Verwandte Themen

Kernspins, Atomkerne mit magnetischem Moment, Präzessionsbewegung der Kernspins, Landau-Lifshitz-Gleichung, Bloch-Gleichung, Magnetisierung, Resonanzbedingung, MR-Frequenz, HF-Pulstechnik (High Frequency), FID-Signal (Free Induction Decay), MR-Anregungswinkel, Spin-Echo, Relaxation, Relaxationszeiten (T_1: Längsmagnetisierung, T_2: Quermagnetisierung), Spin-Gitter-Wechselwirkung, Spin-Spin-Wechselwirkung, Dephasierung, Rephasierung, Repetitionszeiten, Exponentieller FIT, Spektroskopie, Magnetresonanzbildgebung (Magnetic Resonance Imaging „MRI“), Magnetresonanztomographie (Magnetic Resonance Tomography „MRT“).

Prinzip

Die Grundprinzipien von Relaxationsprozessen in der MR-Technologie sollen dargestellt und untersucht werden. Die Durchführung der Experimente erfolgt mit dem MRT-Trainingsgerät, welches die Möglichkeit bietet kleinere Proben in einer Probenkammer direkt zu untersuchen. Das Gerät wird dabei über die mitgelieferte Software gesteuert. Die Untersuchungen beinhalten eine Schätzmethode der Relaxationszeit T_1, welche ein Zeitmaß für die Wiederherstellung der Längsmagnetisierung ist, die genaue Messung dieser Zeit und die Messung der Relaxationszeit T_2, welche ein Zeitmaß für das Abklingen der Quermagnetisierung ist. T_1 und T_2 sind spezifisch für das zu untersuchende Probenmaterial und geben deshalb wichtige Aufschlüsse über seine charakteristische Zusammensetzung.

Material

1	Kompakter Magnetresonanztomograph inkl. Probenset, Software- und Bedienungsanleitung in stabilem Tragekoffer und abgeschirmter Transportbox Bestehend aus: 1 MRT magnet unit, 22 MHz, 500 mT 1 control unit, 12 V DC, 2A 1 BNC Kabel, 50 Ohm, HF connection 2 Gradientenkabel 1 Soundbox 1 Netzteil, IN: 100-240V, 50/60Hz, 2.0A OUT: 12V, 6,67A, 80W max. 1 Datenkabel USB Steckertyp A/B 1 measure MRT Software	09500-99
1	Probensammlung: Öl (5mm, 10mm), Wasser (5mm, 10mm), RG (10mm), Structure (10mm)	
1	TESS expert Demonstrations- und Praktikumsversuche Magnetresonanztomographie (MRT) - Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz (NMR) (P5942100) - Relaxationszeiten in kernmagnetischer Resonanz (P5942200) - Ortskodierung in kernmagnetischer Resonanz (P5942300) - Magnetresonanzbildgebung (MRI) I (P5942400) - Magnetresonanzbildgebung (MRI) II (P5942500)	
	Zusätzlich erforderlich PC, Windows® XP oder höher	

Lesen Sie vor Inbetriebnahme des Gerätes die mitgelieferte Bedienungsanleitung sorgfältig und vollständig. Die Inbetriebnahme darf nur unter Einhaltung aller in der Bedienungsanleitung aufgeführten Sicherheitshinweise erfolgen.

Verwenden Sie das Gerät nur für den vorgesehenen Zweck.

Schwangere Frauen sowie Träger von Herzschrittmachern müssen einen Sicherheitsabstand von mindestens 1 m zum Magneten einhalten.

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

Hinweis:

Dieses Versuchsensemble „Relaxationszeiten in kernmagnetischer Resonanz“ (P5942200) ist Teil des Sets „Kompakter Magnetresonanztomograph“ und beinhaltet wesentliche Grundlagen zum Verständnis eines Magnetresonanztomographen. Alle Versuche sind in den Kursen „Basiskurs“ und „Relaxation“ integriert und können über diese in der „measure MRT Software“ angesteuert werden. Viele der hier eingestellten Parameter sind fundamental für weitere TESS expert Versuchsensemble.
Als Ausgangsbasis für die Versuchsdurchführung sollte das Versuchsensemble „Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz (NMR)“ (P5942100) schon einmal durchgeführt und verstanden worden sein.

Abb. 1: Aufbau des MRT-Trainingsgerätes

Aufbau

Stellen Sie das MR-Gerät gemäß Abb. 1 auf. Achten Sie darauf, dass der Betrieb in einem trockenen staubfreien Raum erfolgt. Das Gerät ist vibrationsarm aufzustellen. Netzschalter und Gerätestecker müssen frei zugänglich sein und die Lüftungsschlitze dürfen nicht abgedeckt werden. Zu anderen technischen Geräten und Speichermedien sollte ein angemessener Sicherheitsabstand eingehalten werden, da starke Magnete diese beschädigen können. Metallische Gegenstände im direkten Umkreis des Gerätes sind zu entfernen.

Achten Sie darauf, dass sich der Schalter POWER der Steuereinheit in Ausstellung befindet (siehe Abb. 3).

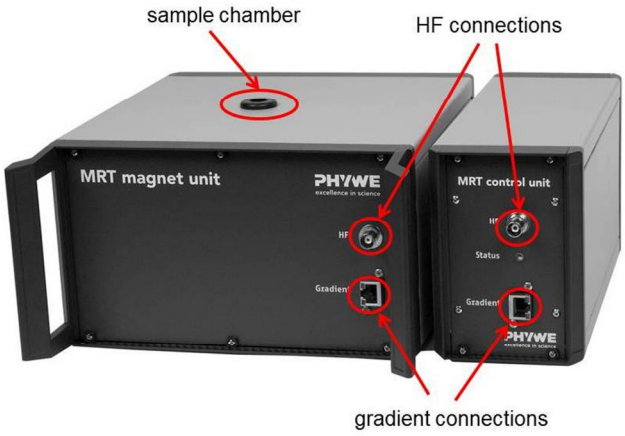

Abb. 2: Anschlüsse der „magnet“ und „control unit“

Schließen Sie dann die Steuereinheit über den Stromanschluss DC 12 V 2 A an die Stromversorgung an. Nutzen Sie hierfür unbedingt das dafür vorgesehene Netzteil (siehe Abb. 3).

Verbinden Sie Steuereinheit und Magneteinheit mit den dafür vorgesehenen Gradienten- und BNC-Kabeln (siehe Abb. 2). Verbinden Sie nun über ein USB-2.0-High-Speed-Kabel die USB-Schnittstellen

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

der Steuereinheit und des Messrechners (siehe Abb. 3). Schalten Sie nun das Gerät über den Kipp-Schalter POWER ein (MR-Gerät möglichst nur für Versuchsdurchführungen einschalten). Bei erstmaliger Inbetriebnahme wird das Betriebssystem des Rechners die Steuereinheit erkennen. Installieren Sie dann Gerätetreiber und Messsoftware (Siehe Installationshinweise). Starten Sie nun die Software „measure MRT“.

Abb. 3: Rückseitige Anschlüsse der Steuereinheit

Hinweis:

Details zur Bedienung des MR-Gerätes, sowie zum Umgang mit Proben im MR-Probenraum entnehmen Sie bitte der entsprechenden Bedienungsanleitung.

Fragen

A: Schätzung der Relaxationszeit T_1

1. Was beschreiben die Relaxationszeiten T_1 und T_2?
2. Warum ist die Relaxationszeit T_1 größer als die Relaxationszeit T_2?
3. Wann hat sich die ursprüngliche Längsmagnetisierung M_{L0} nach einem 90°-HF-Puls zu ca. 95% wieder aufgebaut? Verwenden Sie die Formel $M_L(t) = M_{L0}\left(1 - ce^{-t/T1}\right)$ mit $c = 1$.
4. Leiten sie die allgemeine Beziehung $c = 1 - cos\,\varphi$ her, wobei φ der Auslenkwinkel des Magnetisierungsvektors aus seiner ursprünglichen Präzessionsbewegung um das statische Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$ ist.
5. Warum kann man über einen zweiten 90°-HF-Puls nach einer primären 90°-HF-Anregung die Relaxationszeit T_1 bestimmen?
6. Nach dem zweiten 90°-HF-Puls hat das aufgenommene Signal eine bestimmte Amplitude $A_\beta(t)$. Diese ist für sehr lange Repetitionszeiten zwischen den beiden HF-Pulsen maximal. Verringert man die Repetitionszeit, ist die Amplitude $A_\beta(t)$ bei einem bestimmten Wert $TR_{1/2}$ um die Hälfte gesunken. Leiten Sie nun die folgende Formel für eine grobe T_1-Abschätzung her:

$$T_1 = \frac{TR_{1/2}}{ln\,2} \quad (1)$$

Verwenden Sie $A_\beta(t) = A_\beta^{max} e^{-\frac{t}{T_1}}$.

$\mathrm{TR}_{1/2}$ ist eine grobe Abschätzung für die Spin-Gitter-Halbwertszeit (vgl. Zerfallsgesetz).

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

B: Messung der Relaxationszeit T_1

1. Wieso kann man mit einem exponentiellen FIT $a - be^{-x/T1}$ der T_1-Relaxationskurve auf den Anregungswinkel des Magnetisierungsvektors schließen (vgl. Fragen in A)?
2. Was bewirkt die Spin-Gitter-Wechselwirkung genau? Warum ist die Relaxationszeit T_1 von Fett (Öl) kleiner als die Relaxationszeit T_1 von Liquor (Wasser)?
3. Wie kann man unterschiedliche T_1-Relaxationszeiten verschiedener Substanzen für die MR-Bildgebung nutzen? Wie muss die Repetitionszeit gewählt werden, um einen möglichst hohen T_1-Kontrast zwischen verschiedenen Substanzen zu erhalten? Warum sind kurze Repetitionszeiten mit einer sehr geringen Signalstärke verbunden?

