

# 1 Einführung

Makroskopische systeme aus  $N \ll$  Teilchen.

Mikrozustand und mikroskopische Gesetze

- Klassische Physik:

$$\text{Punkt } (\vec{r}, \vec{p}) \in \text{Phasenraum} \simeq \mathbb{R}^{6N}$$
$$m_1 \ddot{\vec{r}} = \vec{F}_1$$

- Quantenmechanik:

$$\text{Wellenfunktion } \Psi(\vec{r}, t) \in \mathcal{L}_2(\mathbb{R}^{3N})$$
$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi$$

Makrozustand und Makroskopische Gesetze

- Temperatur  $T$ , Volumen  $V$ , Druck  $P$ , ...
- $PV = nk_B T$ ,  $V = RI$

Mikroskopische Gesetze  $\implies$  makroskopische Gesetze.

Makrozustand  $\iff$  Zeitmittelung

- Klassische Physik:

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{\Delta t+t} dt A(\vec{r}(t), \vec{p}(t))$$

- Quantenmechanik:

$$\bar{B} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{\Delta t+t} dt \langle \Psi(t) | \hat{B} | \Psi(t) \rangle$$

Mikroskopische Zeitskala  $\ll \Delta t \ll$  makroskopische Zeitskala

Statistische Mittelung

- Klassische Physik

$$\bar{A} = \int d^3r d^3p A(\vec{r}, \vec{p}), \quad P(\vec{r}, \vec{p}) \text{ Wahrscheinlichkeitsdichte } P$$

- Quantenmechanik:

$$\bar{B} = \text{Sp}(\hat{B}\hat{P}) \text{ Dichteoperator } \hat{P}$$

Statistische Physik

- Bestimmung von  $P$  und  $\hat{P}$
- Berechnung der Ensemblemittelung
- Anwendung auf physikalische Probleme

Reduktionismus

$$\text{System} = \{\text{Einzelteile}\}$$

Elementarteilchenphysik  $\rightarrow$  Festkörperphysik, Chemie  $\rightarrow$  Biologie  $\rightarrow$  Medien  $\rightarrow$  Psychologie  $\rightarrow$  Soziologie

“*More is different*” P.W. Anderson

## 2 Wahrscheinlichkeitstheorie

Schwabl Kapitel 1.2, 15.1

### Einige Definitionen

**Zufallsvariable**  $x$  Wert von  $x$  hängt von einem Zufallsereignis ab Beispiel Messung:  $x = X_{\text{exakt}} + \text{Messfehler}$

**Häufigkeit**  $N$  identische Versuche,  $N_x = \text{Anzahl der Werte } x \implies \frac{N_x}{N}$

**Empirische Wahrscheinlichkeit**  $P_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_x}{N}$ .

$$\sum_x P_x = 1, \quad 1 \geq P_x \geq 0$$

**Wahrscheinlichkeitsdichte**  $w(x)$   $x \in \mathbb{R}$ .

$$w(x)\Delta x = \text{Wahrscheinlichkeit für einen Wert } \in [x, x + \Delta x]$$

$$\int dx w(x) = 1, \quad w(x) \geq 0$$

Beziehung mit diskreter Wahrscheinlichkeit:

$$w(x) = \sum_i P_i \delta(x - x_i)$$

### Mittelwert/Erwartungswert

$$\langle f(x) \rangle = \sum_x f(x) P_x \text{ beziehungsweise } \int dx w(x) f(x)$$

### Schwankungsquadrat

$$\Delta X^2 = \langle (x - \langle X \rangle)^2 \rangle = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad \Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

## 2.1 Zentraler Grenzwertsatz

Es gibt  $N$  unabhängige aber identische Zufallsvariablen  $x_i, i = 1, \dots, N$ .

$$P(x_1, \dots, x_N) = P(x_1)P(x_2) \dots P(x_N)$$

Außerdem existieren  $\langle x \rangle, \Delta$  von  $P(x)$ .

