Kernspintomographie (MRT) einfach erklärt

MEDIZIN AUS DER QUANTENPHYSIK

Wer schon einmal in einem MRT gelegen hat, erinnert sich vor allem an zweierlei: die enge Röhre und den Lärm, ein Klopfen, Brummen und Rattern, das trotz Kopfhörer durch Mark und Bein geht. Das, worum es geht, spürt man dagegen nicht. In diesen Minuten richten sich unvorstellbar viele Atomkerne im eigenen Körper ein winziges Stück nach einem Magnetfeld aus, das Zehntausende Male stärker ist als das der Erde, und antworten auf Radiowellen [1]. Aus diesen Antworten entsteht das Bild.

Die Kernspintomographie, heute meist Magnetresonanztomographie oder kurz MRT genannt, kommt ohne Röntgenstrahlen und ohne jede ionisierende Strahlung aus [1]. Für ihre Entwicklung erhielten Paul Lauterbur und Peter Mansfield 2003 den Nobelpreis für Medizin [2]. Dahinter steckt Quantenphysik, und um sie zu verstehen, braucht man kaum Formeln. Weiter unten steht außerdem, wie eine Untersuchung abläuft, wer nicht ins MRT darf und was sie kostet.

Diesen Artikel gibt es auch als PDF, etwa für den Physik- oder Biologieunterricht.

PDF öffnen

Winzige Magnete im ganzen Körper

Der menschliche Körper besteht zu einem großen Teil aus Wasser und Fett, und beide enthalten viel Wasserstoff. Der Kern eines Wasserstoffatoms ist ein einzelnes Proton, und das hat eine Eigenschaft, die man Spin nennt: einen Eigendrehimpuls, der mit einem kleinen magnetischen Moment verbunden ist. Man darf sich das Proton deshalb ein wenig wie eine winzige Kompassnadel vorstellen, auch wenn sich darin nichts wirklich dreht. Was der Spin ist und warum Protonen zu den Fermionen gehören, erklärt der Artikel über Fermionen und Bosonen.

Ohne äußeres Magnetfeld zeigen diese Kompassnadeln wild durcheinander. Legt man den Körper aber in ein starkes Feld, wird es quantenmechanisch interessant. Ein Proton kann sich dann nicht beliebig ausrichten, sondern nur auf zwei Arten: ungefähr mit dem Feld oder ungefähr dagegen. Die beiden Einstellungen unterscheiden sich ein klein wenig in ihrer Energie, und der Abstand wächst mit der Stärke des Feldes (Abb. 1). Dass die Richtung eines Drehimpulses im Magnetfeld nur

bestimmte Werte annehmen kann, ist eines der ältesten Ergebnisse der Quantenphysik, mehr dazu bei Was sind Quanten?.

