

# 13. Boltzmann-Systeme

# Boltzmann-Gesetz

Zwei Nebenbedingungen:

$$\text{Normierung von } P : \quad 0 = f_0(P) \equiv 1 - \sum_{i=1}^K P_i$$

$$\text{Mittlere Energie} = E : \quad 0 = f_1(P) \equiv E - \sum_{i=1}^K E_i P_i$$

Suche lokales Maximum von  $S(P)$  unter den Nebenbedingungen  $0 = f_0(P) = f_1(P)$ :

$$0 = -\kappa (\ln(P_i) + 1) - \lambda_0 + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial P_i} f_1(P) = -\kappa (\ln(P_i) + 1) - \lambda_0 - \lambda_1 E_i$$

$$\Rightarrow P_i = \exp(-1 - \frac{\lambda_0}{\kappa}) \exp(-\frac{\lambda_1}{\kappa} E_i)$$

**Setze:**  $\kappa \equiv k_B = \text{Boltzmann-Konstante}$   
 $T \equiv 1/\lambda_1 = \text{absolute Temperatur [K]}$

Diese Temperatur mißt  
das Gas-Thermometer



Ludwig Boltzmann  
(1844-1906)

Normierung von  $P$

$\Rightarrow$

$$P_i = \frac{1}{Z} \exp(-\frac{E_i}{k_B T}) \quad \text{mit} \quad Z \equiv \sum_{i=1}^K \exp(-\frac{E_i}{k_B T})$$

**Merke:** Das Besetzungsverhältnis zweier Zustände der Energien  $E_i, E_j$  bei der Temperatur  $T$  ist durch den Boltzmann-Faktor  $\exp((E_j - E_i)/k_B T)$  gegeben

# Fluktuationen der Energie für ein Boltzmann-System:

Energie  $E$  ist nur im Mittel konstant. Wie groß sind die Fluktuationen?

Mittelwert der Energie:  $E = \sum_{i=1}^K E_i P_i$

Varianz:  $\Delta E^2 \equiv \sum_{i=1}^K (E_i - E)^2 P_i = \left( \sum_{i=1}^K E_i^2 P_i \right) - E^2$

Es gilt:  $\Delta E^2 = k_B T^2 \frac{\partial E}{\partial T}$

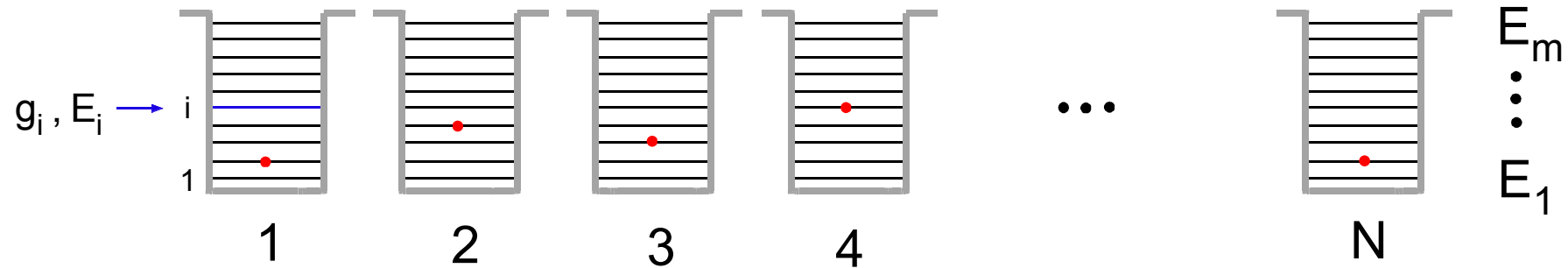
$$\Delta E^2 + E^2 = \sum_{i=1}^K E_i^2 P_i = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^K E_i^2 \exp(-\beta E_i) \quad \beta = 1/k_B T = -\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^K E_i \exp(-\beta E_i)$$

$$= -\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^K Z E_i P_i = -\frac{1}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} (Z E) = -\frac{\partial E}{\partial \beta} - \frac{E}{Z} \frac{\partial Z}{\partial \beta}$$

$$= -\frac{\partial E}{\partial \beta} - \frac{E}{Z} \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^K \exp(-\beta E_i) = -\frac{\partial E}{\partial \beta} + \frac{E}{Z} \sum_{i=1}^K E_i \exp(-\beta E_i)$$

$$= -\frac{\partial E}{\partial \beta} + E \sum_{i=1}^K E_i P_i = -\frac{\partial E}{\partial \beta} + E^2, \quad \frac{\partial E}{\partial \beta} = \frac{\partial E}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \beta} = -\frac{\partial E}{\partial T} k_B T^2$$

## N Teilchen mit gleichem Einteilchen-Energiespektrum:



Betrachte N Kopien eines Teilchens mit Zuständen der Energie  $E_i$ ,  $i=1,\dots,m$

Annahme: Alle Teilchen verhalten sich thermodynamisch äquivalent

Einteilchenzustände seien  $g_i$ -fach entartet mit Energie  $E_i$ ,  $E_i \neq E_j$  für  $i \neq j$

Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Teilchen die Einteilchenenergie  $E_i$  besitzt:

$$P_i = \frac{g_i}{Z} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), \quad Z \equiv \sum_{i=1}^m g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad \text{Zustandssumme} \quad (13.1)$$

Zustände gleicher Energie  $E_i$  haben gleiche Wahrscheinlichkeit  $P_i$ .

Mittlere Anzahl von Teilchen  $N_i$  mit Energie  $E_i$ :

$$N_i = N P_i = N \frac{g_i}{Z} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad (13.2)$$

Innere Energie  $U$  des Systems aus N Teilchen:

$$U = \sum_{i=1}^m E_i N_i$$

## Bestimmung der inneren Energie aus der Zustandssumme

$$(13.3) \quad U = N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z)$$

Aus  $Z = \sum_{i=1}^K g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$  folgt  $\frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) = \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial T} = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^K g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \frac{E_i}{k_B T^2}$

und damit  $N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) = \sum_{i=1}^K N \frac{1}{Z} g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) E_i \stackrel{(13.2)}{=} \sum_{i=1}^K N_i E_i = U$

## Bestimmung der Entropie aus der Zustandssumme

### Fall 1: N unterscheidbare Teilchen

$$(13.4) \quad S = -N k_B \sum_{i=1}^m P_i \ln(P_i/g_i) = \frac{U}{T} + N k_B \ln(Z)$$

Aus  $S = -k_B \sum_{\substack{k=1, \dots, g_i \\ i=1, \dots, m \\ l=1, \dots, N}} P_{ikl} \ln(P_{ikl})$ ,  $P_{ikl} = P_i/g_i$  folgt  $S = -N k_B \sum_{\substack{k=1, \dots, g_i \\ i=1, \dots, m}} (P_i/g_i) \ln(P_i/g_i)$

summiert die Entartung  
summiert die Zustände mit versch. Energie  
summiert die beteiligten Teilchen

$$= -N k_B \sum_{i=1, \dots, m} g_i (P_i/g_i) \ln(P_i/g_i) \stackrel{(13.1)}{=} -N k_B \sum_{i=1}^m P_i \left(-\frac{E_i}{k_B T} - \ln(Z)\right) = \frac{U}{T} + N k_B \ln(Z)$$

## Fall 2: Entropie für N ununterscheidbare Teilchen:

für ein Teilchen:

$$S[1] = k_B \ln(M_n[P]) / n = k_B \ln(M_n[P]^{1/n}), \quad M_n[P] = \frac{n!}{(nP_1)! \cdots (nP_K)!} = \text{Multiplizität von P}$$

$(nP_i)! \equiv (\text{floor}[nP_i])!$

$$= -k_B \sum_{i=1}^m P_i \ln(P_i) \quad \text{hängt nicht von der Anzahl der Beobachtungen "n" ab}$$

für N unterscheidbare Teilchen:  $M_n[P]^{1/n} \rightarrow (M_n[P]^{1/n})^N = M_n[P]^{N/n}$

$$S[N] = k_B \ln(M_n[P]^{N/n}) = k_B N \ln(M_n[P]^{1/n}) = N S[1]$$

für N ununterscheidbare Teilchen:  $M_n[P]^{1/n} \rightarrow (M_n[P]^{1/n})^N / N! = M_n[P]^{N/n} / N!$

$$S'[N] = k_B \ln(M_n[P]^{N/n} / N!) = k_B \ln(M_n[P]^{N/n}) - k_B \ln(N!) = S[N] - k_B \ln(N!)$$

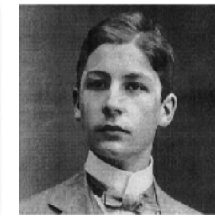
Der Term  $N!$  berücksichtigt, dass alle  $N!$  möglichen Permutationen der Teilchen denselben Zustand darstellen, und somit die Multiplizität um  $N!$  kleiner ist als für N unterscheidbare Teilchen

# Sackur-Tetrode Entropie (1912)

H. Tetrode, Ann. Phys., 343: 434–442 (1912)



Otto Sackur  
1880-1914



Hugo Tetrode  
1895-1931

Es gilt für N ununterscheidbare Teilchen:

$$(13.5) \quad S' = \frac{U}{T} + N k_B \ln(Z/N) + N k_B$$

$$S' \equiv S - k_B \ln(N!)$$

$$(13.4) \quad = -N k_B \sum_{i=1}^m P_i \ln(P_i/g_i) - k_B (N \ln(N) - N)$$

verwende (13.4) und Stirlingsche  
Formel:  $\ln(k!) \approx k \ln(k) - k$

$$= -N k_B \sum_{i=1}^m P_i [\ln(P_i/g_i) + \ln(N)] + N k_B$$

$$= -N k_B \sum_{i=1}^m P_i \ln(N P_i/g_i) + N k_B = -k_B \sum_{i=1}^m N_i \ln(N_i/g_i) + N k_B$$

$\ln(a) + \ln(b) = \ln(ab)$

$N P_i = N_i$

$$(13.2) \quad = -k_B \sum_{i=1}^m N_i \left( -\frac{E_i}{k_B T} - \ln(Z/N) \right) + N k_B = \frac{U}{T} + N k_B \ln(Z/N) + N k_B$$

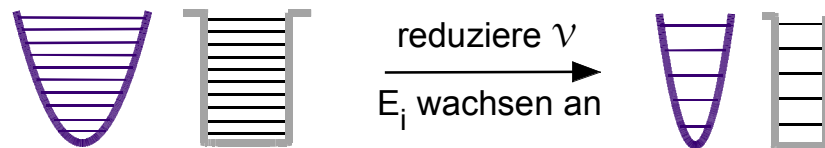
# 1. Hauptsatz für ein System aus N Teilchen

$$U = \sum_{i=1}^m N_i E_i \quad \Rightarrow \quad dU = \underbrace{\sum_{i=1}^m N_i dE_i}_{dW} + \underbrace{\sum_{i=1}^m E_i dN_i}_{dQ} \quad (13.6a)$$

dQ: Die Änderung der Besetzungszahlen  $N_i$  entspricht einer Änderung der im System gespeicherten Wärme. dQ bezeichnet eine infinitesimale Änderung der Wärme.

dW: Die Änderung der Einteilchen-Energiewerte  $E_i$  ist mit mechanischer Arbeit dW verbunden

Es sei  $\mathcal{V}$  ein Kontrollparameter über den die Energiewerte  $E_i$  verändert werden können, also  $E_i = E_i(\mathcal{V})$  (in einem Kastenpotential z.B. das Volumen, in einem harmonischen Potential die Krümmung). Wir bezeichnen  $\mathcal{V}$  als “verallgemeinertes Volumen”.



Wir definieren den “verallgemeinerten” Druck zu  $p = - \sum_{i=1}^m N_i \frac{dE_i}{d\mathcal{V}} \Rightarrow dW = -p d\mathcal{V} \quad (13.6b)$

**Behauptung:**  $\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{\mathcal{V}} = T, \quad \left(\frac{\partial U}{\partial \mathcal{V}}\right)_S = -p$

$$\Rightarrow dU = T dS - p d\mathcal{V} \xrightarrow{(13.6b)} dQ = T dS \quad (13.6c)$$



## Beweis:

$$U = T \left( S - N k_B \ln(Z) + N k_B f(N) \right) \quad (*), \quad f(N) \equiv \begin{cases} 0 & \text{für unterscheidbare Teilchen} \\ \ln(N) - 1 & \text{für ununterscheidbare Teilchen} \end{cases}$$

(13.4, 13.5)

$$S = U/T + N k_B \ln(Z) - N k_B f(N) \quad (13.7)$$

$$\left( \frac{\partial Z}{\partial S} \right)_V \stackrel{(13.1)}{=} \sum_{i=1}^m \frac{\partial}{\partial S} g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) = \sum_{i=1}^m g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \frac{E_i}{k_B T^2} \frac{\partial T}{\partial S} = \frac{\partial T}{\partial S} \frac{Z}{N} \frac{U}{k_B T^2}$$

$$\Rightarrow N k_B T \frac{\partial}{\partial S} \ln(Z) = \frac{\partial T}{\partial S} \frac{U}{T} \quad (13.8)$$

$$(13.2) \quad g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) = Z N_i / N, \quad U = \sum N_i E_i$$

Es folgt  $\left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V \stackrel{(*)}{=} \left( S - N k_B \ln(Z) + N k_B f(N) \right) \frac{\partial T}{\partial S} + T \left( 1 - N k_B \frac{\partial}{\partial S} \ln(Z) \right)$

$$\stackrel{(13.8)}{=} \left( S - N k_B \ln(Z) + N k_B f(N) \right) \frac{\partial T}{\partial S} + T \left( 1 - \frac{U}{T^2} \frac{\partial T}{\partial S} \right)$$

$$= \left( \cancel{S - N k_B \ln(Z) + N k_B f(N)} - \frac{U}{T} \right) \frac{\partial T}{\partial S} + T \stackrel{(13.7)}{=} T$$

(= 0 wegen 13.7)

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial \mathcal{V}}\right)_S \stackrel{(13.1)}{=} \sum_{i=1}^m \frac{\partial}{\partial \mathcal{V}} g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) = \sum_{i=1}^m g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \left( \frac{E_i}{k_B T^2} \frac{\partial T}{\partial \mathcal{V}} - \frac{1}{k_B T} \frac{\partial E_i}{\partial \mathcal{V}} \right)$$

$$\stackrel{(13.2)}{=} \frac{Z}{N} \left( \frac{\partial T}{\partial \mathcal{V}} \frac{U}{k_B T^2} + \frac{p}{k_B T} \right) \Rightarrow N k_B T \frac{\partial}{\partial \mathcal{V}} \ln(Z) = \frac{\partial T}{\partial \mathcal{V}} \frac{U}{T} + p \quad (13.9)$$

(13.6b) Definition  $p$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial \mathcal{V}}\right)_S &\stackrel{(*)}{=} \frac{\partial}{\partial \mathcal{V}} \left( T \left( S - N k_B \ln(Z) + N k_B f(N) \right) \right) \\ &= \left( S - N k_B \ln(Z) + N k_B f(N) \right) \frac{\partial T}{\partial \mathcal{V}} - N k_B T \frac{\partial}{\partial \mathcal{V}} \ln(Z) \\ &\stackrel{(13.9)}{=} \left( S - N k_B \ln(Z) + \cancel{N k_B f(N)} - \frac{U}{T} \right) \frac{\partial T}{\partial \mathcal{V}} - p \stackrel{(13.7)}{=} -p \\ &\quad \quad \quad (= 0 \text{ wegen } 13.7) \end{aligned}$$

## Merke:

Die innere Energie  $U(S, \mathcal{V})$  als Funktion der Entropie  $S$  und des Volumens  $\mathcal{V}$  charakterisiert das System vollständig. Man bezeichnet  $U(S, \mathcal{V})$  als thermodynamisches Potential.

Eine Änderung  $dS$  bzw.  $d\mathcal{V}$  führt zu einer Änderung  $dU$  der inneren Energie  $U(S, \mathcal{V})$  gemäß:

$$dU = T dS - p d\mathcal{V}$$

# Freie Energie: $F \equiv U - TS$ heißt freie Energie

Es gilt: a.  $F = -N k_B T (\ln(Z) - f(N))$ ,  $f(N) \equiv \begin{cases} 0 & \text{für unterscheidbare Teilchen} \\ \ln(N) - 1 & \text{für ununterscheidbare Teilchen} \end{cases}$

b.  $\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V = -S$   
 c.  $\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T = -p$   $\left. \vphantom{\begin{matrix} b. \\ c. \end{matrix}} \right\} dF = \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT = -p dV - S dT$

a. Mit  $S \stackrel{(13.7)}{=} \frac{U}{T} + N k_B (\ln(Z) - f(N))$  folgt  $F = U - TS = -N k_B T (\ln(Z) - f(N))$

b.  $\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V \stackrel{(a.)}{=} -N k_B (\ln(Z) - f(N)) - N k_B T \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) \quad (**)$

Mit  $S \stackrel{(13.7)}{=} \frac{U}{T} + N k_B (\ln(Z) - f(N))$  und  $U \stackrel{(13.3)}{=} N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z)$  folgt

$S = N k_B T \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) + N k_B (\ln(Z) - f(N)) \stackrel{(**)}{=} -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V$

c.  $\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T \stackrel{(a.)}{=} -N k_B T \frac{\partial}{\partial V} \ln(Z) \stackrel{(13.1)}{=} -N k_B T \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^m \frac{\partial}{\partial V} g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$   
 $= N k_B T \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^m g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \frac{1}{k_B T} \frac{\partial E_i}{\partial V} = \sum_{i=1}^m N_i \frac{\partial E_i}{\partial V} \stackrel{(13.6b)}{=} -p$   
 Definition  $p$

## Merke I:

Die freie Energie  $F(T, \mathcal{V})$  als Funktion der Temperatur  $T$  und des Volumens  $\mathcal{V}$  charakterisiert das System vollständig. Man bezeichnet  $F(T, \mathcal{V})$  als thermodynamisches Potential.

Eine Änderung  $dT$  bzw.  $d\mathcal{V}$  führt zu einer Änderung  $dF$  der freien Energie  $F(T, \mathcal{V})$  gemäß:

$$dF = - p d\mathcal{V} - S dT$$

b., c.

Die freie Energie ist der Teil der inneren Energie, der in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann

## Merke II:

Aus  $F \equiv U - TS$  und  $\left(\frac{\partial F}{\partial \mathcal{V}}\right)_T = -p$  folgt:

$$p = - \left(\frac{\partial U}{\partial \mathcal{V}}\right)_T + T \left(\frac{\partial S}{\partial \mathcal{V}}\right)_T$$

↑  
Entropie-Term bei Gasen  
entscheidend

## 2. Hauptsatz:

für die Gesamtentropie  $S$  abgeschlossener Systeme gilt

$dS = 0$  für reversible Prozesse

$dS > 0$  für irreversible Prozesse (Prozesse die von selbst ablaufen)

BSP:

- Ausgleich der Temperaturen zweier sich berührender Massen
- Ausdehnung eines Gases nach plötzlicher Vergrößerung des zur Verfügung stehenden Volumens.

