

Messung der Magnetisierung

1. Faraday-Waage

Energie des magn. Moments im Feld B_0

$$E = -m \cdot B_0$$

Im inhomogenen Feld $B_0(z)$ wirkt Kraft

$$\vec{F}_z = -m_z \frac{dB_0}{dz}$$

Hauptspule B_0 konst.

Gradientenspule B_1

Oben $B_0 - B_1$

Unten $B_0 + B_1$

B_0, B_1 unabh.
einstellbar

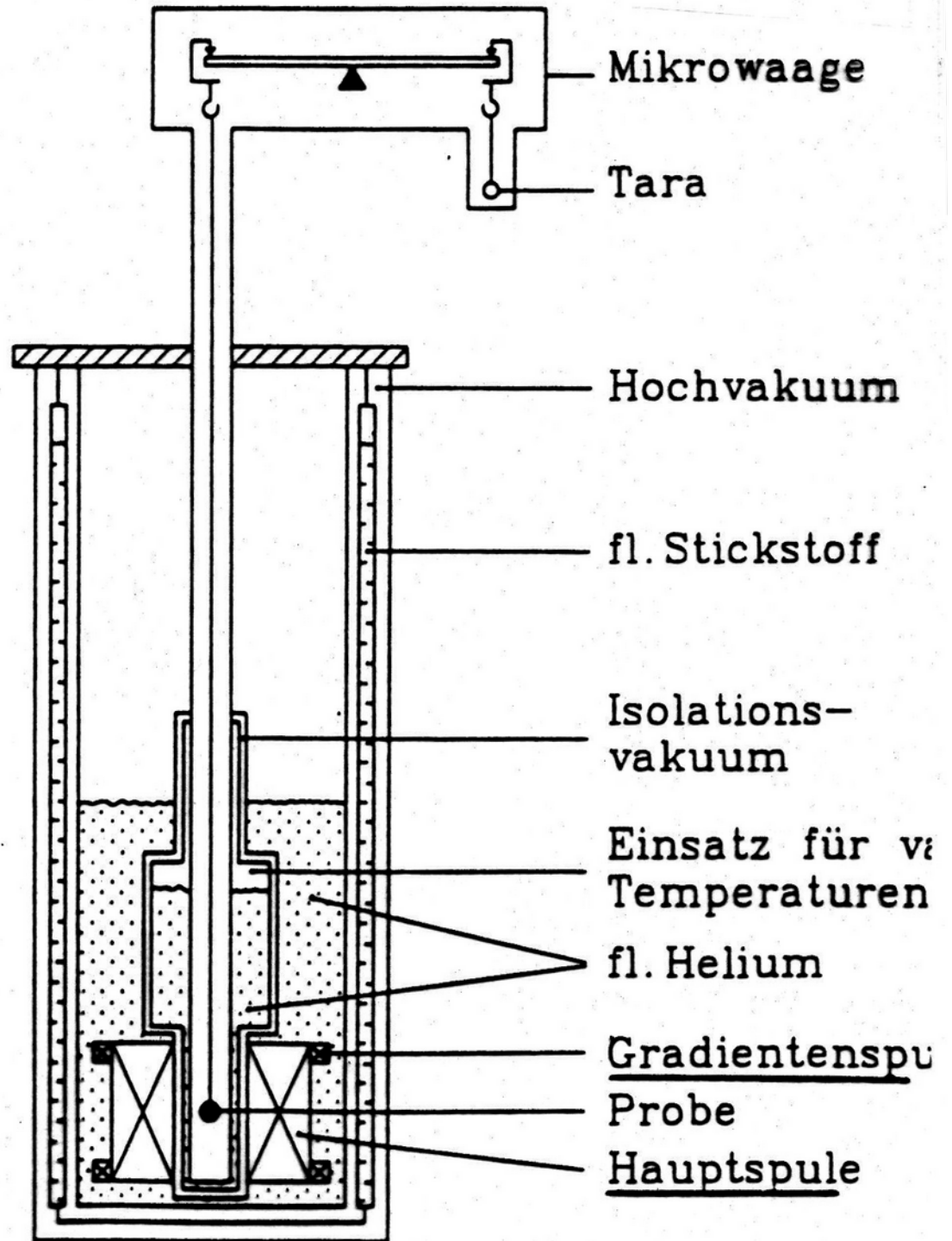
γ variabel

Empfindlichkeit

$$F_z = 1 \mu\text{g} \cdot 10 \text{m/s}^2$$

$$\frac{dB_0}{dz} = 10 \text{T/m}$$

$$\Rightarrow M_{\text{min}} = 10^{-10} \text{J/T}$$



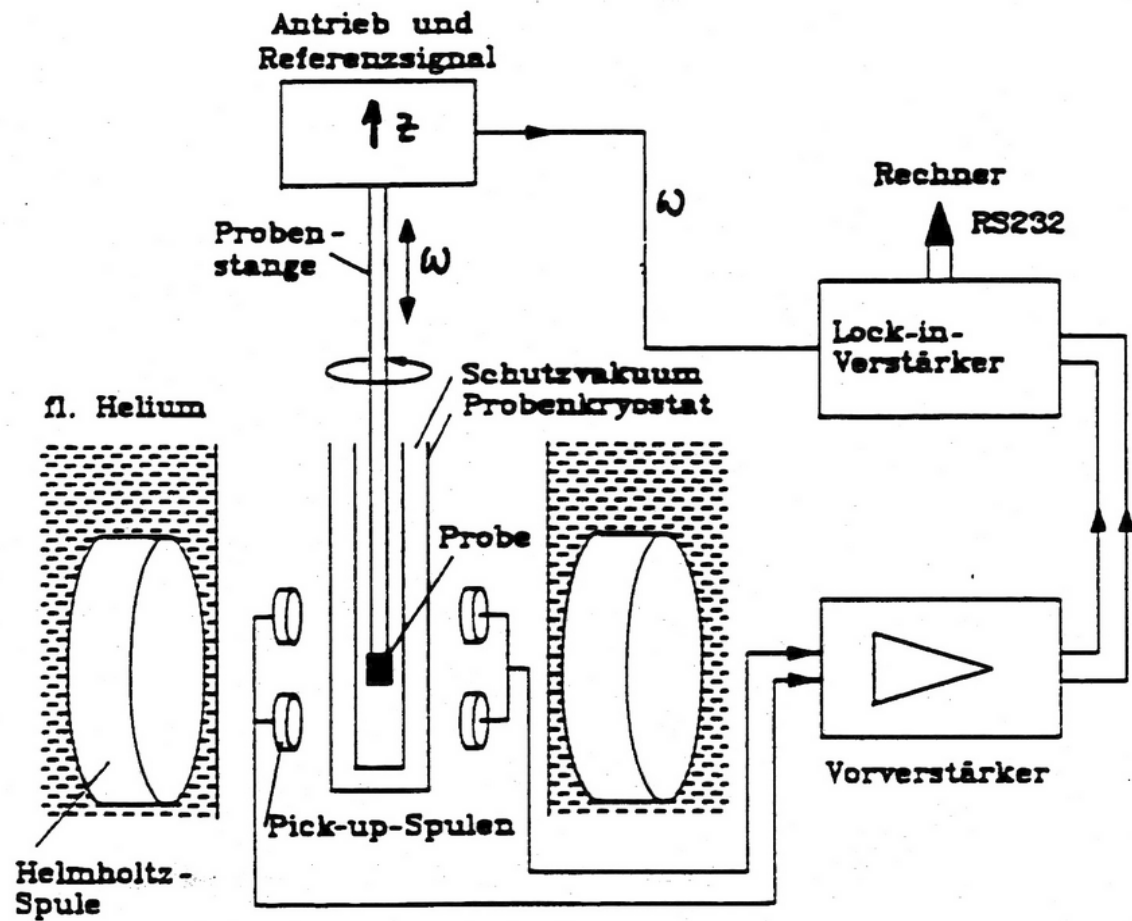
Vibrationsmagnetometer

