

# Programm der Vorlesung ‘THERMODYNAMIK mit astrophysikalischen Anwendungen’

Universität Freiburg  
Sommersemester 2024

Fakultät für Mathematik und Physik  
Dozent: Prof. Dr. Antonio Ferriz Mas

## Teil I. Grundkonzepte und Grundgleichungen der Thermodynamik

### 1. Einführung

Thermodynamische Variablen. Konstitutive Axiome. Prozesse. Mechanische Leistung und Wärmeleistung.

### 2. Erster und zweiter Hauptsätze für homogene Prozesse

Innere Energie. Erster Hauptsatz. Irreversibilität und Entropie. Zweiter Hauptsatz. Isotherme, adiabatische und isentrope Prozesse. Kombiniertes Ausdruck des ersten und zweiten Hauptsätze.

### 3. Thermodynamische Potentiale und konstitutive Beziehungen

Konstitutive Beziehungen (“Zustandsgleichungen”) für Materialien ohne Gedächtnis. Thermodynamische Potentiale ( $U$ ,  $H$ ,  $F$  und  $G$ ) und ihre natürlichen Variablen. Kompatibilitätsbedingungen erster Ordnung.

### 4. Spezifische Wärmen und andere Materialkoeffizienten

Materialkoeffizienten für einfache Fluide: Wärmeausdehnungskoeffizient, adiabatische/isotherme Kompressibilität, adiabatische/isotherme Schallgeschwindigkeiten, spezifische Wärme bei konstantem Druck / Volumen. Kompatibilitätsbedingungen zweiter Ordnung (Maxwell’sche Beziehungen). Materialkoeffizienten der stellaren Astrophysik ( $\chi_T$ ,  $\chi_\rho$  und Chandrasekhars Koeffizienten  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  und  $\Gamma_3$ ). Beziehungen zwischen den verschiedenen Materialkoeffizienten.

### 5. Konstitutive Beziehungen (I): Ideale Gase

Konstitutive Beziehung für das Modell “ideales Gas”. Eigenschaften der idealen Gase. Ausdruck der mittleren Masse pro freiem Teilchen als Funktion der chemischen Häufigkeit.

### 6. Konstitutive Beziehungen (II): Schwarzkörperstrahlung und Mischung aus idealem Gas und Schwarzkörperstrahlung

Das Planck’sche Strahlungsgesetz. Schwarzkörperstrahlung und ihre thermodynamischen Eigenschaften. Ideales Gas im Gleichgewicht mit Schwarzkörperstrahlung; Berechnung von  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  und  $\Gamma_3$  für die Mischung. Bedeutung von  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  und  $\Gamma_3$  in stellarer Astrophysik.

### 7. Schallwellen in einem homogenen Fluid. Stabilitätsbedingungen.

Schallwellen in einem homogenen Fluid. Die Schallgeschwindigkeiten  $c_S$  und  $c_T$  als Materialkoeffizienten. Stabilitätsbedingungen und ihre Auswirkungen auf das Vorzeichen einiger Materialkoeffizienten.

## 8. Phasenübergänge

Das chemische Potential. Die Gibbs-Duhem-Gleichung. Phasenübergänge erster Ordnung. Die Clausius-Clapeyron-Gleichung. Die Gibb'sche Phasenregel.

## Teil II. Anwendungen

### 9. Anwendungen der Thermodynamik auf die Atmosphäre

Hydrostatisches Gleichgewicht. Einfache Atmosphärenmodelle. Temperaturgradient und vertikale Stabilität; die Superadiabatizität.

### 10. Thermodynamik selbstgravitierender Massen (I): Hydrostatik. Eine Einführung in den Sternaufbau.

10.1. Herleitung des Virialsatzes in der Kontinuumsmechanik. Interpretation der Terme.

10.2. Einige astrophysikalische Anwendungen des Virialsatzes: Sterne im hydrostastischen Gleichgewicht; Beschränkung des Verhältnisses der spezifischen Wärmen. Durchschnittliche Sterntemperatur. Quasistatische Kontraktion als mögliche Energiequelle. Die Bedeutung von *negativen Wärmekapazitäten*. Kelvin-Helmholtz-Zeitskala. Herleitung des Zusammenhangs zwischen Pulsationsperiode und mittlerer Sterndichte für pulsierende Sterne.

### 11. Thermodynamik selbstgravitierender Massen (II): Eine Einführung in den Gravitationskollaps und die Sternentstehung.

Bedingung für den Beginn des Gravitationskollapses; Jeans-Masse und Jeans-Radius. Zeitskala des freien Falls. Isothermer und adiabatischer Kollaps; Beginn und Ende der Fragmentierungskaskade. Ein grobes Verständnis der Sternentstehung.

---

---

## Einige Referenzen über Thermodynamik

- **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics**, Herbert B. Callen, Wiley, (1991), [2nd edition] ISBN-10: 0471862568, ISBN-13: 978-0471862567
- **Rational Thermodynamics**, Clifford. A. Truesdell, Springer-Verlag, [2<sup>d</sup> edition 1984]. ISBN-10: 1461297370
- **The Tragicomical History of Thermodynamics**, Clifford. A. Truesdell, Springer-Verlag, New York (1980). ISBN: 978-1-4613-9446-4
- **The Physics of Atmospheres**. John T. Houghton, Cambridge University Press (1968), [3<sup>d</sup> edition 2002]. ISBN-10: 0521011221

## Der Virialsatz (und astrophysikalische Anwendungen)

- **Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability**, S. Chandrasekhar, Dover Publications (1981) [Clarendon Press, 1961]. ISBN-10: 048664071X
- **Fundamental Astronomy**, Hannu Karttunen *et al.*, Springer-Verlag, 4th edition (2003) ISBN: 3540001794 [Finnish ed.: 'Tähtitieteen perusteet', Helsinki (1984) ISBN: 3-540-52339-1]