



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1 Kerne im Magnetfeld . . . . .	3
1.2 Elektromagnetischer Puls . . . . .	3
1.3 Pulse And Collect . . . . .	4
1.4 Relaxation . . . . .	5
1.4.1 $T_1$ -Relaxation . . . . .	5
1.4.2 $T_2$ -Relaxation . . . . .	6
1.4.3 Gewichtung im MRT . . . . .	7
1.5 Spin-Spin-Kopplung . . . . .	7
1.5.1 Kopplungssysteme . . . . .	8
1.5.2 Vorüberlegung . . . . .	8
<b>2 Messung und Auswertung</b>	<b>10</b>
2.1 Setup, $T_1$ und $T_2$ Relaxation und Konzentration . . . . .	11
2.1.1 Setup . . . . .	11
2.1.2 $T_1$ und $T_2$ Relaxation . . . . .	12
2.1.3 Konzentration . . . . .	12
2.2 Gewichtung im MRT-Bild . . . . .	14
2.2.1 $T_1$ Gewichtung . . . . .	14
2.2.2 $T_2$ Gewichtung . . . . .	14
2.2.3 $T_1$ und $T_2$ Gewichtung . . . . .	15
2.3 Spin-Spin-Kopplung im MRT . . . . .	16

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Kerne im Magnetfeld

Ein Kern mit Spinzahl  $I \geq \frac{1}{2}$  besitzt ein magnetisches Moment. In einem äußeren Magnetfeld  $\vec{B}_0 \parallel \vec{z}$  gibt es  $2\ell + 1$  Möglichkeiten der Ausrichtung des Spins (und damit der Magnetisierung). Diese Ausrichtung gibt die Spinquantenzahl  $m = -\ell, \dots, \ell$  vor.

Der Spin zeigt in Richtung Magnetfeld (parallel,  $m = \frac{1}{2}$ ) oder entgegen (antiparallel,  $m = -\frac{1}{2}$ ). Der spin-up bzw spin-down Zustand hat die Energie

$$E = -\gamma\hbar m B_0,$$

wobei  $\gamma$  das gyromagnetische Verhältnis ist. Somit ist es energetisch günstiger, im spin-up Zustand zu sein. Die Verteilung der Zustände ist thermodynamisch bedingt (Boltzmann Statistik). Es befinden sich fast gleich viele Kerne im spin-up Zustand wie im spin-down Zustand. Allerdings gibt es einen kleinen Überschuss an spin-up Kernen. Dieser Überschuss resultiert in einer Gesamtmagnetisierung ungleich Null, die gemessen werden kann.

Wie beim Kreisel führt die transversale Auslenkung der Magnetisierung dazu, dass der Vektor um die  $\vec{z}$ -Achse präzediert mit der Frequenz

$$\omega = \gamma B_0$$

Die Phase der Präzession ist jedoch zufällig, weshalb die transversale Komponente der Magnetisierung insgesamt Null ist. Betrachtet man also eine große Anzahl von Kernen, so ergibt sich eine Gesamt-Magnetisierung in Richtung des  $B_0$ -Feldes.

## 1.2 Elektromagnetischer Puls

Die Spins sind teilweise spin-up, teilweise spin-down ausgerichtet. Ein elektromagnetischer Puls der Größe

$$\Delta E = \gamma\hbar B_0$$

ermöglicht ein Umklappen von spin-up zu spin-down. Die Frequenz dieser elektromagnetischen Welle wird Larmor-Frequenz genannt und ist

$$\omega = \gamma B_0.$$

Dies ist die gleiche Frequenz, mit der die Kerne präzedieren.

Der Drehwinkel ist abhängig von der Länge des Pulses. Interessant für NMR ist der  $90^\circ$  Puls und der  $180^\circ$  Puls. Der  $90^\circ$  Puls kippt den Magnetisierungsvektor aus der  $z$ -Achse in die  $xy$ -Ebene. Dort präzediert der Vektor mit der Larmor-Frequenz. Bringt man eine Spule in die Nähe der Kerne, kann eine Induktionsspannung gemessen werden (free induction decay, FID). Hierfür wird ein LCR-Schwingkreis verwendet. Dieser Schwingkreis hat seinen

Resonanzbereich bei der Frequenz  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Durch korrekte Einstellung von  $C$  kann also erreicht werden, dass die Resonanzfrequenz des Schwingkreises gerade die Larmorfrequenz ist.

Es gilt bei Resonanzfrequenz

$$V_{out} = |IZ_C| = \frac{|V_s|}{R\omega_0 C} = \frac{|V_s|\omega_0 L}{R} = Q|V_s|.$$

Der Qualitätsfaktor  $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$  gibt die Breite des Resonanzpeaks an.

### 1.3 Pulse And Collect

Ziel ist es, die Präzessionsfrequenz und -amplitude zu messen. In Abb. [1.3.1](#) ist das Pulse And Collect Experiment zu sehen.