Probe vibriert in Spule

$$|U| = w F \frac{d}{dt} B_z$$

(Windungszahl Fläche)

$$\text{Dipolfeld: } \mu_0 m / (2\pi z^3)$$



5T

$$z = z_0 + \Delta \sin \omega t$$

$$\rightarrow U = w F \mu_0 \frac{m}{2\pi} \frac{3}{2z_0^4} \Delta \omega \cos \omega t$$

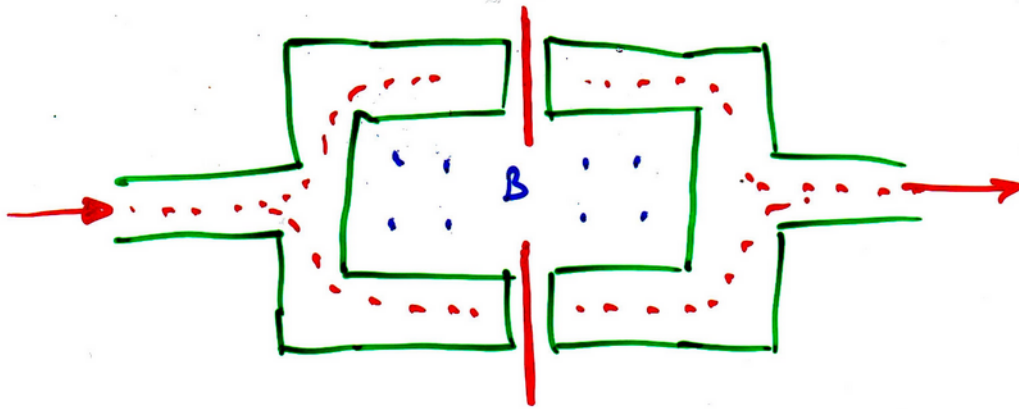
2000 cm^2 0.15 cm $2\pi \cdot 44 \text{ Hz}$
 $U_{\min} = 10 \mu\text{V} \Rightarrow m_{\min} \approx 10^{-8} \text{ J/T}$

$\frac{d\Delta}{dz}$ $\frac{d\Delta}{dz}$

Nachteil: Geometrieabhängig
 → keine Absolutmessungen
 → gut für Relativwerte

SQUID

(später en détail..)



