

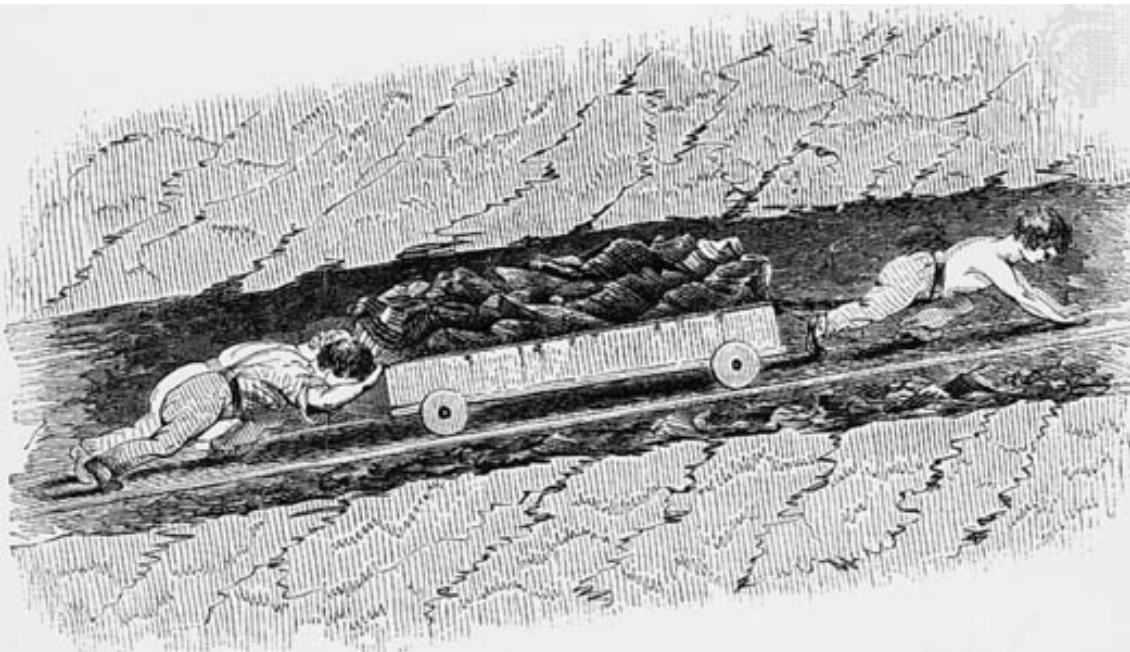
Thermodynamik

θερμός – *thermós* – „warm“
δύναμις – *dýnamis* – „Kraft“

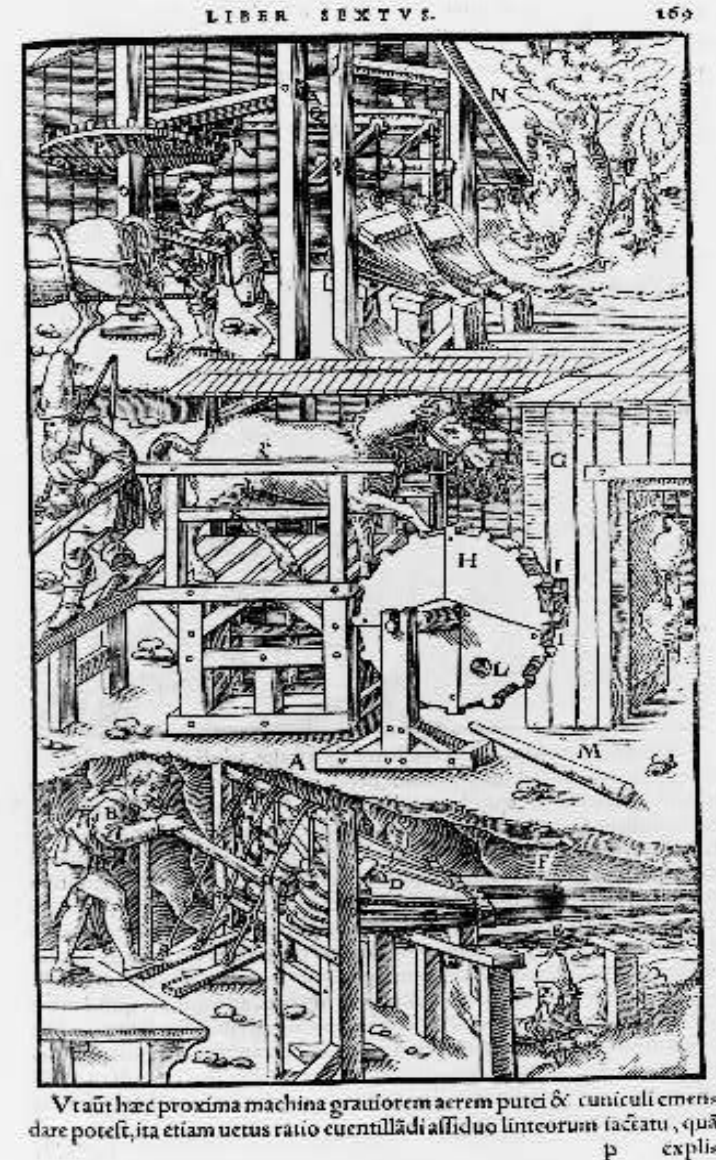
Prof. Dr.-Ing. habil. Jadran Vrabec

Kohlebergbau

- ... begann vor ca. 5000+ Jahren in China (?)
- ... initiierte sehr viel später die Industrialisierung, wobei die Dampfmaschine (ab 1712) eine entscheidende Rolle spielte
- ... endet wahrscheinlich bald



Arbeitsplätze für Kinder im Bergwerk, ca. 1840



Bergwerksbelüftung, Agricola, 1556

Historischer Überblick (sehr unvollständig)

- 1613: [Galileo Galilei \(?\)](#) erfindet das Thermometer.
- 1669: [Richard Towneley](#) erkennt den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen bei konstanter Temperatur.
- 1676: [Edme Mariotte](#) publiziert das Boyle-Mariottesche Gesetz.
- 1690: [Denis Papin](#) beschreibt das Prinzip einer Dampfmaschine.
- 1708: [Daniel Gabriel Fahrenheit](#) entwickelt ein genaues Thermometer.
- 1712: [Thomas Newcomen](#) liefert die erste Dampfmaschine an ein Bergwerk.
- 1776: [James Watt](#) liefert seine erste Dampfmaschine an eine Kanonenfabrik.
- 1787: [Antoine Laurent de Lavoisier](#) veröffentlicht die Wärmerstofftheorie (Caloricum).
- 1798: [Benjamin Thompson](#) (Graf von Rumford) widerlegt die Wärmerstofftheorie von Lavoisier, seine Arbeiten wurden jedoch lange nicht beachtet.
- 1811: [Amedeo Avogadro](#) postuliert, dass ein Volumen bei gleichen Bedingungen (Temperatur, Druck) immer die gleiche Anzahl an (idealen) Gasteilchen enthält.
- 1816: [Robert Stirling](#) meldet seine Heißluftmaschine zum Patent an.
- 1824: [Sadi Carnot](#) beschreibt die Grenzen der Wärmeumwandlung durch eine periodisch arbeitende Maschine.
- 1827: [Robert Brown](#) entdeckt die Bewegung von Blütenpollen in Wasser.
- 1833: [Joseph Louis Gay-Lussac](#) erkennt für das ideale Gas die Abhängigkeit zwischen Temperatur, Druck und Volumen.
