von bewegender Kraft. Wäre eine solche möglich, so wäre es überflüssig, die bewegende Kraft in den Strömungen des Wassers und der Luft, in den Brennmaterialien zu suchen; wir hätten eine unversiegbare Quelle derselben, aus der wir, nach Belieben schöpfen könnten“ (3, S. 14).

Ostwald erläutert dazu: „Jedoch hätte man auch ein perpetuum mobile, wenn man durch Verbrauch von Wärme bei konstanter Temperatur mechanische Arbeit erlangen könnte, die sich wieder in Wärme umwandelt, so daß das Gesetz von der Erhaltung

der Energie stets gewahrt bliebe. Es ist gerade diese zweite Seite jenes Satzes, welche für den Satz von Carnot, wie er gegenwärtig zu fassen ist . . . in Frage kommt. . . die zweite, bisher vielfach übersehene Seite (ist) in bezug auf die Fruchtbarkeit der Anwendungen die wichtigere“ (3, S. 71). Carnot hat auch in dieser Hinsicht nicht nur Sätze aus der Mechanik auf Wärmeprozesse übertragen, sondern Sätze über diese Bewegungsform der Materie erstmals formuliert.

Zur Wärmestofftheorie bei Carnot

Anfang des 19. Jh. existierten zwei Ansichten über die Natur der Wärme.²⁾ Die vor-

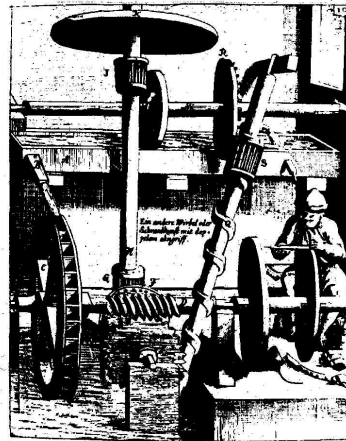


Abb. 3 „Wirbel- oder Schneckenkunst mit Schleifrädern“, Plan eines perpetuum mobile vom Anfang des 17. Jh. Anfang des 19. Jh. wußte man bereits, daß ein mechanisches perpetuum mobile unmöglich ist. Carnot übertrug diese Erkenntnis auf thermische Prozesse.

herrschende postulierte, die Wärme sei ein (unwägbarer) Stoff und stehe gleichberechtigt neben den chemischen Elementen. Dem stand bereits die Ansicht gegenüber, die Wärme sei die ungerichtete Bewegung der Teilchen und somit eine inhärente Eigenschaft aller Stoffe. Diesen Standpunkt vertraten zwar prominente Wissenschaftler — wie Boyle, Mariotte, Lomonosov, Rumford, Davy und dessen Schüler Faraday; insgesamt spielte er jedoch eine geringere Rolle, weil er weniger anschaulich war und weil man daran gewöhnt war, vorwiegend makroskopische mechanische Vorgänge zu beschreiben.

Für den hier betrachteten Zusammenhang würde die Konsequenz aus der Wärmestofftheorie die „Wärmestoffhaltung“ bedeuten; das heißt, die Wärme würde Arbeit leisten, ohne quantitativ verbraucht zu werden. Sie (und nicht die Energie) wäre eine Erhaltungsgröße ebenso wie die Masse. Der Wärmestrom, der nach Arbeitsleistung die Maschine verläßt, besäße quantitativ die gleiche Wärme wie im Zustand des Eintritts in die Maschine. Er wäre durch die Tem-

peraturdifferenz zwischen Ein- und Austritt lediglich qualitativ abgewertet werden.

Ostwalds Übersetzung von „chaleur“ und „calorique“ leistet noch heute der Ansicht Vorschub, Carnot sei eindeutig ein Anhänger der Wärmestofftheorie gewesen.

Eindeutig könnte man Carnots Aussagen allerdings nur interpretieren, wenn er den Begriff „Wärme“ definiert hätte. Er ließ aber dieses Problem — man muß annehmen: ganz bewußt — offen, und seine verbalen Erläuterungen sind nicht eindeutig.

Ostwald interpretiert viele Aussagen Carnots ganz im Sinne der Wärmestofftheorie. Er räumt allerdings ein, daß Carnots „Überzeugung von der Richtigkeit der Wärmetheorie seiner Zeit keine unbedingte war“ (3, S. 70).

