Kernspinresonanz

Dr. Annette Schlemm, 07.12.2008

Zur Vorgeschichte 1
Physik der Kernspinresonanz 1
Protonen 1
Kernspinresonanz 2
Anwendungen der Kernspinresonanz 9
Strukturaufklärung 9
Medizinische Diagnose 9
Medizinische Therapie? 10
Bilanz 11
Literatur und Quellen 12

Zur Vorgeschichte

Das Konzept von Global Scaling® behauptet, innerhalb des Universums gäbe es so etwas wie „Dichtewellen", die alle Prozesse und Strukturen im Universum beeinflussen. Während frühe Texte von „stehenden Gravitationswellen" sprechen, wird später nur noch von „G-Wellen" gesprochen, weil man wohl erkannt hat, dass das mit der Gravitation nicht stimmen kann. Zwar wird weiterhin der ominöse Begriff „G-Wellen" verwendet, vor allem wenn es um die Technik der angeblich erfolgreich getesteten Telekommunikation über diese universelle „G-Welle" geht. Aber so ganz vertraut Hartmut Müller, der Erfinder von Global Scaling®, auf dieses Konzept wohl doch nicht. In einem Vortrag in Erfurt (Müller 2008) verzichtete er auf diese Wellen völlig und sprach diesmal von den „Protonenresonanzen", die alle Schwingungsprozesse in der Welt beeinflussen oder gar steuern sollen. In der Powerpoint-Präsentation hatte er ein Protönchen aufgemalt und das schwang trickfilmartig vor sich hin. Dabei suggerierte Hartmut Müller, dass ja alles in der Welt schwingt und dass diese Schwingungen sich beeinflussen und dass letztlich alles bestimmt würde von „Eigenschwingungen der Materie auf niedrigstem Energielevel". Mit dieser letzten Bemerkung ist Müller im Bereich der *Quantenfeldtheorie*[1], aber darüber spricht er nicht, sondern bleibt bei den mechanisch vorstellbaren schwingenden Protonen. Da Herr Müller seine Theorie als – von Fachwissenschaftlern verleugneten – Höhepunkt der Wissenschaftsentwicklung sehen möchte, muss er sich der Fachwissenschaft hier auch stellen. Und was sagt diese zu Protonenwechselwirkungen? Hier kommen wir u.a. ins Gebiet der sog. Kernspinresonanz.

Physik der Kernspinresonanz

Protonen

Zuerst einmal muss klargestellt werden, dass die Physik der Atome primär von der Elektronenhülle bestimmt wird und nicht vom Kern, der die Protonen enthält. Physikalische Wirkungen von und an Protonen sind u.a. Gegenstand der *Kernphysik* und es wird deutlich, dass sie unter Abgabe und Aufnahme von sehr hohen Energiemengen stattfinden. Solche Energiemengen sind im Universum sehr weit verbreitet (die Kernfusion in den Sternen beruht z.B. darauf). Die Kernphysik kennt aber keine Müllersche „Protonenresonanz". Schauen wir weiter. Ein erster Blick in Wikipedia[2] zeigt, dass diese dort ebenfalls nicht bekannt ist. Geim Googeln erhalten wir Ergebnisse, die aus dem Global Scaling®-Konzept kommen, oder sich auf die Kernspinresonanzanalytik beziehen.

---

[1] http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenfeldtheorie (abgerufen 05.12.2008)
[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Proton (abgerufen 05.12.2008); es ist zu beachten, dass in der Chemie ein etwas anderer Protonenbegriff verwendet wird (http://de.wikipedia.org/wiki/Proton_(Chemie) (abgerufen 05.12.2008))

Protonen sind Quantenobjekte, die deshalb grundsätzlich nicht einfach als „kleine Körperchen, die hin und her wackeln“ vorgestellt werden können. Dass sie aus drei Elementarteilchen, den Quarks, bestehen, kann im Folgenden vernachlässigt werden.

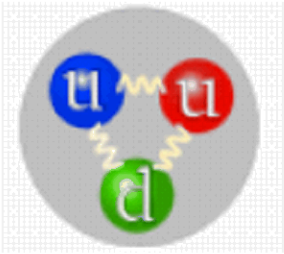

Abb.1: Ein Proton[3]

Protonen treten als freie Protonen z.B. in der Höhenstrahlung auf und bilden gemeinsam mit Neutronen den Kern von Atomen, welche zusätzlich noch Elektronen in einer sog. Elektronenwolke enthalten.

Die schnellen Protonen aus der kosmischen Strahlung üben Spallationswirkungen[4] aus, diese werden uns im Weiteren nicht interessieren. An wechselwirkende Protonen kommen wir über die Atomkerne heran und im günstigsten Fall sprechen wir über einen Wasserstoffkern. Wasserstoffkerne gibt es in drei Formen (Isotopen), je nachdem, ob kein, ein oder zwei Neutronen vorhanden sind. Das Wasserstoffisotop (^{1}H-Wasserstoff) mit einem Kern ohne Neutron wird auch Protium genannt.

In der folgenden Darstellung machen wir einen Spagat zwischen quantentheoretisch bestimmten Begriffen, die die Quantenobjekte angemessen beschreiben und einem Zugeständnis an unsere Vorstellungskraft.

Nehmen wir den einfachsten Fall: ein einzelnes Proton. Dies wackelt nun nicht etwa hin und her oder hoch und runter, wie von Müller in seinem Bildchen behauptet, sondern wenn wir schon eine mechanische Analogie verwenden wollen, so „dreht es sich“[5] und wir können ihm die Zustandsgröße *Drehimpuls P* zuschreiben. Der Betrag dieses Drehimpulses kann jedoch entsprechend der Quantentheorie nur bestimmte Wert annehmen, für ein Proton im ^{1}H-Wasserstoff ist dieser Wert 1/2[6]. Der Eigendrehimpuls ist ein Vektor (ich kann hier die Pfeile auf dem Formelzeichen nicht darstellen), dessen Richtung parallel zur „Drehachse“ verlauft.
Da das Proton elektrisch geladen ist, und dadurch die Rotation einen Kreisstrom darstellt, der ein Magnetfeld aufbaut,[7] erzeugt der Drehimpuls ein magnetisches *Kerndipolmoment* μ[8] . Dieses ist proportional zum Drehimpuls *P*. Der Proportionalitätsfaktor γ heißt *gyromagnetisches Verhältnis*[9], hängt von der Kernsorte ab und beträgt für das Proton 2,675 x 10^8Hz/T. Da, wie wir im Weiteren sehen werden, die Energie, bei welcher Spinresonanz stattfindet, für ein bestimmtes Magnetfeld durch eine bestimmte Frequenz gekennzeichnet wird, kann man die NMR-Frequenz für ein ^{1}H-Nuklid mit 42,576 MHz/Tesla angeben.

