

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

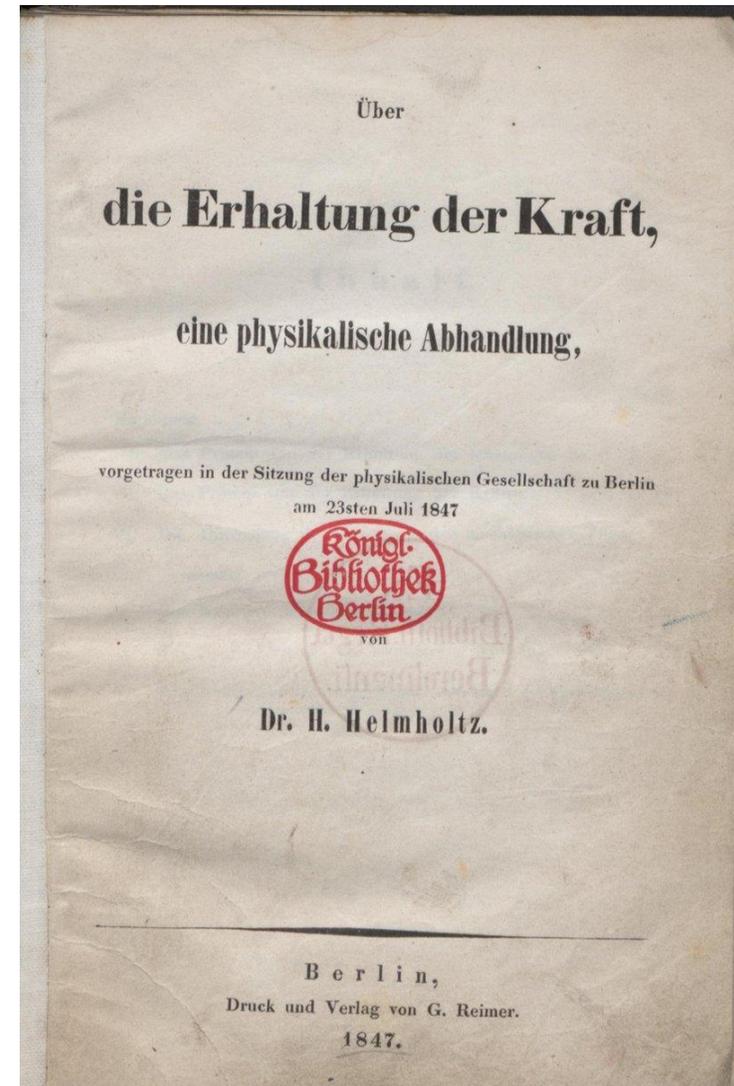
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

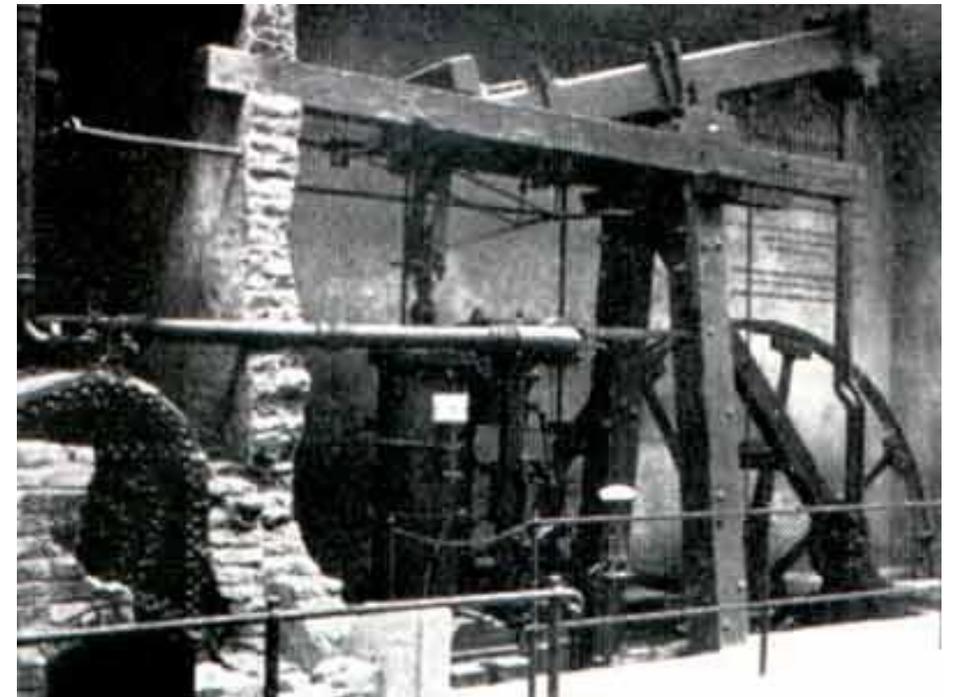
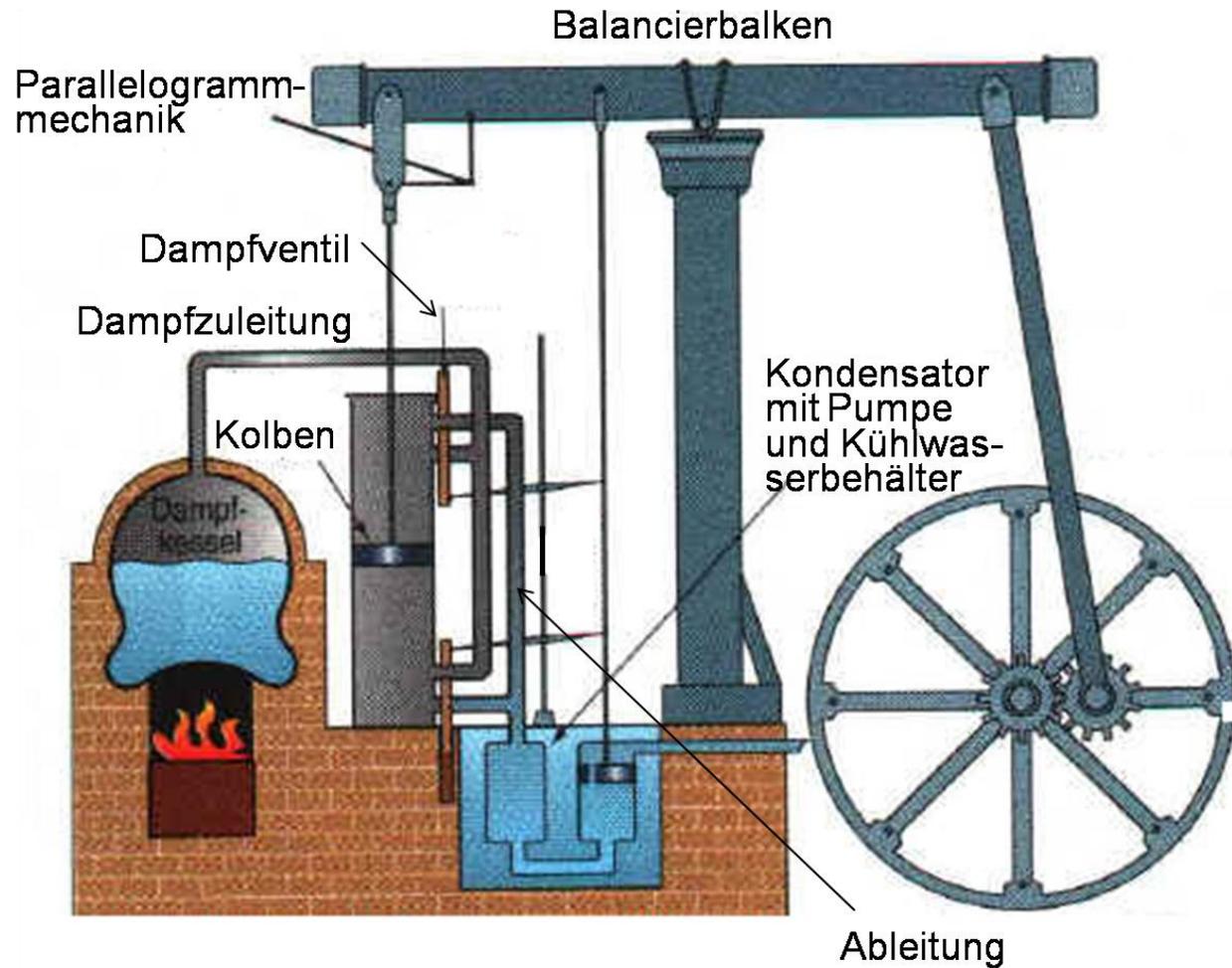
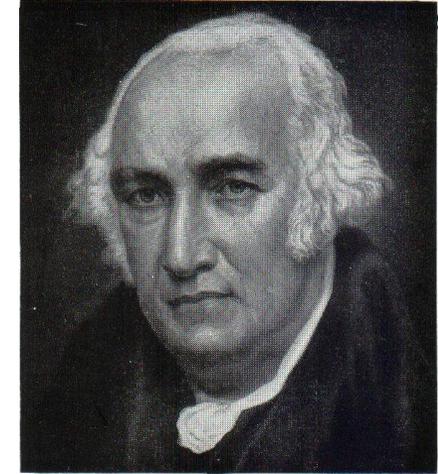
4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

