

# NMR - Kernmagnetische Resonanzspektroskopie

Protokoll zum Versuch des PC 2 Praktikums von  
**Vincent Kümmerle & Elvis Gnaglo & Julian Brügger**

Universität Stuttgart

Autoren: Vincent Kümmerle, 3712667  
st187541@stud.uni-stuttgart.de

Elvis Gnaglo, 3710504  
st189318@stud.uni-stuttgart.de

Julian Brügger, 3715444  
st190050@stud.uni-stuttgart.de

Gruppennummer: A05

Versuchsdatum: 07.01.2025

Betreuer: Valentin Bayer

Erstabgabedatum: 8. Januar 2026

**Abstract:** In diesem Versuch wurde

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Theorie</b>	<b>1</b>
1.1 Grundlagen der Kernmagnetischen Resonanzspektroskopie . . . . .	1
1.2 Magnetische Wechselwirkungen . . . . .	1
1.3 Spinrelaxation . . . . .	2
1.4 Relaxationszeiten . . . . .	2
1.5 Bildgebung . . . . .	2
<b>2 Versuchsdurchführung</b>	<b>3</b>
2.1 Kernspinrelaxation . . . . .	3
2.2 NMR-Bildgebung . . . . .	3
2.2.1 Wasserproben . . . . .	3
2.2.2 2D-NMR . . . . .	3
2.3 Chemische Verschiebung . . . . .	4
<b>3 Messwerte</b>	<b>4</b>
3.1 Inversion-Recovery-Experiment . . . . .	4
3.2 Carr-Purcell-Experiment . . . . .	4
<b>4 Auswertung</b>	<b>5</b>
4.1 Kernspinrelaxation von Lösungen paramagnetischer Ionen . . . . .	5
4.1.1 FID-Messungen . . . . .	5
4.1.2 Relaxationszeiten . . . . .	6
<b>5 Fehlerrechnung</b>	<b>6</b>
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>6</b>

# 1 Theorie

Die Kernmagnetische Resonanzspektroskopie (nuclear magnetic resonance spectroscopy kurz NMR) ist eine Spektroskopieart, bei der Atome mit einem von null verschiedenen Kernspin detektiert werden können. Im Rahmen dieses Versuches wird der Fokus auf die Untersuchung von Spinrelaxationszeiten und der NMR-Bildgebung gelegt.

## 1.1 Grundlagen der Kernmagnetischen Resonanzspektroskopie

In diesem Versuch werden NMR-Spektren der Kerne  $^1\text{H}$  und  $^{19}\text{F}$  aufgenommen. Beide besitzen eine Kernspinquantenzahl von  $I = \frac{1}{2}$ . Der Kernspin  $\vec{I}$  der beiden Kerne mit  $I = \frac{1}{2}$  hat den Betrag  $|\vec{I}| = \sqrt{I(I+1)}\hbar$ . Der Kernspin  $\vec{I}$  ist proportional zum magnetischen Moment  $\vec{\mu}$ :

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{I} \quad (1)$$

Für die potentielle Energie des Kernspins ergibt sich

$$E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0 = -\mu_z \cdot B_0 = \hbar \cdot \gamma \cdot B_0 \cdot m_I \quad (2)$$

$m_I$  ist hierbei die magnetische Kernspinquantenzahl, die die folgenden Werte annehmen kann  $m_I = -I, -I+1, \dots, I$ ,  $\gamma$  beschreibt das gyromagnetische Verhältnis. Als Auswahlregel für den Energienivea-Übergang gilt  $\Delta m_I = \pm 1$ .

Bei den verwendeten Magnetfeldern im Bereich von  $B_0 \approx 1 - 22$  T liegen die Einstrahlfrequenzen im Radiowellenbereich.