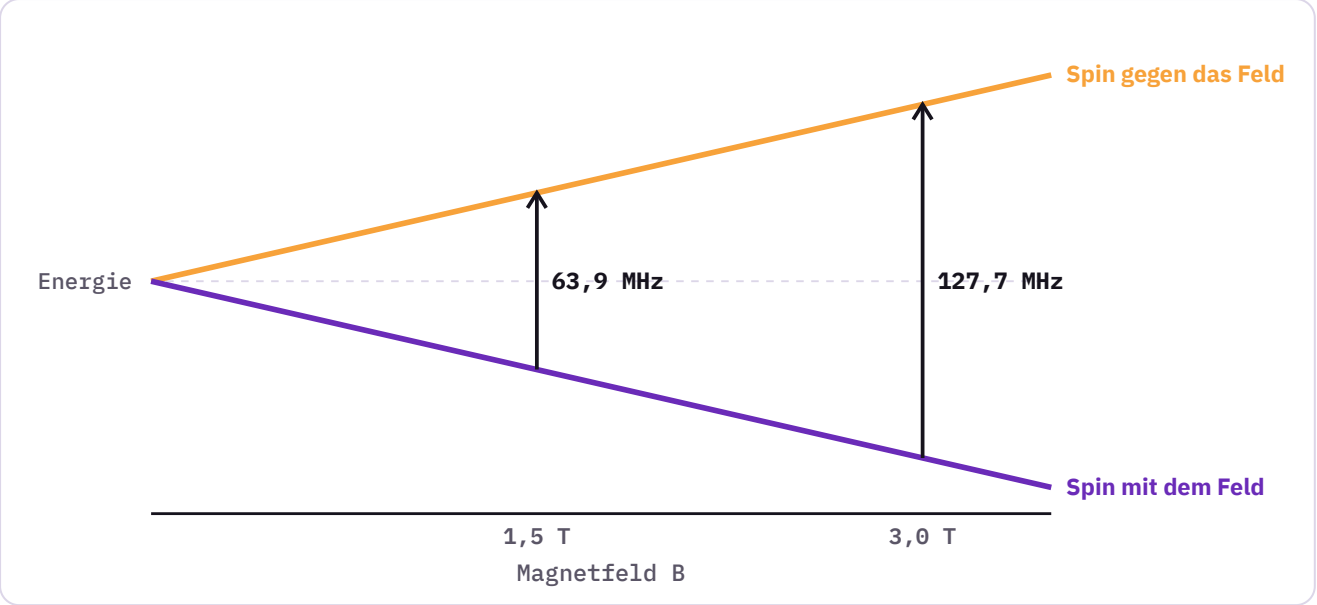

Abb. 1: Ein Proton im Magnetfeld hat zwei mögliche Energien. Der Abstand entspricht bei den üblichen Feldstärken von 1,5 und 3 Tesla Radiofrequenzen von rund 64 und 128 MHz. Eigene Berechnung und Darstellung nach Gleichung (1).

Klinische Geräte arbeiten meist mit 1,5 oder 3 Tesla[1]. Zum Vergleich: Das Magnetfeld der Erde ist in Mitteleuropa rund 50 Mikrotesla stark, ein 3-Tesla-Gerät also etwa 60 000-mal stärker. Den Energieabstand zwischen den beiden Einstellungen kann man in eine Frequenz umrechnen, und die hängt nur von der Feldstärke ab. Für Protonen gilt[3]:

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot B \approx 42{,}58\,\mathrm{MHz/T} \cdot B, \qquad \Delta E = hf \tag{1}$$

γ ist das sogenannte gyromagnetische Verhältnis des Protons, h das Plancksche Wirkungsquantum. Bei 1,5 Tesla ergeben sich rund 64 Megahertz, bei 3 Tesla rund 128 Megahertz, Frequenzen also im UKW-Bereich, knapp unterhalb und oberhalb des Bandes, in dem Radiosender senden. Genau mit solchen Radiowellen bringt das Gerät die Protonen dazu, zwischen den beiden Einstellungen zu wechseln. Das nennt man Kernspinresonanz.

Warum es trotz winziger Effekte funktioniert

Der Energieunterschied ist so klein, dass die Wärmebewegung fast alles überdeckt. Bei 3 Tesla und Körpertemperatur stehen von einer Million Protonen nur etwa zehn mehr mit dem Feld als dagegen. Dass man trotzdem etwas misst, liegt an der schieren Menge: Schon ein einziger Milliliter Wasser enthält rund $6{,}7 \cdot 10^{22}$ Wasserstoffkerne, der Überschuss beträgt

also immer noch einige Hundert Billiarden. *Eigene Überschlagsrechnung mit Gleichung (1) und der Boltzmann-Verteilung.*

Von der Resonanz zum Bild

Die Kernspinresonanz an sich ist älter als die Tomographie. Isidor Rabi maß 1938 die magnetischen Momente von Atomkernen in Molekülstrahlen [4], und 1946 gelang es zwei Gruppen unabhängig voneinander, die Resonanz in gewöhnlicher Materie nachzuweisen, um Edward Purcell in Harvard und um Felix Bloch in Stanford [5],[6]. Seitdem ist die NMR-Spektroskopie eines der wichtigsten Werkzeuge der Chemie. Ein Bild aber liefert sie nicht. Steht eine Probe in einem überall gleich starken Feld, antworten alle Protonen bei derselben Frequenz, egal wo sie sich befinden.

Paul Lauterbur kam 1971 auf eine verblüffend einfache Lösung, die er 1973 veröffentlichte. Er legte über das starke, gleichmäßige Feld ein zusätzliches, das von einer Seite zur anderen gleichmäßig zunimmt, einen sogenannten Gradienten [7]. Dann hat jeder Ort sein eigenes Feld und damit seine eigene Resonanzfrequenz:

$$f(x) = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot (B_0 + G \cdot x) \tag{2}$$

Hier ist B_0 das Grundfeld und G die Stärke des Gradienten. Wer die empfangenen Frequenzen auseinandersortiert, weiß also, an welcher Stelle entlang des Gradienten das Signal entstand. Abbildung 2 zeigt das an zwei gleichen, wasserhaltigen Stäben. Ohne Gradient verschmelzen ihre Signale zu einem, mit Gradient tauchen sie getrennt auf, und ihr Abstand im Spektrum entspricht ihrem Abstand im Gerät.

