

Technische Thermodynamik I

Prof. Dr.-Ing. Thomas Seeger

WS 2024/2025

Vorwort

Das vorliegende Skript stellt die Inhalte der Grundvorlesung „Technische Thermodynamik I“ dar, wie sie an der Universität Siegen für Studentinnen und Studenten des Maschinenbaus und verwandter Studienrichtungen gelehrt werden.

Der Aufbau des Skriptes folgt der Vorstellung, dass dieses Skript das Arbeits- und Prüfungsbuch für die Studierenden während des Studiums und zur Prüfungsvorbereitung wird. Die Vorlesung ist als Powerpoint Präsentation aufbereitet. Gelegentlich werden ergänzend „Herleitungen“ an der Tafel durchgeführt.

Das Fach Thermodynamik gilt als abstrakt und der Inhalt und Sinn einzelner Teile und Ansätze erschließt sich nicht immer unmittelbar. Es ist deshalb für den Studienerfolg ganz wichtig, dass jeder Studierende sich selbst aktiv mit den Inhalten der Vorlesung befasst. Gute Bücher, Skripte oder Vorlesungen können zwar dazu motivieren, können aber die eigene aktive Beschäftigung mit den Inhalten nie ersetzen. Als ganz wichtiger erster Schritt für ein effektives Lernen ist eine regelmäßige Vor- und Nachbereitung der Vorlesungen und Übungen unumgänglich. Studieren Sie regelmäßig das Skript am Abend nach der Vorlesung und vor der nächsten Vorlesung. Notieren Sie sich Fragen zu den Teilen die Sie nicht verstanden haben und stellen Sie diese Fragen in, vor oder nach der Vorlesung.

Damit haben Sie den ersten Schritt gemacht, dass Sie nicht nur ein passiver Konsument sind sondern verstehen um was es gerade in der Vorlesung geht. Trotzdem ist ein weitergehend und intensive Beschäftigung mit den Vorlesungsinhalten insbesondere zur Prüfungsvorbereitung notwendig.

Das Skript enthält zwar alle für das Studium dieses Faches wichtigen Themen und die für die Bearbeitung von Berechnungen (in den Übungen, in der Prüfung und im späteren Berufsleben) notwendigen Beziehungen, ersetzt aber trotzdem kein Lehrbuch der Thermodynamik. Denn viele Themen und Ansätze sind hier nur knapp formuliert, während erläuternde Texte fehlen. Jeder Studierende sollte sich also ein oder zwei Lehrbücher zunächst ausleihen und sich gegebenenfalls beschaffen, um hier zu einzelnen auftretenden Themen und Fragen nochmals in der ausführlichen Variante die Begründung zu suchen.

Das hier vorliegende Skript weicht in der Anordnung der Kapitel leicht vom Üblichen ab, weil an der Universität Siegen derzeit etwa die Hälfte der Studierenden die Vorlesung Höhere Thermodynamik nicht hören (beispielsweise die Wirtschaftsingenieure). Im Teil I wird deshalb das behandelt, was ich als primär wichtig für das spätere Studien- und Berufsleben auch dieser Studierenden erachte.

Der erste Teil wird dominiert durch sorgfältige Energiebilanzierungen im Zusammenhang mit dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Wichtig ist mir nicht nur die in der Thermodynamik verbreitete allgemeine differenzielle Formulierung der Gesetzmäßigkeiten, sondern auch die Formulierung als zeitabhängige Änderung der jeweiligen Systemgrößen in einem Kontrollvolumen, da hier die Ähnlichkeit zum üblichen Bilanzansatz in der zunehmend wichtiger werdenden numerischen Strömungsmechanik mit den Navier-Stokes-Gleichungen besser deutlich wird. Abschließen wird im ersten Teil der Thermodynamik Anwendungsfälle wie z.B. der Gasturbinenprozess und motorischen Kreisprozesse behandelt.