Mittelwert  $Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  ist eine Zufallsvariable mit Wahrscheinlichkeit  $Q_N(Y)$

$$Q_N(Y) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(Y-a)^2}{2\sigma^2}\right)$$
$$a = \langle x \rangle, \quad \sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{N}}$$

Abbildung 1: Normalverteilung,  $Y = \langle X \rangle \pm \frac{\Delta X}{\sqrt{N}}$

## 3 Klassische Physik

**N Teilchen** Mikrozustand  $(q, P) \in \text{Phasenraum} \simeq \mathbb{R}^{6n}$

**Kanonische Gleichungen**

$$\dot{q}_j = \frac{\partial H}{\partial P_j}, \quad \frac{\partial H}{\partial \dot{q}_j}, \quad j = 1, \dots, 3N$$

## Anfangsbedingung

$$(q_0, P_0) = (q_0(t_0), P(t_0)) \implies \text{Bahn } (q(t|q_0, P_0), P(t|q_0, P_0))$$

## Kanonische Transformation

$$(q(t), P(t)) \iff (q(t'), P(t'))$$

## Ziel

$$\bar{A} = \int d^{3N}q d^{3N}p A(q, P) P_G(q, P)$$

Gleichgewichtsverteilung  $\rho_G(q, P) = ?$

## Unschärfe Anfangsbedingung

$$P(q, P, t_0) = \rho_0(q, P)$$

Scharfe Anfangsbedingung:  $\rho_0(q, P) = \delta(q - q_0)\delta(P - P_0)$ . Differentialgleichung für  $P(q, P, t)$ :  
Liouville-Gleichung.

$$P(t) = \rho(q, P, t) d^{3N}q d^{3N}p = P(t') = \rho(q, P, t') d^{3N}q' d^{3N}p'$$

## Liouville-Satz

$$d^{3N}q d^{3N}p = d^{3N}q' d^{3N}p' \quad \left[ \text{Jacobi-Matrix } \frac{d^{3N}q' d^{3N}p'}{d^{3N}q d^{3N}p} = 1 \right]$$
$$\implies \rho(q(t), P(t), t) = \rho(q(t'), P(t'), t'), \quad \text{Erhaltungsgroesse } \frac{dP}{dt} = 0$$

## Kettenregel

$$\frac{d\rho(q(t), P(t), t)}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \{H, P\}$$

## Liouville-Gleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \{P, H\}$$

Bedingungen für  $\rho_G(q, P)$

- $\{P_G, H\} = 0$
- $P_G \geq 0$
- $\int d^{3N}q d^{3N}p \rho_G(q, P) = 1$ .

Superpositionsprinzip: Lösungen  $P_1, P_2 \implies \rho = a_1 \rho_1 + a_2 \rho_2$  mit  $a_1, a_2 \geq 0, \quad a_1 + a_2 = 1$ .

Makrozustand:  $T, V, P, \dots \implies \rho_0 \text{ oder } \rho_g?$

## 4 Quantenmechanik

Schwabl Kapitel 1.4, 1.5.2  $N$  Teilchen, Mikrozustand  $|\Psi\rangle \in \mathcal{H} \simeq \mathcal{L}_2(\mathbb{R}^{3N})$

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H |\Psi(t)\rangle$$

Anfangsbedingung  $|\Psi_0\rangle \rightarrow |\Psi(t)\rangle$  (eindeutig)

$$\text{Erwartungswert } A(t) = \langle \Psi(t) | \hat{A} | \Psi(t) \rangle = \langle \hat{A} \rangle$$

Ziel:

$$\text{Statistische Mittelung } \langle A \rangle = \text{Sp}(\hat{A} \hat{\rho}_G), \quad \hat{\rho} \hat{=} ?$$

### Definition

Statistische Operator, Dichteoperator, Dichtematrix, ...