Kernspinresonanz

Wir betrachten nun typische Verhaltensweisen von Protonen, so wie sie bei der Kernspinresonanz ausgenutzt werden. Es geht dabei um ein „Phänomen, das beobachtet wird, wenn man Kerne gewisser Atome in ein statisches Magnetfeld platziert und diese dann zusätzlich einem zweiten, oszillierenden Magnetfeld aussetzt.“ (Lohninger u.a. 2004)

Um diese Vorgänge zu erklären, wird zwar Quantenmechanik gebraucht, aber nicht in allen Erklärungsschritten. Der Spin eines Protons ist ein Quanteneffekt – die magnetische Resonanz selbst dagegen nicht. (Hanson 2008: 9).

---

[3] aus: http://de.wikipedia.org/wiki/Proton (abgerufen 05.12.2008)
[4] http://de.wikipedia.org/wiki/Spallation (abgerufen 07.12.2008)
[5] Auch dies stimmt nicht wirklich. Die dem Proton zuschreibbaren Zustandsgrößen lassen sich nicht mehr wirklich klassisch vorstellen, sondern stammen aus der Quantentheorie, deren Gültigkeit sich in der Praxis über recht komplizierte Verfahren beweist, nicht darüber, dass man sich ihre Funktionsweise sinnlich vorstellen könnte.
[6] Dies ist die *Kernspinquantenzahl* des Protons.
[7] Auch dies ist eine klassische Vorstellung, die die Zuschreibung des magnetischen Moments vorstellbar machen soll, aber für Quantenobjekte so nicht zutrifft.
[8] Solch ein magnetisches Moment besitzen alle Elementarteilchen, die aus Quarks aufgebaut sind (Protonen, Neutronen). Elementarteilchen ohne solche innere Struktur (wie Neutrinos und Antineutrinos) besitzen kein magnetisches Moment.
[9] Das gyromagnetische Verhältnis ist als Stoffkonstante u.a. ein Maß für die Empfindlichkeit des betrachteten Kernes.

I. Ohne Magnetfeld

Bei diamagnetischen[10] Materialien und für Substanzen mit einem von Null verschiedenen Kernspin[11] sind die Spinausrichtungen ihrer Kerne ohne äußeres Feld in zufällig bestimmte Richtungen orientiert.

Jedes einzelne Proton hat ein Drehmoment (mit festgelegter Richtung) und ein magnetisches Moment – für eine Menge solcher Teilchen ist keine Richtung bevorzugt.

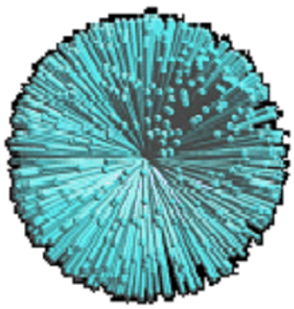

Abb.2: Zufällige Verteilung der Spinausrichtungen ohne Magnetfeld (aus Hanson 2008: 27)

II. Mit Magnetfeld B_0

Nun geht es darum, was geschieht, wenn ein äußeres Magnetfeld B_0 (in Richtung der z-Achse) angelegt wird. Dafür gibt es zwei konkurrierende Erklärungsmuster. Das Erste (A) geht von einem einzelnen Teilchen aus und untersucht Quanteneffekte. Das Zweite (B) behandelt die magnetische Resonanz klassisch.

A)

Nach der quantentheoretischen Einzelteilchenerklärung (wie sie in den meisten Praktikumsanleitungen von Universitäten zu finden ist, die aber nach Hanson 2008 nicht notwendig ist, um die Kernspinresonanz zu erklären. Sie kann also übersprungen werden und bei B) weiter gelesen werden) richten sich nun der Kernspin entlang des Magnetfeldes aus. Der Drehimpuls richtet sich dann – wegen dem Quantencharakter des Kerns – so aus, dass seine Komponente in Feldrichtung, P_z, ein ganz- oder (für Protonen) halbzahliges Vielfaches von h ist. m ist die *magnetische Quantenzahl.* Das führt dazu, dass es bei zwei Quantenzahlen wie beim Proton (m_1=+1/2 und m_2=-1/2) zwei mögliche Richtungen gibt: der Drehimpuls kann sich parallel zum magnetischen Feld ausrichten (was energetisch günstiger ist) oder antiparallel. Dies wird *Richtungsquantelung* genannt. Dabei wechselwirkt das äußere Magnetfeld mit den inneren magnetischen Momenten[12].

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Komponenten des Spins in z-Richtung (nach oben) und in x-Richtung (nach rechts), die sich parallel oder antiparallel zum angelegten B_0-Feld ausrichten können. Dies ist aber nur eine Analogie zur klassischen Beschreibung, die wir gewohnt sind, wenn wir über Magnete sprechen. In Wirklichkeit ist der „Spin" keine räumliche Bewegung[13], sondern eine Beschreibungsgröße für Quanten, für die es die beiden Eigenzustände „spin-up" und „spin-down" gebeben kann. Diese sind nicht wirklich räumliche Orientierungen, werden aber so analogisiert.

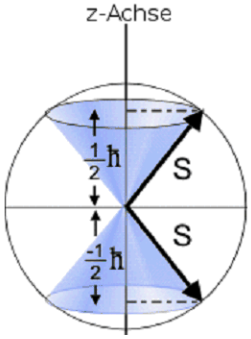

Abb. 3: Richtungsquantelung der z-Komponente des Drehimpulses für die Kernspinquantenzahlen ½ (aus http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch)[14]

---

[10] http://de.wikipedia.org/wiki/Diamagnetismus (abgerufen 05.12.2008)

[11] Dies betrifft alle Kerne mit ungerader Nukleonenzahl und einige mit gerader Nukleonenzahl. (http://de.wikipedia.org/wiki/Diskussion:Kernspinresonanzspektroskopie (abgerufen 05.12.2008)) Das heißt, das Verfahren kann z.B. angewendet werden für die Isotope ^{1}H, ^{13}C, ^{15}N, ^{19}F, ^{29}Si und ^{31}P, aber nicht für ^{12}C.

[12] http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetisches_Moment (abgerufen 05.12.2008)

[13] Warum dies nicht gilt, wird sehr schön erklärt in dem Video einer Vorlesung (ab Minute 5) an der Universität Tübingen unter http://timms.uni-tuebingen.de/List/List01.aspx?clist=6894$0:6892$1359 (abgerufen 07.12.2008)

[14] Siehe zum Stern-Gerlach-Versuch, der die Richtungsquantelung von Drehimpulsen von Atomen behandelt (abgerufen 06.12.2008). Zur Darstellung von Quantenzuständen auf einer Kugeloberfläche siehe „Bloch-Kugel": http://de.wikipedia.org/wiki/Bloch-Kugel (abgerufen 07.12.2008).

