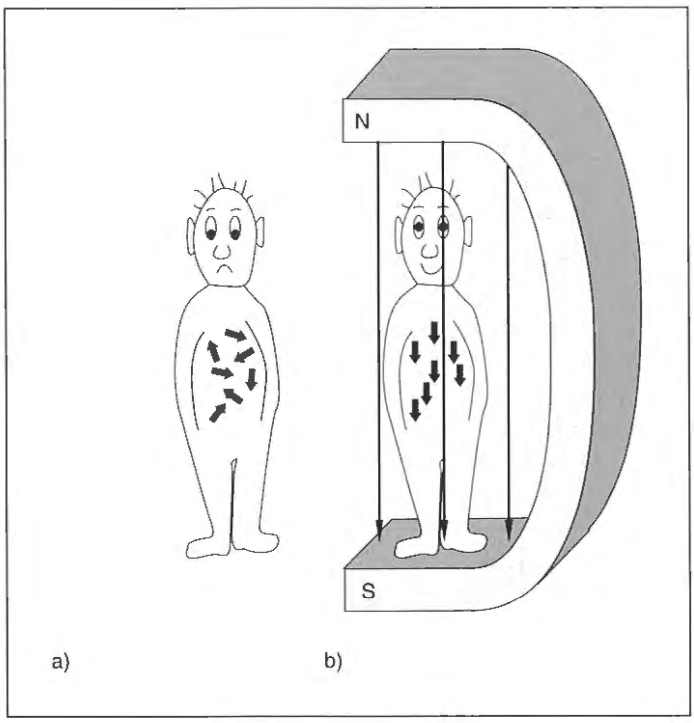
Das Prinzip der Magnetresonanztomografie

R. Berger



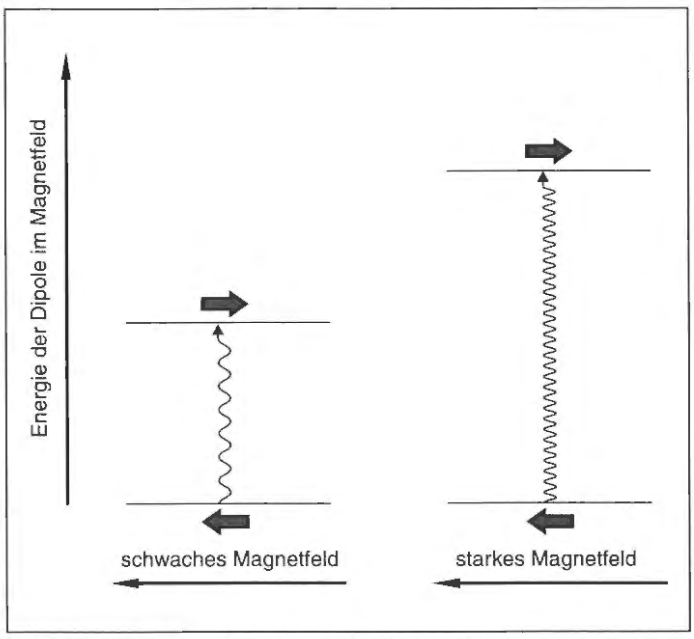


Abb. 1 (oben): Magnetische Dipole im Körper. Die magnetischen Dipole sind in alle Richtungen orientiert (a). Im äußeren Magnetfeld werden die magnetischen Dipole ausgerichtet (b).

Abb. 2 (unten): Energieniveaudiagramm. Um einen magnetischen Dipol im äußeren Magnetfeld umzuklappen, muss Energie zugeführt werden. Der Dipol befindet sich dann auf höherem energetischen Niveau. Diese Energie ist umso größer, je stärker das Magnetfeld ist. Die zum Umklappen notwendige Energie wird in Form einer elektromagnetischen Welle eingestrahlt.