$$\hat{\rho} : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}, \text{ linear}$$

$$\hat{\rho} = \hat{\rho}^+$$

$$\text{positiv-semidefinit } \langle \varphi | \hat{\rho} | \varphi \rangle \geq 0 \quad \forall \quad |\varphi\rangle \in \mathcal{H}$$

$$\text{Sp } \hat{\rho} = 1$$

Spektrale Zerlegung

$$\begin{aligned} \hat{\rho} &= \sum_n p_n |n\rangle \langle n| \\ &= \int d\lambda |\lambda\rangle \langle \lambda| w(\lambda) \end{aligned}$$

$$\text{Dichteoperator} \implies \begin{aligned} p_n &\geq 0 \\ \sum_n p_n &= 1 \\ p_n &\in \mathbb{R} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w(\lambda) &\geq 0 \\ \int d\lambda w(\lambda) &= 1 \\ w(\lambda) &\in \mathbb{R} \end{aligned}$$

$$\langle \hat{A} \rangle = \sum_n p_n \langle n | \hat{A} | n \rangle.$$

**Reiner Zustand :**

$$p_{n_0}, p_n = 0 \quad \forall n \neq n_0, \quad \hat{\rho} = |n_0\rangle \langle n_0| \implies \hat{\rho}^2 = \hat{\rho}$$

**Gemisch :**  $p_n \neq 0$  für 2 oder mehr  $n$ .

- Verschränkte Zustände
- Statistisches Gemisch

### Spektrale Zerlegung

$$\hat{A} = \sum_{\alpha} a_{\alpha} |\alpha\rangle \langle \alpha|$$

$$\langle A \rangle = \sum_n p_n \sum_{\alpha} a_{\alpha} |\langle \alpha | n \rangle|^2 = \sum_n \sum_{\alpha} \underset{\text{Stat. Zufall}}{p_n} \underset{\text{Q.M. Zufall}}{|\langle n | \alpha \rangle|^2} a_{\alpha}$$

$$\text{Gemisch: 2 Quellen: } I_1, \theta_1, \quad I_2, \theta_2 \implies I' = I_1 (\cos \theta_1)^2 + I_2 (\cos \theta_2)^2$$

$$p_1 = \frac{I_1}{I_1 + I_2}, \quad p_2 = \frac{I_2}{I_1 + I_2}$$

## Von Neumann Gleichung

$$i\hbar \frac{d\hat{\rho}}{dt} = [H, \hat{\rho}]$$

- Anfangsbedingung  $\hat{\rho}_0 \rightarrow \hat{\rho}(t)$
- Gleichgewicht:

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = 0 \implies [H, \hat{\rho}] = 0$$

- Superpositionsprinzip  $\rho = a_1\rho_1 + a_2\rho_2$  mit  $a_1, a_2 \geq 0$ , und  $a_1 + a_2 = 1$
- Im Gleichgewicht:

$$\hat{\rho}_G = \sum_n p_n |E_n\rangle \langle E_n| \quad \text{mit} \quad H |E_n\rangle \langle E_n| = \int dE w(E) |E\rangle \langle E| \quad \text{mit} \quad H |E\rangle = E |E\rangle$$

$$p_n = \frac{1}{Z_n} \quad \text{für} \quad E_n = E_0, \quad Z_n = \text{Entartung des Niveaus } E_0$$

$$p_n = \frac{1}{Z} e^{-\beta E_n} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{1}{k_B T}, \quad Z = \sum_n e^{-\beta E_n}$$

## Entropie und Ensemble

**Definition** Entropie (Quantenstatistik)

$$S = -k_B \text{Sp}(\hat{\rho} \ln \hat{\rho}) \quad k_B = k = \text{Boltzmann-Konstante} \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

## Eigenschaften

$$\hat{\rho} = \sum_n p_n |n\rangle \langle n| \quad p_n \geq 0 \quad \sum_n p_n = 1$$

$$S(\{p_n\}) = -k_B \sum_n p_n \ln p_n$$

Hinweise:

$$\begin{aligned} \text{Sp } \hat{A} &= \sum_n \langle n | \hat{A} | n \rangle & f(\hat{\rho}) &= \sum_n f(p_n) |n\rangle \langle n| \\ e^{\hat{A}} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \hat{A}^n \end{aligned}$$

Die Entropie ist also die Summe der Diagonalelemente der Dichtematrix in diagonalisierter Form. Dies ist wohldefiniert, da jede Dichtematrix diagonalisiert werden kann. Extrema mit Nebenbedingung  $\sum_n p_n = 1$

- Minimum  $S = 0$  für einen reinen Zustand ( $p_{n_0} = 1, p_n = 0 \quad \forall n \neq n_0$ )
- Maximum  $S = k_B \ln M$  für  $p_n = \frac{1}{M} \quad \forall 1, \dots, M$ .