- 1842: [Julius Robert Mayer](#) postuliert, dass Wärme eine Energieform ist.
- 1844: [James Prescott Joule](#) liefert den Beweis für die Äquivalenz von mechanischer Arbeit und Wärme.
- 1847: [Hermann von Helmholtz](#), der die Arbeit von Meyer nicht gekannt hatte, formuliert erneut und genauer, dass Wärme eine Energieform ist.
- 1852: [William Thomson](#) (Lord Kelvin) und [James Prescott Joule](#) entdecken den Joule-Thomson-Effekt.
- 1857: [Rudolf Clausius](#) erklärt den Gasdruck aus der mittleren kinetischen Energie der translatorischen Bewegung von Gasmolekülen.
- 1858: [Étienne Lenoir](#) baut den ersten Gasmotor.
- 1860: [James Clerk Maxwell](#) gibt die Funktion für die Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle an.
- 1865: [Rudolf Clausius](#) führt den Begriff der Entropie ein.
- 1865: [Josef Loschmidt](#) ermittelt die Anzahl der (idealen) Gasteilchen pro Volumen, die sein Schüler Ludwig Boltzmann dann Loschmidt-Konstante benennt.
- 1867: [Nikolaus Otto](#) und [Eugen Langen](#) präsentieren ihren Gasmotor.
- 1873: [Johannes Diderik van der Waals](#) veröffentlicht seine Gleichung zur Beschreibung von realen Gasen, die die Idealgasgleichung beinhaltet.
- 1877: [Ludwig Boltzmann](#) deutet die Entropie statistisch und entdeckt die universelle Boltzmann-Konstante.
- 1882: [Thomas Alva Edison](#) bringt die ersten kommerziellen Dampfkraftwerke zur Stromerzeugung ans Netz.
- 1883: [Hermann von Helmholtz](#) führt den Begriff der freien Energie ein.
- 1891: [Carl von Linde](#) entwickelt sein Verfahren zur Verflüssigung und Zerlegung von Luft.
- 1892: [Rudolf Diesel](#) meldet ein Patent auf seine Verbrennungskraftmaschine an.
- 1900: [Max Planck](#) erklärt die Strahlung des ideal schwarzen Körpers.
- 1905: [Albert Einstein](#) erklärt die Brownsche Molekularbewegung.
- 1906: [Walter Nernst](#) stellt den 3. Hauptsatz (Wärmethorem) auf.
- 1953: [Zoran Rant](#) führt den Begriff der Exergie ein.