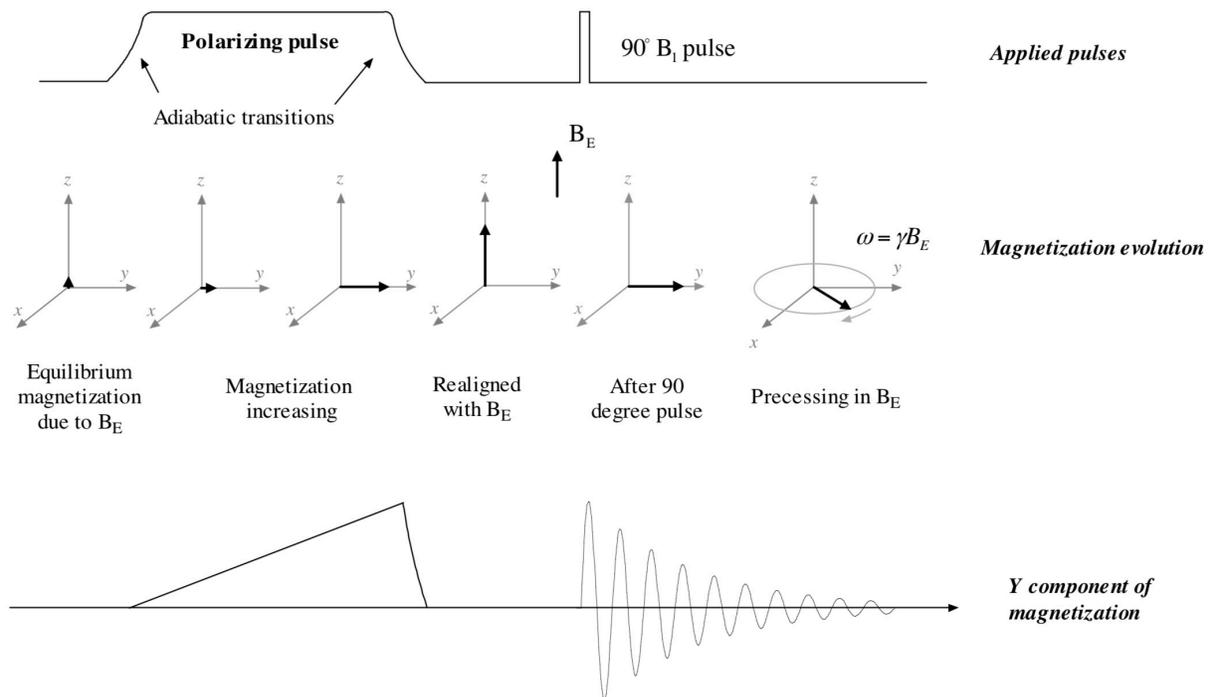


Abbildung 1.3.1: Pulse And Collect Experiment (aus Vorbereitungsmappe)

Zu Beginn sind die Spins parallel und antiparallel zum Magnetfeld  $\vec{B}_{Erde} \parallel \vec{z}$  ausgerichtet. Die Gesamtmagnetisierung zeigt in positive z-Richtung.

Da das Erdfeld relativ schwach ist, wird die Probe polarisiert: Ein sehr starkes Magnetfeld  $B_p$  wird adiabatisch in Richtung y-Achse angeschaltet. Die Magnetisierung kippt langsam in die y-Achse und nimmt zu.

Nach dem adiabatischen Abschalten des Polarisationspulses dreht die jetzt deutlich größere Magnetisierung langsam zurück in die z-Achse.

Durch einen  $90^\circ$ -Puls wird diese wie in Kap. 2 beschrieben in die xy-Ebene gekippt und präzediert um die z-Achse mit der Larmor-Frequenz. Die y-Komponente der Magnetisierung wird durch den LCR-Schwingkreis aufgenommen.

## 1.4 Relaxation

Relaxation ist der Vorgang, durch den die Magnetisierung in ihren Ausgangszustand zurückkehrt. Es gibt zwei Arten von Relaxation:  $T_1$ -Relaxation (Spin-Gitter) und  $T_2$ -Relaxation (Spin-Spin).

### 1.4.1 $T_1$ -Relaxation

$T_1$  gibt an, wie schnell die z-Komponente der Magnetisierung in seinen Anfangszustand zurückkehrt, also aus seinem angeregten Zustand in den thermischen Gleichgewichtszustand übergeht. Der Zusammenhang zwischen  $T_1$ , der z-Komponente der Magnetisierung  $M_z$  und dem Anfangszustand  $M_0$  ist gegeben durch

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{M_0 - M_z}{T_1} \Rightarrow M_z(t) = M_z(0) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + M_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right)\right)$$

Im Polarisationsfeld ist  $M_0 \propto B_p$ . Wir nennen diese Magnetisierung  $M_p$ . Bei  $t = 0$  (vor dem Polarisationspuls) ist  $M_z$  proportional zu  $B_E$  und kann deshalb vernachlässigt werden. Somit ist

$$M_z(t) = M_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right)\right).$$

Nach Abschalten des Polarisationsfeldes findet die Abnahme der Magnetisierung im Erdmagnetfeld statt. Dort ist  $M_z(0) = M_p$  und die Magnetisierung im Gleichgewicht  $M_0$  vernachlässigbar klein. Somit ist

$$M_z(t) = M_p \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right).$$

Diese beiden Effekte werden separat gemessen.

### Messung von $T_1$ im Polarisationsfeld

Sei  $\tau_p$  die Dauer des Polarisationspulses. Dann ist die Signalstärke

$$S(\tau_p) = S_p \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_p}{T_1}\right)\right) \quad (1)$$

Mit dem Pulse And Collect Experiment kann nun für verschiedene  $\tau_p$  die Signalstärke gemessen werden, um so  $T_1$  zu bestimmen.

### Messung von $T_1$ im Erdfeld

Sei  $t$  die Dauer zwischen dem Polarisationspuls und dem  $90^\circ$ -Puls. Die Signalstärke ist

$$S(t) = S_p \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \quad (2)$$

Mit dem Pulse And Collect Experiment und einem zusätzlichen delay zwischen Polarisation und  $90^\circ$ -Puls kann nun  $T_1$  bestimmt werden.