Carnot ging davon aus, daß durch alle Wärmemaschinen ein Wärmestrom fließen muß — und zwar stets von einem hohen, durch die Verbrennungsreaktion gegebenen zu einem durch die Umgebung bereitgestellten niederen Temperaturniveau. Er erkennt die Größe des Temperaturunterschieds als wesentliches Merkmal für die Arbeit, die der Wärmestrom leisten kann, aber nicht muß. Beispielsweise wird bei der Wärmeleitung (wegen ihrer vollkommenen Irreversibilität) trotz des Temperaturunterschieds keine Arbeit geleistet.

Der Temperaturunterschied ist demnach lediglich eine notwendige Bedingung. Die hinreichende Bedingung für das Auftreten von Arbeit ist die Volumenänderung des Arbeitsmittels (Dampf, Luft u. a.). Dieser Prozeß muß nicht vollständig irreversibel verlaufen und dient Carnot zunächst zu der Ableitung, daß die bewegende Kraft der Wärme nicht unendlich ist, sondern daß ein Maximum existiert. Das Maximum wird dann erreicht, wenn „an den zur Gewinnung von bewegender Kraft aus Wärme benutzten Körpern keine Temperaturänderung stattfindet, welche nicht durch eine Volumenänderung bedingt ist“ (3, S. 14). Das bedeutet aber: Dieser Prozeß muß vollständig reversibel verlaufen; er muß sich aus unendlich vielen Gleichgewichtszuständen zusammensetzen.

Die vier Zustandsänderungen des Carnotschen Kreisprozesses sind das technikkwissenschaftliche Modell, mit dem man das Maximum an gewinnbarer Arbeit (bei reversibler Prozeßführung) ermitteln kann. Jede Irreversibilität führt zur Arbeitsverminderung.³⁾

In der technischen Thermodynamik charakterisiert man die Arbeitsfähigkeit eines Systems mit dem Begriff der Exergie (E):

$$E = A = \eta_C \cdot Q_T$$

(η_C — Carnot-Faktor; Q_T — bei der Temperatur T zugeführte Wärme).

Der Carnot-Faktor kennzeichnet ein Aufwand-Nutzen-Verhältnis. Der Aufwand besteht in der Größe Q_T , der Nutzen in der Arbeit A . Dabei tritt jedoch als unvermeidbare Nebenwirkung die Abgabe der Wärme Q_{T_u} bei Umgebungstemperatur auf. Die zugeführte Wärme besteht aus einem arbeitsfähigen Anteil, der Exergie, und aus

²⁾ Siehe Ulbricht, H.; Schmelzer, J.: „Die Entstehung der Thermodynamik“, Wiss. u. Fortschr. 33 (1983) 1, S. 13

der Umgebungswärme, der Anergie. Die abgeführte Wärme besteht jedoch nur noch aus Anergie, da der arbeitsfähige Anteil in Arbeit verwandelt worden ist. Damit ist die Anergie eine Größe, die bei diesem Prozeß erhalten bleibt. Die Methodik dieser Betrachtung ist der vorr Carnot sehr ähnlich; allerdings läßt sich Carnots Wärmebegriff nicht als Anergie deuten, weil ihn der Zusammenhang zwischen dem Aufwand und der unvermeidbaren Nebenwirkung in Form der nutzlosen Abwärme viel weniger interessierte — ist doch beim Betreiben einer Wärmemaschine eben gerade die Äquivalenz und nicht die Erhaltung von Wärme und Arbeit ausschlaggebend.

Carnots Schrift blieb 20 Jahre nahezu unbeachtet. Erst als Clapeyron, ein Klassenkamerad von Carnot, 1843 das bearbeitete Original in Poggendorffs Annalen publizierte, erweckte das Interesse an dieser Arbeit, weil mittlerweile die Diskussion um die Wärmelehre viel stärker war als in den 20er Jahren. Die Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalents durch Mayer 1842, durch Colding und Joule 1843 sowie durch Helmholtz 1847 mußte zum Widerspruch zur Carnotschen Arbeit führen; denn einerseits war nunmehr das Maß für den Wärmeverbrauch beim Erzeugen von mechanischer Arbeit angebar; andererseits hatte Carnot behauptet, daß „die Erzeugung von bewegender Kraft nicht auf einen wirklichen Verbrauch des Wärmestoffes zurückzuführen“ sei. Carnot gab allerdings bereits den Grad der Umwandelbarkeit an.