Die Dampfmaschine von James Watt – Prinzip und Original



James Watt, Erfinder und Ingenieur



Boulton (l.) und Watt (r.)

- 1736 Geboren in Schottland, Vater Zimmermann, gebildete Mutter.
Ausbildung als Mechaniker, da das Geld für ein Studium fehlte,
 - 1757 Werkstattleiter an der Universität Glasgow; Vorlesungen u.a. bei
Joseph Black; Reparatur einer Newcomen Dampfmaschine
 - 1776 Partnerschaft mit dem Industriellen Matthew Boulton zur
Produktion der von Watt verbesserten Dampfmaschinen;
Vermarktung durch Leasing
 - 1800 Rückzug aus dem aktiven Leben, Tod 1819
- Ehrungen: Die Einheit der Leistung wurde nach ihm benannt,
Dr. h.c. der Univ. Glasgow, Mitglied der franz. Akademie
der Wissenschaften, Denkmal in London

Die industrielle Revolution in Großbritannien

- 1712 Dampfmaschine von Newcomen
- 1780 Verbesserte Dampfmaschine von Watt
- Um 1800 Erstes Dampfschiff
- Um 1810 Erste Dampflokomotive

Installierte Leistung von Wind-, Wasser- und Dampfkraftanlagen in Großbritannien, 1760–1907 in PS^[27]							
Jahr	Wind		Wasser		Dampf		Total
	PS	%	PS	%	PS	%	PS
1760	10.000	11,8	70.000	82,3	5.000	5,9	85.000
1800	15.000	8,8	120.000	70,6	35.000	20,6	170.000
1830	20.000	5,7	165.000	47,1	165.000	47,1	350.000
1870	10.000	0,4	230.000	10,0	2.060.000	89,6	2.300.000
1907	5.000	-	178.000	1,8	9.659.000	98,1	9.842.000

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

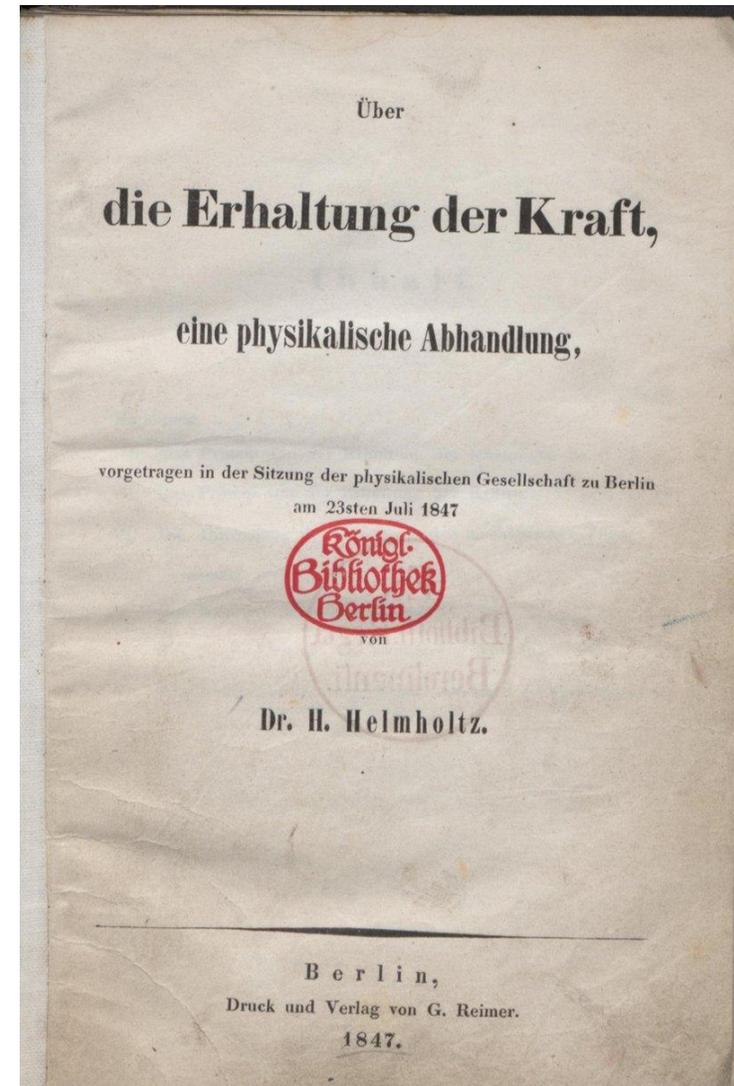
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