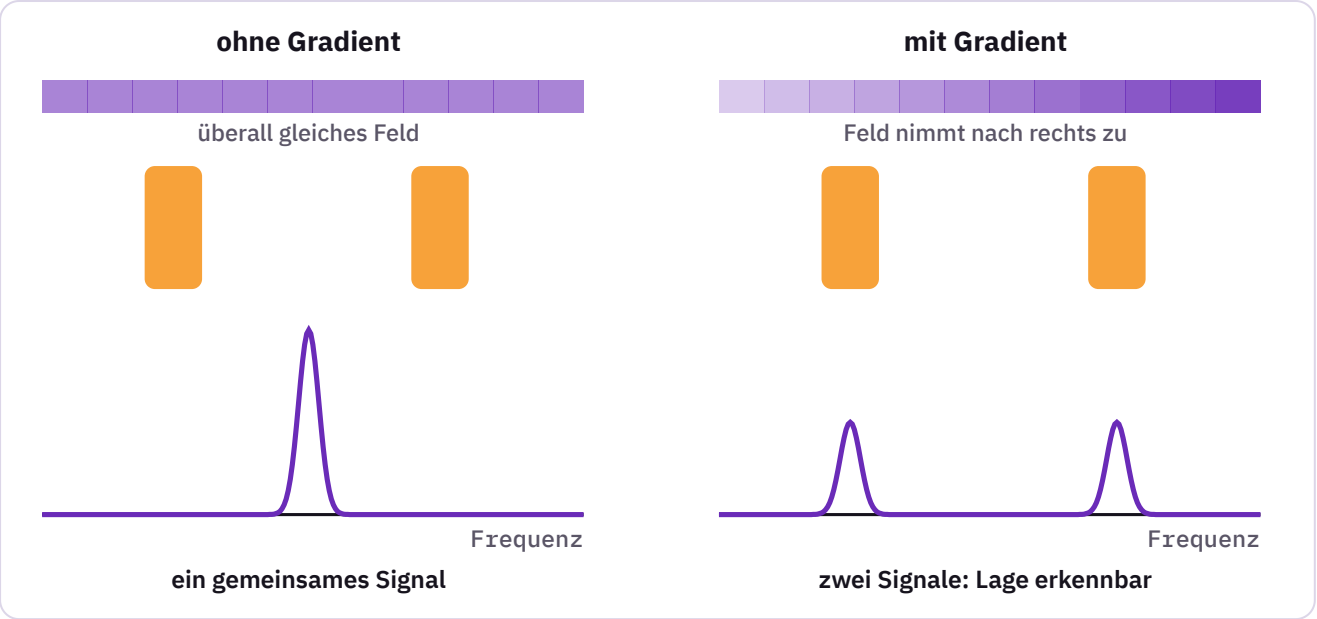

Abb. 2: Prinzip der Ortskodierung nach Gleichung (2): Erst ein Feldgradient ordnet jedem Ort eine eigene Frequenz zu. Eigene schematische Darstellung.

Indem man Gradienten in verschiedene Richtungen schaltet und die Messung viele Male wiederholt, setzt ein Rechner daraus ein Schnittbild zusammen. Lauterbur rekonstruierte 1973 so ein erstes Bild von zwei mit Wasser gefüllten Röhrchen [7]. Peter Mansfield in Nottingham entwickelte ab 1973 die Mathematik weiter und beschrieb 1977 ein Verfahren, das später als Echo-Planar-Imaging Aufnahmen in Sekundenbruchteilen möglich machte [8],[9]. Beides zusammen machte die Methode für die Medizin brauchbar [2].

Die Gradienten erklären übrigens auch den Lärm. Sie werden von Spulen erzeugt, durch die in schnellem Takt starke Ströme fließen, und im starken Grundfeld wirken auf diese Spulen dabei Kräfte, die sie ein winziges Stück bewegen. Jedes Schalten wird so zu einem Schlag gegen das Gehäuse, ähnlich wie bei einem Lautsprecher. Die Gradientenfelder wechseln dabei typischerweise mit rund einem Kilohertz [1], und das hört man.