## 1.2 Magnetische Wechselwirkungen

Um die Energieniveaus der zu untersuchenden Kerne bestimmen zu können muss der Energieausdruck Gleichung 2 durch den zugehörigen Hamiltonoperator ausgedrückt werden. Den entsprechenden Energieniveaus erhält man danach durch anwenden dieses Hamiltonoperators auf die beiden Spinfunktionen  $|\alpha\rangle = |+\frac{1}{2}\rangle$  und  $|\beta\rangle = |-\frac{1}{2}\rangle$  erhält man die folgenden Energieniveaus:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\frac{1}{2}} &= -\frac{1}{2}\gamma\hbar B_0 \\ \epsilon_{-\frac{1}{2}} &= +\frac{1}{2}\gamma\hbar B_0 \end{aligned} \quad (3)$$

In NMR-Spektren einer chemischen Verbindung gibt es allerdings weit mehr als diese beiden Werte. Wechselwirkungen und elektronische Effekte können zu Aufspaltungen oder Verschiebungen führen. Zu nennen sind hier vor allem die chemische Verschiebung  $\delta$ , welche von der elektronischen (=chemischen) Umgebung des betreffenden Kernes abhängt und zu einer Verschiebung dessen Frequenz  $\nu$  führt. Anhand dieser chemischen Verschiebung ist es möglich bei  $^{13}\text{C}$  und  $^1\text{H}$  Spektren Rückschlüsse auf die chemische

Struktur der betreffenden Substanz zu ziehen. Weiterhin können Kernspins mit anderen Kernspins koppeln, was zu Aufspaltungen im Spektrum führt, dieser Effekt ist als sklarare Wechselwirkung bekannt. Außerdem können die Kernspins noch mit ungepaarten Elektronen, bei Anwesenheit paramagnetischer Substanzen, koppeln.

### 1.3 Spinrelaxation

Um von der Betrachtung eines einzelnen Kerns auf die Betrachtung makroskopischer Materie überzugehen wird die Kernmagnetisierung  $M_0$  verwendet, welche alle Spins in einer Probe berücksichtigt. Da wir nur Kerne mit einem Kernspin von  $I = \frac{1}{2}$  betrachten berechnet sich die Kernmagnetisierung wie folgt.

$$M_0 = N \frac{\gamma^2 \hbar^2 B_0}{4kT} \quad (4)$$

Beim FT-Verfahren wird das System einem kurzen Radiofrequenzimpuls (wenige  $\mu\text{s}$ ) ausgesetzt, der das thermische (magnetische) Gleichgewicht stört. Dabei wird der longitudinale Magnetisierungsvektor aus der  $M_z$  in die transversale Ebene ( $x, y$ -Ebene) geklappt. Nach dem dem RF-Impuls lässt sich die Präzession dieser Quermagnetisierung als Induktionsspannung detektieren. Es wird ein mit der Relaxationszeit  $T_2^*$  exponentiell abklingendes Signal detektiert, welches als freier Induktionszerfall, oder Free Induction Decay, kurz FID bezeichnet wird.

Nach Bloch stellt sich diese Gleichgewichtsmagnetisierung nach einem Geschwindigkeitsgesetz erster Ordnung ein, was für die Magnetisierung in  $z$ -Richtung folgende Gleichung ergibt:

$$\frac{\partial M_z}{\partial t} = -\frac{(M_z - M_0)}{T_1} \quad (5)$$

Die Relaxationszeit  $T_1$  ist hierbei die Spin-Gitter-Relaxationszeit, sie beschreibt den Energieaustausch zwischen Spinsystem und den Freiheitsgraden der benachbarten Atome und Moleküle, welche als Gitter aufgefasst werden.

Mittels Fouriertransformation wird das Signal der Präzessionsbewegung als klassische Lorentzkurve dargestellt.

### 1.4 Relaxationszeiten

### 1.5 Bildgebung

## 2 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Messungen wurde der "Daily-Chek" durchgeführt. Dafür wurde die Probe Daily-Check Sample in das Spektrometer gestellt und die Messung gestartet.

### 2.1 Kernspinrelaxation

### 2.2 NMR-Bildgebung

#### 2.2.1 Wasserproben

Bei diesem Versuchsteil wurden zwei Wasserproben mit der Messapplikation "imaging1\_pcII" im Spektrometer gemessen. Dafür wurden die Proben zuerst mit einer Ausrichtung von  $0^\circ$  und anschließend mit einer Ausrichtung von  $90^\circ$  gemessen.