Der zweite Hauptsatz kann als Definition für reversible bzw irreversible Prozesse aufgefasst werden

# BSP Einatomiges ideales Gas in einem Kasten mit Volumen $V = L^3$ :

Bestimmung der Zustandsdichte & Energiewerte für ein Teilchen in einem Kasten mit Volumen  $V = L^3$

Die Eigenfunktionen sind Produkte trigonometrischer Funktionen, die am Rand des Kastens verschwinden:  $\sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$

mit  $k_i L = \pi n_i$ ,  $n_i \in \mathbb{N}$ ,  $i = x, y, z$

$$\eta = \frac{\text{Anzahl von Eigenfunktionen}}{\text{k-Raum-Volumen}} = \frac{1}{(\pi/L)^3} = \frac{V}{\pi^3}$$

Anzahl  $d\rho$  von Eigenfunktionen im Wellenzahlintervall  $[k, k+dk]$

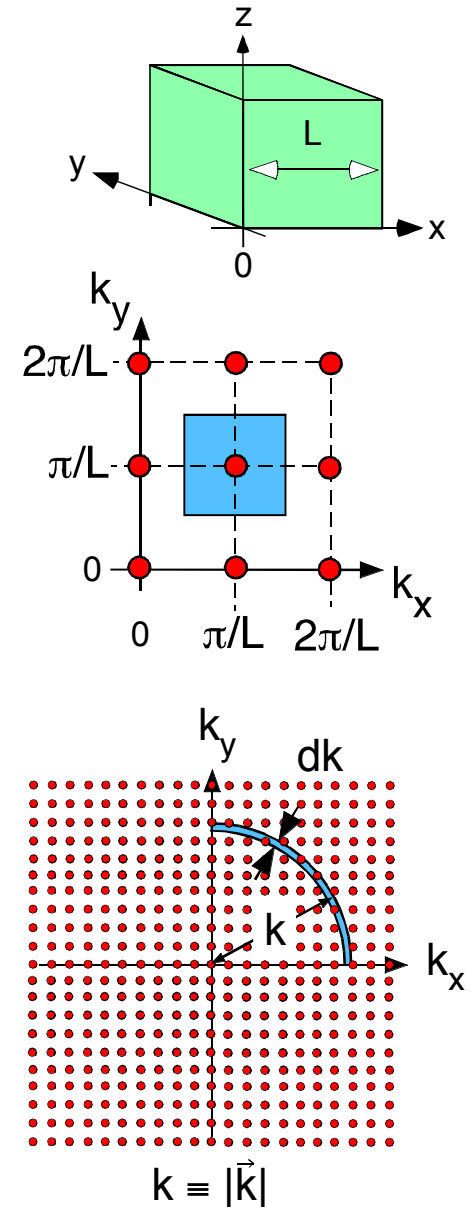
= Anzahl  $d\rho$  der Eigenfunktionen in einer Kugelschale im  $k_x, k_y, k_z > 0$  Oktanten des  $k$ -Raums mit Radius  $k$  und Dicke  $dk$  und

$k$ -Raum Volumen  $dS_k = \frac{1}{8} 4\pi k^2 dk$

$$\text{Somit folgt } d\rho = \eta dS_k = \frac{1}{2} \frac{V}{\pi^2} k^2 dk$$

Mit  $p = \hbar k$  und  $E = p^2/2m$  folgt:

$$\text{Zustandsdichte: } g(E) \equiv \frac{d\rho}{dE} = \frac{(2m)^{3/2} E^{1/2} V}{4 \hbar^3 \pi^2} \quad (13.10a)$$



Energieeigenwerte im 3D Kastenpotential:

$$E_{(n_x, n_y, n_z)} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \text{ mit } k_i L = \pi n_i, n_i \in \{1, 2, \dots\}, i = x, y, z$$

$$k_i^2 = \frac{\pi^2 n_i^2}{L^2}, \quad n^2 = (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$

$$\Rightarrow E_{(n_x, n_y, n_z)} = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\pi^2 n^2}{L^2} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\pi^2 n^2}{V^{2/3}} \quad (13.10b)$$

## Zustandssumme, Innere Energie, Entropie des idealen Gases im Kasten mit Volumen V:

$$Z \equiv \sum_{i=1}^n g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) = \int_0^\infty dE \, g(E) \exp(-E/k_B T) \stackrel{(13.10a)}{=} \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} \int_0^\infty dE \, E^{1/2} \exp(-E/k_B T)$$

$$= V \left(\frac{mk_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2} \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^\infty dz \, z^{1/2} e^{-z} = V \left(\frac{mk_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2} = \frac{V}{\Lambda^3} \quad (13.11)$$

$$\Lambda \equiv \left(\frac{2\pi \hbar^2}{mk_B T}\right)^{1/2}$$

thermische deBroglie-Wellenlänge:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \pi k_B T$$

$$m v = \hbar \frac{2\pi}{\Lambda}$$

Innere Energie des Gases:  $U \stackrel{(13.3)}{=} N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) = \frac{3}{2} N k_B T \quad (13.12)$

Spezifische Wärme:  $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{V,N} = \frac{3}{2} N k_B$

### Entropie des einatomigen idealen Gases:

In der quantenmechanischen Beschreibung sind die Teilchen in einem Gas prinzipiell ununterscheidbar, i.e., die Entropie aus (13.5) ist anzuwenden

$$S \stackrel{(13.5)}{=} \frac{U}{T} + N k_B \ln(Z/N) + N k_B \stackrel{(13.12)}{=} \frac{5}{2} N k_B + N k_B \ln(Z/N) = \frac{5}{2} N k_B + N k_B \ln\left(\frac{1}{\rho \Lambda^3}\right)$$

$\rho \equiv N/V$  Teilchendichte,  $\rho \Lambda^3$  Phasenraum-Dichte

$$\stackrel{(13.11)}{=} N k_B \left(\frac{5}{2} + \ln\left(\chi \frac{T^{3/2} V}{N}\right)\right) \stackrel{(13.12)}{=} N k_B \left(\frac{5}{2} + \ln\left(\zeta \frac{U^{3/2} V}{N^{5/2}}\right)\right) \quad \zeta \equiv \left(\frac{m}{3\pi \hbar^2}\right)^{3/2} \quad (13.13)$$

$$\chi \equiv \left(\frac{mk_B}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2}$$



# 1. Hauptsatz für ein System aus N Teilchen im Kasten mit Volumen V

$$U = \sum_{i=1}^n N_i E_i \quad \Rightarrow \quad dU = \underbrace{\sum_{i=1}^n N_i dE_i}_{dW} + \underbrace{\sum_{i=1}^n E_i dN_i}_{dQ} \quad (13.14a)$$

Für ein ideales Gas in einem Kasten mit Volumen V geschieht die Änderung  $dE_i$  der Einteilchen-Energiewerte  $E_i$  durch eine Volumenänderung  $dV$ .

$$E_i = i^2 \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m V^{2/3}} \quad \Rightarrow \quad \frac{dE_i}{dV} = i^2 \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \frac{d}{dV} V^{-2/3} = i^2 \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m V^{2/3}} \frac{-2}{3V} = E_i \frac{-2}{3V} \quad (13.10b)$$

Für den Druck gilt dann

$$p = - \sum_{i=1}^n N_i \frac{dE_i}{dV} = \frac{2}{3V} \sum_{i=1}^n N_i E_i = \frac{2U}{3V} \quad \Rightarrow \quad 3 pV = 2 U \quad (13.14b)$$

## Zustandsgleichung des idealen Gases im Kasten mit Volumen V:

mit  $pV = \frac{2}{3} U$  (13.14b) und  $U = N \frac{3}{2} k_B T$  (13.12) folgt

$$p V = N k_B T$$

(13.14c)

### Gas-Thermometer:

Die Zustandsgleichung des idealen Gases ermöglicht eine direkte Messung von T über die leicht messbaren mechanischen Größen p (Druck) und V (Volumen)

es gilt  $p = - \cancel{\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T} + T \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T$  Nur Entropie-Term  $\neq 0$

### Fluktuationen der inneren Energie:

Es gilt für Boltzmannsysteme:  $(\Delta U)^2 = k_B T^2 \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{3}{2} N (k_B T)^2$

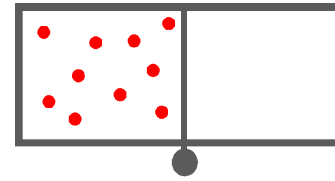
$$\Rightarrow \Delta U / U = (2 / 3N)^{1/2}$$

Für große Teilchenzahl N ist  $\Delta U / U$  extrem klein

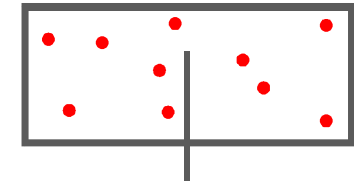
# Expansion & Mischung idealer Gase

Die korrekte Beschreibung der Mischung gleicher bzw. verschiedener Gase erfordert die Verwendung des Entropieausdrucks für ununterscheidbare Teilchen

$$S = N k_B \left[ 5/2 + \ln(T^{3/2} V/N) + 3/2 \ln\left(\frac{m k_B}{2\pi \hbar^2}\right) \right] \quad (13.13)$$

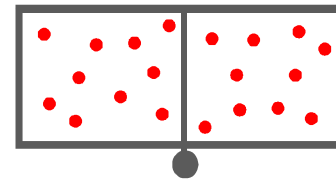


$$S(N, V)$$

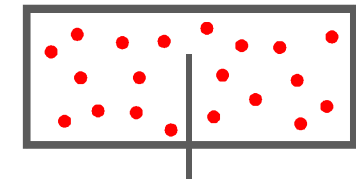


$$S(N, 2V)$$

$$S(N, 2V) - S(N, V) = \ln(2) N k_B > 0$$

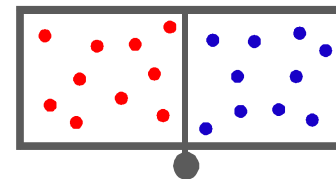


$$S(N, V) + S(N, V)$$

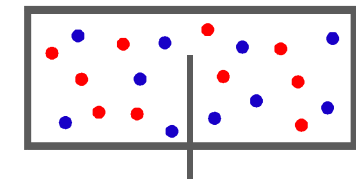


$$S(2N, 2V)$$

$$S(2N, 2V) - 2 S(N, V) = 0$$



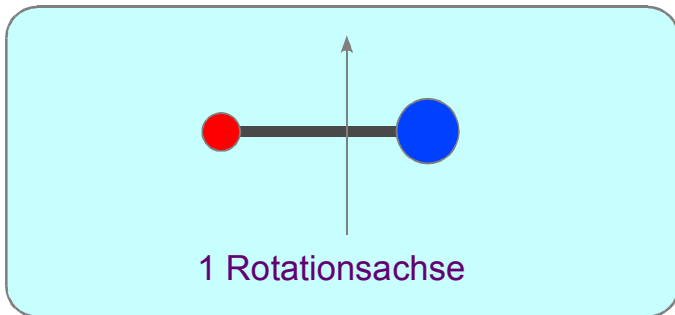
$$S(N, V) + S(N, V)$$



$$S(N, 2V) + S(N, 2V)$$

$$2 S(N, 2V) - 2 S(N, V) = 2 \ln(2) N k_B > 0$$

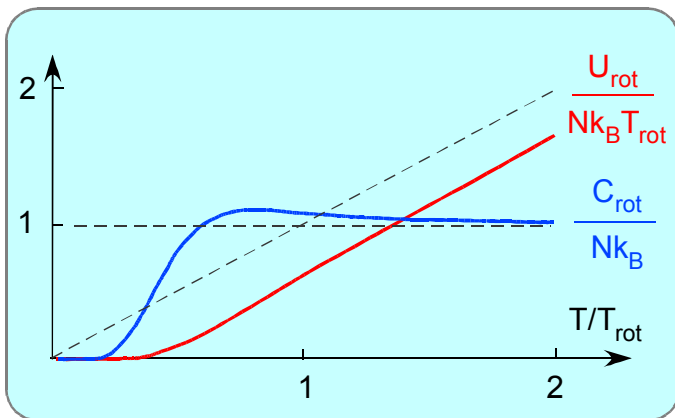
# Zweiatomige Gase: Rotation



Zustandssumme:

Innere Rotationsenergie:

spez. Rotationswärme:



Klassische Mechanik:  $E = L^2 / 2\Theta$ ,  $L = \text{Drehimpuls}$

$$E_\ell = \frac{\hbar^2 \ell(\ell+1)}{2\Theta} = k_B T_{\text{rot}} \ell(\ell+1), \quad g_\ell = 2\ell+1$$

$$\Theta = \text{Trägheitsmoment}, \quad T_{\text{rot}} \equiv \frac{\hbar^2}{2\Theta k_B} \quad \text{Rotationstemperatur}$$

$$P_\ell = \frac{1}{Z_{\text{rot}}} g_\ell \exp\left(-\frac{E_\ell}{k_B T}\right)$$

$$Z_{\text{rot}} = \sum_{\ell=0}^{\infty} g_\ell \exp\left(-\frac{E_\ell}{k_B T}\right) = \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell+1) \exp\left[-(T_{\text{rot}}/T) \ell(\ell+1)\right]$$

$$U_{\text{rot}} = N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z_{\text{rot}}) \quad (13.3)$$

$$C_{\text{rot}} = \left( \frac{\partial U_{\text{rot}}}{\partial T} \right)_N$$

Für  $T \gg T_{\text{rot}}$ :

$$Z_{\text{rot}} \approx \int_0^\infty d\ell \, 2\ell \exp\left(-\frac{T_{\text{rot}}}{T} \ell^2\right) \stackrel{x = (T_{\text{rot}}/T) \ell^2, dx = (T_{\text{rot}}/T) 2\ell d\ell}{=} T/T_{\text{rot}}$$

$$U_{\text{rot}} \approx N k_B T, \quad C_{\text{rot}} = N k_B$$

Für  $T \ll T_{\text{rot}}$ :

$$Z_{\text{rot}} \approx 1, \quad U_{\text{rot}} \approx 0, \quad C_{\text{rot}} \approx 0$$

# Zweiatomige Gase: Vibration

$$E_n = \hbar\Omega (n + 1/2), \quad n = 0, 1, \dots$$

Keine Entartung:  $g_n = 1$ ,  $\alpha \equiv \hbar\Omega / k_B T = T_{\text{vib}} / T$

Zustandssumme:

$$Z_{\text{vib}} = \sum_{n=0} \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right) = e^{-\alpha/2} \sum_{n=0} e^{-\alpha n} = e^{-\alpha/2} \frac{1}{1 - e^{-\alpha}} = \frac{e^{\alpha/2}}{e^{\alpha} - 1}$$

geom. Reihe

Innere Vibrationsenergie:

$$U_{\text{vib}} = N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z_{\text{vib}}) = \frac{1}{2} N \hbar\Omega \frac{e^{\alpha} + 1}{e^{\alpha} - 1} = N k_B T_{\text{vib}} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{e^{T_{\text{vib}}/T} - 1} \right)$$

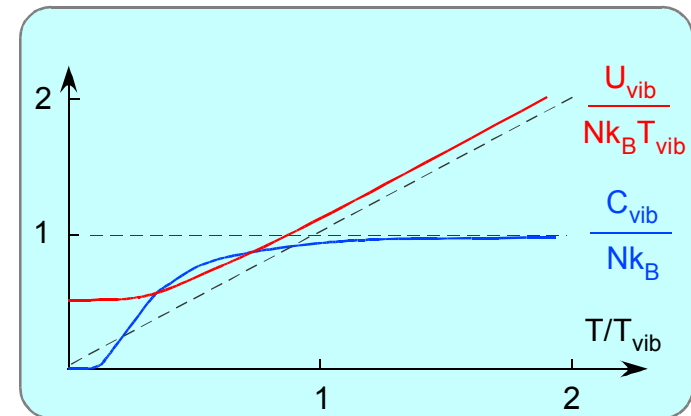
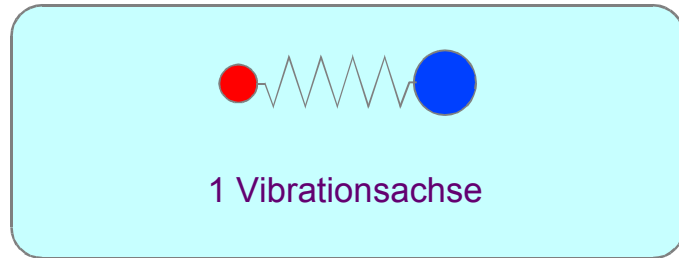
Nullpunktsenergie      Thermische Anregung

spezifische Vibrationswärme:

$$C_{\text{vib}} = \left( \frac{\partial U_{\text{vib}}}{\partial T} \right)_N = N k_B \frac{\alpha^2 e^{\alpha}}{(e^{\alpha} - 1)^2}$$

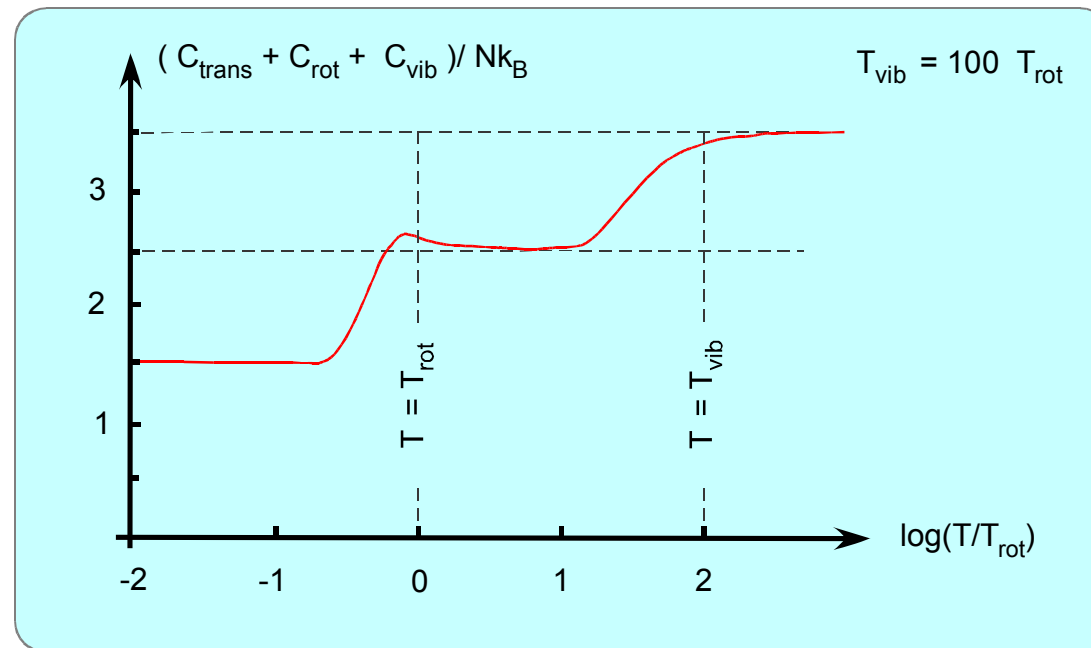
Für  $T \ll T_{\text{vib}}$  bzw.  $1 \ll \alpha$ :  $U_{\text{vib}} \approx \frac{1}{2} N k_B T_{\text{vib}}$

Für  $T_{\text{vib}} \ll T$  bzw.  $\alpha \ll 1$ :  $U_{\text{vib}} \approx N k_B T$ ,  $C_{\text{vib}} \approx N k_B$



# Zweiatomige Gase: Translation, Rotation, Vibration

|               | $T_{\text{rot}}[\text{K}]$ | $T_{\text{vib}}[\text{K}]$ |
|---------------|----------------------------|----------------------------|
| $\text{H}_2$  | 85.5                       | 6140                       |
| $\text{CO}$   | 2.77                       | 3120                       |
| $\text{O}_2$  | 2.09                       | 2260                       |
| $\text{Cl}_2$ | 0.35                       | 810                        |



**Äquipartitionssatz:** Die mittlere Energie pro Teilchen ist  $k_B T / 2$  pro Freiheitsgrad.

(für mehratomigen Gase müssen neben den drei Translationsfreiheitsgraden Rotations- und Vibrationsfreiheitsgrade berücksichtigt werden)

**Zweiatomiges Gas:**

3 Translationsfreiheitsgrade:

$$\Rightarrow 3 * k_B T / 2$$

2 Rotationsfreiheitsgrade: Festlegung der Rotationsachse erfordert zwei Winkel

$$\Rightarrow 2 * k_B T / 2$$

2 Vibrationsfreiheitsgrade: Festlegung der Vibrationsachse erfordert zwei Winkel

$$\Rightarrow 2 * k_B T / 2$$

# Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung:

Gesucht: die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in einem Gas in einem Kasten  
(Potentielle Energie = 0)

$$P_i = \frac{g_i}{Z} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \Rightarrow$$

$$P(E) dE = \frac{1}{Z} g(E) \exp(-E/k_B T) dE = \frac{2}{\pi^{1/2} (k_B T)^{3/2}} E^{1/2} \exp(-E/k_B T) dE$$

(13.10a, 13.11)

