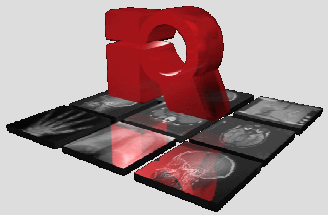
Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Röntgengesellschaft

Physik und Technik
in der bildgebenden Diagnostik



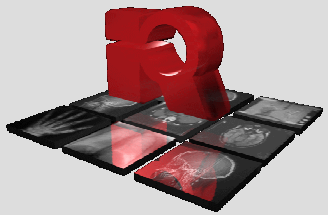
MR-Bildgebung und ihre Gefahren

eine Einführung in die MR-Bildgebung
- unschädlich, aber nicht ungefährlich -

Harald Kugel

Universitätsklinikum Münster - Institut für Klinische Radiologe

Gefahren der Magnetresonanz



Die Erzeugung von Bildern mit Magnetresonanz ist grundsätzlich unschädlich !

- keine ionisierende Strahlung -
- keine WW mit Körpergewebe, die zu bleibender Beeinflussung führen - bei korrekter Anwendung !

Aber:

- Vielzahl von physikalischen Effekten mit erheblichem Gefahrenpotential, das mit der Feldstärke steigt !

Daher:

- beachtliche Unfallgefahr
  bei Unachtsamkeit oder falscher Anwendung !

Felder der Magnetresonanz

Drei elektromagnetische Felder:

1. statisches Magnetfeld B_0
   (im und um den Scanner)

2. mäßig schnell (= Audio-Frequenzen) veränderliche magnetische Zusatzfelder, sog. Gradientenfelder G_x, G_y, G_z, (im Tunnel)

3. gepulstes Hochfrequenzfeld B_1
   (in der Sendespule/Körperspule)

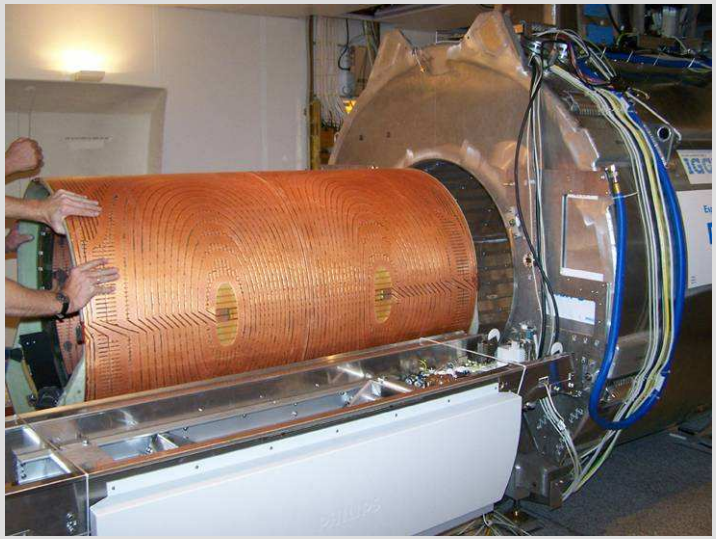
Felder der Magnetresonanz

Dewar mit supraleitender Feldspule

HF-Spule (Körperspule), Sendespule

HF-Spule (Kopfspule), nur HF-Empfang

Gradienten-spulensatz



Risiken der MR-Bildgebung

durch das starke statische Magnetfeld:

- Kräfte auf ferromagnetische Objekte

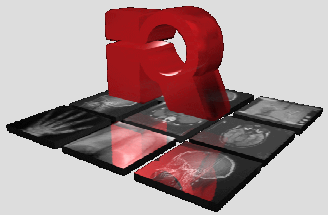
durch schnell wechselnde Magnetfelder (Gradienten):

- Induktion von Strömen, Nervenstimulation, Lärm

durch das Hochfrequenzfeld (Anregungspulse):

- Erwärmung, starke Erhitzung bei Resonanz in elektrischen Leitern (Kabel, Drähte)