Die entropie ist maximal für Unkenntnis über den Zustand des Systems (Auch maß für Unordnung).

## Extensivität

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B, \quad \hat{\rho} = \hat{\rho}_A \otimes \hat{\rho}_B$$

$$\begin{aligned}\hat{\rho}_A &\rightarrow \hat{\rho}_A \otimes \hat{I}_B \\ \hat{\rho}_B &\rightarrow \hat{I}_A \otimes \hat{\rho}_B \\ \implies [\hat{\rho}_A, \hat{\rho}_B] &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S &= -k_B \text{Sp}(\hat{\rho} \ln \hat{\rho}) = k_B \text{Sp}[\hat{\rho}_A \hat{\rho}_B (\hat{\rho}_A = \ln \hat{\rho}_B)] \\ &= -k_B \text{Sp}(\hat{\rho}_A \ln \hat{\rho}_A) - k_B \text{Sp}(\hat{\rho}_B \ln \hat{\rho}_B) = S_A + S_B\end{aligned}$$

Nebenbedingung

$$S \leq S_A + S_B$$

(z.B. verschränkte Systeme)

**Beispiel** System von  $N$  Spins  $S$  ( $\vec{S}^2 = S(S+1)$ ).

Hilbert-Raum für einen Spin  $= \mathcal{H}_1 = \mathbb{C}^{2S+1}$ . Gesamter Hilbert-Raum

$$\mathcal{H} = \bigotimes_{i=1}^N \mathcal{H}_i$$

$$\dim \mathcal{H} = (2S+1)^N = M$$

- Minimum  $S = 0$  z.B. für  $|\Psi\rangle = |\uparrow, \uparrow, \uparrow, \dots, \uparrow\rangle$ .
- Maximum  $S = k_B \ln M$  für  $\hat{\rho} = \frac{1}{n} \hat{I} = k_B n \ln(2S+1)$

## Gleichgewicht

$$\begin{aligned}0 = \frac{d\rho}{dt} &\iff [H, \hat{\rho}] = 0 \implies \rho = \sum_m p_n |E_n\rangle \langle E_n| \\ \implies E = \langle \hat{H} \rangle &= \text{Sp}(\hat{\rho} \hat{H}) = \sum_n p_n E_n\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho |E_n\rangle &= p_n |E_n\rangle \\ H |E_n\rangle &= E_n |E_n\rangle\end{aligned}$$

**Definition** Statistisches Ensemble oder Gesamtheit

Sie ist eine Gewichtete Menge der Mikrozustände, die einen Makrozustand entsprechen.

$$\{(|N\rangle, p_n)\} \equiv \hat{\rho} = \sum_n p_n |n\rangle \langle n|$$

## Zentrales Postulat der statistischen Physik

System mit  $N(\rightarrow \infty)$  Freiheitsgraden im Gleichgewicht.

- $S$  ist maximal für einen gegebenen Makrozustand. Das erlaubt uns eine eindeutige Bestimmung des statistischen Operators  $\hat{\rho}$ .
- Statistische Mittelungen der Observablen erfüllen die makroskopischen Gesetze der Thermodynamik.

$$S = -k_B \text{Sp} \hat{\rho}_B = -k_B \langle \ln \hat{\rho}_G \rangle$$
$$\langle \hat{O} \rangle = \text{Sp}(\hat{\rho}_G \hat{O}) \qquad U = \langle \hat{H} \rangle$$

### Definition Entropie (Thermodynamik)

Wir betrachten ein System in einem Bad, mit welchem es Energie austauschen kann. Eine ideale Situation, in welcher alle Prozesse die wir betrachten reversibel sind.

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Zustandsfunktion oder thermodynamische Variable.

- Extensiv
- monoton steigend  $\frac{\partial S}{\partial E} > 0$
- $\lim_{T \rightarrow 0} \frac{S}{N} = 0$ .