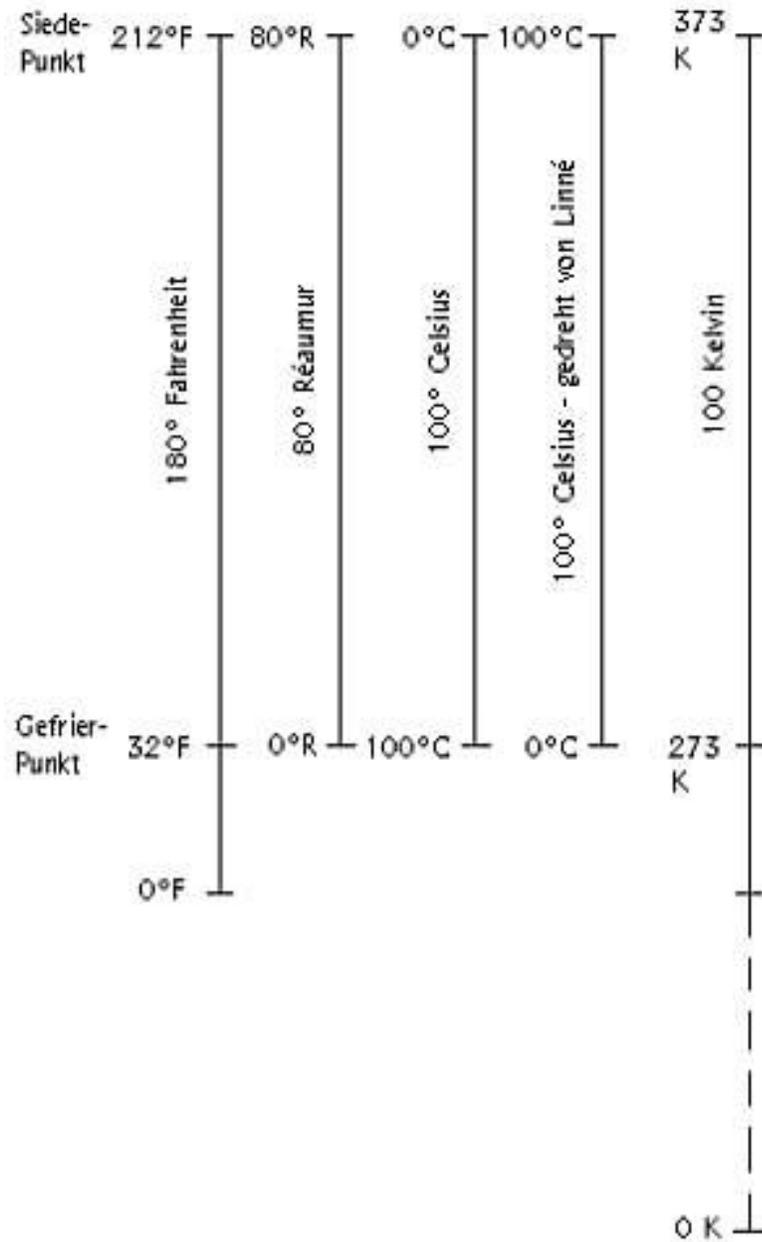
4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847



Temperaturskalen

Michael Fahrenheit (1686 – 1736):	1714
Antoine de Réaumur (1683 – 1757):	1730
Anders Celsius (1701 – 1744):	1742
Karl von Linné (1707 – 1778)	um 1750
Lord Kelvin (1824 – 1907)	1851

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

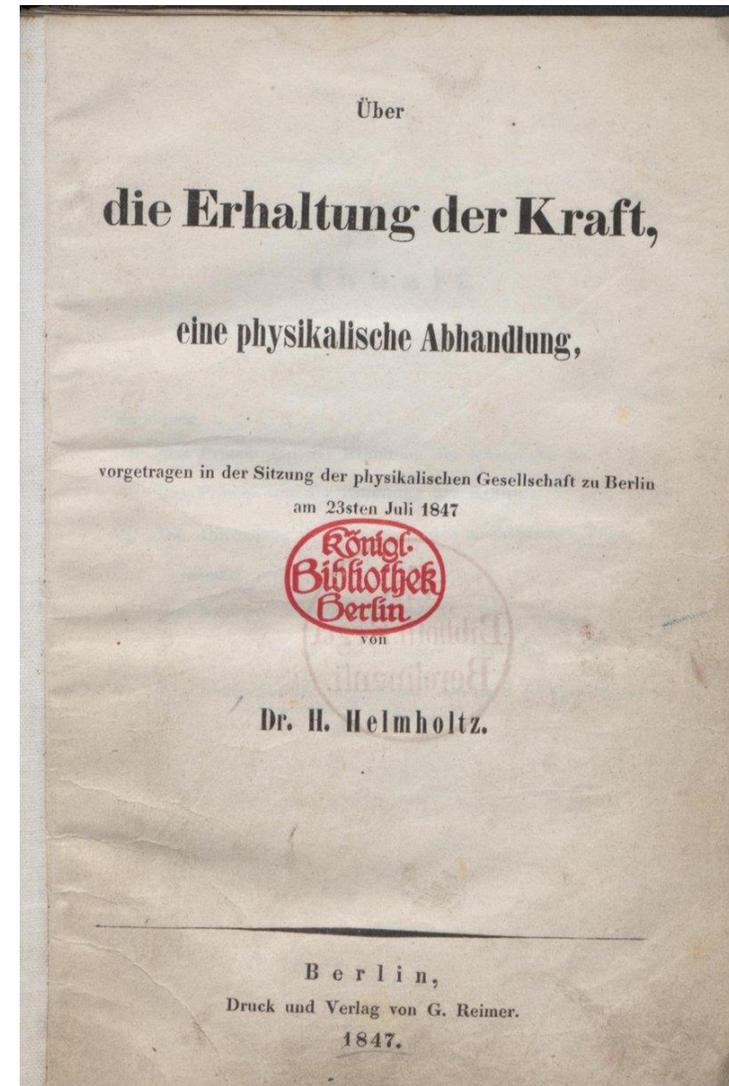
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