Interferenz der Supraströme

Phase \leftrightarrow B

Extrem empfindliche Messung von B

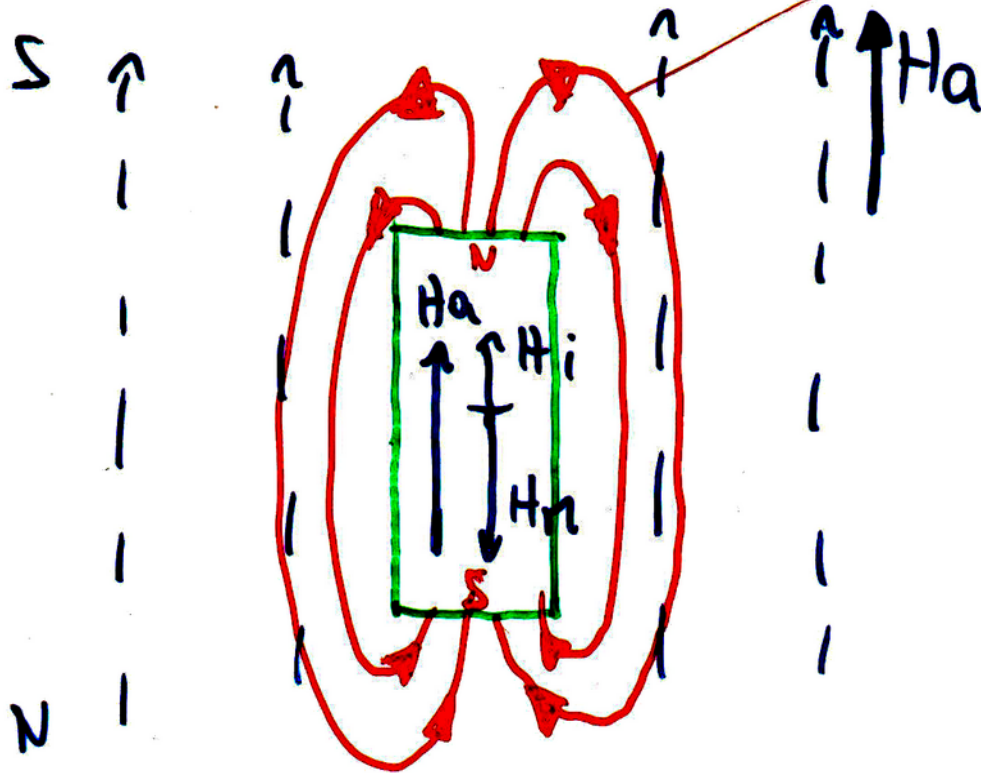
$$m_{\min} : 10^{-13} \text{ Am}^2$$

$$1 \text{ Monolage Fe} : 10^{-8} \text{ Am}^2 \\ 5.5 \text{ nm}^2$$

$$\text{SQUID 1988} : 10^{-14} \text{ T}$$

Entmagnetisierung

H-Feld des Stabes



Magnetisierung
 $\hat{=}$ internes Feld
 $\hat{=}$ $H_m \downarrow \uparrow H_a$

$$M = \frac{\chi H_a}{1 + N \chi}$$

Spezialfälle einfacher Körper:

$$M = \frac{\chi H_a}{1 + N \chi}$$

Kugel

$$N_x = \frac{2}{3}$$

Zylinder $\parallel z$

$$N_x = N_y = \frac{1}{2}$$

$$N_z = 0$$

Platte (∞ in x, y)

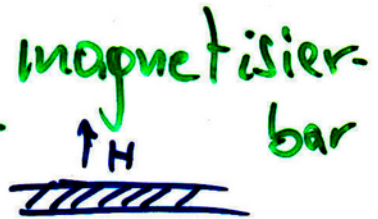
$$N_x = N_y = 0$$

$$N_z = 1$$

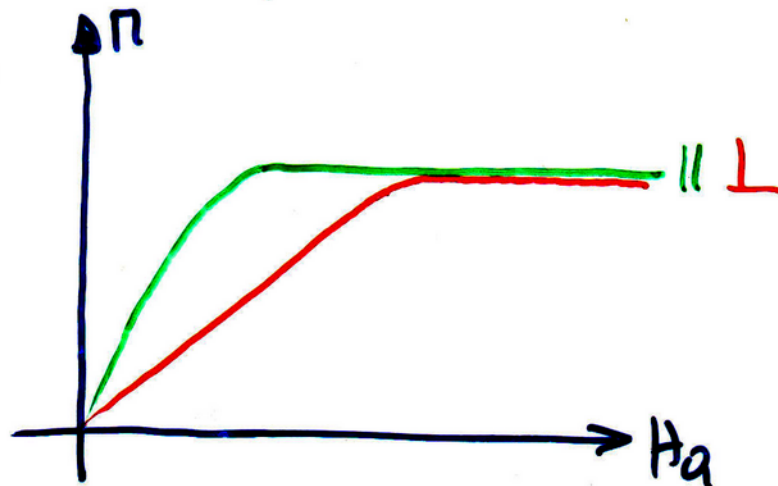
Konsequenz: Filme

$H_a \parallel$ Filmebene: $M_{\parallel} = \chi H_a \rightarrow$ leicht

$H_a \perp$ Filmebene: $M_{\perp} = \frac{\chi}{1+\chi} H_a \rightarrow$ schwer



\Rightarrow Formanisotropie



RECORDING!

