weiterhin keine WW der Momente
nur Statistik über Zeeman-Zustände

Paramagnetismus: q.m.

$$M = \frac{N}{V} \cdot \frac{\sum_{m_j=-j}^{j} -g_j m_j \mu_B \exp\left(\frac{-g_j m_j \mu_B B}{k_B T}\right)}{\sum_{m_j=-j}^{j} \exp\left(\frac{-g_j m_j \mu_B B}{k_B T}\right)}$$

Abk. $y = -\frac{g_j \mu_B B}{k_B T}$

$$M = \frac{N}{V} \cdot g_j \mu_B \underbrace{\frac{\sum_{m_j} -m_j \exp(-m_j y)}{\sum_{m_j} \exp(-m_j y)}}$$

$$\frac{d}{dy} \ln \underbrace{\sum_{m_j} \exp(-m_j y)}$$

$$\exp(-jy)\underbrace{\left(1+e^{y}+e^{2y}+\ldots+e^{2jy}\right)}_{\frac{1-e^{(2j+1)y}}{1-e^{y}}}$$

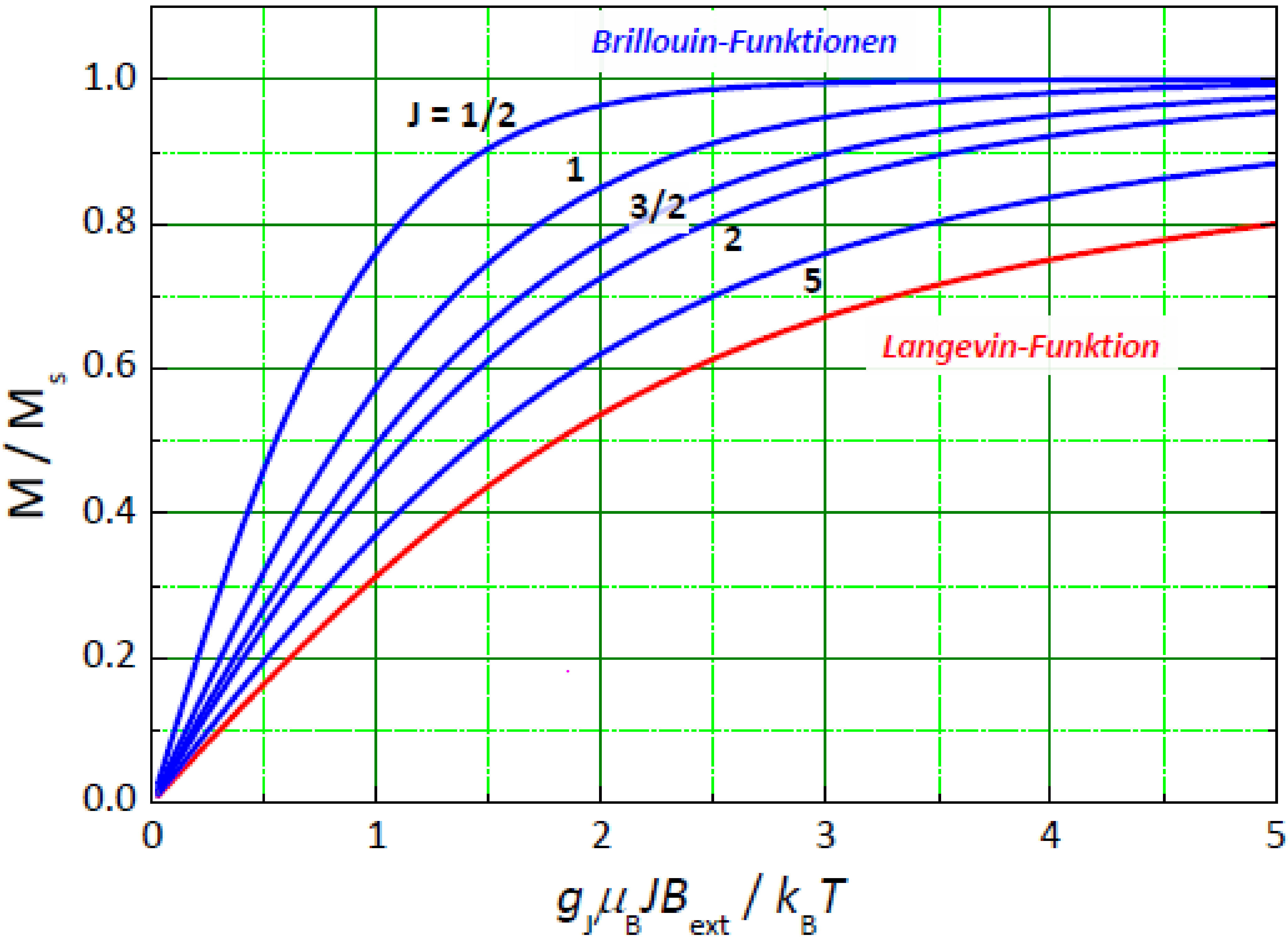
mit $\sinh x = \frac{1}{2}\left(e^{t}-e^{-t}\right)$:

$$M = \frac{N}{V} g_j \mu_B \frac{d}{dy} \ln\left(\frac{\sinh\left(y(2j+1)/2\right)}{\sinh\left(y/2\right)}\right)$$

$$= \frac{N}{V} g_j \mu_B\, j\, B_j(y)$$

$$B_j(y) = \frac{2j+1}{2j} \coth\left(\frac{2j+1}{2j} y\right) - \frac{1}{2j} \coth\left(\frac{y}{2j}\right)$$

Brillouinfunktion



Brillouin-Funktionen
J = 1/2
1
3/2
2
5
Langevin-Funktion
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
1
2
3
4
5
M / M_s
g_J μ_B J B_ext / k_B T

Näherung für "kleine B, große T":

$(k_B T \gg g_J \mu_B j B_{ext})$

Idee der Rechnung:

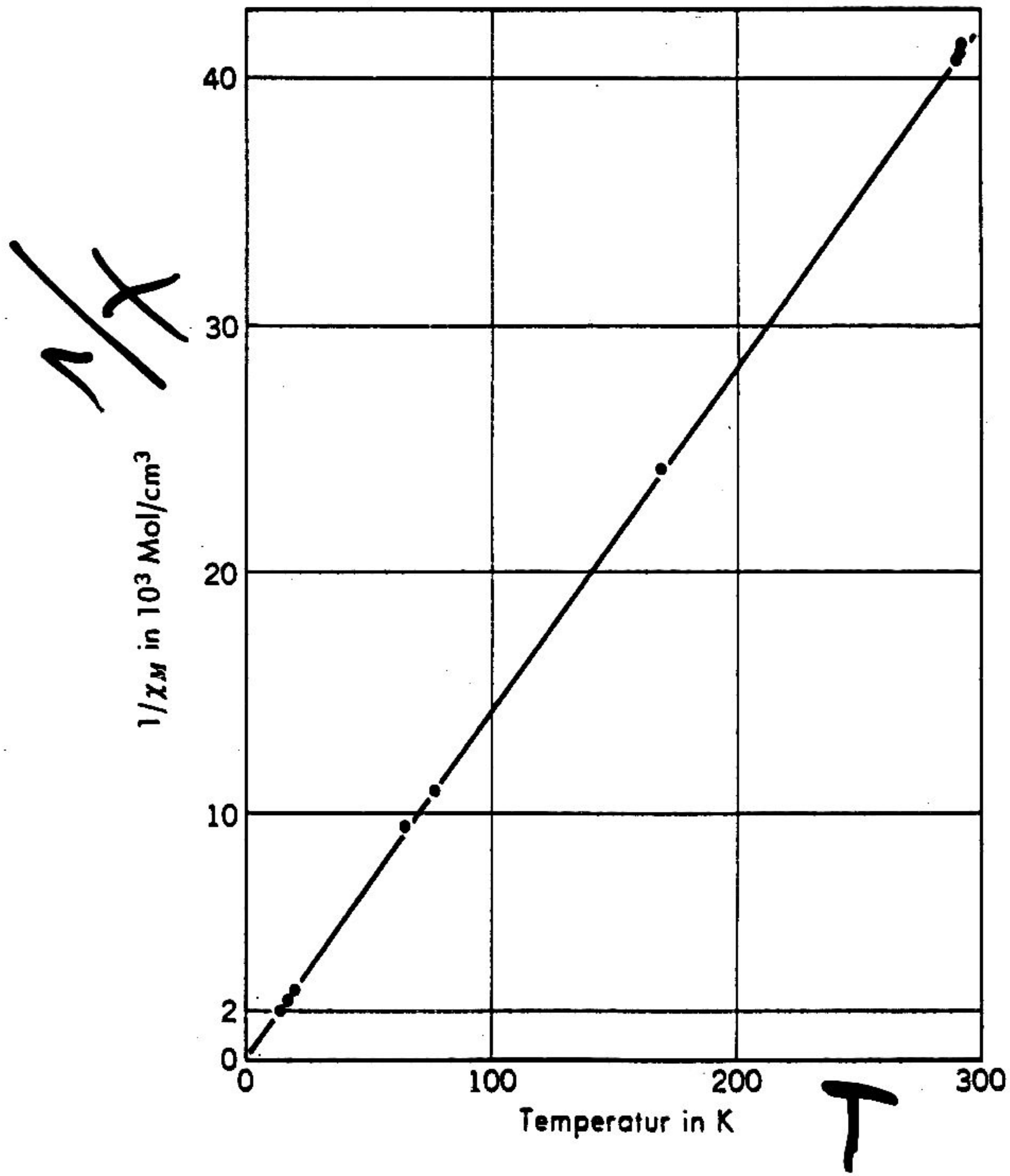
① $e^x \approx 1 + x$ ② $\sum_{m_j} m_j = 0$

