

Ein Demonstrationsexperiment zur Kernspintomographie

von

Oswald ENNEMOSER und Walter AMBACH *)

(Institut für Medizinische Physik der Universität Innsbruck)

A demonstration experiment to the nuclearspin-tomography

S y n o p s i s : In recent years Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Tomography has gained more and more importance as an imaging technique in medical diagnostics and science. This development must be taken into consideration for education in medicine. For this purpose a suitable demonstration experiment has been developed to illustrate the mode of operation of a NMR tomograph. A NMR tomograph is imaging the density of protons. From the classical point of view the spinning proton acts like a magnetic gyroscope. The demonstration experiment shows the reaction of a magnetic gyroscope in static and dynamic magnetic fields.

1. Einleitung

Mit dem im folgenden beschriebenen Demonstrationsversuch werden einige wesentliche physikalische Vorgänge bei der Kernspinresonanz anschaulich dargestellt. Sie können durch zwei unterschiedliche Modelle, durch das quantenmechanische und das klassische Modell, beschrieben werden. Das Demonstrationsexperiment folgt der klassischen Betrachtungsweise.

Die magnetische Kernresonanz (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) wurde bereits 1946 von PURCELL und BLOCH nachgewiesen und anschließend zu einer spektroskopischen Untersuchungsmethode für Fragestellungen im Bereich der Chemie und der Festkörperphysik weiterentwickelt (PURCELL et al., 1946; BLOCH, 1946). LAUTERBUR (1973) hatte die Idee auf der Grundlage der magnetischen Kernresonanz ein bildgebendes Verfahren zu entwickeln, das im Gegensatz zum Röntgen-CT ohne ionisierende Strahlung die Aufnahme von Schnittbildern des menschlichen Körpers ermöglicht.

Der menschliche Organismus ist dabei einem starken Magnetfeld und einer elektromagnetischen Strahlung im Kurzwellenbereich ausgesetzt, was nach bisherigem Wissen ohne schädigende Wirkungen ist. In den aufgenommenen Schnittbildern wird primär die Dichte der in den frei beweglichen Wassermolekülen des Gewebes enthaltenen Protonen dargestellt. Im folgenden wird daher das Verhalten von Protonen in statischen und dynamischen magnetischen Feldern durch das Demonstrationsexperiment näher erklärt.

*) Anschrift der Verfasser: Dr. phil. O. Ennemoser und Univ.-Prof. Dr. phil. W. Ambach, Institut für Medizinische Physik, Müllerstr. 44, A-6020 Innsbruck, Österreich.

Der Atomkern des Wasserstoffs, das Proton, besitzt einen Kernspin, der als Eigendrehimpuls gedeutet werden kann. Da das Proton elektrisch geladen ist, wird durch den Eigendrehimpuls ein Magnetfeld erzeugt. Das Proton stellt daher in der klassischen Betrachtungsweise einerseits einen Kreisel, andererseits einen Elementarmagneten dar.

2. Aufbau des Experiments

Kernstück des Experiments ist ein magnetischer Kreisel, der aus einer Stahlkugel mit einem aufgesetzten kleinen Magneten besteht. Diese Stahlkugel schwebt nahezu reibungslos in einem starken Luftstrom und wird von einem zweiten tangential angreifenden Luftstrom in Rotation versetzt (Abb. 1). Dieser magnetische Kreisel stellt den Atomkern des Wasserstoffs, das Proton dar.

Um den magnetischen Kreisel sind zwei Spulen angebracht (Abb. 1). Spule 1 erzeugt ein zeitlich konstantes Magnetfeld parallel zur z-Achse, das Längsfeld. Spule 2 erzeugt ein Magnetfeld parallel zur y-Achse, das sogenannte Querfeld. Das Querfeld kann mit Hilfe eines Umpolers als magnetisches Wechselfeld betrieben werden.