Energie = kinetische Energie:

$$\begin{aligned} E &= m v^2/2 \\ dE &= m v dv \end{aligned} \Rightarrow$$

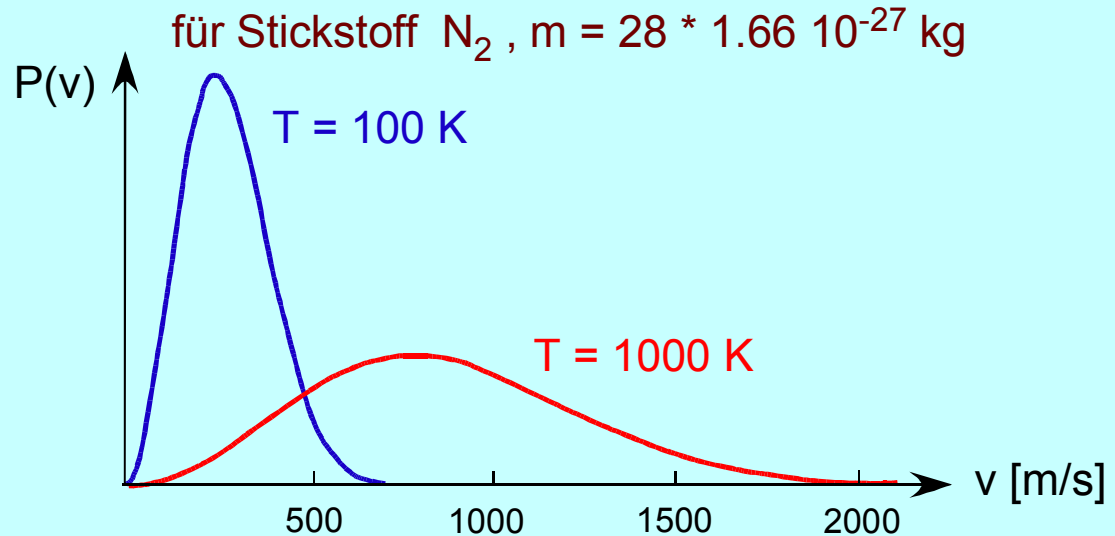
$$P(v) dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{3/2} v^2 \exp(-mv^2 / 2k_B T) dv$$

$$1 = \int_0^\infty P(v) dv$$

$$\langle v \rangle = \int_0^\infty v P(v) dv = \left(\frac{8 k_B T}{\pi m}\right)^{1/2}$$

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^\infty v^2 P(v) dv = \frac{3 k_B T}{m}$$

$$(\Delta v)^2 = (3 - 8/\pi) \frac{k_B T}{m} \approx \frac{k_B T}{2m}$$



$$P(v) = 4\pi v^2 \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp(-mv^2 / 2k_B T) = 4\pi v^2 P(\vec{v}), \quad P(\vec{v}) = \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp(-m\vec{v}^2 / 2k_B T)$$

## Maxwell-Boltzmann-Verteilung:

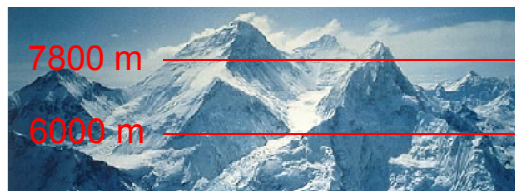
Gesucht: die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in einem Gas in einem Potential

$$\left. \begin{aligned} P(\vec{r}, \vec{v}) &= \frac{g(\vec{r}, \vec{v})}{Z} \exp\left(-\frac{E(\vec{r}, \vec{v})}{k_B T}\right) \\ E(\vec{r}, \vec{v}) &= m\vec{v}^2/2 + W(\vec{r}) \\ \text{Zustandsdichte } g(\vec{r}, \vec{v}) &= 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} P(\vec{r}, \vec{v}) &= \frac{1}{Z_r Z_v} \exp(-mv^2 / 2k_B T) \exp(-W(\vec{r})/k_B T) \\ Z_r &= \int \exp(-W(\vec{r})/k_B T) d^3r \\ Z_v &= \int \exp(-mv^2/2k_B T) d^3v = \left( \frac{2\pi k_B T}{m} \right)^{3/2} \end{aligned}$$

### BSP: Barometrische Höhenformel

$$\text{Gravitationspotential: } W(h) = m g h \quad \Rightarrow \quad P(h) = (mg / k_B T) \exp(-mgh / k_B T)$$

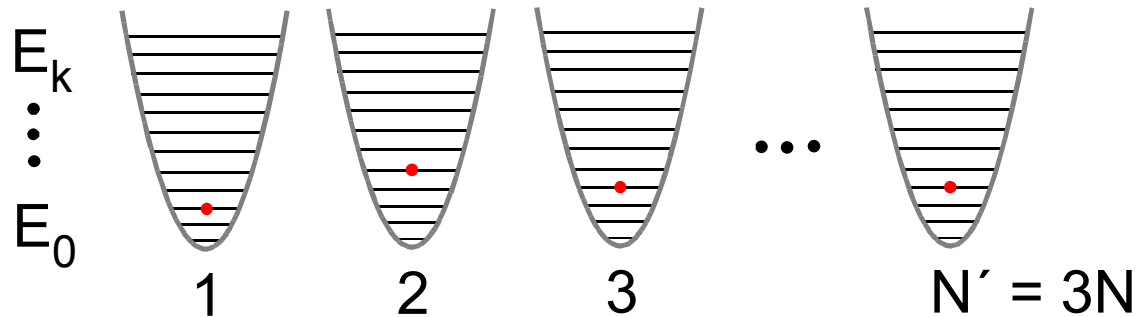
$$1/e\text{-Höhe (T = 300 K, O}_2 \text{ (m = 32 amu)): } h_{1/e} = k_B T / mg \quad \Rightarrow \quad h_{1/e} = 7800 \text{ m}$$





## 3N harmonische (1D) Oszillatoren (Einstein's Modell der spez. Wärme):

Betrachte N Teilchen mit je drei harmonischen Oszillationsfreiheitsgraden. Die Teilchen seien an verschiedenen Orten lokalisiert und damit unterscheidbar. Ein mögliches Beispiel sind die Atome in einem Kristallgitter.



$$E_n = \hbar\Omega (n + 1/2), \quad n = 0, 1, \dots \quad \text{Keine Entartung: } g_n = 1, \quad \alpha \equiv \hbar\Omega / k_B T$$

Zustandssumme:

$$(13.15) \quad Z \equiv \sum_n \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right) = e^{-\alpha/2} \sum_n e^{-\alpha n} = e^{-\alpha/2} \frac{1}{1 - e^{-\alpha}} = \frac{e^{\alpha/2}}{e^{\alpha} - 1}$$

↑  
geom. Reihe

## Innere Energie:

$$(13.16) \quad U = \underset{(13.3)}{N' k_B T^2} \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) \underset{(13.15)}{=} \frac{1}{2} N' \hbar \Omega \frac{e^{\alpha} + 1}{e^{\alpha} - 1} = \frac{1}{2} N' \hbar \Omega + \frac{N' \hbar \Omega}{e^{\alpha} - 1}$$

$e^{\alpha} - 1 + 2$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial T} &= \frac{\partial}{\partial \alpha} \frac{e^{\alpha/2}}{e^{\alpha} - 1} \frac{\partial \alpha}{\partial T} = \frac{\frac{1}{2} e^{\alpha/2} (e^{\alpha} - 1) - e^{\alpha/2} e^{\alpha}}{(e^{\alpha} - 1)^2} \frac{-\alpha}{T} \\ &= \frac{e^{\alpha/2}}{(e^{\alpha} - 1)^2} \left[ \frac{1}{2} (e^{\alpha} - 1) - e^{\alpha} \right] \frac{-\alpha}{T} = \frac{1}{2} Z \frac{e^{\alpha} + 1}{e^{\alpha} - 1} \frac{\alpha}{T} \end{aligned}$$

Nullpunktenergie

Thermische Anregung

## spezifische Wärme:

$$(13.17) \quad C_{\Omega} \equiv \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{\Omega, N} \underset{(13.16)}{=} N' \hbar \Omega \frac{\partial}{\partial \alpha} \frac{1}{e^{\alpha} - 1} \frac{\partial \alpha}{\partial T} = N' k_B \frac{\alpha^2 e^{\alpha}}{(e^{\alpha} - 1)^2}$$

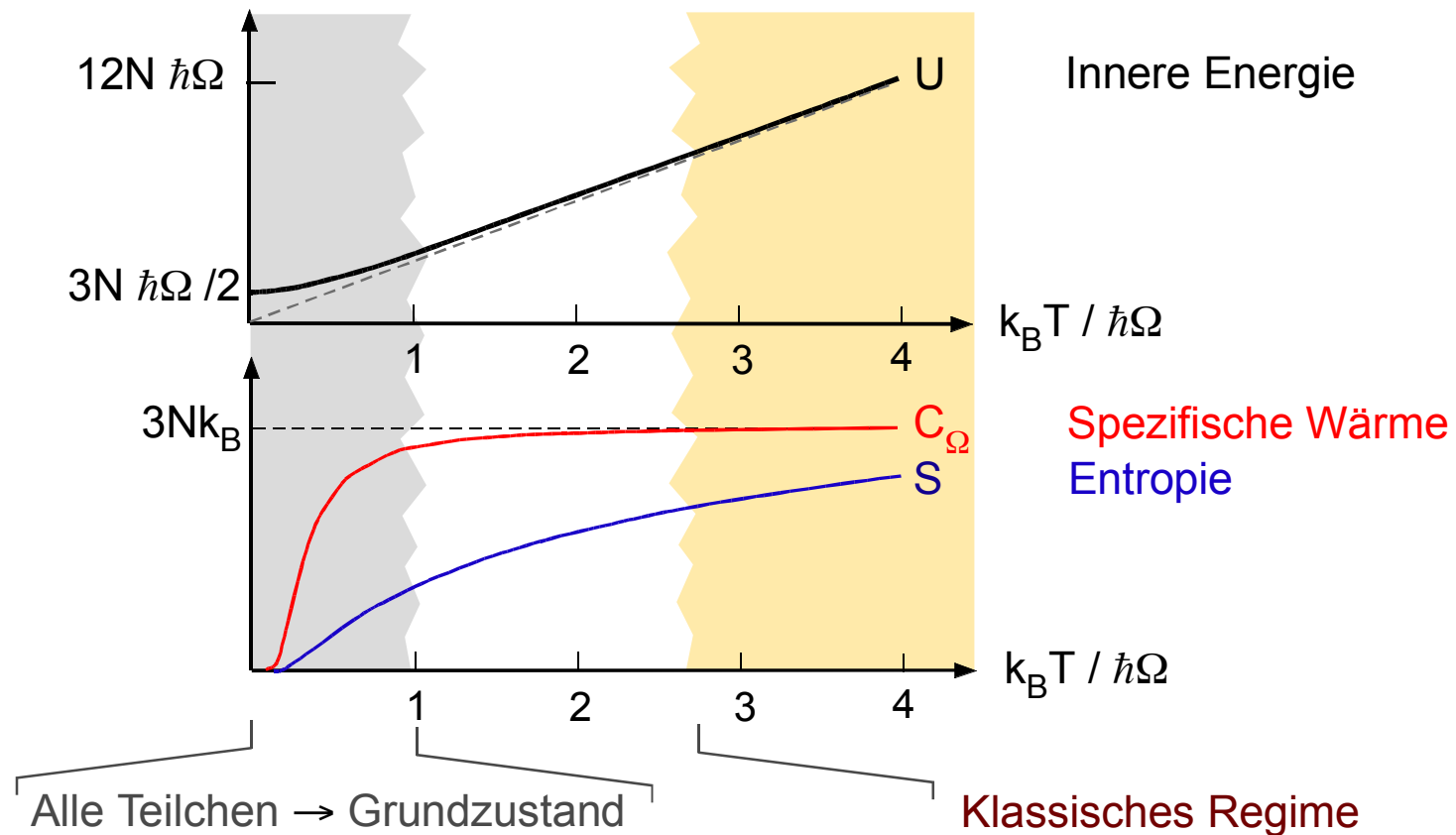
## Entropie:

$$(13.18) \quad S \underset{(13.4)}{=} \frac{U}{T} + N' k_B \ln(Z) \underset{(13.15, 13.16)}{=} N' k_B \frac{\alpha}{e^{\alpha} - 1} - N' k_B \ln(1 - e^{-\alpha})$$

## Grenzfälle:

Für  $k_B T \ll \hbar \Omega$  bzw.  $1 \ll \alpha$  folgt  $U \approx N' k_B \hbar \Omega / 2$  = Nullpunktsenergie,  $C_\Omega, S \rightarrow 0$

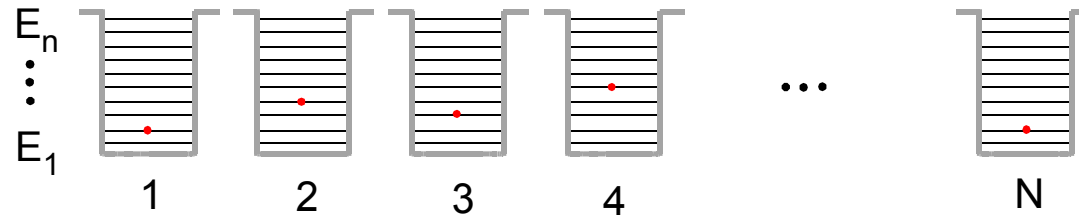
Für  $\hbar \Omega \ll k_B T$  bzw.  $\alpha \ll 1$  folgt  $U \approx 3N k_B T$ ,  $C_\Omega \approx 3N k_B$ ,  $S \approx 3N k_B \ln(k_B T / \hbar \Omega)$



# 14. Bose-Einstein – und Fermi-Dirac-Statistik

# Quantenstatistik von Vielteilchensystemen

Bisher:



N-Teilchen-System wurde als N Kopien eines Ein-Teilchen-Systems behandelt.

Besetzung des i-ten Zustands:  $N_i = N P_i$

Innere Energie: 
$$U = \sum_{i=1}^n E_i N_i$$

Entropie: unterscheidbare Teilchen 
$$S = -k_B N \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i/g_i)$$

ununterscheidbare Teilchen  $\Rightarrow$  Sackur-Tetrode Entropie

$$S' = -k_B N \sum_{i=1}^n P_i \ln(N P_i/g_i) + N k_B$$

Gesucht: Neue Buchhaltung für Vielteilchensystem aus ununterscheidbaren Teilchen, sodass die Anzahl der Teilchen nicht apriori festgelegt sondern echte Systemvariable ist.

# Quantenstatistik von Vielteilchensystemen

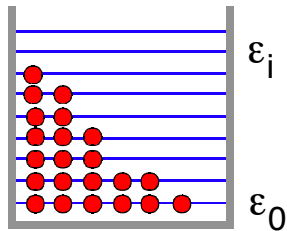
Beschreibe System durch Einteilchenzustände mit Energie  $\varepsilon_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$

Vielteilchenzustände mit ununterscheidbaren Teilchen werden durch Besetzungszahlen  $n_i$  für die Einteilchenzustände charakterisiert, i.e.  $|n_0, n_1, \dots\rangle$ .

Fermionen:  $n_i \in \{0, 1\}$ ,

Bosonen:  $n_i \in \{0, 1, 2, \dots\}$

Wechselwirkungen zwischen den Teilchen (z.B. durch Stöße) werden hier vernachlässigt.



(E)  $E_{\vec{n}} = E[n_0, n_1, \dots] = n_0 \varepsilon_0 + n_1 \varepsilon_1 + \dots$  Energie von  $|n_0, n_1, \dots\rangle$

(N)  $N_{\vec{n}} = N[n_0, n_1, \dots] = n_0 + n_1 + \dots$  Gesamtteilchenzahl von  $|n_0, n_1, \dots\rangle$

Für großes  $N$  ist es unmöglich die Besetzungen  $n_i$  für alle Zeiten exakt zu kennen.

Stattdessen beschreibt man das System durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P[n_0, n_1, \dots]$

$$P[n_0, n_1, \dots] \in [0, 1] \quad \text{mit} \quad \sum_{n_0, n_1, \dots} P[n_0, n_1, \dots] = 1$$

## ENTROPIE:

Für das uns interessierende Vielteilchensystem sind die Zustände durch einen vektoriellen

Index  $\vec{n} \equiv [n_0, n_1, \dots]$  gekennzeichnet  $\Rightarrow S(P) = -\kappa \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \ln(P_{\vec{n}})$

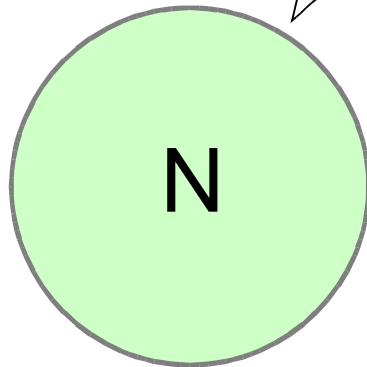
# System

$$|n_0, n_1, \dots\rangle$$

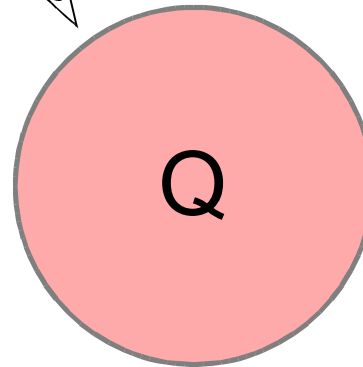
$$P[n_0, n_1, \dots]$$

$$N = \sum_{\vec{n}} N_{\vec{n}} P_{\vec{n}}, \quad \mu = \left( \frac{\partial U}{\partial N} \right)_S$$

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_N, \quad U = \sum_{\vec{n}} E_{\vec{n}} P_{\vec{n}}$$



Teilchenbad



Wärmebad

# Grosskanonisches Ensemble:

Die mittlere Energie und die mittlere Teilchenzahl sei (durch Kopplung an ein Wärmebad und ein Teilchenbad) vorgegeben:

Drei Nebenbedingungen sind zu erfüllen:

$$\text{Normierung von } P : \quad 0 = f_0(P) \equiv 1 - \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \quad (\text{G1})$$

$$\text{Mittlere Energie} = U : \quad 0 = f_1(P) \equiv U - \sum_{\vec{n}} E_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \quad (\text{G2})$$

$$\text{Mittlere Teilchenzahl} = N : \quad 0 = f_2(P) \equiv N - \sum_{\vec{n}} N_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \quad (\text{G3})$$

Suche lokales Maximum von  $S(P)$  unter den Nebenbedingungen  $0 = f_0(P) = f_1(P) = f_2(P)$ :

$$0 = \frac{\partial}{\partial P_{\vec{n}}} ( S(P) + \lambda_0 f_0(P) + \lambda_1 f_1(P) + \lambda_2 f_2(P) ), \quad S(P) = -\kappa \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \ln(P_{\vec{n}})$$

$$\frac{\partial}{\partial P_{\vec{n}}} S(P) = -\kappa (\ln(P_{\vec{n}}) + 1), \quad \frac{\partial}{\partial P_{\vec{n}}} f_0(P) = -1, \quad \frac{\partial}{\partial P_{\vec{n}}} f_1(P) = -E_{\vec{n}}, \quad \frac{\partial}{\partial P_{\vec{n}}} f_2(P) = -N_{\vec{n}}$$

$$\Rightarrow \quad 0 = -\kappa (\ln(P_{\vec{n}}) + 1) - \lambda_0 - \lambda_1 E_{\vec{n}} - \lambda_2 N_{\vec{n}}$$

$$\Rightarrow \quad P_{\vec{n}} = \exp(-1 - \frac{\lambda_0}{\kappa}) \exp(-\frac{\lambda_1}{\kappa} E_{\vec{n}}) \exp(-\frac{\lambda_2}{\kappa} N_{\vec{n}})$$



$$P_{\vec{n}} = \exp(-1 - \frac{\lambda_0}{\kappa}) \exp(-\frac{\lambda_1}{\kappa} E_{\vec{n}}) \exp(-\frac{\lambda_2}{\kappa} N_{\vec{n}})$$

$$\Rightarrow P_{\vec{n}} = \frac{1}{Z} \exp(-\frac{\lambda_1}{\kappa} E_{\vec{n}}) \exp(-\frac{\lambda_2}{\kappa} N_{\vec{n}}) \quad \text{mit } Z \equiv \exp(1 + \frac{\lambda_0}{\kappa})$$