Der Nobelpreis für Medizin ging im letzten Jahr an zwei Wissenschaftler, die wesentlich zur Entwicklung der Magnetresonanztomografie, auch Kernspintomografie genannt, beigetragen haben. Ähnlich wie bei der *Röntgen*-Computertomografie können mit diesem Verfahren Schichtaufnahmen des Körpers erzeugt werden. Allerdings ist das dahinter stehende physikalische Prinzip völlig anders. Wesentlich ist, dass der Atomkern des Wasserstoffs (ein einzelnes Proton) über ein magnetisches Dipolmoment verfügt. Solche Dipole kann man sich in gewissen Grenzen als kleine Magnetnadeln vorstellen. Sie sind im Körper normalerweise in alle möglichen Richtungen orientiert. Bringt man den Körper jedoch in ein äußeres Magnetfeld, so richten sich die Dipole wie Kompassnadeln in Richtung des Magnetfelds aus (Abb. 1).

Um die Dipole in die entgegengesetzte Richtung zu orientieren, muss Energie aufgewandt werden. Sie nimmt mit der Stärke des Magnetfelds zu, da sich die Dipole zunehmend schwerer umklappen lassen. Für die weitere Beschreibung ist es günstig, sich diesen Sachverhalt an einem Energieniveaudiagramm zu veranschaulichen (Abb. 2).

Dort ist die Energie der Dipole für die beiden Orientierungen in Richtung des äußeren Magnetfeldes und dazu entgegengesetzt dargestellt. Ist der Dipol antiparallel zum Magnetfeld gerichtet, so ist die Energie höher als bei paralleler Ausrichtung. Der Unterschied zwischen den beiden Energieniveaus ist umso größer, je stärker das Magnetfeld ist. Bei einer Magnetfeldstärke von 1 T, einem typischen Wert in der Diagnostik, beträgt der Energieunterschied 0,17 µeV. Elektromagnetische Wellen der Frequenz 42 MHz besitzen diese Energie. Bei geringerer Feldstärke genügt eine entsprechend kleinere Energie. Die elektromagnetischen Wellen im Ultrakurzwellen-Bereich können in den menschlichen Körper eindringen und eignen sich daher zum Umklappen der magnetischen Dipole.

Im Magnetresonanztomografen wird ein kurzer Wellenzug mit Hilfe einer Sendespule in den Körper geschickt und klappt die magnetischen Dipole um. Die von den Dipolen aufgenommene Energie wird anschließend innerhalb von etwa einer Sekunde („Relaxationszeit") wieder abgegeben und kann mit Hilfe der auf Empfang umgeschalteten Spule nachgewiesen werden. Die registrierte Intensität ist umso größer, je mehr Dipole angeregt wurden. Da zum Signal hauptsächlich die Wasserprotonen beitragen [1], ist die Signalstärke ein Maß für die Wasserkonzentration im untersuchten Gewebe.

Das gemessene Signal enthält allerdings die Beiträge aller Dipole, die durch den Hochfrequenzimpuls umgeklappt wurden. Eine räumliche Zuordnung ist daher nicht möglich. Der Nobelpreisträger *Paul Lauterbur* konnte dieses Problem auf elegante Weise lösen und veröffentlichte im März 1973 in der Zeitschrift „Nature" die erste Quer-

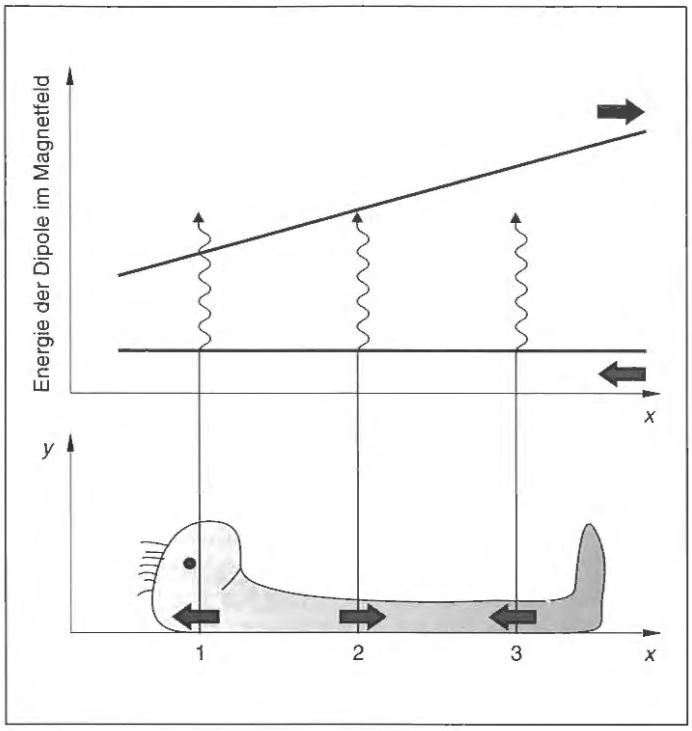
schnittsaufnahme zweier mit Wasser gefüllter Behälter [2]. Unbhängig von *Lauterbur* wandte *Sir Peter Mansfield* das Verfahren auf eine Festkörperprobe aus drei verschiedenen Schichten an und veröffentlichte das Ergebnis im selben Jahr wie *Lauterbur*.