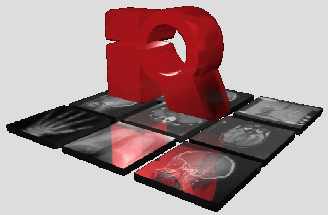
statisches Magnetfeld



- Funktion: Ausrichtung der Spins, Erzeugung der Präzession nach der Anregung.
- Wirkungsort: in der Spule des Magneten, homogen im Magnettunnel, Feldlinien parallel zum Tunnel, d.h. Kopf-Fuß-Richtung;

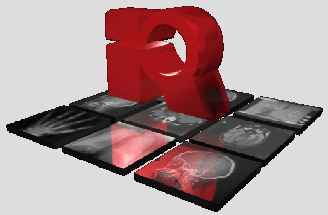
  bei „offenen“ Magneten zwischen den Polen, Feldlinien senkrecht zum Patienten, anterior-posterior;

  Streufeld mit relevanter Stärke (> 0,5 mT) mehrere m um den Scanner
- Wirkungszeit: **IMMER** eingeschaltet (supraleitende Spulen!)
- typische Stärke: 0,5 T- 4 T (Erdmagnetfeld 0,05 mT)



Wechselwirkung mit Körpergewebe:

- bei biologischem Gewebe und Zellen: keine Effekte reproduzierbar gemessen (Gewebe ist diamagnetisch !)
- bei paramagnetischen Substanzen in der Haut : Verlagerungen oder Drehungen bei anisotroper Suszeptibilität (spezielle Pigmente bei Tätowierungen) -> Hautreizungen
- Induktion durch Bewegung von Blut oder Gewebe im Magnetfeld (Gewebe ist leitfähig !)



Wechselwirkung mit Materie:

ferromagnetische Objekte

- Zugkraft: auf Magnete entlang der Feldlinien; auf magnetisierbares Material (Eisen, Nickel) in die Richtung des stärkeren Feldes (auf den Tunnel zu, in den Tunnel hinein – plötzliche Kraftwirkung !)
- Drehmoment: auf langgestreckte Objekte, (magnetische) Längsachse parallel zum Feld

elektrische Geräte, magnetische Informationsträger

- Funktionsverlust elektronischer Geräte möglich, Löschung von (Steuer-) Informationen - <u>schon im Streufeld !</u>

statisches Magnetfeld

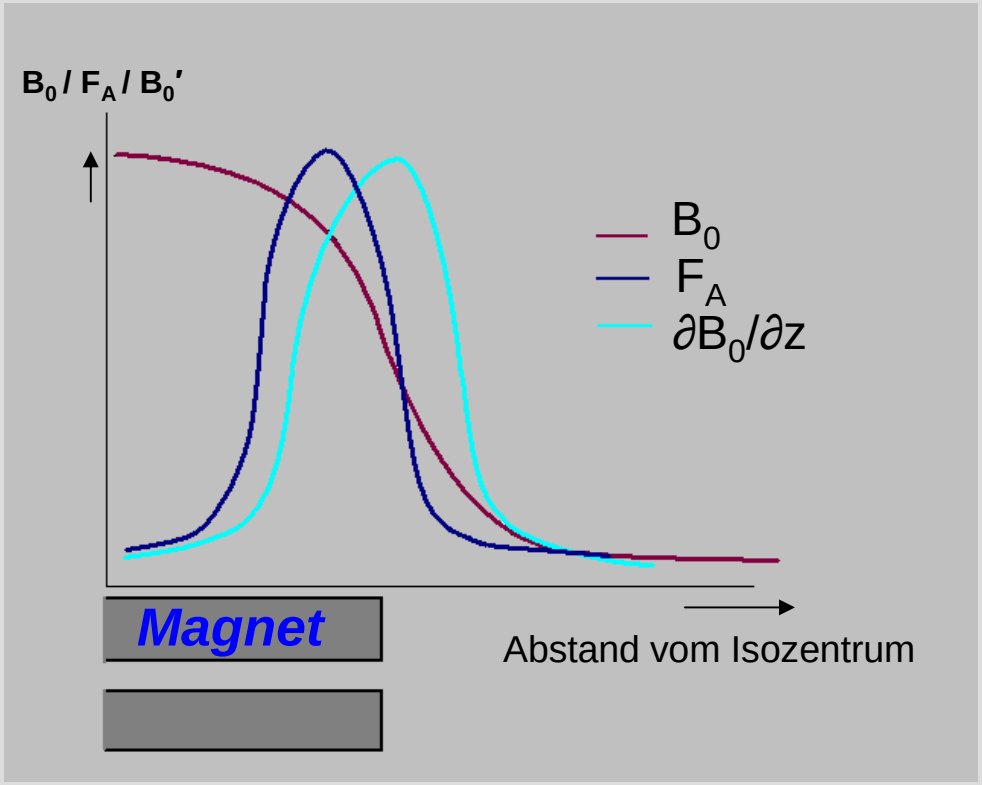
Wirkung auf magnetisierbare Objekte:

Anziehung (F_A):

$$F_A \propto B_0 \frac{\partial B_0}{\partial z}$$

Drehmoment (M):

$$M \propto B_0^2$$



Supraleitender Magnet: <u>immer</u> eingeschaltet !

statisches Magnetfeld

Gewicht:
7 g

Zugkraft:
800 g

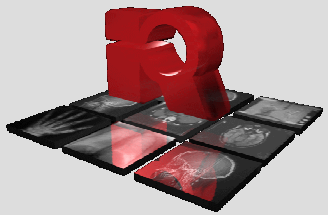
Bilder: J. Bertling, UK Münster

statisches Magnetfeld

Rollhocker (Stahl) im 3 T-Scanner

...und danach

statisches Magnetfeld



Ferromagnetism of Intraocular Foreign Body Causes Unilateral Blindness after MR Study

William M. Kelly,[1] Patrick G. Paglen,[2] Jack A. Pearson,[3] Armando G. San Diego,[4] and Murray A. Soloman[5]

AJNR 7:243–245,

The rapid as
an important to
by its unparalle
compared with
The
of M
dev
wid
atte
MR
are
cert
type
as

The New York Times
July 31, 2001

Boy, 6, Dies of Skull Injury During M.R.I.

Radiology, Vol 187, 855-856, Copyright © 1993 by Radiological Society of North America

Placement of a ferromagnetic intracerebral aneurysm clip in a magnetic field with a fatal outcome

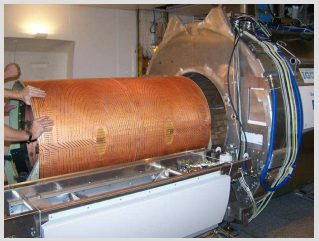
RP Klucznik, DA Carrier, R Pyka and RW Haid
Department of Neuroradiology, Wilford Hall Medical Center, San Antonio, TX 78236-5300.

Magnetic resonance (MR) imaging may be contraindicated in patients with biomedical devices, among the most dangerous of which are intracranial aneurysm clips, owing to the possibility of torque

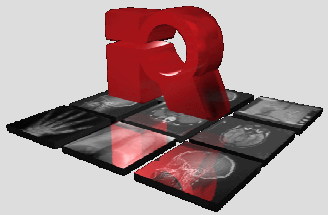
statisches Magnetfeld

Über das statische Feld müssen nicht nur Patienten, Ärzte und MTRAs Bescheid wissen,
sondern auch Reinigungspersonal, Haustechnik, Feuerwehr !

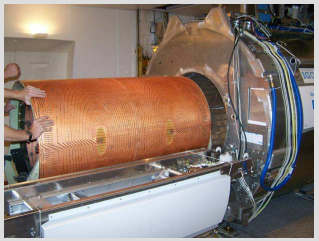
Nachgestelltes Bild: Feuerwehrmann im Scanner eingeklemmt nach Betreten des Scannerraums mit Atemschutz zur Nachkontrolle einer Brandstelle.
Lang R, Brandschutz 2002; 56(2): 281-286