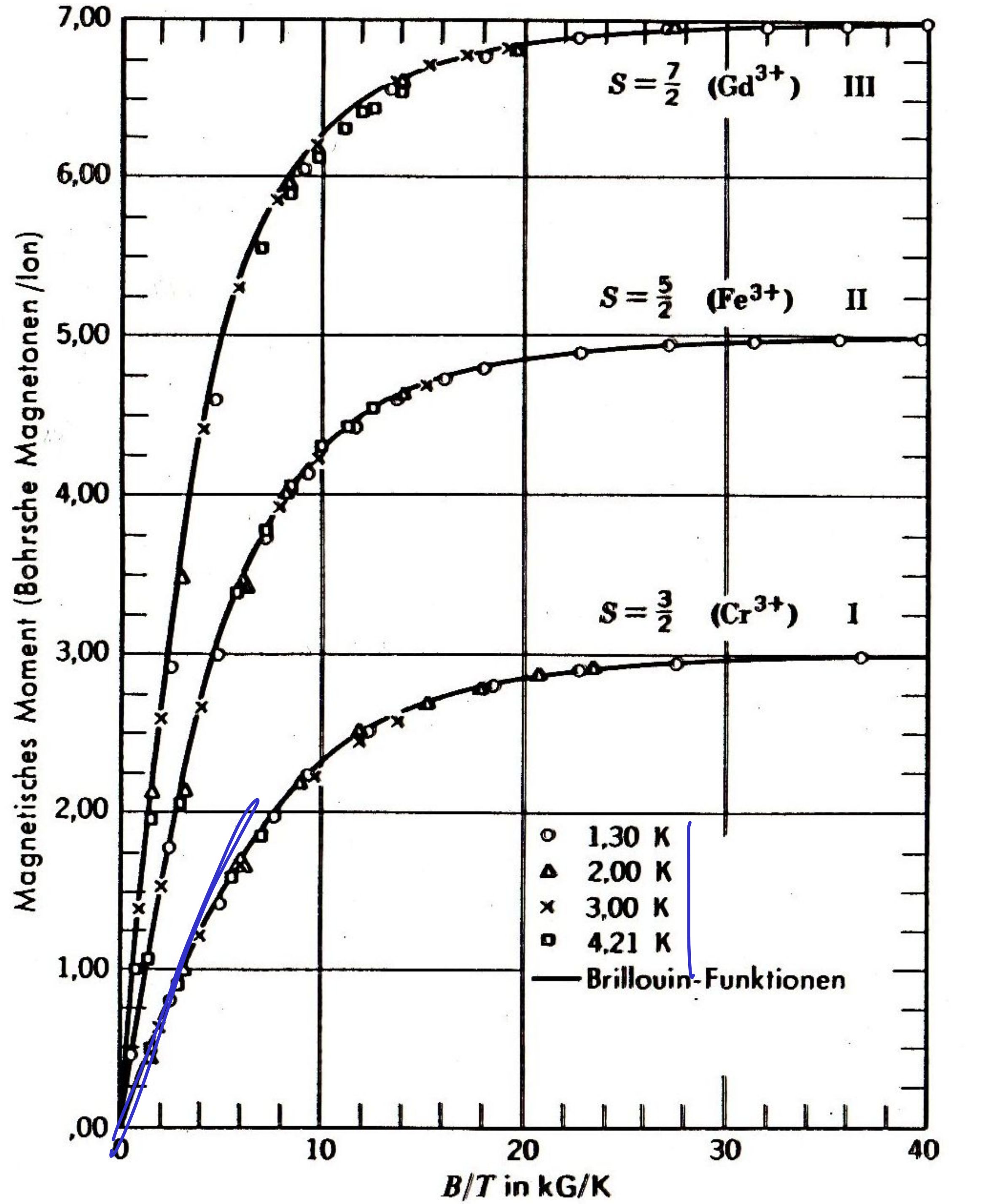
③ $\sum_{m_j} m_j^2 = \frac{1}{3} j (j+1)(2j+1)$