Diesen Widerspruch löste Clausius 1850 durch die Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Er schreibt in bezug auf Carnot: „Diese Umstände, ... daß der Verlust an lebendiger Kraft der geleisteten Arbeit proportional ist, welche auch Carnot sehr wohl kannte, fordern dringend dazu auf, die Vergleichung zwischen Wärme und Arbeit auch unter der abweichenden Voraussetzung vorzunehmen, daß zur Erzeugung von Arbeit nicht bloß eine Änderung in der Verteilung der Wärme, sondern auch ein wirklicher Verbrauch von Wärme nötig sei ...“ (8, S. 5).

Die beiden Diagramme in Abb. 4 veranschaulichen nochmals die Betrachtungsweisen von Carnot und Clausius. Die Unterschiede und Analogien der beiden Betrachtungsweisen lassen erkennen, daß Carnot die Grundlagen für den 2. Hauptsatz der Thermodynamik geschaffen hat. In seinem Nachlaß, der allerdings erst 1878 von seinem Bruder Henry herausgegeben wurde, findet sich bereits ein Wert für das mechanische Wärmeäquivalent.

Die vermeintliche Eindeutigkeit, nach der S. Carnot als Vertreter der Wärmestofftheorie betrachtet werden könnte, wird nicht nur dadurch abgeschwächt, daß er sich bis zu seinem Tode offenbar von ihr löste. Dagegen sprechen auch einige weitere Aussagen in dem hier analysierten Werk (z. B. 3, S. 22 und 23), auf die wir hier aus Platzgründen nicht näher eingehen können.

Das Wesen von Carnots technikkwissenschaftlicher Theorie läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

○ Sadi Carnot geht von praktischen Problemen aus: Für die Beschreibung von Wärmemaschinen will er ein ähnliches wissen-

schaftliches Instrumentarium schaffen, wie es für Maschinen, „welche ihre Bewegung nicht von der Wärme empfangen“ (3, S. 7), schon vorhanden war.

○ Als wesentliche Voraussetzungen für die Gewinnbarkeit von mechanischer Arbeit aus Wärme erkennt er das Vorhandensein einer Triebkraft in Form einer Temperaturdifferenz, die ständig neu erzeugt werden muß und bei deren Abbau eine Expansion des Arbeitsmittels stattfinden muß.

○ Der Carnotsche Kreisprozeß ist das technikkwissenschaftliche Modell, mit dem sich das Maximum an gewinnbarer Arbeit ermitteln läßt. Für die Physik ist der Kreisprozeß lediglich eine Darstellungsmethode des Äquivalenzprinzips zwischen Wärme und Arbeit und ohne theoretischen Belang. Das Maximum an Arbeit wird bei reversiblen Prozessen gewonnen. Eine Vorrichtung, die

2. Hauptsatzes — für den Carnot den Grundstein legte — kann er zu ganz falschen Schlussfolgerungen verleiten. Durch die unterschiedslose Behandlung unterschiedlicher Qualitäten können (ohne die Aussagen des 2. Hauptsatzes) Illusionen hinsichtlich der rationalen Energieanwendung entstehen; andererseits wird das Auftreten vermeidbarer Energieverluste u. U. verschleiert.¹⁾ Das begründet die hohe Aktualität der Carnotschen Arbeit.

Der progressive Ingenieur

Fortschrittsglaube und Begeisterung für die technische Entwicklung charakterisieren Carnots Geisteshaltung. Das Studium der Dampfmaschinen war für ihn „vom höchsten Interesse“, weil sie bestimmt zu sein schienen, „eine große Umwälzung in der

