

Magnetische Kühlschränke für tiefste Temperaturen

Jürgen Schnack

Fakultät für Physik – Universität Bielefeld

<http://obelix.physik.uni-bielefeld.de/~schnack/>

Info-Wochen, Physik, Universität Bielefeld

21. Juni 2021



Magnetisches Kühlen?



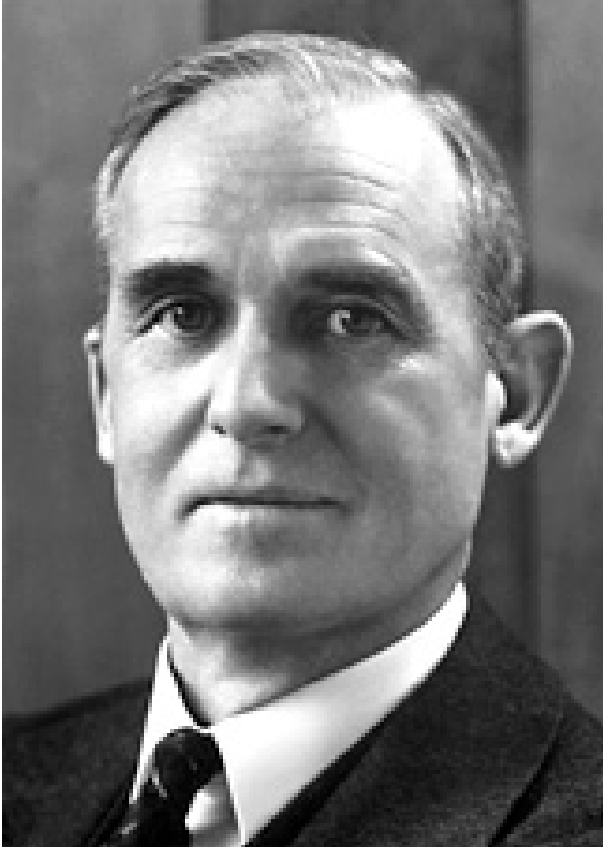
- Kühlschränke, na klar.
- Magnetisches Kühlen?
- Kühlen mit Molekülen?
- Was bringt das?

Was ist eigentlich Temperatur?

Wie funktioniert Ihr Kühlschrank?

Wie kommt man zu ganz tiefen Temperaturen?

Magnetisches Kühlen: Nobelpreis 1949



The Nobel Prize in Chemistry 1949 was awarded to William F. GIAUQUE *for his contributions in the field of chemical thermodynamics, particularly concerning the behaviour of substances at extremely low temperatures.*

Magnetisches Kühlen: Geschichte

768

LETTERS TO THE EDITOR

Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

We have recently carried out some preliminary experiments on the adiabatic demagnetization of $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ at the temperatures of liquid helium. As previously predicted by one of us, a large fractional lowering of the absolute temperature was obtained.

An iron-free solenoid producing a field of about 8000 gauss was used for all the measurements. The amount of $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ was 61 g. The observations were checked by many repetitions of the cooling. The temperatures were measured by means of the inductance of a coil surrounding the gadolinium sulfate. The coil was immersed in liquid helium and isolated from the gadolinium by means of an evacuated space. The thermometer was in excellent agreement with the temperature of liquid helium as indicated by its vapor pressure down to 1.5°K.

On March 19, starting at a temperature of about 3.4°K, the material cooled to 0.53°K. On April 8, starting at about 2°, a temperature of 0.34°K was reached. On April 9, starting at about 1.5°, a temperature of 0.25°K was attained.

It is apparent that it will be possible to obtain much lower temperatures, especially when successive demagnetizations are utilized.

W. F. GIAUQUE
D. P. MACDOUGALL

Department of Chemistry,
University of California,
Berkeley, California,
April 12, 1933.

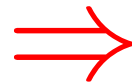
W. F. Giauque and D. MacDougall, Phys. Rev. **43**, 768 (1933).

Wie funktioniert der Magnetokalorische Effekt?

(1. einfach – 2. physikalisch – 3. unverständlich)