Warum Fett hell und Wasser dunkel sein kann

Wüsste das Gerät nur, wo wie viele Protonen sitzen, wären die Bilder ziemlich flau, denn fast alle Gewebe enthalten viel Wasser. Den eigentlichen Kontrast liefert etwas anderes: wie schnell die Protonen sich nach einem Radiopuls wieder beruhigen. Nach dem Puls kippt die Magnetisierung aus ihrer Ruhelage und kehrt dann allmählich zurück. Zwei Zeitkonstanten beschreiben das. T_1 gibt an, wie schnell sich die Magnetisierung entlang des Feldes wieder aufbaut, T_2, wie schnell das Signal quer dazu verklingt, weil die Protonen außer Takt geraten [6]:

$$M_z(t) = M_0(1 - e^{-t\,/\,T_1})$$
$$M_{\mathrm{xy}}(t) = M_0 \cdot e^{-t\,/\,T_2} \tag{3}$$

Beide Zeiten hängen davon ab, wie beweglich die Wassermoleküle sind und wie sie mit ihrer Umgebung wechselwirken, und deshalb unterscheiden sie sich von Gewebe zu Gewebe. Bei 3 Tesla beträgt T_1 in der weißen Substanz des Gehirns etwa 1,1 Sekunden, in der grauen Substanz etwa 1,8 Sekunden. T_2 liegt bei etwa 70 beziehungsweise 100 Millisekunden [10]. Wählt man die Zeitpunkte von Puls und Messung geschickt, erscheint ein Gewebe hell und das andere dunkel. Daher die Begriffe „T1-gewichtet“ und „T2-gewichtet“, die in fast jedem MRT-Befund auftauchen. Im T1-gewichteten Bild erscheint Fett zum Beispiel hell und freies Wasser dunkel, im T2-gewichteten ist es beim Wasser umgekehrt.

So läuft eine MRT-Untersuchung ab

In Deutschland werden pro Jahr etwa 13 Millionen MRT-Untersuchungen gemacht [11]. Für die meisten Menschen läuft das ähnlich ab. Vor der Untersuchung fragt das Praxisteam nach Implantaten, Operationen und Metall im Körper. Uhr, Schmuck, Schlüssel und Bankkarten bleiben draußen, oft zieht man einen Kittel ohne Metallteile an [12]. Das hat einen handfesten Grund: Das Magnetfeld ist immer eingeschaltet, auch wenn gerade nicht gemessen wird. Münzen oder eine Schere können im Streufeld so stark beschleunigt werden, dass sie zu gefährlichen Geschossen werden [11].

Dann liegt man auf einer Liege, die in die Röhre fährt. Ein Scan dauert je nach Körperregion und Fragestellung 20 bis 60 Minuten. In dieser Zeit muss man möglichst still liegen und auf Ansage gelegentlich die Luft anhalten, sonst verwackelt das Bild [12]. Gegen den Lärm, dessen Ursache weiter oben bei den Gradienten erklärt ist, gibt es Kopfhörer oder Ohrstöpsel [11],[12].

Wer Angst vor engen Räumen hat, sollte das vorher sagen. Dann kann man vorher ein angstlösendes Medikament bekommen. Außerdem gibt es offene Geräte mit mehr Platz. Die Bilder offener Geräte sind je nach Feldstärke etwas weniger scharf, für die Diagnose aber brauchbar [12].

Kontrastmittel: wann und mit welchem Risiko

Für manche Fragen, etwa bei Tumoren oder Entzündungen, spritzt man ein Kontrastmittel in die Vene. Verwendet werden dafür Mittel, die das Metall Gadolinium enthalten. Mögliche Nebenwirkungen sind Kopfschmerzen, Übelkeit, ein Kältegefühl an der Einstichstelle, ein veränderter Geschmack und Schwindel. Schwere Reaktionen sind seltener als bei den jodhaltigen Kontrastmitteln der Computertomographie [12].

Bei Menschen mit fortgeschrittener Nierenerkrankung kann Gadolinium in seltenen Fällen eine schwere Bindegewebserkrankung auslösen, die nephrogene systemische Fibrose [12]. Außerdem weiß man inzwischen, dass Spuren von Gadolinium nach der Untersuchung im Gehirn verbleiben können. Einen Schaden für Patienten hat man dadurch bisher nicht nachgewiesen. Die Europäische Arzneimittel-Agentur hat 2017 trotzdem vorsorglich mehrere Mittel vom Markt genommen oder eingeschränkt, die mehr Gadolinium freisetzen, und erlaubt die übrigen nur in der niedrigsten wirksamen Dosis [13].

