

Fortgeschrittenen Praktikum Teil 2: PI

Versuch 4: Magnetische Resonanz

Betreuer: Paul Eibisch

Gruppe 1: Reinhold Kaiser, Florian Stoll

09.07.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theoretische Grundlagen	3
3	Aufbau und Durchführung	6
4	Ergebnisse und Auswertung	8
5	Anwendungen der NMR	10
5.1	NMR in der Medizin (MRT)	11
5.2	NMR in der Chemie (Strukturanalyse)	12
5.3	NMR in der Festkörperphysik	12
6	Zusammenfassung/Fazit	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch geht es darum, verschiedene Proben mit der Methode der magnetischen Kernresonanz, auf englisch Nuclear Magnetic Resonance (NMR), zu untersuchen. Die NMR ist die herausragende Technik um die Struktur organischer Komponenten zu bestimmen [Eib18]. Aber auch andere Proben, die molekularer oder kristalliner Form sind, können mit Hilfe der NMR untersucht werden. Der große Vorteil der NMR ist, dass die Probe bei der Untersuchung nicht zerstört wird, weswegen sie auch Anwendung in der Medizin findet.

In unserem Fall wird die NMR dazu genutzt, für zwei unterschiedliche Proben (Kupfersulfat und Teflon) die gyromagnetischen Verhältnisse und die Landé-g-Faktoren zu bestimmen. So kann auch geklärt werden, welcher Kern oder welche Kerne der Probe auf die NMR reagieren. Das Magnetfeld, was an die Proben angelegt wird, muss dafür kalibriert werden. Es wird Glycerin untersucht, dass ein bekanntes gyromagnetisches Verhältnis hat, woraus dann auf das Magnetfeld an der Probe geschlossen werden kann.

2 Theoretische Grundlagen

Die grundlegende Eigenschaft für den vorliegenden Versuch ist der Spin. Als rein quantenmechanische Eigenschaft besitzt der Spin kein klassisches Analogon und kann zwar mit dem Eigendrehimpuls eines Körpers verglichen aber nicht gleichgesetzt werden. Wichtige Unterschiede liegen vor allem in der Quantelung des Spins und in der fehlenden räumlichen Ausdehnung der quantenmechanischen Teilchen wie z.B. dem Elektron. Der Spin eines Teilchens lässt sich über zwei Kenngrößen beschreiben, wobei man üblicherweise die z-Komponente und den Betrag des Spin-Vektors auswählt. Im Fall eines Spins I lauten diese:

$$|I| = \sqrt{I(I+1))} \hbar^2 \quad (1)$$

$$I_z = m_I \hbar \quad (2)$$

$$m_I \in [-I, I] \quad (3)$$

Über die magnetische Quantenzahl m_I ergeben sich dann $2I + 1$ verschiedene Einstellungsmöglichkeiten, die jedoch in Abwesenheit externer Felder alle energetisch entartet sind.

Wie jeder Drehimpuls geladener Teilchen ist natürlich auch der Spin mit einem magnetischen Moment verbunden, über das er z.B. mit einem externen Magnetfeld wechselwirken kann. Den teilchenabhängigen Proportionalitätsfaktor zwischen Spin und magnetischem Moment bezeichnet man als gyromagnetisches Verhältnis γ . Dieses ist schon in klassischer Rechnung bekannt und ergibt sich im Fall eines Elektrons mit Ladung $-e$, Masse m_e und klassischem Bahndrehimpuls L zu:

$$\vec{\mu}_L = \gamma \cdot \vec{L} = \frac{q}{2m} \cdot \vec{L} = \frac{-e}{2m_e} \cdot \vec{L} = -\mu_B \cdot \frac{\vec{L}}{\hbar} \quad (4)$$

Dabei bezeichnet $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ das sogenannte Bohrsche Magneton, eine Naturkonstante.

