



Figure 1: 1-D Ising-Modell-Kette (Quelle: W. Nolting - Grundkurs Theoretische Physik: Band 6)

Ising Modell

Das Ising Modell ist ein wichtiges Modell der Statistischen Physik, was die Phänomäne des Magnetismus insbesondere Ferromagnetismus beschreiben soll. Damit werden auch Phasenübergänge untersucht, d.h. ob es eine bestimmte kritische Temperatur gibt bei dem ein Phasenübergang in einem Material stattfindet. Mit dem Ising Modell ist es möglich analytisch ein und zwei dimensionale Probleme exakt beschreiben. Für dreidimensionale Probleme werden numerische Approximationen verwendet. Das Ising Modell gilt als das einzige halbwegs realistische Modell für ein Viel-Teilchen-System mit dem man Phasenübergänge mathematisch behandeln kann. Bei vielen meisten Problemuntersuchungen wird immer die gleiche Vorgehensweise verwendet. Man bestimmt die Zustandssumme eines Systems von der aus ist es möglich weitere thermodynamische Größen zu bestimmen. Um die Zustandssumme bestimmen zu können benötigt man die Gesamtenergie des Systems wissen.

Herleitung der Hamiltonfunktion

Wir betrachten ein System aus vielen Teilchen, die in einer Dimension nebeneinander angeordnet sind mit jeweils einem positiven bzw. einem negativen Spin besitzen (siehe Abbildung 1). Beim Ising Modell wird nur die Spin-Wechselwirkung von benachbarten Teilchen betrachtet.

Die Hamiltonfunktion dieses Systems lautet

$$H = - \sum_{ij} J_{ij} S_i S_j - \vec{\mu} \vec{B} \sum_i S_i \quad (1)$$

Dabei ist J_{ij} eine Wechselwirkungskonstante die die magnetische Wechselwirkung zwischen den Teilchen i und j beschreibt. $S_i = \pm 1$ ist dazu da um das Vorzeichen des Spins darzustellen. $\vec{\mu}$ ist dabei das Magnetische Moment und \vec{B} die magnetische Flussdichte.

Wir betrachten das Magnetfeld in z-Richtung, d.h. $\vec{B} = (0, 0, B_0)^T$, weiterhin gilt im Ising-Modell nur die Wechselwirkung zwischen benachbarten Teilchen $j = i + 1$, vereinfacht sich die Gleichung (1) insgesamt zu

$$H = - \sum_i^{N-1} J_i S_i S_{i+1} - \mu B_0 \sum_i S_i \quad (2)$$

1-D Ising-Modell ohne äußeres Magnetfeld ($B_0 = 0$)

In diesem Abschnitt wollen wir untersuchen ob es bei einer kritischen Temperatur T_C zu einem Phasenübergang kommt. D.h. ob sich eine spontane Magnetisierung einstellt. Dies war der ursprüngliche Plan von Ernst Ising, als dieses Modell erarbeitet hat.

Wir bestimmen zunächst die kanonische Zustandssumme, die allgemein lautet

$$Z = \sum_{\{\alpha\}} e^{-\beta E_\alpha} \text{ mit } \beta = \frac{1}{k_B T} \quad (3)$$

Setzen wir nun den Hamiltonoperator aus Gleichung (2) mit $B_0 = 0$ in die Zustandssumme (3) ein, so lautet die von Teilchenzahl abhängige Zustandssumme

$$\begin{aligned}
Z_N &= \sum_{S_1=\pm 1} \cdot \sum_{S_2=\pm 1} \cdots \sum_{S_N=\pm 1} e^{\beta \sum_{i=1}^{N-1} J_i S_i S_{i+1}} \\
&= \sum_{S_1=\pm 1} \cdot \sum_{S_2=\pm 1} e^{\beta J_1 S_1 S_2} \sum_{S_3=\pm 1} e^{\beta J_2 S_2 S_3} \cdots \sum_{S_N=\pm 1} e^{\beta J_{N-1} S_{N-1} S_N} \\
&= \sum_{S_1=\pm 1} \prod_{i=2}^N \left(\sum_{S_i=\pm 1} e^{\beta J_{i-1} S_{i-1} S_i} \right) \\
&= \sum_{S_1=\pm 1} \prod_{i=2}^N (e^{+\beta J_{i-1} S_{i-1}} + e^{-\beta J_{i-1} S_{i-1}}) \\
&= \sum_{S_1=\pm 1} \prod_{i=2}^N 2 \cosh(\beta J_{i-1} S_{i-1})
\end{aligned} \tag{4}$$

Nun möchten wir die erste Summe $\sum_{S_1=\pm 1}$ berechnen. Das ist die Summe für das erste Teilchen das ohne Partner, d.h. ohne Wechselwirkung mit der Wechselwirkungskonstanten $J_0 = 0$ und aus dem Grund müsste Die Exponentialfunktion lauten e^0 und die Summe $\sum_{S_1} e^0 = 2$. Rein mathematisch können wir aus der Gleichung (4) ein Produkt ausklammern

$$\begin{aligned}
Z_N &= \sum_{S_1=\pm 1} \left(2 \cosh(\beta J_1 S_1) \prod_{i=3}^N 2 \cosh(\beta J_{i-1} S_{i-1}) \right) \\
&= 2 \cosh(\beta J_1 1) \prod_{i=3}^N 2 \cosh(\beta J_{i-1} S_{i-1}) + 2 \cosh(\beta J_1 (-1)) \prod_{i=3}^N 2 \cosh(\beta J_{i-1} S_{i-1})
\end{aligned} \tag{5}$$

Mit der Relation $\cosh(\pm x) = \cosh(x)$ können wir die zwei Terme wieder zusammenfassen

$$\begin{aligned}
Z_N &= 2 \cdot 2 \cosh(\beta J_1) \prod_{i=3}^N 2 \cosh(\beta J_{i-1} S_{i-1}) \\
&= 2 \cdot \prod_{i=2}^N 2 \cosh(\beta J_{i-1} S_{i-1})
\end{aligned} \tag{6}$$

Um die Gleichung (6) weiter zu vereinfachen, betrachten wir eine isotrope Wechselwirkung zwischen den Spins, d.h es gilt $J_1 = J_2 = \cdots = J_j = J$ mit $j = 2 \dots N$. Desweiteren gilt $\cosh(\beta J S_i) = \cosh(\pm \beta J) = \cosh(\beta J)$. Mit diesen Vereinfachungen lautet die Gleichung (6)

$$Z_N = 2 \cdot \prod_{i=2}^N 2 \cosh(\beta J) = 2 \cdot \prod_{i=1}^{N-1} 2 \cosh(\beta J) = 2 \cdot 2^{N-1} \cosh^{N-1}(\beta J) \tag{7}$$

Aus Gleichung (7) erhalten wir schlussendlich eine Zustandssumme für ein 1-Dim. Ising-Modell ohne äußeres Magnetfeld

$$\boxed{Z_N = 2^N \cosh^{N-1}(\beta J)} \tag{8}$$