Ingenieurwissenschaft unterscheidet sich von der Naturwissenschaft

- Naturwissenschaftler versuchen die Natur zu verstehen
- Ingenieure versuchen Dinge zu machen, die in der Natur nicht vorzufinden sind
- Zur Verwirklichung einer Erfindung müssen Ingenieure ihre Idee konkretisieren und so gestalten, dass sie genutzt werden kann
- Erfindungen können Geräte, Materialien, Methoden, Problemlösungen oder Verbesserungen von Existierendem sein
- Weil technische Erfindungen konkret sein müssen, erfordern sie die Festlegung z.B. von Material, Geometrie und zahlreicher weiterer Eigenschaften

Scientists study the world as it is – engineers create the world that has never been.

(Theodore von Kármán)

Thermodynamik ist ein Bindeglied zwischen zahlreichen Disziplinen

Naturwissenschaften

Physik

Chemie

Biologie

T
h
e
r
m
o
d
y
n
a
m
i
k

Ingenieurwissenschaften

Verfahrenstechnik

Energietechnik

Strömungsmechanik

Informationstechnik

Was ist Thermodynamik?

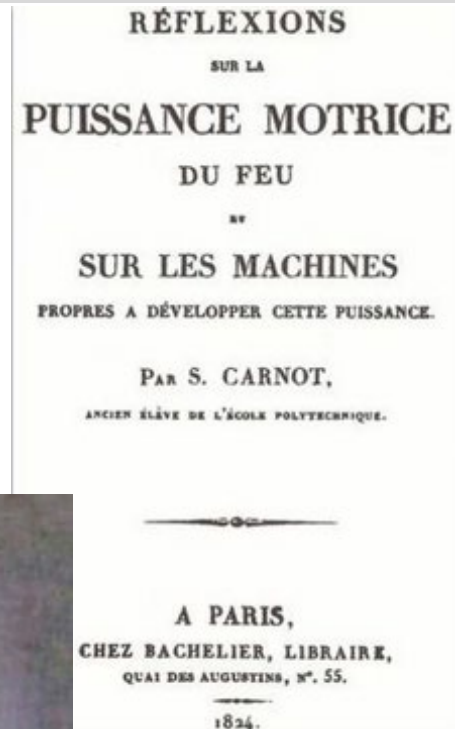
Die Thermodynamik hat ihren Ursprung im Studium der Dampfmaschinen und ging zunächst der Frage nach, wie Wärme in mechanische Arbeit umwandelt werden kann.

Als Ingenieurwissenschaft hat sie heute für die verschiedenen Möglichkeiten der Energieumwandlung eine zentrale Bedeutung.

In der Verfahrenstechnik beschreibt sie die Eigenschaften und das Verhalten von Stoffen, die an Prozessen beteiligt sind.