### 1.4.2 $T_2$ -Relaxation

In dem NMR Experiment kann ein Signal übermittelt werden, da die Kernspins phasenkohärent sind. Mit der Zeit verlieren die Spins diese Kohärenz (dephasing), was zu einer Abnahme des Signals führt. Dieser Effekt wird durch magnetische Dipol Kopplung von benachbarten Spins hervorgerufen. Er wird beeinflusst von der Inhomogenität des Magnetfeldes. Die Signalstärke ist

$$S(t) = S_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (3)$$

Dieser Effekt ist reversibel. Durch das Spin-Echo Experiment kann dem dephasing der Spins entgegengewirkt werden:

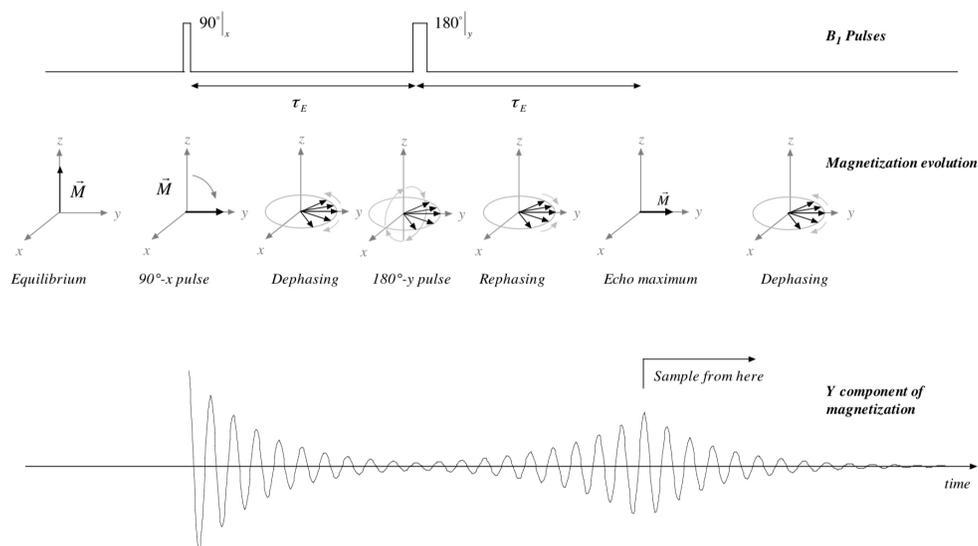


Abbildung 1.4.1: Spin Echo Experiment (aus Vorbereitungsmappe)

Wie in Abb. [1.4.1](#) zu sehen ist, kann mit dem Spin Echo Experiment erreicht werden, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt (nach  $2\tau_E$ ) die Effekte der spin-spin Relaxation rückgängig gemacht werden. Misst man also an diesem Zeitpunkt, so erhält man ein besseres Signal.

**Messung von  $T_2$**  Die Stärke des Signals beträgt

$$S(t) = S_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right)$$

Variiert man die Zeit  $\tau_E$  und misst die Stärke des Signals ab  $2\tau_E$ , so erhält man die Kurve  $S(t)$ , aus der  $T_2$  bestimmt werden kann.

### 1.4.3 Gewichtung im MRT

Verschiedene Gewebearten haben verschiedene Relaxationszeiten  $T_1$  und  $T_2$ . Mit  $T_1$  oder  $T_2$  Gewichtung kann dies ausgenutzt werden, um mehr Kontrast im MRT Bild zu erzeugen.

Die Signalstärke ist abhängig von der Polarisationszeit  $t_{polz}$ , der Echozeit  $t_{Echo}$  und den Relaxationszeiten  $T_1$  und  $T_2$ .

**$T_1$  Gewichtung** Die Signalstärke ist

$$SNR \propto (1 - \exp(-\frac{\tau_p}{T_1}))$$

Für sehr kleine  $\tau_p$  ist das Signal fast Null. Für große  $\tau_p$  ist das Signal groß, allerdings ist der Unterschied des Signals für verschiedene  $T_1$  nicht sehr groß. Um also ein Signal zu bekommen, das zwischen den verschiedenen Gewebearten (also den verschiedenen  $T_1$ ) unterscheidet, muss eine mittelgroße Polarisationszeit gewählt werden. Um die  $T_2$ -Gewichtung zu vermeiden, sollte eine kleine Echozeit gewählt werden.

**$T_2$  Gewichtung** Die Signalstärke ist

$$SNR \propto \exp(-\frac{t_{Echo}}{T_2})$$

Für sehr kleine  $t_{Echo}$  ist das Signal maximal, allerdings ist der Unterschied des Signals für verschiedene  $T_2$  nicht sehr groß. Für große  $t_{Echo}$  ist das Signal fast Null. Um also Signale zu bekommen, die zwischen den verschiedenen Gewebearten (also den verschiedenen  $T_2$ ) unterscheiden, muss eine mittelgroße Echozeit gewählt werden. Um die  $T_1$ -Gewichtung zu vermeiden, sollte eine möglichst große Polarisationszeit gewählt werden.

**Überlagerung** Es sollte immer eine  $T_1$  ODER  $T_2$  Gewichtung vorgenommen werden. Das Signal ist größer, je größer  $T_1$  und je kleiner  $T_2$  ist.  $T_1$  und  $T_2$  sind jedoch proportional zueinander. Wählt man die Parameter so, dass sowohl  $T_1$  als auch  $T_2$  gewichtet wird, ist kein Kontrast erkennbar.

## 1.5 Spin-Spin-Kopplung

In Molekülen mit mehreren Atomkernen mit Spinzahl  $I \geq \frac{1}{2}$  kommt es zu einer Spin-Spin-Kopplung. Dabei handelt es sich um eine indirekte Kopplung der Atomspins über die kovalente Bindung des Moleküls. Mithilfe der Spin-Spin-Kopplung kann der Aufbau eines Moleküls bezüglich der Atome mit Spinzahl  $I \geq \frac{1}{2}$  untersucht werden.

Die Spinzustände der Atomkerne werden hier in verschiedene Energieniveaus aufgespalten. Dabei hängt die Anzahl der Niveaus eines Atoms von den möglichen Orientierungen der Spinzustände der anderen Atome ab. So kann ein Bild davon erzeugt werden welche und wie

viele Atome mit Spinzahl  $I \geq \frac{1}{2}$  nahe beieinander liegen.