Für Dummies: Rolle der Temperatur

Temperatur

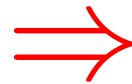


Wackeln*

*Wackeln = Unordnung: höhere Temperatur ergibt mehr Unordnung

Für Dummies: Rolle des Magnetfeldes

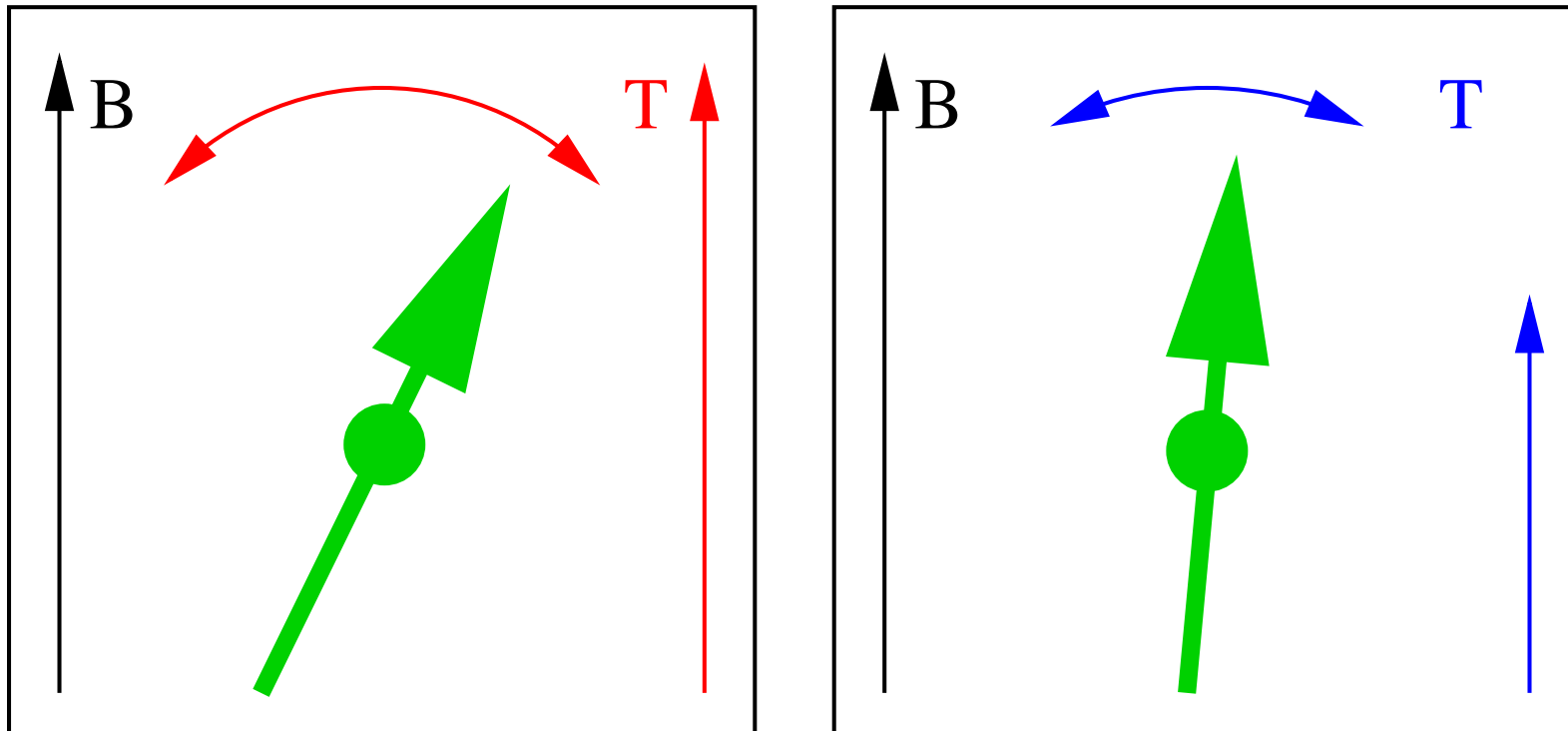
Magnetfeld



Ausrichten*

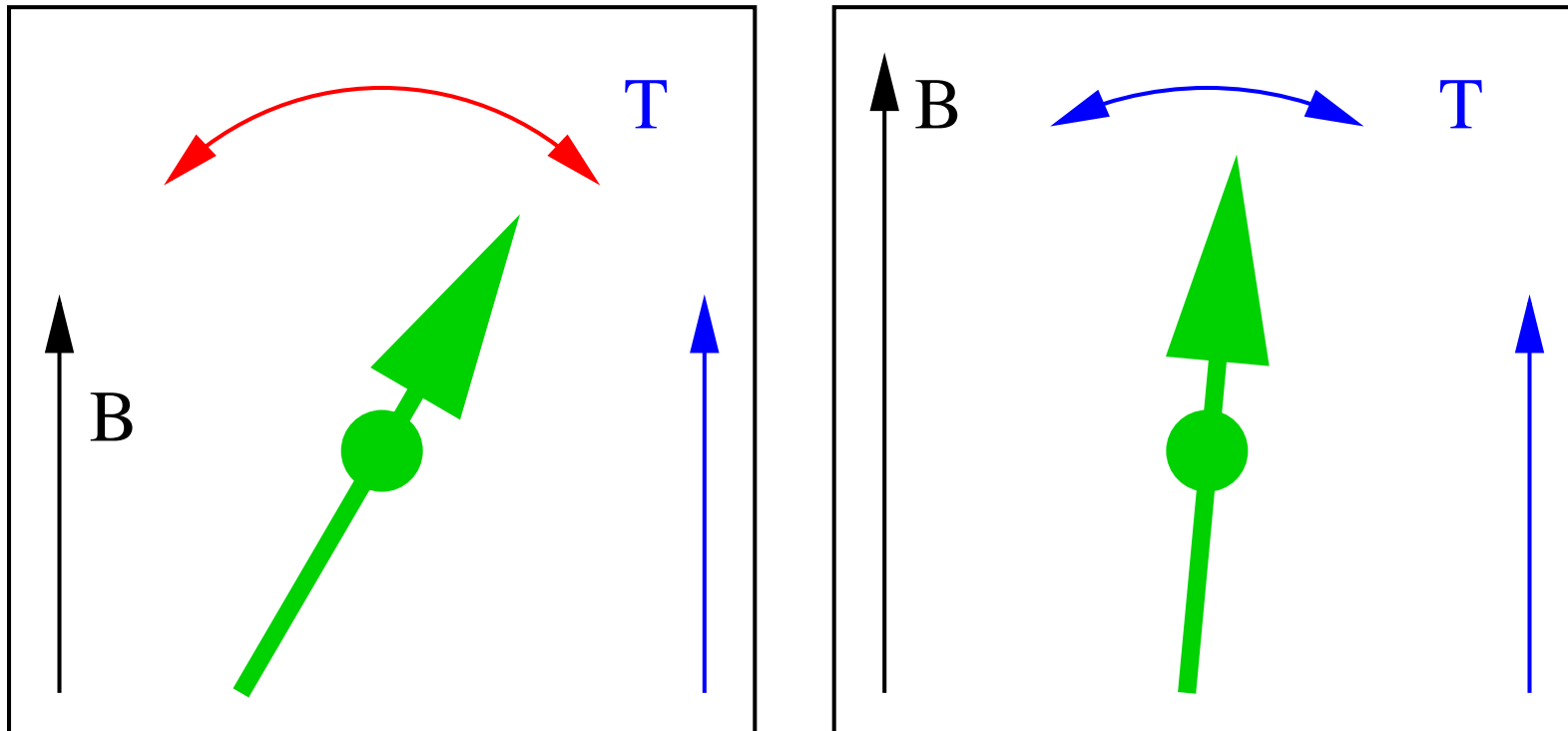
*Ausrichten = Antiwackeln = Ordnung: höheres Feld ergibt mehr Ordnung