C: Messung der Relaxationszeit T_2

1. Was bewirkt die Spin-Spin-Wechselwirkung genau? Warum ist die Relaxationszeit T_2 von Fett (Öl) kleiner als die Relaxationszeit T_2 von Liquor (Wasser)?
2. Wie kann man unterschiedliche T_2-Relaxationszeiten verschiedener Substanzen für die MR-Bildgebung nutzen? Wie muss die Repetitionszeit und die Echozeit gewählt werden, um einen möglichst hohen T_2-Kontrast zwischen verschiedenen Substanzen zu erhalten?

Aufgaben

A: Schätzung der Relaxationszeit T_1

1. Untersuchen Sie die Auswirkungen der Repetitionszeit zwischen zwei 90°-HF-Pulsen auf das aufgenommene Signal.
2. Reduzieren Sie die Repetitionszeit solange, bis die aufgenommene Signalamplitude in etwa der Hälfte der Maximalamplitude entspricht und berechnen Sie aus der ungefähren Spin-Gitter-Halbwertszeit die ungefähre Relaxationszeit von Wasser.
3. Vergleichen Sie die geschätzten Relaxationszeiten von Wasser und Öl und kommentieren Sie Ihre Ergebnisse.

B: Messung der Relaxationszeit T_1

1. Nehmen Sie die exponentielle T_1-Relaxationskurve von Öl auf. Untersuchen Sie den Einfluss der Repetitionszeit, des Zeitschrittes und der Anzahl der Punkte auf diese Relaxationskurve.
2. Nehmen Sie eine ideale T_1-Relaxationskurve auf und fitten Sie den Signalverlauf mit der in der Software implementierten FIT-Routine. Lesen Sie die Relaxationszeit T_1 von Öl ab und drucken Sie den Graphen.
3. Wiederholen Sie diese Messungen für Wasser. Lesen Sie die Relaxationszeit T_1 von Wasser aus der entsprechenden FIT-Kurve ab und drucken Sie den Graphen.

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

C: Messung der Relaxationszeit T_2

1. Untersuchen Sie den Einfluss der Echozeit und der Anzahl der Echos auf die exponentielle T_2-Relaxationskurve von Öl.
2. Nehmen Sie eine ideale T_2-Relaxationskurve auf und fitten Sie den Signalverlauf mit der in der Software implementierten FIT-Routine. Lesen Sie die Relaxationszeit T_2 von Öl ab und drucken Sie den Graphen.
3. Wiederholen Sie diese Messungen für Wasser. Lesen Sie die Relaxationszeit T_2 von Wasser aus der entsprechenden FIT-Kurve ab und drucken Sie den Graphen.

Durchführung

Beim Start der Software „measure MRT“ öffnet sich automatisch das Fenster aus Abb. 4. Im Bereich 1 lassen sich entsprechende Lektionen auswählen (Lektionenbereich), deren Parameter im Bereich 2 dargestellt werden (Parameterbereich). Im Bereich 3 erfolgt eine Sequenzdarstellung des ausgewählten Versuches (Sequenzbereich). Schließlich werden im Bereich 4 alle Ergebnisse angezeigt (Messbereich). Alle Bereiche lassen sich beliebig im Fenster anordnen. Eine individuell gestaltete Anordnung lässt sich über die „Programm Einstellungen“ für zukünftige Messungen speichern.

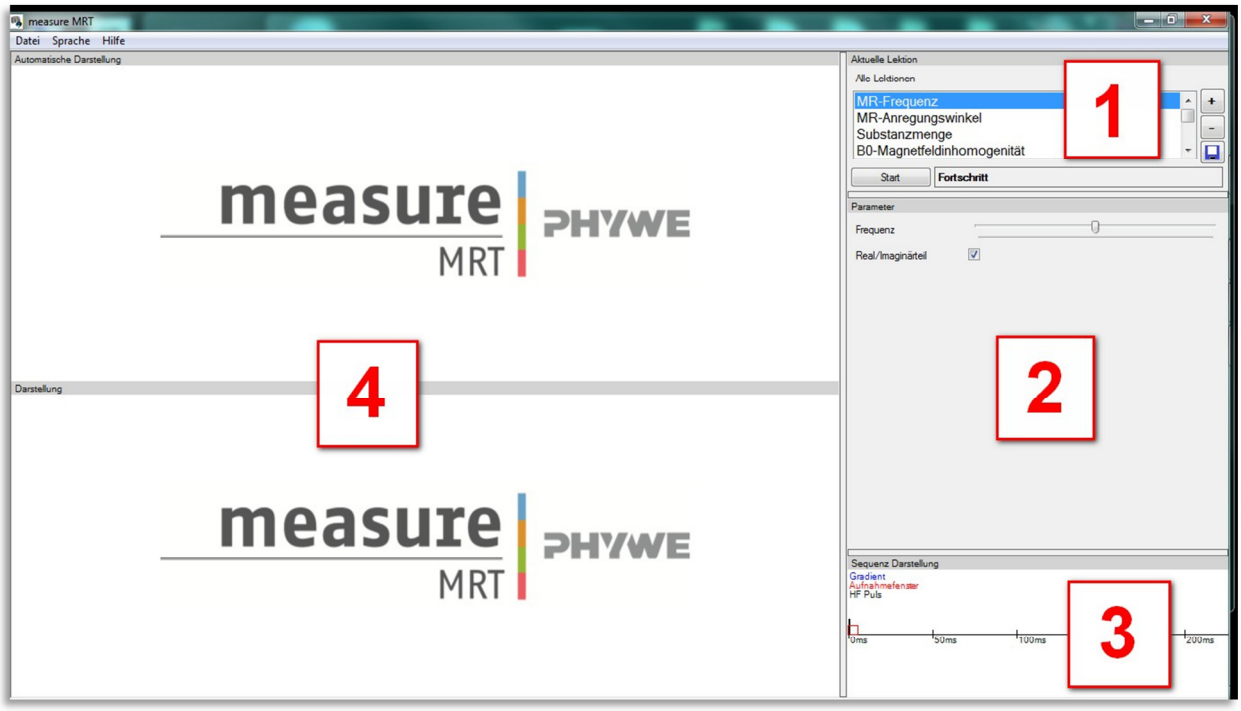

Abb. 4: „measure MRT“ - Bereichsdarstellung

Hinweis:

Alle nun folgenden Experimente (A-C) sollten in chronologischer Reihenfolge durchgeführt werden. Um dies tun zu können, sollte das Versuchsensemble „Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz“ (P5942100) durchgeführt worden sein. Die Einstellungen aus diesem Ensemble sind dann für das Versuchsensemble „Relaxationszeiten in kernmagnetischer Resonanz“ gespeichert.

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

Es ist stets zweckmäßig, die Versuche MR-Frequenz und MR-Anregungswinkel zu wiederholen und sowohl die Systemfrequenz erneut genauestens auf die Larmorfrequenz abzustimmen, als auch die Pulsdauer eines idealen 90°-HF-Puls einzustellen (vgl. P5942100). Deshalb sind diese Versuche in allen Kursen, die das folgende Versuchsensemble enthalten, integriert. TIP: Vor Versuchsbeginn die Parametereinstellungen aus dem Versuchsensemble „Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz“ (P5942100) checken und gegebenenfalls neu einstellen.

A: Schätzung der Relaxationszeit T_1

1. Stellen Sie die 10 mm Wasserprobe in den Probenraum des MR-Gerätes. Wählen Sie im Lektionenbereich die Lektion mit der Bezeichnung *T1-Abschätzung* aus. Der Parameterbereich zeigt nun die Einstellmöglichkeiten *Repetitionszeit* und *Real/Imaginärteil* (siehe Abb. 5). Variieren Sie die Repetitionszeit zwischen zwei 90°-HF-Pulsen über den Einstellregler *Repetitionszeit* (zeitlicher Abstand zwischen zwei Messungen mit jeweils einem 90°-HF-Puls).

Abb. 5: *T1-Abschätzung* - Parameter

2. Stellen Sie die Repetitionszeit zunächst auf einen sehr hohen Wert ein (z.B. 15 s) und messen Sie die Signalamplitude. Reduzieren Sie dann die Repetitionszeit solange, bis Sie nur noch die halbe Signal-Amplitude erhalten. TIP: Reduzieren Sie die Repetitionszeit von 15 s auf ca. 2 s und entscheiden Sie, ob die Repetitionszeit dann größer oder kleiner gewählt werden muss. Berechnen Sie aus dem finalen Wert der eingestellten Repetitionszeit (entspricht der Spin-Gitter-Halbwertszeit) die Relaxationszeit T_1 von Wasser.
3. Tauschen Sie die 10 mm Wasserprobe gegen die 10 mm Ölprobe aus und wiederholen Sie die Punkte 1 und 2. Berechnen Sie die Relaxationszeit T_1 von Öl.

Hinweis: Notieren Sie sich die T_1-Relaxationszeiten von Wasser und Öl. Diese Parameterabschätzungen sind für eine adäquate Durchführung der weiteren Experimente äußerst hilfreich.