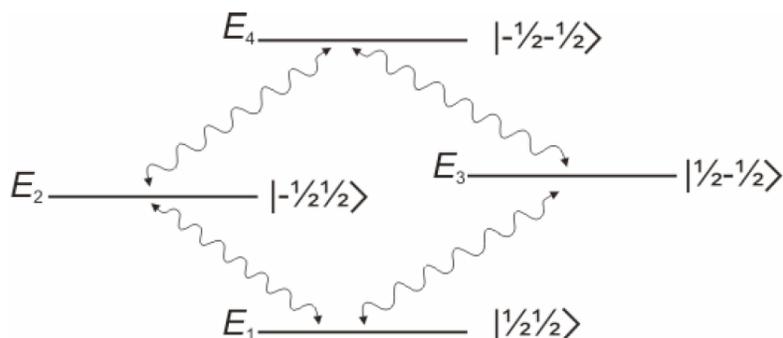


Abbildung 1.5.1: Energieleveldiagramm für zwei Atome mit Spinzahl  $\frac{1}{2}$  (aus Vorbereitungsmappe)

Für Spin-Spin-Kopplungen zwischen zwei Atomen mit Spinzahl  $I \geq \frac{1}{2}$  wie in Abb. 1.5.1 ergeben sich so 4 diskrete Energieniveaus, also 2 pro Atom.

### 1.5.1 Kopplungssysteme

Durch die Spin-Spin-Kopplung interagieren alle Atomkernspins eines Moleküls miteinander. Dabei ergeben sich sogenannte AX-Spinsysteme ( $A_n X_m$ ). Für  $n$  mögliche Spins einer Atomart  $A$  gekoppelt mit  $m$  möglichen Spins einer Atomart  $X$  ergeben sich  $m + 1$  Peaks für die Spinzustände der Atomart  $A$  und  $n + 1$  Peaks für die Spinzustände der Atomart  $X$ .

Die Resonanzpeaks haben jeweils den gleichen Abstand zueinander, der durch die Kopplungskonstante  $J$  beschrieben wird. Diese ist für beide Atomarten gleich und unabhängig vom anliegenden Magnetfeld.

Die Ausprägung der Resonanzpeaks ist abhängig von ihrer relativen Häufigkeit und folgt den Verhältnissen des Pascalschen Dreiecks wie in Abb. 1.5.2.

Die Annahmen für Spin-Spin-Kopplungssysteme gelten nur bei relativ schwachen Kopplungen. Dann überwiegt der Zeeman-Effekt und die Spin-Spin-Kopplung kann als Störung erster Ordnung betrachtet werden. Eine schwache Bindung liegt vor wenn  $2\pi J \ll |\omega_1 - \omega_2|$  gilt.

### 1.5.2 Vorüberlegung

Für das Experiment wird 1,4-Difluorbenzol verwendet und mit der Einstellung Pulse And Collect untersucht. Die Atome mit Spinzahl  $I = \frac{1}{2}$  sind hier 4  $^1\text{H}$  und 2  $^{19}\text{F}$  Atome mit einer regelmäßigen Anordnung wie in Abb. 1.5.3.

Number of Spins	Spin State Combinations	Peak Ratios
2	$\begin{array}{c} \downarrow\downarrow \\ \downarrow\uparrow \uparrow\downarrow \\ \uparrow\uparrow \end{array}$	$\begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 1 \end{array}$
3	$\begin{array}{ccc} \downarrow\downarrow\downarrow & & \\ \uparrow\uparrow\downarrow & \uparrow\downarrow\uparrow & \downarrow\uparrow\uparrow \\ \uparrow\downarrow\downarrow & \downarrow\downarrow\uparrow & \downarrow\uparrow\downarrow \\ & \uparrow\uparrow\uparrow & \end{array}$	$\begin{array}{c} 1 \\ 3 \\ 3 \\ 1 \end{array}$

Abbildung 1.5.2: Resonanzpeakverhältnisse nach Spinanzahl (aus Vorbereitungsmappe)

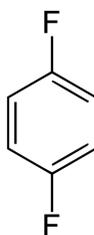


Abbildung 1.5.3: 1,4-Difluorbenzol

Quelle: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:P-Difluorobenzene.svg>

Es ist zu erwarten, dass Wasserstoff 3 Resonanzpeaks aufweist, wobei der mittlere Peak doppelt so groß ausfällt wie die anderen. Fluor sollte 5 Resonanzpeaks aufweisen und die Ausprägung der Peaks dem Verhältnis 1 – 4 – 6 – 4 – 1 folgen.

## 2 Messung und Auswertung

### Versuchsaufbau

Gemessen wird im Erdmagnetfeld. Dass dieses aufgrund anderer Felder und Geräte im Physikbau nicht homogen ist, wird durch eine äußere Spule berichtigt.



Abbildung 2.0.1: Versuchsaufbau

Innerhalb dieser Spule ist der eigentliche Versuchsaufbau zu finden (siehe Abb. [2.0.1](#), roter Kasten). Zu sehen ist der vordere Teil der Polarisationspule, der Gradientenspule und der  $B_1$  Spule. Diese drei Spulen sind ineinander gesteckt. In den Hohlraum der  $B_1$  Spule kann nun die Probe gelegt werden.



Abbildung 2.0.2: EFNMR/ MRI Spulen (aus Vorbereitungsmappe)

Dieser Aufbau ist durch Kabel über ein Spektrometer mit einem PC verbunden. Mittels des Programmes "Prospa" lassen sich nun die Parameter (z.B. Polarisationsstrom, Polarisationszeit, Echozeit, Kapazität, ...) einstellen und die Daten des Experiments erfassen.