Normierung von P  $\Rightarrow Z = \sum_{\vec{n}} \exp(-\frac{\lambda_1}{\kappa} E_{\vec{n}}) \exp(-\frac{\lambda_2}{\kappa} N_{\vec{n}})$  Zustandssumme

setze

$$\begin{aligned} \kappa &\equiv k_B = \text{Boltzmann-Konstante} \\ T &\equiv 1/\lambda_1 = \text{absolute Temperatur [K]} \\ \mu &\equiv -T \lambda_2 = \text{chemisches Potential} \end{aligned}$$

$\Rightarrow$

$$P_{\vec{n}} = \frac{1}{Z} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \quad \text{mit } Z = \sum_{\vec{n}} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \quad (14.1)$$

Die natürlichen Variablen der Zustandssumme Z sind T und  $\mu$ :  $Z = Z(T, \mu)$

## Innere Energie und mittlere Teilchenzahl:

$$U = \sum_{\vec{n}} E_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \stackrel{(G2)}{=} \sum_{\vec{n}} \sum_{i=0}^{\infty} n_i \varepsilon_i P[n_0, n_1, \dots] \stackrel{(E)}{=} \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon_i \sum_{\vec{n}} n_i P[n_0, n_1, \dots] = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon_i \bar{n}_i \quad (14.2)$$

$$N = \sum_{\vec{n}} N_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \stackrel{(G3)}{=} \sum_{\vec{n}} \sum_{i=0}^{\infty} n_i P[n_0, n_1, \dots] \stackrel{(N)}{=} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{\vec{n}} n_i P[n_0, n_1, \dots] = \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \quad (14.3)$$

## Entropie & Innere Energie:

$$S = -k_B \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \ln(P_{\vec{n}}) \stackrel{(14.1)}{=} -k_B \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} \left( -\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T} + \frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T} - \ln(Z) \right)$$

$$= \frac{1}{T} \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} E_{\vec{n}} - \frac{\mu}{T} \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}} N_{\vec{n}} + k_B \ln(Z) \sum_{\vec{n}} P_{\vec{n}}$$

$$\stackrel{(G2, G3, G1)}{=} \frac{U}{T} - \frac{\mu N}{T} + k_B \ln(Z) \quad (14.4)$$

$$\Rightarrow U = \mu N + TS - k_B T \ln(Z) \quad (14.5)$$

## Nützliche Beziehungen zwischen $Z$ , $S$ , $U$ , $N$ als Funktionen von $T$ und $\mu$

$$(14.6) \quad U = \mu N + k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z)$$

$$(14.7) \quad N = k_B T \frac{\partial}{\partial \mu} \ln(Z)$$

$$(14.8) \quad U = k_B T \left( \mu \frac{\partial}{\partial \mu} + T \frac{\partial}{\partial T} \right) \ln(Z)$$

$$(14.9) \quad S = k_B T \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) + k_B \ln(Z)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} = \left( \frac{\partial}{\partial T} \right)_{\mu}$$

$$\frac{\partial}{\partial \mu} = \left( \frac{\partial}{\partial \mu} \right)_T$$

$$\text{BEW (14.6)} \quad U = \mu N + k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z)$$

$$Z = \sum_{\vec{n}} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \Rightarrow \frac{\partial Z}{\partial T} = \sum_{\vec{n}} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \frac{(E_{\vec{n}} - \mu N_{\vec{n}})}{k_B T^2}$$

$$\Rightarrow k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) = k_B T^2 \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial T} = \frac{1}{Z} \sum_{\vec{n}} (E_{\vec{n}} - \mu N_{\vec{n}}) \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right)$$

$$\stackrel{(14.1)}{=} \sum_{\vec{n}} (E_{\vec{n}} - \mu N_{\vec{n}}) P_{\vec{n}} \stackrel{(G2, G3)}{=} U - \mu N$$

$$\text{BEW (14.7)} \quad N = k_B T \frac{\partial}{\partial \mu} \ln(Z)$$

$$\begin{aligned} k_B T \frac{\partial}{\partial \mu} \ln(Z) &= k_B T \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial \mu} \stackrel{(14.1)}{=} \frac{k_B T}{Z} \sum_{\vec{n}} \frac{\partial}{\partial \mu} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) = N \\ &= \frac{1}{Z} \sum_{\vec{n}} N_{\vec{n}} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) = N \quad \text{(G3,14.1)} \end{aligned}$$

$$\text{BEW (14.8)} \quad U = k_B T \left( \mu \frac{\partial}{\partial \mu} + T \frac{\partial}{\partial T} \right) \ln(Z)$$

$$U \stackrel{(14.6)}{=} \mu N + k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) \stackrel{(14.7)}{=} \mu k_B T \frac{\partial}{\partial \mu} \ln(Z) + k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z)$$

$$\text{BEW (14.9)} \quad S = k_B T \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) + k_B \ln(Z)$$

$$S - k_B \ln(Z) \stackrel{(14.4)}{=} (U - \mu N)/T \stackrel{(14.6)}{=} k_B T \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z)$$

# Großkanonisches Potential

(14.10)  $J(T, \mu) \equiv U(T, \mu) - TS(T, \mu) - \mu N(T, \mu)$  heißt großkanonisches Potential

Das großkanonische Potential  $J(T, \mu)$  als Funktion der Temperatur  $T$  und des chemischen Potentials  $\mu$  charakterisiert das System vollständig. Es gilt

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} J = -k_B T \ln(Z) \\ S = -\left(\frac{\partial J}{\partial T}\right)_\mu \\ N = -\left(\frac{\partial J}{\partial \mu}\right)_T \\ U = J(T, \mu) - T\left(\frac{\partial J}{\partial T}\right)_\mu - \mu\left(\frac{\partial J}{\partial \mu}\right)_T \end{array} \right.$$

$$dJ = -S dT - N d\mu$$

In den Variablen  $T, \mu$  können  $S, N, U, Z$  durch  $J$  dargestellt werden

BEW (14.10)

$$(a) \quad J(T, \mu) \equiv U(T, \mu) - TS(T, \mu) - \mu N(T, \mu) \stackrel{(14.6)}{=} k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) - TS \stackrel{(14.9)}{=} -k_B T \ln(Z)$$

$$(b) \quad \left(\frac{\partial J}{\partial T}\right)_\mu \stackrel{(a)}{=} -k_B T \frac{\partial}{\partial T} \ln(Z) - k_B \ln(Z) \stackrel{(14.9)}{=} -S$$

$$(c) \quad \left(\frac{\partial J}{\partial \mu}\right)_T \stackrel{(a)}{=} -k_B T \frac{\partial}{\partial \mu} \ln(Z) \stackrel{(14.7)}{=} -N$$

$$(d) \quad \text{mit (b) und (c) folgt } U = J(T, \mu) - T\left(\frac{\partial J}{\partial T}\right)_\mu - \mu\left(\frac{\partial J}{\partial \mu}\right)_T$$

# Innere Energie als Funktion von S und N:

BEH: a)  $\left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_S = \mu$

klärt die Bedeutung des chemischen Potentials

b)  $\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_N = T$

$$dU = \mu dN + TdS$$

a) Aus (14.5):  $U = \mu N + TS - k_B T \ln(Z) \Rightarrow$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_S = \mu + N \left(\frac{\partial \mu}{\partial N}\right)_S + S \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S - k_B \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S \ln(Z) - k_B T \left(\frac{\partial \ln(Z)}{\partial N}\right)_S$$

$$Z = Z(T(S,N), \mu(S,N)) \Rightarrow \left(\frac{\partial \ln(Z)}{\partial N}\right)_S = \left(\frac{\partial \ln(Z)}{\partial T}\right)_\mu \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S + \left(\frac{\partial \ln(Z)}{\partial \mu}\right)_T \left(\frac{\partial \mu}{\partial N}\right)_S$$

$$= \frac{U - \mu N}{k_B T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S + \frac{N}{k_B T} \left(\frac{\partial \mu}{\partial N}\right)_S$$

(14.6, 14.7)

$$\left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_S = \mu + N \cancel{\left(\frac{\partial \mu}{\partial N}\right)_S} + S \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S - k_B \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S \ln(Z) - \frac{U - \mu N}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S - N \cancel{\left(\frac{\partial \mu}{\partial N}\right)_S}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_S = \mu + \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_S \left( S - k_B \ln(Z) - (U - \mu N)/T \right) = \mu$$

(14.5)

b) ähnliche Rechnung wie in a)



## Ⓟ Zustandssumme Z :

$$Z \stackrel{(14.1)}{=} \sum_{\vec{n}} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) = \sum_{\vec{n}} \exp\left(\frac{\sum_{j=0} n_j (\mu - \varepsilon_j)}{k_B T}\right)$$

$$N_{\vec{n}} = \sum_{j=0} n_j \quad (E)$$

$$E_{\vec{n}} = \sum_{j=0} n_j \varepsilon_j \quad (N)$$

$$e^{a+b+c+\dots} = e^a e^b e^c \dots$$

$$= \sum_{n_0, n_1, \dots} \exp\left(\frac{n_0(\mu - \varepsilon_0)}{k_B T}\right) \dots \exp\left(\frac{n_i(\mu - \varepsilon_i)}{k_B T}\right) \dots$$

$$A_i \equiv \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{k_B T}\right)$$

$$= \sum_{n_0, n_1, \dots} A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots$$

$$\sum_{n_0, n_1, \dots} f_0(n_0) f_1(n_1) \dots = \left(\sum_{n_0} f_0(n_0)\right) \left(\sum_{n_1} f_1(n_1)\right) \dots$$

$$= \left(\sum_{n_0} A_0^{n_0}\right) \dots \left(\sum_{n_i} A_i^{n_i}\right) \dots = \prod_{i=0}^{\infty} \left(\sum_{n_i} A_i^{n_i}\right)$$

$$\Rightarrow Z = \prod_{i=0}^{\infty} \left(\sum_{n_i} A_i^{n_i}\right), \quad \ln(Z) = \sum_{i=0}^{\infty} \ln\left(\sum_{n_i} A_i^{n_i}\right) \quad (14.11)$$

# Mittlere Besetzung des i-ten Einteilchenzustands: (Herleitung )

$$\langle n_i^k \rangle \equiv \sum_{n_0, n_1, \dots} n_i^k P[n_0, n_1, \dots] \stackrel{(14.1)}{=} \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i^k \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}} - E_{\vec{n}}}{k_B T}\right)}{\sum_{n_0, n_1, \dots} \exp\left(\frac{\mu N_{\vec{n}} - E_{\vec{n}}}{k_B T}\right)}$$

$$e^{a+b+c+\dots} = e^a e^b e^c \dots$$

$$\begin{aligned} N_{\vec{n}} &= \sum_{j=0}^{\infty} n_j \\ E_{\vec{n}} &= \sum_{j=0}^{\infty} n_j \varepsilon_j \end{aligned}$$

$$\frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i^k \exp\left(\frac{[\mu - \varepsilon_0] n_0}{k_B T}\right) \dots \exp\left(\frac{[\mu - \varepsilon_i] n_i}{k_B T}\right) \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} \exp\left(\frac{[\mu - \varepsilon_0] n_0}{k_B T}\right) \dots \exp\left(\frac{[\mu - \varepsilon_i] n_i}{k_B T}\right) \dots}$$

$$A_i \equiv \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{k_B T}\right)$$

$$\frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i^k A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}$$



$$= \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i^k A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots} = \frac{\left( \sum_{n_0} A_0^{n_0} \right) \dots \left( \sum_{n_i} n_i^k A_i^{n_i} \right) \dots}{\left( \sum_{n_0} A_0^{n_0} \right) \dots \left( \sum_{n_i} A_i^{n_i} \right) \dots}$$

$\sum_{n_0, n_1, \dots} f_0(n_0) f_1(n_1) \dots = \left( \sum_{n_0} f_0(n_0) \right) \left( \sum_{n_1} f_1(n_1) \right) \dots$

$$= \frac{\cancel{\left( \sum_{n_0} A_0^{n_0} \right)} \dots \left( \sum_{n_i} n_i^k A_i^{n_i} \right) \dots}{\cancel{\left( \sum_{n_0} A_0^{n_0} \right)} \dots \left( \sum_{n_i} A_i^{n_i} \right) \dots} = \frac{\sum_{n_i} n_i^k A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} = \frac{\left( A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \right)^k \sum_{n_i} A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} \quad (14.12)$$

$$A_i \equiv \exp\left( \frac{\mu - \varepsilon_i}{k_B T} \right)$$

**Fermionen:**  $n_i = 0, 1$        $\bar{n}_i \equiv \langle n_i \rangle$        $A_i \equiv \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon_i}{k_B T}\right)$

$$\langle n_i^k \rangle \stackrel{(14.12)}{=} \frac{\sum_{n_i} n_i^k A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} = \frac{A_i}{1 + A_i} = \frac{1}{A_i^{-1} + 1} = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon_i - \mu}{k_B T}\right) + 1} \quad (14.13)$$

unabhängig von k

$$\bar{n}_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon_i - \mu}{k_B T}\right) + 1}$$

Fermi-Dirac Verteilung

(14.14)

Fluktuationen:  $\langle n_i^2 \rangle = \langle n_i \rangle \Rightarrow \Delta n_i^2 \equiv \langle n_i^2 \rangle - \langle n_i \rangle^2 = \langle n_i \rangle (1 - \langle n_i \rangle)$  (14.14a)

für  $\langle n_i \rangle \rightarrow 1$  folgt  $\Delta n_i^2 \rightarrow 0 \rightarrow$  Pauli-Prinzip

$$\ln(Z) \stackrel{(14.11)}{=} \sum_{i=0}^{\infty} \ln\left(\sum_{n_i} A_i^{n_i}\right) = \sum_{i=0}^{\infty} \ln(1 + A_i) \stackrel{(14.14)}{=} \sum_{i=0}^{\infty} \ln\left(\frac{1}{1 - \bar{n}_i}\right) \quad (14.15)$$

**Bosonen:**  $n_i = 0, 1, 2, \dots$

verwende  $\sum_{n=0}^{\infty} q^n = 1/(1 - q)$  falls  $q < 1$

$$\langle n_i^k \rangle = \frac{\left( A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \right)^k \sum_{n_i} A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} = (1 - A_i) \left( A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \right)^k \frac{1}{1 - A_i} \quad (14.12)$$

$$\bar{n}_i = \langle n_i \rangle = (1 - A_i) \left( A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \right) \frac{1}{1 - A_i} = \frac{A_i}{1 - A_i} = \frac{1}{A_i^{-1} - 1}$$

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon_i - \mu}{k_B T}\right) - 1} \quad (14.16)$$

Bose-Einstein Verteilung

$$\langle n_i^2 \rangle = (1 - A_i) \left( A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \right)^2 \frac{1}{1 - A_i} = (1 - A_i) A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \frac{A_i}{(1 - A_i)^2}$$

$$= \frac{A_i}{1 - A_i} + \frac{2A_i^2}{(1 - A_i)^2} = \langle n_i \rangle (1 + 2 \langle n_i \rangle) \Rightarrow \Delta n_i^2 = \langle n_i \rangle (1 + \langle n_i \rangle) \quad (14.16 \text{ a})$$

starke thermische Besetzungsfuktuationen

$$\ln(Z) = \sum_{i=0}^{\infty} \ln\left(\sum_{n_i} A_i^{n_i}\right) = \sum_{i=0}^{\infty} \ln\left(\frac{1}{1 - A_i}\right) = \sum_{i=0}^{\infty} \ln(1 + \bar{n}_i) \quad (14.17)$$

$$(1) \quad i \neq j \Rightarrow \langle n_i^q n_j^p \rangle = \langle n_i^q \rangle \langle n_j^p \rangle \quad (14.18)$$

$$\langle n_i^q n_j^p \rangle = \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i^q n_j^p A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots} = \frac{\sum_{n_i} n_i^q A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} \frac{\sum_{n_j} n_j^p A_j^{n_j}}{\sum_{n_j} A_j^{n_j}} = \langle n_i^q \rangle \langle n_j^p \rangle$$

Annahme  $n_i = n_{\varepsilon, \nu}$ ,  $\nu \in \{1, \dots, g_\varepsilon\}$  mit Entartungsgrad  $g_\varepsilon$  für Zustände der Energie  $\varepsilon$

$$(2) \quad n_\varepsilon \equiv \sum_{\nu=1, \dots, g_\varepsilon} n_{\varepsilon, \nu} \Rightarrow \Delta n_\varepsilon^2 = \sum_{\nu} \Delta n_{\varepsilon, \nu}^2$$

$$\Delta n_\varepsilon^2 = \langle n_\varepsilon^2 \rangle - \langle n_\varepsilon \rangle^2 = \sum_{\nu, \mu} \langle n_{\varepsilon, \nu} n_{\varepsilon, \mu} \rangle - \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle \langle n_{\varepsilon, \mu} \rangle \stackrel{(1)}{=} \sum_{\nu} \langle n_{\varepsilon, \nu} n_{\varepsilon, \nu} \rangle - \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle = \sum_{\nu} \Delta n_{\varepsilon, \nu}^2$$

$$(3) \quad \langle n_\varepsilon \rangle = g_\varepsilon \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle, \Delta n_{\varepsilon, \nu}^2 = \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle (1 \pm \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle) \Rightarrow \Delta n_\varepsilon^2 = \langle n_\varepsilon \rangle (1 \pm g_\varepsilon^{-1} \langle n_\varepsilon \rangle) \quad (14.19)$$

$$\Delta n_\varepsilon^2 \stackrel{(2)}{=} \sum_{\nu} \Delta n_{\varepsilon, \nu}^2 \stackrel{\uparrow}{=} \sum_{\nu} \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle (1 \pm \langle n_{\varepsilon, \nu} \rangle) = \sum_{\nu} g_\varepsilon^{-1} \langle n_\varepsilon \rangle (1 \pm g_\varepsilon^{-1} \langle n_\varepsilon \rangle) = \langle n_\varepsilon \rangle (1 \pm g_\varepsilon^{-1} \langle n_\varepsilon \rangle)$$

(14.14 a), (14.16 a)

# 15. Bose-Systeme

# Bose-Systeme

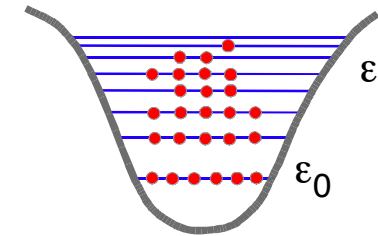
Bose-Einstein-Verteilung:  $\bar{n}_i = \frac{g_i}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon_i/k_B T) - 1}$ ,  $\xi = \exp(\mu/k_B T)$

$\varepsilon_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  Einteilchen-Energien, wähle  $\varepsilon_0 = 0$

$g_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  Entartungsgrade,  $g_0 = 1$

$\mu$  = chemisches Potential  $\in [-\infty, 0]$ ,  $\xi$  = Fugazität  $\in [0, 1]$

$T$  = Temperatur



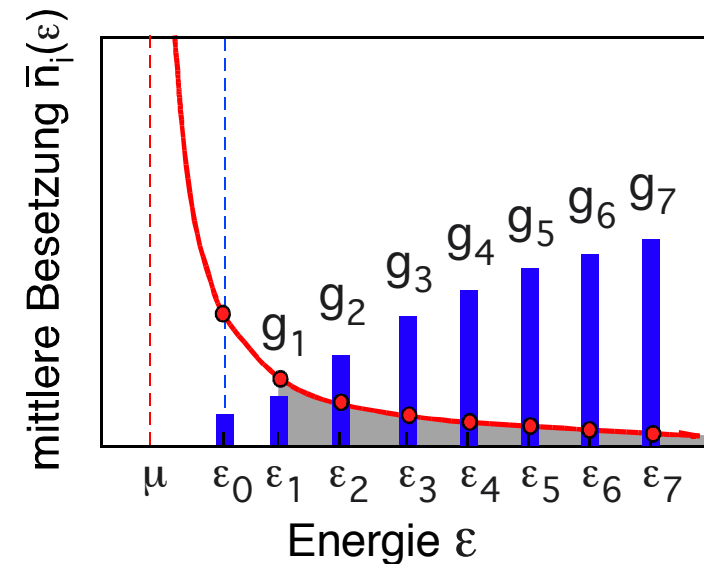
Fluktuationen:

Aus (14.18):  $\Delta n_i^2 \equiv \langle n_i^2 \rangle - \langle n_i \rangle^2 = \langle n_i \rangle (1 + g_i^{-1} \langle n_i \rangle)$



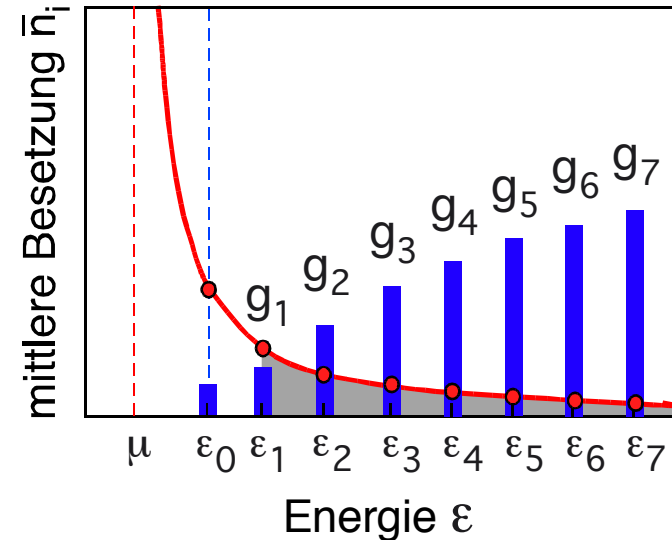
$n_i \gg 1 \Rightarrow \Delta n_i \approx \bar{n}_i g_i^{-1/2}$

thermisches Rauschen



## Bose-Einstein-Kondensation:

$$\bar{n}_i = \frac{g_i}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon_i/k_B T) - 1}$$



Normalisierung für N Teilchen:

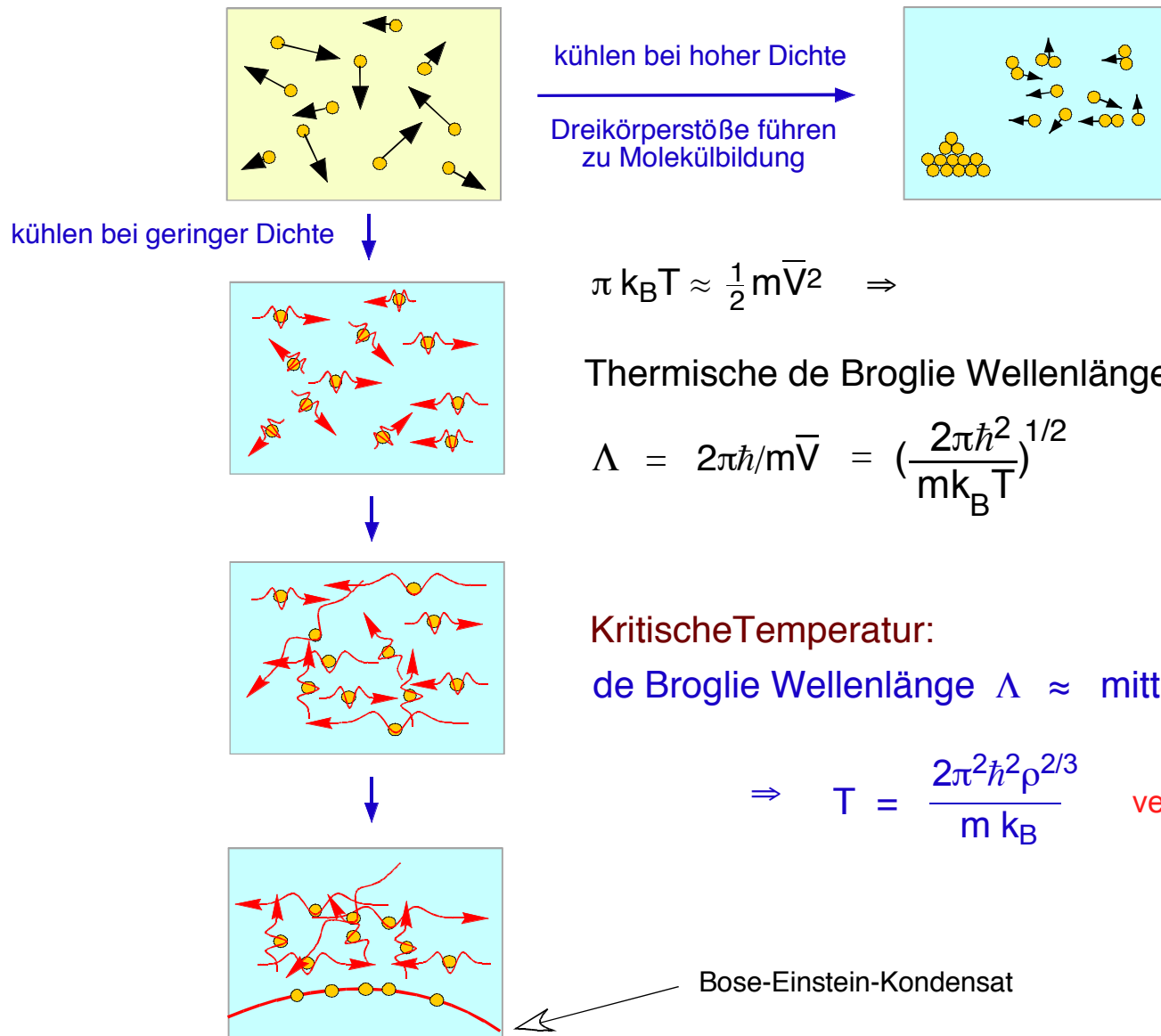
$$(15.1) \quad N = \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i = \bar{n}_0 + G(\xi) \quad (14.3)$$

Für hinreichend vernünftige Einteilchen-Parameter  $\varepsilon_i, g_i$  (gilt fast immer in 3D) wächst  $G(z)$  monoton und ist beschränkt auf  $[0,1]$ , i.e.,  $G(z) \leq G(1) < \infty$

**Bose-Einstein-Kondensation:**  $N > N_C \equiv G(1), \quad \xi = 1$

$\Rightarrow N_C$  Teilchen sind angeregt, alle zusätzlichen  $N - N_C$  Teilchen bevölkern den Grundzustand

# Bose-Einstein-Kondensation: physikalische Interpretation



$$\pi k_B T \approx \frac{1}{2} m \bar{V}^2 \Rightarrow$$

Thermische de Broglie Wellenlänge:

$$\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{m\bar{V}} = \left( \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T} \right)^{1/2}$$

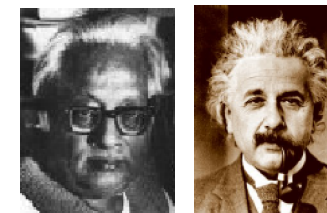
Kritische Temperatur:

de Broglie Wellenlänge  $\Lambda \approx$  mittlerer Teilchenabstand  $d \approx 1/\rho^{1/3}$

$$\Rightarrow T = \frac{2\pi^2\hbar^2\rho^{2/3}}{m k_B} \quad \text{vergl. (15.5)}$$



Luis Victor de Broglie 1923



Satyendra Nath Bose, Albert Einstein  
S. N. Bose, Z. Phys. 26, 178 (1924)  
A. Einstein, Sitzber. Kgl. Akad. Wiss. 3 (1924/25)



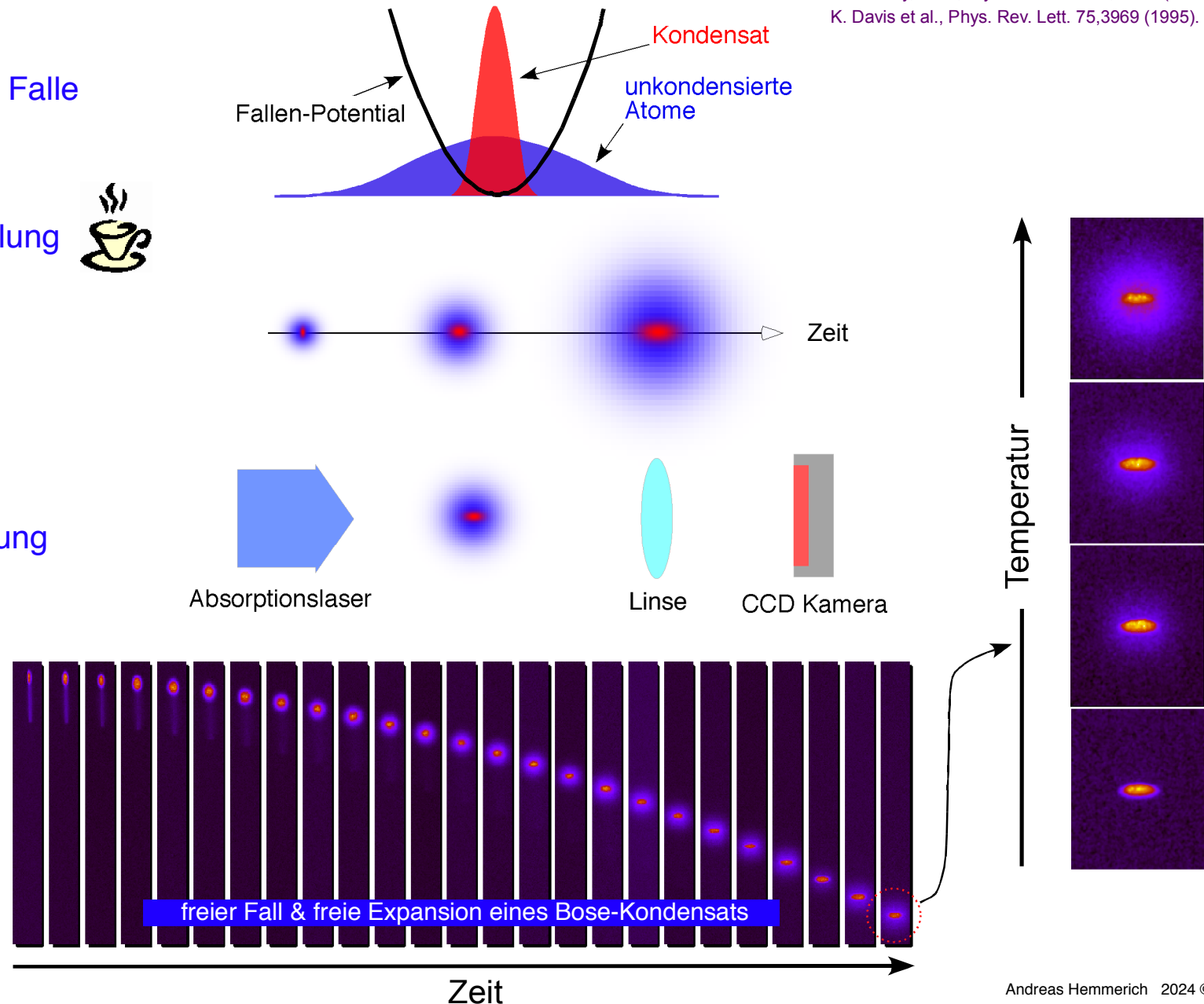
# Herstellung und Beobachtung eines Bose-Einstein-Kondensats



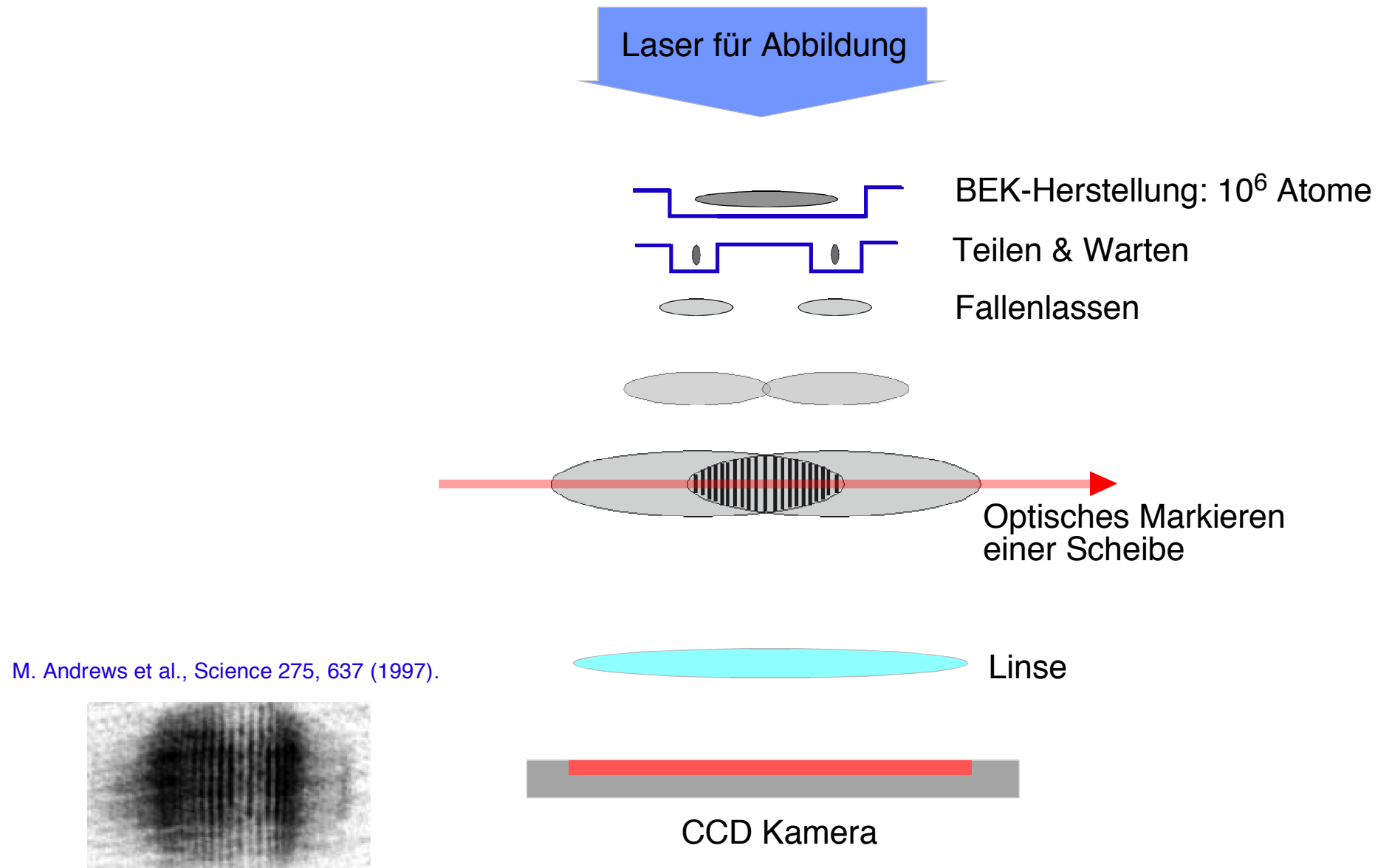
Nobelpreis 2001 E. Cornell, C. Wieman, W. Ketterle

M. Anderson et al., Science 269,198 (1995)  
C. Bradley, et al., Phys. Rev. Lett. 75, 1687 (1995)  
K. Davis et al., Phys. Rev. Lett. 75,3969 (1995).

- Laserkühlung
- Magneto-Optische Falle
- Magnetische Falle
- Verdampfungskühlung 
- Freie Expansion
- Absorptionsabbildung



# Bose-Einstein-Kondensate interferieren

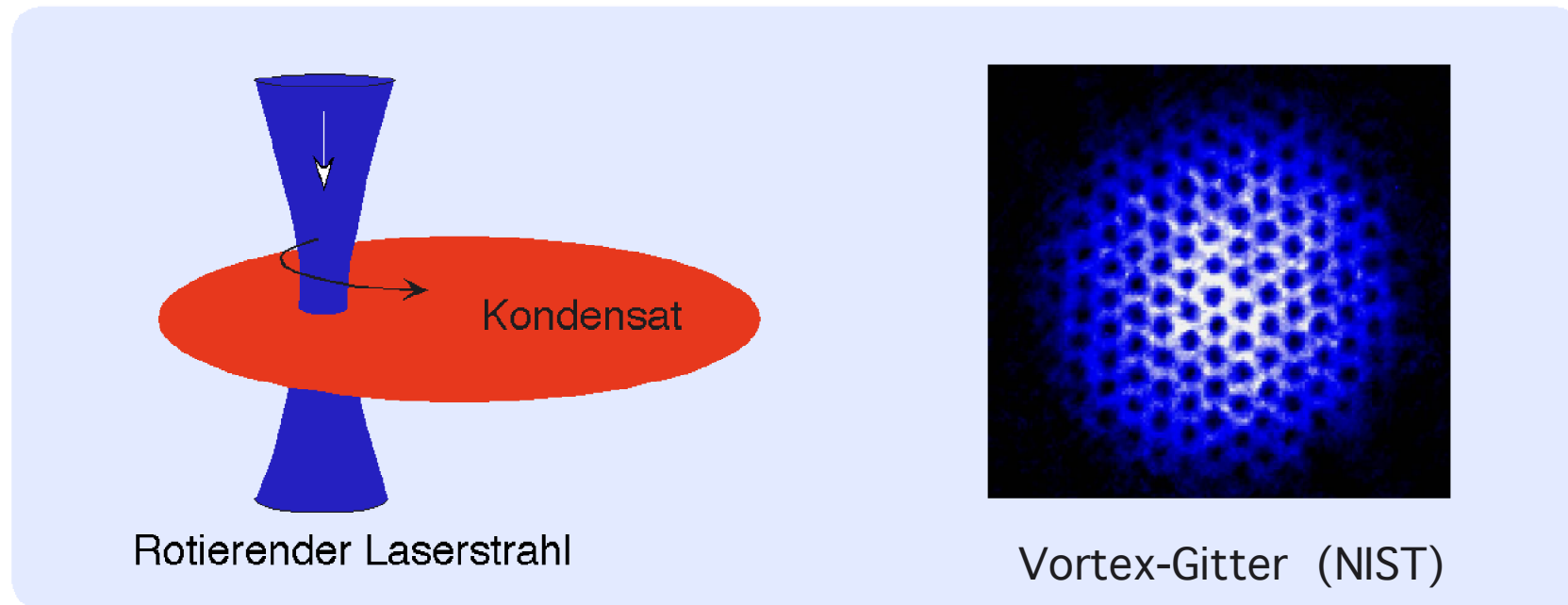


# Bose-Einstein-Kondensate sind superfluid

Anregungen bei kleinen Energien haben lineare Dispersionsrelation wie Phononen

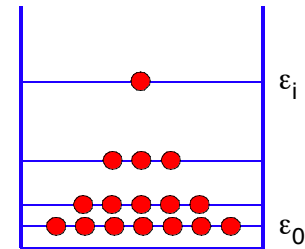
Klassische Teilchen bewegen sich unterhalb der Schallgeschwindigkeit reibungsfrei

Einbringung von Rotationsenergie führt zu reibungsfreien Wirbeln mit quantisiertem Drehimpuls



## BSP1: N Bosonen in einem (großen) Kasten mit Volumen V

$$(15.2) \quad G(\xi) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{g_i}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon_i/k_B T) - 1} \approx \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{g(\varepsilon)}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) - 1}$$



Zustandsdichte:  $g(\varepsilon) = \frac{(2m)^{3/2} \varepsilon^{1/2} V}{4\hbar^3 \pi^2}$

$$= \frac{V}{\Lambda^3} \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{1/2}}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = \frac{V}{\Lambda^3} g_{3/2}(\xi)$$