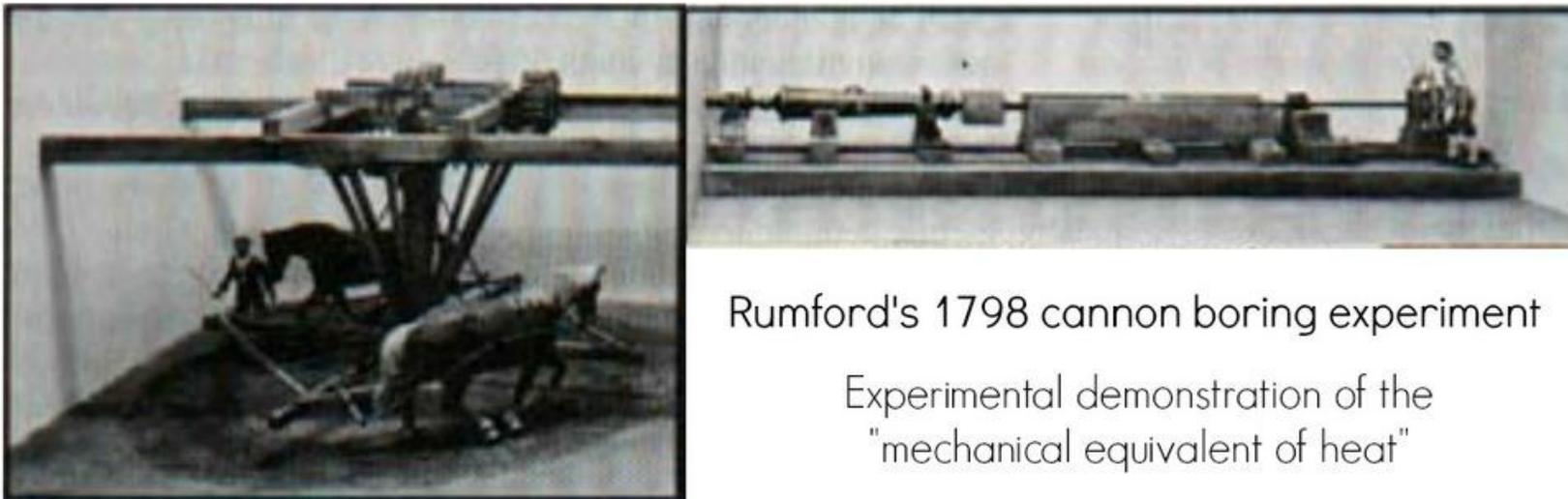
Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung ?

Vorherrschende Meinung im 18. Jahrhundert: Wärme ist eine Substanz, sie fließt von einem Körper höherer zu einem niedrigerer Temperatur.

Prominenter Vertreter: Joseph Black (1728 – 1799)

Dagegen sagt Graf Rumford (1753 – 1814): Wärme ist keine Substanz, sondern eine Art von Bewegung. Er untermauerte seine Meinung durch zwei Schlüssel-Experimente:

- a. Wägung während des Schmelzens von Eis → Wärme hat kein Gewicht.
- b. Bohren von Kanonenrohren → Wärme kann beliebig produziert werden.



Rumford's 1798 cannon boring experiment

Experimental demonstration of the
"mechanical equivalent of heat"

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

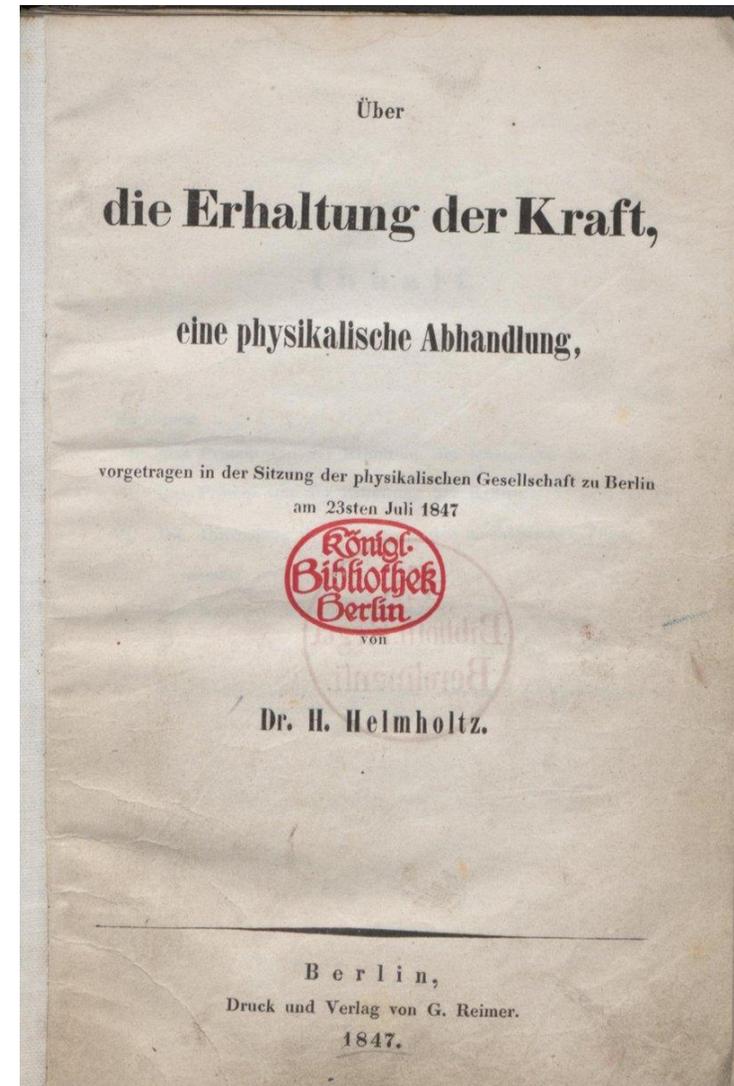
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

Benjamin Thompson, später Graf Rumford (1753 – 1814)



- 1753 Geboren in der Nähe von Boston, USA
Interesse an Naturwissenschaften, kein abgeschlossenes Studium, durch Heirat sozialer Aufstieg
- 1773 Der Gouverneur von Massachusetts macht ihn zum Major der Miliz
- 1775 Flucht nach England, Anstellung in der Kolonialverwaltung
Versuche mit Schießpulver und Artilleriegeschossen
- 1779 Mitglied der Royal Society
- 1783 Beendigung seiner militärischen Karriere in England als Oberst,
Ritterschlag durch den König
- 1784 Kammerherr und Adjutant am bayerischen Hof, u.a. verantwortlich für
das Arsenal
Reorganisation der Armee, Sozialreformer, Bau des englischen Gartens
Steile Karriere in der Armee: vom Generalmajor bis zum Kriegsminister
und Polizeichef, rettet München vor der Zerstörung
- 1790 Erhebung zum Reichsgrafen des Heiligen Römischen Reichs
- 1798 Widerlegung der Wärmestofftheorie beim Kanonenbohren
Rückkehr nach England und Gründung der Royal Institution
- 1802 Übersiedlung nach Paris, wo er im Labor von Lavoisier bis zu seinem Tode
wissenschaftlich arbeitete.