Kühlung mit adiabatischer Entmagnetisierung

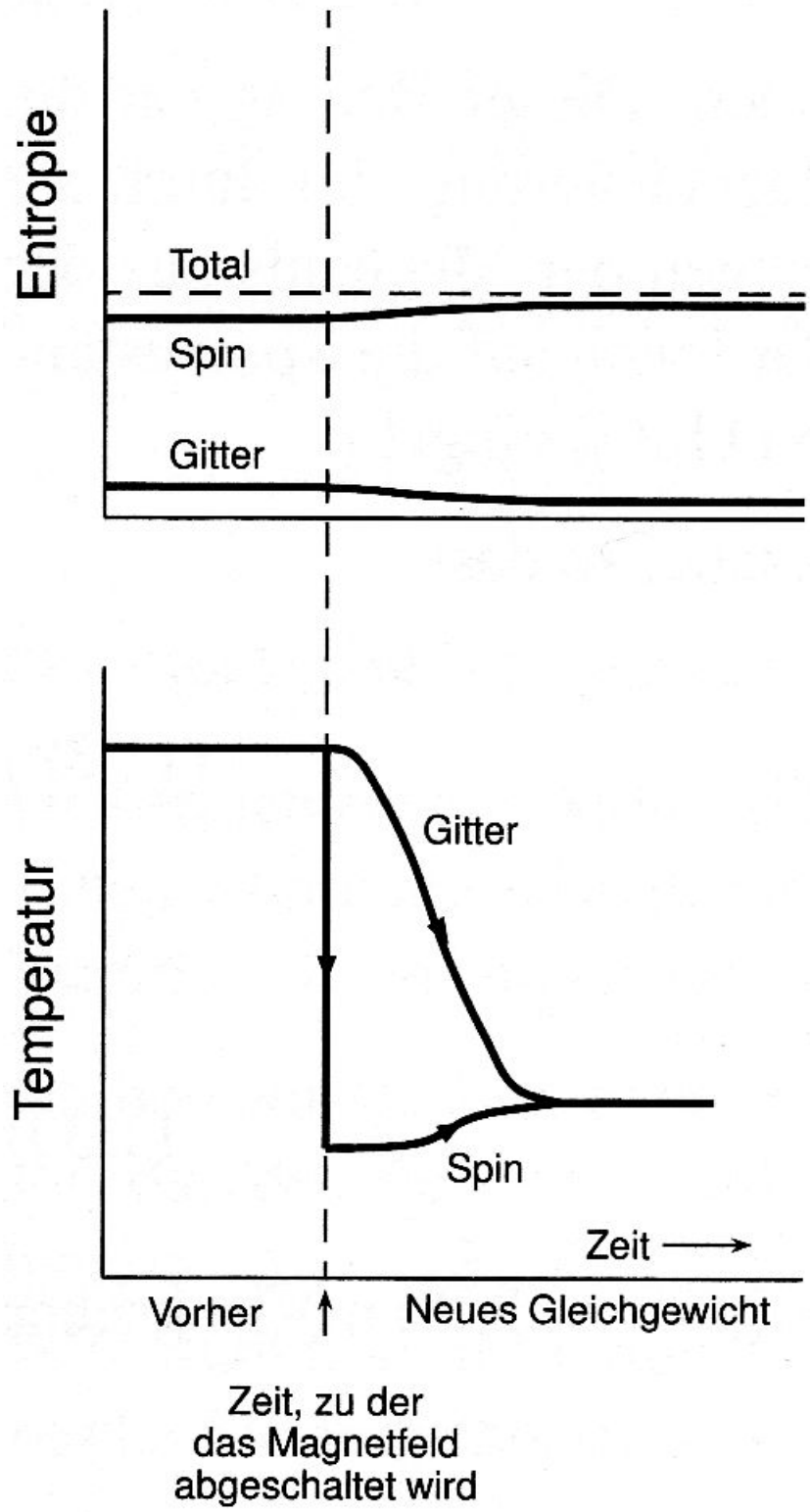
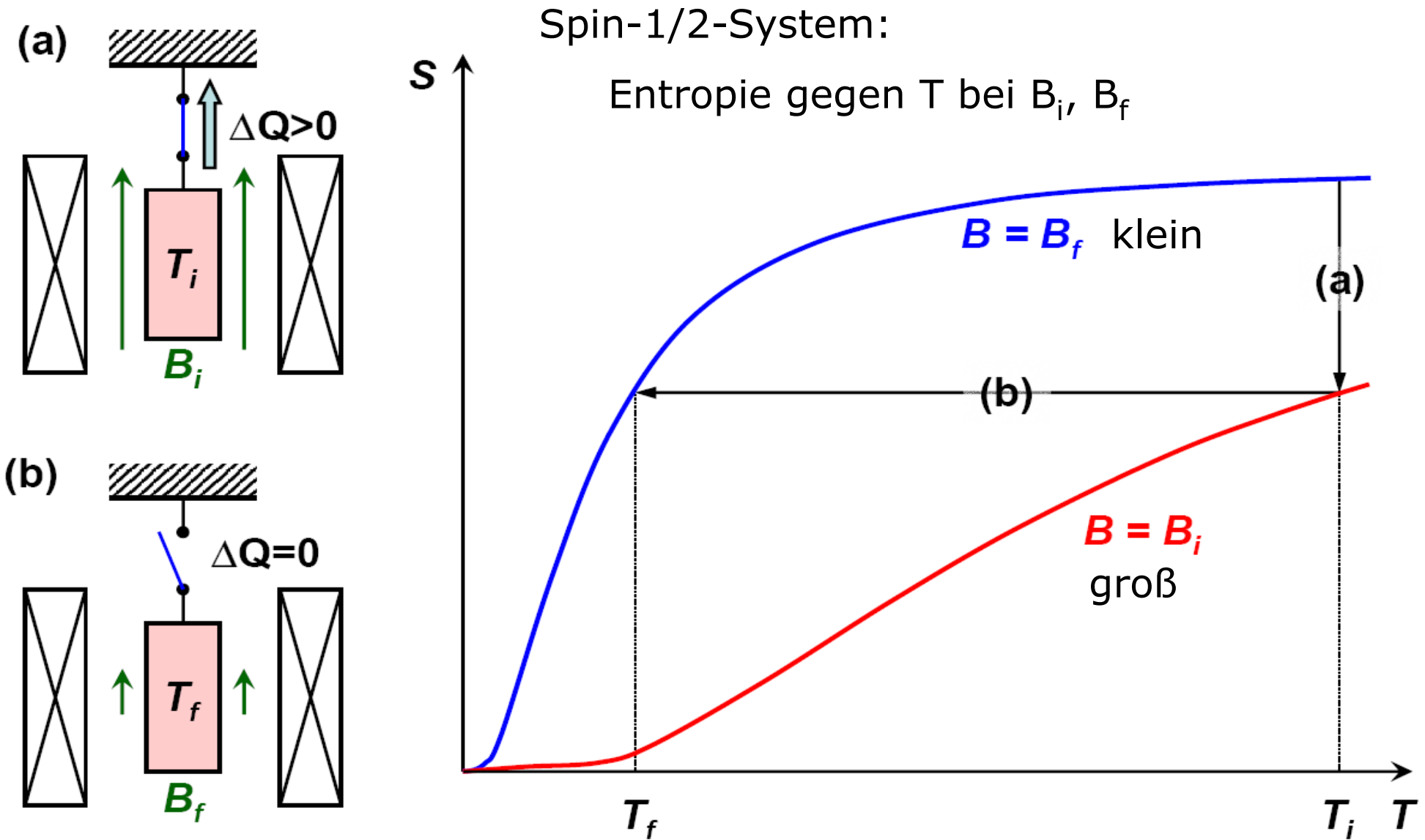