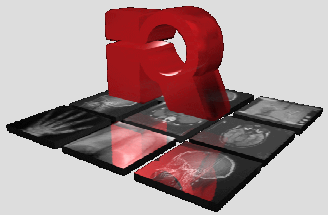
Gradientenfeld

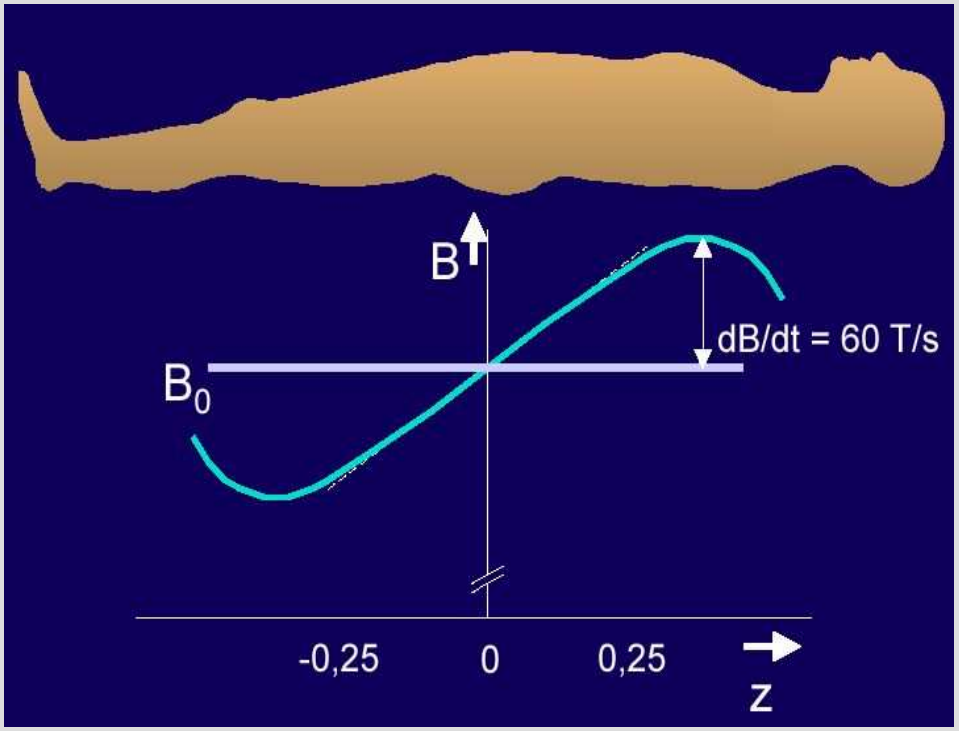


- Funktion: Ortsabhängige Modifizierung des B_0-Feldes zur Ortskodierung des Resonanzsignals
- Wirkungsort: im Magnettunnel (Position der Gradientenspulen), maximaler Gradientenhub am Tunneleingang, Streufeld vor dem Tunnel nicht erheblich
- Wirkungszeit: während der Messung
- typische Werte: Feldhub ortsabhängig, max. 30 mT; Feldänderung ortsabhängig, max. 90 T/s; Schaltfrequenz bis ca. 600 kHz



