

Exkurs: Der Kernspintomograf

Verwendete Synonyme : KST (Kernspin-Tomografie); MRT (Magnetresonanz-Tomografie); MR; MRI (magnetic resonance tomographie); NMR (nuclear magnetic resonance)

Der Kernspintomograf ist ein seit etwa 25 Jahren in der medizinischen Routine eingesetztes medizinisches Großgerät, das die Integration verschiedener physikalischer Prinzipien demonstriert:

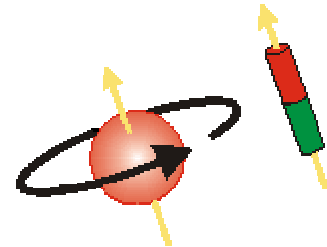
- Erzeugung sehr starker, homogener Magnetfelder,
- Verwendung supraleitender Magnete,
- Nutzung elektromagnetischer Wellen,
- Nutzung atomarer Eigenschaften
- Verwendung mathematischer Algorithmen zur Konstruktion medizinisch aussagefähiger Daten und Bilder.

1946	Geschichtlicher Abriss Entdeckung des zugrundeliegenden physikalischen Vorgangs
1950 - 1970	Einsatz in der chemischen und physikalischen Forschung
1973	Einführung des Computertomografie-Prinzips (mit Röntgenstrahlen)
1977	erstes komplettes MRI-Bild eines Patienten
1980	Aufnahmedauer: 5 Minuten / Bild
1986	Aufnahmedauer: 5 Sekunden / Bild
1987	Aufnahme des Herzschlags in real-time
1993	Funktionelle MRI zeigt Aktivität unterschiedlicher Hirnteile

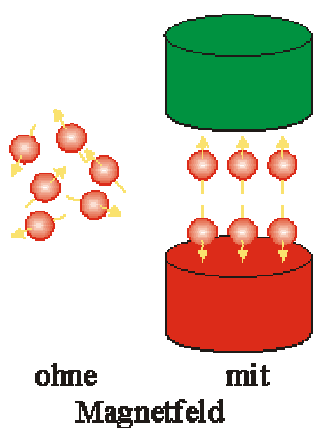
Prinzip: Der Spin der Atomkerne

Die Kernspintomografie ist ursprünglich eine Methode aus der Chemie. Sie nutzt den *Spin* bestimmter Atomkerne, medizinisch sind vor allem Wasserstoffatomkerne (Protonen) von Interesse.

Atomkerne zeigen einen Spin, den man sich als ständiges Drehen um eine Achse vorstellen kann. Dadurch wirken sie wie eine bewegte Ladung und erzeugen ein Magnetfeld.

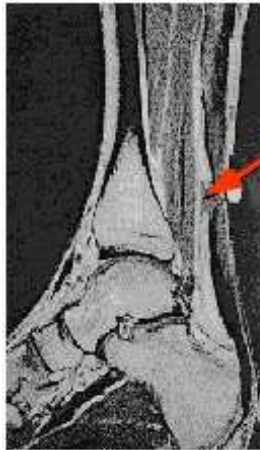


Von außen betrachtet kann man sich die Protonen daher wie kleine Magnete vorstellen.



Bringt man die Atomkerne in ein sehr starkes Magnetfeld (1 bis 1,5 Tesla), so richten sich diese parallel zu den magnetischen Feldlinien aus. Dieses Magnetfeld muss sehr homogen und seine Stärke in kleinen Schritten schnell veränderbar sein. In der Regel benutzt man dazu supraleitende Magnete (s.u.).

Zur Erstellung eines Bildes wird der zu untersuchende Körperteil mit Hochfrequenzwellen (Frequenz im Kurzwellenbereich) bestrahlt. Dazu dient eine im Inneren der Magnetspule zusätzlich angeordnete Spule. Bei passender Frequenz nehmen die Protonen Energie auf, sie beginnen Kreisbewegungen. Schaltet man das Hochfrequenzfeld wieder ab, richten sich die Atomkerne wieder im Magnetfeld aus. Die überschüssige Energie geben sie in Form von Radiowellen ab. Diese werden von Spulen (als Teil von Schwingkreisen) empfangen.