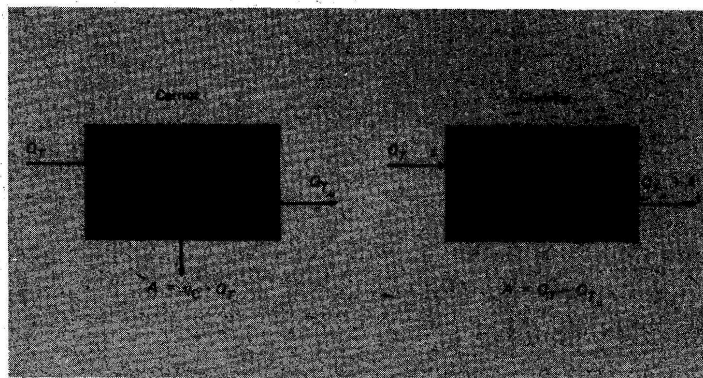


Abb. 4 Carnot und Clausius betrachten gleichartige Prozesse unter verschiedenen Aspekten: Carnot interessiert sich im wesentlichen für die Umwandlung von Wärme in Arbeit (Ursache, Maß, Richtung). Clausius betont stärker die Energieerhaltung, die die Äquivalenz von Wärme und Arbeit voraussetzt.

unter gleichen Bedingungen mehr Arbeit erzeugen würde, wäre eine Form des perpetuum mobile. Bei realen Wärmemaschinen sind die Prozesse stets teilweise irreversibel; sie liefern daher einen geringeren Betrag an Arbeit als im reversiblen Grenzfall.

○ Nach Carnot wird Arbeit gewonnen, indem der Wärmestrom qualitativ abgewertet wird. Das ist zweifellos das Wesen dieses Vorgangs. Daß dabei jedoch die Quantität der Wärme konstant bleibt, kennzeichnet eine Auffassung von der Wärme, die durch eine Qualität ($T - T_0$) und eine vom Temperaturniveau unabhängige Quantität charakterisiert ist.

Diese Ansicht hinderte Carnot allerdings nicht, seine eingangs formulierten Ziele zu erreichen.

○ Der 1. Hauptsatz bringt verschiedene energetische Qualitäten in einen additiven Zusammenhang und behandelt sie gleichwertig. Seine bemerkenswertesten Aussagen sind zwar Äquivalenz und Additivität; aber ohne die qualitative Seite in Form des

Kulturwelt zu bewirken“ (3, S. 3). Die „Savannah“ hatte als kombiniertes Segel- und Dampfschiff 1819 erstmals den Atlantik überquert. Darin sah Carnot eine Entwicklung, die „die Völker der Erde verbindet, als bewohnten sie dasselbe Land“ (3, S. 5).

Carnot würdigte insbesondere den englischen Beitrag zur Entwicklung und Anwendung der Dampfmaschine. Als Ursache der schnellen Produktivkraft-Entwicklung in Großbritannien erkannte er den Einfluß der Produktionsverhältnisse; er hielt es für „naturgemäß, daß eine Erfindung dort entsteht und namentlich sich entwickelt, wo das Bedürfnis nach ihr sich am zwingendsten geltend macht“ (3, S. 6).

Diese Aussagen zeigen zumindest Elemente einer spontan-materialistischen Einstellung.

Der Dampfmaschine traute er zu, „eines Tages der allgemeine Motor werden zu sollen, welcher den Vorzug über die Kräfte der Tiere, den Fall des Wassers und die Ströme der Luft erhält“ (3, S. 4). Zumindest für den Zeitraum der industriellen Revolution hat sich das bestätigt. Wesentlich über diesen Zeitabschnitt hinaus — im Sinne allgemeiner Prinzipien der Ingenieurarbeit — weist seine Begründung für die Überlegenheit der Dampfmaschine gegenüber dem „Hafermotor“: „Wohlfelheit“, bessere Verfügbarkeit sowie größere Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit.

Auf sicherheitstechnische Fragen bei der Dampfschiffahrt eingehend, schrieb er:

„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 ... wohlbekanntem Wege zu halten und der Wirkung des Windes zu widerstehen, wenn diese das Schiff gegen Küsten, Untiefen und Klippen treibt“ (3, S. 5). Damit wendet sich Carnot gegen jede Art von Technikpesimismus. Seine Argumentation ist im Prinzip hochaktuell; man denke nur an die Diskussionen über die friedliche Nutzung der Kernenergie.