Wer nicht ohne Weiteres ins MRT darf

Hält man sich an die geltenden Sicherheitsempfehlungen, ist eine MRT für Patienten nach Einschätzung des Bundesamts für Strahlenschutz nicht mit gesundheitlichen Risiken verbunden. Im Gegensatz zur Computertomographie arbeitet sie ohne ionisierende Strahlung [11]. Heikel wird es bei Metall und Elektronik im Körper:

- **Aktive Implantate** wie Herzschrittmacher, Defibrillatoren, Infusionspumpen oder Innenohrimplantate gelten als Ausschlussgrund, sofern Implantatausweis oder behandelnde Ärzte nichts anderes sagen. Das Magnetfeld kann ihre Funktion stören [11],[12]. Ist ein Gerät ausdrücklich für das MRT freigegeben, steht das im Implantatausweis.
- **Metallsplitter**, etwa im Auge, und andere Einschlüsse unbekannter Herkunft schließen eine MRT in der Regel aus, weil sie sich bewegen können [11],[12].
- **Passive Implantate** wie Gefäßclips, Stents, künstliche Herzklappen oder Spiralen müssen vorher geprüft werden. Zahnimplantate, künstliche Hüftgelenke oder Stäbe in der Wirbelsäule sind nach dem MSD Manual dagegen in der Regel unproblematisch. Frisch eingesetzte Implantate sind in den ersten sechs Wochen empfindlicher, weil sie noch nicht eingewachsen sind [11],[12].
- **Schwangerschaft:** Eine MRT kommt nur nach sorgfältiger Abwägung in Frage, in den ersten drei Monaten mit besonders strengem Maßstab [11]. Muss überhaupt ein Schnittbild gemacht werden, ist sie aber meist besser als eine CT, weil das Kind keiner Röntgenstrahlung ausgesetzt wird [12].

Ob eine Untersuchung im Einzelfall möglich ist, entscheiden Ärztin oder Arzt nach dem Aufklärungsgespräch. Dieser Artikel ersetzt keine ärztliche Beratung.

MRT oder CT: der Unterschied

Beide Verfahren liefern Schnittbilder, arbeiten aber völlig verschieden. Die Computertomographie durchleuchtet den Körper mit Röntgenstrahlen aus vielen Richtungen, die MRT misst die Antwort der Wasserstoffkerne auf Magnetfeld und Radiowellen [11].

	MRT (Kernspintomographie)	CT (Computertomographie)
Prinzip	Magnetfeld und Radiowellen	Röntgenstrahlen
Ionisierende Strahlung	keine	ja
Dauer	meist 20 bis 60 Minuten	kürzer
Stärke	Weichteile, etwa Gehirn, Wirbelsäule, Muskeln und Leber	Notfälle wie schwere Verletzungen und Schlaganfall, bewegte Organe
Einschränkungen	Lärm, Enge, Metall und aktive Implantate	Strahlenbelastung, jodhaltiges Kontrastmittel

MRT und CT im Vergleich, nach Bundesamt für Strahlenschutz [11] und MSD Manual [12].

Was kostet eine MRT?

Eine MRT-Aufnahme kostet nach Angaben des Medizinischen Dienstes in der Regel zwischen 230 und 600 Euro (Stand 2018) [14]. Wer sie bezahlt, hängt vom Anlass ab. Als Früherkennung ohne konkreten Verdacht, etwa als MRT der Brust, zahlen die gesetzlichen Kassen nicht. Dann handelt es sich um eine Selbstzahlerleistung, deren Nutzen der IGeL-Monitor in diesem Fall als „tendenziell negativ“ bewertet [14]. Ob eine ärztlich verordnete Untersuchung übernommen wird, klären Sie am besten vorher mit der überweisenden Praxis oder Ihrer Krankenkasse.

Ein Verwandter des Quantencomputers

Die Kernspins, die im MRT Bilder liefern, haben noch eine zweite Karriere gemacht. Weil ein Spin im Magnetfeld genau zwei Zustände kennt, eignet er sich als Qubit. Mit sieben Kernspins in einem eigens gebauten Molekül zerlegte eine Gruppe bei IBM 2001 die Zahl 15 in ihre Faktoren, mit denselben Methoden aus Radiopulsen und Resonanzen, die auch im Krankenhaus verwendet werden [15]. Heute setzt die Forschung zwar auf andere Arten von Qubits, etwa auf supraleitende Schaltkreise, aber die Idee ist dieselbe geblieben. Wie das funktioniert, steht im Artikel über Quantencomputer.