Bild 11.7: Während der adiabatischen Entmagnetisierung bleibt die Gesamtentropie der Probe konstant. Um eine effektive Kühlung zu erreichen, sollte die Anfangsentropie des Gitters klein im Vergleich zur Entropie des Spinsystems sein.

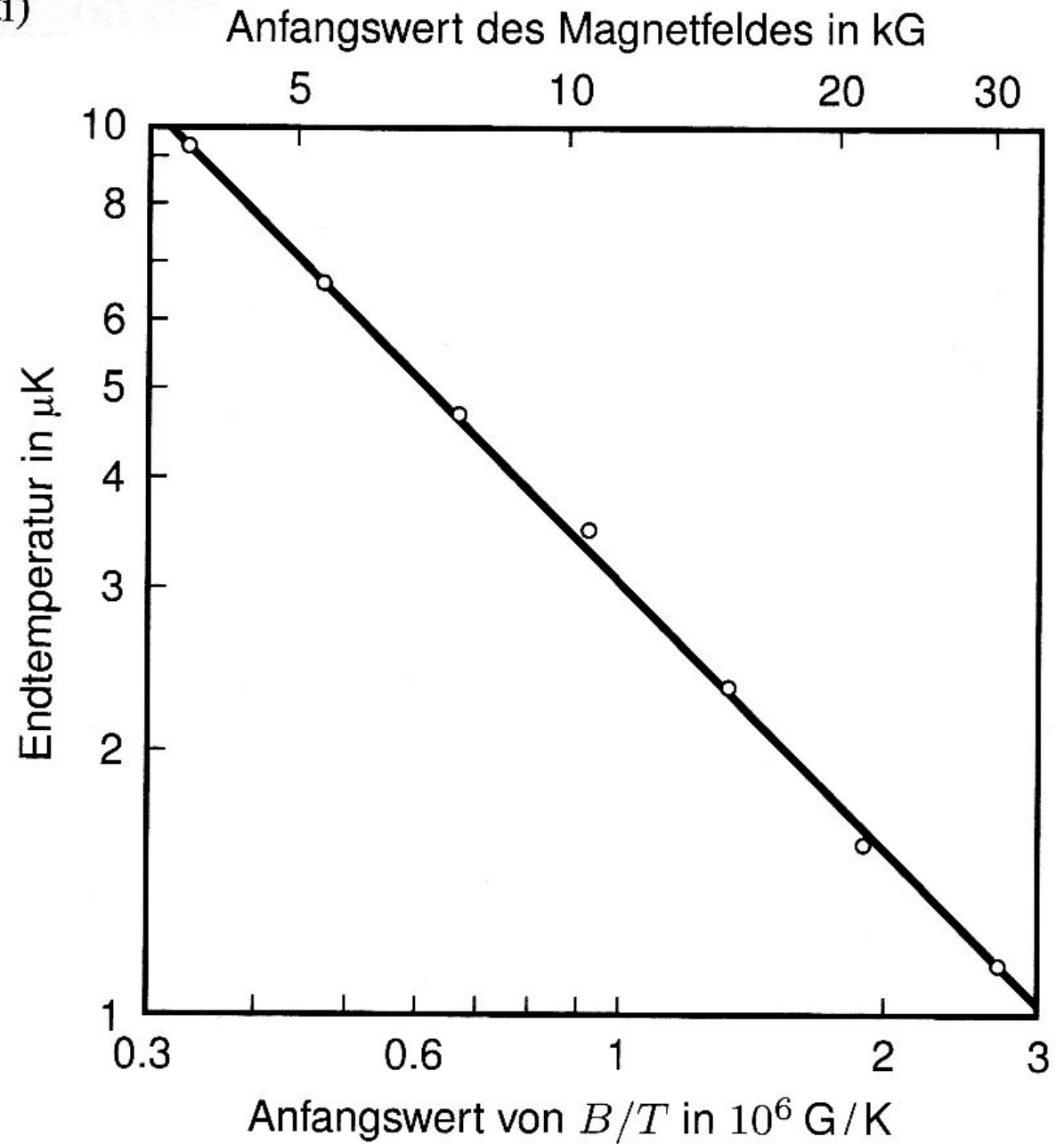
Kühlung mit adiabatischer Entmagnetisierung



(a) paramagnetisches Salz an Wärmesenke gekoppelt

(b) Wärmeschalter offen; Entmagnetisierung bei $\Delta S = \Delta Q/T = 0$

Bild 11.9: Kernentmagnetisierung von Kupferkernen im Metall bei einer Anfangstemperatur von 0,012 K und verschiedenen Anfangsfeldstärken. (Nach M.V. Hobden und N. Kurti)



Microkelvin refrigerator 1998

Magnetic fields up to 7 T

1999: nuclei of single crystal rhodium

sample cooled to 250 pK

<http://boojum.hut.fi>



Ultra-low temperature measurements (μK)

Frank Pobell: Matter & Methods at Low Temperatures

e. g.