Carnot sprach sich eindeutig für die Hochdruckdampfmaschine im Verbundbetrieb aus, weil man so die bewegende Kraft von Brennstoffmaterialien am besten ausnutzen kann. Gleichzeitig relativierte er diesen Aspekt: „Die Ersparnis an Brennstoffmaterial ist von den Bedingungen ... nur eine einzige; unter vielen Umständen ist sie nur eine sekundäre und muß der Sicherheit, Festigkeit, Dauer der Maschine, der Einschränkung des Raumes, den sie beansprucht, der Wohlfeilheit ihrer Herstellung etc. gegenüber zurückstehen“. Die Gabe des Ingenieurs sei es, diese Faktoren „nach ihrem richtigen Werte zu beurteilen, die wichtigeren ... von den nur gelegentlichen zu unterscheiden, sie gegeneinander angemessen auszugleichen, um mit den leichtesten Hilfsmitteln zu dem besten Ergebnis zu gelangen ...“ (3, S. 67).

Damit gab Carnot einen Einblick in die Komplexität des technikwissenschaftlichen Schaffens, dem aus heutiger Sicht kaum etwas hinzuzufügen ist.

Wir würdigen in Sadi Carnot einen Technikwissenschaftler, mit dessen Arbeit die Entstehung der technischen Thermodynamik begann. Nach Bernal ist er „einer der ersten, der mit mathematisch-physikalischen Prinzipien die Arbeitsweise der neuen Maschine untersuchte“ und „eins der bedeutendsten verkannten Genies des 19. Jahrhunderts“ (9).

Literaturverzeichnis

- (1) Carnot, S.: „Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance“, Paris 1824
- (2) Engels, F.: „Dialektik der Natur“, MEW, Bd. 20, Berlin 1962
- (3) Carnot, S.: „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen“, Übersetzung von (1); übersetzt u. herausgegeben von W. Ostwald in Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften Nr. 37, Leipzig 1892
- (4) Schöpf, H.-G.: „Die absonderliche Entwicklung der klassischen Thermodynamik“, Vortrag auf der Konferenz: Philosophische und historische Fragen der technischen Wissenschaften vom 10.-30. 10. 1978 an der TU Dresden, Fachsektion III
- (5) Autorenkollektiv (Ltg. G. Grubn): „Einführung in die Verfahrenstechnik“, Leipzig 1982, S. 75
- (6) Szucs, E.: „Dialoge über technische Prozesse“, Leipzig 1976, S. 44
- (7) Krug, K.: „Zur Herausbildung der Technischen Thermodynamik am Beispiel der wissenschaftlichen Schule von G. A. Zeuner“, NTM-Schriftenr. Gesch. Naturwiss., Technik, Med., Leipzig 18 (1984) 2, S. 79
- (8) Clausius, R.: „Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, die sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen“, Pogg. Ann. Phys. Chem. 79 (1850) 368, 500
- (9) Bernal, J. D.: „Die Wissenschaft in der Geschichte“, Berlin 1967, S. 378

Gehirn – Peptide – Gehirn

Zwei Klassen von Nachrichtenketten für eine komplexe Hirnleistung

Prof. Dr. Armin Ermisch
Karl-Marx-Universität Leipzig
Sektion Biowissenschaften
Bereich Zellbiologie und Regulation

Der Titel dieses Beitrags spricht nicht für sich. Ein einführendes Beispiel soll den Ansatz verdeutlichen: Bei „Grün“ einer Verkehrsampel überquert ein Passant die Straße. Dies geschieht, weil ein Sender (die Ampel) in einen Kanal (die Luft) ein Signal (das Lichtzeichen „Grün“) freisetzt, das ein Empfänger (der Passant) aufnimmt und verwertet. Auf das Signal „Grün“ wird mit „Gehen“ reagiert.

Solche Beziehungen, in denen ein Signal aus einem Sender über einen Kanal einen Empfänger erreicht, bezeichnen wir als Nachrichtenketten (Abb. 1). In diesem Artikel wollen wir uns mit Nachrichtenketten befassen, deren Sender und Empfänger sich im Gehirn befinden und deren Signale Peptide, d. h. aus wenigen Aminosäureresten verknüpfte chemische Substanzen sind (Abb. 2).