Siegen, im September 2009

Thomas Seeger

Literatur (Auszug)

Englischsprachig:

Y. Cengel „*Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*“ (McGraw-Hill)

Y. Cengel, M. Boles „*Thermodynamics- an Engineering Approach*“ (McGraw-Hill)

S. Turns „*Thermodynamics: Concepts and Applications*“ (Cambridge University Press)

Deutschsprachig:

H. Herwig, C. H. Kuntz „*Technische Thermodynamik*“ (Pearson)

G. Cerbe, G. Wilhelms „*Technische Thermodynamik*“ (Hanser)

H. Windisch „*Thermodynamik*“ (Oldenburg)

H. D. Baehr, S. Kabelac „*Thermodynamik*“ (Springer)

P. Stephan, K. Schaber, K. Stephan, F. Mayinger „*Thermodynamik*“ (Springer)

Zweisprachig:

A. Leipertz „*Technische Thermodynamik- Engineering Thermodynamics*“ (ESYTEC)

Als Aufgabensammlung ist in der Siegener Lehrbuchsammlung besonders das Buch

J. U. Keller „*Technische Thermodynamik in Beispielen*“ (de Gruyter)

vorhanden, das viele Aufgaben mit ausführlichem Lösungsweg enthält. Hinten auch eine umfangreiche Begriffssammlung zur Thermodynamik.

Thermodynamik einer Tasse Kaffee

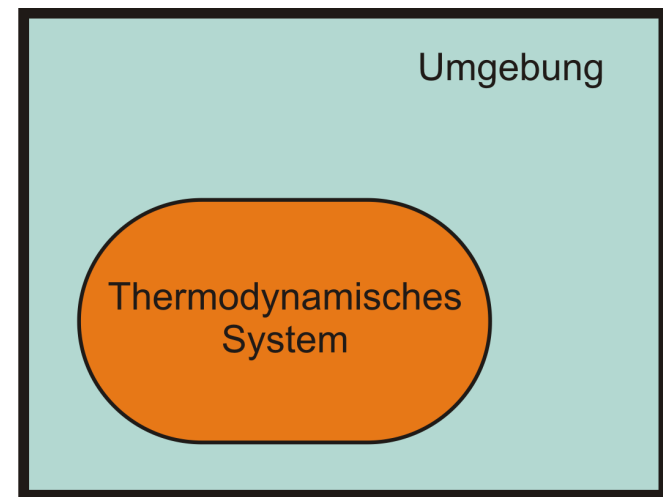
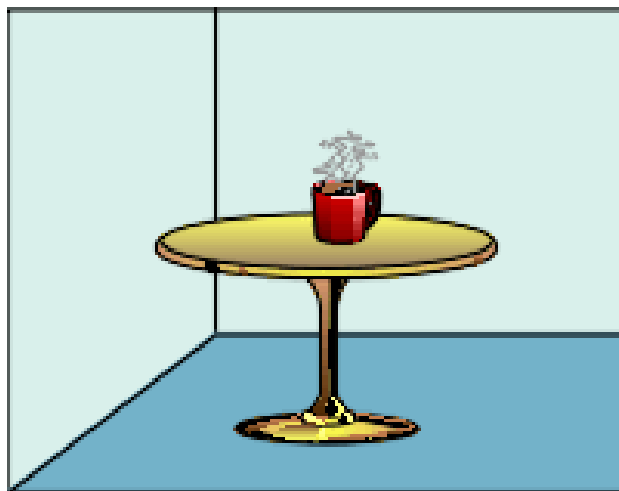


Eine gute Tasse Kaffee hält nicht nur wach, sie ist außerdem ein allen bekanntes Beispiel für einen von der Umgebung abgegrenzten Bereich, in dem eine Stoffmenge (der Kaffee) eine bestimmte Temperatur hat. Dies wiederum ist eine einfache Definition für ein thermodynamisches System.