B: Messung der Relaxationszeit T_1

1. Stellen Sie die 10 mm Ölprobe in den Probenraum des MR-Gerätes. Wählen Sie im Lektionenbereich die Lektion mit der Bezeichnung *T1-Messen* aus. Der Parameterbereich zeigt nun die Einstellmöglichkeiten *Repetitionszeit, Zeitschritt* und *Anzahl Punkte* (siehe Abb. 6). Variieren Sie die Repetitionszeit zwischen zwei Messungen (eine Messung sind zwei aufeinanderfolgende 90°-Pulse) über den Einstellregler *Repetitionszeit,* den in-

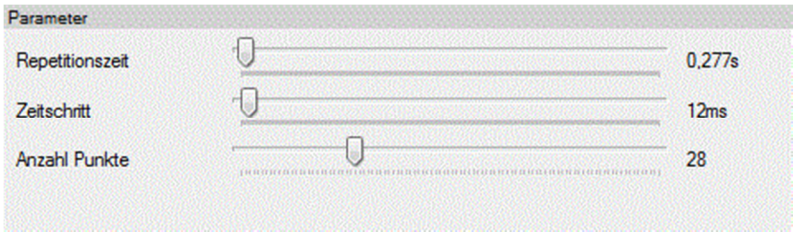

Abb. 6: *T1-Messen* - Parameter

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

krementellen Zeitschritt zur Erhöhung des zeitlichen Abstandes der beiden 90° HF-Pulse in aufeinander folgender Messungen über den Einstellregler *Zeitschritt* und die Anzahl aufeinander folgender Messungen über den Einstellregler *Anzahl Punkte.*

2. Stellen Sie alle Einstellregler so ein, dass Sie auf dem Bildschirm eine adäquate Exponentialkurve sehen. Diese Kurve ist ein Teil der T_1-Relaxationskurve von Öl. TIP: Benutzen Sie die geschätzte Relaxationszeit aus Aufgabenteil A. Die Repetitionszeit sollte mindestens auf das Dreifache des geschätzten T_1-Wertes der Probe eingestellt werden. Zeitschritte und Anzahl der Punkte sollten so eingestellt werden, dass am Ende der Gesamtmessung die effektive Zeit zwischen den beiden 90°-Pulsen mindestens dem Wert vom geschätzten T_1 entspricht. Beachte: Eine große Anzahl von Datenpunkten bei kleinem Zeitschritt liefert stets ein vertrauenswürdigeres Ergebnis.

   Fitten Sie den aufgenommenen Signalverlauf mit einer Exponentialkurve $a - be^{-x/T1}$. Klicken Sie dazu mit der rechten Maustaste auf den Graphen und wählen Sie „Auswertung/Absolut“ aus. Wählen Sie dann den T_1-FIT aus und klicken Sie auf „Kurve anpassen“. Die gefitteten Parameter sind direkt in der Abbildung ablesbar.
3. Tauschen Sie die 10 mm Ölprobe gegen die 10 mm Wasserprobe aus und wiederholen Sie die Punkte 1 und 2. Vergleichen Sie die gefitteten Parameter a, b und T_1 von Öl und Wasser.

Hinweis: Notieren Sie sich die gefitteten T_1-Relaxationszeiten von Wasser und Öl. Diese Parameter sind für eine adäquate Durchführung der weiteren Experimente äußerst hilfreich.

C: Messung der Relaxationszeit T_2

1. Stellen Sie zunächst die 10 mm Ölprobe in den Probenraum des MR-Gerätes. Wählen Sie im Lektionenbereich die Lektion mit der Bezeichnung *T2-Messung* aus. Der Parameterbereich zeigt nun die Einstellmöglichkeiten *Anzahl Echos* und *Echozeit* (siehe Abb. 7). Variieren Sie die Anzahl erzeugter Echos über den Einstellregler *Anzahl Echos* und den zeitlichen Abstand aufeinanderfolgender Echos über den Einstellregler *Echozeit.*

Abb. 7: ***T2-Messen* - Parameter**

2. Stellen Sie alle Einstellregler so ein, dass Sie auf dem Bildschirm eine adäquate Exponentialkurve sehen. Diese Kurve ist ein Teil der T_2-Relaxationskurve von Öl. TIP: Eine Echoanzahl von ca. 250 Echos und eine Echozeit von ca. 2 ms liefert schon eine recht gute Exponentialkurve. Beachte: Bei größeren Echozeiten kommt es zu einer künstlichen und ungewollten Dephasierung aufgrund der speziellen Messsequenz. Damit verschiebt sich die Relaxationszeit T_2 zu deutlich kleineren Werten. Benutzen Sie also eine möglichst kleine Echozeit.

   Fitten Sie den aufgenommenen Signalverlauf mit einer Exponentialkurve $ae^{-x/T2} + c$. Klicken Sie dazu mit der rechten Maustaste auf den Graphen und wählen Sie „Auswertung/Absolut“ aus. Wäh-

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

len Sie dann den T_2-FIT aus und klicken Sie auf „Kurve anpassen“. Die gefitteten Parameter sind direkt in der Abbildung ablesbar.

3. Tauschen Sie die 10 mm Ölprobe gegen die 10 mm Wasserprobe aus und wiederholen Sie die Punkte 1 und 2. Vergrößern Sie dazu die Echoanzahl und ggf. auch die Echozeit. Vergleichen Sie die gefitteten Parameter a, c und T_2 von Öl und Wasser.

Hinweis: Notieren Sie sich die gefitteten T_2-Relaxationszeiten von Wasser und Öl. Diese Parameter sind für eine adäquate Durchführung der weiteren Experimente äußerst hilfreich.

Theorie

In dem Versuchsensemble „Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz (NMR)“ haben wir uns wesentlich mit dem Zustandekommen des eigentlich messbaren Signals, dem sogenannten FID-Signal, beschäftigt. Wir haben gezeigt, wie die einzelnen Kernspins zu einer Gesamtmagnetisierung beitragen, die sich parallel zu einem externen statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$ ausrichtet. Die Kernspins präzedieren dann um diesen statischen Magnetfeldvektor mit einer für den Kern ganz spezifischen Frequenz, der sogenannten Larmorfrequenz. Es gilt

$$\nu_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\gamma}{2\pi} B_0. \tag{2}$$

Ein HF-Puls in der Resonanzbedingung (2), der senkrecht zum externen statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$ aufgeprägt wird, lenkt die Gesamtmagnetisierung um einen Winkel φ aus. Dieser Anregungswinkel ist im Wesentlichen abhängig von der Pulsdauer. Nach jeder Anregung um einen Winkel φ ist der Magnetisierungsvektor zerlegbar in einen Anteil parallel zum statischen Magnetfeld, der Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$ genannt wird, und einen Anteil senkrecht dazu, der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ genannt wird, und der in der Ebene senkrecht zu $\overrightarrow{B_0}$ um selbigen Feldvektor präzediert. Ein 90°-HF-Puls beispielsweise überführt die anfängliche Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_{L0}}$ vollständig in eine Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(0)}$. Entscheidend ist, dass Quermagnetisierungen $\overrightarrow{M_Q(t)}$ in einer Probe Resultat der Phasensynchronizität des Kernspinensembles sind. Zerfällt diese Phasensychronizität ist auch keine Quermagnetisierung mehr messbar.

Jede Auslenkung bewirkt ein Verlassen des Gleichgewichtszustandes, also der Präzession des Magnetisierungsvektors um das statische Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$. Die Relaxation beschreibt nun die natürliche dynamische Wiederherstellung des ursprünglichen Gleichgewichtszustandes. Die exponentielle Wiederherstellung der Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$ wird durch die Relaxationszeit T_1 beschrieben, das exponentielle Abklingen der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ durch die Relaxationszeit T_2 (vgl. Abb. 8). Es gilt

$$M_L(t) = M_{L0}\left(1 - ce^{-t/T1}\right) \tag{3}$$

bzw.

$$M_Q(t) = M_Q(0)e^{-t/T2}, \tag{4}$$

wobei M_{L0} die Stärke der anfänglichen Längsmagnetisierung angibt, die Konstante c den Zustand des Spinensembles zu Beginn der Relaxation ($c = 1$: Sättigung, $c = 2$: Inversion) und $M_Q(0)$ die Stärke der

8 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved P5942200

Quermagnetisierung direkt nach dem mit der Larmorfrequenz aufgeprägten HF-Puls. Für die Konstante c erhält man aus geometrischen Überlegungen

$$c = 1 - cos\,\varphi. \tag{5}$$

Die exponentiell abnehmende Quermagnetisierung ist das eigentliche MR-Signal, welches über die Empfängerspulen detektiert werden kann. Dieses Signal wird in der Fachsprache meistens FID-Signal (Free Induction Decay) genannt.

T_2 ist im Normalfall kleiner ist als T_1 (vgl. Abb.8). Dieses basiert auf unterschiedlichen Wechselwirkungsmechanismen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

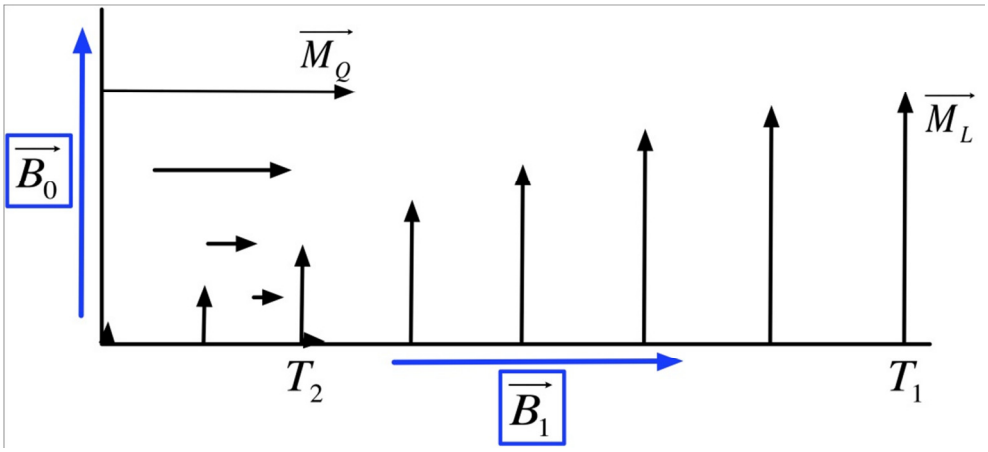

Abb. 8: Längs- und Querrelaxation nach einem 90°-HF-Puls. Die Quermagnetisierung zerfällt schneller als sich die Längsmagnetisierung wieder aufbaut ($T_2 < T_1$). Man beachte, dass die echten Relaxationszeiten T_1 und T_2 kleiner sind als in der Abbildung eingezeichnet. Nach den Formeln (3) und (4) gilt $M_L(T_1) \approx 0.63 \cdot M_{L0}$ und $M_Q(T_2) \approx 0.37 \cdot M_Q(0)$.