In der Bracket-Schreibweise[15] ausgedrückt gilt,

$$|\Psi> = c_{\uparrow}|\uparrow> + c_{\downarrow}|\downarrow>.$$

Das bedeutet *nicht*, dass es nur diese zwei Zustände gäbe, sondern es entsteht ein neuer Zustand mit neuen Eigenschaften (Gühne, Häffner 2007).[16] Dies ist für Hanson (2008) auch der Grund, diese Erklärung zur Kernspinresonanz abzulehnen.

Für die Energie E eines solchen magnetischen Dipols gilt unter Verwendung des magnetischen Moments μ[17] . $E = - \mu B_0$. Die Quantelung führt dazu, dass es für den Spin eines Protons genau zwei energetisch unterscheidbare Zustände gibt, welche durch die Magnetquantenzahl $m=\pm$ ½ gekennzeichnet werden und ihre Energiedifferenz beträgt genau $\Delta E = h\gamma B_0$. (mit h: Plancksches Wirkungsquantum, der Strich im Formelzeichen kann hier nicht dargestellt werden). Diese Energiedifferenz ist notwendig, um einen Zustandswechsel herbei zu führen. Die Umorientierung der Kernspins zwischen diesen Niveaus wird *Kernspinresonanz* genannt. Bei einer magnetischen Feldstärke von 1 Tesla wird eine 10-MHz-Welle benötigt.

Durch die Richtungsquantelung spalten sich also die Energieniveaus im Magnetfeld B_0 auf, was auch als *Zeemann-Effekt*[18] bezeichnet wird.

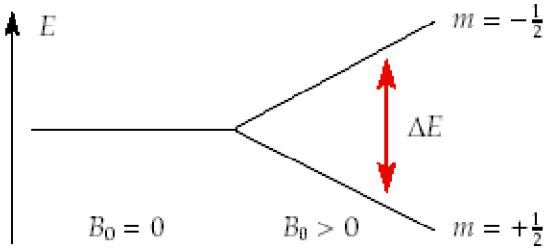

Abb. 4: Zeemanaufspaltung im Magnetfeld. (aus Eismann u.a. 2004 : 4)

B)

Die andere Erklärung lässt diese Quanteneffekte am einzelnen Teilchen weg und erklärt rein klassisch, dass ein magnetischer Dipol mit einem Drehmoment in einem magnetischen Feld B_0 präzessieren wird:

Wenn die Richtung des Spins nicht mit der Richtung des äußeren Magnetfelds überein stimmt, wirkt auf den Spin eine Kraft ein, die zu einer Präzession[19] des Spins um das Magnetfeld führt. Die Frequenz, mit der diese Präzession geschieht, wird *Larmor-Frequenz*[20] genannt und beträgt: $\varpi_L = \gamma B_0$.

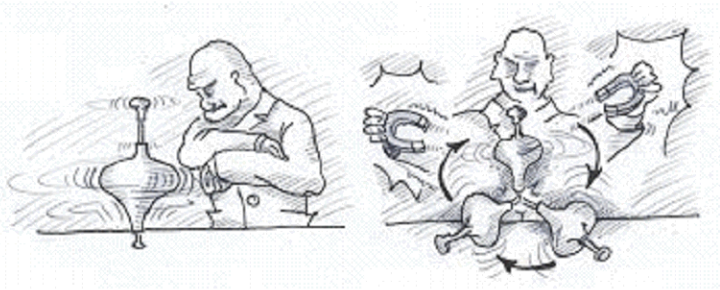

Abb. 5: Analogie: Präzession eines Kreisels (aus Lohninger u.a. 2004)

---

[15] http://de.wikipedia.org/wiki/Bra-Ket (abgerufen 07.12.2008).

[16] Zu vergleichen ist der Zusammenhang nach Gühne und Häffner mit ist Schallwellen, wo eine Überlagerung von Schallwellen verschiedener Frequenzen eine Schwebung hervorruft, und nicht als das Vorliegen der einen *oder* der anderen Frequenz gedeutet werden kann. (Gühne, Häffner: 4) Wie Hanson (2008: 17) zeigt, wirkt auch für zwei Spinsysteme eine Verschränkung, so dass eine Kernresonanzmessung nicht mehr als „Umklappen in einen Eigenzustand" interpretiert werden kann.

[17] genauer: des in B_0-Richtung projizierten magnetischen Moments (abgerufen 05.12.2008)

[18] http://de.wikipedia.org/wiki/Zeeman-Effekt (abgerufen 05.12.2008), wobei dieser für Elektronen- und nicht Protonenbewegungen diskutiert wird. Es w erden außerdem nicht, wie beim Zeemann-Effekt, die energetischen Übergänge atomarer elektrischer Dipole unter Emission elektrischer Dipolstrahlung in einem äußeren Magnetfeld betrachtet, sondern die energetischen Übergänge magnetischer Dipolmomente unter Absorption magnetischer Dipolstrahlung.

[19] http://de.wikipedia.org/wiki/Präzession (abgerufen 05.12.2008)

[20] http://de.wikipedia.org/wiki/Larmorfrequenz (abgerufen 05.12.2008)

Für ein Vielteilchensystem (B) zeigt sich die Präzessionsbewegung als Rotation um eine (in Abb. 6 senkrecht dargestellte) Achse. Für ein Teilchen (A) ist vergleichsweise die entsprechende Abbildung (Abb. 7) angegeben. Dass hier die klassische und die quantenmechanische Beschreibung dasselbe Ergebnis bringen, zeigt Hanson (2008: 17 f.).

Abb. 6: Präzession der Spinverteilung in einem magnetischen Feld (B_0) (aus Hanson 2008: 28)

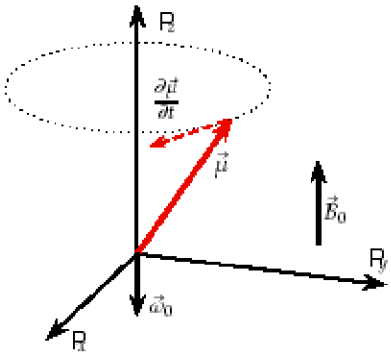

Abb. 7: Präzessionsbewegung des magnetischen Moments für ein Teilchen (leicht verändert aus Eismann u.a. 2004...: 8)

Der Grund für die Ablehnung der Erklärung A) liegt für Hanson darin, dass die Spins eben nicht nur in zwei Richtungen, wie in Abbildung 3 suggeriert wird, ausgerichtet sein können, sondern sich in einer Überlagerung bzw. einer Superposition[21] befinden.