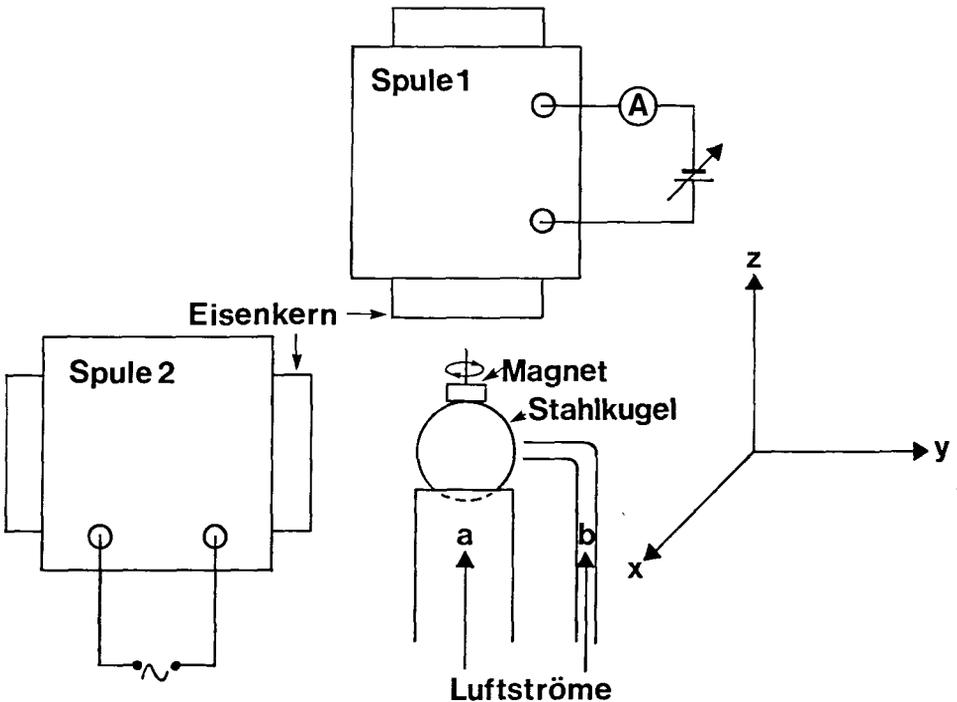


Abb. 1: Eine Stahlkugel mit aufgesetztem Magneten schwebt auf einem Luftstrom (a) und wird von einem zweiten Luftstrom (b) in Rotation versetzt. Spule 1 erzeugt ein Magnetfeld parallel zur z-Achse, das Längsfeld. Spule 2 erzeugt ein magnetisches Wechselfeld parallel zur y-Achse, das Querfeld

3. Durchführung des Experimentes

Welche physikalischen Effekte können durch das Demonstrationsexperiment gezeigt werden?

3.1. Statischer Fall:

Zu Beginn des Experimentes schwebt der Magnetkreisel im Luftstrom, ohne um die eigene Achse zu rotieren. Er stellt daher keinen Kreisel, sondern lediglich einen in alle Richtungen leicht beweglichen Magneten dar. Fließt ein Strom durch Spule 1, entsteht das magnetische Längsfeld und der Magnet richtet sich parallel zu den Feldlinien des Längsfeldes aus.

3.2. Dynamischer Fall:

Versetzt man die Stahlkugel durch einen tangential angreifenden Luftstrom in Rotation, stellt das System zugleich einen Kreisel und einen Magneten dar. Wird das Längsfeld (Spule 1) eingeschaltet, beginnt die Kreiselachse um die Feldlinien des Längsfeldes zu präzedieren. Die Frequenz ω_L dieser Präzessionsbewegung wird als Larmorfrequenz bezeichnet, wobei gilt:

$$\omega_L = \gamma \cdot B_z$$

In dieser Beziehung stellt γ eine kernspezifische Konstante, das sogenannte gyromagnetische Verhältnis, und B_z die magnetische Kraftflußdichte des Längsfeldes dar.

3.3. Abhängigkeit der Larmorfrequenz von der magnetischen Kraftflußdichte und vom Eigendrehimpuls:

Wird der Strom in Spule 1 vergrößert, verstärkt sich die Kraftflußdichte B_z und der Kreiselmagnet präzediert mit größerer Frequenz. Die Larmorfrequenz ist direkt proportional zur Kraftflußdichte B_z des Längsfeldes. Das gyromagnetische Verhältnis γ kann durch einen Drehimpuls des Kreiselmagneten simuliert werden. Reduziert man den tangentialen Luftstrom, rotiert der Kreisel langsamer und die Präzessionsfrequenz steigt.