Der Grundgedanke der beiden Forscher soll anhand von Abb. 3 erläutert werden: Durch entsprechende Feldspulen wird erreicht, dass das Magnetfeld in x-Richtung zunimmt („magnetischer Feldgradient", veranschaulicht durch zunehmende Schwärzung der Figur). Dadurch nimmt die Energie, die zum Umklappen der magnetischen Momente benötigt wird, ebenfalls von links nach rechts zu (vgl. auch Abb. 2).

Dies ist in Abb. 3 durch das Energieniveauschema veranschaulicht. Strahlt man nun mit einer festen Frequenz in den Körper ein, so werden nur die magnetischen Momente in einer dünnen Schicht bei $x = 2$ umgeklappt („Resonanz"). Die zugeführte Energie ist an den anderen Stellen zu groß ($x = 1$) oder zu gering ($x = 3$) um das Umklappen zu erreichen[1]. Die beim Zurückklappen der magnetischen Momente freigesetzte Energie kann jetzt der Schicht $x = 2$ zugeordnet werden, da der Zusammenhang zwischen der Aufspaltung der beiden Energieniveaus einerseits und der Magnetfeldstärke an einem bestimmten Ort andererseits bekannt ist. Daraus kann man allerdings nur die Konzentration des Wassers in einer ganzen Scheibe des Körpers bestimmen. Um sie an einem bestimmten kleinen Volumenelement in dieser Scheibe ermitteln zu können, werden magnetische Feldgradienten nicht nur in x-Richtung, sondern auch in y- und z-Richtung erzeugt. Auf diese Weise kann man die Wasserkonzentration an allen Stellen des Körpers ermitteln und sie dann als beliebige Schnitte auf dem Computermonitor darstellen (Abb. 4 links). Die Bildelemente werden beispielsweise umso heller dargestellt, je größer der Wassergehalt im entsprechenden Volumenelement des Körpers ist („Graukodierung"). Aber auch eine Farbkodierung wird gelegentlich verwendet.

Die Magnetresonanztomografie bietet die interessante Möglichkeit, unterschiedliche Kontraste ohne Verabreichung eines Kontrastmittels zu erzeugen. Grundlage dafür ist, dass die Zeit, innerhalb der die von den magnetischen Dipolen aufgenommene Energie wieder abgegeben wird, sehr empfindlich von deren Umgebung abhängt. Beispielsweise beträgt die Relaxationszeit in der grauen Gehirnmasse 810 ms, in der weißen dagegen nur 680 ms [3]. Diese Relaxationszeiten können dem beim Zurückklappen der Protonen in der Empfangsspule induzierten Signal ebenfalls entnommen werden. Eine Graukodierung der Relaxationszeiten liefert Abb. 4 rechts. Man erkennt einen deutlich unterschiedlichen Kontrast im Vergleich zum Bild auf der linken Seite. Je nach diagnostischem Anliegen können somit unterschiedliche Darstellungen gewählt werden.

Aufgrund der geringen Energie der Ultrakurzwellen (ca. 0,2 µeV) werden keine chemischen Bindungen (Bindungsenergie typischerweise 1 eV bis 10 eV) aufgebrochen. Damit arbeitet das Verfahren im Gegensatz zur Röntgen-