$$\Rightarrow \chi = \mu_0 \frac{M}{B_{ext}} = \frac{N}{V} \mu_0 \frac{g_j^2 \mu_B^2 \, j(j+1)}{3 k_B T} =: \frac{C}{T}$$

Curiegesetz

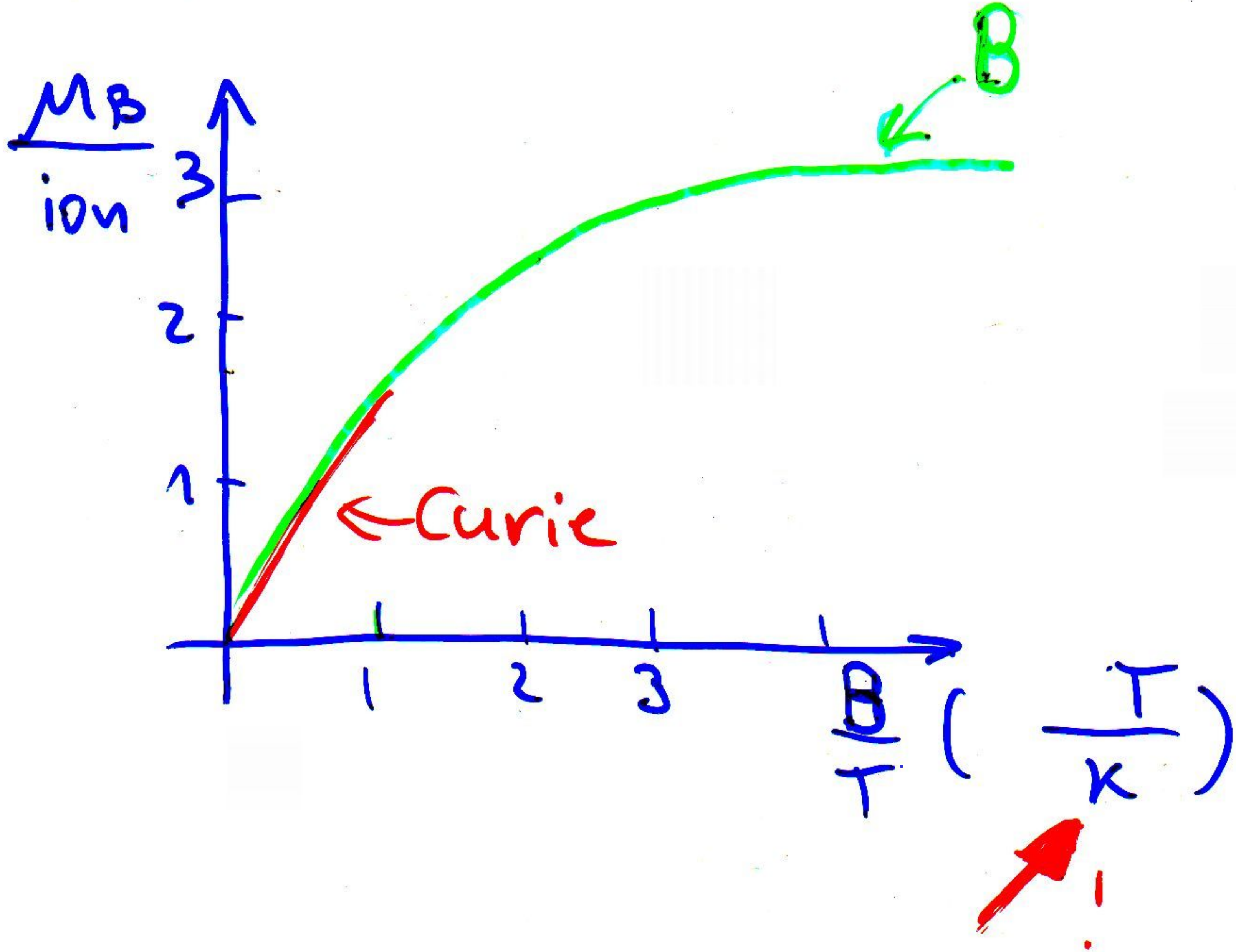
Temperaturabhängigkeit der reziproken Suszeptibilität $1/\chi$ eines Gadoliniumsalzes Gd $(C_2H_5SO_4)_3 \cdot 9\,H_2O$. Die gerade Linie entspricht dem Curiegesetz (nach L. C. Jackson und H. Kamerlingh Onnes).