Standbild von Kaspar von Zumbusch in der Münchener Maximiliansstraße

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

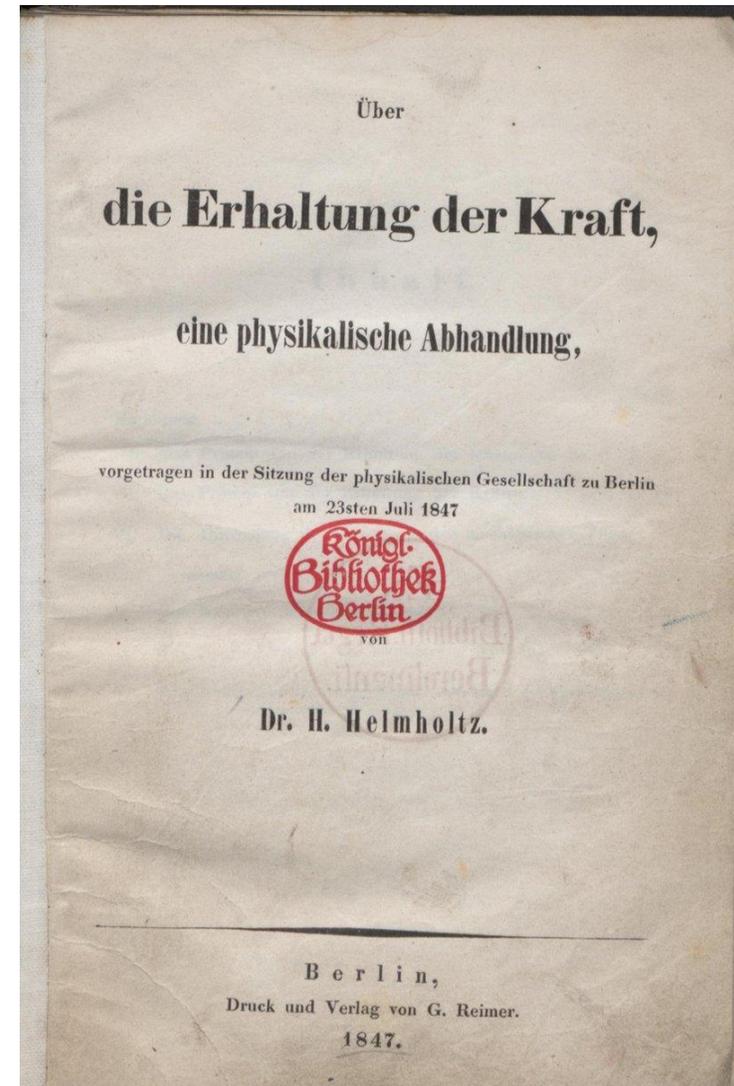
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847



Robert Julius Mayer
(1814 – 1878)

Das mechanische Wärmeäquivalent

Für eine wissenschaftliche Entdeckung muss die Zeit reif sein.

„Zwischen 1842 und 1847 wurde die Hypothese der Energieerhaltung von vier in weiter Entfernung von einander arbeiteten europäischen Wissenschaftlern – Mayer, Joule, Colding und Helmholtz – öffentlich geäußert, von denen alle außer dem letztgenannten keinerlei Kenntnis von der Arbeit der anderen hatten.“ (Thomas Kuhn. „Die Erhaltung der Energie als Beispiel gleichzeitiger Entdeckung“)



James Prescott Joule
(1818 – 1889)

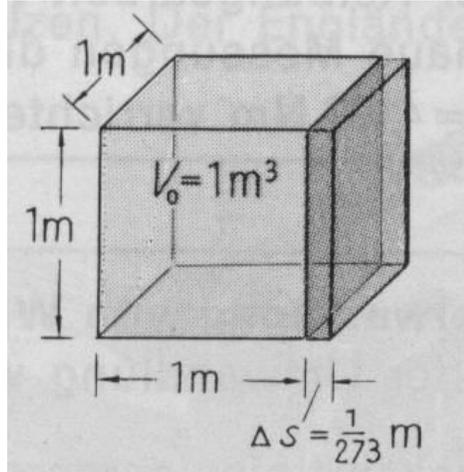


Ludwig August Colding
(1815 – 1888)



Hermann Helmholtz
(1821 – 1894)

Robert Mayer und das mechanische Wärmeäquivalent



Damit wird die Arbeit $W = F \Delta s = p \Delta V$ gegen den äußeren Luftdruck verrichtet.

$$W = 370 \text{ Nm}$$

370 Nm entsprechen also 88,5 cal oder

Spezifische Wärmen von Luft:

$$c_p = 0,240 \text{ cal}/(\text{g}\cdot\text{K}); c_v = 0,1715 \text{ cal}/(\text{g}\cdot\text{K})$$

Bei Erwärmung von 1 m^3 Luft von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ um 1 K wird bei konstantem Druck die Wärme ΔQ mehr zugeführt als bei konstantem Volumen:

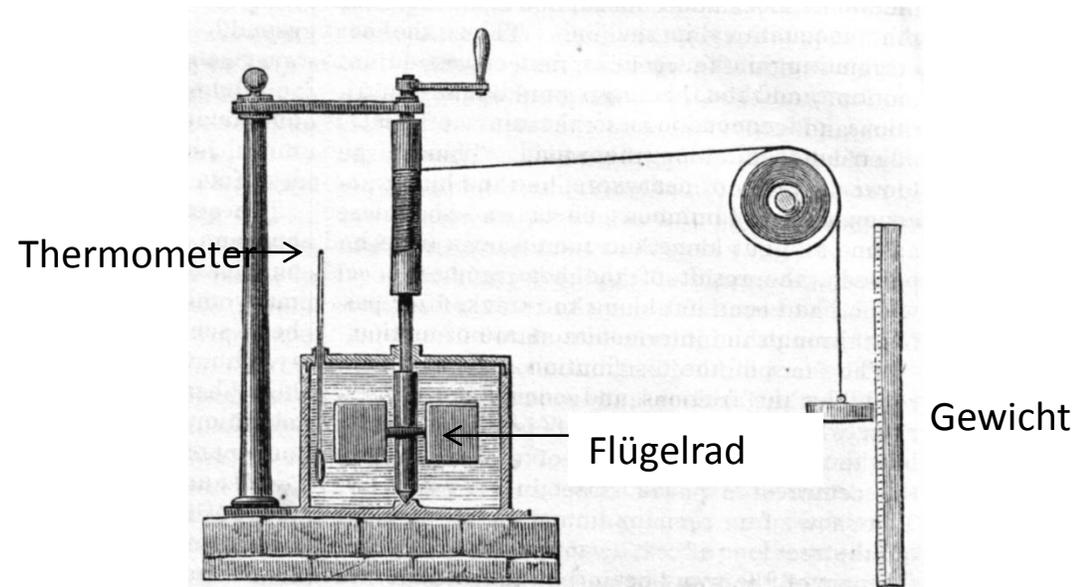
$$\begin{aligned} \Delta Q &= (c_p - c_v) \cdot m \cdot \Delta \vartheta \\ &= 88,5 \text{ cal} \end{aligned}$$

