3.8. Der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen

3.8.1. Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschinen wandeln einen möglichst großen Teil der aus einer chemischen oder Kernreaktion gewonnen Wärme in Arbeit um. Sie finden sich in Form von **Dampfturbinen** in allen Kohle-, Öl- und Kernkraftwerken sowie in Form von **Kolbendampfmaschinen** in Dampflokomotiven. Sie funktionieren alle nach dem gleichen Prinzip:

1. Eine Wärmequelle (Kernreaktion oder chemische Reaktion) **erwärmt** ein Gas.
2. Das heiße Gas **expandiert** und treibt dabei eine Turbine oder einen Kolben an.
3. Bei der Expansion **kühlt** sich das Gas ab.
4. Das expandierte und abgekühlte Gas wird durch den Druck der laufenden Turbinen bzw. des zurück laufenden Kolbens wieder in die Wärmequelle gepumpt und dabei wieder **komprimiert**.

Die Schritte 3 und 4 verhindern, dass die gesamte Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann: In Schritt 3 wird nicht nutzbare Abwärme produziert, die in weit sichtbaren Kühltürmen an die Umgebung abgeführt wird. In Schritt 4 wird ein Teil der gewonnen Arbeit dazu benutzt, um das Gas wieder zurück zu pumpen.

Auch die **Verbrennungsmotoren** in allen Kraftfahrzeugen lassen sich im weiteren Sinn mit diesen vier Schritten beschreiben. Die Abgase werden nicht zurückgeführt, sondern ausgestoßen, womit ein großer Teil Wärme ungenutzt verloren geht. Dafür muss neue Umgebungsluft angesaugt und komprimiert werden, wodurch der Motor gebremst wird bzw. ein Teil der erzeugten Arbeit wieder verloren geht.

Die verlorene Abwärme entsteht im Wesentlichen aus den folgenden Gründen:

1. Umwandlung äußerer Energie (geordnete Bewegung makroskopischer Körper) in innere Energie (ungeordnete Bewegung mikroskopischer Körper) durch **Reibung** und **Verformung**. (siehe Aufgabe)
2. **Irreversible Ausgleichsvorgänge** infolge von Druck- und Temperaturunterschieden zwischen System und Umgebung (siehe Abschnitt 3.4.3.)
3. **Rückführung** des Kolbens und des Arbeitsmediums in den ursprünglichen Zustand bei **periodisch** arbeitenden Wärmekraftmaschinen auch bei **reversiblem** und **reibungsfreien** Betrieb. Dies ist die Aussage des klassischen Formulierung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik:

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik für Wärmekraftmaschinen
Jede **periodisch arbeitende** Wärmekraftmaschine muss auch bei **reversiblem** und **reibungsfreien** Betrieb einen Teil der zugeführten Wärme wieder an die Umgebung abgeben, um wieder in die **Ausgangsstellung** zurückzukommen. Infolge dieser **Abwärme** wird das Verhältnis aus zugeführter Wärmenergie und abgegebener Arbeit (ihr **Wirkungsgrad**) niemals 100 % erreichen.

Andernfalls müsste es z.B. möglich sein, einen Automotor zu konstruieren, der nur die Umgebungsluft abkühlt und die dadurch gewonnene Wärmenergie in Arbeit umwandelt. Ein solcher Motor widerspricht zwar jeglicher Erfahrung, nicht aber dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik.

Für die Untersuchung des maximal erreichbaren Wirkungsgrades reversibel und reibungsfrei arbeitender Wärmekraftmaschinen benötigt man **Modellvorstellungen** über die thermodynamischen Vorgänge in einer **Wärmekraftmaschine**. Ein geeignetes Modell ist der **Carnot-Prozeß**, der im Folgenden beschrieben wird.