Für Dummies: Einfluss von Temperatur und Magnetfeld



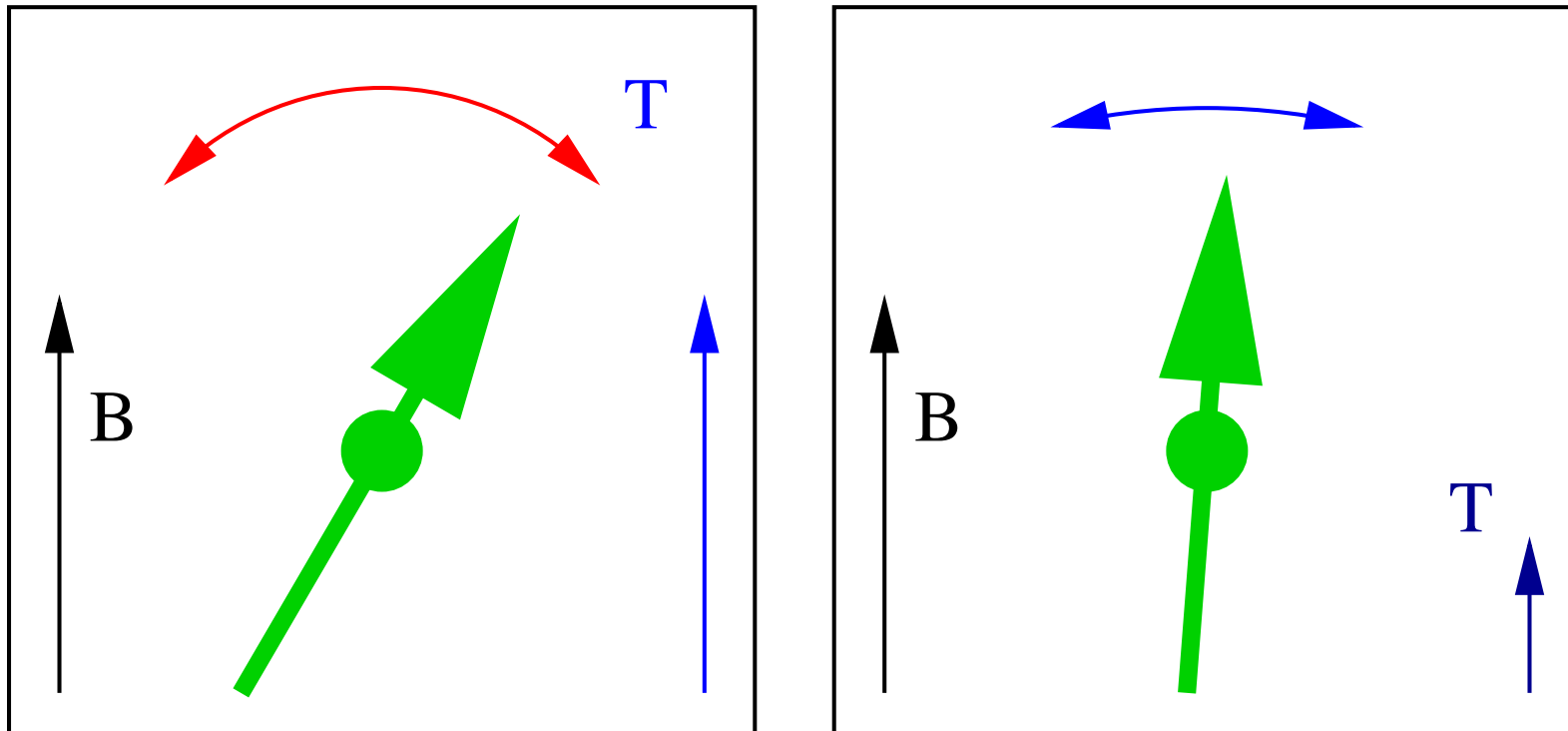
tieferer Temperatur = weniger Wackeln = stärkere Ausrichtung

Für Dummies: Einfluss von Temperatur und Magnetfeld



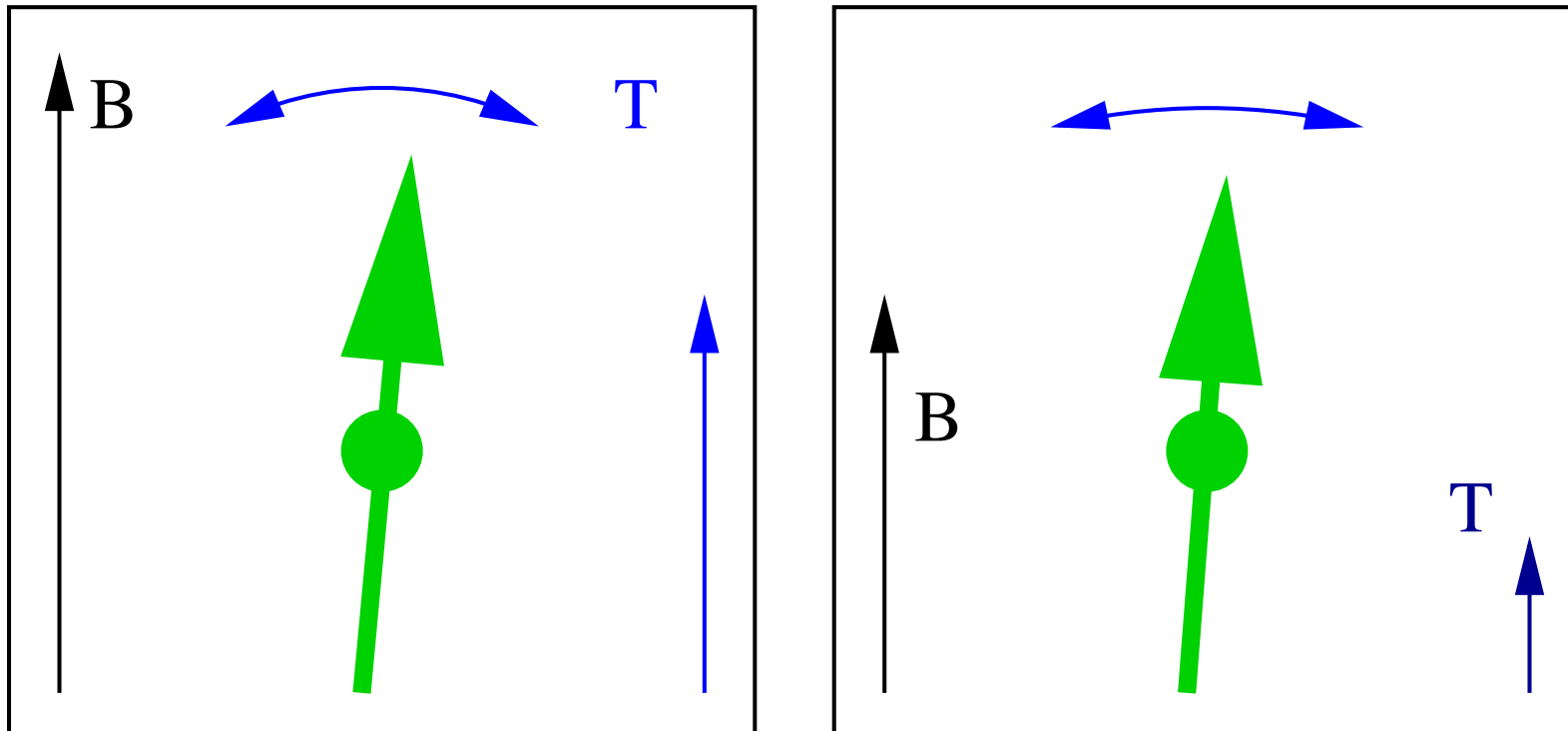
höheres Feld = weniger Wackeln = stärkere Ausrichtung