3.4. Auslenkung des Kreiselmagneten aus der Vertikalen:

Spule 2 erzeugt ein Magnetfeld parallel zur y-Achse, das sogenannte Querfeld (Abb. 1). Wird das Querfeld eingeschaltet, neigt sich der Kreiselmagnet aus der z-Achse heraus; die geneigte Kreiselachse präzediert dabei mit der Larmorfrequenz um die Längsachse. Nach einer Präzession um 180° muß das Querfeld umgepolt werden, um eine weitere Neigung der Kreiselachse zu erreichen. Nach einer Präzession um weitere 180° muß wiederum die Polung umgekehrt werden usw. Das Querfeld muß seine Polung im Rhythmus der Larmorfrequenz ändern (Resonanzbedingung; Abb. 2). Diese Auslenkbewegung kann als Präzession um die Feldlinien des Querfeldes B_y gedeutet werden, so daß sich die Bewegung des Kreiselmagneten aus zwei Rotationen zusammensetzt:

1. Präzession um z-Achse (Längsfeld)
2. Präzession um y-Achse (Querfeld).

Für beide Präzessionsbewegungen gilt die Beziehung $\omega_L = \gamma \cdot B$, unter Verwendung von B_z für das Längsfeld bzw. B_y für das Querfeld.

3.5. 90° Impuls:

Unter einem 90° Impuls versteht man einen Querfeldimpuls, der in der Lage ist, den Kreiselmagneten um den Winkel $\varphi = 90^\circ$ aus der z-Richtung in die xy-Ebene zu drehen.

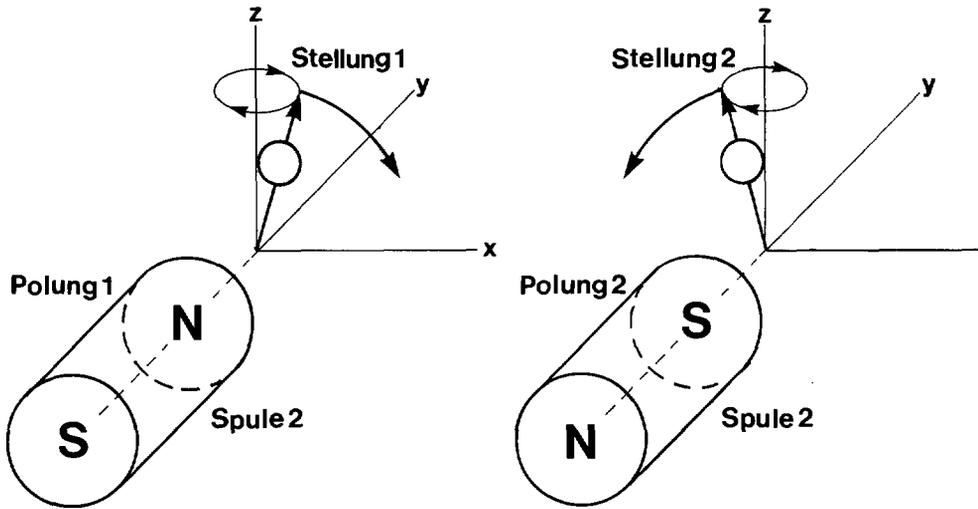


Abb. 2: Der um die z-Achse präzedierende Kreiselmagnet wird in Stellung 1 durch das Querfeld bei Polung 1 zu einer Rotation im Uhrzeigersinn um die y-Achse gezwungen. Nach einer Präzession um 180° um die z-Achse erzwingt das Querfeld in Stellung 2 bei Polung 2 eine Rotation im Gegen-uhrzeigersinn um die y-Achse, wodurch sich der Kreiselmagnet weiter aus der z-Achse heraus in Richtung der xy-Ebene senkt

Dazu muß das Querfeld für die Zeitdauer t_1 eingeschalten werden. Es gilt

$$\omega_L = \frac{\varphi}{t} = \gamma \cdot B_y$$

daraus folgt

$$t = \frac{\varphi}{\gamma B_y}$$

für

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \quad t_1 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\gamma B_y}$$

Durch mehrmaliges Umpolen des Querfeldes, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, kann eine Neigung des Kreiselmagneten um 90° aus der z-Richtung erreicht werden.

3.6. Empfangssignal:

Nach Auslenkung des Kreiselmagneten aus der z-Richtung wird Spule 2 als Empfangsspule an ein Galvanometer angeschlossen. Der in der xy-Ebene rotierende Magnet erzeugt in der Empfangsspule eine Induktionswechselspannung mit der Präzessionsfrequenz.

3.7. Relaxationszeit T_1 :

Nach einem 90° Impuls präzediert der Kreiselmagnet in der xy-Ebene um die z-Achse. Aufgrund von Reibungskräften richtet sich der Kreiselmagnet in Richtung der z-Achse langsam auf. Die Amplitude des Empfangssignals nimmt durch das Aufrichten des Kreiselmagneten mit der Relaxationszeit T_1 ab.