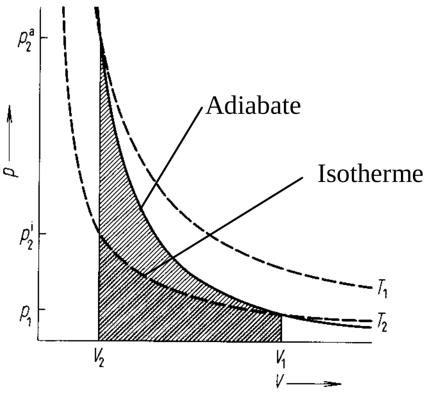
Übungen: Aufgaben zur Thermodynamik Nr. 23 und 24

3.8.2. Reversible adiabatische Zustandsänderungen

Die meisten Redoxreaktionen und insbesondere die Vorgänge in Verbrennungsmotoren laufen so schnell ab, dass ein Wärmeaustausch mit der Umgebung vernachlässigt werden kann. Bei solchen Vorgängen ist also Q = 0 und man spricht von **adiabatischen** Prozessen. Aus dem 1. Hauptsatz erhält man durch Übergang zu kleinen Schritten und Trennung der Variablen: $dU = dW \Rightarrow n\cdot C_V\cdot dT = -p\cdot dV = -\frac{n\cdot R\cdot T}{V}\cdot dV \Rightarrow \frac{1}{T}dT = -\frac{R}{C_V}\frac{1}{V}dV \Rightarrow$

$\int_{T_1}^{T_2}\frac{1}{T}dT = -\int_{V_1}^{V_2}\frac{R}{C_V V}dV \Rightarrow \ln\frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_V}\ln\frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\frac{R}{C_V}}$ Mit pV = nRT ergibt sich weiter $\frac{p_2\cdot V_2}{p_1\cdot V_1}$

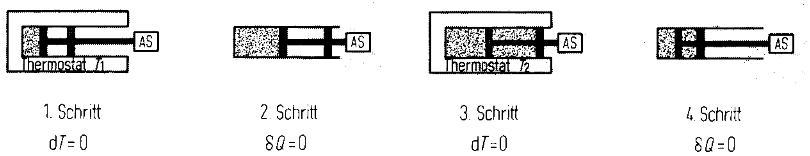
$= \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\frac{R}{C_V}} \Rightarrow p_2 = p_1\cdot\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1+\frac{R}{C_V}}$. Im Vergleich zur Isothermen verläuft die **Adiabate** $p(V) = p_1\cdot\left(\frac{V_1}{V}\right)^{1+\frac{R}{C_V}}$ steiler nach unten und die geleistete Arbeit $W = -\int_{V_1}^{V_2} p\,dV = p_1V_1\frac{C_V}{R}\left[\left(\frac{V}{V_1}\right)^{-\frac{R}{C_V}}\right]_{V_1}^{V_2} =$ $n\cdot T_1\cdot C_V\cdot\left[\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\frac{R}{C_V}}-1\right] = n\cdot T_1\cdot C_V\cdot\left[\frac{T_2}{T_1}-1\right] = n\cdot C_V\cdot\Delta T$ ist geringer, da sich das Gas bei der Expansion abkühlt, wodurch sich der Druck verringert und weniger Arbeit verrichtet werden kann. Die Berechnung des Integrals kann man sich auch sparen: Wegen $Q = 0$ ist die geleistete Arbeit gleich der Änderung der inneren Energie, also $W = \Delta U = n\cdot C_v\cdot\Delta T$.