Gradientenfeld





Stärke:
1985: 3 mT/m
2010: 80 mT/m

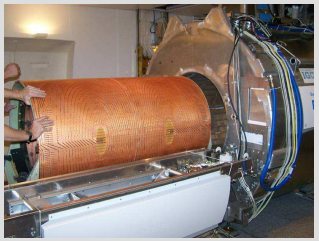
Schaltdauer:
1985: 2,0 ms
2010: 0,2 ms

max. Feldänderung:[1)]
1985: 0,4 T/s
2010: 60 T/s

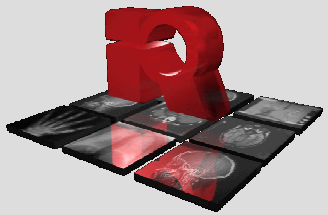
[1)]ca. 30 cm vom Isozentrum

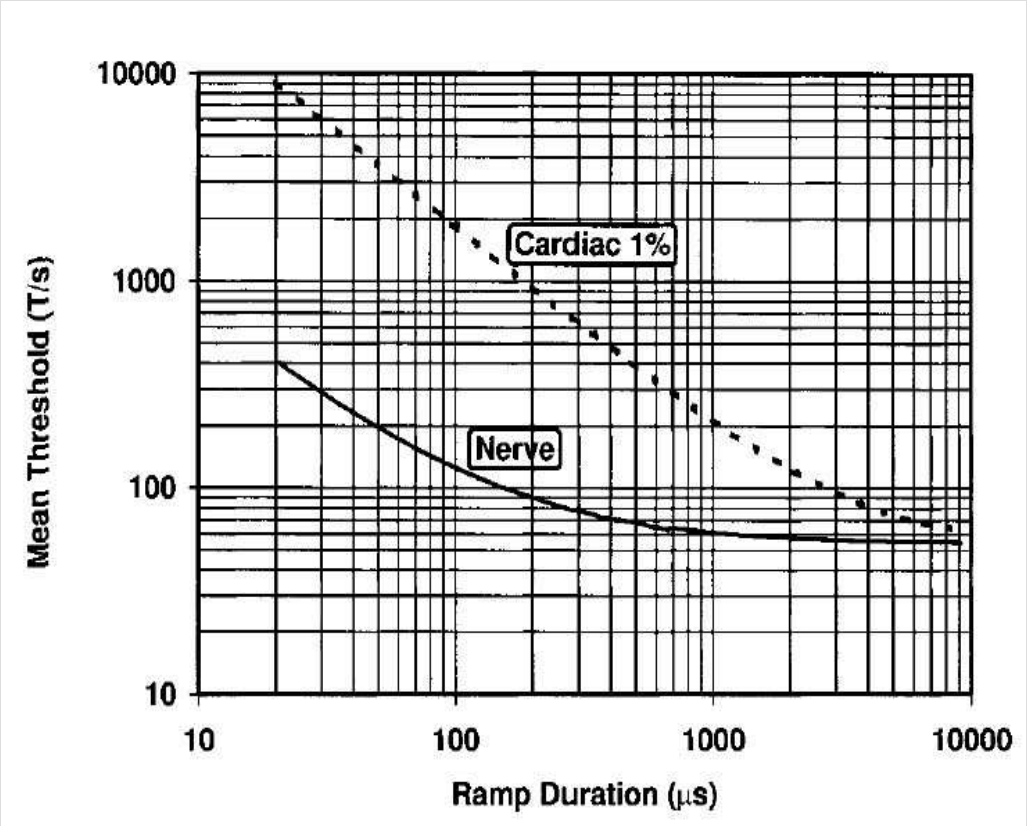
3 Richtungen x, y, z: Schicht-, Frequenz-, Phasenkodierung

Effekt: mögliche Nervenstimulation, Lärm (während der Messung)



Gradientenfeld





exponentielles Modell: mittlere PNS-Schwelle, sensitive Herzstimulations-Schwelle (= 1/2 mittlere Schwelle)

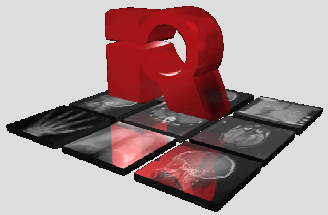
nach Reilly JP, Med Biol Eng Comput 1989;27:101
(die Modelle beruhen auf diversen Annahmen! Eigentlich ist das el. Feld E (in V/m) wichtig, man kann für typische Spulen und Patienten korrelierende dB/dt abschätzen)

Schaefer DJ, JMRI 200; 12:20

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{Schwellwert} = 54(T/s)\left(1+\frac{132\mu s}{d}\right)$$

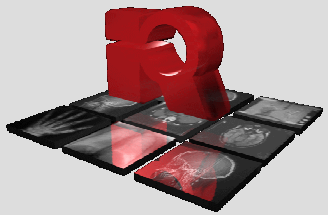
experimenteller Wert für PNS-Schwelle, hyperbolisches Modell
Havel W, IEEE Trans Magn 1997;33:4269