Verantwortlich für die T_1-Relaxation ist die sogenannte Spin-Gitter-Wechselwirkung. Die einzelnen Kernspin-Dipole wechselwirken aufgrund der zufälligen Molekularbewegung mit ihrer Umgebung und geben Energie, z.B. kinetische Energie, an entsprechende Gitteratome der umgebenden Substanz ab (wir werden die Umgebung eines Kernspin-Dipols im Folgenden oftmals als Gitter bezeichnen, obwohl dieser Begriff eigentlich nur für einen Festkörper zulässig ist). Die zeitliche Änderung dieser Wechselwirkungen geht einher mit einer zeitlichen lokalen Änderung des Magnetfeldes. Stimmt die Frequenz dieser Magnetfeldschwankungen mit der ungefähren Larmorfrequenz überein, wirken sie wie kleine HF-Pulse und lassen die Spins „flippen“. Dadurch stellt sich nach kurzer Zeit der alte Gleichgewichtszustand gemäß der Boltzmann-Verteilung wieder ein. Die Wahrscheinlichkeit und Geschwindigkeit dieser „Kernspinflips“ ist abhängig von der umgebenden Substanz, was zu unterschiedlichen T_1-Relaxationen in unterschiedlichen Medien führt. Betrachten wir beispielsweise wieder die für die MR-Technologie wichtigen Wasserstoffprotonen. Innerhalb eines relativ gering beweglichen Fettmoleküls spüren die Protonen die magnetischen Feldschwankungen relativ stark. Damit ist die Wahrscheinlichkeit für einen „Protonen-Spinflip“ vergleichsweise hoch, d.h. Fettgewebe geht einher mit einer relativ kurzen T_1-Relaxationszeit (vgl. Abb. 9). Dieselbe Argumentation gilt natürlich auch für andere gering bewegliche Medien, wie z.B. für an ein Protein angelagerte Protonen. Anders verhält es sich in Flüssigkeiten, da hier die Molekularbewegung des Wassers bedeutend schneller als die meisten Magnetfeldschwankungen ist. Dies führt zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit von Resonanzen der einzelnen Kernspins mit diesen Magnetfeldschwankungen. Tauchen sie dennoch auf, sind sie meistens schwächer. Damit ist die Wahrscheinlichkeit für einen „Protonen-Spinflip“ vergleichsweise gering. Deshalb gehen reines Wasser oder Gehirnflüssigkeit (Liquor) einher mit einer relativ langen T_1-Relaxationszeit (vgl. Abb. 9).

Zusammenfassend ist also festzuhalten, dass die Relaxationszeit T_1, die der Zeitdauer zur Wiederherstellung von ca. 63 % der ursprünglichen betragsmäßigen Längsmagnetisierung entspricht, wesentlich abhängt von der Größe und Struktur der die Wasserstoffprotonen umgebenden Moleküle und ihrer Mobilität und Viskosität (temperaturabhängig). Mit Hilfe einer T_1-Gewichtung kann also ein Bildkontrast erzeugt werden, der unterschiedliche Gewebearten eindeutig identifiziert. Zum Beispiel erscheint Liquor

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

(Wasser) in einem typischen T_1-gewichteten MR-Bild deutlich dunkler als Fettgewebe (Öl). Dieser Kontrast kann sogar noch weiter verbessert werden, da auch Elektronenhüllen-Dipole die Relaxationszeit T_1 beeinflussen. Beispielsweise führen paramagnetische Verunreinigungen zu einer Verkürzung von T_1, da die Elektronenhüllen-Dipole sehr viel stärkere Magnete sind als die Kern-Dipole und deshalb stärkere und weiter reichende Störungen produzieren. Im klinischen Einsatz wird dieser „Hüllen-Effekt" besonders bei der Gefäßdarstellung verwendet. Dabei werden hauptsächlich Gadolinium-Komplex-Verbindungen eingesetzt.

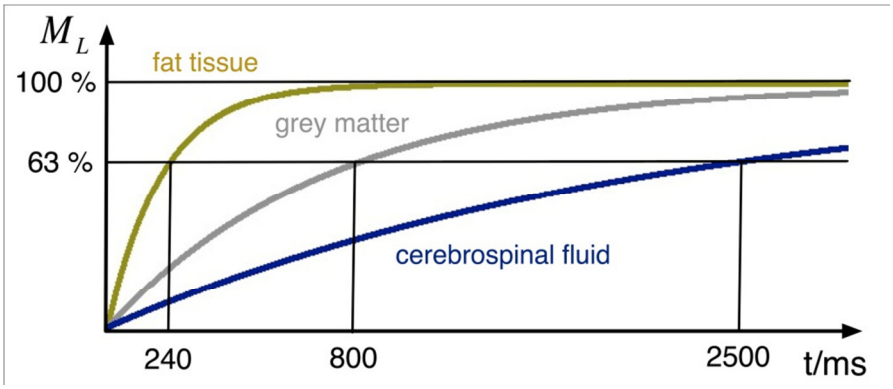

Abb. 9: T_1-Relaxationskurven für unterschiedliche Substanzen. Die Kurven entsprechen dem zeitlichen Verlauf der betragsmäßigen Längsmagnetisierung nach einem 90°-HF-Puls. Zu sehen ist, dass Fett sehr schnell wieder in den Gleichgewichtszustand zurückkehrt (Magnetisierungsvektor parallel zum statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$), die T_1-Relaxationszeit also vergleichsweise kurz ist. Liquor hat hingegen ein deutlich längeres T_1. Die Relaxationskurve von Öl ist ähnlich zu der von Fett, die Relaxationskurve von Wasser ist ähnlich zu der von Liquor.

Die Frage besteht nun, wie die beschriebenen Spin-Gitter-Relaxationszeiten T_1 überhaupt messbar sind. Ein probates Mittel ist sicherlich eine Sequenz von zwei 90°-HF-Pulsen, die durch eine bestimmte Zeit $\tau_{\Delta 90}$ voneinander getrennt sind (vgl. Abb.10).

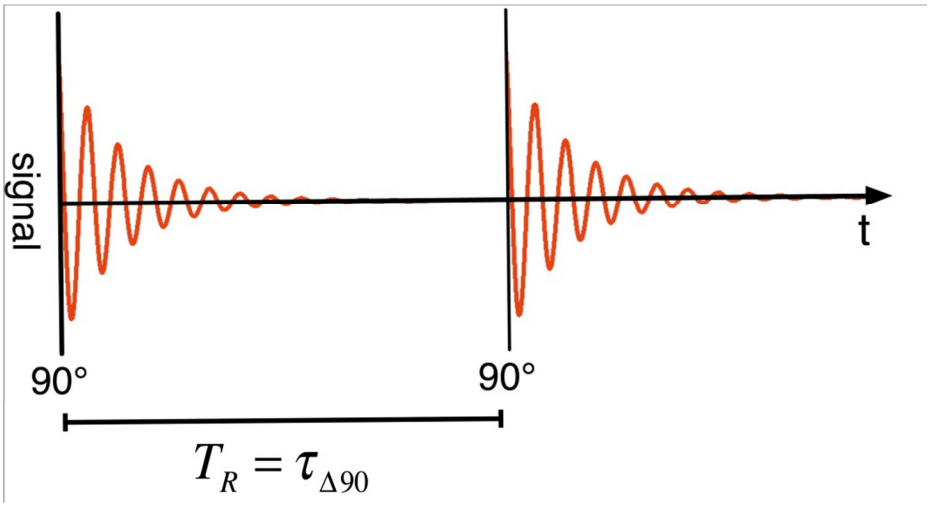

Abb. 10: Pulssequenz zur Messung der T_1-Relaxationskurve. Nach dem ersten 90°-Anregungspuls, der das FID-Signal generiert, wird nach der Zeit $T_R = \tau_{\Delta 90}$ ein zweiter 90°-Puls aufgeprägt. Die Signalstärke nach dem zweiten Puls ist direkt proportional zur Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$. Durch Variation von $\tau_{\Delta 90}$ kann man die T_1-Relaxationskurve abtasten. Über einen exponentiellen FIT dieser Kurve erhält man die Relaxationszeit T_1 der untersuchten Substanz.