Für Dummies: Einfluss von Temperatur und Magnetfeld



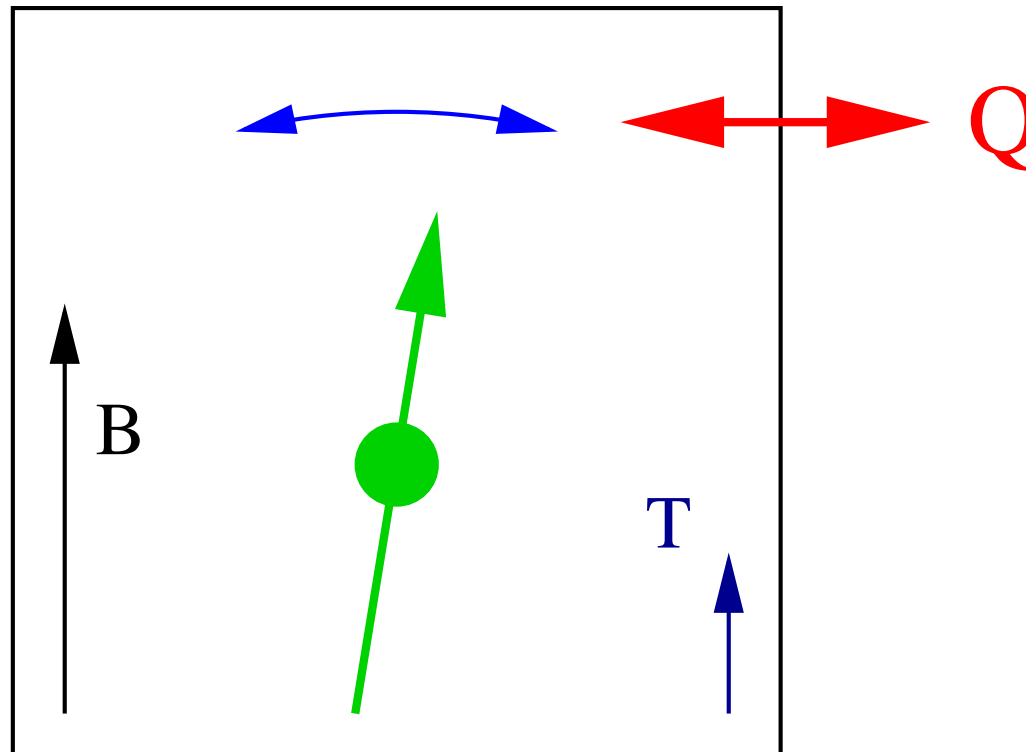
weniger Wackeln bei niedrigem Feld = noch niedrigere Temperatur

Für Dummies: Einfluss von Temperatur und Magnetfeld



Ausschalten des Magnetfeldes bei gleich bleibendem Wackeln (Ordnung)
führt zu einer Temperaturerniedrigung.

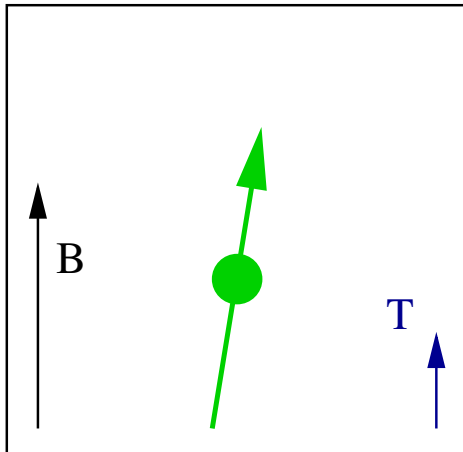
Für Dummies: Wackeln und Ordnung



Ordnung konstant, wenn keine Wärme Q übertragen wird (isoliert oder schnell),
adiabatische Magnetisierungskühlung

Jetzt das Ganze noch einmal,
wie im Physikstudium

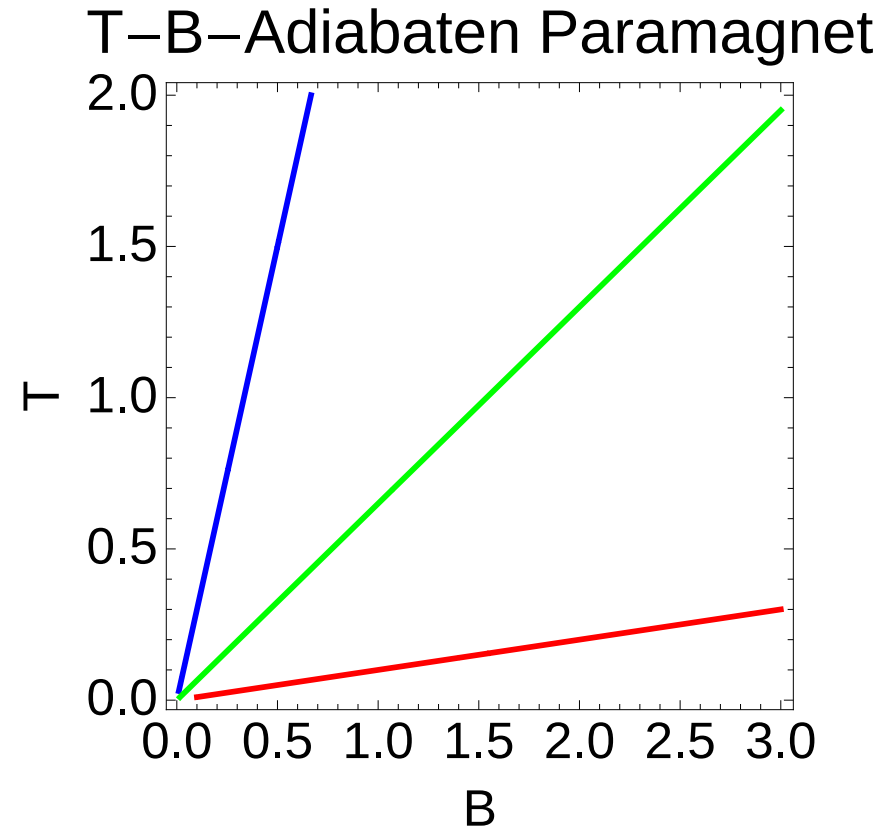
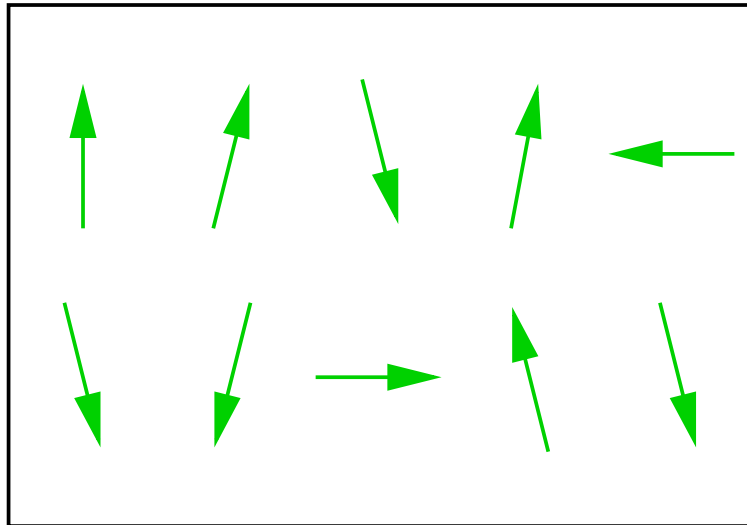
Für Physikstudenten: Thermodynamische Statistik