**Nebenbedingung** Für bestimmte Modelle statistische Entropie nicht gleich der thermodynamischen Entropie, das bedeutet das Modell ist nicht physikalisch. Eigentlich hat man in den letzten 100 Jahren in denen man Forschung betreibt kein Problem gefunden, das man nicht lösen konnte. Es gibt verschiedene Situationen in der Praxis, in denen man die Makrozustände beschreibt.

## Mikrokanonisches Ensemble

Es beschreibt ein isoliertes System.

### Freie thermodynamische Variablen

- Teilchenzahl  $N$
- Volumen  $V$
- Magnetisierung  $M$
- Energie  $E$

**Zustandsfunktion** Druck  $P(N, V, E)$

### Maximierung der Entropie

$$\hat{\rho} = \frac{1}{\Omega} P_E P_N \dots$$
$$\hat{\rho} \propto \delta(\hat{H} - E) \delta(\hat{N} - N)$$



## Kanonisches Ensemble

Beschreibt ein geschlossenes System.

### Freie thermodynamische Variablen

- Temperatur  $T$
- $N, V, M$

**Zustandsfunktionen**  $E(T, N, V)$

**Maximum der Entropie** Für feste  $T, N, V, \dots$

$$\hat{\rho} = \frac{1}{z} e^{-\beta \hat{H}} \hat{P}_N \dots \quad \beta = \frac{1}{k_B T}$$

**Zustandssumme**

$$z = \text{Sp } e^{-\beta \hat{H}}$$

## Großkanonisches Ensemble

Beschreibt ein offenes System

### Freie Thermodynamische Variablen

- Chemisches Potential  $\mu$
- $T, V, \dots$

**Zustandsfunktionen**  $N(T, \mu, V)$

**Maximum der Entropie** für feste  $T, \mu, V$  falls

$$\hat{\rho}_G = \frac{1}{Z_{GK}} e^{-\beta(\hat{H} - \mu \hat{N})} P$$

**Großkanonische Zustandssumme**  $Z_{GK} \text{Sp } e^{-\beta(\hat{H} - \mu \hat{N})}$

## Viele weitere Ensembles

Zu jeder intensiven Variable gibt es eine Extensive Variable(Observable).

(äußeres Feld) $< - >$ Intensive Variable	Observable $y$ Extensive Variable	$x$
$\hat{\rho}_G e^{-\beta y \hat{x}}$	$\hat{\rho}_G P_x \delta(\hat{x} - x)$	
Beispiele $M$	$N$	
$P$	$V$	
$H$	$M$	
(Magnetfeld)	(Magnetisierung)	

## Mikrokanonisches Ensemble

Wir betrachten ein isoliertes System. Zum Beispiel ein Gas in einem Behälter welcher isoliert ist. Energie und Teilchenzahl sind fest. Genauso das Volumen. Eine Ähnliche Situation wäre auch ein magnetisches Material. Die Isolation wäre hier ein Material welches keine magnetischen Felder durchlässt. Typisch für das isolierte System ist, dass die Energie eine kontrollierbare Variable ist. Es gibt also eine freie thermodynamische Variable  $E$ . Die erlaubten Mikrozustände sind die Eigenzustände des Hamilton-Operators  $H$  zur Energie  $E$ . Das Ziel ist nun die mikrozustände zu beschreiben und die makroskopischen Variablen zu berechnen. Man braucht dazu den statistischen Operator.

### Diskretes Eigenspektrum

$$\hat{\rho} = \sum_n p_n |n\rangle \langle n| \quad : \quad \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H} \quad p_n = 0 \quad \forall n \text{ mit } E_n \neq E$$

$$\hat{\rho} = \sum_{n=1}^{w(E)} p_n |n\rangle \langle n| \quad w(E) = \text{Entartung der Eigenenergie } E$$