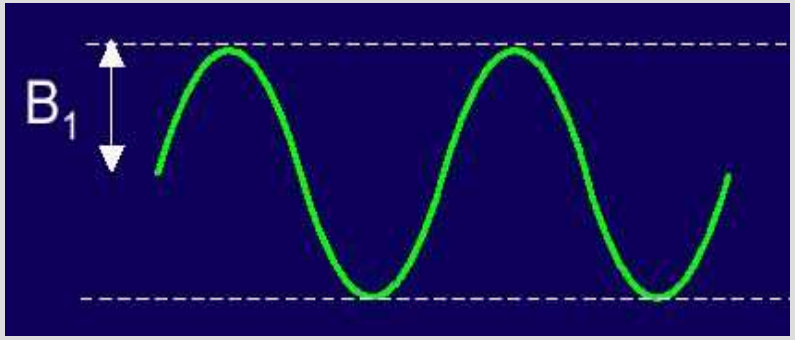
Hochfrequenzfeld



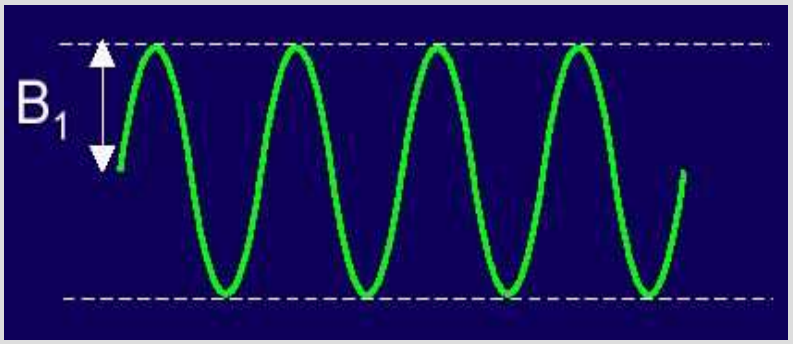
- Funktion: Spinanregung; Erzeugung der Spinresonanzsignale und von Spin-Echo-Pulsen
- Wirkungsort: im Magnettunnel (Position der HF-Sendespulen) Streufeld außerhalb der Sendespule mit geringer Leistung
- Wirkungszeit: während der Pulsanregung
- typische Werte: max. 30 µT (magnetischer Anteil), Pulsleistung ca. 20 kW
- physikalische Wirkungen: Strom- und Spannungsinduktion in leitenden Stoffen (durch zeitliche Änderung des Magnetfeldes)

Hochfrequenzfeld



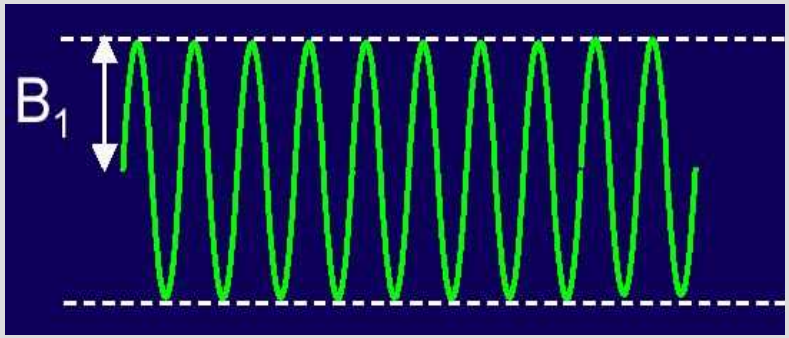


1,5 T - 63,8 MHz



3,0 T - 127,6 MHz

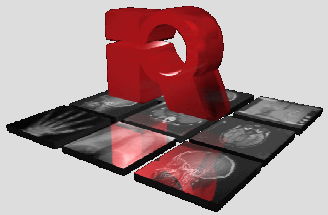
dB/dt	→	2 mal größer
Frequenz	→	2 mal größer
SAR/Erwärmung	→	4 mal größer