Das gyromagnetische Verhältnis im Fall des Spins lässt sich prinzipiell nach obigem Beispiel berechnen. Aus Messungen und auch aus relativistischen Quantenmechanik-Rechnungen lässt sich jedoch feststellen, dass obige Gleichung im Fall des Spins noch um den Landé-Faktor g ergänzt werden muss. Dieser ist ebenfalls teilchenabhängig und gibt eine unterschiedlich starkes magnetisches Moment im Bezug auf den Spin an. Im Fall eines Elektrons und eines Atomkerns lautet die Beziehung zwischen den Spins S (Elektronspin) bzw. I (Kernspin) und dem jeweiligen magnetischen Moment wie folgt:

$$\vec{\mu}_S = -\frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \vec{S} \cdot g \quad (5)$$

$$\vec{\mu}_I = \frac{e\hbar}{2m_p} \cdot \frac{\vec{S}}{\hbar} \cdot g \quad (6)$$

Die Größe $\frac{e\hbar}{2m_p}$ bezeichnet man analog zum Bohrschen Magneton als Kernmagneton μ_N . Um auch bei verschiedenen Teilchen weiter mit diesen beiden Naturkonstanten rechnen zu können, definiert man alle Abweichungen von dieser Größe in den jeweiligen g -Faktor des untersuchten Teilchens. Im Fall des Protons beträgt dieser ungefähr: $g \approx 5,586$.

Durch Vergleich der Formeln lässt sich nun das gyromagnetische Verhältnis in Beziehung zum Landé-Faktor g setzen:

$$\gamma = \frac{\mu_N g}{\hbar} \quad (7)$$

Legt man nun ein konstantes externes Magnetfeld in z -Richtung an, koppelt das magnetische Moment eines Kerns an das Magnetfeld und die Entartung der Zustände mit verschiedener Quantenzahl m_I wird aufgehoben. Diesen Effekt bezeichnet man als Zeeman-Effekt, dessen Energien E_Z sich wie folgt berechnet:

$$E_Z = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_N \cdot g \cdot B_0 \cdot m_I \quad (8)$$

$$\vec{B} = B_0 \cdot \vec{e}_z \quad (9)$$

Wie zu erkennen nimmt die Energiedifferenz zwischen den Zuständen linear mit dem angelegten Magnetfeld zu, sodass sich im Fall eines Kernspins $I = \frac{1}{2}$ der in Abbildung 1 dargestellte Verlauf ergibt:

Die Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen ergibt sich weiterhin zu:

$$\Delta E = |E_{m=\frac{1}{2}} - E_{m=-\frac{1}{2}}| = \mu_N \cdot g \cdot B_0 = \hbar \cdot \gamma \cdot B_0 = \hbar \omega_L \quad (10)$$

ω_L bezeichnet dabei die der Energiedifferenz entsprechenden Frequenz, mit der sich Übergänge zwischen den beiden Zuständen anregen lassen. Mit dem Zahlenwert für das Kernmagneton $\mu_N = 5,05 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T}$ wird ersichtlich, dass die so entstehenden Energiedifferenzen sehr klein (ungefähr im μeV -Bereich) liegen.

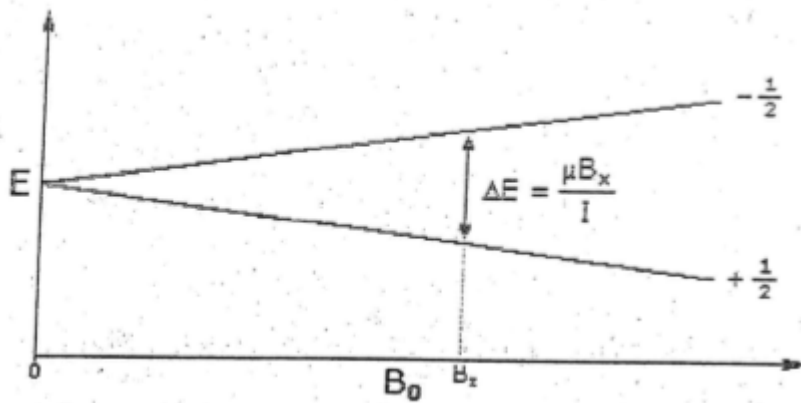


Abbildung 1: Proportionalität der Energiedifferenz zwischen zwei Zeemann-Zuständen [Eib18]

Liegen die Vektoren \vec{I} und \vec{B} nun nicht parallel zueinander, stellt sich ein Effekt ein, den man ebenfalls schon klassisch betrachten kann. Der Drehimpuls-Vektor präzessiert dabei wie in Abbildung 2 dargestellt um den Magnetfeld-Vektor mit der sog. Larmor-Frequenz ω . Diese bestimmt sich über vektorielle Rechnungen zu:

$$\omega_L = B_0 \cdot \gamma \quad (11)$$

Die Bezeichnung ω_L ist in obiger Formel für die Energiedifferenz ist dabei nicht zufällig gewählt, da dies ebenfalls genau die Larmor-Frequenz ist.