## 2.1 Setup, $T_1$ und $T_2$ Relaxation und Konzentration

### 2.1.1 Setup

Das Programm muss auf die Wasserstoffprobe eingestellt werden.

Mit "AutoTune" lässt sich über einen 2D-Plot bestimmen, bei welcher Kapazität des Kondensators die Resonanzfrequenz erreicht ist, also bei welcher Kapazität die Resonanzfrequenz des Schwingkreises gleich der Larmor-Frequenz der H-Kerne ist. Das Programm liefert außerdem tabellarisch Werte der Stärke des Signals abhängig von  $C$ , woraus sich das Maximum genauer bestimmen lässt. In unserem Fall ist die Kapazität (siehe Abb. [2.1.1](#))  $C = 5,75 \text{ nF}$ .

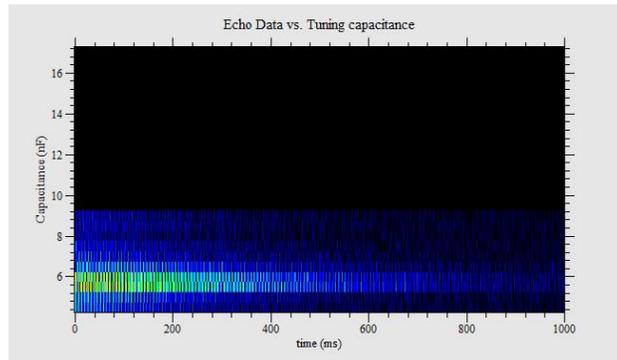


Abbildung 2.1.1: Bestimmung der Kapazität

Die Larmor-Frequenz lässt sich nun aus dem Amplitude-Frequency Diagramm ablesen. Sie beträgt (siehe Abb. [2.1.2](#), Mitte)

$$\omega = 2424 \text{ Hz.}$$

Mit "B1 Duration" lässt sich die Signalstärke über die Dauer des elektromagnetischen Impulses (siehe Kap. 1.2) auftragen. Das Maximum dieser Kurve gibt die Länge des Signals an, die für einen  $90^\circ$  Puls benötigt wird, das Minimum die Länge des  $180^\circ$  Puls. Auch hier gibt das Programm mehrere Werte tabellarisch aus, sodass das Minimum und Maximum bestimmt werden können (siehe Abb. [2.1.2](#), rechts). Es ist  $t_{90^\circ} = 1,6 \text{ ms}$ ,  $t_{180^\circ} = 3,5 \text{ ms}$ .

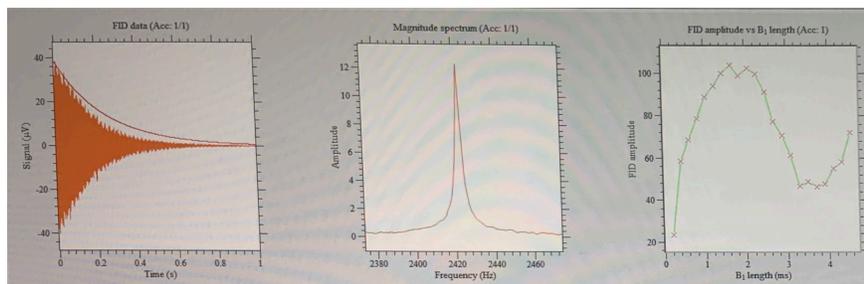


Abbildung 2.1.2: Bestimmung der Larmorfrequenz und Dauer der Pulse

### 2.1.2 $T_1$ und $T_2$ Relaxation

Mit den im vorherigen Kapitel gemessenen Daten werden nun die Relaxationszeiten  $T_1$  und  $T_2$  gemessen.

Die Einstellung “T1Be” liefert die Signalstärke  $S(t)$  (wobei  $t$  die Zeit zwischen Polarisation und dem  $90^\circ$  Puls ist), die exponentiell fällt (siehe Theorie Kap. 1.4.1). Aus dieser Kurve berechnet das Programm den Wert  $T_1$  im Erdmagnetfeld.

Die Einstellung “T1Bp” liefert die Signalstärke  $S(\tau_p)$  mit der Länge der Polarisation  $\tau_p$ , die eine gesättigte Exponentialfunktion beschreibt (siehe Theorie Kap. 1.4.1). Aus dieser Kurve berechnet das Programm den Wert  $T_1$  im Polarisationsfeld.

In der Einstellung “T2” lässt sich die Relaxationszeit  $T_2$  messen. Auch hier wird ein Diagramm  $S(\tau_E)$  ausgegeben, wobei  $\tau_E$  die Echozeit ist (siehe Theorie Kap. 1.4.2). Das Programm berechnet daraus den Wert  $T_2$ .

Für die Probe (eine 500ml Flasche Leitungswasser) ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 2.1.1: Messwerte Relaxationszeiten Wasser

$T_1$ im Erdfeld	2390 ms
$T_1$ im Polarisationsfeld	2480 ms
$T_2$	1990 ms

### 2.1.3 Konzentration

Nun werden  $T_1$  und  $T_2$  für mit Kupfersulfat angereichertem Wasser gemessen (mit der Einstellung “T1Bp”). Es ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 2.1.2: Messwerte Relaxationszeiten Wasser mit  $\text{Cu}^{2+}$

Konzentration in $\mu\text{M}$	$T_1$ in ms	$T_2$ in ms
250	1110	1230
500	750	780
1000	390	410
2000	220	290
unbekannt	150	200

Die Relaxationszeiten sind antiproportional zu der Konzentration. In Abb. [2.1.3](#) ist deshalb das Inverse der Relaxationszeiten über der Konzentration zu sehen. Durch einen linearen Fit lassen sich die Proportionalitätsfaktoren bestimmen, sodass die unbekannt Konzentration bestimmt werden kann.