Der erste Auslenkpuls lenkt den Magnetisierungsvektor in die Ebene senkrecht zum statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$ aus. Nach kurzer Zeit ($T_2{}^*$) kommt es zur Dephasierung der Kernspins in der senkrechten Ebene und später (T_1) auch wieder zur Herstellung des Gleichgewichtszustandes, also der Relaxation des Magnetisierungsvektors in Richtung des statischen Magnetfeldes $\overrightarrow{B_0}$. Der zweite 90°-Puls nach der Zeit $\tau_{\Delta 90}$ tastet nun quasi ab, wie viele Kernspins wieder im Gleichgewichtszustand präzedieren, oder anders formuliert, um welchen Winkel sich der Magnetisierungsvektor wieder zurückgekippt hat. Das bedeutet, dass die Signalamplitude nach dem zweiten „90°-Nachweispuls" proportional ist zur Längsmagnetisie-

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

rung $\overrightarrow{M_L(t)}$ direkt vor dem „90°-Nachweispuls“. Eine kleine Amplitude nach einem kurzen $\tau_{\Delta 90}$ impliziert einen hohen Anteil der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ und einen geringen Anteil der Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$ an der Gesamtmagnetisierung $\overrightarrow{M_\varphi(t)}$ vor dem Nachweispuls ($\overrightarrow{M_\varphi(t)} = \overrightarrow{M_Q(t)} + \overrightarrow{M_L(t)}$). Eine große Amplitude nach einem langen $\tau_{\Delta 90}$ impliziert entsprechend einen geringen Anteil der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ und einen hohen Anteil der Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$ an der Gesamtmagnetisierung $\overrightarrow{M_\varphi(t)}$ vor dem Nachweispuls, also eine nahezu vollständige Relaxation (vgl. Abb. 10). Über Variation der Repetitionszeit $\tau_{\Delta 90}$ kann man also eine typische T_1-Relaxationskurve einer bestimmten Substanz bestimmen. Über eine FIT-Routine, die eine Exponentialfunktion an die Amplituden der gemessenen Signale anpasst, können schließlich die Relaxationszeiten T_1 berechnet werden. Dazu müssen die Signale vorher noch bearbeitet werden (Basislinienkorrektur, Fourier-Transformation), um sicherzustellen, dass die richtigen Amplitudenwerte für den FIT übernommen werden (im mitgelieferten Messprogramm werden diese Bearbeitungen automatisch durchgeführt).

Eine erste Abschätzung der T_1-Relaxationszeit kann man mit einem sehr einfachen Verfahren gewinnen. Wählt man $\tau_{\Delta 90}$ zunächst sehr lang (z.B. 20 s), erhält man die ungefähre Maximalamplitude nach dem zweiten Nachweispuls, also die Amplitude, die der vollständigen Relaxation der Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$ vor dem zweiten Nachweispuls entspricht. Verringert man nun $\tau_{\Delta 90}$ und sucht nach einem Wert, bei dem die Signalamplitude nur noch etwa halb so groß wie die ungefähre Maximalamplitude ist, entspricht dieser Wert einer groben Abschätzung für die Spin-Gitter-Halbwertszeit $TR_{1/2}$. Definieren wir die Amplitude des Signals als $A_\beta(t)$, so gilt das typische Zerfallsgesetz

$$A_\beta(t) = A_\beta^{max} e^{-\frac{t}{T_1}}. \tag{6}$$

Hieraus lässt sich unmittelbar die Abschätzung für die Relaxationszeit T_1 gewinnen. Es gilt

$$T_1 = \frac{TR_{1/2}}{ln\,2}. \tag{7}$$

Die Spin-Gitter-Wechselwirkung ist auch verantwortlich für die T_2-Relaxation, die ja das exponentielle Abklingen der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ beschreibt. Dies ist sofort ersichtlich, da schwankende Magnetfelder in der Nähe der Larmorfrequenz die Spinzustände der Protonen verändern. Dabei geht auch die Phasenkohärenz des Spinensembles und damit die messbare Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ verloren.

Bei der Relaxation der Quermagnetisierung kommt aber noch eine weitere Wechselwirkung hinzu, die für die generell kürzere T_2-Relaxationszeit im Vergleich zur T_1-Relaxationszeit verantwortlich ist. Dies ist die sogenannte Spin-Spin-Wechselwirkung. Der Wechsel eines Spinzustandes impliziert eine kleine lokale Magnetfeldänderung. Diese Änderung ($\sim 1mT$) spüren die benachbarten Protonen, wodurch sich natürlich ihre Präzessionsfrequenzen leicht verändern. In einem lokalen Bereich streuen dann diese Frequenzen um etwa $40\ kHz$ um die gewöhnliche Larmorfrequenz. Die Frequenzvariationen benachbarter Kernspins treiben den Dephasierungsprozess weiter voran und die messbare Quermagnetisierung geht vergleichsweise schnell verloren.

Die zusätzliche Dephasierung basierend auf Spin-Spin-Wechselwirkungen ist wiederum stark abhängig von der umgebenden Substanz, was zu unterschiedlichen T_2-Relaxationen in unterschiedlichen Medien führt. In Flüssigkeiten (z.B. Wasser oder Liquor) ist T_2 relativ lang (bei reinen Flüssigkeiten manchmal fast gleich lang wie T_1), in festem oder halbfestem Material (z.B. Fett oder biologisches Gewebe) ist T_2 hingegen meistens deutlich kürzer als T_1 (vgl. Abb. 11).

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

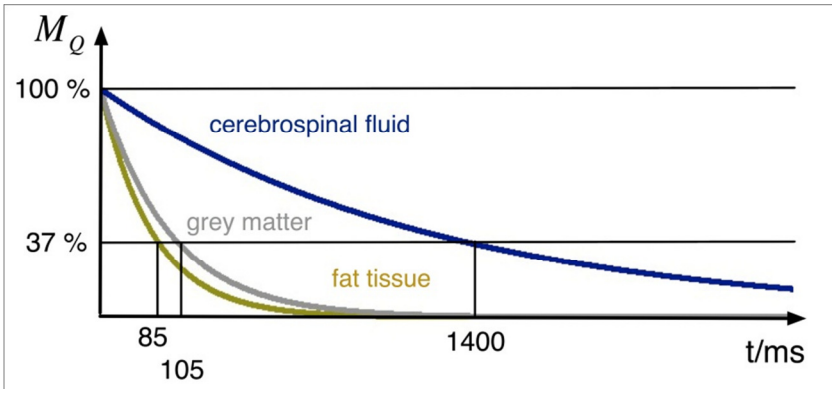

Abb. 11: T_2-Relaxationskurven für unterschiedliche Substanzen. Die Kurven entsprechen dem zeitlichen Verlauf der betragsmäßigen Quermagnetisierung nach einem 90°-HF-Puls. Zu sehen ist, dass Fett sehr schnell wieder in den Gleichgewichtszustand zurückkehrt (Magnetisierungsvektor parallel zum statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$), die T_2-Relaxationszeit also vergleichsweise kurz ist. Liquor hat hingegen ein deutlich längeres T_2. Die Relaxationskurve von Öl ist ähnlich zu der von Fett, die Relaxationskurve von Wasser ist ähnlich zu der von Liquor.

Zusammenfassend ist also festzuhalten, dass die Relaxationszeit T_2, die der Zeitdauer zur Abnahme von ca. 63 % der ursprünglichen betragsmäßigen Quermagnetisierung entspricht, wie auch schon die Relaxationszeit T_1 wesentlich abhängt von der Größe und Struktur der die Wasserstoffprotonen umgebenden Moleküle und ihrer Mobilität und Viskosität (temperaturabhängig). Mit Hilfe einer T_2-Gewichtung kann also auch ein Bildkontrast erzeugt werden, der unterschiedliche Gewebearten eindeutig identifiziert. Zum Beispiel erscheint Liquor (Wasser) in einem typischen T_2-gewichteten MR-Bild deutlich heller als Fettgewebe (Öl).

Letztlich besteht wiederum die Frage, wie Spin-Spin-Relaxationszeiten T_2 überhaupt messbar sind. Typischerweise verwendet man hierzu eine Sequenz aus einem 90°-Puls und mehreren 180°-Pulsen (vgl. Abb. 12).

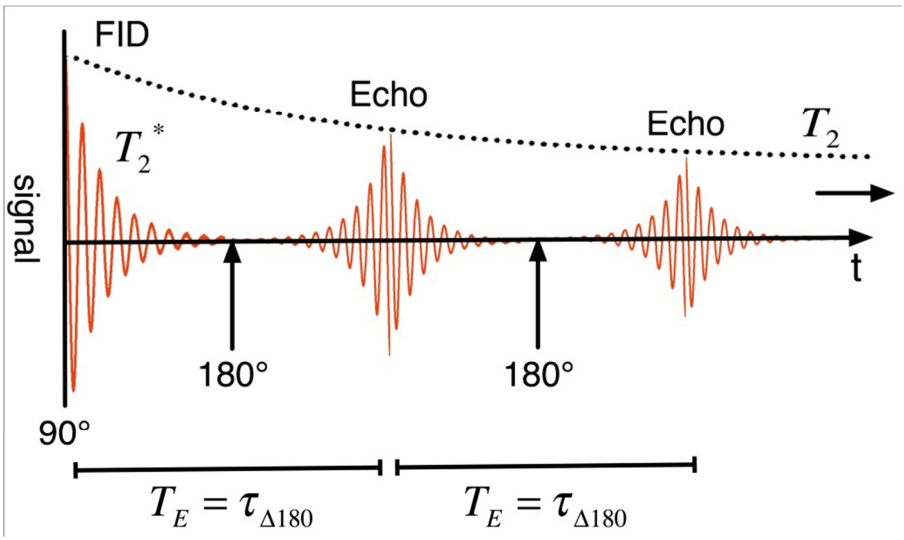

Abb. 12: Pulssequenz zur Messung der T_2-Relaxationskurve. Nach dem ersten 90°-Anregungspuls, der das FID-Signal generiert wird nach der Zeit T_S ein 180°-Puls aufgeprägt. Dieser erzeugt ein Spin-Echo-Signal nach der Zeit $2 \cdot T_S = T_E = \tau_{\Delta 180}$. Dessen Amplitude ist proportional zur Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$. Verwendet man eine Multi-Echo-Sequenz kann man die T_2-Relaxationskurve mit einer einzigen Messung abtasten. Über einen exponentiellen FIT dieser Kurve erhält man die Relaxationszeit T_2 der untersuchten Substanz.