III. Mit Magnetfeld *B0* und zusätzlichem Magnetfeld B_1

Dieses Verhalten ist die Grundlage für weitere Einwirkungen. Bis jetzt haben wir Kerns, die sich in einem Magnetfeld B_0 befinden. Dies entspricht dem Gleichgewichtszustand, der in den verschiedenen NMR-Verfahren nun gestört wird, woraufhin die Reaktion auf diese Störung gemessen und ausgewertet wird.

Um diesen Gleichgewichtszustand zu stören, wird elektromagnetische Strahlung (Radiowellen reichen aus) zugeführt, wobei hier nur die Wirkung des veränderten magnetischen Feldes interessiert. Möglich ist auch eine kurzzeitige, gepulste Zuführung eines um 90° gegenüber B_0 gedrehten magnetischen (HF-)Feldes B_1, für eine Zeitdauer von ca. 1–10 µs.

A)

Im Quanten-Ein-Teilchenbild wird unter *Spinresonanz* das Umklappen der magnetischen Momente, die sich in einem konstanten Magnetfeld eingestellt haben, unter Einfluss eines im allgemeinen dazu senkrechten Wechselfeldes geeigneter Frequenz, verstanden (Eschenberg, Kenzelmann 2003 : 8).

Die Präzession aus der Abbildung 8a) verändert sich dadurch. Wir erhalten (bei Wechselspannung) eine spiralförmige Bewegung zwischen Polen auf der z-Achse[22] oder ein Abklingen der präzessierenden Bewegung nach einem Puls[23].

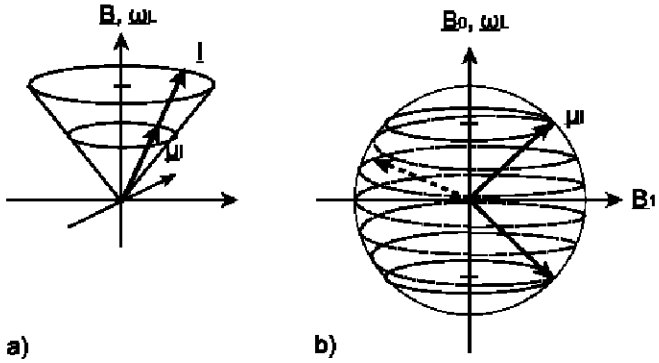

Abb. 8: Larmorpräzession (a) und hochfrequenzinduzierter Übergang (b) Im Fall b) wechselt die Richtung zwischen +z und –z. (aus: Versuch D 18: 6)

---

[21] http://de.wikipedia.org/wiki/Superpositionsprinzip_(Quantentheorie) (abgerufen 07.12.2008)
[22] siehe mehr unter http://de.wikipedia.org/wiki/Rabioszillation (abgerufen 05.12.2008)
[23] Siehe eine Animation in BIGS (o.J.).

B)

Für die klassische Vielteilchendarstellung dagegen wird gezeigt, dass ein homogenes RF-Feld nicht zu einer Veränderung der Orientierung des Protonenspins führen kann, sondern nur die Spin-Verteilung als Ganzes verändern kann. (Hanson 2008: 11, 19ff.)

Da keine Eigenzustände von Einzelteilchen verändert werden, gibt es hier auch kein „Umklappen" (das sowieso, wie im Folgenden gezeigt, nur bei 3 von 400 000 Teilchen geschehen würde), sondern die gesamte Verteilung verschiebt sich (wird „schief") durch die Einwirkung des (elektro)magnetischen Felds.

Abb. 9: Wirkung eines elektromagnetischen Feldes (B_1) (dessen Feldvektor hier nach vorn - in Richtung der Leserin - gerichtet ist) auf die Spinverteilung in einem magnetischen Feld (B_0) (aus Hanson 2008: 30)

Auch die Einteilchenbetrachtung geht spätestens jetzt in eine Systembetrachtung über. Während modellhafte Vorstellungen auch am Einzelkern entwickelt werden können, finden reale Prozesse natürlich nur in Vielkörpersystemen statt. Dabei gilt: Von ca. 400 000 Spins befinden sich somit nur 3 im Grundzustand, und nur diese können angeregt werden![24] Für den nicht angeregten Grundzustand gilt die Boltzmann-Statistik und die folgenden Relaxationszeiten beziehen sich auf die Rückkehr des gesamten Spinsystems in den Grundzustand.

Nach dem Ende der störenden zusätzlichen Einwirkung begibt sich das System wieder zurück in den Gleichgewichtszustand und dann gelten für die Magnetisierungen *M* die sog. Blochschen Gleichungen. (aus Eismann u.a. 2004: 12)

$$\frac{dM_{x,y}(t)}{dt} = \gamma\left(\vec{M}(t)\times\vec{B}\right)_{x,y} - \frac{M_{x,y}(t)}{T_2}$$

$$\frac{dM_z(t)}{dt} = \gamma\left(\vec{M}(t)\times\vec{B}\right)_z + \frac{M_\infty - M_z(t)}{T_1}$$

Dabei kennzeichnet die Zeitkonstante *T1* den Wiederaufbau der Magnetisierung in z-Richtung und die Zeitkonstante *T2* den Abfall der Magnetisierung in der x-y-Ebene.[25]

Der erste Prozess wird auch *Spin-Gitter-Relaxation* (oder auch Längs- oder Longitudinalrelaxation[26]) genannt und sie wird durch Energieabgabe (strahlungslos, d.h. über Wärme) über Wechselwirkungen des Spins mit der Umgebung (die „Gitter" genannt wird) ermöglicht. Solche Spin-Gitter-Wechselwirkungen finden spontan unter natürlichen Bedingungen nicht statt, sondern sie müssen stimuliert werden.

Der andere Prozess wird *Spin-Spin-* oder auch transversale Relaxation genannt und führt bei konstanter Energie zu einer Entropiezunahme im Spin-System. Er kennzeichnet den Zerfall der durch das zusätzliche Feld erzwungenen Magnetisierung.

---

[24] Lohninger u.a. 2004, speziell: http://www.vias.org/tmanalytik_germ/hf_nmr_physikalischegrundlagen_ spinensembles.html (abgerufen 06.12.2008) Um die Zahl der angeregten Teilchen zu erhöhen, muss das Magnetfeld verstärkt oder Kühlung eingesetzt werden. Dabei gilt, dass diese geringe Anzahl angeregter Teilchen der Grund dafür ist, dass die klassische und die Quantenmechanik zu gleichen Ergebnissen führen, wie in Hanson (2008: 20 f.) dargestellt.

[25] Für die genauere quantitative Erklärung dieser Kernwechselwirkungsprozesse ist die Quantentheorie dann wieder notwendig.

[26] Die Bezeichnungen longitudinal und transversal kommen daher, dass im ersten Fall die longitudinale Polarisation geändert wird und im zweiten Fall die Phasenbeziehung, also die transversale Polarisation.