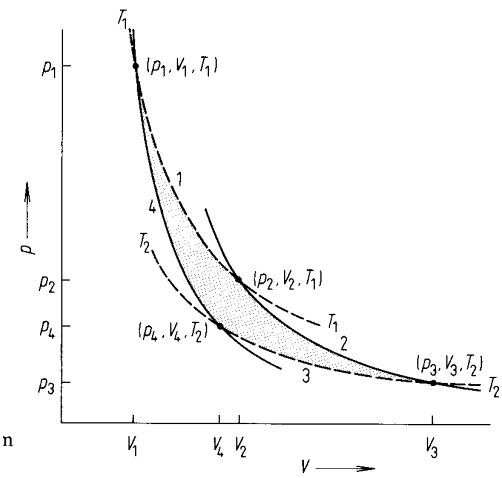


reversible adiabatische und isotherme Zustandsänderungen

3.8.3. Der Carnot-Prozess

Der Carnotsche Kreisprozess ist eine idealisierte Beschreibung der Arbeitstakte einer Dampfmaschine. Er wurde 1824 von dem französischen Ingenieur **Sadi Carnot** formuliert, um den Wirkungsgrad von Dampfmaschinen zu untersuchen und besteht aus den folgenden vier Schritten (AS = Arbeitsspeicher).





1. **Isotherme Expansion** von (p_1, V_1, T_1) nach (p_2, V_2, T_1) auf der **Isothermen** $p(V) = \frac{n\cdot R\cdot T_1}{V}$. Die aufgenommene Wärme Q_{T1} wird in Form von Volumenarbeit $-W_1$ vollständig wieder abgegeben: $Q_{T1} = -W_1 = n\cdot R\cdot T_1 \ln\frac{V_2}{V_1}$.
2. **Adiabatische Expansion** von (p_2, V_2, T_1) nach (p_3, V_3, T_2) auf der **Adiabaten** $p(V) = p_2\cdot\left(\frac{V_2}{V}\right)^{1+\frac{R}{C_V}}$. Die geleistete Volumenarbeit $-W_2$ entspricht gerade der Abnahme ΔU der inneren Energie infolge der Abkühlung um ΔT: $-W_2 = \Delta U = C_v\Delta T = C_v\cdot(T_2 - T_1)$.
3. **Isotherme Kompression** von (p_3, V_3, T_2) zu (p_4, V_4, T_2) auf der **Isothermen** $p(V) = \frac{n\cdot R\cdot T_2}{V}$. Die abgeführte Wärme Q_{T2} wird in Form von Volumenarbeit $-W_3$ vollständig wieder zugeführt, also $Q_{T2} = -W_3 = n\cdot R\cdot T_2 \ln\frac{V_4}{V_3}$.
4. **Adiabatische Kompression** von (p_4, V_4, T_2) zu (p_1, V_1, T_1) auf der **Adiabaten** $p(V) = p_4\cdot\left(\frac{V_4}{V}\right)^{1+\frac{R}{C_V}}$. Die zugeführt Volumenarbeit $-W_4$ entspricht gerade der Zunahme ΔU der inneren Energie: $-W_4 = \Delta U = C_v\Delta T = C_v\cdot(T_1 - T_2) = W_2$.

3.8.4. Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses

Die bei dem Prozess insgesamt **gewonnene Arbeit** ist dann $-W = -W_1 - W_2 - W_3 - W_4 = n{\cdot}R{\cdot}T_1\ln\frac{V_2}{V_1} + C_V{\cdot}(T_2 - T_1) + n{\cdot}R{\cdot}T_2\ln\frac{V_4}{V_3} + C_V{\cdot}(T_1 - T_2) = n{\cdot}R{\cdot}T_1\ln\frac{V_2}{V_1} + n{\cdot}R{\cdot}T_2\ln\frac{V_4}{V_3}$. Aus den **Adiabatengleichungen** ergibt sich aber einerseits im 2. Schritt $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\frac{R}{C_V}}$ und andererseits im 4. Schritt $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{\frac{R}{C_V}}$, also $\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\frac{R}{C_V}} = \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\frac{R}{C_V}} \Rightarrow \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \Rightarrow -W = n{\cdot}R{\cdot}(T_1 - T_2)\ n\frac{V_2}{V_1}$. Der **Wirkungsgrad η** der Wärmekraftmaschine ist das Verhältnis der gewonnenen Arbeit $-W$ zu der aufgenommenen Wärmemenge Q_{T1}:

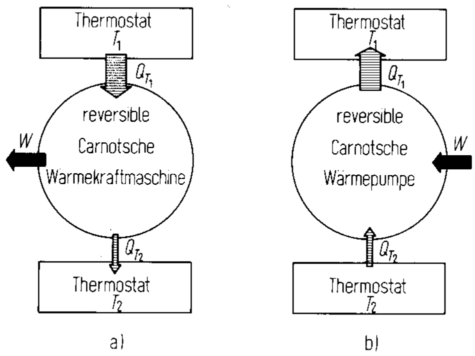
$$\eta = \frac{|W|}{|Q_{T1}|} = \frac{n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}}{n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

. Der Wirkungsgrad hängt also allein vom Verhältnis der Temperaturen ab und wird mit steigender Heiztemperatur T_1 und sinkender Kühltemperatur T_2 anwachsen. Die Heiztemperatur T_1 ist u.a. durch die entsprechend hohen Drücke in den Heizrohren aus technischen Gründen nach oben begrenzt. Andererseits kann die Kühltemperatur niemals 0 K erreichen, da die Wärme immer vom wärmeren zum kälteren Körper fließt, d.h. um den Kühler auf $T_2 = 0$ K abzukühlen, bräuchte man einen weiteren Kühler mit einer Temperatur $T_3 < 0$ K. **Die zugeführte Wärme Q_{T1} kann also niemals vollständig in Arbeit umgewandelt werden**: **es gibt keine Carnot-Maschine mit Wirkungsgrad 100 %.**

Übungen: Aufgaben zur Thermodynamik Nr. 23 und 24

3.8.5. Der Wirkungsgrad beliebiger reversibler Kreisprozesse

Um den **Wirkungsgrad** des Carnot-Prozesses auf **beliebige Wärmekraftmaschinen** zu übertragen, verwendet man den Carnot-Prozess in entgegen gesetzter Richtung als **Wärmepumpe**, die ein kaltes Gas durch Kompression bzw. Zufuhr von Arbeit erwärmt. Angenommen, es gäbe nun eine Wärmekraftmaschine, die bei gleicher Heiz- und Kühltemperatur einen höheren Wirkungsgrad als $\eta = \frac{|W|}{|Q_{T1}|} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ hätte und von der von der Heizung aufgenommenen Wärmemenge Q_{T1} den erhöhten Anteil $W + \Delta W$ in nutzbare Volumenarbeit umsetzen und den entsprechend verminderten Anteil $Q_{T2} - \Delta W$ als Wärme an den Kühler abgeben würde. Dann könnte man die Arbeit W benutzen, um mit Hilfe einer **Carnot-Wärmepumpe** die Wärmemenge Q_{T2} aus dem Kühler zu entnehmen und der Heizung die Wärmemenge Q_{T1} zuzuführen. In der Bilanz der beiden gekoppelten Maschinen hätte man dann nichts weiter getan, als die dem Kühler entnommene Wärme $Q_{t2} - \Delta W - Q_{t2} = -\Delta W$ vollständig in nutzbare Arbeit umzuwandeln. Jede Wärmekraftmaschine, die effektiver arbeitet als der Carnot-Prozeß, würde also sogar die Konstruktion einer Maschine mit 100 % Wirkungsgrad erlauben. Dies widerspricht aber allen Erfahrungen, d.h., dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik.