Und noch etwas haben die beiden gemeinsam: Was im Inneren passiert, sieht man nicht. Man sieht nur das, was am Ende gemessen wird, ein paar Radiowellen, aus denen ein Rechner ein Bild macht. Dass daraus ein scharfer Blick in den Körper wird, ohne Skalpell und ohne Röntgenstrahlen, verdankt die Medizin der Quantenphysik.

Fragen rund ums MRT

Sind Kernspintomographie und MRT dasselbe?

Ja. Kernspintomographie, Magnetresonanztomographie und MRT bezeichnen dasselbe Verfahren. Der ältere Name erinnert an den Kernspin, also die Eigenschaft der Wasserstoffkerne, die das Gerät misst.

Wie lange dauert ein MRT?

Je nach Körperregion und Fragestellung meist 20 bis 60 Minuten, die Vorbereitung nicht mitgerechnet.

Ist ein MRT gefährlich?

Bei Einhaltung der Sicherheitsregeln nach Einschätzung des Bundesamts für Strahlenschutz nicht. Es gibt keine Röntgenstrahlung. Gefährlich können Metall im Körper und aktive Implantate wie Herzschrittmacher werden, deshalb das Aufklärungsgespräch vorher.

Warum ist das MRT so laut?

Die Gradientenspulen, die jedem Ort im Körper eine eigene Frequenz geben, werden im Takt von etwa einem Kilohertz umgeschaltet. Im starken Magnetfeld bewegen sie sich dabei ein winziges Stück und schlagen wie die Membran eines Lautsprechers.

Was kostet ein MRT?

Nach Angaben des Medizinischen Dienstes in der Regel 230 bis 600 Euro (Stand 2018). Früherkennung ohne Verdacht müssen gesetzlich Versicherte selbst bezahlen.

Quellen

1. Deutsche Physikalische Gesellschaft: *Magnetresonanztomographie.* physikkonkret Nr. 3, April 2009, dpg-physik.de.
2. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2003* (P. C. Lauterbur, P. Mansfield). nobelprize.org/prizes/medicine/2003.
3. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
4. I. I. Rabi, J. R. Zacharias, S. Millman, P. Kusch: *A New Method of Measuring Nuclear Magnetic Moment.* In: Physical Review 53 (1938), S. 318, doi:10.1103/PhysRev.53.318.

5. E. M. Purcell, H. C. Torrey, R. V. Pound: *Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid.* In: Physical Review 69 (1946), S. 37–38, doi:10.1103/PhysRev.69.37.
6. F. Bloch: *Nuclear Induction.* In: Physical Review 70 (1946), S. 460–474, doi:10.1103/PhysRev.70.460.
7. P. C. Lauterbur: *Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance.* In: Nature 242 (1973), S. 190–191, doi:10.1038/242190a0.
8. P. Mansfield, P. K. Grannell: *NMR „diffraction" in solids?* In: Journal of Physics C 6 (1973), S. L422–L426, doi:10.1088/0022-3719/6/22/007.
9. P. Mansfield: *Multi-planar image formation using NMR spin echoes.* In: Journal of Physics C 10 (1977), S. L55–L58, doi:10.1088/0022-3719/10/3/004.
10. G. J. Stanisz u. a.: *T_1, T_2 relaxation and magnetization transfer in tissue at 3T.* In: Magnetic Resonance in Medicine 54 (2005), S. 507–512, doi:10.1002/mrm.20605.
11. Bundesamt für Strahlenschutz: *Magnet-Resonanz-Tomographie.* Stand 30. Mai 2023, bfs.de.
12. M. A. Mafraji: *Magnetresonanztomografie (MRT).* MSD Manual, Ausgabe für Patienten, überprüft September 2025, msdmanuals.com.
13. European Medicines Agency: *EMA's final opinion confirms restrictions on use of linear gadolinium agents in body scans.* 21. Juli 2017, ema.europa.eu.
14. Medizinischer Dienst des Spitzenverbandes Bund der Krankenkassen: *MRT keine gute Alternative zum Mammographie-Screening.* Pressemitteilung vom 3. Mai 2018 zum IGeL-Monitor, md-bund.de.
15. L. M. K. Vandersypen u. a.: *Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance.* In: Nature 414 (2001), S. 883–887, doi:10.1038/414883a.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Kernspintomographie (MRT) einfach erklärt. Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/kernspintomographie.php
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Fermionen und Bosonen · Quantencomputer · Was sind Quanten?