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} \text{ entspricht } 0,239 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} \text{ entspricht } 4,19 \text{ J}$$

$$\text{Mayers Ergebnis: } 1 \text{ cal} = 3,6 \text{ J}$$

Joulesche Messung des mechanischen Wärmeäquivalents (1843)



Prinzip der Jouleschen Apparatur

Ergebnis seiner Messungen: $1 \text{ cal} = 4,15 \text{ J}$



**James Prescott Joule
(1818-1889)**

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

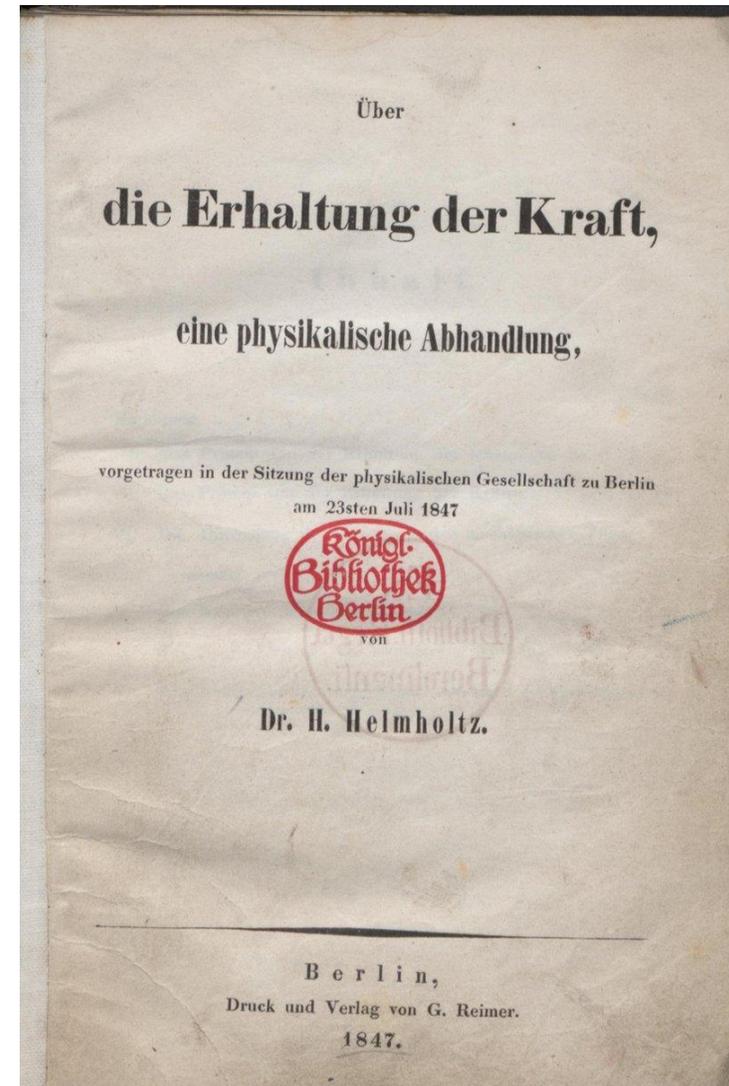
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

Julius Robert Mayer (1814-1878)



„No greater genius than Robert Mayer has appeared in our century“

John Tyndall

geb. in Heilbronn, Vater Apotheker
Studium der Medizin in Tübingen

1840 Schifffarzt auf einem Frachtschiff nach Indonesien, Beobachtung der Farbänderung des Blutes in den Tropen

1841 Niederlassung als Arzt in Heilbronn

Erste Arbeit *„Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“* vom Herausgeber der Annalen der Physik ignoriert

1842 Zweite Arbeit *„Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“* in den Annalen der Chemie veröffentlicht

1850 Suizidversuch u.a. wegen mangelnder wissenschaftlicher Anerkennung

1867 Adelstitel,

1871 Copley Medaille

Historisches Umfeld:

1806 Ende des Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation
Königreich Württemberg souveräner Staat

1848 Der König beruft liberale Politiker in seine Regierung, die Revolution verläuft anders als in Baden in geordneten Bahnen.

1871 Gliedstaat des Deutschen Reiches mit gewissen Sonderrechten

1918 Ende der Monarchie

Hermann von Helmholtz (1821 – 1894)



- 1821 Geboren in Potsdam, Sohn eines Gymnasiallehrers
Studium der Medizin
- 1847 Arbeit „Über die Erhaltung der Kraft“
- 1849 Professur für Physiologie und Pathologie in Königsberg
- 1855 Lehrstuhl für Physiologie und Anatomie in Bonn
- 1857 Lehrstuhl für Physiologie in Heidelberg
- 1870 Ruf auf den Lehrstuhl für Physik in Berlin
- 1888 Direktor der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

*"Gleich nach Bismarck und dem alten Kaiser war er
damals (1885) der berühmteste Mann im Deutschen Reich."*

Michael Pupin (1858 – 1935)

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

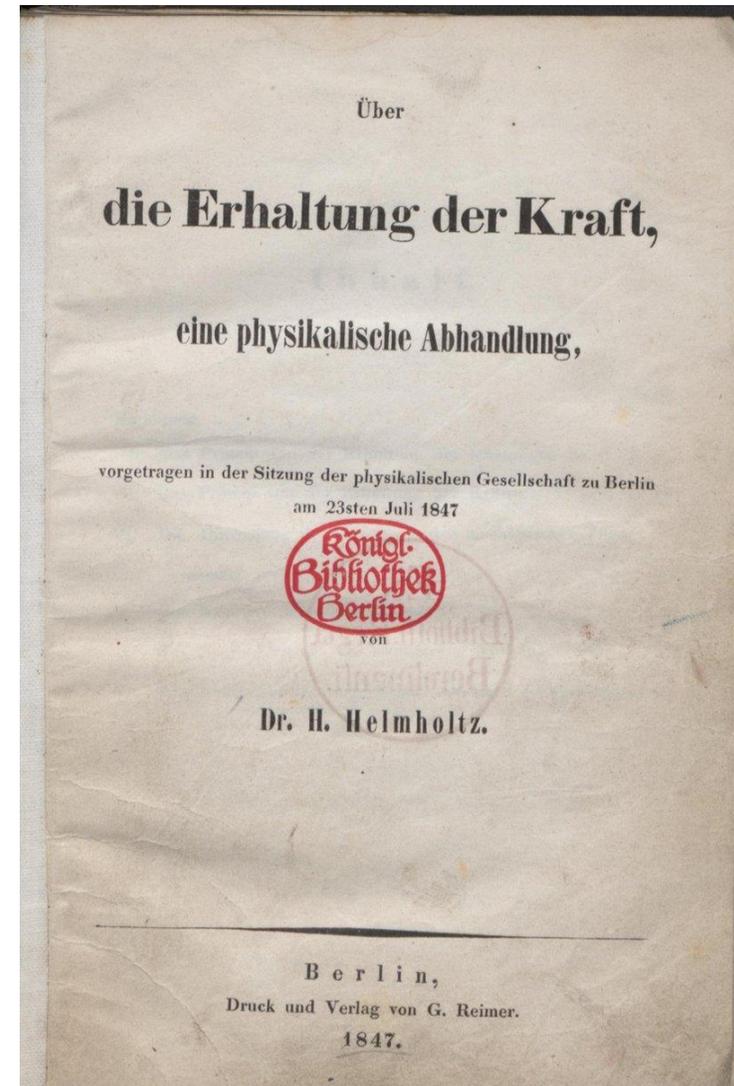
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