4. Folgerungen aus dem Experiment

Was kann aus dem Demonstrationsexperiment für das NMR-Verfahren gelernt werden?

Im menschlichen Körper ist ohne äußeres Magnetfeld die Orientierung der einzelnen elementaren Magnete (Protonen) völlig ungeordnet. Wird der Körper in ein starkes äußeres Magnetfeld gebracht, beginnen die Protonen mit der Larmorfrequenz um die Feldlinien zu präzedieren (vergl. Abschnitt 3.2.). Die Größe der Larmorfrequenz von Protonen liegt bei den verwendeten Kraftflußdichten des Längsfeldes im MHz-Bereich, was einer Wellenlänge im Kurzwellenbereich entspricht. Die Präzessionsbewegung klingt mit der Relaxationszeit T_1 ab und die Protonen orientieren sich mehrheitlich parallel zur z-Achse. Will man die Protonen aus der z-Richtung auslenken, muß das Querfeld ein Wechselfeld mit der Larmorfrequenz sein (vergl. Abschnitt 3.4.). Dies erreicht man durch Einstrahlung einer Kurzwelle, deren Frequenz mit der Larmorfrequenz übereinstimmt (MHz-Bereich). Durch einen 90° Impuls werden die Protonen in die xy-Ebene gedreht, in der sie mit der Larmorfrequenz präzedieren (vergl. Abschnitt 3.5.). Durch diese Präzession induzieren die Protonen ein Signal in der Empfangsspule (vergl. Abschnitt 3.6.). Die Intensität dieses Signals ist proportional zur Zahl der präzedierenden Protonen, die Frequenz gleich der Larmorfrequenz. Das Empfangssignal nimmt mit der Zeit T_1 ab, da sich die Protonen allmählich wieder in Richtung der z-Achse orientieren (vergl. Abschnitt 3.7.). Es findet dabei eine Energieübertragung auf die Gittermoleküle statt, weshalb die Relaxationszeit T_1 als Spin-Gitterrelaxationszeit bezeichnet wird.

5. Spin-Spin Relaxationszeit und Bildgebung

Bei Anwendung des NMR-Verfahrens auf den Organismus sind anstelle eines Kreiselsterns viele Protonen den beschriebenen Magnetfeldern ausgesetzt. Welche zusätzlichen Effekte sind dabei für das NMR-Verfahren von Bedeutung?

5.1. Spin-Spin Relaxationszeit:

Das Empfangssignal nimmt bei der Kernspintomographie wesentlich rascher ab, als es durch den in 3.7. beschriebenen Vorgang erklärbar wäre. Die Abnahme muß daher durch einen zweiten Vorgang bestimmt sein.

Durch den Hochfrequenzimpuls des Querfeldes, was der Einstrahlung einer Kurzwelle entspricht, werden die Protonen nicht nur um 90° gedreht. Als zusätzlicher Effekt ergibt sich, daß aufgrund der Resonanzbedingung die Protonen in ihren Präzessionsbewegungen synchronisiert werden.

Abbildung 3a zeigt die nach dem 90° Impuls synchron in der xy-Ebene präzedierenden Elementarmagnete. Durch Vektoraddition ergibt sich die Resultierende in Abb. 3b. Durch Feldinhomogenitäten, erzeugt durch die elementaren Magnetfelder benachbarter Spins, rotieren einige Elementarmagnete etwas schneller, andere wiederum langsamer. Dies führt zu einem Verlust der Synchronisation, der resultierende Vektor und damit das Empfangssignal nimmt mit der Spin-Spin Relaxationszeit T_2 ab (Abb. 3c, d).

5.2. Bildgebung:

Eine Ortsauflösung von Protonen-Dichten erreicht man dadurch, daß dem Längsfeld in allen 3 Raumrichtungen ein Feldgradient überlagert wird. Dadurch ist jeder Raum-

