

# Theoretische Physik IV

## Thermodynamik + Statistik

⇒ <http://www.itp.tu-berlin.de/menue/lehre>

VL:

Mi: 12.15 - 13.45 (EW 203)

Fr: 8.30 - 10.00 (EW 203)

UE: - Ausgabe der Zettel am Mi in der VL  
- Abgabe: jeweils Donnerstags im Briefkasten / Altkau  
bis 11h

- Bearbeitung der Zettel in 2- oder 3-er Gruppe

Scheinkriterien:

- 50% Punkte UE-Zettel

- mind. 1x korrekte  
aktive Teilnahme!

- Beständene Klausur:

Termin: 04.07.2012 (Mi)

12-14h

# 0. Einführung

Ziel: die Thermodynamik und Statistische Physik?

⇒ theoretische Beschreibung der physikalischen Eigenschaften von Systemen mit sehr vielen Freiheitsgraden!

Beispiele:

- Gase:

1 Mol  $\hat{=}$   $6.024 \times 10^{23}$  Teilchen  
(Atome, Moleküle)

Klassische Freiheitsgrade

Orte  $\underline{r}_i$  (€)

Impulse  $\underline{p}_i$  (€)

- Flüssigkeiten (wechselwirkendes Vielteilchensystem)

- Festkörper:

- Positionen der Atome
- Elektronen

→ quantenmechanisches Vielteilchensystem!

- Quantengase

Beschreibungsebenen Solcher Vielteilchensysteme

• mikroskopische Ebene

⇒ vollständige Angabe der Konfiguration  
(des mikroskopischen Zustands) des Systems  
zu einer Zeit  $t$

z.B. Klassisch:  $N_i(t), f_i(t), i=1, \dots, N$

qm:  $|\psi(q_i, t)\rangle$   
↑  
Dabei Zustand  
z.B. Spin-Konfigurationen

involviert alle Freiheitsgrade!

### makroskopische Ebene

Idee: Reduktion auf wenige Variablen

— möglichst solche, die auch experimentell  
zugänglich sind!

z.B. Temperatur  $T$  des Systems

Druck  $P$

Energie  $E$

Magnetisierung  $M$ , Polarisation  $P$  etc.

„Mikrozustand“ (makroskop. Zustand)

# Rolle der Thermodynamik

→ Beschreibung der Systeme  
auf der makroskop. Ebene

Thermodynamik liefert allgemeine Beziehungen  
zwischen den makroskop. Variablen!

Beispiel: Änderung der Energie bei  
Expansion oder Kompression  
eines Gases

# Rolle der statistischen Physik

"Brücke" zwischen Mikro- und Makrowelt

d.h. Konkrekt

- Berechnung der makroskopischen Parameter  
auf Basis des Mikrozustand

Beispiel: Magnetisierung M

Berechnung auf Basis der mikroskop. Spin-  
Konfiguration als Funktion  
von Temperatur, Magnetfeld

- mikroskopische Begründung  
thermodynamischer Beziehungen!

Problem: sehr viele Freiheitsgrade

— wie geht man mit der Fülle  
von Information sinnvoll um?

"Lösung"

statistische Beschreibung  
(Wahrscheinlichkeitskerne)  
→ Fokus auf Mittelwert

Heilung:

Die Mittelwerte beschreiben das System  
hinreichend gut, Fluktuationen sind also  
vernachlässigbar! — verschwinden mit  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ !  
in der Regel  $\sqrt{N}$ !

Sowohl bei der Statistik als auch  
bei der Thermodynamik unterscheidet  
man

- Beis
- (a) Gleichgewicht  
(betrachtet ein System ohne äußere Einflüsse  
(abgeschlossenes))
- Observablen (z.B. Energie) laufen für große  
Zeiten auf konstanten Wert zu
- b) Nichtgleichgewicht / Transport  
offene Systeme, Systeme in zeitabhängigen Feldern

hier in dieser VL:

## Fokus auf Gleichgewicht

### Themenüberblick

- Elemente aus der Wahrscheinlichkeitstheorie
- Statistische Ensembles  
Klassisch, quantenmechanisch, Informations-  
Entropie
- Thermodynamik: Hauptsätze, Prozesse
- Anwendungen auf Gase, Flüssigkeiten, Festkörper
- Quantenstatistik Wechselwirkende Vielteilchensysteme

# 0.1. Kurzer historischer Überblick

• A. Avogadro (1776 - 1856)

→ Zustandsgleichung ideale Gase (1811)

↑  
Keine Wechselwirkungen

$$\begin{array}{c} \text{Druck} \rightarrow \frac{P \cdot V}{N \cdot T} = \text{const} \\ \uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow \\ \text{Teilchenzahl} \qquad \qquad \text{Temperatur} \end{array}$$

← Volumen

← Boltzmann Konstante  $k_B$

• R. Mayer 1842

⇒ 1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$dE = \underbrace{\delta Q}_{\text{Energieänderung eines Körpers}} + \delta A$$

Wärme, die dem Körper zugeführt wird

Arbeit, die aus dem Körper geleistet wird  
(z.B. Kompression)

• Clausius & Lord Kelvin (1850)

⇒ 2. Hauptsatz der Thermodynamik

⇒ es gibt eine Entropie. Diese hängt für bestimmte Vorgänge mit der Wärme zusammen

$$dQ = T dS \quad \text{Entropie}$$

• Maxwell 1860

→ Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung

$$w(v) \sim e^{-\frac{m}{2} \frac{v^2}{k_B}}$$

• Boltzmann 1874

Brücke zw. Thermodyn. und Statistik!

$$S = k_B \ln \Omega(E, V, N)$$

Entropie

Boltzmann'scher

Zahl der Mikrozustände des Systems bei vorgegebener Energie, Volumen, Teilchenzahl

• Gibbs (1839 - 1905)

→ Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Mikrozustands bei einer



Letzen (Umgebungs-) Temperatur  $T$

$$W_i \sim e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

$E_i$ : Energie des Systems  
im Zustand  $i$

• Fermi & Dirac 1926

⇒ Statistik ideale Fermionen (Elektronen)

• Bose & Einstein 1924 ⇒ Statistik ideale Bosonen

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/k_B T} \pm 1}$$

mittlere Besetzung  
des Quantenzustands  $i$

" - " Bosonen

" + " Fermionen

• Planck :

Statistik von Photonen (masselose Bosonen)

Wichtige neue Entwicklungen:

Phasenübergänge, ungerichtete Medien, irreversible Prozesse,  
Systeme weit weg vom therm. Gleichgewicht,  
biologische Systeme

→ Statistische Physik als  
„Querschnittsmethode“

für Vielteilchensysteme