Thermodynamik einer Tasse Kaffee

Unser System “Tasse mit Kaffee” befindet sich in einem Raum, also einer **Umgebung**, die den **Zustand** des Kaffees beeinflusst. Zum Beispiel wird der Kaffee kalt, wenn man ihn lange stehen lässt.

Wie sieht das bei allgemeinen thermodynamischen Systemen aus?



Kaffeeextrakt, Wasser, Milch,...



Stoffmenge

Kaffeetasse



Wände

umgebender Raum

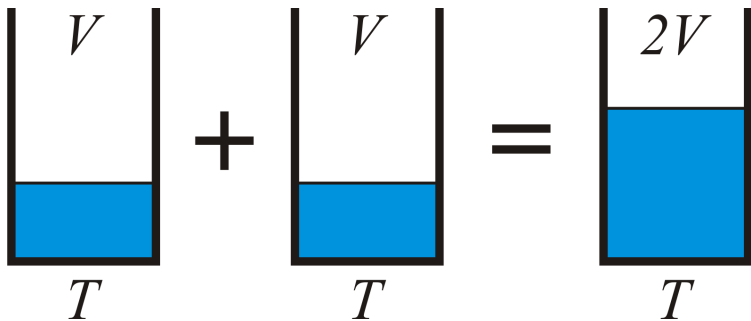


Umgebung

Thermodynamik einer Tasse Kaffee

Definition: Eine **Umgebung** ist ein Reservoir, das mit dem System eine **extensive Größe** (hier Wärme) austauscht, ohne dass sich die zugehörige **intensive Größe** (hier die Temperatur) der Umgebung ändert.

Dass das Volumen z.B. eine additive und damit extensive Größe ist, während die Temperatur eine nicht additive und damit intensive Größe ist, kann man aus folgender Alltagserfahrung ableiten:

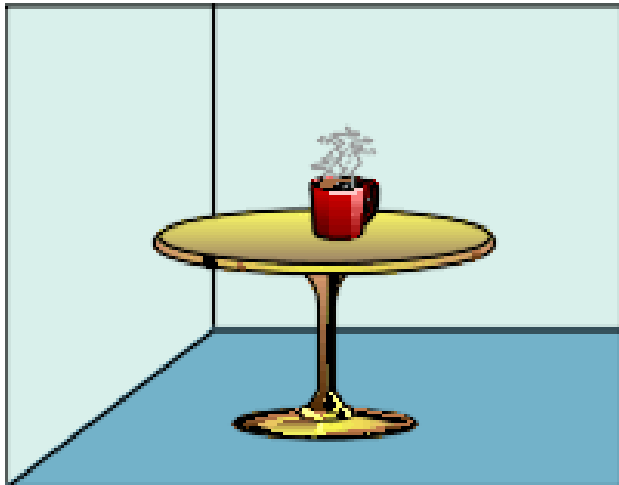


Schüttet man die Inhalte zweier Gefäße zusammen, die jeweils die gleiche Flüssigkeit mit dem Volumen V und der Temperatur T beinhalten, so erhält man zwar das doppelte Volumen, die Temperatur verdoppelt sich jedoch nicht.

Thermodynamik einer Tasse Kaffee

Was passiert, wenn man den Kaffee vergisst?

- Zunächst wird der Kaffee kalt, d.h. er nimmt die Temperatur des Raumes an, ohne dass sich dabei die Temperatur der Umgebung erhöht.
- Dies ist gerade die charakteristische Eigenschaft einer Umgebung.
- Lässt man ihn noch länger stehen, so wird die Flüssigkeit verdampfen, d.h. es findet ein Austausch von Materie zwischen System und Umgebung statt.



Bei unserer Kaffeetasse handelt es sich also um ein **offenes System**, da sowohl Wärme als auch Materie an die Umgebung abgegeben werden. Der Raum ist ein Wärme- und Teilchenbad.