Es ist also

$$C = 4,773 \cdot 10^{-4} \text{ Ms} \frac{1}{T_1} - 1,806 \cdot 10^{-4} \text{ M bzw}$$

$$C = 6,553 \cdot 10^{-4} \text{ Ms} \frac{1}{T_1} - 3,618 \cdot 10^{-4} \text{ M}$$

Damit ergibt sich für die unbekannte Probe  $C = 3001,4 \mu\text{M}$  bzw  $C = 2914,7 \mu\text{M}$ .

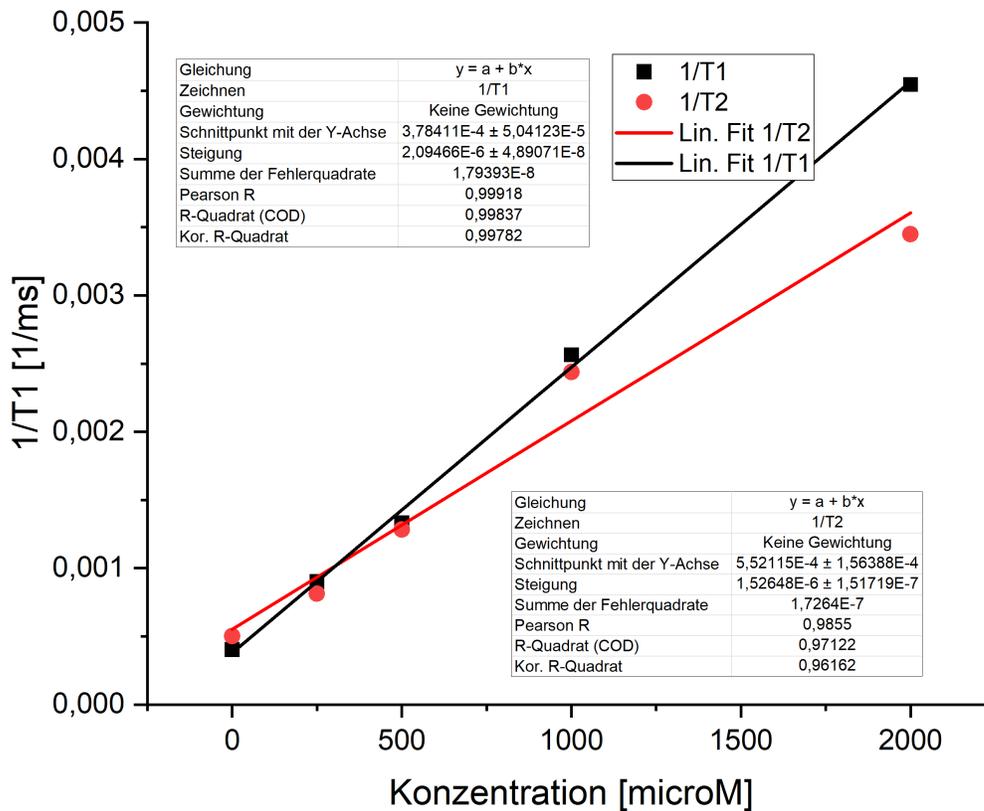


Abbildung 2.1.3: Inverses der Relaxationszeiten über Konzentration

## 2.2 Gewichtung im MRT-Bild

Verschiedene Gewebearten haben verschiedene  $T_1$  bzw  $T_2$  Werte. Die Echozeit und Polarisationszeit lassen sich so einstellen, dass die Signalstärke der Gewebearten deutlich verschieden ist. So ergibt sich ein Kontrast im MRT Bild.

Es werden zwei Proben (Wasser und Wasser mit Kupfersulfat) nebeneinander in die Anordnung gelegt. In der Einstellung “nD Spin-Echo Imaging” lässt sich nun ein MRT Bild erzeugen. Die Probe mit Kupfersulfat hat kleinere  $T_1$  und  $T_2$  Werte als das Wasser (siehe Kap 2.1).

### 2.2.1 $T_1$ Gewichtung

Für diese Gewichtung wird eine mittelgroße Polarisationszeit (damit die Signale der verschiedenen  $T_1$  deutlich verschieden sind) und eine kleine Echozeit (um  $T_2$  Gewichtung zu vermeiden) gewählt. Die gewählten Einstellungen sind

$$\tau_p = 500 \text{ ms}, \quad t_{Echo} = 100 \text{ ms (kleinstmöglicher Wert)}$$

Je kleiner  $T_1$ , desto stärker ist das Signal. Somit erzeugt die Wasserprobe ein stärkeres Signal (siehe [2.2.1](#), die rechte Probe ist die Wasserflasche)