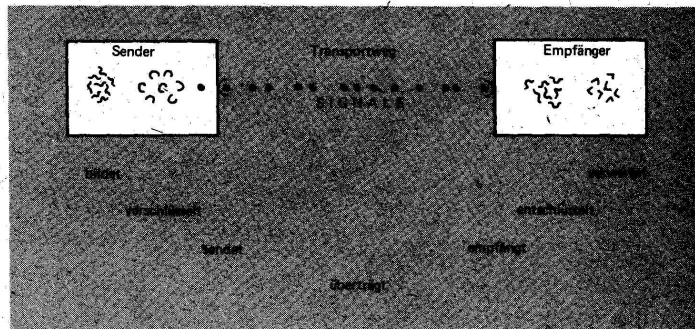


Abb. 1 Eine Nachrichtenkette besteht aus den Mindestgliedern Sender, Kanal und Empfänger. Der Sender (z. B. Zellen in Lebewesen) bildet, verschlüsselt und sendet Signale. Der Kanal oder Transportweg

(z. B. Flüssigkeiten um Zellen) transportiert Signale zu einem Empfänger. Der Empfänger (wiederum Zellen) empfängt, entschlüsselt und verwertet die Signale; er reagiert auf sie.

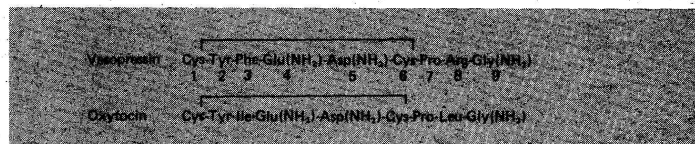


Abb. 2 Aminosäuresequenzen der „Signalpeptide“ Vasopressin und Oxytocin: Die Schwefelatome der Cysteinreste (Cys) in

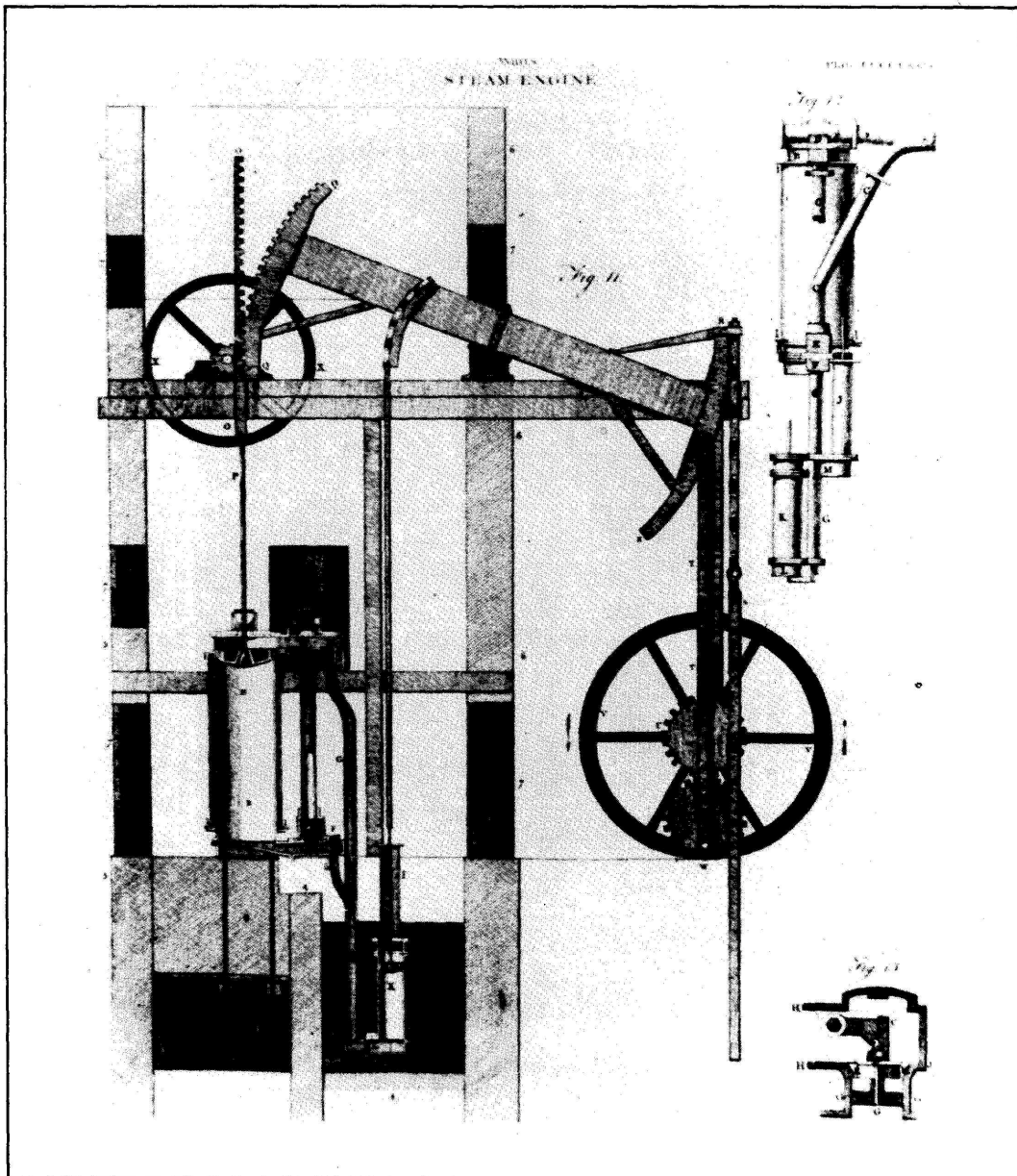
den Positionen 1 und 6 sind verbunden, so daß ein Ring entsteht, an den die Aminosäurereste 7, 8, 9 linear geknüpft sind.