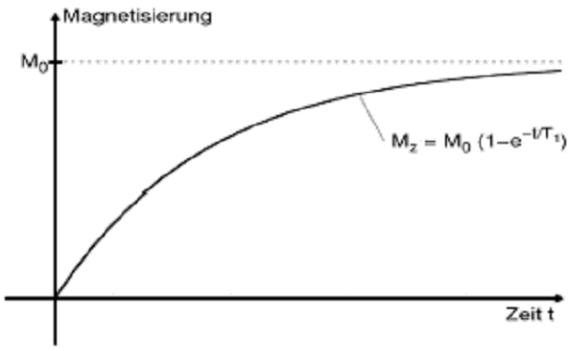

Abb. 10: Relaxationsverlauf der Spin-Gitter-Relaxation (mit M_0: Gleichgewichtsmagnetisierung) (aus Lewerenz 2007: 8)

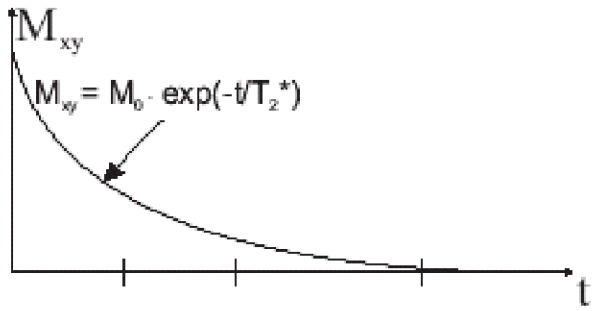

Abb. 11: Spin-Spin-Relaxation[27] (aus Lewerenz 2007: 9)

Für Kerne mit dem Spin ½ (wie Protonen) in Flüssigkeiten sind außerdem *rotatorische Diffusionsprozesse* zu beachten (entsprechend der BPP-Theorie von Bloembergen, Purcell und Pound 1948). Dabei beeinflussen sich die Spinrichtungen benachbarter Kerne auch bezüglich ihrer Winkelanordnungen.

Diese Relaxationen werden beeinflusst durch die lokalen Bedingungen, in dem sich das Spinsystem befindet. Wenn ihr genauer Verlauf ermittelt werden kann, können deshalb Rückschlüsse auf die Struktur der Materie gezogen werden.

Insgesamt gibt es folgende Wechselwirkungen von einzelnen Kernen:

- *dipolare magnetische Kopplung*: Wechselwirkung von räumlich benachbarten Kernmomenten miteinander

  chemische Verschiebung: Wechselwirkung des Kerns mit der Umgebung (den Elektronenwolken der anderen Atome), speziell innerhalb des Moleküls [28] Elektronegative[29] Elemente beispielweise ziehen die Bindungselektronen zu sich heran, wodurch der Kern weniger abgeschirmt/entschirmt ist. Dadurch „fühlt" der Kern ein höheres äußeres Magnetfeld und seine Resonanzfrequenz wird höher. *quadrupolare Wechselwirkung*: Beeinflussung zweier Dipole (und Kernspin >1/2).

Insgesamt sind folgende Faustregeln für die Abhängigkeit der Relaxationszeiten von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Stoffe bekannt:

- in leichtbeweglichen Flüssigkeiten liegen T1 und T2 im Bereich einiger Sekunden;
- in viskoseren Substanzen und in Festkörpern können T1 und T2 mitunter um mehrere Zehnerpotenzen voneinander abweichen, wobei die T1-Werte mitunter weit länger sind als in Flüssigkeiten. T2 hingegen ist umso kleiner, je 'starrer' die betreffenden Kerne im Molekül gebunden sind;
- in der Umgebung von stark gekrümmten Oberflächen (poröse Medien) ist die Beweglichkeit der jeweiligen Moleküle herabgesetzt. Für das ‚Frequenzspektrum' der ungeordneten Bewegungen hat dies die gleiche Konsequenz wie eine erhöhte Viskosität des Mediums. Für die im Rahmen des Versuchs untersuchten Flüssigkeiten sinkt die Relaxationszeit mit steigender Viskosität bzw. steigendem Anteil von Molekülen, die sich dicht vor Oberflächen befinden;
- in Gegenwart von paramagnetischen Substanzen verringern sich die Werte von beiden Relaxationszeiten (eventuell um viele Zehnerpotenzen). (Hoster 2008: 27)

---

[27] Siehe zur Verdeutlichung dieser Relaxationen auch BIGS (o.J.).

[28] siehe genauer z.B.: http://www.vias.org/tmanalytik_germ/hf_nmr_physikalischegrundlagen_abentschirmung.html und http://www.vias.org/tmanalytik_germ/hf_nmr_physikalischegrundlagen_verschiebung.html. (abgerufen 06.12.2008)

[29] http://de.wikipedia.org/wiki/Elektronegativität (abgerufen 07.12.2008)

Über verschiedene Verfahren (siehe z.B. Hoster 2008: 29) werden die entsprechenden Relaxationen ermittelt. Dabei wird eine Fourier-Analyse[30] durchgeführt. Dies bedeutet, dass ein periodisches Signal oder Überlagerungen im Verlaufe der Zeit (zeitliche Signale) umgewandelt wird zu einem Signal, das nicht mehr die Zeit, sondern die Frequenz auf der x-Achse (Frequenzspektrum) enthält.

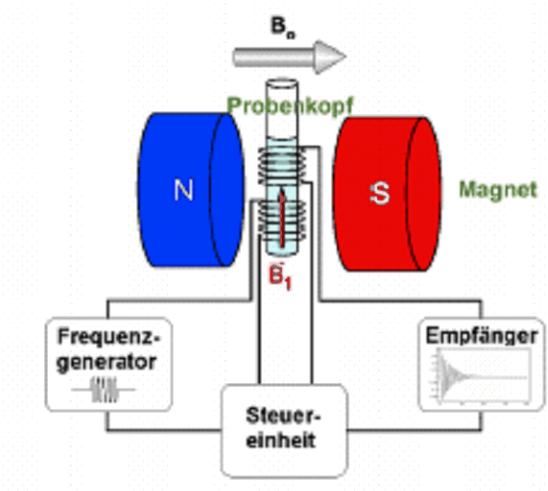

Abb. 12: Versuchsaufbau für die NMR-Analyse (wobei Sende- und Empfangsspule oft identisch sind) (aus: Hoster 2008: 39)