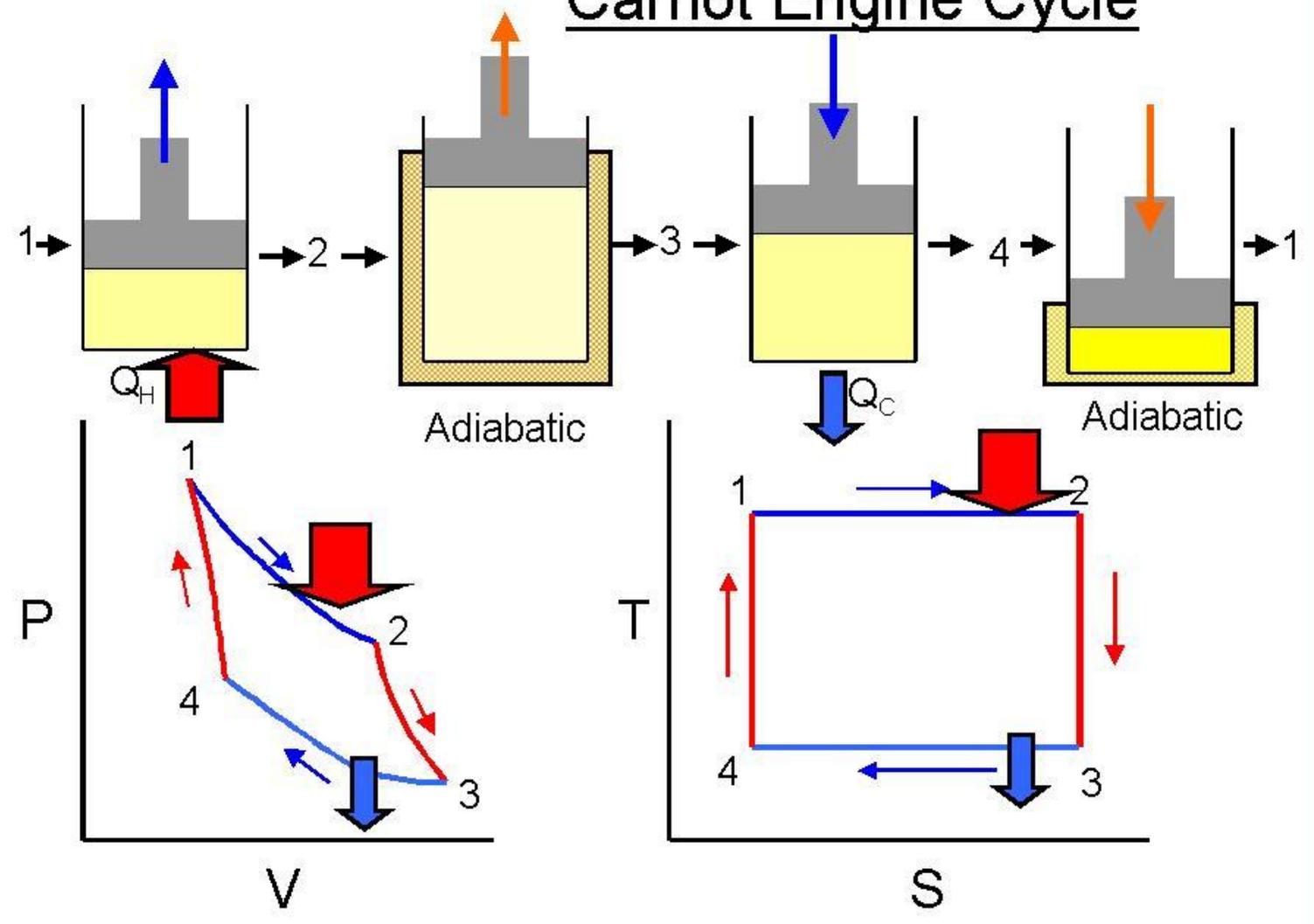
4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

Carnot Engine Cycle



Der Wirkungsgrad einer idealen Dampfmaschine

Wirkungsgrad = gewonnene Arbeit/aufgewandte Wärmeenergie

Idealer Wirkungsgrad $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$

T_1 Temperatur des eingeführten heißen Dampfes

T_2 Temperatur des Kondensats

Beispiel:

$T_1 = 650 \text{ K}$ (entspricht etwa 380°C)

$T_2 = 350 \text{ K}$ (entspricht etwa 80°C)