- Kanonisches Ensemble:
 $\underline{R} = Z^{-1} \exp(-\underline{H}/(k_B T)), Z = \text{Sp} \left\{ \exp(-\underline{H}/(k_B T)) \right\}$
- Hamiltonoperator für Paramagneten im äußeren Magnetfeld: $\underline{H} = g\mu_B B \underline{s}^z$
- Entropie (Unordnung): $S(T, B) = -k_B \text{Sp} \left\{ \underline{R} \ln(\underline{R}) \right\}$
- Adiabatisch (auch isentrop), d.h. S konstant

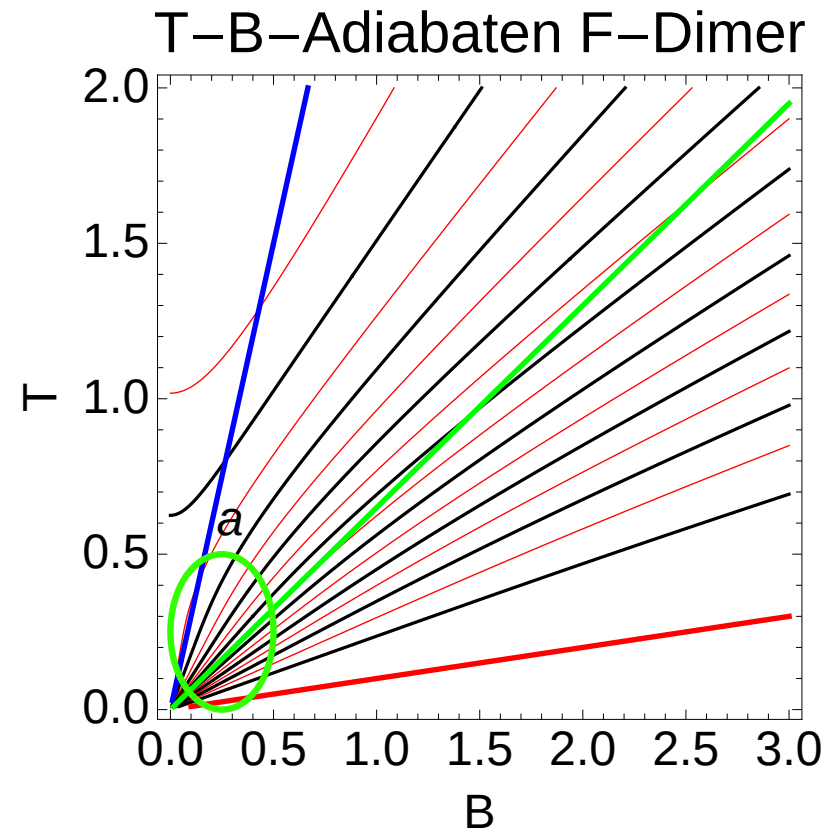
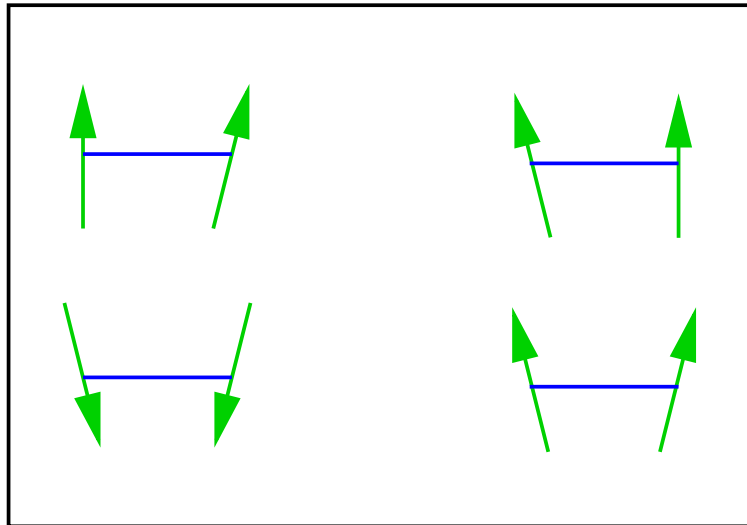
$$\left(\frac{\partial T}{\partial B} \right)_S = -\frac{T}{C} \left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T \quad \text{adiabatische Kühlrate}$$

Für Physikstudenten: MCE bei Paramagneten



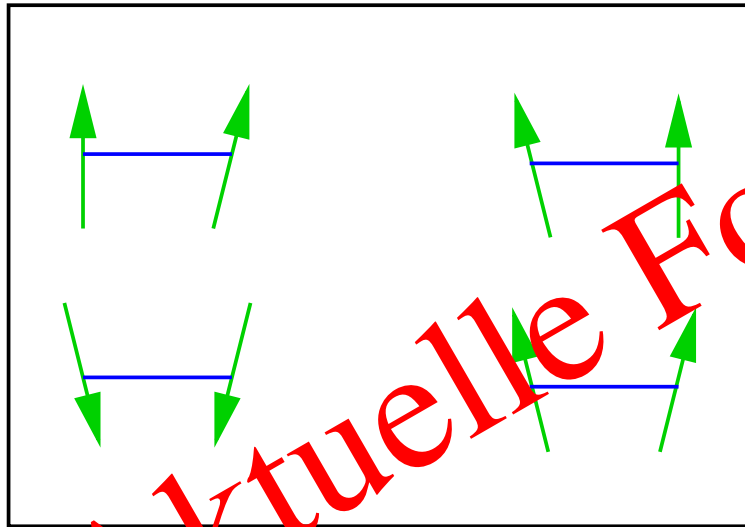
- Paramagnet: $S(T, B) = f(T/B) \Rightarrow$ Adiabaten sind Geraden durch den Ursprung.