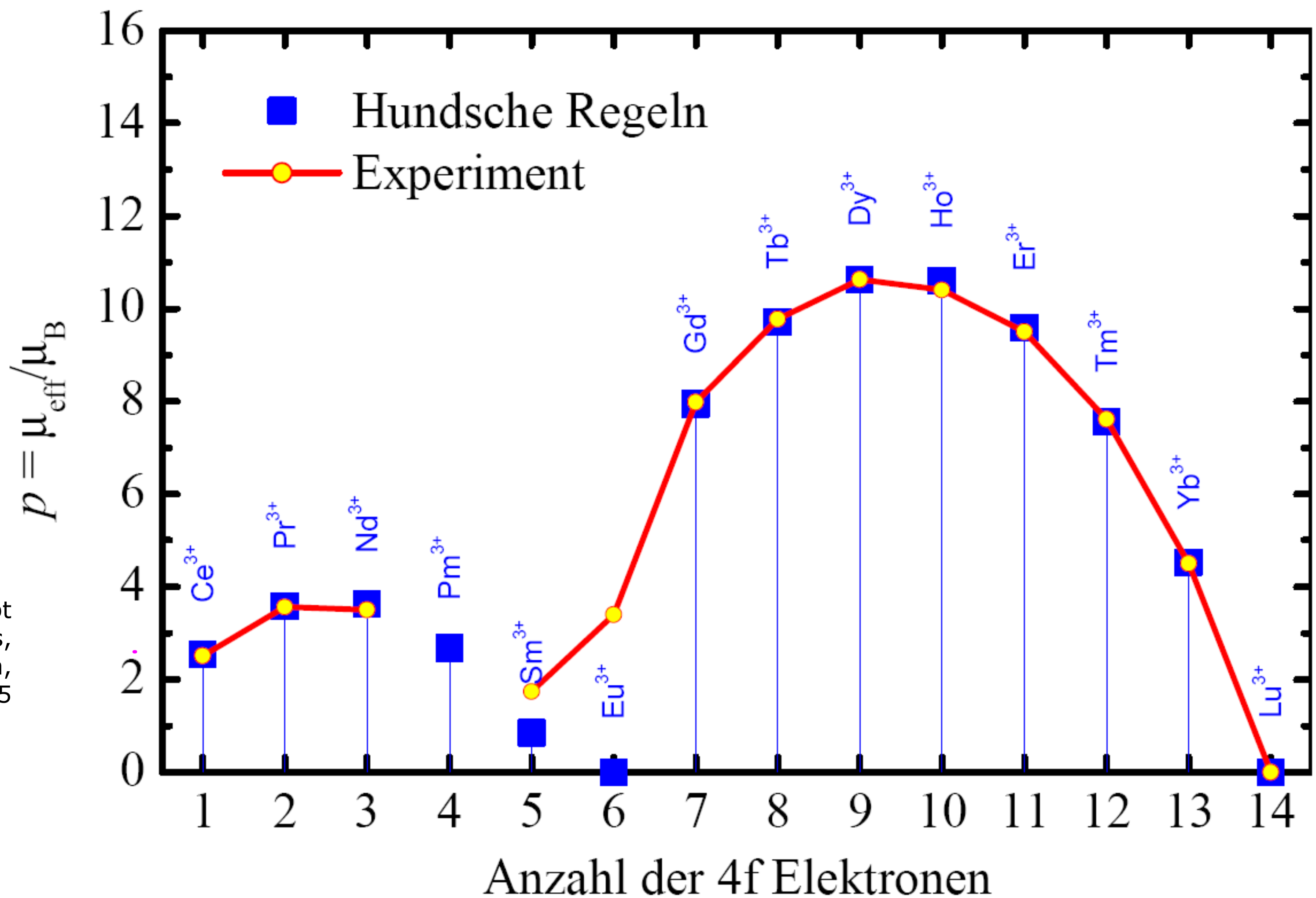
Abhängigkeit des magnetischen Moments von B/T für kugelförmige Proben aus (I) Kalium-Chrom-Alaun, (II) Eisen-III-Alaun und (III) Gadolinium-Sulfat-Oktahydrat. Bei 1,3 K und etwa 50 000 Gauß wird eine 99,5%ige magnetische Sättigung erreicht. [Nach