Für das zu untersuchende Phänomen der Kernspinresonanz müssen wir noch die Besetzungen der beiden Zuständen im Fall $I = \frac{1}{2}$ betrachten. Diese lassen sich durch die Boltzmann-Verteilung beschreiben:

$$\frac{N_{m_{I+1}}}{N_{m_I}} \sim e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (12)$$

Wenn wir nun unsere größenordnungsmäßig kleine Energieaufspaltung zwischen den beiden Zuständen berücksichtigen nähert sich die Boltzmann-Verteilung nahezu zu 1. Wäre dies exakt der Fall, würden wir keinerlei Resonanz-Effekte messen, da sich die beiden Effekte der Photon-Absorption und der stimulierten Emission gerade aufheben würden. Dies ist aber nicht exakt der Fall, denn natürlicherweise liegen mehr Kernteilchen im energetisch niedrigeren Zustand vor. Durch Anregung mit der Resonanzfrequenz ω_L lassen sich diese Kernteilchen auf den energetisch höheren $m_I = -\frac{1}{2}$ -Zustand anheben und wir können eine Absorption der Strahlung im entsprechenden Frequenzbereich beobachten. Bestrahlt man eine Probe längere Zeit mit der entsprechenden Frequenz, so stellt sich nach und nach das oben erwähnte Gleichgewicht ein und anschließend wird keine Absorption mehr beobachtet. Mit der Zeit stellt sich nach Abstellen der Strahlung wieder der Grundzustand ein, da die Kernteilchen über Spin-Spin- oder Spin-Gitter-Wechselwirkungen wieder Energie abgeben können. Charakteristisch für diese Effekte sind die sogenannten Relaxationszeiten, welche zwischen $10^{-4}s$ und mehreren 10^4s liegen können.

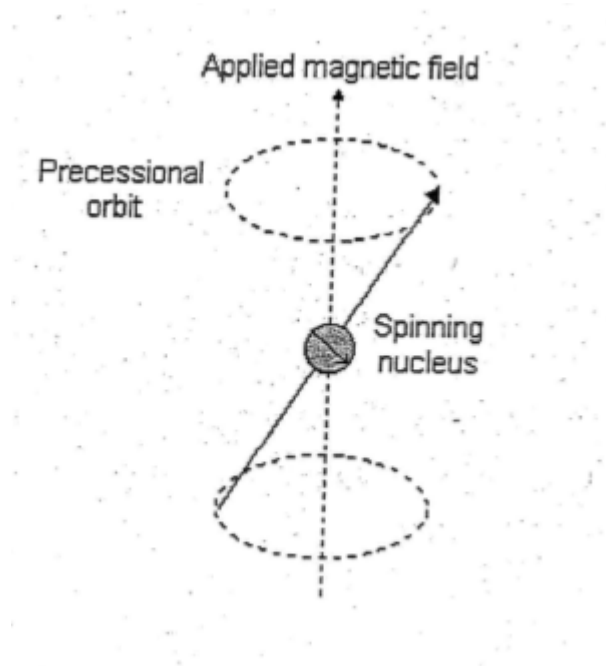


Abbildung 2: Larmor-Präzession eines Drehimpulsvektors um ein angelegtes Magnetfeld [Eib18]

3 Aufbau und Durchführung

Der Aufbau des Versuchs ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die zu untersuchende Probe (Sample tube) wird zwischen zwei starke Permanentmagnete positioniert. Zwei Sweep Coils erzeugen ein zusätzliches magnetisches Wechselfeld, das dem permanenten Magnetfeld überlagert ist. Am Radiofrequenz-Transmitter wird mit einem Rad eine Radiofrequenz eingestellt, mit der dann Radiowellen auf die Probe emittiert werden. Die Frequenz wird durch einen Frequenzzähler angezeigt. Um die Probe ist eine Spule angebracht, die zusammen mit einem Schaltkreis im Radiofrequenz-Empfänger als Detektor für die Absorption der Radiowellen in der Probe fungiert. Durch die Ausrichtung der nuklearen Spins ändert sich die Permeabilität und dadurch auch die Induktivität der Spule, was gemessen werden kann. Dann wird das Signal verstärkt und genau wie das Signal der Sweep Coils an das Oszilloskop gegeben, wie man in Abbildung 4 sehen kann.