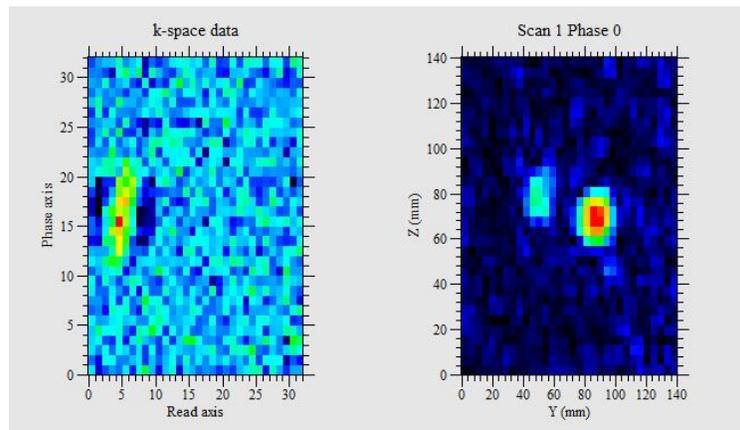


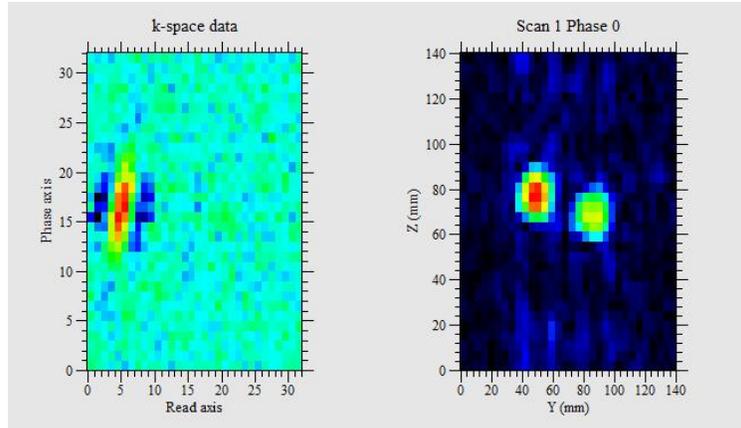
Abbildung 2.2.1: MRT Bild (rechts) mit  $T_2$  Gewichtung

### 2.2.2 $T_2$ Gewichtung

Für diese Gewichtung wird eine sehr große Polarisationszeit (um  $T_1$  Gewichtung zu vermeiden) und eine kleine Echozeit (damit die Signale der verschiedenen  $T_2$  deutlich verschieden sind) gewählt. Die gewählten Einstellungen sind

$$\tau_p = 4000 \text{ ms}, \quad t_{Echo} = 100 \text{ ms}$$

Je größer  $T_2$ , desto stärker ist das Signal. Somit erzeugt die Wasserprobe ein schwächeres Signal (siehe [2.2.2](#), die rechte Probe ist die Wasserflasche)

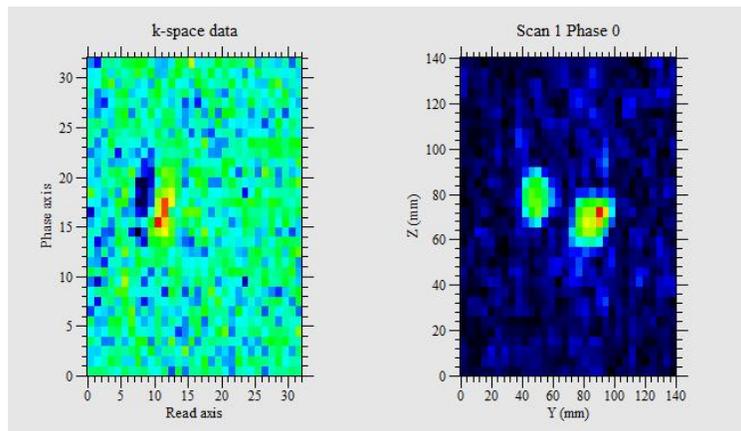
Abbildung 2.2.2: MRT Bild (rechts) mit  $T_2$  Gewichtung

### 2.2.3 $T_1$ und $T_2$ Gewichtung

Wie in der Theorie beschrieben wird der Kontrast schlechter, wenn man  $T_1$  und  $T_2$  Gewichtung gleichzeitig benutzt. Mit den Einstellungen

$$\tau_p = 1000 \text{ ms}, \quad t_{Echo} = 100 \text{ ms}$$

lässt sich dies veranschaulichen: Die beiden Gewichtungen heben sich gegenseitig fast vollständig auf und es ist nicht mehr klar zu erkennen, welche Probe welche ist, da die Signalstärken fast gleich sind.

Abbildung 2.2.3: MRT Bild (rechts) mit  $T_1$  und  $T_2$  Gewichtung

## 2.3 Spin-Spin-Kopplung im MRT

Die 1,4-Difluorbenzol-Probe wird mit den Einstellungen aus dem Setup untersucht und zunächst auf das gut sichtbare Signal des Wasserstoffs eingestellt. Die Einstellungen, um die Resonanzpeaks von Wasserstoff sauber abzubilden, sind

$$\omega_p = 2424 \text{ Hz}, \quad C = 5,75 \text{ nF}$$

Wie erwartet sind die 3 Resonanzpeaks um die Larmor-Frequenz  $\omega_H = 2424 \text{ Hz}$  gut sichtbar (siehe Abb. 2.3.1). Mit dem gyromagnetischen Verhältnis  $\gamma_H = 2,675 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{sT}}$  und der Larmor-Frequenz kann das im Versuch wirkende Erdmagnetfeld berechnet werden zu

$$B_E = \frac{\omega_H}{\gamma_H} = 9,062 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Mit dem Erdmagnetfeld und dem gyromagnetischen Verhältnis von Fluor  $\gamma_F = 2,517 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{sT}}$  kann die Larmor-Frequenz von Fluor bestimmt werden.

$$\omega_F = \gamma_F B_E = 2280,8 \text{ Hz}$$

Stellt man den betrachteten Bereich auf die errechnete Larmor-Frequenz von Fluor ein, so erkennt man drei deutlich sichtbare Peaks für Fluor (siehe Abb. 2.3.2). Um die Auflösung zu verbessern kann die Einstellung verändert werden zu

$$\omega_p = 2280 \text{ Hz}, \quad C = 7,1 \text{ nF}$$

Die äußeren Peaks sind allerdings nicht klar vom Rauschen zu unterscheiden, da das Signal zu schwach ist (siehe Abb. 2.3.2).

Da die beiden Larmor-Frequenzen nur etwa  $140 \text{ Hz}$  auseinander liegen können die beiden Resonanzspektren auch gleichzeitig betrachtet werden (siehe Abb. 2.3.3). Die hierfür gewählte Einstellung ist

$$\omega_p = 2352 \text{ Hz}, \quad C = 7,1 \text{ nF}$$

Um die Kopplungskonstante  $J$  zu bestimmen muss der Abstand zwischen den Peaks von Wasserstoff und Fluor gemessen werden. Da die Position der Peaks nicht klar zuordenbar ist bietet sich eine Mittelung an.