Thermodynamik einer Tasse Kaffee



Bleibt dagegen nur die Materie erhalten, wie das z.B. in einer völlig geschlossenen Kaffeekanne der Fall ist, spricht man von einem **geschlossenen System**.



Von einem **abgeschlossenen System** spricht man bei einer Thermoskanne, da hier sowohl Materie als auch Temperatur erhalten bleiben.

Thermodynamik einer Tasse Kaffee

Wie kalt kann der Kaffee eigentlich werden?

Da die Abkühlung des Kaffees durch Temperaturanpassung an die Umgebung geschieht, kühlt der Kaffee so lange ab, wie die Umgebung noch kälter ist als er selbst. Sobald der Kaffee die Temperatur des Raumes erreicht hat, befinden sich Kaffee und Umgebung im **thermischen Gleichgewicht**.

Der umgekehrte Prozess “Raum heizt Kaffee auf”, d.h. der Kaffee wird wieder warm, wird nie beobachtet. Das bedeutet, es existiert eine Richtung für diesen Prozess:

Das System strebt ins thermische Gleichgewicht.

Ist der Kaffee verdampft, so hat das System mit der Umgebung ein **vollständiges Gleichgewicht** erreicht. Allerdings dauert das sehr lange. Im Vergleich zum vollständigen stellt sich das thermische Gleichgewicht sehr schnell ein. Diese Eigenschaft wird bei der Temperaturmessung ausgenutzt.

Thermodynamik einer Tasse Kaffee

Wie misst man die Temperatur?

- Der Kaffee befindet sich nach einer gewissen Zeit im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung.
- Das bedeutet, wenn wir wissen, welche Temperatur der Raum hat, können wir sagen, wie warm der Kaffee ist.
- Während beim Kaffee die subjektive Einschätzung “kalt”, “warm” oder “heiß” noch genügt, ist es für den physikalischen Begriff der Temperatur nötig, Empfindungen in objektive Zahlenangaben umzusetzen.
- Das bedeutet, man muss die Temperatur durch andere messbare Eigenschaften festlegen.
- So misst man die Temperatur seit Jahrhunderten mit Hilfe von Flüssigkeitsvolumina und deren Änderung bei Temperaturveränderungen.

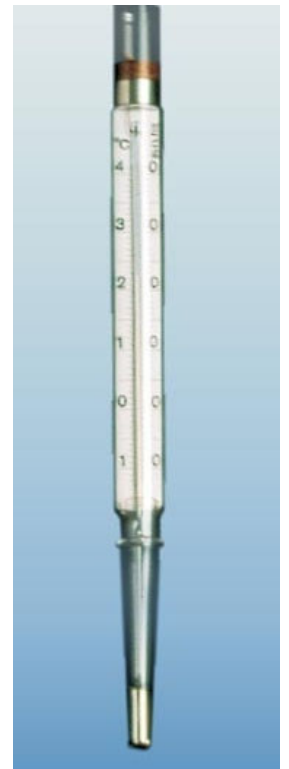
Thermodynamik einer Tasse Kaffee

Unsere im Alltag gebräuchliche Einheit der Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) geht auf den schwedischen Astronom Anders Celsius (1701-1744) zurück.

Er eichte ein Quecksilberthermometer, indem er zunächst den Pegelstand des Quecksilbers für eine Mischung von fein verteiltem Eis und Wasser (Eispunkt; 0°C) festhielt und dann für die Temperatur des Dampfes über siedendem Wasser (Siedepunkt; 100°C) gleiches tat.

Den Abstand dazwischen teilte er in 100 gleiche Teile und setzte diese Einteilung nach oben und unten fort.

Die Anzeigen des (bei Normaldruck) so geeichten Thermometers erhielten die Benennung bzw. die Einheit $^{\circ}\text{C}$ (Grad Celsius).