Der maximale Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen

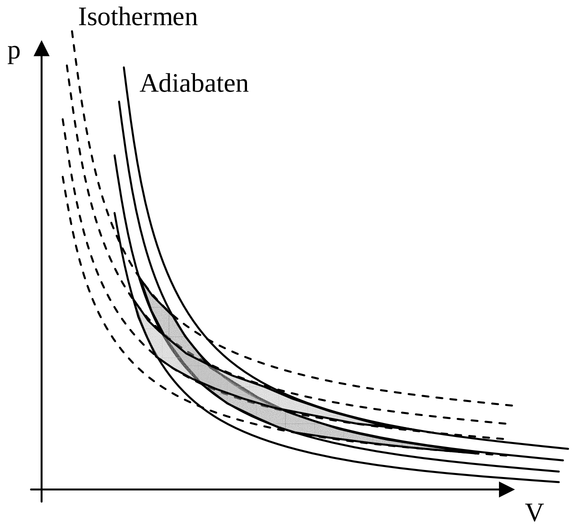
Jede reversibel arbeitende Wärmekraftmaschine hat den gleichen Wirkungsgrad $\eta = \frac{|W|}{|Q_{T1}|} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

Übungen: Aufgaben zur Thermodynamik Nr. 25

3.8.6. Optimierung des Carnot-Prozesses

Die von einem Carnot-Prozess geleistetete Arbeit ist im p-V-Diagramm gleich der durch die Linien für isotherme und adiabate Kompression und Expansion eingeschlossenen Fläche. Um die in einem Arbeitstakt geleistete Arbeit zu erhöhen, kann man diese Fläche in zwei Richtungen erweitern:

In **vertikaler** Richtung (dunkel schraffiert) durch Erhöhung des **Temperaturverhältnisses** T_1/T_2. Dadurch wächst der Wirkungsgrad $\eta = W/Q_{T1}$, d.h., bei gleicher Wärmeaufnahme wird eine größere Arbeit geleistet. Dieses Verhältnis ist aber technisch begrenzt durch **hohe Drücke** bei steigenden Expansionstemperaturen T_1 und die **nachlassende Kühlgeschwindigkeit**, wenn sich die Kompressionstemperaturen T_2 der Umgebungstemperatur nähert.



In **horizontaler** Richtung (hell schraffiert) durch Erhöhung des **Verdichtungsverhältnisses** $V_2/V_1 = V_3/V_4$. Dadurch wächst die bei gegebener Expansionstemperatur aufgenommen Wärme Q_{T1} und damit auch die geleistete Arbeit W, denn der Wirkungsgrad $\eta = 1 - T_2/T_1$ bleibt unverändert. Auch dieses Verhältnis ist technisch begrenzt durch **hohe Drücke** bei hohen Verdichtungen V_1 bzw. V_4 und die **nachlassende Druckkraft** bzw. **nachlassendes Drehmoment** an Kolben oder Turbine, wenn sich der Auslassdruck p_2 dem Umgebungsdruck nähert.

Betrachtet man die Abhängigkeit der geleisteten Arbeit vom Verdichtungsverhältnis genauer, so fällt auf, dass die auf den **Adiabaten** geleisteten Arbeiten $W_2 = W_4 = C_v(T_1 - T_2)$ **unabhängig von der Verdichtung** sind. Die auf den **Isothermen** übertragenen Arbeiten bzw. Wärmen $W_1 = Q_{T1} = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$ und $W_2 = Q_{T2} = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_3/V_4) = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln(V_2/V_1)$ sind **proportional zur Wärmeübertragungstemperatur** T_1 bzw. T_2 und zum **Logarithmus des Verdichtungsverhältnisses** V_1/V_2. Die auf die Wärmeübertragungstemperatur bezogene Wärme $Q_{T1}/T_1 = Q_{t2}/T_2 = n \cdot R \cdot \ln(V_2/V_1)$ ist also ein Maß für die Wärmeausbeute des Carnot-Prozesses: Ein Carnot-Prozess mit hoher Verdichtung kann bei gegebener Brennertemperatur T_1 und gegebener Kühlertemperatur T_2 mehr Wärme aus der Wärmequelle entnehmen und in Arbeit umwandeln. Diesen „**Äquivalenzwert der Verwandlung**“ nahm der Physiker **Rudolf Clausius** im Jahr 1865 als Grundlage für die Definition einer neuer Zustandsgröße, der **Entropie**.