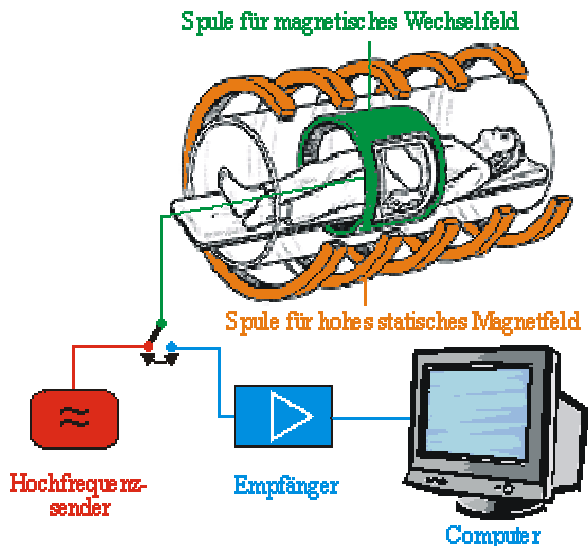


Rupturstelle der Achillessehne

Aus den gemessenen Radiowellen lässt sich nach dem Prinzip der Tomografie (s.u.) auf den Ort der Entstehung zurückschließen. Der unterschiedliche Gehalt an Wasserstoffkernen (Fett z.B. besitzt viele, Knochen (Kalk) nur wenige Protonen) erlaubt eine Differenzierung der Gewebe des Körpers.

Genereller Aufbau des Geräts

Der Patient liegt auf einem Schlitten in einer Röhre, in der durch besondere Spulen ein sehr homogenes, starkes Magnetfeld erzeugt wird. Eine zweite Spule erzeugt hochfrequente Wellen. Diese Spule dient auch als Antenne für die von den Atomen ausgesendeten Radiowellen. Die empfangenen Wellen werden von einem Rechner zu einem Schnittbild der beobachteten Patientenebene zusammengesetzt. Dann wird der Patient verschoben und das nächste Schnittbild erstellt.



Bereitstellung des benötigten Magnetfelds



Beispieldaten eines MRT-Magneten:

- Ultrakompakter 1.5 Tesla Magnet, Länge: 160 cm
- Patientenfreundliche innere Öffnung von 60 cm Durchmesser
- Magnetgewicht nur (!) 4 050 kg
- Exzellente Homogenität des Magnetfeldes über eine Länge von 50 cm

Magnetische Flussdichte B_0 eines MRT-Systems:

- 1,5 T = 15 000 Gauss = Vs/m² (T = Tesla = 10⁴ Gauss)
- Magnetische Flussdichte des Erdmagnetfeldes:
- 0.25 ... 0.5 Gauss = 2.5 mT ... 5 mT
- 15 000 Gauss / 0,5 Gauss = 30 000

Allgemein werden heute Helmholtz-Spulen verwendet. Dies sind zwei sehr kurze Spulen mit der Windungszahl N, die parallel zueinander in einem Abstand angeordnet sind, der gleich dem Radius r der Spulen ist. Fließt in diesen beiden Spulen der gleiche Strom I, entsteht ein Magnetfeld, dass in der Verbindungsachse der beiden Spulen liegt und nahezu homogen ist.

$$(5-7) \quad B_x \approx 0.716 \mu_0 \frac{N}{r} I.$$

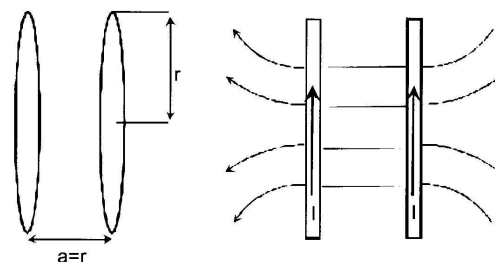


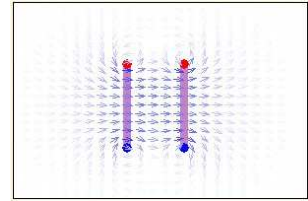
Abb. 5.1: Helmholtz-Spule

Genau zwischen den beiden Spulen berechnet sich seine Stärke zu

$$B_x = 0,716 \cdot \mu_0 \cdot N/r \cdot I$$

Der große Vorteil solcher Helmholtz-Spulen besteht in der leichten Zugänglichkeit des Spulinnenraums (in diesem Fall für die Patienten).