Einige berühmte Namen in der Thermodynamik

1824 N. L. S. Carnot (1796-1832)

**Äquivalenz zwischen Wärme und Arbeit,
Grundgedanken zum 2. Hauptsatz**

1850 R. J. E. Clausius (1822-1888)

Formulierung des 1. und 2. Hauptsatzes

1865 Begriff der Entropie

1848 W. Thomson (1824-1907)

Universelle Temperaturskala

1851 (seit 1892 Lord Kelvin)

Formulierung des 2. Hauptsatzes



Abb. 1.1. N. L. S. Carnot
im Alter von 17 Jahren



Abb. 1.3. R. Clausius

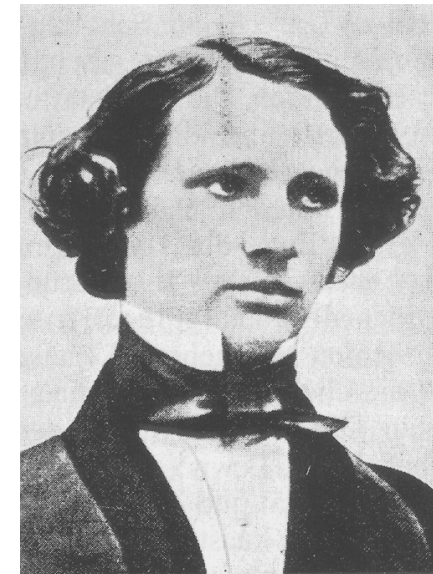


Abb. 1.4. W. Thomson im Jahre
1846

Joule, Rankine, Gibbs, Lewis, Nerst, Plank, Poincare, Bryan, Mollier, Boltzmann etc.

Inhalte

1. Grundlagen und grundlegende Begriffe	1
1.1 Was ist Thermodynamik ?	2
1.2 System, Zustand und Zustandsgrößen	3
1.3 Gleichgewicht, Prozess und Zustandsänderung	8
1.4 Thermisches Gleichgewicht, Temperatur	12
1.5 Temperaturmessung	13
1.6 Thermische Zustandsgleichung	21
1.7 Kalorische Zustandsgleichung	29
2. Erster Hauptsatz	39
2.1 Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme	40
2.2 Erster Hauptsatz für offene Systeme	46
2.3 Anwendung Zustandsänderungen idealer Gase in einfachen Systemen	55
3. Zweiter Hauptsatz und Entropie	71
3.1 Beispiele für irreversible Prozesse	71
3.2 Reversible, irreversible und unmögliche Prozesse	77
3.3 Wärme, Entropie und thermodynamische Temperatur	79
3.4 Formulierung des zweiten Hauptsatzes	84
3.5 Temperatur-Entropie Diagramm	86
3.6 Entropie des idealen Gases	87
3.7 Entropie inkompressibler Stoffe	89
3.8 Entropie und Entropieproduktion bei Wärme-, Stoff- und Arbeitsübertragung	90

4. Energie, Exergie und Anergie	103
4.1 Umwandlung von Wärme in Arbeit	104
4.2 Exergie und Anergie	107
4.3 Anwendung des Exergiebegriffes: Exergieverluste und exergetischer Wirkungsgrad	115
5. Kreisprozesse	121
5.1 Erster Hauptsatz für Kreisprozesse	124
5.2 Zweiter Hauptsatz für Kreisprozesse	126
5.3 Carnot-Prozess	129
5.4 Joule-Prozess	130
5.5 Otto-Prozess	136
5.6 Diesel-Prozess	143
5.7 Stirling-Prozess	159
5.8 Kreisprozess des Verdichters	153
6. Wärmeübertragung	154
6.1 Grundlagen der Wärmeübertragung	158
6.2 Wärmeleitung	159
6.3 Konvektive Wärmeübertragung	161
6.4 Strahlungswärmeübertragung	164
6.5 Wärmedurchgang durch eine Wand	165
7. Ausblick	173