Für Physikstudenten: MCE bei ferromagnetischen Dimeren

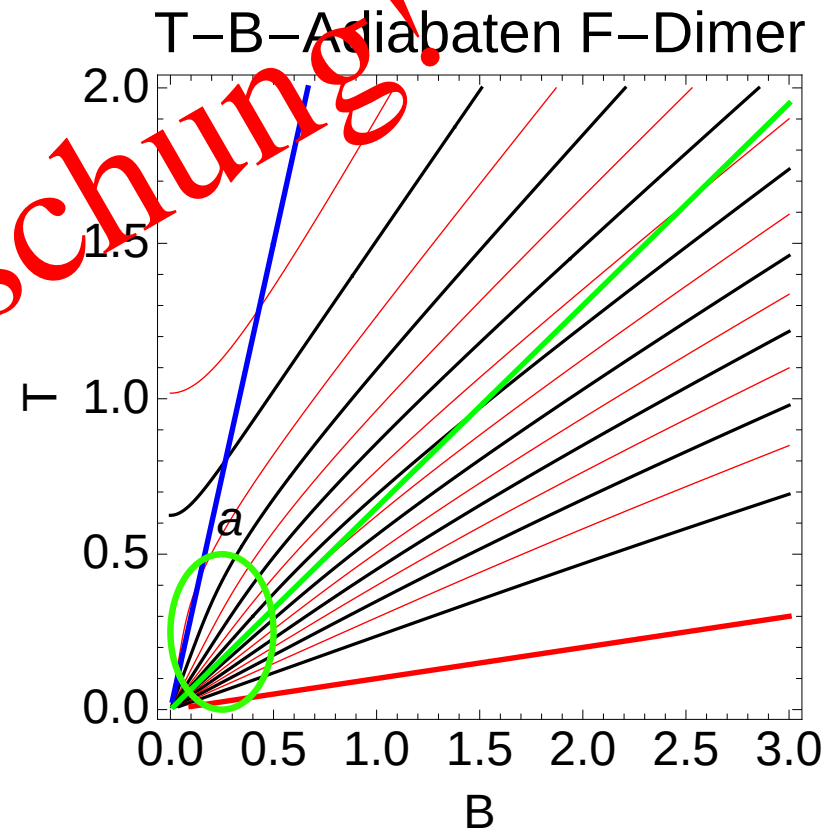


- Die ferromagnetische Wechselwirkung kann den Anstieg bei $B = 0$ vergrößern.

Für Physikstudenten: MCE bei ferromagnetischen Dimeren

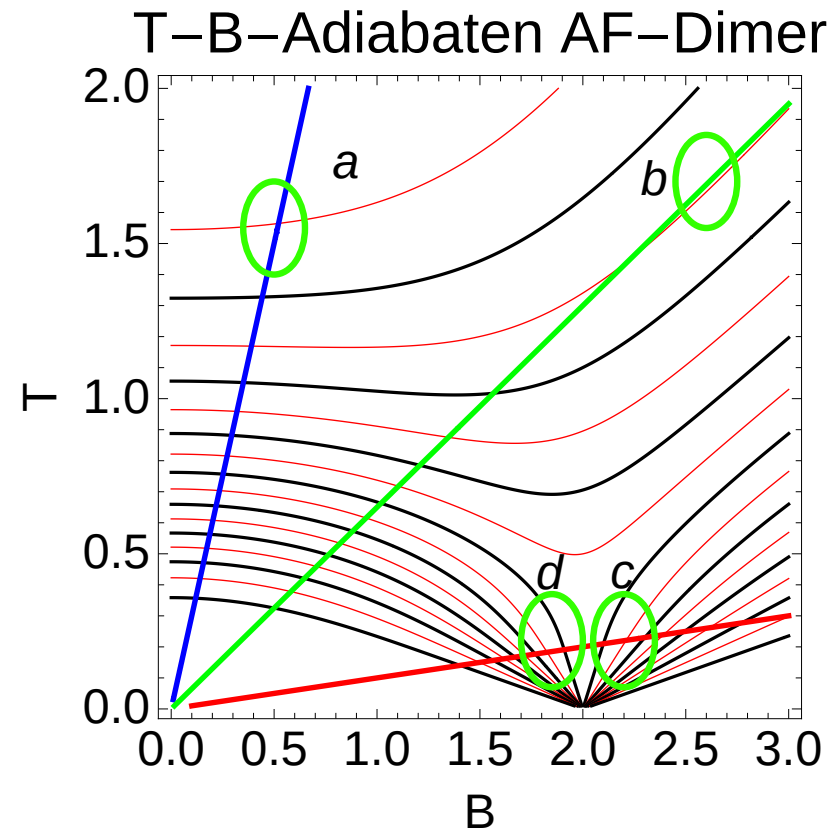
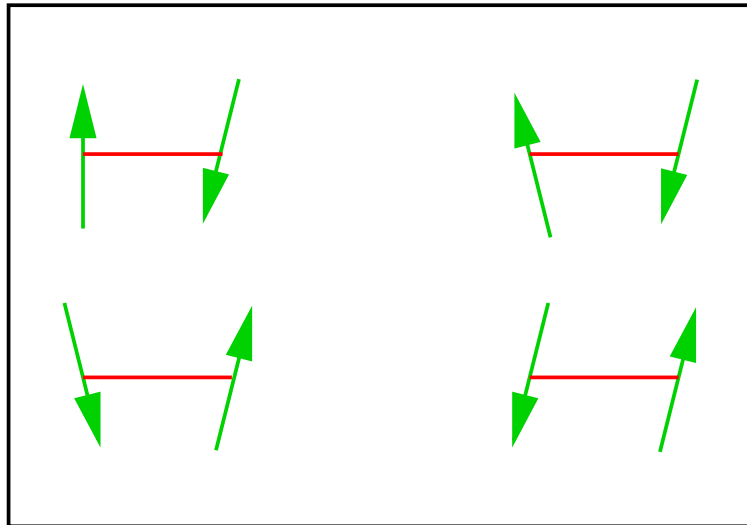


Aktuelle Forschung!