Mit dem Programm *Helmholtz* können Sie das Magnetfeld einer Helmholtz-Spule selbst untersuchen.



Die Stärke des Magnetfelds demonstriert nebenstehende Abbildung: bei Einschalten des Stroms wurde eine mit Stahl- und Eisenteilen bestückte Palette in den Magneten gezogen. Berichtet wird auch von der Demonstration des neu erworbenen Tomografen in Anwesenheit eines Polizisten. Dessen Pistole wurde aus dem Holster in den Magneten gezogen, durch den Aufprall der Pistole löste sich ein Schuss, glücklicherweise traf das Geschoss nur die Wand. Außer der Beschädigung des Magneten wurde die Pistole magnetisiert – und magnetisierte mechanische Objekte funktionieren in aller Regel nicht.

Neben solchen Unfälle stellt die große Stärke des Magnetfeldes aber auch ein medizinisches Problem dar: ähnliche Kräfte wie oben demonstriert wirken auch auf implantierte ferromagnetische Gegenstände (Schrapnelle aus Kriegen, ältere Schrittmacher). Bei Herzschrittmachern besteht zusätzlich die Gefahr, dass das starke Magnetfeld in der elektronischen Schaltung des Schrittmachers Fehlerströme induziert (s...) und zu lebensbedrohenden Fehlfunktionen führt. Nach den Vorschriften der United States Food and Drug Administration dürfen Patienten mit Schrittmachern keinen magnetischen Feldern von über 5 Gauss ausgesetzt werden!

Supraleitende Magnete

Im Kernspintomografen wird das Phänomen der Supraleitung benutzt, um mit vertretbarem Aufwand hohe Magnetfeldstärken zu erreichen.

Bei der Supraleitung handelt es sich um eine thermodynamisch eigene Phase (neben fest, flüssig, gasförmig, plasmatisch). Ein Supraleiter verliert unterhalb einer bestimmten Sprungtemperatur jeden Widerstand, ein einmal in einer supraleitenden Spule induzierter Strom fließt ohne jeden Verlust für ewige Zeiten weiter. Offenbar stoßen sich die stromtransportierenden Elektronen nicht mehr an den Atomrümpfen und erzeugen so die Wärme, die man bei normalen Stromleitern beobachtet.

Die Erklärung für dieses Phänomen lieferten 1957 Bardeen, Cooper und Schrieffer in der sogenannten BCS-Theorie.

Danach bilden die Elektronen im Supraleiter durch eine besondere Anziehungskraft (die attraktive Elektron-Elektron-Wechselwirkung) im Kristallgitter des Supraleiters Cooper-Paare. Dieses Paar zeigt nun – im Gegensatz zum Elektron, das einen Spin von $+$ oder $- \frac{1}{2}$ hat – keinen Spin mehr. Damit gilt hier das Pauli-Prinzip nicht mehr, das ja dafür sorgt, dass ein Energieniveau nur von einem Elektronenpaar besetzt werden darf. Alle Cooper-Paare weisen daher das gleiche Energieniveau auf. Dabei kommt es zu keiner Wechselwirkung mit dem Kristallgitter der Atomrümpfe – es gibt weder Wärme noch Widerstand.

Supraleiter zeigen eine Reihe verblüffender Eigenschaften:

Im Video *supra01.mpg* wird der Meissner-Ochsenfeld-Effekt demonstriert: auf der Tischplatte liegt der mit flüssigem Stickstoff gekühlte Supraleiter aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_2$. Über ihm schwebt ein kleiner, würfelförmiger Magnet. Das Schweben kommt dadurch zustande, dass der Supraleiter die Magnetfeldlinien des Magneten komplett aus seinem Inneren verdrängt. Der Magnet schwingt um seine Gleichgewichtsposition hin und her.