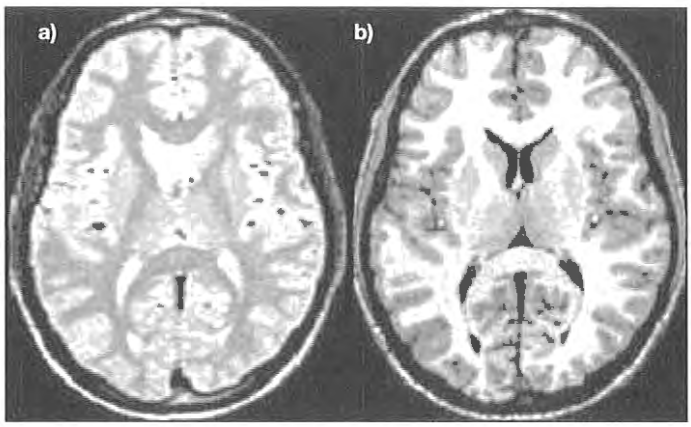


Abb. 3 (oben): Prinzip der Bildgebung. Die Erläuterungen finden sich im Text.

Abb. 4 (unten): Aufnahmen mit dem Magnetresonanztomografen. Abbilduug der Wasserkonzentration über einen Kopfquerschnitt (a). Abbildung auf der Basis der unterschiedlichen Relaxationszeiten (b). (Quelle: http://www. santafe.edu/sfi/publications/Bulletins/bulletinWinter02/features/brain.html)

Computertomografie mit nichtionisierender Strahlung und gilt als für die Gesundheit unbedenklich. Eine ausführlichere Diskussion zu gesundheitlichen Aspekten ist bei *Heinzerling* [4] zu finden.

Im Beitrag wurde das Prinzip der Magnetresonanztomografie auf elementarem Niveau dargestellt. Ein vertieftes Verständnis der technische Durchführung und des physikalischen Hintergrunds erfordert weitergehende Konzepte. Das Verfahren ist letztlich deutlich komplexer als die *Röntgen*-Computertomografie. Aus der Fülle der Literatur möchte ich auf drei Arbeiten

verweisen: Ein sehr anschaulich gehaltenes Buch stammt von *Sigal* [5], *Bley* [6] hat einen recht gut lesbaren deutschen Text verfasst. Eine umfassende, aber auch sehr anspruchsvolle Darstellung findet sich bei *Vlaardingerbroek* und *den Boer* [7]. Dort ist z. B. auch anschaulich beschrieben, warum die Relaxationszeiten von der Art des Gewebes abhängen. Eine knappe Zusammenfassung des Wirkens der beiden Nobelpreisträger stammt von *Haase* [8].

[1] Vom Bild der Magnetnadeln her wäre es plausibel, dass eine kleinere Energie den Dipol in eine Orientierung bringen würde, die zwischen paralleler und antiparalleler Ausrichtung liegt. Hier ist aber die Grenze der Veranschaulichung mit Hilfe von Magnetnadeln erreicht. Es gibt tatsächlich nur zwei mögliche Orientierungen mit den beiden entsprechenden Energieniveaus. Nur wenn die zugeführte Energie gleich dem Energieunterschied ist, kommt es zum Umklappen („Resonanz"). Diese diskrete Natur von Energieniveaus als quantenmechanischem Effekt ist z. B. vom *Bohr*'schen Atom-Modell für Energieniveaus von Elektronen im Atom bekannt.

Literatur

[1] *G. Brix*: Bildgebungssequenzen und Bildkontraste. In: *Reiser, M.* u. *Semmler, W.* (Hrsg.). Magnetresonanztomographie. Berlin: Springer (1992)
[2] *P. C. Lauterbur*: Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. Nature (242) 16, (1973), S. 190–191.
[3] *H. Morneburg*: Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik. München: Publicis MCD Verlag (1995)
[4] *J. Heinzerling*: Gefahren durch elektromagnetische Felder bei der MR-Diagnostik? Kontraste (Philips Medizinsysteme), Ausgabe Mai 1997, S. 30–39
[5] *R. Sigal*: Magnetic Resonance Imaging. New York: Springer (1988), insbesondere S. 1-35
[6] *H. Bley*: Kompendium Medizin + Technik. Gräfelfing: Forum-Medizin Verlagsgesellschaft (1994), S. 327–357
[7] *M. T. Vlaardingerbroek* u. *J. A. den Boer*: Magnetic Resonance Imaging. Theory and Practice. Berlin, Heidelberg: Springer (1996)
[8] *A. Haase*: Von der Kernphysik zur medizinischen Diagnostik. Physik Journal 2 Nr. 12 (2003), S. 27–29