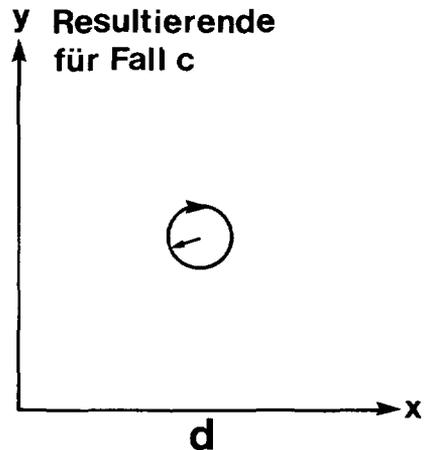
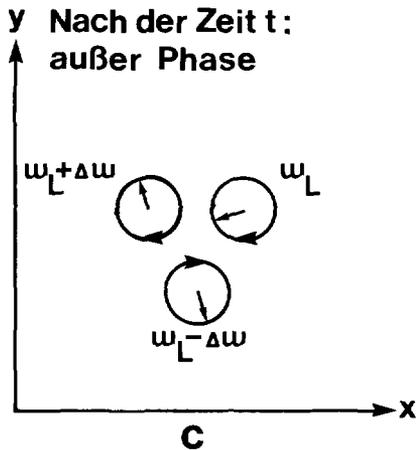
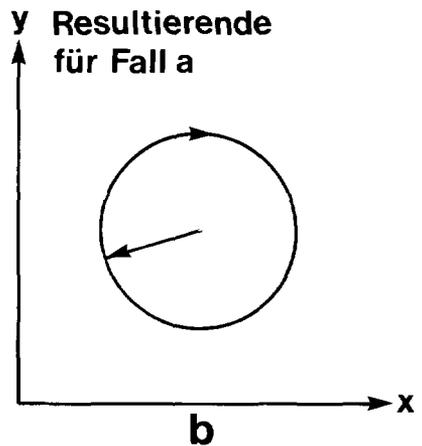
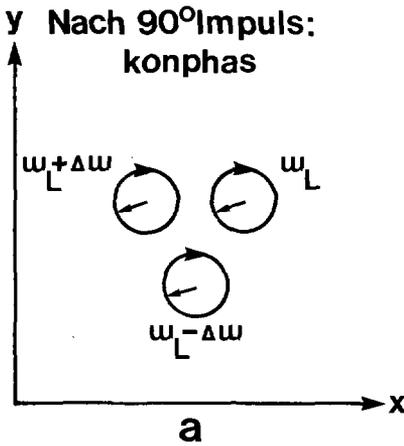


Abb. 3: a) Nach einem 90° Impuls präzedieren die Protonen auf Grund der Resonanzbedingung konphas in der xy-Ebene. – b) Das magnetische Moment der einzelnen Protonen addiert sich zu der gezeichneten Resultierenden. Diese ist ein Maß für die Intensität des Meßsignals. – c) Durch Feldinhomogenitäten, erzeugt durch die elementaren Magnetfelder benachbarter Spins, präzedieren einige Protonen etwas schneller, andere wiederum langsam. Die Protonen sind nach kurzer Zeit t außer Phase. – d) Durch Vektoraddition ergibt sich nach der Zeit t eine verkürzte Resultierende und damit ein kleineres Meßsignal als in 3b. Das Meßsignal nimmt auf Grund dieses Vorganges mit der Spin-Spin Relaxationszeit T_2 ab

punkt einer anderen Kraftflußdichte B_z ausgesetzt. Die Protonen präzedieren daher aufgrund der Beziehung $\omega_L = \gamma \cdot B_z$ (vergl. Abschnitt 3.5.) von Punkt zu Punkt mit einer anderen Larmorfrequenz. Die Meßsignale unterscheiden sich sowohl in ihrer Frequenz als auch in ihrer Intensität. Die Zuordnung der Meßsignale zu den Raumpunkten erfolgt über die Frequenz, die Intensität der Meßsignale ist ein Maß für die Dichte der Protonen (siehe Abb. 4). Die Zuordnung und Auswertung der Meßdaten übernimmt ein Prozessrechner. Dieses Verfahren wird als Nuclear Magnetic Imaging (NMI) bezeichnet.