Wir verwenden das Postulat der Maximierung der Entropie:

$$0 = \frac{\partial S}{\partial p_n} - \lambda \frac{\partial}{\partial p_n} \left( \sum_{n=1}^{w(E)} p_n - 1 \right)$$

$$= -k_B (\ln p_n + 1) - \lambda \quad \forall 1, \dots, w(E)$$

$$\text{Extrema für } \implies p_n = e^{-\frac{\lambda}{k_B} - 1} \implies p_n = \frac{1}{w(E)}$$

$$\implies S(E) = k_B \ln(w(E)) \text{ ist auch ein Maximum}$$

### Dichteoperator im Gleichgewicht

$$\hat{\rho}_G = \sum_{n=1}^{w(E)} \frac{1}{w(E)} |n\rangle \langle n| = \frac{1}{w(E)} P_E = \frac{1}{w(E)} \delta(H - E)$$

$$\text{Tr } \hat{\rho}_G = 1$$

$$\text{Tr } P_E = w(E)$$

### Kontinuierliches Spektrum

$$\hat{\rho} = \int d\lambda |\lambda\rangle \langle \lambda| p(\lambda)$$

$$N(E) = \text{Anzahl der Zustände mit einer Eigenenergie } \leq E$$

Hinweis: Für ein diskretes System von Eigenzuständen für ein kontinuierliches Spektrum kann man die Anzahl der Eigenzustände kleiner Als  $w$  definieren.

$$\begin{aligned}
 w(E) &= \frac{dN}{dE} = \text{Zustandsdichte} \\
 \implies w(E)\Delta E &= \text{Anzahl der Eigenzustände in } [E, E + \Delta E] \\
 S(E) &= k_B \ln(w(E)\Delta E) \\
 \hat{\rho} &= \frac{1}{w(E)} \delta(H - E)
 \end{aligned}$$

## Thermodynamische Variablen

Man macht eine Statistische Mittelung

$$\langle \hat{O} \rangle = \text{Tr}(\hat{\rho}_G \hat{O})$$

## Beispiele

Innere Energie:  $U = \langle H \rangle = E$

Magnetisierung:  $M_z = \langle S_z \rangle$

## Thermodynamischer Limes ( $N \rightarrow \infty$ )

**Definition:** Temperatur

$$\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_x$$

**Definition** Konjugierte Variablen

Beispiele:

$$x = \begin{bmatrix} M & \Longleftrightarrow & H \\ N & \Longleftrightarrow & M \\ V & \Longleftrightarrow & P \end{bmatrix} y$$

$$S(E, X), \quad y = \pm T \left( \frac{\partial S}{\partial X} \right)_E$$

## Statistische Physik

Observable  $\hat{x}$ ,    extensiv ,  
 $\implies \langle \hat{x} \rangle = x$

$$\begin{aligned}
 [\hat{x}, \hat{H}] &\xrightarrow{N \gg 1} N^0, n^{-1} \\
 S(E, X) &= k_B \ln w(E, X)
 \end{aligned}$$

## Beispiel: System von nicht-wechselwirkenden Spins

$$N \text{ Spins } s = 1, \quad H = \sum_{i=1}^N H_i = J \sum_{i=1}^N S_{iz}^z \quad (J > 0)$$

Eigenzustände:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Teilchen } & \begin{cases} H_i |m_j\rangle = JS_{jz}^z |m_j\rangle = J\hbar^2 m_j^2 \\ S_{zj} |m_j\rangle = \hbar m_j |m_j\rangle \end{cases} & m_j = -1, 0, 1 \\ N \text{ Teilchen } & \begin{cases} \text{Dim } \mathcal{H} = 3^N \\ |\{m_j\}\rangle = |m_j\rangle \otimes |m_j\rangle \otimes \dots \otimes |m_N\rangle \\ E(\{M_j\}) = J \sum_{j=1}^N m_j^2 \\ S_z |\{m_j\}\rangle = \sum_j m_j |\{m_j\}\rangle \\ H |\{m_j\}\rangle = E(\{m_j\}) |\{m_j\}\rangle \end{cases} & M = \sum_j m_j |\{m_j\}\rangle \end{aligned}$$