Als Begründer gilt Sadi Carnot, der 1824 im Alter von 28 Jahren seine wegweisende Arbeit schrieb:

*“Beim Fall des **Wärmestoffs** nimmt die bewegende Kraft mit der Temperaturdifferenz zwischen heißem und kaltem Körper zu.”*



N. L. S. Carnot
(1796-1832)

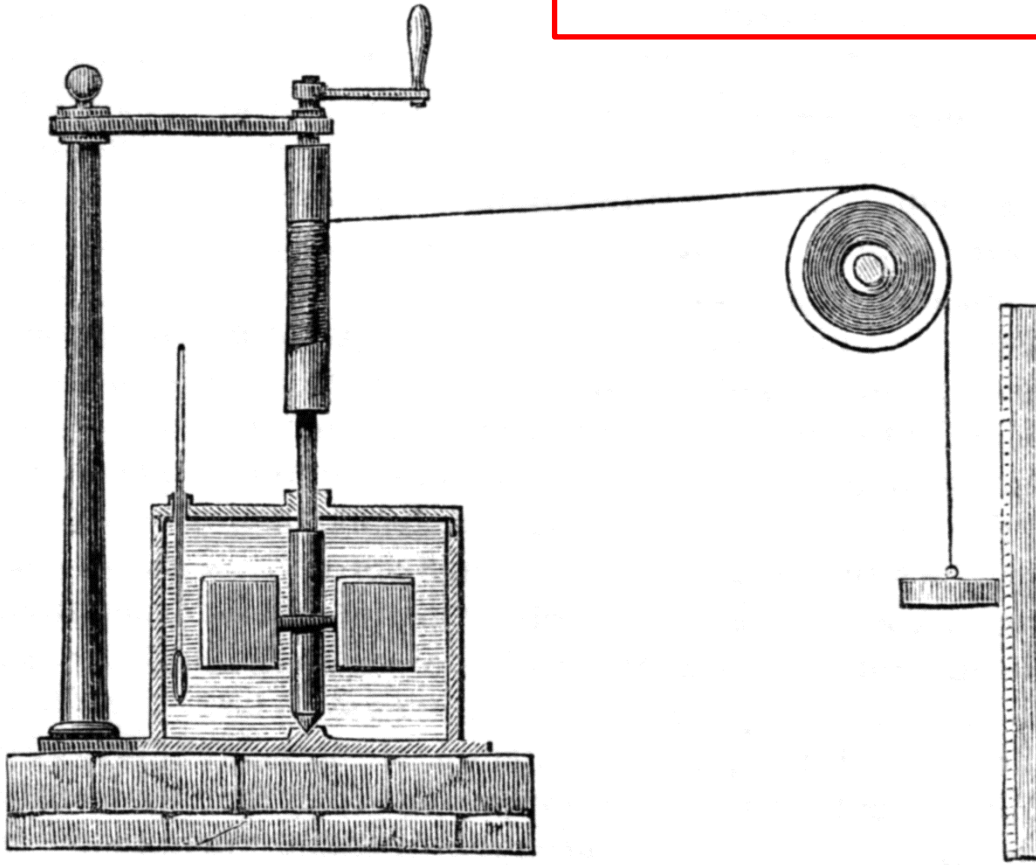
Äquivalenz von mechanischer Arbeit und Wärme

Es gibt keinen Wärmestoff (Caloricum), der Begriff „Energie“ wird eingeführt

1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$dE = \delta Q + \delta W$$

E = „Energie“



J. R. von Mayer,
1842

– *Pharmazeut*



J. P. Joule,
1844

– *Physiker,
Brauer*



Energiebegriff



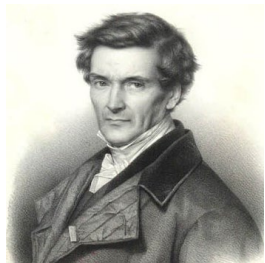
T. Young
(1773-1829)

Der Begriff „Energie“ wurde im 19. Jahrhundert zunächst in der Mechanik eingeführt (kinetische und potentielle Energie).