$x = \varepsilon/k_B T$

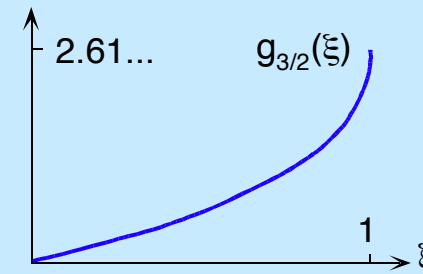
Thermische deBroglie Wellenlänge:  $\Lambda \equiv \left( \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T} \right)^{1/2}$ ,  $k \equiv 2\pi/\Lambda \Rightarrow \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \pi k_B T$



Die Funktion  $g_{3/2}(\xi)$ :

$$(15.3) \quad g_{3/2}(\xi) \equiv \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{1/2}}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^{3/2}}$$

$g_{3/2}(\xi)$  ist monoton auf  $[0,1]$ ,  $g_{3/2}(1) \approx 2.61$



## Bose-Einstein-Kondensation in einem Kasten mit Volumen $V$ :

Anzahl angeregter Teilchen:  $G(\xi) = g_{3/2}(\xi) \frac{V}{\Lambda^3}$

Normalisierung für  $N$  Teilchen:  $N = \bar{n}_0 + g_{3/2}(\xi) \frac{V}{\Lambda^3}, \quad \bar{n}_0 = \frac{1}{\xi^{-1}-1} = \frac{\xi}{1-\xi} \quad (15.4)$   
(15.1, 15.2)

Kritische Teilchenzahl  $N_c$ :  $N_c \equiv g_{3/2}(1) \frac{V}{\Lambda_c^3}, \quad \Lambda_c \equiv \left( \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T_c} \right)^{1/2} \Leftrightarrow \rho_c \Lambda_c^3 = g_{3/2}(1) \approx 2.61$   
 $\rho \equiv N/V$  Dichte,  $\rho \Lambda^3$  Phasenraum-Dichte

Kritische Temperatur  $T_c$  bzw.  $\Lambda_c$ :  $k_B T_c \equiv \frac{2\pi\hbar^2}{m} \left( \frac{\rho_c}{g_{3/2}(1)} \right)^{2/3} \quad (15.5)$

( BSP:  $\Lambda$ -Punkt  $^4\text{He}$ :  $T_c = 2.177 \text{ K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  bei  $\rho_c = 10^{14} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow T_c = 400 \text{ nK}$  )

## Berechnung des chemisches Potentials $\mu(T,V,N)$ :

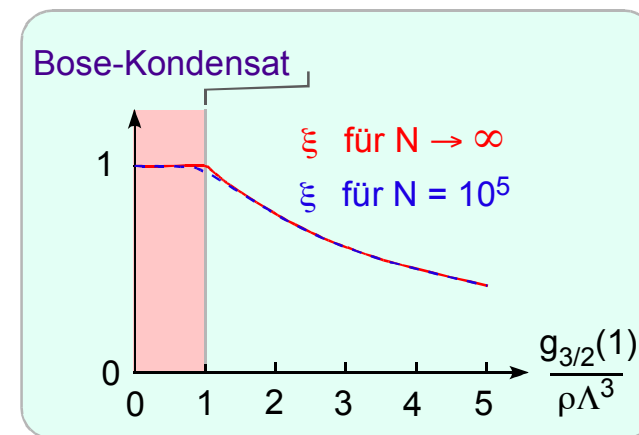
Aus (15.4)  $N = \bar{n}_0 + g_{3/2}(\xi) \frac{V}{\Lambda^3}$ ,  $\bar{n}_0 = \frac{1}{\xi^{-1}-1} = \frac{\xi}{1-\xi}$ ,  $\xi = \exp(\mu/k_B T)$

folgt  $1 = \frac{1}{N} \frac{\xi}{1-\xi} + \frac{1}{\rho \Lambda^3} g_{3/2}(\xi) \Rightarrow \xi = \xi(T,V,N)$

Thermodynamischer Limes:  $V, N \rightarrow \infty$  so, dass  $\rho \Lambda^3$  konstant:

$$\Rightarrow \xi(T,V,N) = \begin{cases} g_{3/2}^{-1}(\rho \Lambda^3) & \text{falls } \xi < 1 \text{ bzw. } \rho \Lambda^3 < g_{3/2}(1) \\ 1 & \text{falls } \rho \Lambda^3 > g_{3/2}(1) \text{ i.e. für Bose-Kondensat} \end{cases} \quad (15.6)$$

$$\mu(T,V,N) = k_B T \ln(\xi(T,V,N))$$



## Besetzung des Grundzustands:

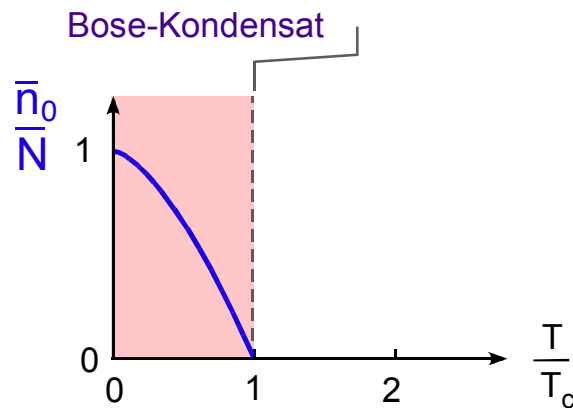
Mit (15.4) folgt  $\frac{\bar{n}_0}{N} = 1 - \frac{1}{\rho\Lambda^3} g_{3/2}(\xi)$

Einsetzen von (15.6)  $\xi(T,V,N) = \begin{cases} g_{3/2}^{-1}(\rho\Lambda^3) & \text{falls } \rho\Lambda^3 < g_{3/2}(1) \\ 1 & \text{falls } \rho\Lambda^3 > g_{3/2}(1) \end{cases}$

führt zu  $\frac{\bar{n}_0}{N} = \begin{cases} 0 & \text{falls } \rho\Lambda^3 < g_{3/2}(1) \\ 1 - \frac{g_{3/2}(1)}{\rho\Lambda^3} & \text{falls } \rho\Lambda^3 > g_{3/2}(1) \end{cases} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{3/2} \quad (15.7)$

für festgehaltene Dichte  $\rho$

$$g_{3/2}(1) = \rho\Lambda_c^3$$



## Innere Energie, Zustandsgleichung:

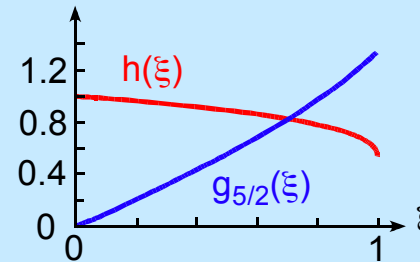
$$U = \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \varepsilon_i \approx \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{g(\varepsilon) \varepsilon}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) - 1} \stackrel{g(\varepsilon)}{=} \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{\varepsilon^{3/2}}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) - 1}$$

$$\stackrel{\substack{\varepsilon = k_B T x \\ \varepsilon^{3/2} d\varepsilon = (k_B T)^{5/2} dx}}{=} \frac{V}{\Lambda^3} k_B T \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{3/2}}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = \frac{3}{2} k_B T \frac{V}{\Lambda^3} g_{5/2}(\xi) \quad (15.8)$$

$$g_{5/2}(\xi) = \frac{4}{3\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{3/2}}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^{5/2}} \quad \text{monoton auf } [0,1], g_{5/2}(1) \approx 1.34$$

$$h(\xi) = \frac{g_{5/2}(\xi)}{g_{3/2}(\xi)} \quad h(\xi) = 1 - \frac{\xi}{2^{5/2}} + \dots$$

$$0.513 \leq h(\xi) \leq 1$$



Für kleine Werte von  $\xi$  erhält man die Relationen für ein Boltzmann-Gas:

$$\frac{V}{\Lambda^3} \stackrel{(15.4)}{=} \frac{N - \bar{n}_0}{g_{3/2}(\xi)} \stackrel{(15.8)}{\Rightarrow} U = \frac{3}{2} k_B T (N - \bar{n}_0) h(\xi) = \frac{3}{2} k_B T (N - \bar{n}_0) \left( 1 - \frac{\xi}{2^{5/2}} + \dots \right) \quad (15.9)$$

$$pV \stackrel{(13.14b)}{=} \frac{2}{3} U \stackrel{(15.8)}{=} k_B T \frac{V}{\Lambda^3} g_{5/2}(\xi) \stackrel{(15.4)}{=} k_B T (N - \bar{n}_0) h(\xi) = k_B T (N - \bar{n}_0) \left( 1 - \frac{\xi}{2^{5/2}} + \dots \right) \quad (15.10)$$



# Spezifische Wärme:

(Herleitung )

$$\begin{aligned}
 \frac{C_V}{N} &= \frac{1}{N} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V,N} \stackrel{(15.8)}{=} \frac{d}{dT} \left( \frac{3}{2} k_B T \frac{1}{\rho \Lambda^3} g_{5/2}(\xi(T,V,N)) \right) \\
 &= \frac{3}{2} k_B \frac{d}{dT} \left( \frac{T}{\rho \Lambda^3} \right) g_{5/2}(\xi(T,V,N)) + \frac{3}{2} \frac{k_B T}{\rho \Lambda^3} \frac{d}{dT} g_{5/2}(\xi(T,V,N)) \\
 &= \frac{15}{4} k_B \frac{1}{\rho \Lambda^3} g_{5/2}(\xi(T,V,N)) + \frac{3}{2} \frac{k_B T}{\rho \Lambda^3} \frac{d}{d\xi} g_{5/2}(\xi(T,V,N)) \left( \frac{\partial \xi}{\partial T} \right)_{V,N} \quad (15.11)
 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{d\xi} g_{3/2}(\xi(T,V,N)) = \frac{d}{d\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^{3/2}} = \xi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^{1/2}} = \xi^{-1} g_{1/2}(\xi(T,V,N))$$

$$\frac{d}{d\xi} g_{5/2}(\xi(T,V,N)) = \frac{d}{d\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^{5/2}} = \xi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^{3/2}} = \xi^{-1} g_{3/2}(\xi(T,V,N)) \quad (15.12)$$

$$\left( \frac{\partial \xi}{\partial T} \right)_{V,N} \stackrel{\xi < 1}{=} \frac{d}{dy} g_{3/2}^{-1}(\rho \Lambda^3) \frac{d}{dT} (\rho \Lambda^3) = \frac{\frac{d}{dT} (\rho \Lambda^3)}{\frac{d}{d\xi} g_{3/2}(\xi)} = - \frac{3}{2} \frac{\rho \Lambda^3}{T} \frac{\xi}{g_{1/2}(\xi)}$$

gilt auch für  $\xi=1$  wegen  $g_{1/2}(1) = \infty$

$$\Rightarrow \quad \frac{C_v}{N} = \frac{15}{4} k_B \frac{1}{\rho \Lambda^3} g_{5/2}(\xi) - \frac{9}{4} k_B \frac{g_{3/2}(\xi)}{g_{1/2}(\xi)} \quad (15.13)$$

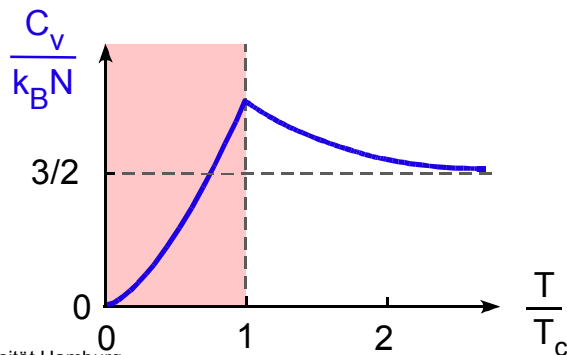
$$\xi(T, V, N) = \begin{cases} g_{3/2}^{-1}(\rho \Lambda^3) & \text{falls } T > T_c \\ 1 & \text{falls } T < T_c \end{cases} \quad \rho \Lambda^3 = \frac{N}{V} \left( \frac{2\pi \hbar^2}{m k_B T} \right)^{3/2} \quad (15.6)$$

Grenzfälle:

$$T > T_c \Rightarrow \rho \Lambda^3 = g_{3/2}(\xi) \Rightarrow \frac{C_v}{k_B N} \stackrel{(15.13)}{=} \frac{15}{4} \frac{g_{5/2}(\xi)}{g_{3/2}(\xi)} - \frac{9}{4} \frac{g_{3/2}(\xi)}{g_{1/2}(\xi)}$$

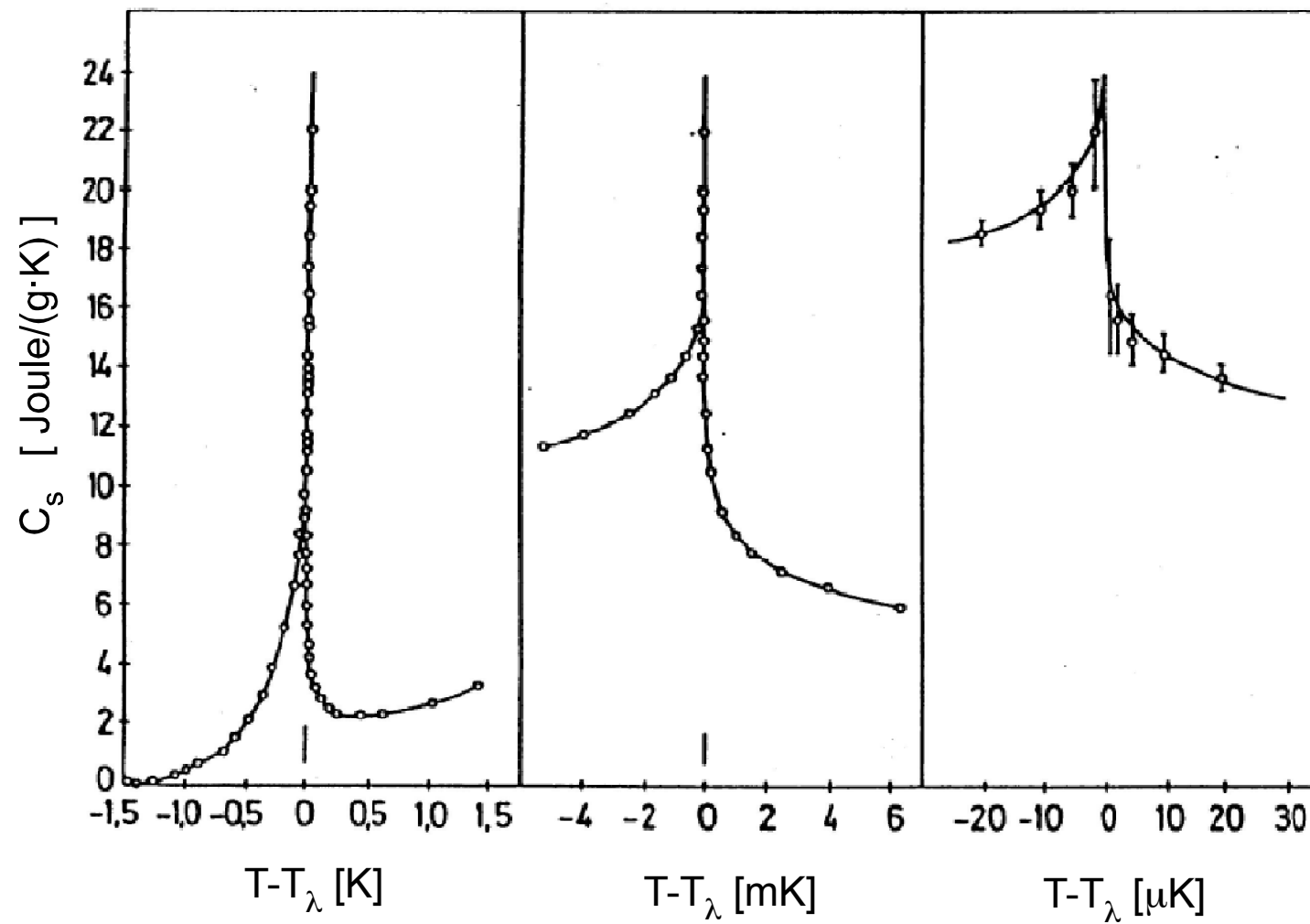
$$T < T_c \Rightarrow 1 = \xi, \quad g_{1/2}(1) = \infty \Rightarrow \frac{C_v}{k_B N} \stackrel{(15.13)}{=} \frac{15}{4} \frac{g_{5/2}(1)}{\rho \Lambda^3} \stackrel{(15.5)}{=} \frac{15}{4} \frac{g_{5/2}(1)}{g_{3/2}(1)} \left( \frac{T}{T_c} \right)^{3/2}$$

$$T \rightarrow \infty \Rightarrow \rho \Lambda^3 \rightarrow 0 \Rightarrow \xi = g_{3/2}^{-1}(\rho \Lambda^3) \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{C_v}{k_B N} = \frac{15}{4} - \frac{9}{4} = \frac{3}{2}$$



vergl. klassisches ideales Gas

$$\frac{C_v}{k_B N} = \frac{3}{2}$$



$\Lambda$ -Punkt von  $^4\text{He}$

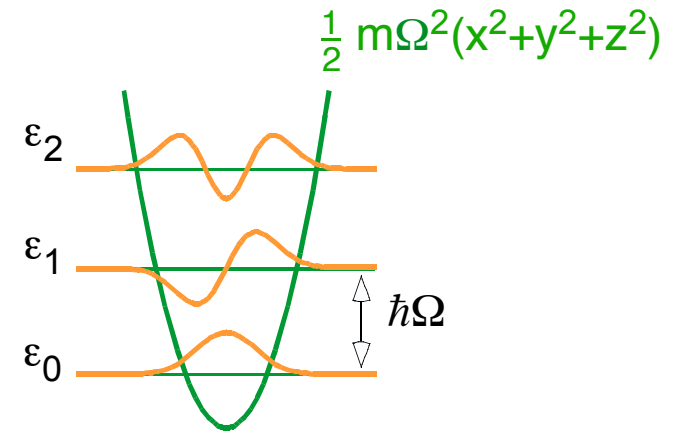
## BSP2: N Bosonen in einem 3D harmonischen Potential

Zustände:  $|i_x, i_y, i_z\rangle$ ,  $i_x, i_y, i_z = 0, 1, 2, \dots$

Energiewerte:  $\varepsilon_i = i \hbar \Omega$ ,  $i = (i_x + i_y + i_z) = 0, 1, \dots$

Entartungsgrade:  $g_i = \frac{1}{2}(i+1)(i+2) \approx \frac{1}{2}i^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_i}{\hbar\Omega}\right)^2$

Zustandsdichte:  $g(\varepsilon) = \frac{g_i}{\hbar\Omega} = \frac{\varepsilon^2}{2(\hbar\Omega)^3} \quad (15.14)$



$$G(\xi) = \int_0^\infty d\varepsilon \frac{g(\varepsilon)}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) - 1} \stackrel{x = \varepsilon/k_B T}{=} \left(\frac{k_B T}{\hbar\Omega}\right)^3 \frac{1}{2} \int_0^\infty dx \frac{x^2}{\xi^{-1} \exp(x) - 1}$$



$$g_3(\xi) \equiv \frac{1}{2} \int_0^\infty dx \frac{x^2}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = \sum_{n=1}^\infty \frac{\xi^n}{n^3} \quad \text{monoton auf } [0,1] \text{ mit } g_3(1) \approx 1.202$$

Normalisierung auf N Teilchen:  $N = \bar{n}_0 + \left(\frac{k_B T}{\hbar\Omega}\right)^3 g_3(\xi) \Rightarrow \quad (15.15)$

Bose-Einstein-Kondensation:  $N_c \equiv \left(\frac{k_B T_c}{\hbar\Omega}\right)^3 g_3(1)$  bzw.  $\Theta_c = g_3(1)$ ,  $\Theta_c \equiv N_c \left(\frac{\hbar\Omega}{k_B T_c}\right)^3$

Kritische Temperatur  $T_c$ :  $k_B T_c \equiv (N_c / g_3(1))^{1/3} \hbar\Omega$   $\Theta$  Phasenraum-Dichte

(vergl. Boltzmann:  $k_B T_c = \hbar\Omega$ )

Chemisches Potential  $\mu(T, \Omega, N)$ :