Aus den Resonanzbildern (Abb. 1.5.1 und Abb. 2.3.5) ergeben sich folgende Werte für  $J$ :

Tabelle 2.3.1: Kopplungskonstante  $J$  von Wasserstoff und Fluor

$J$ von H in $\text{Hz}$	$J$ von F in $\text{Hz}$
6	7
7	6

Gemittelt erhält man damit  $J = 6,5 \text{ Hz}$ .

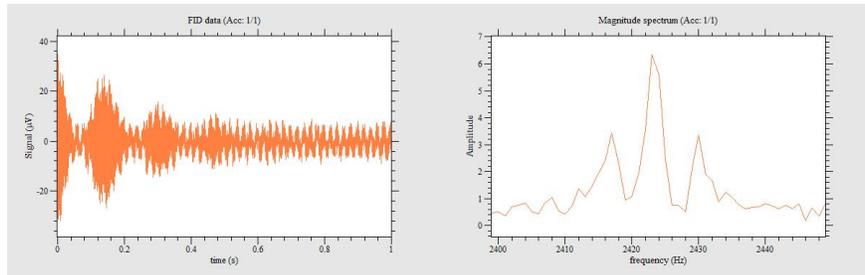


Abbildung 2.3.1: Spin-Spin-Kopplungspeaks Wasserstoff

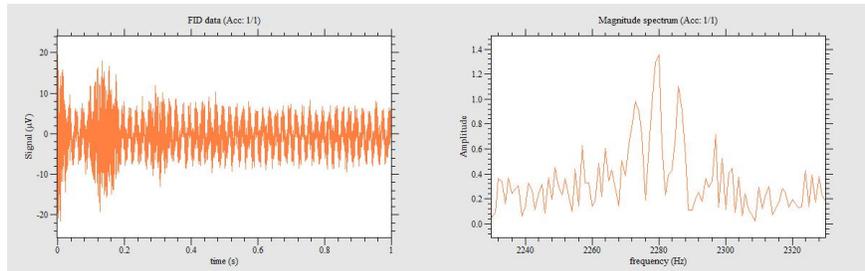


Abbildung 2.3.2: Spin-Spin-Kopplungspeaks Fluor

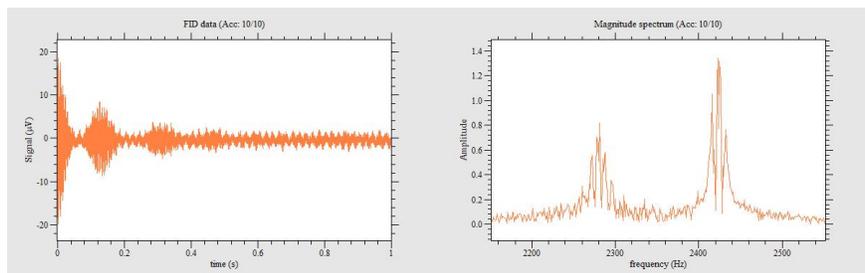


Abbildung 2.3.3: Spin-Spin-Kopplungspeaks Fluor und Wasserstoff

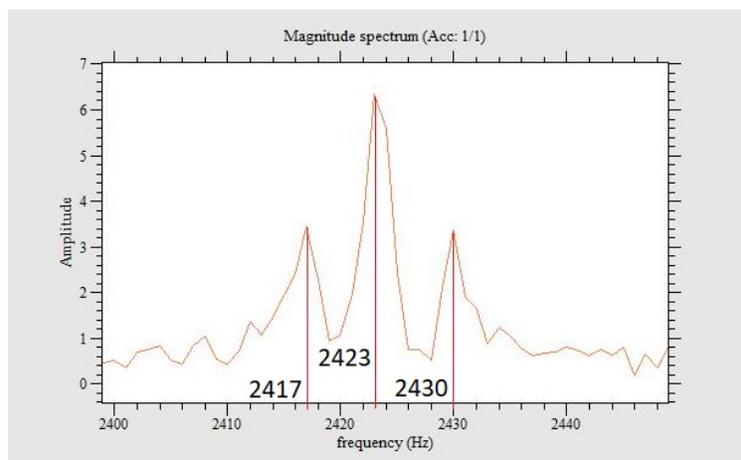


Abbildung 2.3.4: Kopplungskonstante bestimmen an Wasserstoff

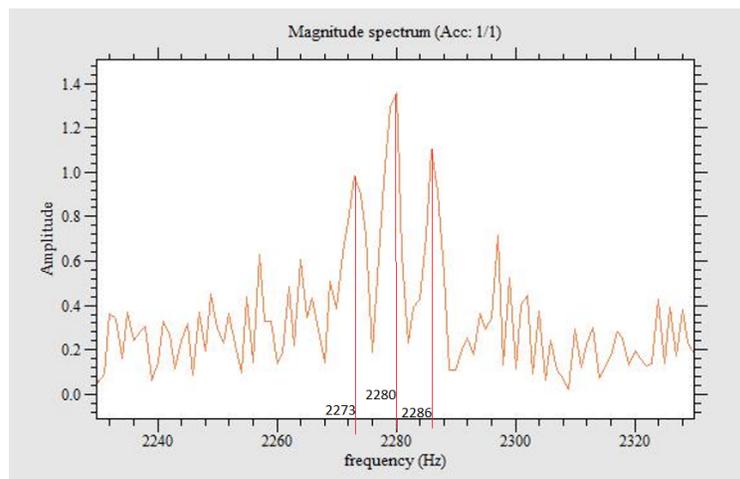


Abbildung 2.3.5: Kopplungskonstante bestimmen an Fluor