Curie law: $\chi \sim B/T$

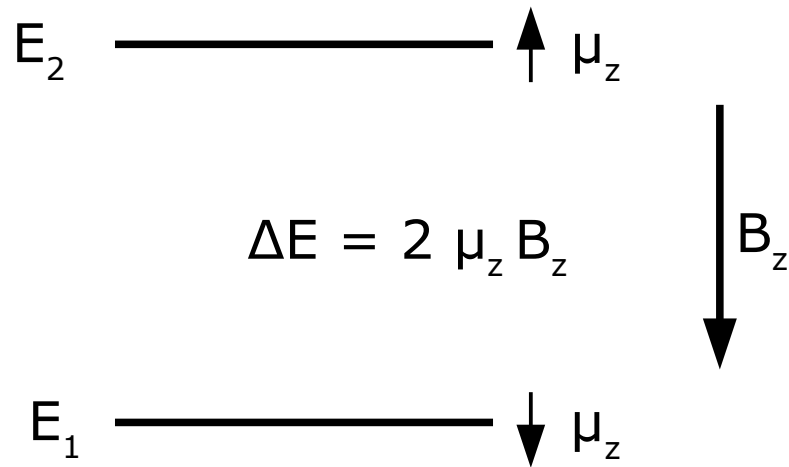
electron spins, nuclear spins

Voltage noise ($\langle U^2 \rangle_t = 4 k_B T R \Delta f$)

Anisotropy of γ -rays (nuclear magnets oriented in external B-field)

pK ?

Kernspinresonanz (NMR)