Mit (15.15) folgt 
$$1 = \frac{1}{N} \frac{\xi}{1 - \xi} + \frac{1}{\Theta} g_3(\xi) \Rightarrow \xi = \xi(T, \Omega, N) \quad (15.16)$$

Thermodynamischer Limes:  $N \rightarrow \infty$  so, dass  $\Theta$  konstant:

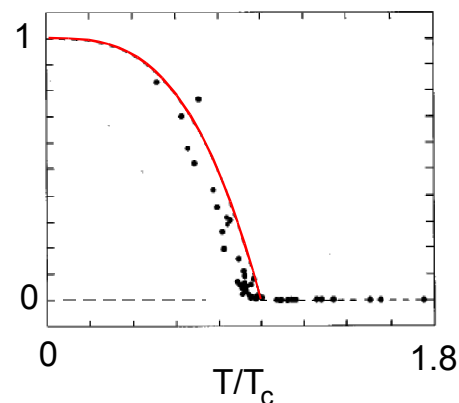
$$\Rightarrow \xi(T, \Omega, N) = \begin{cases} g_3^{-1}(\Theta) & \text{falls } \Theta < g_3(1) \\ 1 & \text{falls } \Theta > g_3(1) \end{cases} \quad (15.17)$$

$$\mu(T, \Omega, N) = k_B T \ln(\xi(T, \Omega, N))$$

$$\frac{\bar{n}_0}{N} = \begin{cases} 0 & \text{falls } \Theta < g_3(1) \\ 1 - \frac{g_3(1)}{\Theta} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^3 & \text{falls } \Theta > g_3(1) \end{cases} \quad (15.18)$$

Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidiumatomen

J. Ensher et al. Phys. Rev. Lett. 77, 4984 (1996)



# Innere Energie, Zustandsgleichung:

(Herleitung )

$$U = \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \varepsilon_i \approx \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{g(\varepsilon) \varepsilon}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) - 1} \stackrel{(15.14)}{=} \frac{1}{2(\hbar\Omega)^3} \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{\varepsilon^3}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) - 1}$$

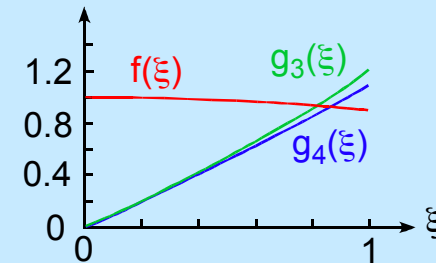
$$\stackrel{x = \varepsilon/k_B T}{=} \frac{N}{\Theta} k_B T \frac{1}{2} \int_0^{\infty} dx \frac{x^3}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = 3 k_B T \frac{N}{\Theta} g_4(\xi) \quad (15.19)$$

$$g_4(\xi) = \frac{1}{6} \int_0^{\infty} dx \frac{x^3}{\xi^{-1} \exp(x) - 1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^4} \quad \text{monoton auf } [0,1] \text{ mit } g_4(1) \approx 1.082$$

$$f(\xi) \equiv \frac{g_4(\xi)}{g_3(\xi)}$$

$$f(\xi) = 1 - \frac{\xi}{16} + \dots$$

$$0.9004 \leq f(\xi) \leq 1$$



Für kleine Werte von  $\xi$  erhält man den Ausdruck für ein klassisches Boltzmann-Gas:

$$\frac{N}{\Theta} \stackrel{(15.16)}{=} \frac{N - \bar{n}_0}{g_3(\xi)} \Rightarrow U \stackrel{(15.19)}{=} 3 k_B T (N - \bar{n}_0) f(\xi) = 3 k_B T (N - \bar{n}_0) \left( 1 - \frac{\xi}{16} + \dots \right) \quad (15.20)$$

# Spezifische Wärme:

(Herleitung )

$$\begin{aligned}
 \frac{C_{\Omega}}{N} &\equiv \frac{1}{N} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{\Omega, N} \stackrel{(15.8)}{=} \frac{d}{dT} \left( 3 k_B T \frac{1}{\Theta} g_4(\xi(T, \Omega, N)) \right) \\
 &= 3k_B \frac{d}{dT} \left( \frac{T}{\Theta} \right) g_4(\xi(T, \Omega, N)) + 3k_B \frac{T}{\Theta} \frac{d}{d\xi} g_4(\xi(T, \Omega, N)) \left( \frac{\partial \xi}{\partial T} \right)_{V, N} \\
 &= 12k_B \frac{1}{\Theta} g_4(\xi(T, \Omega, N)) - 9k_B \frac{g_3(\xi(T, \Omega, N))}{g_2(\xi(T, \Omega, N))}
 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{d\xi} g_4(\xi(T, \Omega, N)) = \frac{d}{d\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^4} = \xi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^3} = \xi^{-1} g_3(\xi(T, \Omega, N))$$

$$\frac{d}{d\xi} g_3(\xi(T, \Omega, N)) = \frac{d}{d\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^3} = \xi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n^2} = \xi^{-1} g_2(\xi(T, \Omega, N))$$

$$\left( \frac{\partial \xi}{\partial T} \right)_{\Omega, N} \stackrel{(15.17)}{=} \frac{d}{d\Theta} g_3^{-1}(\Theta) \frac{d\Theta}{dT} = \frac{\frac{d\Theta}{dT}}{\frac{d}{d\xi} g_3(\xi)} = -3 \frac{\xi \Theta}{T g_2(\xi)}$$

gilt auch für  $\xi=1$  wegen  $g_2(1) = \infty$

$$\Rightarrow \quad \frac{C_\Omega}{N} = 12k_B \frac{g_4(\xi)}{\Theta} - 9k_B \frac{g_3(\xi)}{g_2(\xi)} \quad (15.21)$$

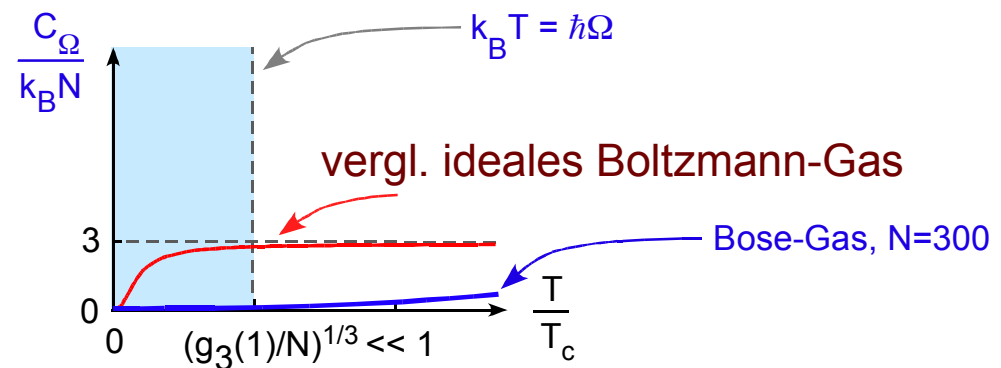
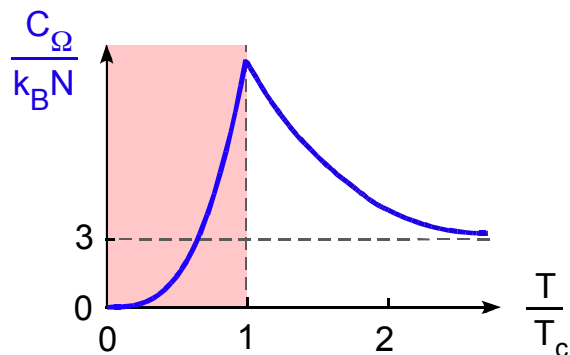
$$\xi(T, \Omega, N) = \begin{cases} g_3^{-1}(\Theta) & \text{falls } \Theta < g_3(1) \\ 1 & \text{falls } \Theta > g_3(1) \end{cases} \quad (15.17)$$

Grenzfälle:

$$T > T_c \Rightarrow \Theta = g_3(\xi) \Rightarrow \frac{C_\Omega}{k_B N} = 12 \frac{g_4(\xi)}{g_3(\xi)} - 9 \frac{g_3(\xi)}{g_2(\xi)} \quad (15.22)$$

$$T < T_c \Rightarrow 1 = \xi, \quad g_2(1) = \infty \Rightarrow \frac{C_\Omega}{k_B N} = 12 \frac{g_4(1)}{\Theta} = 12 \frac{g_4(1)}{g_3(1)} \left( \frac{T}{T_c} \right)^3$$

$$T \rightarrow \infty \Rightarrow \Theta \rightarrow 0 \Rightarrow \xi = g_3^{-1}(\Theta) \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{C_\Omega}{k_B N} = 12 - 9 = 3$$





# Nützliche Darstellung von $g_{n+1/2}^{\pm}(\xi)$ , $n=0,1,\dots$ ; $\pm$ = Fermionen/Bosonen

für  $n \in \{1,2,\dots\}$  sei  $(n-1/2)! \equiv (n-1/2)(n-3/2)\cdots 1/2$ ,  $(-1/2)! \equiv 1$



für  $n \in \{0,1,\dots\}$ :

$$g_{n+1/2}^{\pm}(\xi) \equiv \frac{1}{(n-1/2)!} \frac{1}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{(n-1/2)}}{\xi^{-1} \exp(x) \pm 1} \quad \xi \equiv e^{-\alpha} = \frac{1}{(n-1/2)!} \frac{1}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{(n-1/2)} e^{-(x+\alpha)}}{1 \pm e^{-(x+\alpha)}}$$

geometrische Reihe  $\sum_{v=0}^{\infty} (\mp q)^v = \frac{1}{1 \pm q}$  mit  $q = e^{-(x+\alpha)}$

$$= \frac{1}{(n-1/2)!} \frac{1}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx x^{(n-1/2)} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} e^{-v(x+\alpha)} = \frac{1}{(n-1/2)!} \frac{1}{\pi^{1/2}} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \xi^v \int_0^{\infty} dx x^{(n-1/2)} e^{-vx}$$

n-fache partielle Integration

$$= \frac{1}{(n-1/2)!} \frac{1}{\pi^{1/2}} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \xi^v \int_0^{\infty} dx (n-1/2)! x^{-1/2} \frac{e^{-vx}}{v^n} = \frac{1}{\pi^{1/2}} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \xi^v \int_0^{\infty} dx x^{-1/2} \frac{e^{-vx}}{v^n}$$

Variablentransformation  $z = vx$

Variablentransformation  $y^2 = z$

$$= \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(\mp 1)^{(v-1)} \xi^v}{v^{(n+1/2)}} \frac{1}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dz z^{-1/2} e^{-z} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(\mp 1)^{(v-1)} \xi^v}{v^{(n+1/2)}} \underbrace{\frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dy e^{-y^2}}_{=1} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(\mp 1)^{(v-1)} \xi^v}{v^{(n+1/2)}}$$

# Nützliche Darstellung von $g_n^\pm(\xi)$ , $n = 1, 2, \dots$ ; $\pm = \text{Fermionen/Bosonen}$



$$g_n^\pm(\xi) \equiv \frac{1}{(n-1)!} \int_0^\infty dx \frac{x^{(n-1)}}{\xi^{-1} \exp(x) \pm 1} \quad \xi \equiv e^{-\alpha} = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^\infty dx \frac{x^{(n-1)} e^{-(x+\alpha)}}{1 \pm e^{-(x+\alpha)}}$$

geometrische Reihe

$$= \frac{1}{(n-1)!} \int_0^\infty dx x^{(n-1)} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} e^{-v(x+\alpha)} = \frac{1}{(n-1)!} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \xi^v \int_0^\infty dx x^{(n-1)} e^{-vx}$$

(n-1)-fache partielle Integration

Variablentransformation  $z = vx$

$$= \frac{1}{(n-1)!} \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \xi^v \int_0^\infty dx (n-1)! \frac{e^{-vx}}{v^{(n-1)}} = \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \xi^v \int_0^\infty dx \frac{e^{-vx}}{v^{(n-1)}}$$

$$= \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \frac{\xi^v}{v^n} \underbrace{\int_0^\infty dz e^{-z}}_{=1} = \sum_{v=1}^{\infty} (\mp 1)^{(v-1)} \frac{\xi^v}{v^n}$$

# Kanonisches Ensemble:

Mittlere Teilchenzahl nicht erhalten  $\Rightarrow$  Nebenbedingung (G3) entfällt, i.e.  $\mu = 0$  in Gleichung (14.1)

$$\Rightarrow P_{\vec{n}} = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \quad \text{mit} \quad Z = \sum_{\vec{n}} \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right) \quad (15.23)$$

Mittlere Besetzung des Einteilchenzustands mit Energie  $\varepsilon_i$ :

(Herleitung )

$$\bar{n}_i \equiv \sum_{n_0, n_1, \dots} n_i P[n_0, n_1, \dots] = \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right)}{\sum_{n_0, n_1, \dots} \exp\left(-\frac{E_{\vec{n}}}{k_B T}\right)}$$

$E_{\vec{n}} = \sum_{i=0}^{\infty} n_i \varepsilon_i \quad \& \quad e^{a+b+c+\dots} = e^a e^b e^c \dots$

$A_i \equiv \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{k_B T}\right)$

$$= \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i \exp\left(-\frac{n_0 \varepsilon_0}{k_B T}\right) \dots \exp\left(-\frac{n_i \varepsilon_i}{k_B T}\right) \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} \exp\left(-\frac{n_0 \varepsilon_0}{k_B T}\right) \dots \exp\left(-\frac{n_i \varepsilon_i}{k_B T}\right) \dots} = \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\sum_{n_0, n_1, \dots} n_i A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots}{\sum_{n_0, n_1, \dots} A_0^{n_0} \dots A_i^{n_i} \dots} = \frac{\left( \sum_{n_0} A_0^{n_0} \right) \dots \left( \sum_{n_i} n_i A_i^{n_i} \right) \dots}{\left( \sum_{n_0} A_0^{n_0} \right) \dots \left( \sum_{n_i} A_i^{n_i} \right) \dots} = \frac{\sum_{n_i} n_i A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} \\
&= \frac{A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \sum_{n_i} A_i^{n_i}}{\sum_{n_i} A_i^{n_i}} = \frac{A_i \frac{\partial}{\partial A_i} \frac{1}{1 - A_i}}{\frac{1}{1 - A_i}} = \frac{1}{A_i^{-1} - 1} = \frac{1}{e^{\varepsilon_i/k_B T} - 1} \quad (15.24)
\end{aligned}$$

## BSP: Photonengas (thermische Photonen)

Mittlere Photonenzahl bei der Frequenz  $\omega \equiv \varepsilon / \hbar$  :  $\bar{n}(\omega) = \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$

Spektrale Energiedichte (Plancks Strahlungsformel):

$$\frac{1}{V} \frac{dE}{d\omega} = \frac{1}{V} \frac{d\rho}{d\omega} \bar{n}(\omega) \hbar\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{1}{(e^{\hbar\omega/k_B T} - 1)} \hbar\omega \quad (15.25)$$

spektrale Modendichte
mittlere Anzahl von Photonen pro Mode
Energie pro Photon

# Debye-Modell der spezifischen Wärme eines Festkörpers:

Die Atome eines Festkörpers sind durch starke elektrische Kräfte verbunden. Deshalb muss die Wärmebewegung eines Festkörpers durch kollektive Schwingungen des ganzen Gitters beschrieben werden (Schallwellen). Die Quantisierung dieser Schallwellen führt (analog zu den Photonen) zum Begriff der Phononen.



Peter Debye  
(1884 - 1966)

Nobelpreis 1936

## Modendichte der Phononen in einem Kasten mit Volumen $V$ :

Wie viele Phononen gibt es pro Frequenzintervall? Analoge Überlegung wie für thermische Photonen (Skript Teil1) führt zu

$$\frac{1}{V} \frac{dg}{d\omega} = \frac{\omega^2}{2\pi^2 c^3} \quad \text{spektrale Modendichte, } c = \text{Schallgeschwindigkeit}$$

transversale und longitudinale Moden:

Es gibt zwei verschiedene Klassen transversaler Phononen (2 Polarisationen) und eine Klasse longitudinaler Phononen jeweils mit verschiedener Schallgeschwindigkeit  $c_l$  bzw.  $c_t$

$$\frac{1}{V} \frac{dg}{d\omega} = 2 \frac{1}{V} \frac{dg_t}{d\omega} + \frac{1}{V} \frac{dg_l}{d\omega} = \frac{\omega^2}{2\pi^2} \left( \frac{2}{c_t^3} + \frac{1}{c_l^3} \right)$$

Schallgeschwindigkeiten  
 $c_l$  bzw.  $c_t$  für longitudinale  
bzw. transversale Wellen

Die maximale Anzahl kollektiver Schwingungen von N Teilchen mit je 3 Freiheitsgraden ist 3N:

Es gibt eine maximale Frequenz  $\omega_D$ , sodass

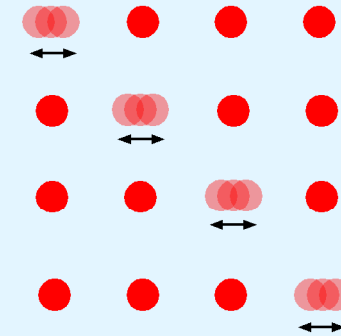
$$\Rightarrow \frac{3N}{V} = \int_0^{\omega_D} d\omega \frac{1}{V} \frac{dg}{d\omega} = \frac{\omega_D^3}{6\pi^2} \left( \frac{2}{c_t^3} + \frac{1}{c_l^3} \right)$$

$$\Rightarrow \omega_D^3 = 18\pi^2 \rho \left( \frac{2}{c_t^3} + \frac{1}{c_l^3} \right)^{-1} \Rightarrow \frac{dg}{d\omega} = \frac{9N \omega^2}{\omega_D^3}$$

Debye-Grenzfrequenz,  $\rho = N/V$  = Teilchendichte

$$\Rightarrow \frac{dg}{d\omega} = \frac{\omega^2}{2\pi^2} \left( \frac{2}{c_t^3} + \frac{1}{c_l^3} \right) V = \frac{9N \omega^2}{\omega_D^3}$$

4 Teilchen, 1 Freiheitsgrad:



Phononen gehorchen Bose-Statistik analog zu Photonen:

Innere Energie: 
$$U = \int_0^{\omega_D} d\omega \frac{9N \omega^2}{\omega_D^3} \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$$

spez. Wärme/Teilchen:

$$\frac{C_V}{N} = \frac{1}{N} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V,N} = \int_0^{\omega_D} d\omega \frac{9\omega^2}{\omega_D^3} \frac{\frac{(\hbar\omega)^2}{k_B T^2} e^{\hbar\omega/k_B T}}{(e^{\hbar\omega/k_B T} - 1)^2}$$

$$= \int_0^{\omega_D} d\omega \frac{9\hbar^2 \omega^4}{\omega_D^3 k_B T^2} \frac{e^{\hbar\omega/k_B T}}{(e^{\hbar\omega/k_B T} - 1)^2} = 9k_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} dx \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \quad (15.26)$$

$\theta_D \equiv \hbar\omega_D/k_B$  = Debye-Temperatur  
Integrationsgrenze  $\hbar\omega_D/k_B T = \theta_D/T$

$$= \hbar/k_B \frac{(18\pi^2 \rho)^{1/3}}{\left(\frac{1}{c_l^3} + \frac{2}{c_t^3}\right)^{1/3}} \quad (\text{Herleitung } \textcircled{P})$$

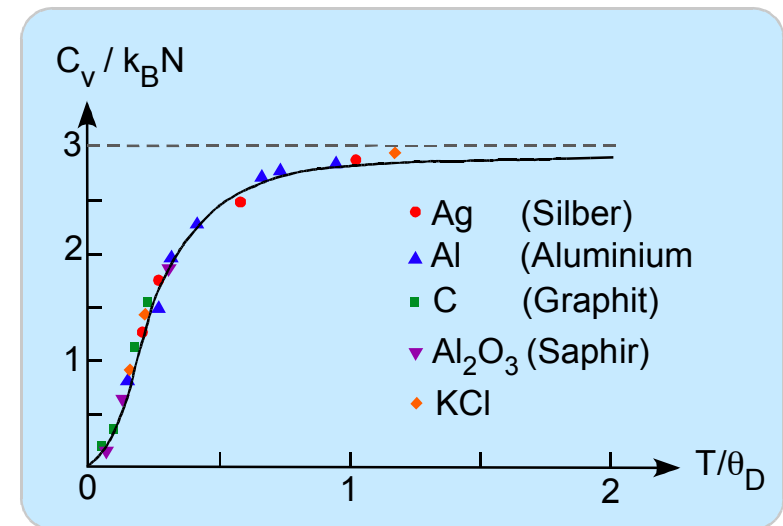
|                | Cs | Pb | Cd  | Ag  | Cu  | Al  | Fe  | Be   | C*   |
|----------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $\theta_D$ [K] | 38 | 88 | 168 | 215 | 315 | 398 | 453 | 1440 | 2230 |