Anschrift des Verfassers:

StR Dr. *Roland Berger*, Universität Kassel, FB 18/Physikdidaktik, Heinrich-Plett-Str. 40, 34132 Kassel

Altlasten der Physik (76): Negative Entropie und Negentropie

F. Herrmann

Gegenstand

In manchen Lehrbüchern der Biologie oder verwandter Fachrichtungen findet man Aussagen, in denen von negativen Werten der Entropie die Rede ist: „Die lebendigen Systeme produzieren beständig positive Entropie. Um dem Zerfall ins thermodynamische Gleichgewicht zu entgehen, bedürfen sie der beständigen Zufuhr *negativer Entropie*. Die einzige ergiebige Quelle negativer Entropie, die den lebenden Systemen zur Verfügung steht, ist die Anregungsenergie der [...] Pigmente. Die Anregung erfolgt durch die Lichtquanten. Die einzige natürliche Quelle für Lichtquanten ist die Sonne."
Manchmal wird negative Entropie auch Negentropie genannt, und diese wiederum, so wird gesagt, sei identisch mit der *Shannon*'schen Datenmenge (Information).

Mängel

Zum Teil verstoßen solche Aussagen nur gegen physikalische Gewohnheiten, zum Teil sind sie falsch.

1. Wenn der Betrag einer mengenartigen Größe X in einem System A zu- und in einem anderen System B abnimmt, weil zwischen A und B ein Strom der Größe X fließt, so hat man zunächst einmal die Wahl, diesen Sachverhalt auf zwei Arten in Worte zu fassen: Entweder man sagt, es fließe ein Strom von positivem X von A nach B oder man sagt, es fließe negatives X von B nach A. Die Theorie (genauer: die Kontinuitätsgleichung) gestattet uns nicht, zwischen diesen beiden Sprechweisen zu unterscheiden. Nur in dem besonderen Fall, dass sich dem Strom eindeutig eine Geschwindigkeit zuordnen lässt, d. h. dass man die Stromdichte j_X als Produkt aus Dichte ρ_X und Geschwindigkeit v schreiben kann, also

$$j_X = \rho_X v,$$

ist eine solche Unterscheidung zu rechtfertigen. Ist nämlich die Dichte ρ_X an den Stellen, wo der Strom fließt negativ, so kann man mit einem gewissen Recht sagen, es fließe negatives X von B nach A. Ist ρ_X positiv, so würde man sagen, es fließt positives X von A nach B. Notwendig ist diese Unterscheidung allerdings nicht (siehe [1]).
Wenn nun aber die Größe X grundsätzlich nur positive Werte annehmen kann, wie etwa die Masse oder die Entropie, so ist die Aussage, negatives X fließe von B nach A einfach unpassend, denn sie legt nahe, es gebe eine negative Massen- bzw. Entropiedichte.
Wenn man in dem anfangs zitierten Zusammenhang von negativer Entropie spricht, so verfolgt man natürlich eine bestimmte Absicht: Man möchte das Verdienst für das Nichtanwachsen der Entropie gern der Sonne zuschreiben. Und hier wird nun der Fehler gemacht. Denn wenn man sich schon darüber hinwegsetzt, dass es keine negative Entropiedichte gibt, so müsste doch der Strom der negativen Entropie, der in das System hineinfließen soll, denselben Weg durchlaufen (nur in entgegengesetzter Richtung), wie der Strom der positiven Entropie, der tatsächlich aus dem System herausfließt. Da die positive Entropie in die Umgebung abfließt, könnte man also bestenfalls sagen, es fließe negative Entropie aus der Umgebung in das lebende System hinein. Die Aussage, die negative Entropie komme von der Sonne, ist also sicher falsch. Da der betrachtete Gegenstand sehr komplex ist, fällt dieser Fehler offenbar nicht auf.
Um die Unstimmigkeit noch etwas deutlicher zu machen, wollen wir die Aussage auf ein System übertragen, bei dem die Verhältnisse durchsichtiger sind: auf den Glühdraht einer elektrischen Heizung. Die normale (und korrekte) Beschreibung der Entropiebilanz lautet so: Im Glühdraht wird Entropie erzeugt. Diese ver-