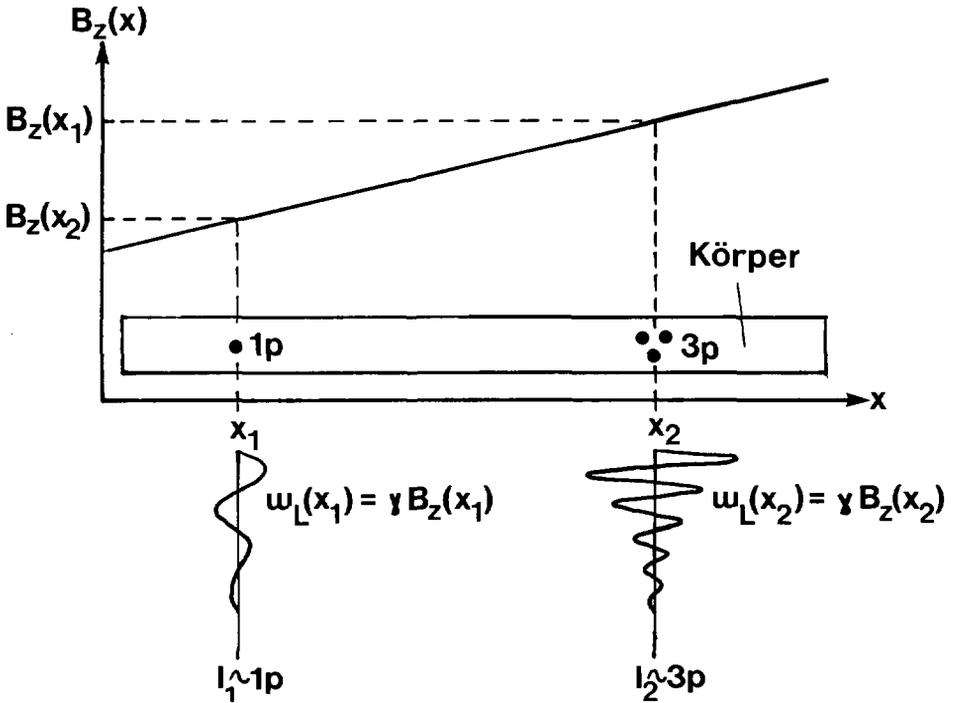


Abb. 4: Das Längsfeld B_z ist nicht homogen, sondern nimmt durch Überlagerung eines Feldgradienten in Richtung der x -Achse linear zu. An der Stelle x_1 wird nur ein Proton zur Präzession angeregt. Das ausgesandte Meßsignal hat die Larmorfrequenz ω_1 und die Intensität I_1 . An der Stelle x_2 werden 3 Protonen zur Präzession angeregt. Das ausgesandte Meßsignal hat die Larmorfrequenz ω_2 und die Intensität I_2 , die dreimal so groß ist wie I_1 . Die verschiedenen Frequenzen werden durch unterschiedliche Wellenlängen, die verschiedenen Intensitäten durch unterschiedliche Amplituden angedeutet. Die Zuordnung der Meßsignale zu den Raumpunkten erfolgt über deren Frequenz, die Intensität der Meßsignale ist ein Maß für die Dichte der Protonen

6. Schlußbemerkungen

Das vorgestellte Experiment läßt sich mit einfachen Labormitteln zusammenstellen. Zur Erzeugung des Luftstromes, in dem der Kreiselmagnet schwebt, wird ein Staubsauger verwendet, für den tangentialen Luftstrom eine laborübliche Luftpumpe. Die Magnetfelder werden mit Spulen (1200 Windungen, 1,5 A Max.), wie sie in jeder Lehrmittelsammlung vorhanden sind, erzeugt. Der Kreiselmagnet ist aus einer Stahlkugel eines Kugellagers und einem kleinen Magneten zusammengesetzt. Das Experiment kann im Rahmen einer Vorlesungsstunde durchgeführt werden. Nach unseren Erfahrungen wird das Experiment gut aufgenommen und trägt wesentlich zum Verständnis der physikalischen Grundlagen des NMR-Verfahrens bei.

Zusammenfassung: Die Kernspintomographie als abbildendes Verfahren gewinnt in der medizinischen Diagnostik und Forschung immer mehr an Bedeutung. Im Rahmen der Physikausbildung für Mediziner wurde ein Demonstrationsexperiment entwickelt, durch das wesentliche physikalische

sche Aspekte dieses Verfahrens dargestellt werden können. Im klassischen Modell sind die zur Abbildung gelangenden Protonen einerseits als Kreisler, andererseits als Elementarmagneten beschreibbar. Mit Hilfe des Experimentes kann das Verhalten eines magnetischen Kreislers in statischen und dynamischen Magnetfeldern demonstriert werden.

Literatur

- PURCELL, E.M., H.C. TORREY and R.V. POUND (1946): Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. — *Phys. Rev.*, **69**: 37.
- BLOCH, F. (1946): Nuclear Induction. — *Phys. Rev.*, **70**: 460 - 473.
- LAUTERBUR, P.C. (1973): Image formation by induced local interaction: examples employing nuclear magnetic resonance. — *Nature*, **242**: 190 - 191.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1985

Band/Volume: [72](#)

Autor(en)/Author(s): Ambach Walter, Ennemoser Oswald

Artikel/Article: [Ein Demonstrationsexperiment zur Kernspintomographie. 263-270](#)