ἐν – *en* – „innen“

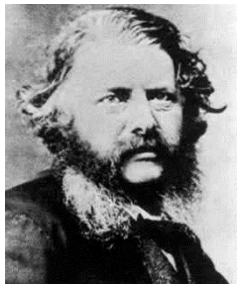
ἔργον – *ergon* – „Wirken“

Energie steht für das Arbeitsvermögen physikalischer Systeme



G.-G. de Coriolis
(1792-1843)

Form	Beispiel	Anwendung
Mechanische Energie	Fließwasser, Auto, Schwungrad, Stausee	Wasserkraftwerk, Speicherkraftwerk
Wärmeenergie	Heizkörper, Wärmeflasche	Wärmespeicher, Heizung
Elektrische Energie	Strom, Blitz	Generator, Elektromotor
Chemische Energie	Brennstoffe, Sprengstoffe	Kohlekraftwerk, Holzofen
Strahlungsenergie	Sonnenlicht, Radiowellen	Photovoltaikanlage
Kernenergie	Kernspaltung	Atomkraftwerk



W.J.M. Rankine
(1820-1872)

Energieformen lassen sich ineinander umwandeln

Beispiele für technische und natürliche Energieumwandlungsprozesse

<u>Energieform</u>	Mechanisch	Thermisch	Strahlung	Elektrisch	Chemisch
Mechanisch	Getriebe	Bremsen	Synchro- tronstrah- lung	Generator	Eischnee
Thermisch	Turbine	Wärmeüber- tragung	Glühendes Metall	Thermo- element	Hochofen
Strahlung	Radiometer	Solar- kollektor	Nichtlineare Optik	Solarzelle	Photo- synthese
Elektrisch	Elektro- motor	Elektroherd	Blitz	Transfor- mator	Akkumulator
Chemisch	Muskel	Ölheizung	Glühwürm- chen	Brenn- stoffzelle	Kohle- vergasung

Ingenieuraufgaben mit engem Bezug zur Thermodynamik

Auslegung, Bau, Betrieb und Optimierung von ...

- energietechnischen Anlagen (z.B. Kraftwerke)
- Produktionsanlagen der chemischen Industrie, Pharmazie, Biotechnologie und Lebensmittelindustrie
- Apparaten energie- und verfahrenstechnischer Anlagen (z.B. Turbinen, Verdichter, Pumpen, Wärmeübertrager)
- Kälte-, Klima- und Heiztechnik
- Motoren und Flugtriebwerken

Thermodynamik ist eine grundlegende Technikwissenschaft, die uns lehrt, Energieformen zu unterscheiden und die Grenzen für die Umwandlung der verschiedenen Energieformen bei natürlichen Vorgängen und technischen Prozessen zu erkennen

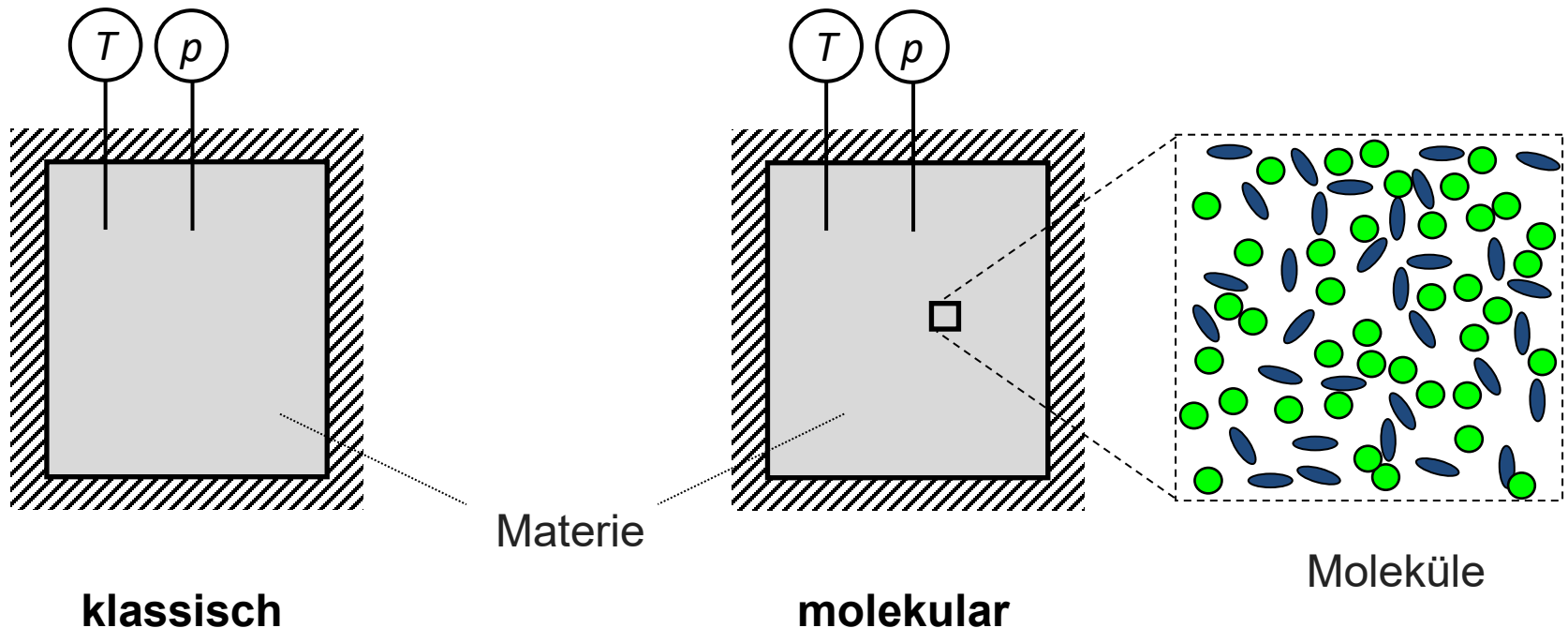
Phänomenologische vs. molekulare Thermodynamik