#### 2.2.2 2D-NMR

Im zweiten Teil dieses Versuchs wurde eine andere Probe mit der Messapplikation "imaging2\_pcII" gemessen. Dazu wurde die Probe mit einer Ausrichtung von  $0^\circ$  im Spektrometer gemessen. Anschließend wurde die Probe um  $10^\circ$  gedreht und erneut gemessen. Dies wurde so lange wiederholt, bis eine Drehung um  $180^\circ$  erreicht wurde.

## 2.3 Chemische Verschiebung

# 3 Messwerte

### 3.1 Inversion-Recovery-Experiment

$\tau$ / ms	Intensität / %
0.5	-79.83638584
10.5	-61.32112332
20.5	-43.38705739
30.5	-27.67277167
40.5	-13.46031746
50.5	-1.245421245
60.5	10.12454212
70.5	19.71184371
80.5	28.42735043
90.5	35.79975580
100.5	42.53235653
110.5	48.29792430
120.5	53.46275946
130.5	57.87545788
140.5	61.89010989
150.5	65.34798535
160.5	68.29548230
170.5	71.12332112
180.5	73.78021978

### 3.2 Carr-Purcell-Experiment

$\tau$ / ms	Echoamplitude / %

## 4 Auswertung

### 4.1 Kernspinrelaxation von Lösungen paramagnetischer Ionen

#### 4.1.1 FID-Messungen

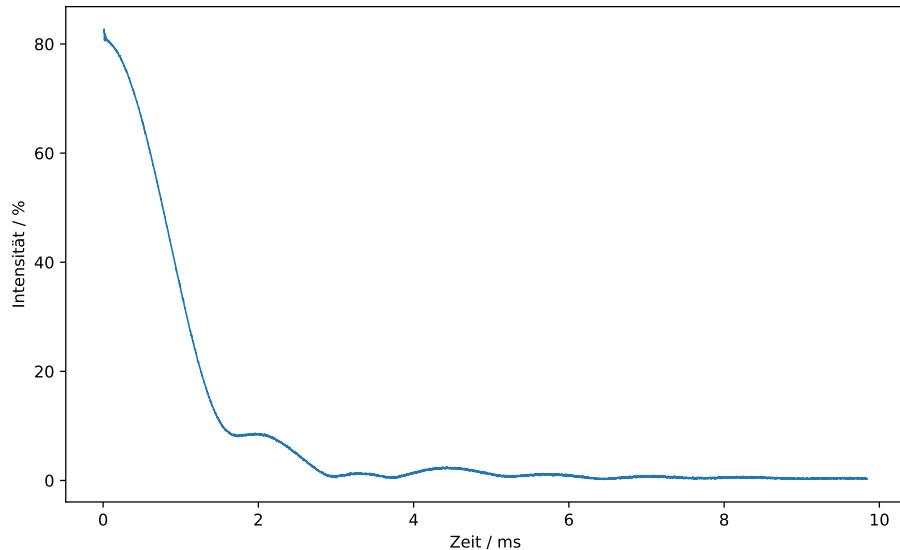


Abb. 1: FID-Signal der "Daily-Check-Probe".

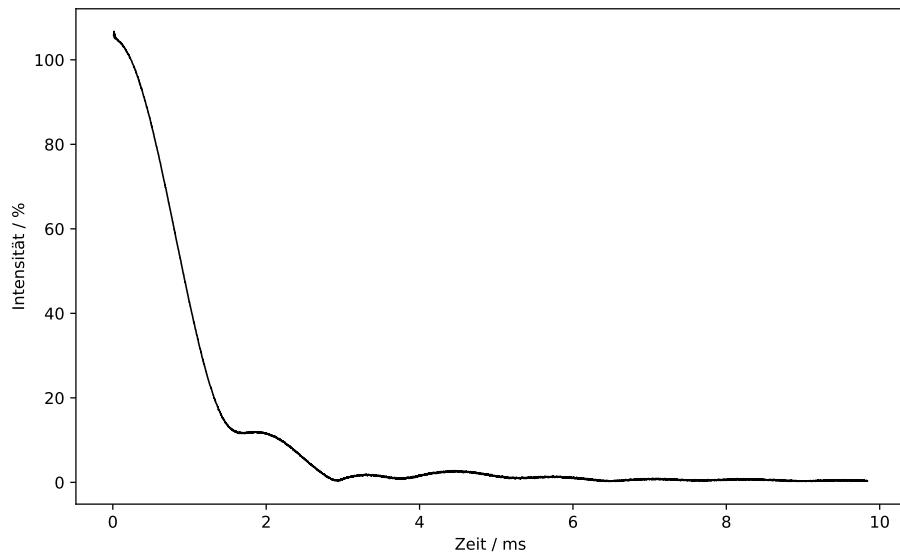


Abb. 2: FID-Signal der CuSO<sub>4</sub>-Probe.