Gehirnbausteine und Gehirnleistungen

Gehirne bestehen aus Zellen und Flüssigkeiten um die Zellen. Das Gehirn eines Wirbeltieres besteht vorwiegend aus drei Zelltypen: Nervenzellen, Gliazellen¹⁾ und Endothelzellen (Hauptzelltyp der Blutgefäßwände). In einem menschlichen Gehirn z. B. sind nach vorsichtigem Überschlag etwa 100 Mrd. (zudem unterschiedliche) Nerven- und Gliazellen zusammengefügt. Um diese Zahl zu veranschaulichen, sei erwähnt, daß

man mit 100 Mrd. Kopfsteinen alle Straßen unseres Landes pflastern könnte. Auch die Endothelzellen im menschlichen Gehirn zählen nach Milliarden; denn alle Blutgefäße des Gehirns zusammen sind mehr als 600 km lang. Irgendwie kommen alle kom-

¹⁾ Die Bezeichnung Gliazellen — vom Griechischen hergeleitet — weist darauf hin, daß dieser Zelltyp früher als „Leim“ oder „Kitt“ zwischen Nervenzellen aufgefaßt wurde. Heute sind verschiedene Funktionen von Gliazellen nachgewiesen, weitere werden diskutiert.



Watts Dampfmaschine

1765 hatte James Watt seine Dampfmaschine erfunden. Gegenüber ihren Vorläuferinnen — z. B. der Maschine des Engländers Newcomen — sparte sie 75% Brennstoff durch einen „einfachen“ Trick: Bis dahin hatte man den Dampf im Zylinderraum (durch Einspritzen von kaltem Wasser) kondensiert. Watt führte einen gesonderten Kondensator ein, so daß Zylinder und Kolben ständig die Dampftemperatur behielten.

Die Abbildung in der dritten Ausgabe der Encyclopaedia Britannica von 1797 zeigt eine verbesserte Version, die Watt

nach 1780 entwickelt hatte. Sie nutzt sowohl die Aufwärts- als auch die Abwärtsbewegung des Kolbens. Gleichzeitig ist diese Maschine eine der ersten, die die Kolbenbewegung in eine Rotationsbewegung umwandelt.

Der Franzose Sadi Carnot, über dessen Werk wir auf den S. 46–50 berichten, untersuchte etwa 40 Jahre später als erster den Wirkungsgrad von Dampfmaschinen. In seinem Hauptwerk, den „Réflexions...“, zitiert er die Encyclopaedia Britannica als Informationsquelle über verschiedene Arten dampfgetriebener Maschinen. Sicherlich war das kein Zufall — hatte doch der britische Dampfmaschinenbau weltweit eine führende Position.