**Problem** Entartung  $w(E, M)$

$$\begin{aligned} N_+ &= \text{Anzahl der Spins mit } m_j = +1 \text{ in } \{m_j\} \\ N_0 &= \text{Anzahl der Spins mit } m_j = +0 \text{ in } \{m_j\} \\ N_- &= \text{Anzahl der Spins mit } m_j = -1 \text{ in } \{m_j\} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E = J(N_+ + N_-) \\ M = N_+ - N_- \\ N = N_+ + N_- + N_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} N_+ = \frac{R+M}{L} = \frac{r+m}{L} N \\ N_- = \frac{R-M}{L} = \frac{r-m}{L} N \\ N_0 = N - R = (1-r)N \end{cases}$$

$$\text{Energie pro Spin ist } r = \frac{R}{N} = \frac{E}{NJ} \in [0, 1]$$

$$\text{Magnetisierung pro Spin } m = \frac{M}{N} \in [-1, 1]$$

Problem:  $N_+$  unterscheidbare Zustände  $m_j = +1$  auf  $N$  Spins verteilen.

$$\Rightarrow \binom{N}{N_+} = \frac{N!}{N_+!(N-N_+)!} \text{ Möglichkeiten}$$

Danach:  $N_-$  unterscheidbare Zustände auf  $N - N_+$  Spins mit  $m_j = -1$  verteilen.

$$\Rightarrow \binom{N - N_+}{N_-} \text{ Moeglichkeiten}$$

Also insgesamt:

$$\begin{aligned} w(E, M) &= w(N_+, N_-) \\ &= \binom{N}{N_+} \binom{N - N_+}{N_-} \\ &= \frac{N!}{N_+! N_-! N_0!} \end{aligned}$$

Damit folgt die Entropie:

$$\begin{aligned} S(E, M) &= S(N_+, N_-) \\ &= k_B \ln \left( \frac{N!}{N_+! N_-! N_0!} \right) \end{aligned}$$

Annahme:  $N, N_+, N_0, N_- \gg 1$  aber

$$\begin{aligned} \frac{N_+}{N}, \frac{N_-}{N}, \frac{N_0}{N} &\text{ fest und endlich} \\ \Leftrightarrow m, n &\text{ fest und endlich} \\ \Leftrightarrow M, E &\text{ sind extensiv } (M, E \propto N) \end{aligned}$$

Stirling Formel

$$\begin{aligned} \ln N! &\approx N \ln N - N \\ \Rightarrow S(E, M) &= k_B N f(r, m) \\ f(r, m) &= - \left[ \frac{r+m}{2} \ln(r+m) + \frac{r-m}{2} \ln \frac{(r-m)}{2} + (1-r) \ln(1-r) \right] \end{aligned}$$

**Temperatur**

$$\frac{1}{T} = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_M = \frac{k_B}{J} \ln \left( \frac{2(1-r)}{\sqrt{r^2 - m^2}} \right)$$

**Ohne Magnetisierung**  $M = 0$  genau dann, wenn  $m = 0$ .

$$S(E) = -kN \left[ r \ln \frac{r}{2} + (1-r) \ln(1-r) \right]$$

$$\frac{1}{T} = \frac{k_B}{J} \ln \left( \frac{2(1-r)}{r} \right) \begin{cases} > 0 & \text{falls } 0 < r < \frac{2}{3} \\ < 0 & \text{falls } \frac{2}{3} < r < 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow r(T) &= \frac{2}{e^{\beta J} + 2}, \quad \beta = \frac{1}{k_B T} \\ E(T) &= NJ \frac{2}{e^{\beta J}} \frac{2}{e^{\beta J} + 2} \\ S(T) &= kN \left[ \frac{2}{e^{\beta J} + 2} \ln(e^{\beta J} + 2) - \frac{1}{e^{-\beta J} + 2} \ln(1 + 2e^{-\beta J}) \right]\end{aligned}$$

## Diskussion

Tiefe Temperaturen

$$k_B T \ll J \iff \beta J \longrightarrow \infty \implies \begin{cases} E \longrightarrow 0 \\ S \longrightarrow 0 \end{cases}$$

Nebenbedingung für  $J < 0$ :

$$\implies \begin{cases} E = NJ \\ S = k_B N \ln(z) \end{cases}$$

Hohe Temperatur  $k_B T \gg J$

$$\iff \beta J \longrightarrow 0 \implies \begin{cases} E = \frac{2}{3} NJ \\ S = \frac{1}{3} k_B N \ln(3) \end{cases}$$