Durch das magnetische Wechselfeld erreicht man, dass die Aufspaltung der Energieniveaus erfolgt, aber auch dass die Besetzung der Energieniveaus nach einer gewissen Zeit nicht gleichverteilt ist. Dies würde dazu führen, dass keine Absorption der Radiowellen mehr erkennbar ist. Der Grund dafür ist, dass die Relaxationszeit aufgrund der geringen Energien sehr lang ist. Bei einem statischen Magnetfeld würde also die Absorption nach einer gewissen Zeit aufhören und die Relaxation in das thermodynamische Gleichgewicht, in der wieder Absorption stattfinden kann, würde zu lange dauern.

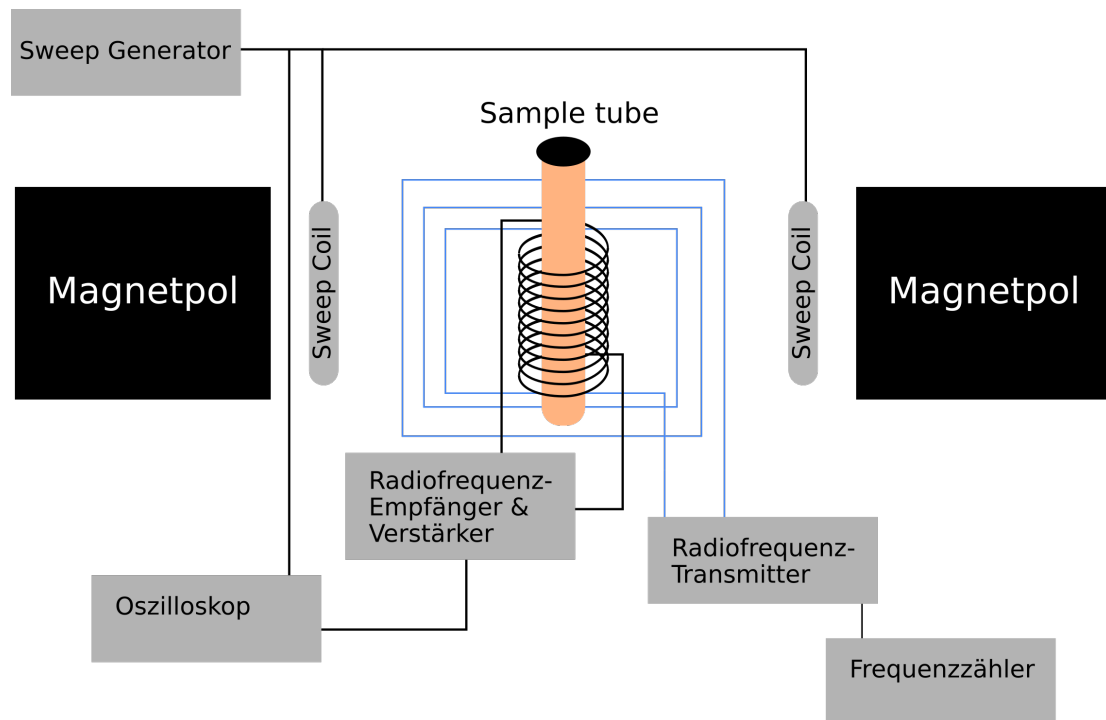


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Versuchsinstrumente

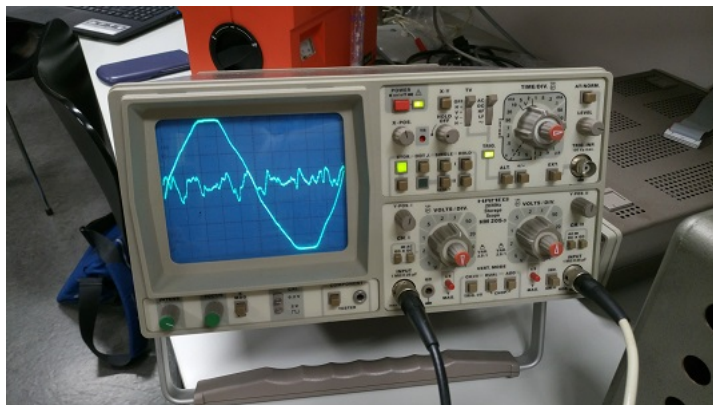


Abbildung 4: Oszilloskop mit Wechselmagnetfeld und Detektorsignal

Die Durchführung des Versuchs beginnt damit, die Kalibrierung des Magnetfelds vorzunehmen. Von nun an darf die Halterung der Probe nicht mehr verändert werden, damit sich keine Änderungen des Magnetfelds ergeben, die nicht einberechnet werden können. Für jede Probe wird das gleiche magnetische Wechselfeld angelegt und dann auf dem Oszilloskop nach den Absorbtionspeaks innerhalb des Rauschens gesucht, während die Frequenz an dem Rad verändert wird. Für minimales und maximales Magnetfeld werden die Peaks gesucht und die zugehörige Frequenz wird so bestimmt, dass die von den Flanken des Magnetfelds kommenden Peaks irgendwann ineinander laufen. Dort wird dann die Frequenz am Frequenzzähler abgelesen. Die hohe und die niedrige Frequenz werden abwechselnd gesucht, jeweils 10 mal, sodass durch sich immer wiederholendes Neueinstellen der Frequenz eine gute Statistik entsteht.

4 Ergebnisse und Auswertung

In unserem Versuch untersuchen wir drei verschiedene Proben auf ihre spezifische Resonanzenergie, die für den Übergang zwischen den beiden Zeeman-Zuständen charakteristisch ist. Zunächst untersuchen wir Glycerin, dessen γ -Faktor mit $\gamma = 26,7519 \cdot 10^7 \frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{s}}$ [Eib18] bekannt ist. Damit können wir gemäß der Theorie das eingestrahlte Magnetfeld berechnen und für die anderen Messungen verwenden. Anschließend untersuchen wir jeweils eine Probe mit in Wasser aufgelöstem CuSO_4 und Teflon und bestimmen aus den ermittelten Resonanzenergien die g - und γ -Faktoren.