#### 4.1.2 Relaxationszeiten

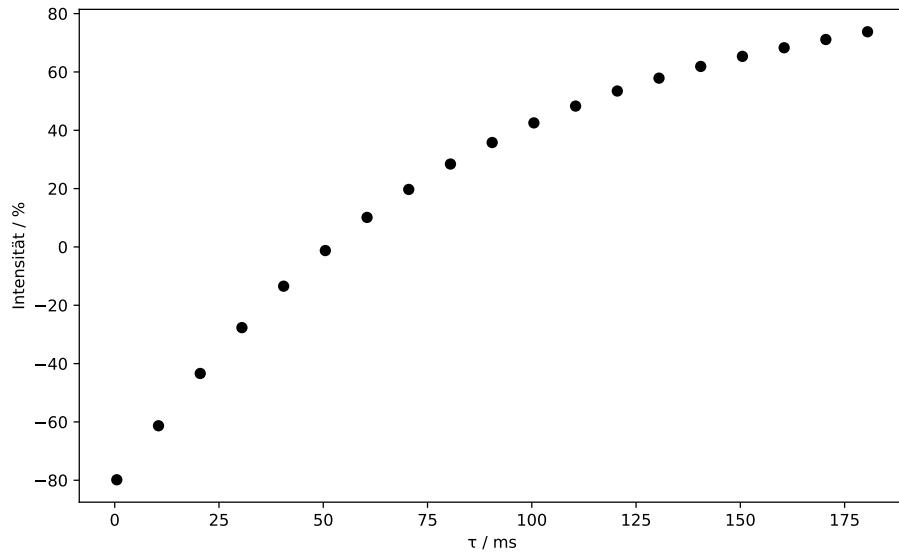


Abb. 3: Signalintensitäten für verschiedene  $\tau$ -Werte der CuSO<sub>4</sub>-Probe.

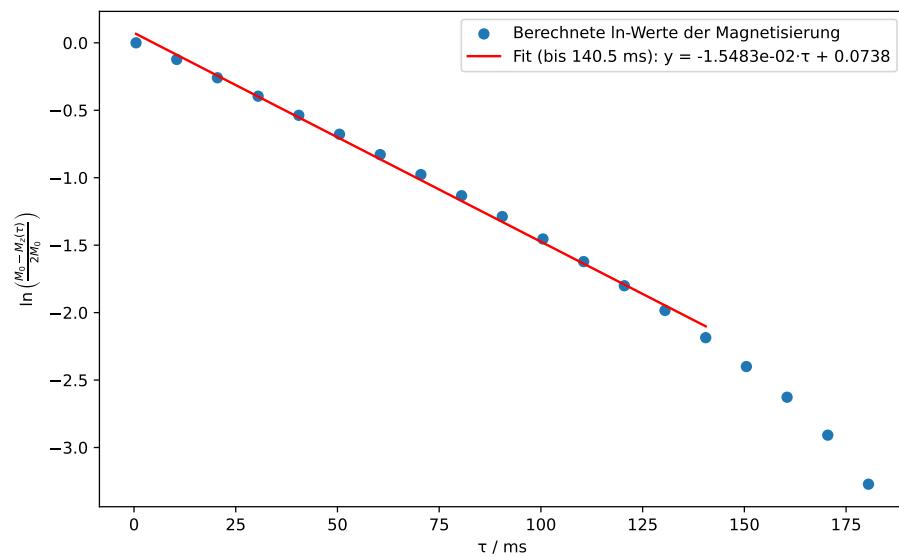


Abb. 4: ln-Plot der CuSO<sub>4</sub>-Probe.

## 5 Fehlerrechnung

## 6 Zusammenfassung

Im ersten Versuchsteil wurde