7,0 T - 297,7 MHz

dB/dt	→	4,7 mal größer
Frequenz	→	4,7 mal größer
SAR/Erwärmung	→	22 mal größer

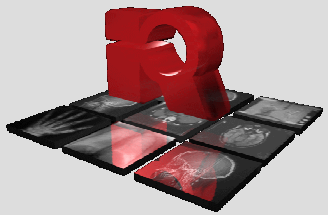
Hochfrequenzfeld

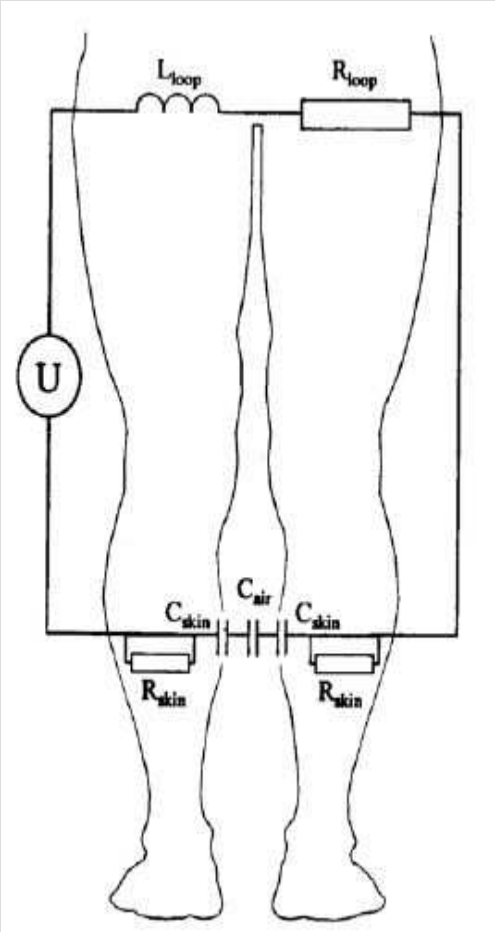


Wirkung auf biologisches Gewebe:

- Magnetfeldänderung pro Zeit höher/schneller als bei Gradientenfeldern: mehr Leistungsübertragung
- Frequenz zu hoch für Stimulation: nur Wärmeerzeugung
- Begrenzung der Erwärmung durch Beschränkung der SAR (Spezifische Absorptionsrate, auf Körper übertragene Energie)
- Gefahren: Störung der Thermoregulation beim Patienten; Lokal verstärkte HF-Einstrahlung („Hot spots“) bei inhomogenen Sendespulen (kleine Spulen, Oberflächenspule) oder stehenden Wellen (bei höheren Feldstärken)