Um unsere Messungen vergleichen zu können, ist es wichtig diese bei gleichem Magnetfeld durchzuführen. Um die entsprechenden Resonanzfrequenzen bestimmen zu können, verändern wir die Frequenz des eingestrahlichten Feldes kontinuierlich, bis sich die beiden am Oszilloskop erkennbaren Maxima genau aufheben. Dies geschieht genau am Maximum bzw. Minimum des magnetischen Wechselfeldes, sodass wir so den minimalen bzw. maximalen Wert des angelegten Magnetfelds bestimmen und annehmen können. Leider zeigen die verwendete Elektronik und Leitungen ein sehr hohes Rauschen, sodass die tatsächlichen Maxima im Detektorsignal nur sehr schwer vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden waren. Aus diesem Grund nehmen wir für jede Messung 10 Messwerte am Magnetfeld-Maximum und -Minimum auf, um eventuelle Ungenauigkeiten herausmitteln zu können.

Die aufgenommenen Messwerte zusammen mit den berechneten Mittelwerten für die Resonanzfrequenzen finden sich in Tabelle 1. Dort ist auch die Standardabweichung der Messungen gegeben, die jeweils für die Fehlerfortpflanzungsrechnungen genutzt wird.

Aus den aufgenommenen Werten für Glycerin können wir nun das angelegte Magnetfeld im Maximum und im Minimum berechnen. Dies ergibt sich zu:

Tabelle 1: Resonanzfrequenzen der untersuchten Verbindungen

	Glycerin		$CuSO_4$		Teflon	
	f_{max} in kHz	f_{min} in kHz	f_{max} in kHz	f_{min} in kHz	f_{max} in kHz	f_{min} in kHz
1	32415	31644	32409	31645	30486	29772
2	32413	31648	32416	31642	30480	29781
3	32408	31645	32410	31643	30480	29784
4	32410	31649	32410	31645	30477	29788
5	32416	31647	32409	31644	30469	29789
6	32411	31648	32406	31646	30472	29780
7	32411	31648	32408	31647	30479	29794
8	32412	31645	32406	31647	30475	29782
9	32410	31649	32408	31649	30477	29786
10	32413	31647	32408	31647	30478	29789
\emptyset	32411,9	31647	32409	31645,5	30477,3	29784,5
σ	2,3	1,7	2,7	2,0	4,4	5,8