NMR-Spektrometer für chemische Strukturanalyse

$B = 7 \dots 21 \text{ T}$ ergibt

Larmorfrequenz ^1H 300 ... 900 MHz

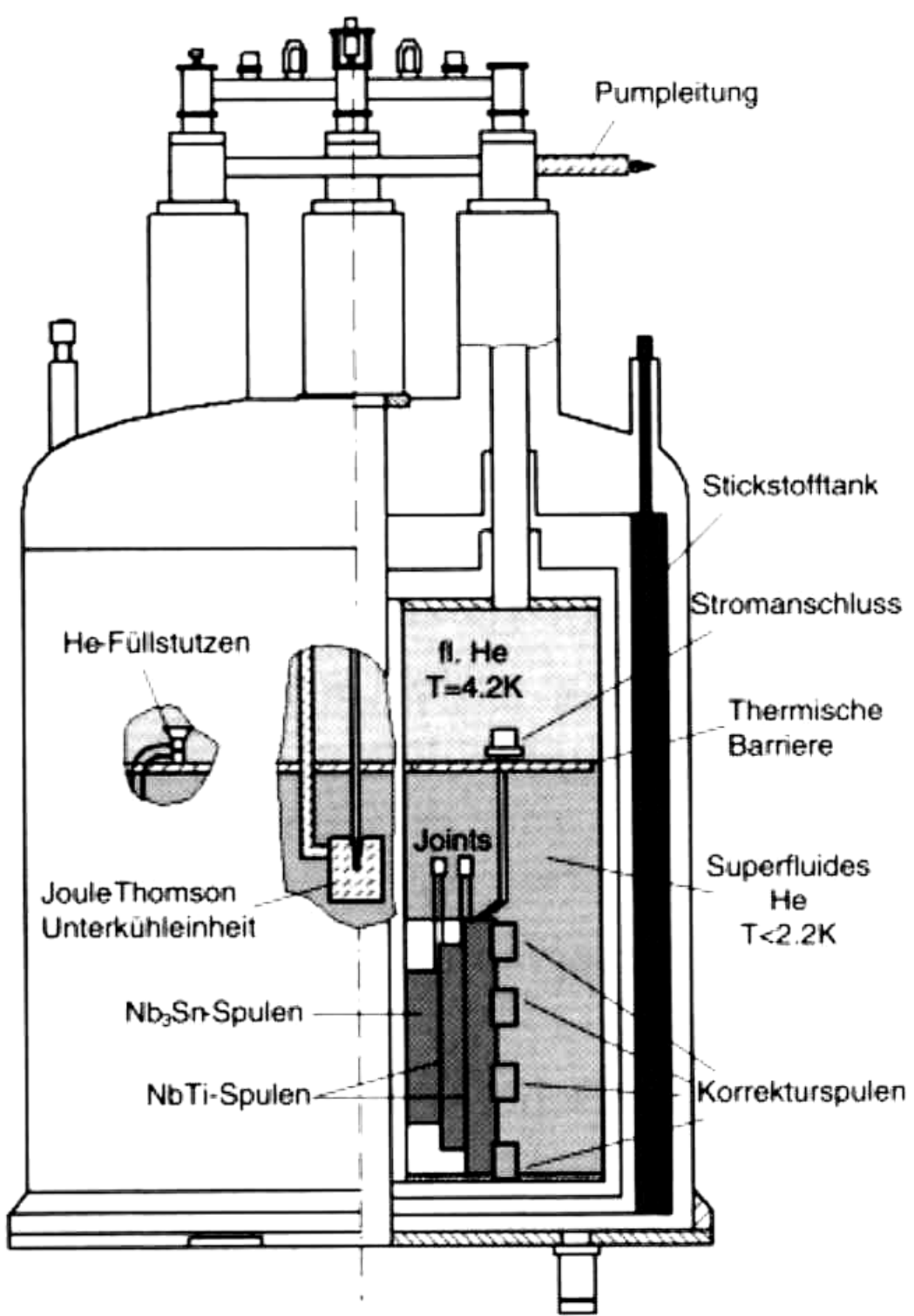
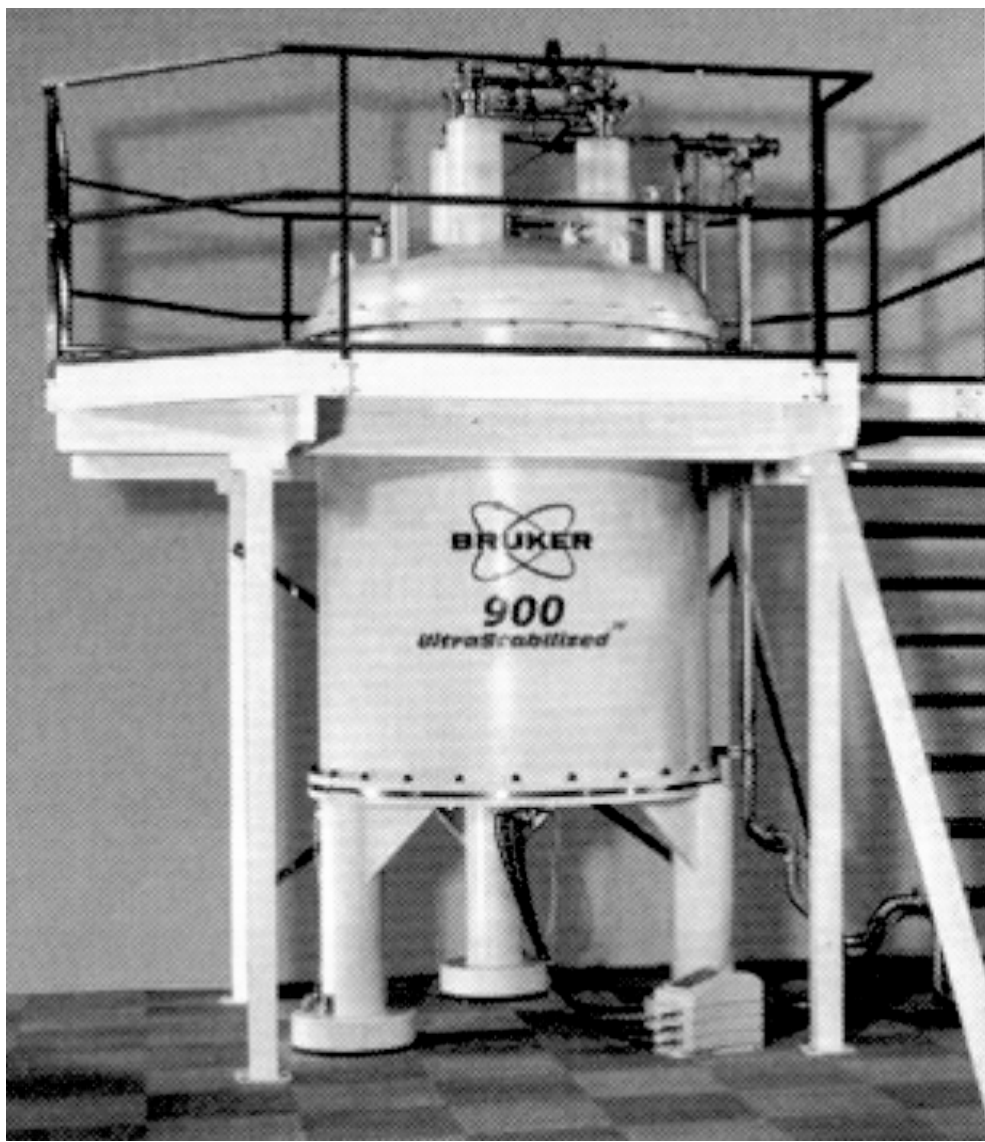


Abb. 7.13 NMR-Spektrometer: (a) Modernes 900 MHz NMR-Spektrometer mit hochhomogenem 21,1 T Magnetfeld, (b) prinzipieller Aufbau eines mit superfluidem Helium gekühlten NMR-Magnetsystems.