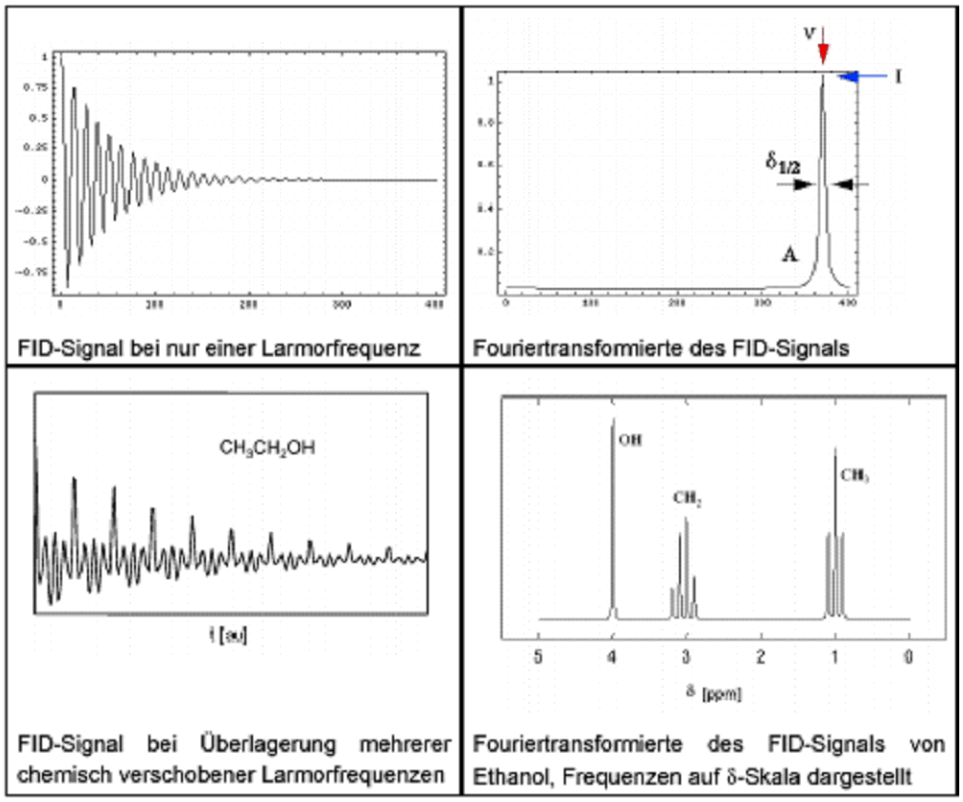

Abb. 13: oben: Fouriertransformierte einer Larmor-Frequenz (Übergang von einer Zeitdarstellung in die Frequenzdarstellung); unten: Signal der Analyse von Ethanol auf der Deltaskala[31] (aus V 10: 30)

Aus solchen Spektren sind folgende Aussagen abzuleiten (Hallpapp, Händel (1)):

Zahl der Resonanzlinien	Anzahl der Gruppen äquivalenter Protonen
Lage der Resonanzlinien	Art der Protonengruppen
Intensität der Resonanzlinien	Zahl der die Signale verursachenden Protonen
Aufspaltung der Resonanzlinien	Stellung der Protonengruppen zueinander

Tab. 1: Aussagen über Protonen aus Kernresonanzspektren

[30] http://de.wikipedia.org/wiki/Fourier-Analyse (abgerufen 05.12.2008)

[31] relative Frequenzverschiebung im Vergleich zur Larmorfrequenz der äquivalenten Protonen in Tetramethylsilan (TMS). TMS dient für ^{13}C- und ^{1}H-Spektren als Standard, weil die Protonen hier besonders gut abgeschirmt sind.

Anwendungen der Kernspinresonanz

Strukturaufklärung

Die Kernresonanzspektroskopie (NMR von engl. nuclear magnetic resonance = Kernmagnetische Resonanz) findet weite Anwendungsbereiche in der chemischen Analytik. Zuerst konnte sie vorwiegend für Flüssigkeiten verwendet werden; aber aufgrund der Möglichkeit, höhere Magnetfelder (>15 Tesla) zu erzeugen, können heute auch Festkörper untersucht werden. Industriell wird z.B. der Fettgehalt in Schokolade und Margarine routinemäßig mittels NMR überprüft.

Der einfachste Fall der Analyse besteht im Ermitteln der Resonanzfrequenz, über die verschiedene Atomkerne und damit chemische Elemente unterschieden und ermittelt werden können. Aber durch die zusätzlichen, sekundären Wechselwirkungen anderer struktureller Umweltgegebenheiten können noch mehr Aussagen gemacht werden. So können über die Ermittlung der chemischen Verschiebung verschiedene Atome des gleichen Atomtyps in einem Molekülverband detektiert werden, wie auch in Abb. 13 gezeigt. Die chemischen Verbindungen in der Umgebung der Kerne beeinflussen die Resonanzfrequenz.

Die genauen Spektren hängen auch von der chemischen Struktur der Moleküle ab, d.h. auch vom Vorhandensein von Doppel- oder Dreifachbindungen, da die Elektronen um den Kern herum jeweils das äußere Magnetfeld abschirmen. Auch die anderen Wechselwirkungen führen zu charakteristische Signalen. So führt die Spin-Spin-Wechselwirkung zu charakteristischen Verschiebungen, Verbreiterungen oder Aufspaltungen der Resonanzlinien. Ein Beispiel einer Auswertung wird gegeben in Lohninger (2004)[32].

Deshalb wird die Kernspinresonanz heute zum zerstörungsfreien Nachweis von Inhaltsstoffen einer Probe ebenso verwendet wie zur Bestimmung von Molekülstrukturen (von kleinen Molekülen bis hin zu Proteinen und Nukleinsäurefragmenten).[33]

Medizinische Diagnose

Die Kernresonanzspektroskopie, auch Kernspintomographie oder Magnetresonanztomographie (MRT)[34], ist neben der Computertomographie (CT)[35], die mit Röntgenbildern arbeitet, eine der modernsten medizinischen Diagnosetechniken.[36] Die eben geschilderte Kernresonanzmethode wird hier angewendet, um unterschiedliche Wasserkonzentrationen in den verschiedenen Gewebearten oder Organen zu ermitteln. Diese werden dann als Bild sichtbar gemacht. Der Bezug auf das Wasser erklärt sich einfach: Der Körper besteht zum größten Teil aus Wasser. Da der Sauerstoff im Wasser den Gesamtspin Null besitzt und sich die Spins der Elektronen im Wassermolekül aufheben (weil es sich um eine geschlossene Elektronenhülle handelt), liefern nur Protonen eine Wirkung. Es braucht nun nur noch die relative Häufigkeit einer Atomsorte nachgewiesen zu werden (vorzugsweise ^{1}H), woraus auf den Wassergehalt des Gewebes geschlossen werden kann. In dieser Auswertung werden die bereits genannten unterschiedlichen Relaxationszeiten verwendet:

---

[32] genauer: in http://www.vias.org/tmanalytik_germ/hf_nmr_spektren_nmrspektrum.html (abgerufen 06.12.2008)
[33] http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspinresonanz (abgerufen 05.12.2008)
[34] http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetresonanztomographie (abgerufen 06.12.2008). Englisch auch MRI: Magnetic Resonance Imaging. In der Diskussionsseite (http://de.wikipedia.org/wiki/Diskussion:Magnetresonanztomographie (abgerufen 06.12.2008)) wird vermutet, dass sich im Sprachgebrauch die „Magnet-Resonanz-Tomographie“ gegenüber der genaueren Formulierung „Nuklear-Magnet-Resonanz“ deshalb durchgesetzt hat, weil Ängste gegenüber allem „Nuklearen“ vermieden werden sollen.
[35] http://de.wikipedia.org/wiki/Computertomographie (abgerufen 06.12.2008)
[36] Ein schönes Beispiel einer MRT-Aufnahme siehe Dschwen; Frey (2008).