$$B = \frac{f \cdot 2\pi}{\gamma} \quad (13)$$

$$B_{max} = \left[\frac{32411,9 \cdot 10^3 \cdot 2\pi}{26,75 \cdot 10^7} \pm \frac{2,3 \cdot 10^3 \cdot 2\pi}{26,75 \cdot 10^7} \right] T \approx [0,76131 \pm 0,00005] T \quad (14)$$

$$B_{min} = \left[\frac{31647 \cdot 10^3 \cdot 2\pi}{26,75 \cdot 10^7} \pm \frac{1,7 \cdot 10^3 \cdot 2\pi}{26,75 \cdot 10^7} \right] T \approx [0,74334 \pm 0,00004] T \quad (15)$$

Die Fehler der Magnetfelder wurden mit Hilfe der Formel

$$\Delta B = \frac{\Delta f \cdot 2\pi}{\gamma} \quad (16)$$

Mit diesen Werten und den gemessenen Resonanzfrequenzen können wir nun γ und die g-Faktoren für $CuSO_4$ und Teflon bestimmen. Zusätzlich wird noch der g-Faktor für Glycerin bestimmt, welcher sich aus der Formel

$$g = \frac{\gamma \cdot 2m_P}{e} \quad (17)$$

ergibt. Berechnet wurde hier ein Wert von $g = 5,586$. Dies entspricht dem g-Faktor für den Kern des Wasserstoff-Atoms.

Die γ -Faktoren werden nun für die beiden Proben Teflon und Kupfersulfat aus dem zuvor bestimmten Magnetfeld und der gemessenen Frequenz berechnet. Die Formel ist dann

$$\gamma = \frac{f \cdot 2\pi}{B}. \quad (18)$$

Der Fehler aus der Fehlerfortpflanzung ergibt sich dann zu

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta f \cdot 2\pi}{B} + \frac{f \cdot 2\pi}{B^2} \cdot \Delta B. \quad (19)$$

Zusätzlich wird der g-Faktor mit der Formel

$$g = \frac{\gamma \cdot 2m_P}{e} \quad (20)$$

berechnet. m_P ist die Masse des Proton, e die Elementarladung. Sein Fehler wird mit Hilfe der Formel

$$\Delta g = \frac{\Delta\gamma \cdot 2m_P}{e} \quad (21)$$

bestimmt. In den unten stehenden Tabellen 2 und 3 sind die Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 2: Experimentell bestimmte Faktoren $CuSO_4$

	$CuSO_4$		
	f_{max}	f_{min}	\emptyset
Landé-Faktor g	$5,5851 \pm 0,0009$	$5,5854 \pm 0,0007$	5,5853
$\gamma \cdot 10^{-7}$ in $\frac{rad}{T \cdot s}$	$26,7496 \pm 0,0041$	$26,7507 \pm 0,0031$	26,7502

Tabelle 3: Experimentell bestimmte Faktoren Teflon

	Teflon		
	f_{max}	f_{min}	\emptyset
Landé-Faktor g	$5,2523 \pm 0,0011$	$5,2569 \pm 0,0013$	5,2546
$\gamma \cdot 10^{-7}$ in $\frac{rad}{T \cdot s}$	$25,1552 \pm 0,0051$	$25,1776 \pm 0,0063$	25,1664

Vergleicht man die berechneten γ -Faktoren mit den Literaturwerten, kann man die unterschiedlichen Kernmomente identifizieren. Im Fall von Kupfersulfat wurde ein gyromagnetisches Verhältnis von $26,7502 \cdot 10^7 \frac{rad}{T \cdot s}$ berechnet. Das entspricht ziemlich genau dem gyromagnetischen Verhältnis von Wasserstoff von $26,7519 \cdot 10^7 \frac{rad}{T \cdot s}$, was Sinn ergibt, da das Kupfersulfat in Wasser gelöst ist. Das Kupfersulfat selbst hat also keine Resonanz auf die angeregten Radiowellen gezeigt.

Beim Teflon ($(C_2F_4)_n$) wurde experimentell ein gyromagnetisches Verhältnis von $25,1664 \cdot 10^7 \frac{rad}{T \cdot s}$ bestimmt, was dem gyromagnetischen Verhältnis von Fluor-19 mit $25,181 \cdot 10^7 \frac{rad}{T \cdot s}$ sehr nahe kommt. Insgesamt liegen die Literaturwerte gut in dem experimentellen Fehlerintervall. Da die g-Faktoren nur von γ und Konstanten abhängen, lassen sich dieselben Schlussfolgerungen auch für die g-Faktoren ziehen.