Klassische, phänomenologische Thermodynamik

Ist die ältere Herangehensweise und betrachtet Materie als Kontinuum, was eine gute Näherung ist, wenn die betrachteten Systeme makroskopisch groß sind ($>10^{23}$ Moleküle). Aufgrund ihres phänomenologischen Charakters beruht sie auf experimentellen Befunden.

Molekulare Thermodynamik

Betrachtet Moleküle explizit und operiert wegen ihrer großen Anzahl mit statistischen Methoden oder z.B. der kinetischen Gastheorie. Diese Herangehensweise liefert Erklärungen für zahlreiche Phänomene und ist das theoretische Fundament für die Hauptsätze.



Woraus besteht die phänomenologische Thermodynamik?

Formale Grundlagen

Zur Beschreibung thermodynamischer Sachverhalte ist eine formale Herangehensweise erforderlich. Diese beinhaltet einfache Ingenieurbegriffe sowie Randbedingungen und ist insbesondere zur Bilanzierung von Prozessen notwendig.

Hauptsätze

Es existieren vier „Hauptsätze der Thermodynamik“, die von 0. bis 3. durchnummeriert sind. Davon ist nur einer schwierig zu verstehen (2. Hauptsatz).

Zustandsgrößen

Es treten zahlreiche Größen auf, die das Verhalten von Materie beschreiben. Zustandsgrößen haben oft einen abstrakten Charakter und sind nicht Gegenstand der Alltagskommunikation. Besonders herausfordernd ist, dass Zustandsgrößen auf nicht-intuitive Weise vielfältig miteinander zusammenhängen.

Modelle

Für die Zustandsgrößen existiert eine unüberschaubar große Anzahl von algebraischen Modellen sehr unterschiedlicher Güte. In der Vorlesung wird nur eine sehr kleine Auswahl diskutiert, wobei ihre rechnerische Auswertbarkeit einen hohen Stellenwert einnimmt.

Lehrbücher

Stephan, P., Schaber, K., Stephan, K., Mayinger, F.: **Thermodynamik Band 1, Einstoffsysteme**

19. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2013

Stephan, P., Schaber, K., Stephan, K., Mayinger, F.: **Thermodynamik Band 2, Mehrstoffsysteme und chemische Reaktionen**

16. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, 2017

Baehr, H. D.; Kabelac S.: **Thermodynamik**

Springer, Berlin Heidelberg, 2016

Heintz, A.: **Gleichgewichtsthermodynamik**

Springer, Berlin Heidelberg, 2011

Gmehling, J.; Kolbe, B.: **Thermodynamik**

VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1992

Tester, J. W.; Modell, M.: **Thermodynamics and its applications**

Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1997

- Diese Liste ließe sich fast beliebig weiter fortsetzen.
- Fast alle modernen Bücher (>1960) zur Thermodynamik sind nützlich.
- Vor allem ist wichtig, dass Sie als Leser sich angesprochen fühlen und damit arbeiten!