Gewebe	T_1 [ms]	T_2 [ms]	T_2/T_1
Graue Hirnsubstanz	950	100	0,11
Weiße Hirnsubstanz	600	80	1,33
Blut	1200	100-200	0,09-0,17
Fett	250	60	0,24
Liquor	4500	2200	0,49
Muskel	900	50	0,06

Tab. 2: Relaxationszeiten verschiedener Gewebearten bei B_0=1,5 T (nach Zühlsdorf 2003: 14)

Besonders interessant ist MRT für Gewebe, die anders nicht darstellbar sind, wie Nerven- und Hirngewebe.

Medizinische Therapie?

Verwirrung gibt es derzeit um die Frage, ob die Effekte der Kernspinresonanz bzw. der Magnetresonanz, wie eben beschrieben, nicht nur zur medizinischen Diagnose, sondern auch zu Therapiezwecken genutzt werden kann. Es wurde nämlich berichtet, dass Menschen nach einer Diagnose im Gerät ein Abklingen ihrer Beschwerden erlebten. Ist das nur ein Placeboeffekt?

Zuerst einmal muss die Kernspin-, bzw. Magnetresonanz unterschieden werden von der sog. „Magnetfeldtherapie“[37]. Diese gilt als alternativmedizinische Behandlungsmethode und dabei werden die Menschen direkt einem statischen oder pulsierenden Magnetfeld ausgesetzt. Diese Magnetfelder sollen die Durchblutung und den Zellstoffwechsels günstig beeinflussen. Es gibt einige Untersuchungen, auch im Doppelblindverfahren, die eine günstige Wirkung auf Knochenheilungen u.ä. nahe legen.[38] Die Krankenkassen bezahlen dieses Verfahren nicht, aber in Österreich ist aufgrund des § 343. MFTG-Verordnung eine Selbstbehandlung eines schwerwiegenden gesundheitlichen Problems mit Magnetfeldtherapie ohne ärztliche Hilfe nicht gestattet.[39] Ob diese Festlegung bedeutet, dass diese Therapie damit „ärztlich und gesetzlich anerkannt“ sei, ist strittig.

Nun aber zurück zur Kernspinresonanz/Magnetresonanz. Diese ist unter der Bezeichnung MBST®KernspinResonanzTherapie markenrechtlich geschützt.[40] Es werden elektromagnetische Felder verwendet, die 10.000-fach schwächer als bei der Kernspintomografie sind. Es ist erstaunlich, wie eine Vorrichtung, mit extrem schwächeren magnetischen Flussleistungen und elektromagnetischen Feldern etwas im Körper beeinflussen will, wo viel stärkere Vorrichtungen mit Müh und Not ein diagnostisches Signal aus dem Rauschen herauspräparieren (Die Empfindlichkeit steigt mit höherer Magnetflussdichte). Die für die Therapie angegebenen technischen Werte wären sogar für eine Diagnose viel zu gering. Wo nicht mal diagnostisch eine Wirkung nachgewiesen wird, wird eine Heilwirkung behauptet.

Wie in einer Wikipedia-Diskussion berichtet wird, hat eine Kassenärztliche Vereinigung die Finanzierung solch einer Behandlung abgelehnt mit der Begründung: „Für diese Therapie wird die gleiche Technik eingesetzt, wie für die MRT. Da die MRT aber nebenwirkungsfrei ist, kann die gleiche Technik nicht gleichzeitig als Therapie wirksam sein.“[41] Es liegen auch zwei Urteile des Oberlandesgerichts Frankfurt am Main (2006 und 2007) vor, die anhand von Gutachten zu einer negativen Bewertung der Wirksamkeit von MBST® gelangen. Alle Studien, die die Wirksamkeit behaupten und die in der entsprechenden Werbung erwähnt werden, beruhen i.a. auf zu wenigen Teilnehmern und wurden meist ohne Kontrollgruppe durchgeführt (z.B. von nur 14 Probanten

[37] http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetfeldtherapie (abgerufen 06.12.2008)
[38] Diese Studien werden aber auch kritisch diskutiert, z.B. in http://de.wikipedia.org/wiki/ Diskussion:Magnetfeldtherapie (abgerufen 06.12.2008)
[39] http://www.sbg.ac.at/ver/links/bgbl/2003b343.pdf (abgerufen 06.12.2008)
[40] MBST soll heißen „MultiBioSignalTherapie“; siehe auch http://www.mbst.de/ (abgerufen 06.12.2008) sowie Muntermann 1998 (Patent DE 198 27 736).
[41] http://de.wikipedia.org/wiki/Diskussion:Magnetresonanztomographie (abgerufen 06.12.2008)

ohne Kontrollgruppe an der Deutschen Sporthochschule Köln). Es wird festgestellt, dass die kritische Betrachtung solcher Studien zwar nicht die eventuelle Wirksamkeit des Therapieverfahrens widerlegen kann, sie aber „derart in Zweifel" stellt, dass jene, die damit werben, den Wirkungsnachweis nachprüfbar und gültig erbringen müssten. Im Urteil wird deshalb festgelegt, dass die Geräte zwar beworben werden dürfen, aber es darf „nicht den Eindruck einer nachgewiesenen Wirksamkeit" erweckt werden.

Wer im Internet die entsprechenden Stichworte googelt, wird geradezu überhäuft mit fast gleichlautenden Werbesprüche, die alle die in den Urteilen zurückgewiesenen Heilbehauptungen aufstellen. Durch die ständige Wiederholung wird die Behauptung nicht wahrer, die Berieselung der Surfenden könnte aber ihren Zweck nicht verfehlen und viele Hilfesuchenden um viel Geld erleichtern... Vielleicht bekommen sie dafür wenigstens die Placeboeffekt-Wirkung (dürfen aber diesen Text hier nicht gelesen haben).