5 Anwendungen der NMR

Die NMR findet in vielen unterschiedlichen Bereichen Anwendung, weswegen hier 3 verschiedene Anwendungen der NMR vorgestellt und erläutert werden sollen.

5.1 NMR in der Medizin (MRT)

Die Magnetresonanztomografie (MRT) ist ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung von Organen oder Gewebe des Körpers. Ausgenutzt wird dabei der Kernspin der Protonen, sodass die Protonendichte oder unterschiedliche Relaxationszeiten die unterschiedlichen Gewebearten bzw. Kontraste darstellen.

Aufbau einer typischen Anlage zur MRT

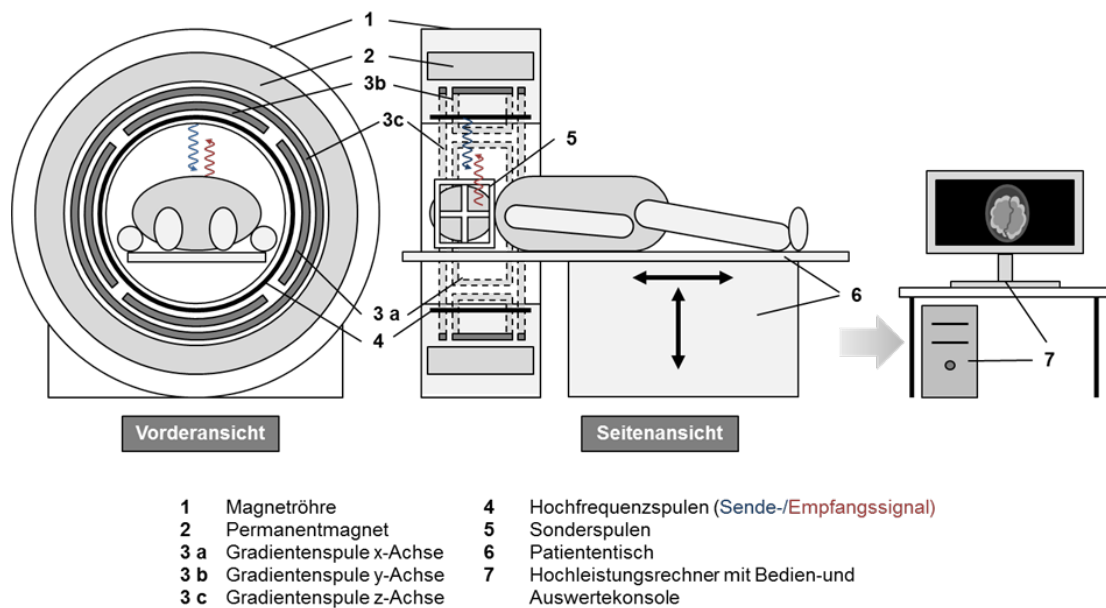


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer MRT-Anlage [Bre18]

In Abbildung 5 sieht man den Aufbau einer typischen MRT-Anlage. Die entscheidenden Elemente sind Gradientenspulen und die Hochfrequenzspulen, sowie der Permanentmagnet, der die Aufspaltung der Kernspinlevel der Protonen verursacht.

Funktionsprinzip der MRT

Der Permanentmagnet ist ein supraleitender mit Helium gekühlter Magnet, der ein nahezu räumlich konstantes Magnetfeld von $1,5T$ oder $3T$ liefert. Durch die Hochfrequenzspule wird die Magnetisierung des Patienten kurzzeitig verändert, der Übergang in die ursprüngliche Magnetisierung erfolgt dann durch Aussenden Strahlung, welche von der Hochfrequenzspule empfangen wird. Die räumliche Zuordnung erfolgt durch die Gradientenspulen, die in x-, y-, und z-Richtung ausgerichtet sind. Die Sonderspulen verbessern das Signal und am Hochleistungsrechner wird dann aus den Daten das Bild erstellt.

5.2 NMR in der Chemie (Strukturanalyse)

In der Chemie wird die NMR genutzt, um die Struktur von Molekülen genauer zu untersuchen. Entscheidend ist, dass die Resonanzen in unterschiedlichen Bindungen in ihrer Frequenz unterschiedlich verschoben werden.