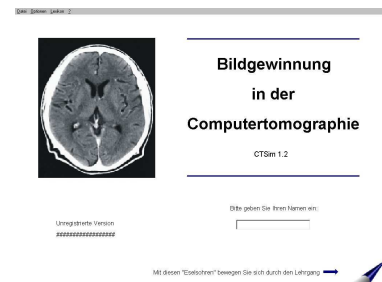
<http://www.physik.tu-berlin.de/institute/IFFP/thomsen/supra01.html>

Die Spulen für das statische Magnetfeld von MRT-Geräten bestehen aus einigen Kilometern supraleitender Drähte, die in einem Dewargefäß (doppelwandiges Gefäß, der Zwischenraum ist evakuiert und verhindert so die Wärmeübertragung, die Wärmestrahlung wird durch Verspiegelung unterdrückt) mit flüssigem Helium bei einer Temperatur von 4,2 K gehalten werden. Während sich früher dieser Anlagenteil in einem weiteren Dewargefäß mit flüssigem Stickstoff (77,4 K) befand, setzt man heute elektrische Kühlaggregate ein.

Das Tomografie-Prinzip: Bildgewinnung mit Hilfe mathematischer Algorithmen

Das Prinzip des Tomografen wurde in der Medizin erstmals 1974 vom britischen Ingenieur G. Hounsfield (Nobelpreis 1979) beim Röntgen-Tomografen angewendet.

Sie können sich mit diesem Prinzip intensiver mit Hilfe eines Lernprogramms des Lehrstuhls für Didaktik der Physik der LMU München beschäftigen („CTSim“).



Tomografische Verfahren (das Wort stammt vom altgriechischen τόμος, "Schnitt, abgeschnittenes Stück", und von γράφω, "ritzen", "malen", "schreiben") stellen Körper in Form von Schnittbildern dar. Dazu werden Werte einer zweidimensionalen Verteilung benutzt. Das Verfahren als

Computertomografie	Bei der Computertomografie rotiert ein Ring, bestehend aus Röntgenröhre und Röntgenempfänger um den Patienten. Die Abschwächung der Röntgenstrahlung beim Passieren unterschiedlich „röntgendichter“ Bereiche des Körpers wird gemessen und daraus ein Schnittbild der durchstrahlten Körperscheibe errechnet.
Kernspinresonanztomografie	Bei der Kernspinresonanztomografie wird über die Messung der Spinumkehr von Atomkernen (vorwiegend H) deren Verteilung bestimmt.
Positronen-Emissions-Tomographie (PET)	Nach Gabe eines radioaktiv markierten Pharmakons, das unter Aussendung eines β^+ -Teilchens (Anti-Elektron, positiv geladenes Elektron) zerfällt, wird die Verteilung der entstehenden Gammastrahlung analysiert. Das β^+ -Teilchen zerstrahlt als Antiteilchen bei der Kollision mit einem Elektron und sendet dabei zwei Gammastrahlen unter einem Winkel von 180° aus. Ein Ring aus 12 000 Wismutgermanat-Detektoren bestimmt die räumliche Energieverteilung der Gammastrahlung und gestattet die Berechnung des Ortes der Materie-Antimaterie-Reaktion und damit der Stelle im Körper, an der das Pharmakon angereichert wurde.