3.8.7. Sadi Carnot

Sadi Carnot kommt im Jahr 1796 als zweiter Sohn des Politikers und Wissenschaftlers Lazare Nicolas Marguerite Carnot in **Paris** zur Welt. Er wird nach dem **persischen Dichter Sadi Schirazi** benannt. Sein Vater erkennt früh das Interesse für Mechanik und Physik und bewege ihn, die technischen Wissenschaften zu studieren. Nach dem Besuch des Elitegymnasiums **lycée charlemagne** besteht Carnot bereits im Alter von 16 Jahren im Jahr 1812 die Aufnahmeprüfung für die renommierte **École Polytechnique** in **Paris**. 1814 erhält er das Leutnantspatent und wechselt an die berühmte **Artillerieschule nach Metz**. Nach seinem Abschluss 1817 tritt er in den regulären militärischen Dienst ein. Da ihm die Monotonie der Garnison und die aufgrund seiner republikanischen Gesinnung sehr beschränkten Aufstiegschancen nicht zusagen, verbringt er die nächsten zehn Jahr fast ausschließlich im **ganz oder teilweise bezahlten Urlaub mit dem Besuch von Vorlesungen und Museen in Paris**. Die Armee gewährt im diesen Urlaub aufgrund seiner **hervorragenden Schulleistungen** und trotz seiner regimekritischen Einstellung, um seinen endgültigen Austritt aus dem Staatsdienst zu verhindern. Eine Erbschaft ermöglicht ihm aber trotz aller Bemühungen seines Arbeitgebers im Jahre 1828 die **Entlassung**, um sich nun ganz der Wissenschaft hinzugeben. Dazu gehören der Besuch von Vorlesungen in **Chemie**, **Physik**, **Mathematik**, **Naturgeschichte** und **Volkswirtschaft** sowie von **Industrieunternehmen** und technischen **Museen** aber auch Musik und die Werke von Blaise Pascal, Molière oder Jean de La Fontaine. Seine Aktivitäten unterbricht er dabei nur einmal für einen Besuch seines Vaters, der seine letzten Lebensjahre in der **Verbannung in Magdeburg** verbingt.

Bei seinen Studien erkennt Carnot Vorzüge und Perspektive der Dampfmaschine. Da man diese Maschinen zu seiner Zeit nur empirisch verbessert, hält er es für dringend geboten, das „**Phänomen der Erzeugung von Bewegung durch Bewegung von Wärme**" eingehend zu betrachten. Das Ergebnis erscheint 1824 in der 43seitigen Schrift „**Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance"** (Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen). Dabei handelt es sich um die einzige Schrift, die zu Lebzeiten Carnots veröffentlicht wird. Sie findet allgemeinen Anklang, ist jedoch bald vergriffen und wird nicht nachgedruckt. Erst 1890 erscheint die englische Übersetzung, und 1892 gibt **Wilhelm Ostwald** eine Übersetzung in deutscher Sprache heraus.

Im Juni 1832 erkrankt Carnot an Scharlach und „Gehirnfieber". Er stirbt wenig später im Alter von nur 36 Jahren während einer Cholera-Epidemie.

