

Magnetometrie mit Kernresonanzverfahren (NMR)

Die Messung magnetischer Felder mit Kernresonanzverfahren („nuclear magnetic resonance“, NMR) basiert auf dem linearen Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte B und der Präzessionsfrequenz ω_p , mit der magnetische Kernmomente um den Vektor von B rotieren, entsprechend

$$B = \omega_p / \gamma_p$$

wobei γ_p als der gyromagnetische Koeffizient – der Quotient des magnetischen Momentes und des Kernspins – bezeichnet wird. Die gyromagnetischen Koeffizienten für bestimmte Atomkerne sind sehr genau bekannt. Als Fundamentalkonstante ist zum Beispiel der gyromagnetische Koeffizient für Protonen im Wassermolekül nur mit der geringen relativen Unsicherheit von $1,3 \cdot 10^{-8}$ behaftet. Daher ist die Frequenz von Atomkernen, die in magnetischen Gleichfeldern präzedieren, zurzeit der genaueste Maßstab zur Messung magnetischer Felder.

Kernresonanzmagnetometer nach dem Absorptionsverfahren für Magnetfelder ab 1 mT

In der PTB dient zum Nachweis der magnetischen Kernresonanz bei mittleren Feldstärken die Energieabsorption durch die Kerne, die zur Bedämpfung der Amplitude eines schwach schwingenden „Marginaloszillators“ führt. Die Kernprobe befindet sich in der Schwingkreisspule des Oszillators und absorbiert Energie, wenn die Oszillatorfrequenz mit der durch das Magnetfeld und den gyromagnetischen Koeffizienten bestimmten Präzessionsfrequenz der Kerne übereinstimmt. Mit der Protonenresonanz in schwach paramagnetischen Wasserlösungen können Felder um 2mT mit einem Signal / Rausch-Verhältnis von 10 präzise gemessen werden. Mit einem Probenvolumen von 1 cm^3 und bei einer Absorptionslinienbreite von $2 \mu\text{T}$ sind Messungen mit einer Auflösung von 5 nT bei einer Messzeit von 2 s möglich.

Mit dem Kernresonanzmagnetometer werden Magnetometer kalibriert, die auf anderen physikalischen Effekten beruhen, z.B. Hall-Sensoren oder Saturationskernmagnetometer. Im Bereich von 1 mT bis 100 mT können auch Feldspulen, die als Normale bei der Produktion von Magnetfeldsensoren eingesetzt werden, mit einer relativen Unsicherheit von weniger als 10^{-4} kalibriert werden.

Kernresonanzmessungen nach dem Verfahren der freien Präzession für Magnetfelder ab 1 nT

Bei niedrigen Feldstärken und wenn die Relaxationszeiten ausreichend lang sind, erhält man NMR-Signale ausreichender Dauer und geeigneter Frequenz, um sie mit dem Verfahren der freien Präzession zu detektieren. Mit dieser Methode lassen sich Flussdichten im Bereich von 1 nT bis etwa 2 mT messen. Dazu wird eine hochreine Wasserprobe mit einem Feldimpuls (20 mT Amplitude, 10 s Dauer) polarisiert. Danach wird die Probe kurzzeitig mit einem Wechselfeld resonant angeregt. Damit wird eine anfängliche Gleichphasigkeit der einzelnen Kernmomente hergestellt. Nach Abschalten des Wechselfeldes misst man eine exponentiell abfallende Wechselfeldspannung, deren Frequenz als Maß für die magnetische Flussdichte in der Wasserprobe registriert wird.

Näheres zu magnetischen NMR-Messmethoden in:

Landolt-Börnstein: Units and Fundamental Constants, Subvolume a: Units
S. 2-275: Quantum effect sensors
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1991

Ansprechpartner: Hans Harcken, Rainer Ketzler