Dazu sei nochmals kurz auf die Funktion eines 180°-Pulses hingewiesen. Wir haben in „Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz gesehen“, dass effektiv das Kernspinensemble nach der phasensynchronen Auslenkung in die Ebene senkrecht zum externen statischen Magnetfeldvektor $\overrightarrow{B_0}$ in einer Zeit $T_2{}^*$dephasiert mit $T_2{}^* < T_2$. Grund dafür waren rein statische, zeitlich und räumlich konstante Feldinhomogenitäten, die die Phasen des Kernspinensembles nach einem bestimmten Muster auseinanderlaufen lassen. Diese systematische Dephasierung lässt sich aber wieder rückgängig machen. Prägt man nach

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

einer Zeit T_S einen 180°-Puls auf, d.h. dreht man das ganze aufgefächerte Spin-Ensemble um 180° (vgl. „gewendetes Omelett“), so hat der schnellste Spin 1 den langsamsten Spin n nach der Zeit $2 \cdot T_S = T_E$ wieder eingeholt. Zu genau diesem Zeitpunkt ist also die anfängliche Phasensynchronizität des Spinensembles wieder hergestellt. Das wiedergewonnene MR-Signal nennt man Spin-Echo. Das Spin-Echo-Signal selbst nimmt mit T_2^* ab, seine Amplitude jedoch mit T_2 (vgl. Abb. 12). Die Dephasierung aufgrund der reinen Spin-Spin- und Spin-Gitter-Wechselwirkung ist also direkt an der Amplitude des Spin-Echo-Signals abzulesen. Jetzt wird auch unmittelbar klar, wie man die T_2-Relaxationskurve bestimmen kann. Man verwendet anstelle eines zweiten 90°-Pulses einfach einen 180°-Puls als Nachweispuls (vgl. T_1-Relaxationskurve) und damit das klassische Spin-Echo-Signal als Nachweissignal dafür, wie groß der Betrag der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ ist, der zum Zeitpunkt T_E des Spin-Echos schon zerfallen ist (vgl. Abb.12). Variation der Echozeit T_E liefert letztlich die typische T_2-Relaxationskurve einer bestimmten Substanz. Über eine FIT-Routine, die wie bei der T_1-Relaxationskurve eine Exponentialfunktion an die Amplituden der gemessenen Signale zu verschiedenen Echozeiten T_E anpasst, können schließlich die Relaxationszeiten T_2 berechnet werden.

Zur Bestimmung der T_2-Relaxationskurve ist es faktisch überhaupt nicht nötig, mehrere Messung mit variierendem T_E zu machen, um einen großen Satz von Datenpunkten zu erreichen. Hier reicht schon eine Messung mit mehreren Echos, die sich nach der einmal eingestellten Echozeit $T_E = \tau_{\Delta 180}$ wiederholen. Eine solche Abfolge nennt man Multiechosequenz oder auch Turbo Spin Echo (TSE). Jede Amplitude eines bestimmten Spin-Echos liefert zum Zeitpunkt seines Erscheinens ($n \cdot T_E$ mit $n \in \mathbb{N}$) einen Datenpunkt der T_2-Relaxationskurve. Über die exponentielle FIT-Routine lässt sich wieder die Relaxationszeit T_2 bestimmen. In Analogie zur T_1-Schätzung genügt es bei der T_2-Schätzung die Echozeit $TE_{1/2}$ zu finden, bei der die Echoamplitude der Hälfte der anfänglichen FID-Signal-Amplitude entspricht. Für die T_2-Abschätzung gilt dann

$$T_2 = \frac{TE_{1/2}}{ln\,2}. \tag{8}$$

Auswertung

A: Schätzung der Relaxationszeit T_1

1. Untersuchen Sie die Auswirkungen der Repetitionszeit zwischen zwei 90°-HF-Pulsen auf das aufgenommene Signal.

Abb. 13 a-c zeigen das Mess-Signal nach dem zweiten 90°-HF-Puls der 10 mm Wasserprobe für drei unterschiedliche Repetitionszeiten $T_R = \tau_{\Delta 90}$. Zu sehen ist, dass das Signal nach dem zweiten 90°-HF-Puls für die kürzeste Repetitionszeit am kleinsten ist (a) und mit größer werdender Repetitionszeit zunimmt (b, c). Dies resultiert unmittelbar aus der vergleichsweise langen Relaxationszeit von Wasser. Prägt man den zweiten HF-Puls auf, noch bevor der Gleichgewichtszustand erreicht ist, d.h. bevor der Magnetisierungsvektor wieder nahezu parallel zum externen statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$ ist, kommt es durch den zweiten HF-Puls nicht mehr zu einer vollständigen Auslenkung aller Kernspins in die Ebene senkrecht zu $\overrightarrow{B_0}$. Damit ist der Betrag des Quermagnetisierungsvektors $\overrightarrow{M_Q(t)}$ geringer und das Messsignal schwächer. Das aufgenommene Signal ist also direkt proportional zum Betrag der relaxierten Längsmagnetisierung $\overrightarrow{M_L(t)}$.

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

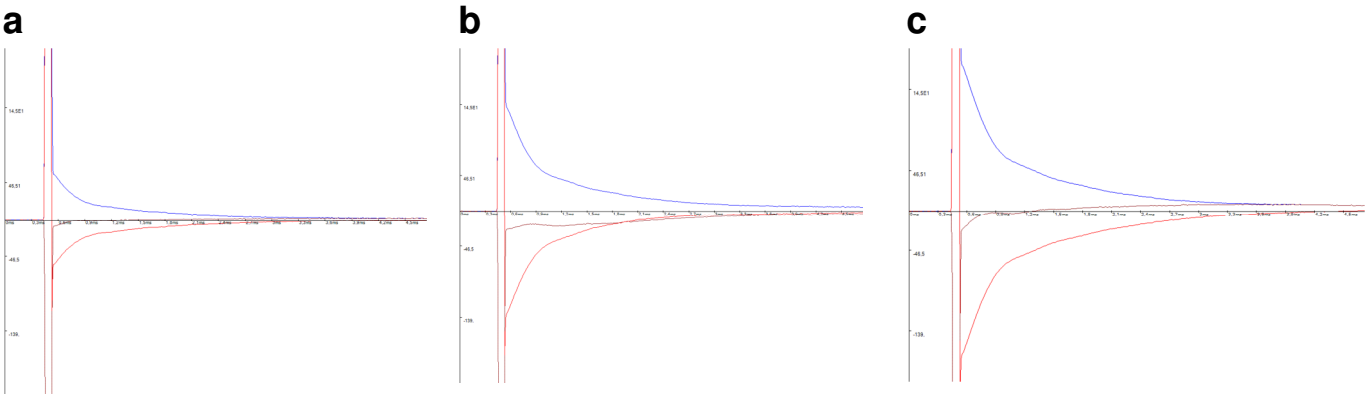

Abb. 13: Mess-Signal nach dem zweiten von zwei 90°-HF-Pulsen der 10 mm Wasserprobe für drei unterschiedliche Repetitionszeiten $T_R = \tau_{\Delta 90}$. (a) $T_R = 1\ s$. (b) $T_R = 5\ s$. (c) $T_R = 16\ s$. Die Repetitionszeit gibt genau den zeitlichen Abstand der beiden Pulse an. Das Signal ist für die sehr kleine Repetitionszeit äußerst schwach, d.h. dass Wasser eine T_1-Relaxationszeit haben muss, die deutlich länger als $1\ s$ ist.

2. Reduzieren Sie die Repetitionszeit solange, bis die aufgenommene Signalamplitude in etwa der Hälfte der Maximalamplitude entspricht und berechnen Sie aus der ungefähren Spin-Gitter-Halbwertszeit die ungefähre Relaxationszeit von Wasser.

Stellt man die Repetitionszeit auf ca. 15 s, erhält man eine gute Schätzung für die Maximalamplitude nach dem zweiten 90°-Puls. Das bedeutet, dass größere Repetitionszeiten so gut wie keine Änderungen mehr an der Signal-Amplitude nach dem zweiten 90°-Puls evozieren. Nach Verringerung der Repetitionszeit auf etwa 2 s entspricht die messbare Signalamplitude in etwa der Hälfte der Maximalamplitude. Die so eingestellte Repetitionszeit ist die Spin-Gitter-Halbwertszeit $TR_{1/2}$ von Wasser. Nun benutzt man die Formel

$$T_1 = \frac{TR_{1/2}}{ln\,2}.$$

Einsetzen liefert $T_1 \approx 2.9\ s$. Dies ist die geschätzte T_1-Relaxationszeit von Wasser.

3. Vergleichen Sie die geschätzten Relaxationszeiten von Wasser und Öl und kommentieren Sie Ihre Ergebnisse.

Abb. 14 a-c zeigen das Mess-Signal nach dem zweiten 90°-HF-Puls der 10 mm Ölprobe für die drei gleichen Repetitionszeiten $T_R = \tau_{\Delta 90}$ wie in Abb. 13 a-c. Offensichtlich sind kaum Unterschiede in der Signalamplitude nach dem zweiten 90°-Puls zu beobachten. Das bedeutet, dass Öl schon nach einer vergleichsweise kurzen Relaxationszeit den Gleichgewichtszustand erreicht, d.h. dass der Magnetisierungsvektor deutlich schneller als bei Wasser wieder nahezu parallel zum externen statischen Magnetfeld $\overrightarrow{B_0}$ ist. Der zweite Puls lenkt dann für alle drei Repetitionszeiten fast alle Kernspins in die Ebene senkrecht zu $\overrightarrow{B_0}$ aus. Damit ist der Betrag des Quermagnetisierungsvektors und folglich das aufgenommene Signal nach dem zweiten 90°-Puls für alle drei Repetitionszeiten in etwa gleich.