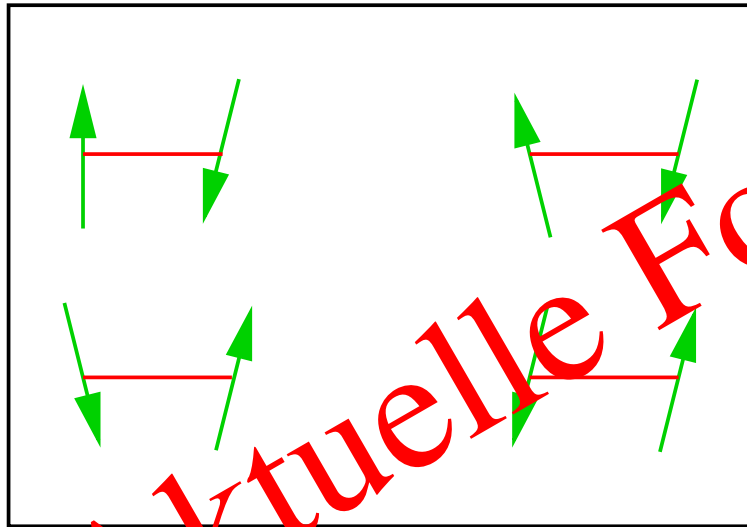
- Die ferromagnetische Wechselwirkung kann den Anstieg bei $B = 0$ vergrößern.

Für Physikstudenten: MCE bei antiferromagnetischen Dimeren

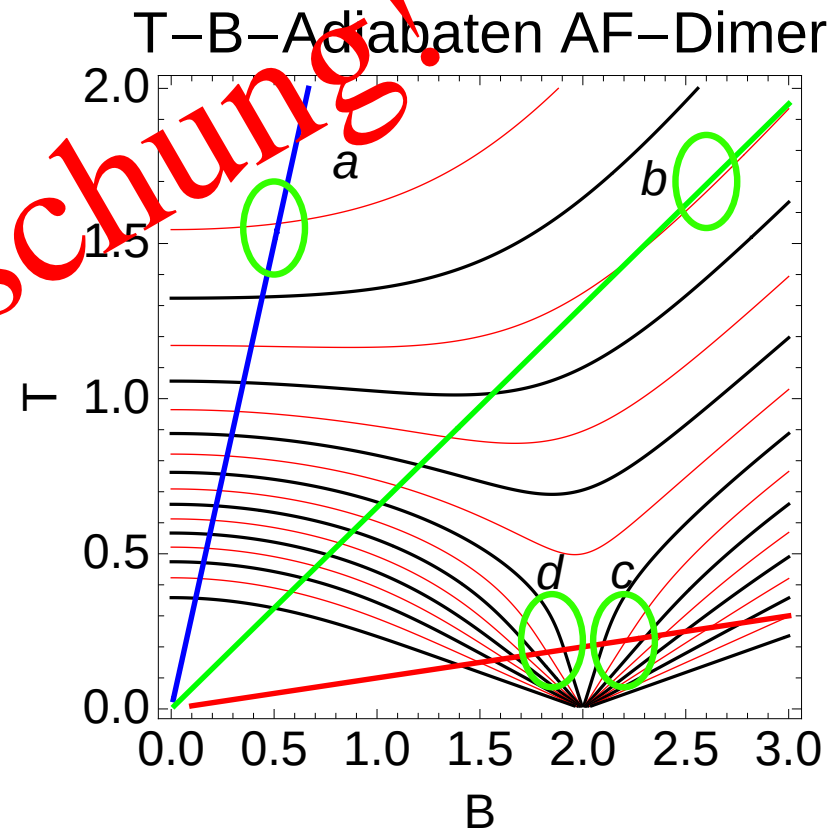


- Die antiferromagnetische Wechselwirkung führt zu hohen Kühlraten bei Feldern $B \neq 0$.

Für Physikstudenten: MCE bei antiferromagnetischen Dimeren

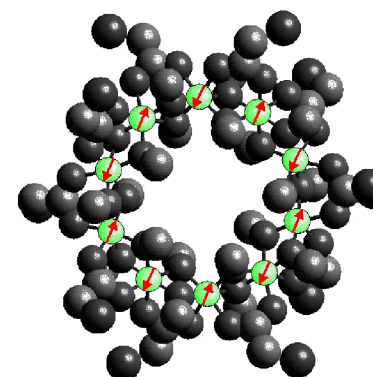
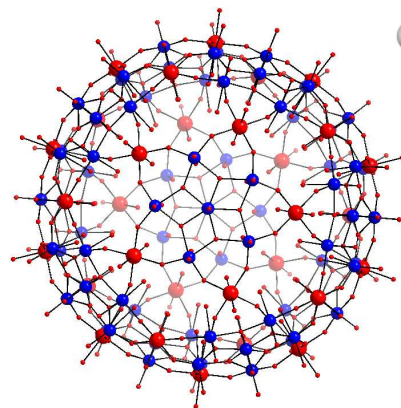
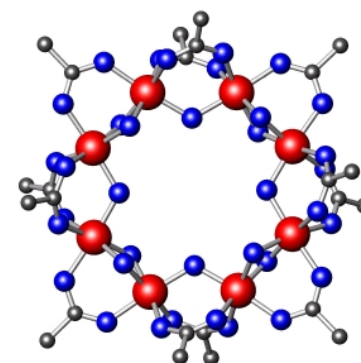
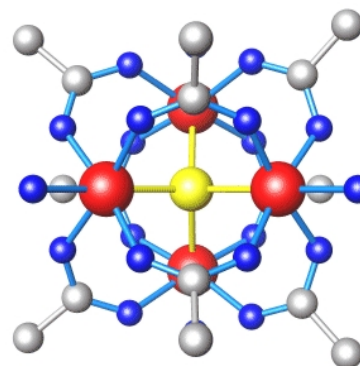
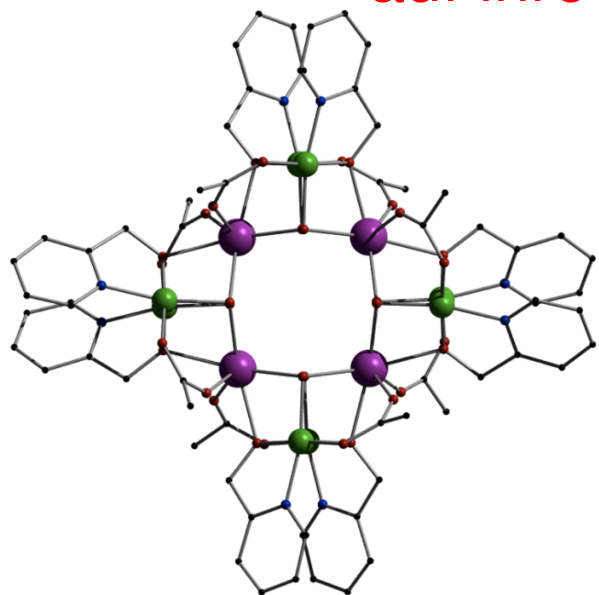


Aktuelle Forschung!