Gesetz von Dulong/Petit:  $\theta_D \ll T$

$$\frac{C_V}{N} \approx 9k_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} dx x^2 = 3k_B$$

Verhalten bei niedrigen Temperaturen:  $T \ll \theta_D$

$$\frac{C_V}{N} \approx 9k_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\infty} dx \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} = 9k_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \frac{\pi^4}{15}$$



# 16. Fermi-Systeme



# Fermi-Systeme

Fermi-Dirac-Verteilung:  $\bar{n}_i = \frac{g_i}{\exp(\frac{\varepsilon_i - \mu}{k_B T}) + 1}$

Fluktuationen:  $\Delta n_i^2 = \langle n_i \rangle (1 - g_i^{-1} \langle n_i \rangle)$   
(14.19)

Für die Zustände mit  $\varepsilon_i \ll \mu$  folgt  $\langle n_i \rangle \rightarrow g_i$ ,  $\Delta n_i \rightarrow 0$

Normierung für N Teilchen:

$$N = \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \Rightarrow \mu(N, T)$$

Notationen:

$F(\varepsilon, \mu, T) = \frac{1}{\exp(\frac{\varepsilon - \mu}{k_B T}) + 1}$  Fermi-Funktion

$\varepsilon_F(N) \equiv \mu(T=0, N)$  Fermi-Energie

$\{Z_i: E(Z_i) \leq \varepsilon_F\}$  Fermi-Kugel

$\{Z_i: E(Z_i) = \varepsilon_F\}$  Fermi-Fläche

$\varepsilon_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  Einteilchen-Energien

$g_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  Entartungsgrade

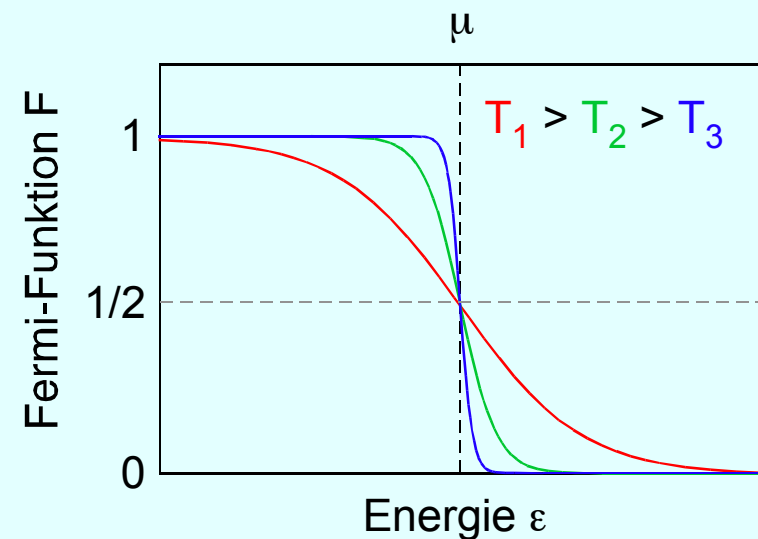
$\mu \in ]-\infty, \infty[$  chemisches Potential

$\xi = \exp(\mu/k_B T) \in [0, \infty[$  Fugazität

$T$  = Temperatur

(16.1)

für konstantes chemisches Potential  $\mu$



## Fermi-Gas in einem Kasten mit Volumen V:

Normalisierung:

$$\begin{aligned}
 N &= \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \approx \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{g(\varepsilon)}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) + 1} = \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{\varepsilon^{1/2}}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) + 1} \\
 &= \frac{V}{\Lambda^3} (2s+1) \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^{\infty} dx \frac{x^{1/2}}{\xi^{-1} \exp(x) + 1} = \frac{V}{\Lambda^3} (2s+1) f_{3/2}(\xi), \quad \Lambda \equiv \left( \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T} \right)^{1/2} \quad (16.2)
 \end{aligned}$$

Thermische deBroglie Wellenlänge

Chemisches Potential: mit Invertierung von Gl. (16.2) folgt

$$\mu(T, \rho) = k_B T \ln( f_{3/2}^{-1}(\Xi) ), \quad \Xi \equiv \rho \Lambda^3 / (2s+1) \text{ Phasenraumdichte} \quad (16.2a)$$

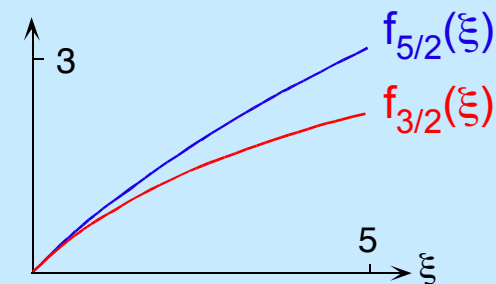
$$\rho \equiv N/V \text{ Teilchendichte}$$



Die Funktionen  $f_{3/2}(\xi)$ ,  $f_{5/2}(\xi)$ :

$$f_{3/2}(\xi) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\xi)^n}{n^{3/2}}, \quad f_{5/2}(\xi) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\xi)^n}{n^{5/2}}$$

$f_{3/2}(\xi)$ ,  $f_{5/2}(\xi)$  sind monoton steigend auf  $[0, \infty[$



(16.3)

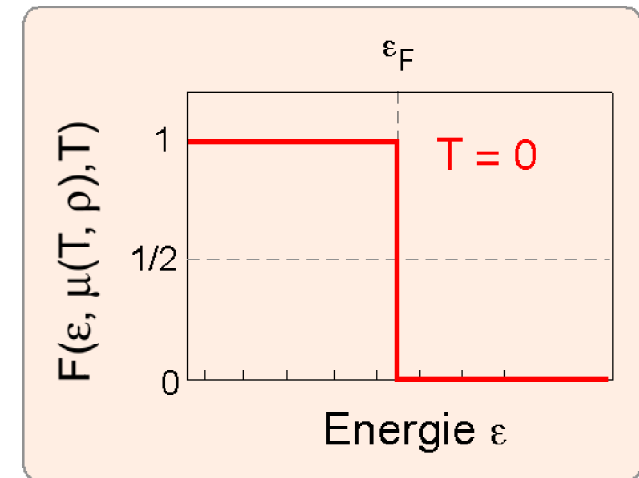
# Fermi-Energie im Kasten mit Volumen V:

Grenzfall  $T \rightarrow 0$  bzw.  $\xi \rightarrow \infty$  :

$$\mu(T, \rho) \rightarrow \varepsilon_F(\rho) = \mu(T=0, \rho)$$

$$F(\varepsilon, \mu(T, \rho), T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu(T, \rho)}{k_B T}\right) + 1}$$

$$\rightarrow \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F(\rho)}{k_B T}\right) + 1} \rightarrow \chi_{[0, \varepsilon_F]}(\varepsilon)$$



charak. Funktion auf  $[0, \varepsilon_F]$

$$N = \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^\infty d\varepsilon \varepsilon^{1/2} F(\varepsilon, \mu(T, \rho), T) \underset{k_B T \rightarrow 0}{\approx} \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^\infty d\varepsilon \varepsilon^{1/2} \chi_{[0, \varepsilon_F]}(\varepsilon)$$

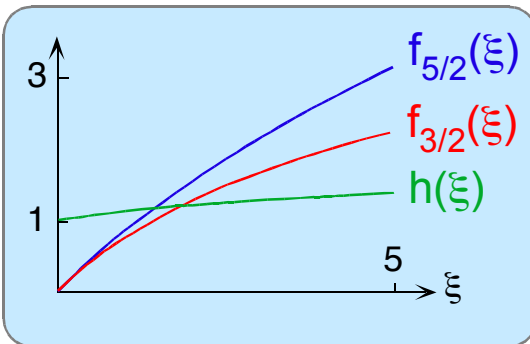
$$= \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^{\varepsilon_F} d\varepsilon \varepsilon^{1/2} = \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \frac{2}{3} \varepsilon_F^{3/2} = \frac{V (2s+1) m^{3/2}}{\hbar^3 \pi^2 (9/2)^{1/2}} \varepsilon_F^{3/2}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_F = (2s+1)^{-2/3} (9/2)^{1/3} \hbar^2 \pi^{4/3} \rho^{2/3} / m \quad \text{hängt nur von Teilchendichte ab} \quad (16.4)$$

## Innere Energie:

$$\begin{aligned}
 U &= \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \varepsilon_i \approx \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{g(\varepsilon) \varepsilon}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) + 1} = \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^{\infty} d\varepsilon \frac{\varepsilon^{3/2}}{\xi^{-1} \exp(\varepsilon/k_B T) + 1} \\
 &= \frac{3}{2} \frac{V}{\Lambda^3} k_B T \frac{4}{3\pi^{1/2}} (2s+1) \int_0^{\infty} dx \frac{x^{3/2}}{\xi^{-1} \exp(x) + 1} = \frac{3}{2} k_B T (2s+1) \frac{V}{\Lambda^3} f_{5/2}(\xi) \quad (16.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{V}{\Lambda^3} &\stackrel{(16.2)}{=} \frac{N}{(2s+1)f_{3/2}(\xi)} \Rightarrow U = \frac{3}{2} N k_B T h(\xi) = \frac{3}{2} N k_B T \left( 1 + \frac{\xi}{2^{5/2}} - \dots \right) \quad (16.6) \\
 h(\xi) &\equiv f_{5/2}(\xi)/f_{3/2}(\xi) \\
 pV &= \frac{2}{3} U = N k_B T h(\xi) = N k_B T \left( 1 + \frac{\xi}{2^{5/2}} - \dots \right)
 \end{aligned}$$



Im Grenzfall  $k_B T \rightarrow \infty$  bzw.  $\xi \rightarrow 0$  erhält man die Relationen für ein Boltzmann-Gas:

$$U = \frac{3}{2} N k_B T, \quad pV = N k_B T$$

Grenzfall  $T \rightarrow 0$  bzw.  $\xi \rightarrow \infty$  :

$$\mu(T, \rho) \rightarrow \varepsilon_F = \mu(T=0, \rho)$$

$$F(\varepsilon, \mu(T, \rho), T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu(T, \rho)}{k_B T}\right) + 1} \rightarrow \chi_{[0, \varepsilon_F]}(\varepsilon)$$

$$\begin{aligned} U(T=0) &= \sum_{i=0}^{\infty} \bar{n}_i \varepsilon_i = \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^{\infty} d\varepsilon \varepsilon^{3/2} F(\varepsilon, \mu, T=0) = \frac{(2m)^{3/2} V}{4\hbar^3 \pi^2} (2s+1) \int_0^{\varepsilon_F} d\varepsilon \varepsilon^{3/2} \\ &\stackrel{(16.4)}{=} \frac{3}{2} N \varepsilon_F^{-3/2} \int_0^{\varepsilon_F} d\varepsilon \varepsilon^{3/2} = \frac{3}{5} N \varepsilon_F \end{aligned} \quad (16.7)$$

$$p(T=0) = \frac{2}{3} U(T=0) / V = \frac{2}{5} \frac{N \varepsilon_F}{V} = \frac{1}{5} (6/(2s+1))^{2/3} \hbar^2 \pi^{4/3} \rho^{5/3} / m$$

Pauli-Prinzip führt bei Fermi-Gasen zu endlichem Druck bei  $T=0$ : Quantendruck bzw. Nullpunktsdruck

# Näherung für tiefe Temperaturen

für  $k_B T \ll \varepsilon_F$  hat die Fermi-Verteilung nahezu Kastenform (blaue Kurve:  $F(\varepsilon, \mu, T) \approx F(\varepsilon, \varepsilon_F, T)$ ).

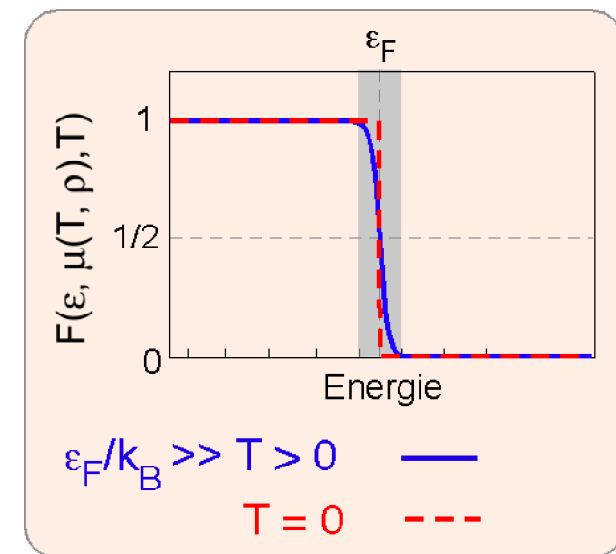
Pauli-Prinzip: die meisten Elektronen finden keine freien Zustände, nur Elektronen in unmittelbarer Umgebung der Fermi-Fläche (grauer Bereich: Breite  $\approx k_B T \pi^2/2$ ) tragen zur thermischen Anregung bei.

$$\Rightarrow U \approx \frac{3}{5} N \varepsilon_F + \underbrace{N (\pi^2 k_B T / 2 \varepsilon_F) (k_B T / 2)}_{\text{Anteil der Teilchen im grauen Bereich}} \Rightarrow \frac{C_V}{k_B N} \approx \frac{\pi^2}{2} \frac{T}{T_F}$$

$\Rightarrow$  spezifische Wärme  $C_V \rightarrow 0$  für  $T \rightarrow 0$

Halbe Breite des grauen Bereichs  $\approx k_B T \pi^2/4$  :

$$\frac{1}{\exp(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{k_B T}) + 1} = \frac{1}{\exp(\frac{\pi^2}{4}) + 1} \approx 0.08$$



# Spezifische Wärme:

(Herleitung )

$$\begin{aligned}
 \frac{C_v}{N} &\equiv \frac{1}{N} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V,N} \stackrel{(16.2)}{=} \frac{d}{dT} \left( \frac{3}{2} k_B T \frac{1}{\Xi} f_{5/2}(\xi(T,V,N)) \right) & \Xi &= \rho \Lambda^3 / (2s+1) \\
 &= \frac{3}{2} k_B \frac{d}{dT} \left( \frac{T}{\Xi} \right) f_{5/2}(\xi(T,V,N)) + \frac{3}{2} \frac{k_B T}{\Xi} \frac{d}{dT} f_{5/2}(\xi(T,V,N)) \\
 &= \frac{15}{4} k_B \frac{1}{\Xi} f_{5/2}(\xi(T,V,N)) + \frac{3}{2} \frac{k_B T}{\Xi} \frac{d}{d\xi} f_{5/2}(\xi(T,V,N)) \left( \frac{\partial \xi}{\partial T} \right)_{V,N} & (16.8)
 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{d\xi} f_{3/2}(\xi) = \frac{d}{d\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\xi)^n}{n^{3/2}} = -\xi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\xi)^n}{n^{1/2}} = \xi^{-1} f_{1/2}(\xi)$$

$$\frac{d}{d\xi} f_{5/2}(\xi) = \frac{d}{d\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\xi)^n}{n^{5/2}} = -\xi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\xi)^n}{n^{3/2}} = \xi^{-1} f_{3/2}(\xi)$$

$$\left( \frac{\partial \xi}{\partial T} \right)_{V,N} = \frac{d}{dy} f_{3/2}^{-1}(\Xi) \frac{d\Xi}{dT} = \frac{\frac{d\Xi}{dT}}{\frac{d}{d\xi} f_{3/2}(\xi)} = -\frac{3}{2} \frac{\xi \Xi}{T f_{1/2}(\xi)}$$

(16.9)

$$\Rightarrow \frac{C_v}{Nk_B} = \frac{15}{4} \frac{1}{\Xi} f_{5/2}(\xi) - \frac{9}{4} \frac{f_{3/2}(\xi)}{f_{1/2}(\xi)} = \frac{15}{4} \frac{f_{5/2}(\xi)}{f_{3/2}(\xi)} - \frac{9}{4} \frac{f_{3/2}(\xi)}{f_{1/2}(\xi)}$$

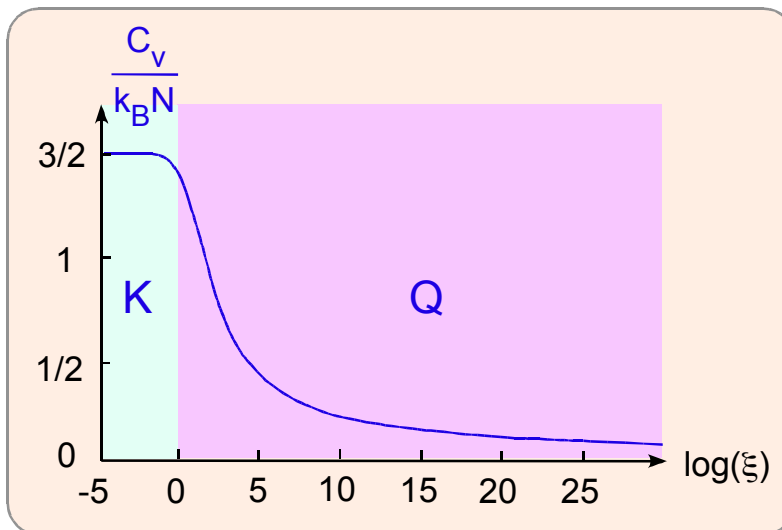
$$\xi(T,V,N) = f_{3/2}^{-1}(\Xi)$$

Grenzfälle:

$$T \rightarrow \infty \Rightarrow \Xi \rightarrow 0, \xi \rightarrow 0 \Rightarrow f_{5/2}(\xi)/f_{3/2}(\xi) \rightarrow 1, f_{3/2}(\xi)/f_{1/2}(\xi) \rightarrow 1$$

$$\Rightarrow \frac{C_v}{k_B N} \rightarrow \frac{15}{4} - \frac{9}{4} = \frac{3}{2}$$

$$T \rightarrow 0 \Rightarrow \Xi \rightarrow \infty, \xi \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{C_v}{k_B N} = \frac{15}{4} \frac{f_{5/2}(\xi)}{f_{3/2}(\xi)} - \frac{9}{4} \frac{f_{3/2}(\xi)}{f_{1/2}(\xi)} \rightarrow 0$$



K: Klassischer Bereich  
jedes Elektron trägt im Mittel  $\frac{3}{2} k_B T$  bei

Q: Quantenentarteter Bereich  
nur wenige Elektronen nahe an der Fermi-Fläche  
können angeregt werden



# Beispiele für entartete Fermi-Gase

1. **Elektronen in Metallen:** Fermi-Energien der Elektronen in Metallen liegen im eV-Bereich.

BSP Kupfer  $\rightarrow \varepsilon_F = 7 \text{ eV}$  ,  $\varepsilon_F / k_B = 82.000 \text{ K}$

2. **Weiße Zwerge**

Erloschene Sterne, deren Quantendruck  $p(T=0) = \frac{2}{5} \frac{N \varepsilon_F}{V} = \frac{1}{5} (6/(2s+1))^{2/3} \hbar^2 \pi^{4/3} \rho^{5/3} / m$

die Gravitation kompensiert.

Fermi-Energie des Elektronengas des Stern-Plasmas im Bereich 300 keV.

Relativistische Behandlung  $\rightarrow$  Chandrasekhar-Grenze: Masse  $< 1.4 M_{\text{Sonne}}$

3. **Kernmaterie:** Fermi-Energie der Nukleonen im Kern im Bereich 30 MeV.

4. **Neutronensterne:** Fermi-Energie der Neutronen im Bereich 300 MeV.