Genau wie in Aufgabe 2 kann man die Abschätzung der Relaxationszeit von Öl vornehmen, nur muss man bei Öl die Repetitionszeit deutlich weiter herunterregeln. Nach etwa 0.08 s entspricht die messbare Signalamplitude in etwa der Hälfte der Maximalamplitude. Die so eingestellte Repetitionszeit ist die Spin-Gitter-Halbwertszeit $TR_{1/2}$ von Öl. Einsetzen dieser Zeit in o.a. Formel liefert $T_1 = 0.115\ s$. Dies ist die geschätzte T_1-Relaxationszeit von Öl.

Aus welchen Gründen die T_1-Relaxationszeiten von Wasser und Öl so unterschiedlich sind, wird im Theorieteil eingängig beschrieben.

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

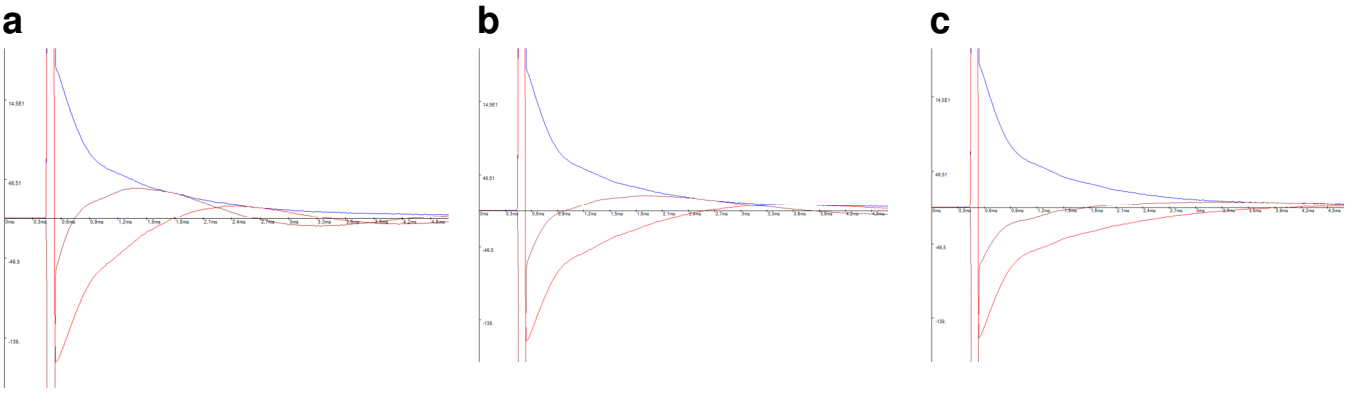

Abb. 14: Mess-Signal nach dem zweiten von zwei 90°-HF-Pulsen der 10 mm Ölprobe für drei unterschiedliche Repetitionszeiten $T_R = \tau_{\Delta 90}$. (a) $T_R = 1\ s$. (b) $T_R = 5\ s$. (c) $T_R = 16\ s$. Die Repetitionszeit gibt genau den zeitlichen Abstand der beiden Pulse an. Das Signal ist für die sehr kleine Repetitionszeit fast genauso groß wie für die beiden größeren, d.h. dass Öl eine T_1-Relaxationszeit haben muss, die kleiner als $1\ s$ ist.

B: Messung der Relaxationszeit T_1

1. Nehmen Sie die exponentielle T_1-Relaxationskurve von Öl auf. Untersuchen Sie den Einfluss der Repetitionszeit, des Zeitschrittes und der Anzahl der Punkte auf diese Relaxationskurve.

In diesem Versuchsteil ist die Repetitionszeit die Zeit zwischen den Einzelmessungen, die sich jeweils aus den zwei 90°-HF-Pulsen zusammensetzen. Damit ist klar, dass für eine adäquate T_1-Relaxationskurve die Repetitionszeit so gewählt werden muss, dass für die neue Messung das Spinensemble wieder nahezu im Gleichgewichtszustand ist, der Magnetisierungsvektor also in Richtung des externen statischen Magnetfeldes $\overrightarrow{B_0}$ zeigt (vgl. hierzu Aufgabenteil A). Wählt man die Repetitionszeit nicht ausreichend groß genug, ist schon das erste FID-Signal in einer Messung schwächer, da der Magnetisierungsvektor nicht mehr vollständig in die Ebene senkrecht zu $\overrightarrow{B_0}$ ausgelenkt wird. Damit ist natürlich auch das Signal nach dem zweiten HF-Puls innerhalb der Einzelmessung verzerrt und gibt nicht mehr den exakten Wert der T_1-Relaxationskurve zum Zeitpunkt des zweiten Signals an. Natürlich ist die Messzeit bei größeren Repetitionszeiten auch länger. Dennoch sollte man die Repetitionszeit mindestens auf das Dreifache des geschätzten T_1-Wertes der zu untersuchenden Substanz einstellen, da zu diesem Zeitpunkt schon in etwa 95% der ursprünglichen Längsmagnetisierung wieder aufgebaut ist.

Über den Zeitschritt variiert man nun den Abstand der zwei 90°-Pulse in aufeinanderfolgenden Messungen. Dabei wird von Messung zu Messung der Abstand zwischen den beiden 90°-Pulsen genau um den Zeitschritt erhöht. Für ein feines Abtasten der T_1-Relaxationskurve benötigt man einen kleinen Zeitschritt. Dennoch sollte man am Ende der Messung die Relaxationskurve mindestens bis zur Relaxationszeit T_1 abgetastet haben, damit ein guter exponentieller FIT möglich ist. Das bedeutet, je feiner man abtastet, desto mehr Messungen (Anzahl der Punkte) muss man generieren.

Bei ungeschickter Wahl dieser beiden Parameter liefert der exponentielle FIT falsche Ergebnisse.

2. Nehmen Sie eine ideale T_1-Relaxationskurve auf und fitten Sie den Signalverlauf mit der in der Software implementierten FIT-Routine. Lesen Sie die Relaxationszeit T_1 von Öl ab und drucken Sie den Graphen.

Abb. 15 zeigt eine T_1-Relaxationskurve von Öl, die einen guten exponentiellen FIT zulässt. Dabei wurde die Repetitionszeit auf 0.5 s eingestellt, die Anzahl der Datenpunkte auf 30 und der Zeitschritt auf 15 ms. Der FIT-Algorithmus fittet die exponentielle Funktion $a - b \cdot e^{-x/T_1}$ an die Datenpunkte. Die so gefunde-

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

nen Parameter lauten a=0.021, b=0.023 und T_1=0.126 s. Beachte: a und b sollten in etwa immer gleich groß sein. Dies hat die Ursache in der 90°-HF-Anregung ($c = 1$, vgl. Formel (3)). T_1=126 ms ist die gesuchte Relaxationszeit von Öl.

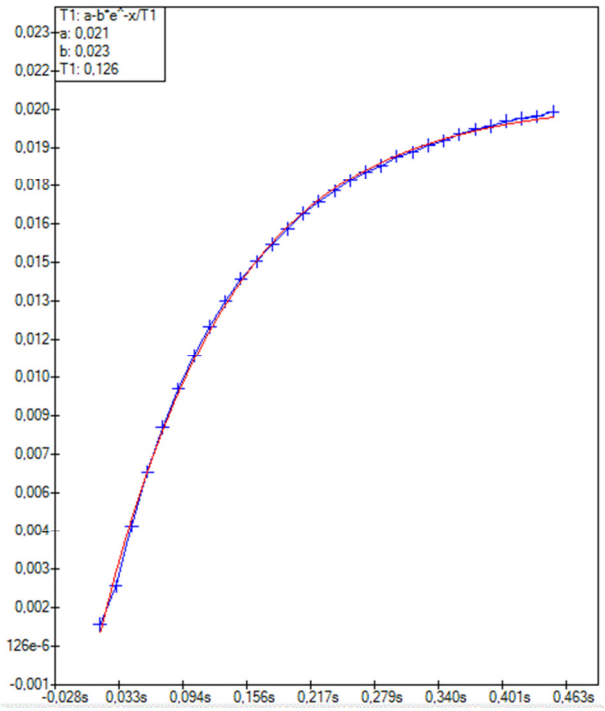

Abb. 15: Exponentieller FIT an die T_1-Relaxationskurve von Öl. Insgesamt wurden 30 Datenpunkte mit einem inkrementellen Zeitschritt von 15 ms aufgenommen, d.h. von Messung zu Messung erhöht sich der Pulsabstand zwischen den beiden 90°-Pulsen um 15 ms. Die Repetitionszeit zwischen zwei aufeinander folgenden Doppel-90°-Puls-Sequenzen wurde auf 500 ms eingestellt. Diese Zeit ist mehr als das Vierfache der geschätzten T_1-Relaxationszeit aus Aufgabenteil A.

Aus dem FIT (rot) erhält man eine T_1-Relaxationszeit von 126 ms für Öl, d.h. 126 ms nach dem anregenden 90°-HF-Puls sind 63 % der ursprünglichen betragsmäßigen Längsmagnetisierung wieder aufgebaut.