- Die antiferromagnetische Wechselwirkung führt zu hohen Kühlraten bei Feldern $B \neq 0$.

Wir untersuchen magnetische Moleküle auf ihre magnetokalorischen Eigenschaften ...

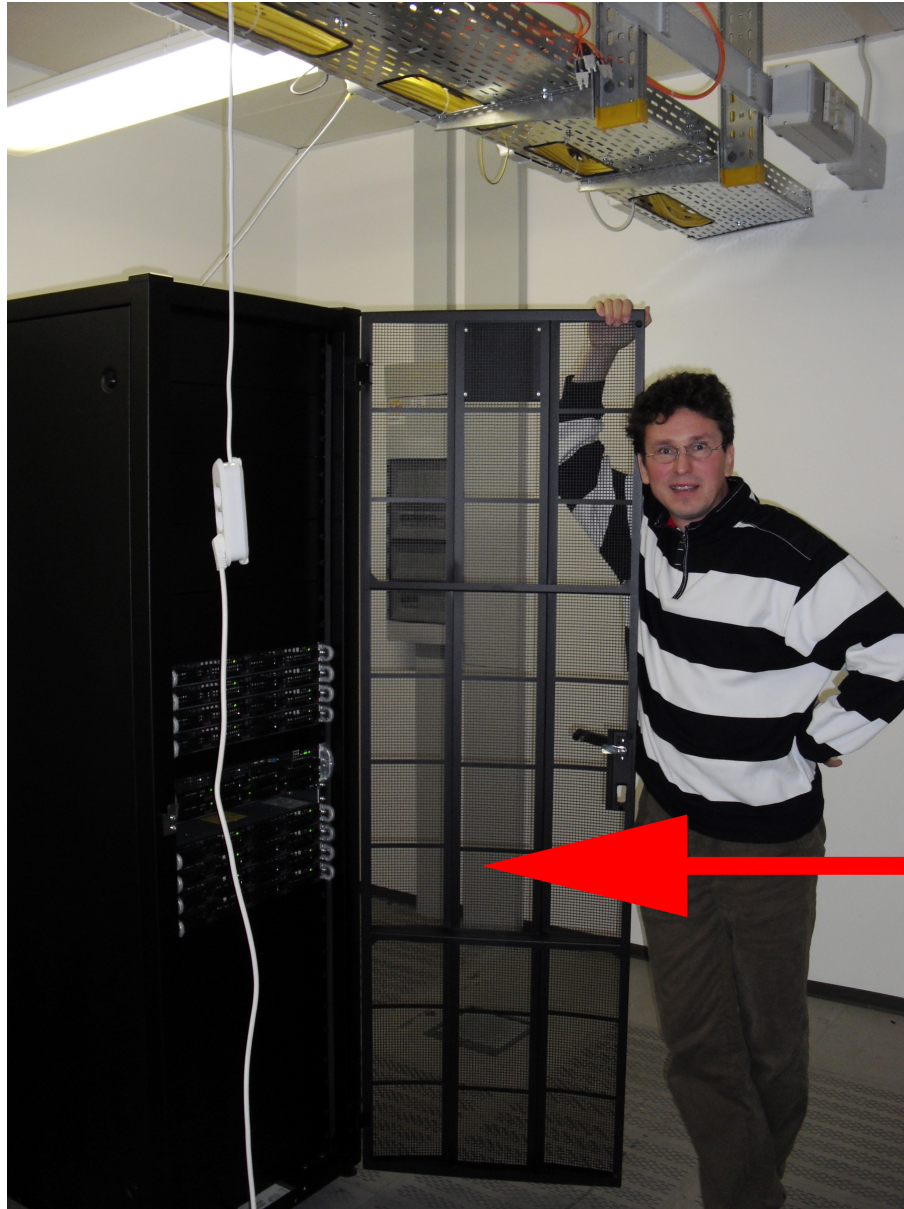


... mit mächtigen Computern



128 cores, 384 GB RAM

... mit mächtigen Computern



Quantenmechanik: 4. Semester

Thermodynamik: 5. Semester

Sie dürfen auf diesem Computer
spielen: > 8. Semester

128 cores, 384 GB RAM

Manchmal reicht das nicht!

Manchmal muss es einfach die ganz große Lösung sein!



Supercomputer SuperMUC am Leibniz-Rechenzentrum in Garching:
3 PFLOPS/s, mehr als 150,000 Intel-Prozessor-Cores (Xeon E5)
Noch haben wir 2 Millionen CPU-Stunden, aber für Sie würden wir auch neue einwerben.

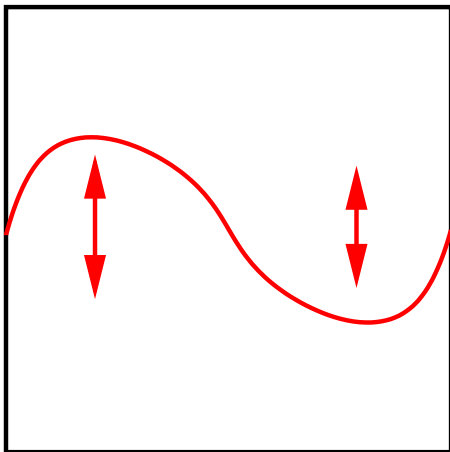
Alles klar?

Ja?

Dann fangen Sie doch
bei uns an!

Wir brauchen Leute,
die uns weiter helfen.
Wir sind nicht mehr so sicher . . .

Moderne Thermodynamische Statistik



- Temperatur ist eine Eigenschaft des thermischen Gleichgewichts
- Thermisches Gleichgewicht z.B. durch Mischen
- Aber, existiert das thermische Gleichgewicht überhaupt?
- Entropie S steigt bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts (Zeitpfeil)
- Fundamentale physikalische Gesetze sind zeitumkehrinvariant!
- Wie äquilibrieren kleine abgeschlossene Quantensysteme?

Das war's:
Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit

(Sie haben's geschafft!)

Molecular Magnetism Web

www.molmag.de

Highlights. Tutorials. Who is who. Conferences.