Bilanz

Wir haben festgestellt, dass die von Hartmut Müller behauptete „Protonenresonanz" in der wissenschaftlichen Welt überhaupt nicht bekannt ist. Physikalisch bekannt ist die Kernspinresonanz, ein künstlich hergestelltes Phänomen, bei dem Magnetfelder, die 10 000 mal stärker sind als das Erdmagnetfeld, in ganz gezielter Weise eingesetzt werden (ein statisches und ein dazu senkrechtes Pulssignal oder eine elektromagnetische Welle), um jeden 100 000. Kern zu einer Resonanz zu bringen und diesen Effekt, samt Einflüssen der direkten Umgebung des Kerns, zu detektieren. Dabei „sieht" ein Kern (in dem sich Protonen befinden) maximal seinen direkten Nachbarn, die Elektronenhüllen schotten die Kernwechselwirkung stark ab.

Es ist also völlig unvorstellbar, wie solch schwachen und kurzreichweitigen Wechselwirkungen derartig langreichweitige und alle anderen Prozesse überdeterminierenden kosmischen Beeinflussungsfelder darstellen sollen, wie es Hartmut Müller behauptet. Hartmut Müllers Konzept fällt hinter die Grundlagen der Wissenschaft des 20. Jahrhunderts zurück, weil es weder Quanteneffekte allgemein, noch das Wissen über wirkliche Zustandsgrößen von Protonen verwendet. Sie versucht, mit Hilfe von einfachen mechanischen Vorstellungen (Schwingungen, Resonanz) zu arbeiten. Dieses wissenschaftliche Manko ist wahrscheinlich gleichzeitig das Erfolgsgeheimnis des populistischen Erfolgs von Global Scaling.®

Interessant ist, dass es für die Erklärung der Kernspinresonanz zwei konkurrierende Darstellungsweisen gibt, wobei die neuere viele komplizierte Zwischenschritte, die quantentheoretisches Wissen voraussetzen, nicht mehr benötigt.

Nebenbei konnte die für den alternativmedizinischen Bereich interessierende Frage nach der Wirksamkeit der „Kernspin-Resonanztherapie" mit einem eher kritischen und skeptischen Ergebnis diskutiert werden.

Literatur und Quellen

BIGS - Bluck Industrial Graphic Service (o.J.): *Relaxieren und Präzidieren; T1 und T2-Kurven.* In Internet: http://www.bigs.de/de/shop/anim/relax01.swf.

Dschwen; Frey (2008): *Bild:Kiwi 3d MRT projektion-endless.gif.* http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Kiwi_3d_MRT_projektion-endless.gif (abgerufen 06.12.2008)

Eismann, D; Matschl, V.; Medick, P.; Gottwald, J.: Schütz, W.; Senker, J.; Vogel, M.; Rößer, E. (2004): Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene. *Gepulste Kernspinresonanz.* Physikalisches Institut der Universität Bayreuth. In Internet: http://ep2.uni-bayreuth.de/roessler/lecture/anleitung.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Eschenberg, S., Kenzelmann, D. (2003): *Versurchsprotokoll – Kernspinresonanz.* In Internet: http://www.stormzone.de/uni/Hauptstudium/Physik/APFP/2003-07-31_Versuchsprotokoll_Kernspinresonanz.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Gühne, O.; Häffner, H.(2007): *Tomografie eines Quantenzustands – Verschränkung und Reinheit.* In Internet: http://heart-c704.uibk.ac.at/publications/papers/ei07_guehne.pdf (abgerufen 07.12.2008)

Hallpapp, P., Händel, H.: *Anwendung der ^{1}H-NMR-Spektroskopie.* In Internet: http://buch.nmrguide.info/html.txt/german/index.shtml (abgerufen 05.12.2008)

Hallpapp, P., Händel, H (1): http://buch.nmrguide.info/html.txt/german/goal.shtml

Hanson, Lars G. (2008) : *Is Quantum Mechanics necessary for understanding Magnetic Resonance ?* In Internet: http://www.drcmr.dk:8080/22/1/article.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Müller, Hartmut (2008): *Global Scaling – Moderne Wissenschaft erkennt kosmische Zusammenhänge.* Vortrag auf dem „Festival Herzöffnung – open your heart“ (10.-12. Oktober 2008) in Erfurt. Mitschrift von A.S., siehe in Internet: http://philosophenstuebchen.wordpress.com/ 2008/10/18/ zu-global-scaling/(abgerufen 01.12.2008)

Muntermann, Axel (1998): *Vorrichtung zur Behandlung mit magnetischen Feldern.* Patent DE 198 27 736.

Oberlandesgericht Frankfurt am Main (6 U 4/06 vom 2.06.2006): Urteil zur MBST-KernspinResonanzTherapie. In Internet: http://web2.justiz.hessen.de/migration/rechtsp.nsf/56FA79124D415DF3C125720C002879F8/$file/06u00406.pdf (abgerufen 07.12.2008)

Oberlandesgericht Frankfurt am Main (6 U 5/06 vom 2.024.05.2007): Urteil zur MBST-KernspinResonanzTherapie. In Internet: http://web2.justiz.hessen.de/migration/rechtsp.nsf/3E94F3F05EB7042AC125747A0044EB41/$file/06u00506.pdf (abgerufen 07.12.2008)

Versuchsanleitungen zum Praktikum Physikalische Chemie für Anfänger. In Internet: http://www.ipc.uni-karlsruhe.de/download/A52_2008.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Hoster, H.E. (2008): *V 10. Puls-NMR. Kernmagnetische Relaxation.* Physikalisch-Chemisches Praktikum für Fortgeschrittene. Universität Ulm. In Internet: http://www.uni-ulm.de/physchem-praktikum/media/fp/v_10.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Lewerenz, Meinert (2007): *Signalerhöhung durch Ultraschall in der Magnetresonanztomographie.* Diplomarbeit. In Internet: www.iskp.uni-bonn.de/gruppen/material/public/works/dipl/2007_Diplom_Lewerenz.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Lohninger, H; Fröhlich, J.; Mizaikoff, B.; Rosenberg, E. (2004): *Instrumentelle Analytik.* In Internet: http://www.vias.org/tmanalytik_germ/wrapnt_einleitung106.html (Startseite, abgerufen 06.12.2008)

Versuch D 18: *Kernspinresonanz,* Universität Duisburg-Essen. In Internet http://www.uni-duisburg-essen.de/agfarle/ap/ANLEITUNGEN/D18.pdf (abgerufen 05.12.2008)

Zühlsdorf, Sven (2003): *MR-Bildgebung mit aktiven, intravasalen Kathedern.* Dissertation. In Internet http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=96973834x&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=96973834x.pd (abgerufen 05.12.2008)