Chemische Verschiebung

Die Elektronen, die den Atomkern umgeben, bewegen sich entsprechend dem angelegten Magnetfeld B_0 , da sie geladene Teilchen sind. So generieren sie ein viel kleineres entgegengerichtetes Magnetfeld, was den Kern vom Magnetfeld teilweise abschirmt. B_0 muss also leicht erhöht werden, damit Resonanz bei einer gegebenen Radiofrequenz auftritt. Unterschiedliche Bindungen führen zu unterschiedlichen Abschirmungen, sodass die Verschiebung des Magnetfelds spezifisch zu ein Referenz in *ppm* angegeben werden kann. In Protonen-NMR wird als Referenz Tetramethylsilan (TMS) verwendet, da einen scharfen Peak im Spektrum hat und weitere positive chemische Eigenschaften besitzt.

Kopplungsstruktur der NMR-Spektren

In der Wasserstoff-NMR-Spektroskopie tritt ein Effekt auf, der durch das Koppeln der benachbarten Protonen entsteht. Das benachbarte Proton kann einen zum angelegten Magnetfeld parallelen oder antiparallelen Kernspin haben. Dadurch teilt sich der Zustand des anderen Protons zu einem Dublett auf. Ganz allgemein ergeben sich für n Nachbarn $n + 1$ neue Zustände, die im NMR-Spektrum zu sehen sind.

5.3 NMR in der Festkörperphysik

Besonderheiten der Festkörper-NMR

Für Materialien, in denen die Atome oder Moleküle keine oder nur eine sehr geringe Beweglichkeit haben, können die richtungsabhängigen Interaktionen der einzelnen Atomkerne mit Hilfe der NMR-Spektroskopie aufgelöst werden. Anders gesagt verändern die richtungsabhängigen Interaktionen die Kernspin-Energielevels.

Magic-Angle-Spinning-NMR

Durch die eben beschriebenen anisotropen Wechselwirkungen treten Linienverbreiterungen auf, die es erschweren, das NMR-Spektrum zu analysieren. Eine Methode, um die Signalqualität zu verbessern ist das Magic-Angle-Spinning (MAS). Dabei wird die Probe um eine Rotationsachse rotiert, die in einem Winkel von ca. $54,74^\circ$ zu dem externen Magnetfeld ausgerichtet ist. Die anisotropen Wechselwirkungen können so herausgemittelt werden und die Linienbreiten des Spektrums wird deutlich schärfer.

Knight-Shift

Der Knight-Shift ist ein Effekt, der auftritt, wenn man die Resonanzfrequenz von einem Atom in einem Nichtmetall und in einem Metall vergleicht. Ähnlich wie bei der chemi-

schen Verschiebung wird dem äußeren Magnetfeld ein effektives Magnetfeld überlagert, was durch die Ausrichtung der Spins der Leitungselektronen entsteht, wenn ein externes Magnetfeld angelegt ist. So wird die Resonanzfrequenz um einen Betrag der Größenordnung ein Promille verschoben.

6 Zusammenfassung/Fazit

In diesem Versuch wurden mit Hilfe der NMR-Spektroskopie mehrere Proben untersucht und die gyromagnetischen Verhältnisse sowie die Landé-g-Faktoren bestimmt. Im Vergleich mit den Literaturwerten konnten einerseits die zugehörigen Kernmomente identifiziert werden und andererseits stellte sich heraus, dass diese Messmethode sehr genau ist, da die Literaturwerte bis auf einen kleinen Fehler gut reproduziert wurden. Ein erforderliches Mittel für diese genauen Werte waren die 20-fache Wiederholung der Messung für jede Probe.

Insgesamt wurde ein guter Überblick gewonnen, wie die NMR-Spektroskopie funktioniert und welche Herausforderungen dabei auftreten können. Es wurde auch gezeigt, welcher Anwendungsbereich die NMR-Spektroskopie hat und wie vielfältig sie eingesetzt werden kann.

Literatur

- [Bre18] BRECKOW, Joachim: *Magnetresonanztomographie (MRT)*.
<https://www.mni.thm.de/info-page/radiologie/modalitaeten/magnetresonanztomographie-mrt>, Juli 2018
- [Eib18] EIBISCH, Paul: *Magnetische Kernresonanz*, Juli 2018