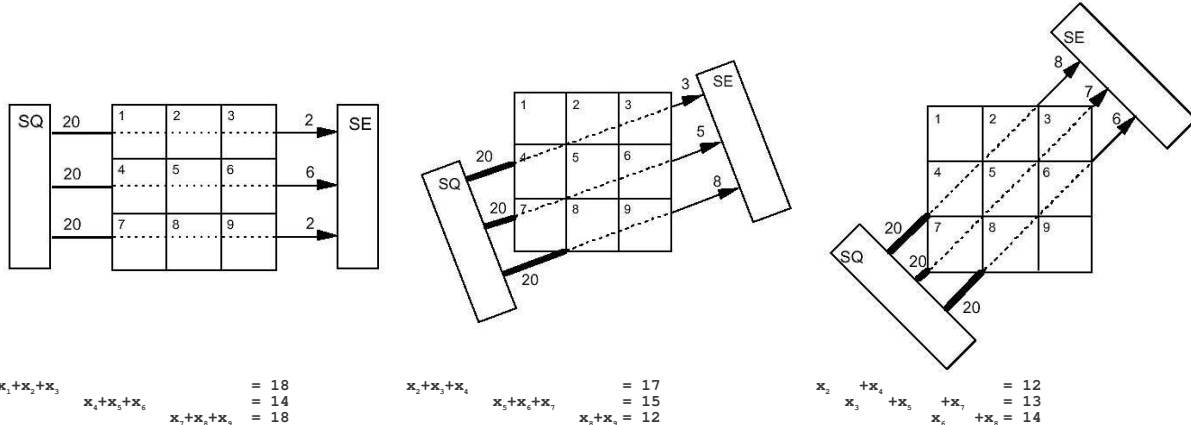
Erläutert werden soll das Prinzip des mathematischen Vorgehens am Beispiel der Röntgentomographie: eine Strahlenquelle SQ sendet Röntgenstrahlen durch einen Materiewürfel. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die Intensität der Strahlung von einem Empfänger SE gemessen.

Zur Veranschaulichung betrachten wir einen Würfel aus 9 Zellen. Jede der Zellen schwächt einen von der Strahlenquelle SQ ausgesandten Strahl um einen bestimmten Betrag, x_1 bis x_9 bezeichnet. Der oberste Strahl (Stärke beim Verlassen der Quelle: 20 Einheiten) durchquert die Zellen 1, 2 und 3 und wird dann vom Strahlungsempfänger mit der Stärke 2 gemessen, es gilt also:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 20 - 2 = 18.$$

In analoger Weise stellt man die Gleichungen für die beiden anderen Strahlen auf und kommt zu einem Gleichungssystem mit 3 Gleichungen und 9 Unbekannten (x_1 bis x_9), das so nicht lösbar ist.

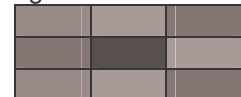
Nun nimmt man jedoch zwei weitere Messungen vor, bei denen Strahlenquelle und Strahlungsempfänger um einen bestimmten Winkel gedreht werden. Die Strahlen werden nun andere Zellkombinationen passieren und andere Intensitäten ergeben. Erneut werden die Gleichungen für die Schwächung der Strahlen aufgestellt, was zu einem Gleichungssystem aus 9 Gleichungen führt:



Dieses Gleichungssystem (9 Gleichungen mit 9 Unbekannten) hat genau eine Lösung:

6	7	5
5	2	7
6	7	5

Setzt man die Werte der Schwächungskonstanten x_1 bis x_9 in eine Grauskala um, entsteht das rechts abgebildete „Tomogramm“:

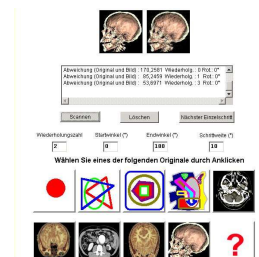


nach: <http://www.educeth.ch/mathematik/leitprog/lingl/docs/lingl.pdf>

Obige Rechnung demonstriert nur das Prinzip, die tatsächlich eingesetzten Algorithmen sind um ein Vielfaches komplizierter.

Eine gute Simulation des tomografischen Prinzips und der Entstehung der medizinischen Bilder finden Sie unter

<http://www.ottmarlabonde.de/L1/Tomo/TomoTest.html>



Im Internet finden Sie unter

<http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/inside.htm>
ein englischsprachiges Online-Buch, dass über alle Aspekte der Kernresonanztomografie erschöpfend Auskunft gibt.