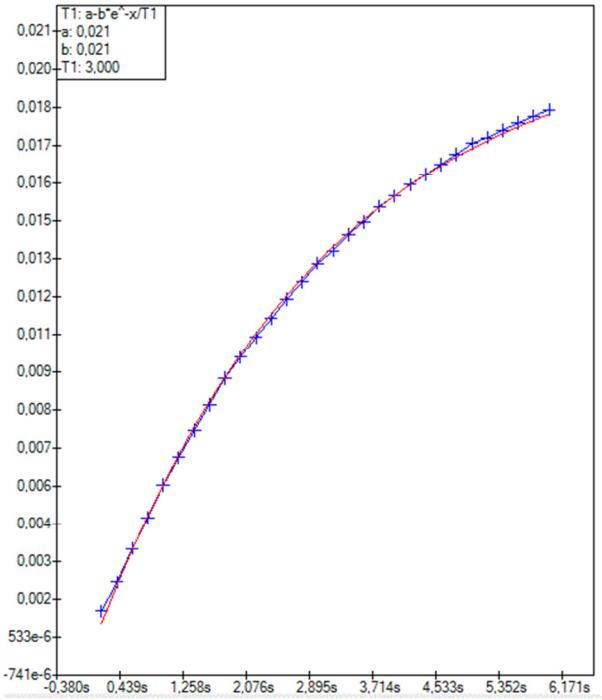

Abb. 16: Exponentieller FIT an die T_1-Relaxationskurve von Wasser. Insgesamt wurden 30 Datenpunkte mit einem inkrementellen Zeitschritt von 200 ms aufgenommen, d.h. von Messung zu Messung erhöht sich der Pulsabstand zwischen den beiden 90°-Pulsen um 200 ms. Die Repetitionszeit zwischen zwei aufeinander folgenden Doppel-90°-Puls-Sequenzen wurde auf 10 s eingestellt. Diese Zeit ist mehr als das Dreifache der geschätzten T_1-Relaxationszeit aus Aufgabenteil A.

Aus dem FIT (rot) erhält man eine T_1-Relaxationszeit von 3 s für Wasser, d.h. 3 s nach dem anregenden 90°-HF-Puls sind 63 % der ursprünglichen betragsmäßigen Längsmagnetisierung wieder aufgebaut.

3. Wiederholen Sie diese Messungen für Wasser. Lesen Sie die Relaxationszeit T_1 von Wasser aus der entsprechenden FIT-Kurve ab und drucken Sie den Graphen.

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

Abb. 16 zeigt eine T_1-Relaxationskurve von Wasser, die einen guten exponentiellen FIT zulässt. Dabei wurde die Repetitionszeit auf 10 s eingestellt, die Anzahl der Datenpunkte auf 30 und der Zeitschritt auf 200 ms. Der FIT-Algorithmus fittet die exponentielle Funktion $a - b \cdot e^{-x/T_1}$ an die Datenpunkte. Die so gefundenen Parameter lauten a=0.021, b=0.021 und T_1=3 s. T_1=3 s ist die gesuchte Relaxationszeit von Wasser.

C: Messung der Relaxationszeit T_2

1. Untersuchen Sie den Einfluss der Echozeit und der Anzahl der Echos auf die exponentielle T_2-Relaxationskurve von Öl.

In diesem Aufgabenteil geht es darum, die Relaxationszeit T_2 von Substanzen über eine Multiechosequenz zu bestimmen. Jedes Spin-Echo dient dabei als Nachweissignal für den übriggebliebenen Anteil der Quermagnetisierung $\overrightarrow{M_Q(t)}$ im Relaxationsprozess und ist vom nächsten Spin-Echo jeweils durch die Echozeit $T_E = \tau_{\Delta 180}$ getrennt. Damit ist unmittelbar klar, dass für ein feines Abtasten der T_2-Relaxationskurve die Anzahl der Echos möglichst groß gewählt werden sollte und die Echozeit möglichst klein. Es gilt wieder, dass man in etwa bis zur T_2-Relaxationszeit der zu untersuchenden Substanz abtasten sollte, damit ein guter exponentieller FIT möglich ist. Das bedeutet, je feiner man abtastet, desto mehr Echos muss man generieren. Beachte: Bei größeren Echozeiten kommt es zu einer künstlichen und ungewollten Dephasierung aufgrund der speziellen Messsequenz. Damit verschiebt sich die Relaxationszeit T_2 zu deutlich kleineren Werten. Bei ungeschickter Wahl der Echozeit T_E liefert der exponentielle FIT also falsche Ergebnisse.

T_2 kann man wiederum aus einem Schätzverfahren gemäß Formel (8) gewinnen.

Beachte: Im Gegensatz zur Messung der Relaxationszeit T_1 kann man T_2 schon mit einer einzigen Messung, bestehend aus einer Multiechosequenz, bestimmen.

2. Nehmen Sie eine ideale T_2-Relaxationskurve auf und fitten Sie den Signalverlauf mit der in der Software implementierten FIT-Routine. Lesen Sie die Relaxationszeit T_2 von Öl ab und drucken Sie den Graphen.

Abb. 17 zeigt eine T_2-Relaxationskurve von Öl, die einen guten exponentiellen FIT zulässt. Dabei wurde die Echozeit auf 2 ms eingestellt und die Anzahl der Echos auf 250. Der FIT-Algorithmus fittet die exponentielle Funktion $c + a \cdot e^{-x/T_2}$ an die Datenpunkte. Die so gefundenen Parameter lauten a=0.052, c=0.002 und T_2=0.094 s. T_2=94 ms ist die gesuchte Relaxationszeit von Öl.

3. Wiederholen Sie diese Messungen für Wasser. Lesen Sie die Relaxationszeit T_2 von Wasser aus der entsprechenden FIT-Kurve ab und drucken Sie den Graphen.

Abb. 18 zeigt eine T_2-Relaxationskurve von Wasser, die einen guten exponentiellen FIT zulässt. Dabei wurde die Echozeit auf 12 ms eingestellt und die Anzahl der Echos auf 450. Der FIT-Algorithmus fittet die exponentielle Funktion $c + a \cdot e^{-x/T_2}$ an die Datenpunkte. Die so gefundenen Parameter lauten a=0.052, c=0.002 und T_2=1.423 s. T_2=1.423 s ist die gesuchte Relaxationszeit von Wasser.

P5942200 PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved

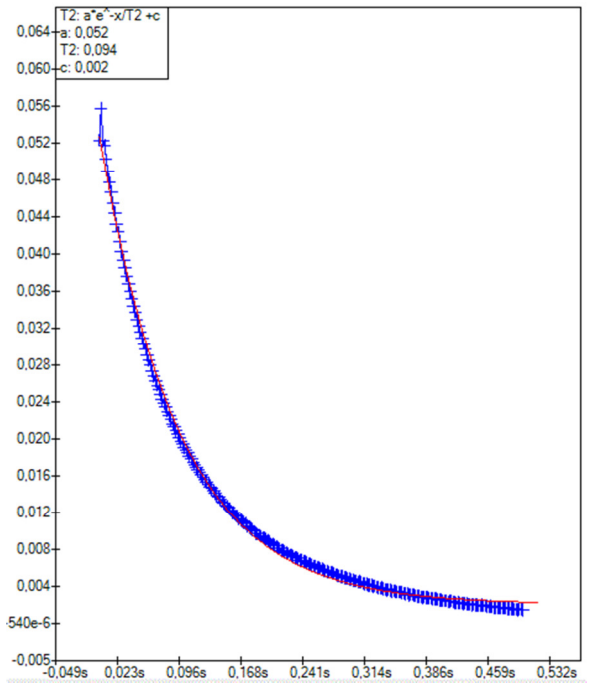

Abb. 17: Exponentieller FIT an die T_2-Relaxationskurve von Öl. Insgesamt wurden 250 Datenpunkte, also 250 Spin-Echos aufgenommen, die jeweils durch eine Echozeit von 2 ms voneinander getrennt sind. Insgesamt wird also der Betrag der Quermagnetisierung in einem Bereich von 500 ms nach dem ersten Anregungspuls abgetastet.

Aus dem FIT (rot) erhält man eine T_2-Relaxationszeit von 94 ms für Öl, d.h. 94 ms nach dem anregenden 90°-HF-Puls sind 63 % der ursprünglichen betragsmäßigen Quermagnetisierung zerfallen.

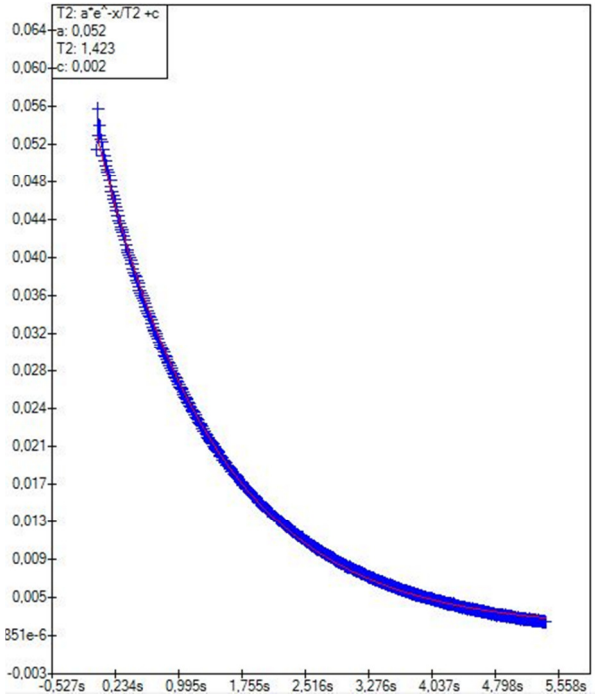

Abb. 18: Exponentieller FIT an die T_2-Relaxationskurve von Wasser. Insgesamt wurden 450 Datenpunkte, also 450 Spin-Echos aufgenommen, die jeweils durch eine Echozeit von 12 ms voneinander getrennt sind. Insgesamt wird also der Betrag der Quermagnetisierung in einem Bereich von 5.4 s nach dem ersten Anregungspuls abgetastet.

Aus dem FIT (rot) erhält man eine T_2-Relaxationszeit von 1.423 s für Wasser, d.h. 1.423 s nach dem anregenden 90°-HF-Puls sind 63 % der ursprünglichen betragsmäßigen Quermagnetisierung zerfallen.

PHYWE Systeme GmbH & Co. KG © All rights reserved