$\eta = 46 \%$

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

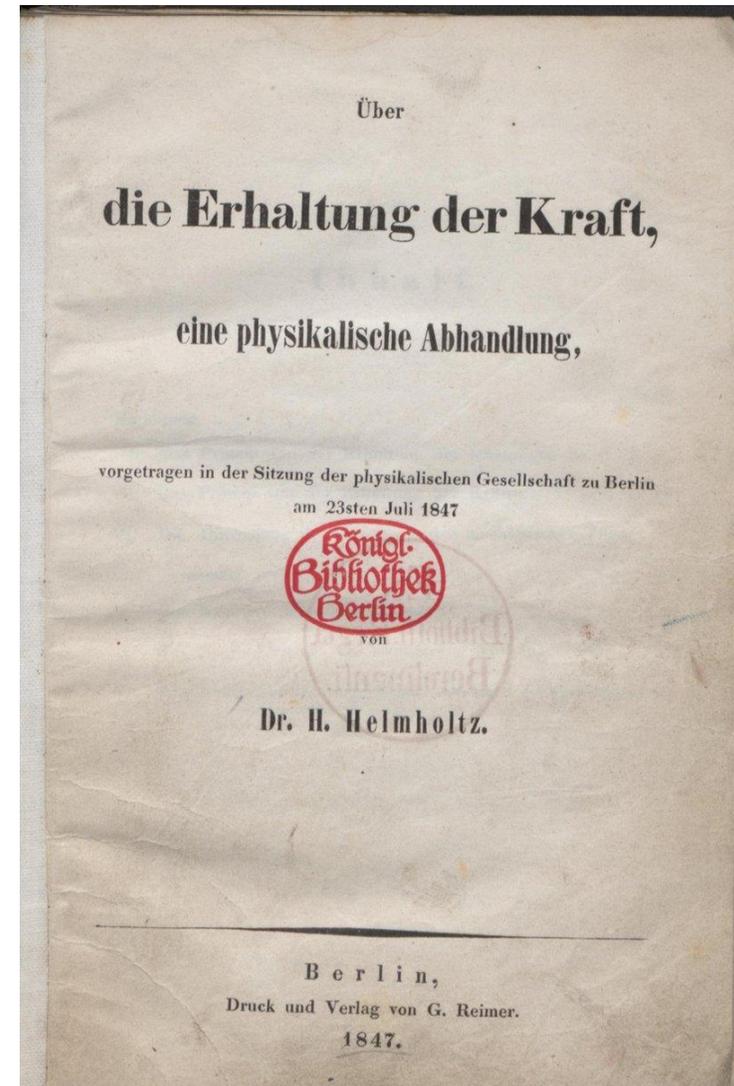
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

Sadi Carnot (1796 – 1832)



- 1796 in Paris geboren
- 1812 Studium der Physik an der Ecole Polytechnique, danach Studium des Militär-Ingenieurwesens an der Ecole du Genie
- 1819 Nach kurzer Militärzeit zog er sich in sein Privatleben zurück und beschäftigte sich mit naturwissenschaftlichen Fragen, insbesondere mit der Wirkungsweise von Dampfmaschinen
- 1824 „Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance“

4. Wärme, Energie und Entropie

4.1 Die Dampfmaschine und der Beginn des industriellen Zeitalters

4.2 Temperatur

4.3 Wärme: Substanz oder eine Art von Bewegung?

4.4 Benjamin Thompson

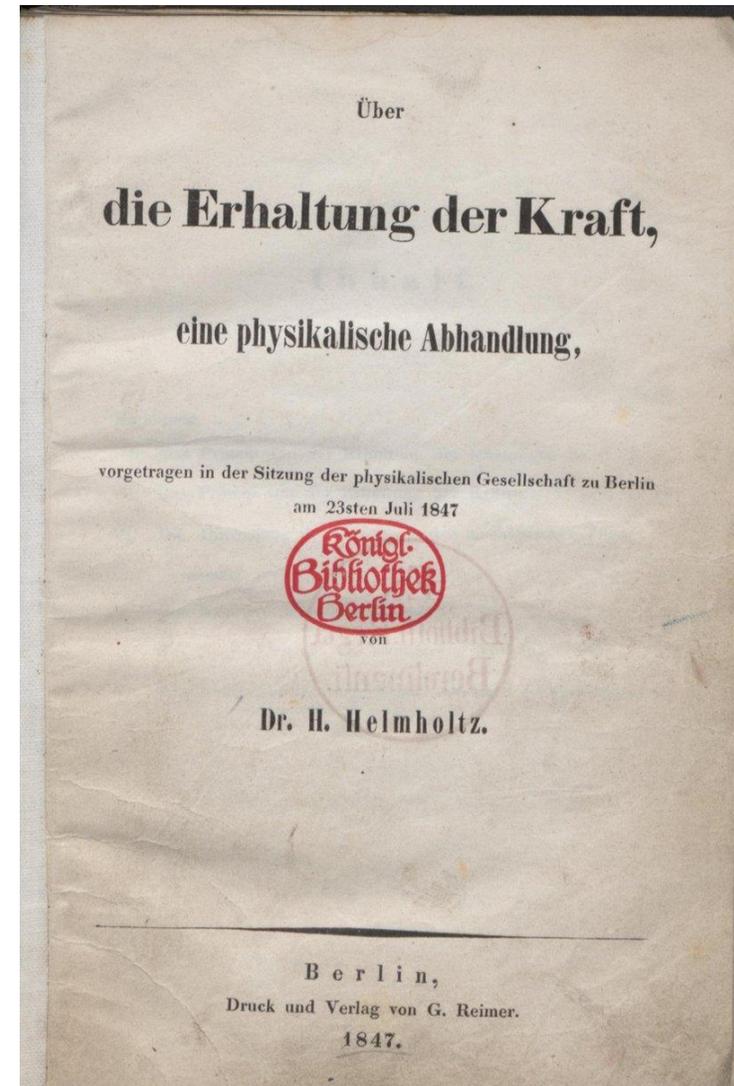
4.5 Die Erhaltung der Energie

4.6 Robert Mayer, Prescott Joule und Hermann Helmholtz

4.7 Umwandlung von Wärme in Arbeit – Wirkungsgrad

4.8 Sadi Carnot

4.9 2. Hauptsatz, Entropie



Berlin SBB-PK, Mw 9728 R

Helmholtzsche Abhandlung zur Erhaltung der Energie, Berlin 1847

Entropie und zweiter Hauptsatz

Entdecker:

Rudolf Clausius (1822 -1888)

[William Thomson (Lord Kelvin) (1822 – 1892)]

Zweiter Hauptsatz: ca. 1860

Wärme ist eine „merkwürdige“ Form von Energie.

Ausgehend von Carnots Betrachtungen gab Clausius zwei mögliche Formulierungen für den Hauptsatz:

- Wärme kann nicht von selbst von einem kälteren in einen wärmeren übergehen.
- Es gibt kein Perpetuum mobile zweiter Art, d.h. keine Vorrichtung, die Wärme vollständig (Wirkungsgrad 100%) in mechanische Arbeit umwandelt (unter Erhaltung der Gesamtenergie)

„Entropie ist etwas, was man nicht versteht, aber man gewöhnt sich daran.“ Max Planck

Aus der Betrachtung des Carnot-Kreisprozesses ergibt sich

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2 \quad \rightarrow \quad \int dQ/T = 0, \text{ wenn über den ganzen Kreisprozess integriert wird}$$

Damit ist die Größe S definiert durch $dS = \delta Q/T$ eine **Zustandsfunktion**. Die Größe $S(E,V,N..)$ wird Entropie genannt. „Entropie“ gr. „Richtung“

Entropie bestimmt,

- in welche Richtung ein Prozess von selbst abläuft
- wie viel mechanische Energie maximal mit einer Wärmekraftmaschine gewonnen werden kann.

Wenige Jahre später (1971) entdeckte Boltzmann den Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit

Dritter Hauptsatz (1906) : Die Entropie eines Zustand im inneren Gleichgewicht verschwindet für $T \rightarrow 0$ (Walter Nernst (1864 – 1941))