Zimmertemperatur = 293 K



Effektive Magnetonenzahl p der 4*f*-Ionen

$$\chi = \frac{N}{V}\frac{\mu_B^2\mu_0}{3k_BT}g_j^2\, j(j+1) = \frac{N}{V}\frac{\mu_B^2\mu_0}{3k_BT}p^2 \qquad p = g_J\sqrt{J(J+1)}$$



Skript Magnetismus, TU München, WS 2004/5

Seltene Erden: Erwartetes *p* passt gut zu experimentellen Werten, denn die magnetisch relevanten 4f-Elektronen werden durch 5sp-Elektronen gut von den Nachbarn abgeschirmt. Verhalten sich fast wie einzelne Ionen.

Effektive Magnetonenzahl: 3*d*-Ionen

			Exp.	$p(J=\|L+S\|)$	$p(J=S)$
Cr^{3+}	$3d^3$	$^4F_{3/2}$	3.7	0.77	3.87
Fe^{2+}	$3d^6$	$^5D_4$	5.4	6.7	4.9
Co^{2+}	$3d^7$	$^4F_{9/2}$	4.8	6.54	3.87
Ni^{2+}	$3d^8$	$^3F_4$	3.2	5.59	2.83
Cu^{2+}	$3d^9$	$^2D_{5/2}$	1.9	3.55	1.73

Schlechte Übereinstimmung bei Übergangsmetallen

als LS-Kopplung

Ursache: größere Kristallfeldaufspaltung;

Ausgangslage "Zeemaneffekt hebt m_J-Entartung auf"

nicht mehr gegeben

Kristallfeld-Wechselwirkung

Atomare Zustände bzgl. m_J entartet

WW mit Nachbarn im Kristall hebt das auf.

Seltene Erden (4f) : Aufspaltung wenige meV

Ü-Metalle (3d) : Aufspaltung $\approx$ eV

$\Rightarrow$ In Ü-Metallen bricht WW die Rotationssymmetrie um B

$\Rightarrow$ Mittelung über alle $L_z \approx 0$

$\Rightarrow$ Unterdrückung ("quenching") des Bahndrehimp.

Exkurs: adiabatische Entmagnetisierung

& NMR

Pauli-Paramagnetismus der Leitungs e^-

Leitungs e^- $\mu = \mu_B \rightarrow$ ~~Curiegesetz~~?

Exp: $\chi(T) \approx$ const.