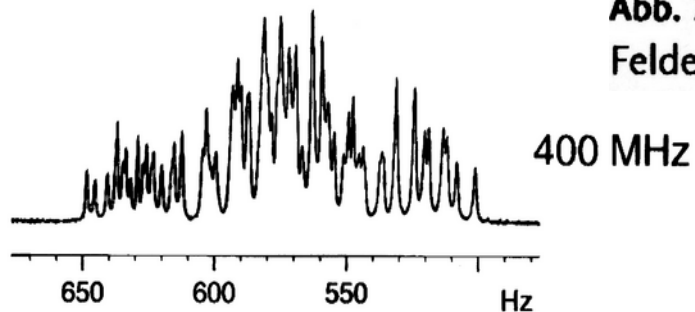
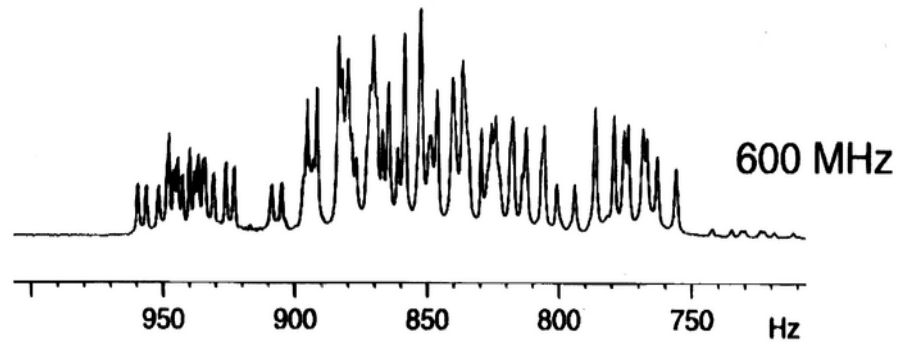
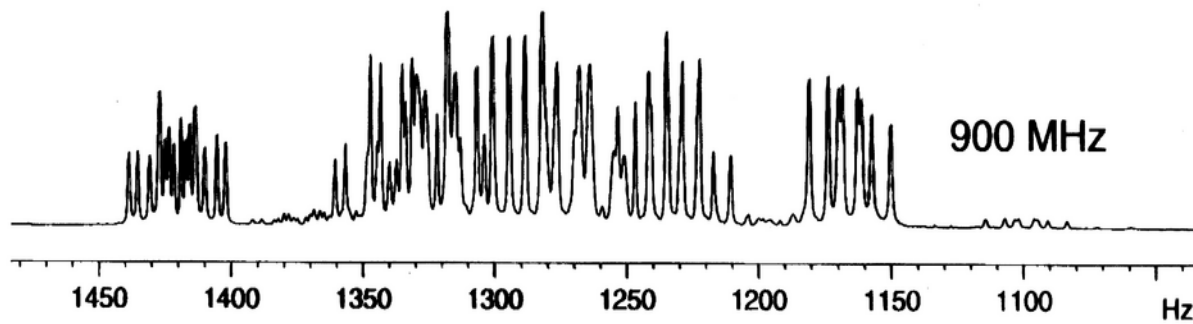


Abb. 7.12 Vergleich der NMR-Spektren von Oestradiol-acetate in Feldern von 9,4 T (unten), 14,1 T (Mitte) und 21,1 T (oben).

- Peak positions: Chemical shifts
- Intensities: Concentrations
- Line widths: Relaxation times
 - longitudinal: Spin-lattice-relaxation
 - transverse: Spin-spin relaxation

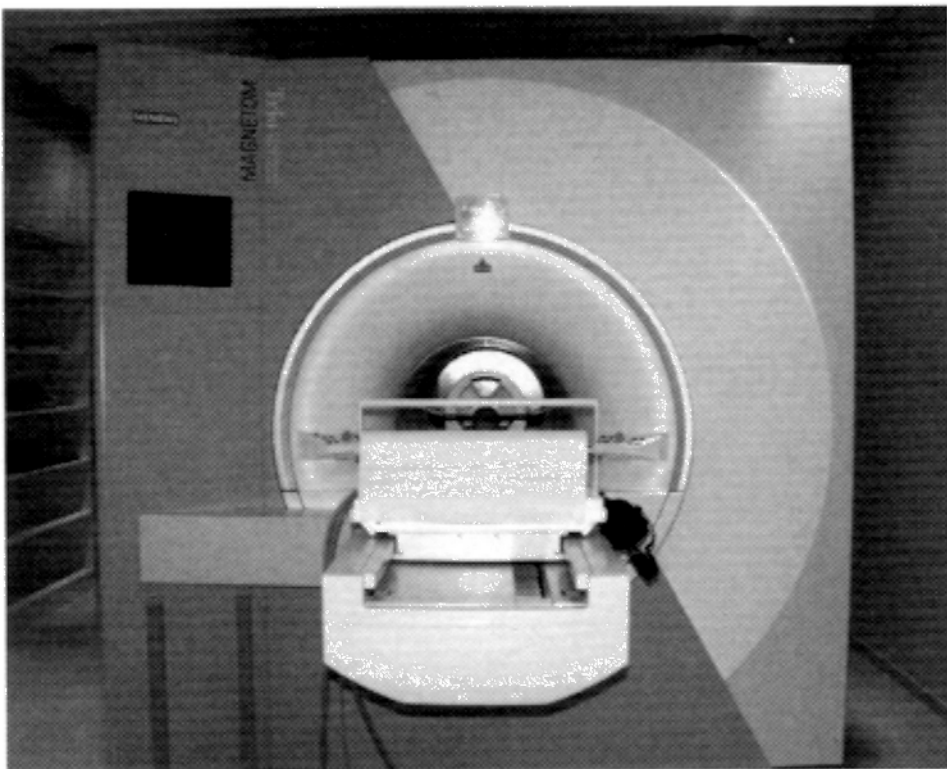


Abb. 7.14 Blick in den an der Radiologischen Klinik der Universität Tübingen installierten 3T-Ganzkörper-Kernspintomographen mit supraleitendem Magneten (Siemens Magnetom Trio). Im Vordergrund ist der Behandlungstisch zu sehen, der in die Röhre des Tomographen eingeschoben wird. (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung der Radiologischen Klinik der Universität Tübingen).



Abb. 7.15 Kernspintomogramm eines Gehirns. (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung der Radiologischen Klinik der Universität Tübingen).