Inhalt der Carnot-Schrift

Carnots Arbeiten geraten einige Jahrzehnte lang in Vergessenheit, bis William Thomson, der spätere **Lord Kelvin** sie im Jahr 1848 wieder entdeckt und als Anregung für seine regten Temperaturskala verwendet. **Rudolf Clausius** verweist in einem Artikel zur Wärmelehre im Jahr 1850 ausdrücklich auf Carnots wissenschaftliche Leistung, er spricht von der „... wichtigste[n] hierher gehörige[n] Untersuchung".
Carnot gibt in seinen Betrachtungen an, dass sie sich nicht nur auf Dampfmaschinen beziehen, „... sondern auf jede denkbare Wärmemaschine, welches auch der angewandte Stoff sei, und welcher Art man auf ihn einwirkt". Er bemerkt, dass es sich bei der Arbeitsleistung um einen periodischen Vorgang handelt und gibt dafür einen ideal gedachten Prozess an, der heute ihm zu Ehren als Carnot-Prozess bezeichnet wird. Mit diesen beiden Erkenntnissen legt er auch den Grundstein zur Entwicklung der verschiedenen Verbrennungsmotoren, der Carnot-Prozess liegt bis heute jeder Konstruktion und Berechnung periodisch arbeitender Wärmekraftmaschinen zugrunde. Carnot gibt auch an, dass der Vorgang **umkehrbar** sein müsse, woraus die Entwicklung der **Wärmepumpe** resultiert.
Carnots fundamentaler Satz sagt aus, dass überall dort, wo ein Temperaturunterschied existiert, bewegte Kraft erzeugt werden kann, da Wärme stets bestrebt ist, von einem heißen in einen kalten Zustand überzugehen.
Carnot weist nach, dass sich die Arbeit von Dampfmaschinen proportional zur Menge der Wärme (genauer: Entropie) verhält, die vom Kessel auf den Kondensator übergeht, also vom Reservoir hoher auf das Reservoir niedriger Temperatur. Notwendig sind ein "Zufluss" und ein "Abfluss" der Wärme bzw. der **Entropie**. Der Abfluss kann normalerweise nicht bei tieferer Temperatur als der Umgebungstemperatur (298,15 K) erfolgen. Daraus ergibt sich, dass der maximale Wirkungsgrad nicht 1 erreichen kann.

Carnot weist zudem nach, dass der Wirkungsgrad mit größerem Temperaturgefälle ebenfalls größer wird. Daraus resultiert, dass keine Wärmekraftmaschine einen höheren Wirkungsgrad aufweisen kann, als jenen, der sich aus dem „Maximum an bewegter Kraft, welches sich aus der Anwendung des Dampfes ergibt". Dabei ist jede reversible Maschine unabhängig vom Arbeitsstoff, andernfalls könnte eine geeignete Kombination von Maschinen mit unterschiedlichem Wirkungsgrad ein Perpetuum Mobile zweiter Art ermöglichen.

Kritik an der Carnot-Schrift

Carnot stützt sich mit seinen Ausführungen auf die Theorie, Wärme sei ein hypothetischer, unwägbarer **Stoff** von immer gleich bleibender Menge. Dieser Gedanke wird seinerzeit allgemein vertreten, Antoine Laurent de Lavoisier spricht von „**Calorique**". Sir Benjamin Thompson und Sir Humphry Davy sehen aufgrund ihrer Reibungsversuche in Wärme aber bereits eine Art Bewegung. 1850 führt dann Clausius mit einem Aufsatz das Äquivalenzprinzip ein, welches die Idee einer unveränderlichen Wärmemenge verlässt. **Robert von Mayer** erwähnte es bereits 1842, **James Prescott Joule** bestätigt es im darauf folgenden Jahr experimentell und **Hermann von Helmholtz** verallgemeinert es - unabhängig von Mayer - auf alle Energieformen. Clausius weist dabei explizit darauf hin, dass nicht das Grundprinzip Carnots zu beanstanden ist, sondern lediglich der Zusatz, dass keine Wärme verloren geht.
Sadis Bruder Lazare Hippolyte Carnot (1801 bis 1888) veröffentlicht mit der zweiten Auflage der Carnot-Schrift einen Anhang mit Ausführungen aus dem Nachlass. Aus diesen geht hervor, dass Sadi von seiner 1824 ausgeführten Ansicht später wieder abwich und nun Wärme als eine Energieform begriff. Er bestimmte sogar das **mechanische Wärmeäquivalent** mit 370 kpm/Kalorie wenigstens 10 Jahre vor Mayer, womit er einem universellen Gesetz zur **Energieerhaltung** sehr nahe kam.