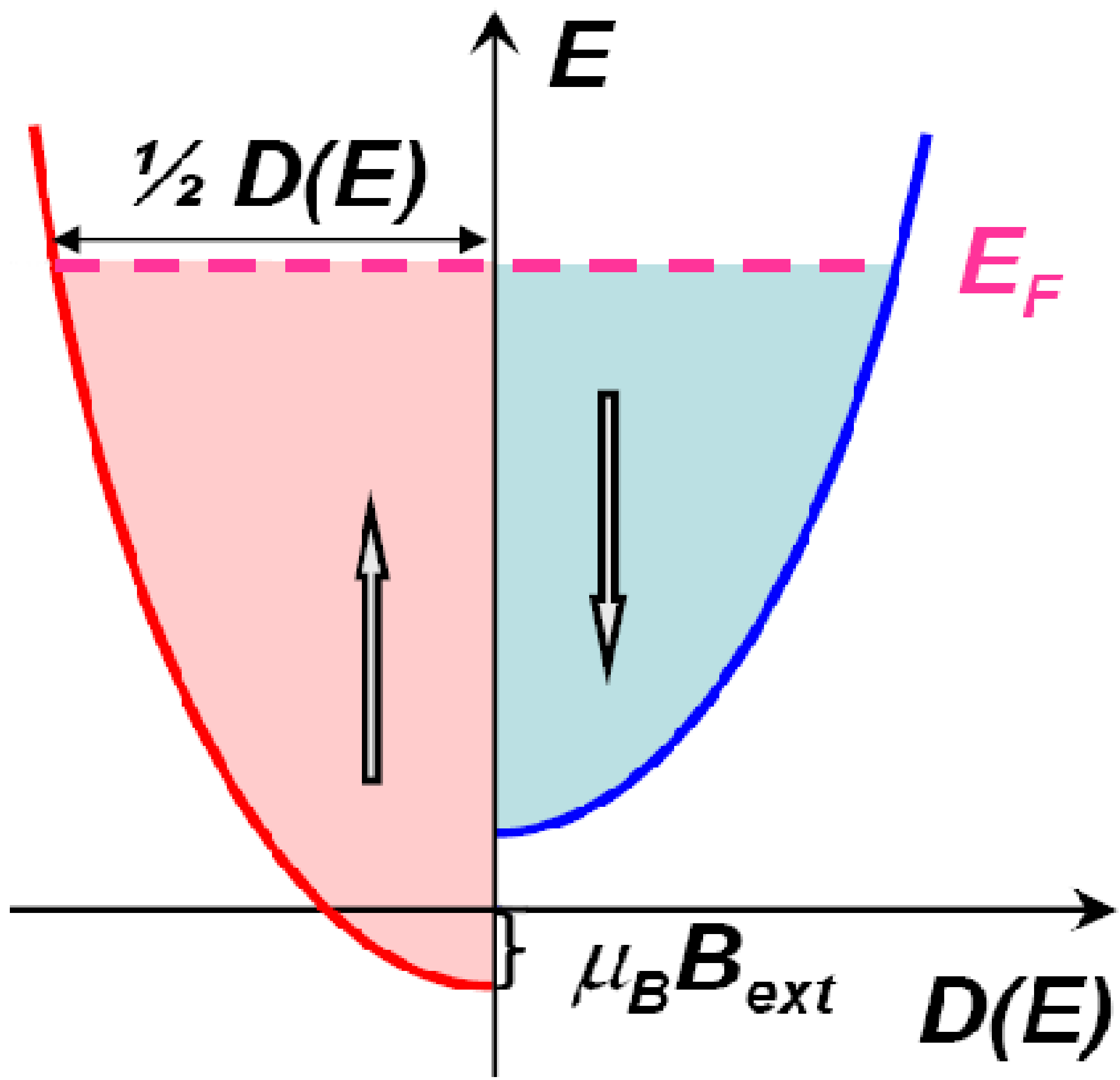
Ursache: Fermi-Dirac-Verteilung

nur $E \approx E_F$ - Elektronen reagieren auf B_{ext}

Abschätzung: Aufweichungszone $\sim k_B T$

$$\chi_{Metall} \approx \chi_{Curie} \cdot \frac{T}{T_F} \approx \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{T_F} = \text{const.}$$

Paulischer Paramagnetismus – etwas genauer



Niveauaufspaltung im B-Feld : $g \mu_B B$

Zustandsdichte $\frac{1}{2} D(E_F)$

Zahl der Elektronen deren Spin nicht kompensiert wird : $\frac{1}{2} D(E_F) g \mu_B B$

Moment eines e^- : $\frac{1}{2} g \mu_B$

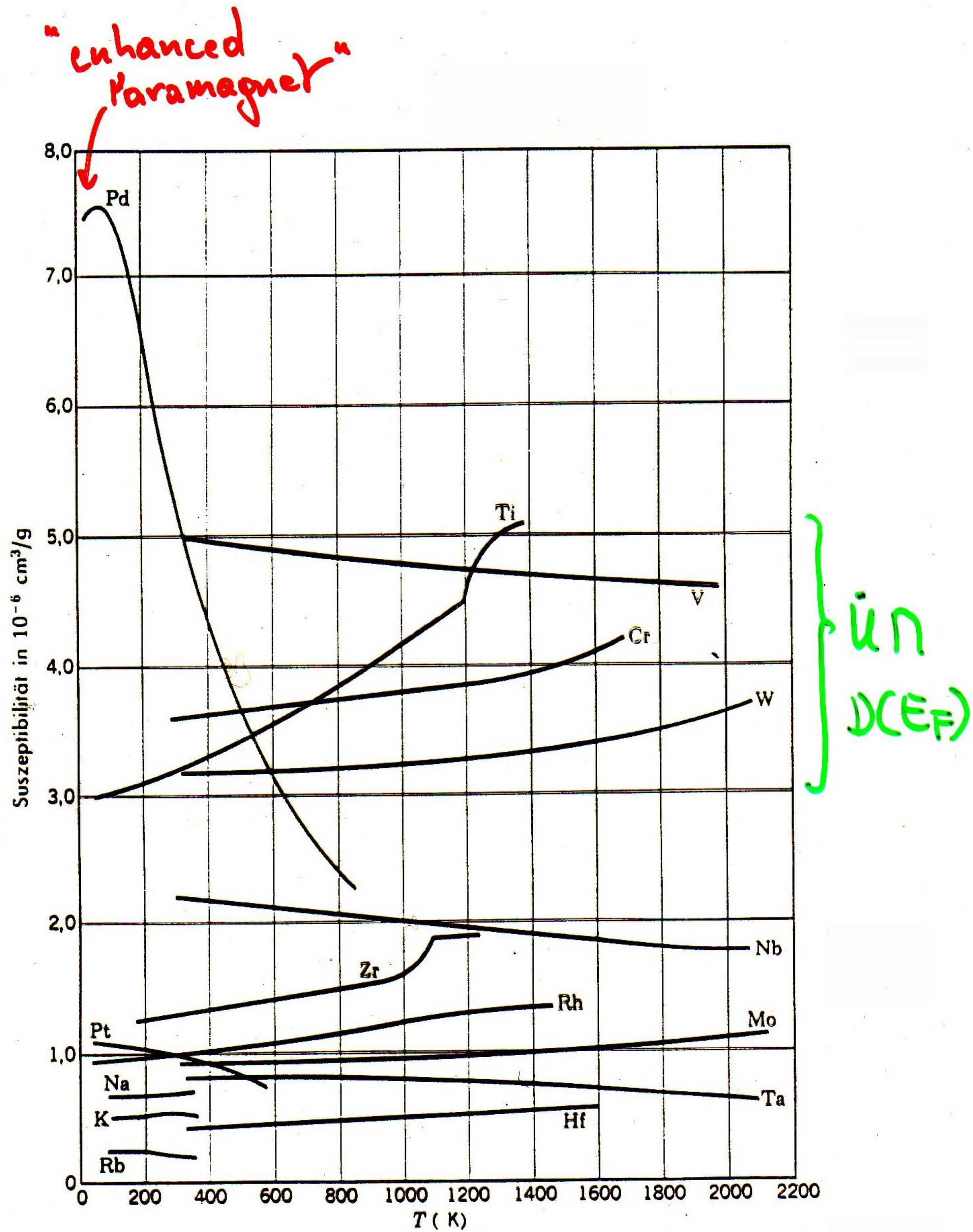
$$\Rightarrow M = \frac{1}{4} D(E_F) g^2 \mu_B^2 B$$

$$\Rightarrow \chi_{Pauli} = \frac{M}{H} = \frac{1}{4} D(E_F) g^2 \mu_B^2 \mu_0 \quad ; g \approx 2$$

$$\Rightarrow \chi_{Pauli} = \underline{D(E_F)} \mu_B^2 \mu_0 = \text{const.}$$

Suszeptibilität von Metallen

- "T-unabhängig"
- D(E_F)



Diamagnetismus

Leitungselektronen zeigen auch Diamagnetismus

$$\chi = \chi_{Pauli} + \chi_{Dia} = \mu_0 \mu_B^2 D(E_F)\left[1 - \frac{1}{3}\left(\frac{m}{m^*}\right)^2\right]$$