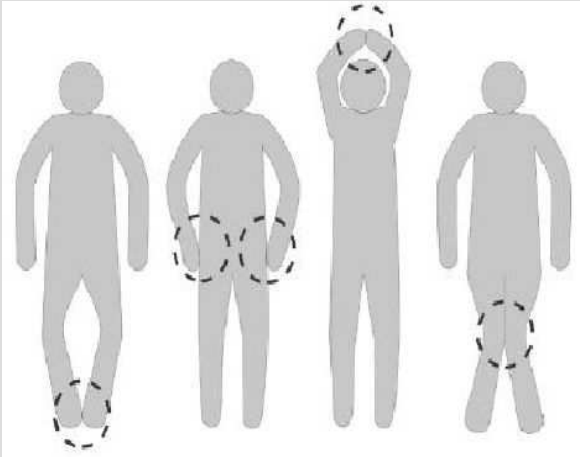
Hochfrequenzfeld



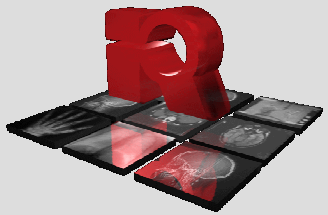


Verbrennung am Haut-Haut-Kontakt

Knopp MV,
Radiologe 1998;39:759



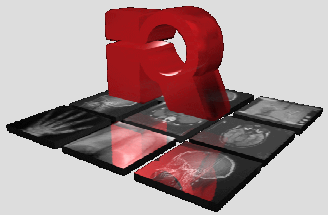
Hochfrequenzfeld

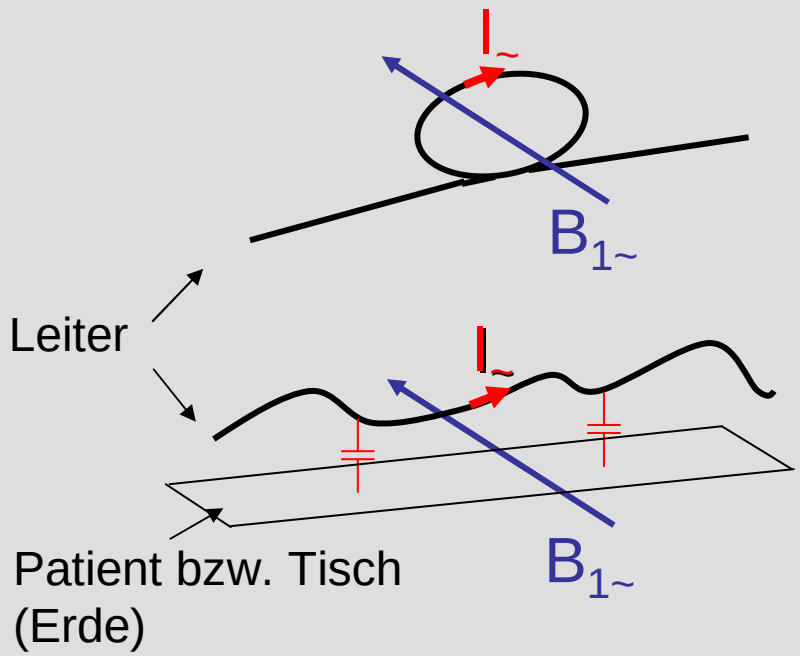


Wirkung auf sonstige Objekte:

- Objekte mit hoher elektrischer Leitfähigkeit (alle Metalle, auch nichtmagnetische, Karbonfasern und -stäbe): induzierte Ströme werden in elektrischen Leitern konzentriert; große Erwärmung vor allem an Grenzflächen zum Körpergewebe
- Induktion durch Änderung des magnetischen Anteils dB/dt des HF-Feldes: in Ringstrukturen und Leiterschleifen (geschlossen auch durch kapazitive Kopplung)
- Induktion durch elektrischen Anteil E des HF-Feldes: in langgestreckten Leitern (Hertz‘sche Dipole: Antennen, Drähte)

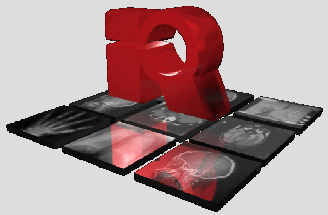
Hochfrequenzfeld

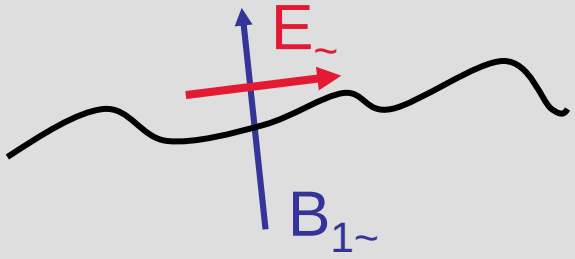




Induktion durch $B_1^{\bullet}$ in Leiterschleifen

Hochfrequenzfeld





Induktion durch E in langen Leitern (Hertz'scher Dipol)

Stehende Welle (hohe Erwärmung an Leiterenden) bei $L_{Leiter} \approx c_{vak} / (2 f \sqrt{\varepsilon_{Gewebe}}) = \lambda_{Gewebe} / 2$ mit $\varepsilon_{Gewebe} \approx 81$ gilt für die unteren Grenzlängen, wenn beide Leiterenden im selben Medium (Körpergewebe) sind:

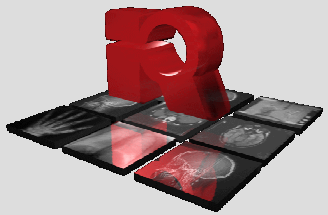
B_0	1 T	1,5 T	3 T	7 T
$\lambda_{1/2}$	40 cm	26 cm	13 cm	5 cm

Erwärmung ist auch schon möglich, wenn $L_{Leiter} < (\lambda_{Gewebe} / 2)$!

Induktion: Spannungsbauch am Leiterende

Während des Scans:
Funkenüberschlag am Leiterende: Fixateur externe, Carbon (!)-Stab

Hochfrequenzfeld



Feuer im Scanner:

- Überwachungspflichtiger Patient, externes EKG, langes Kabel
- sagittale T2w TSE, 3500/120/90°
  SAR 3 W/kg KG, in neuer Position
- 3 cm hohe Flamme über dem rechten Thorax, nahe EKG-Elektroden

Interpretation:

- im Kabel vermutlich Resonanzbedingung erfüllt
- Funken zwischen Clips und Elektroden bei Wackelkontakt

Teilweise geschmolzene Plastik-Clips

Elektroden mit Spuren des geschmolzenen Plastiks der Clips

Brandspuren am Hemd des Patienten

Hochfrequenzfeld

Blutung infolge Erhitzung an der Elektrodenspitze eines Neurostimulators

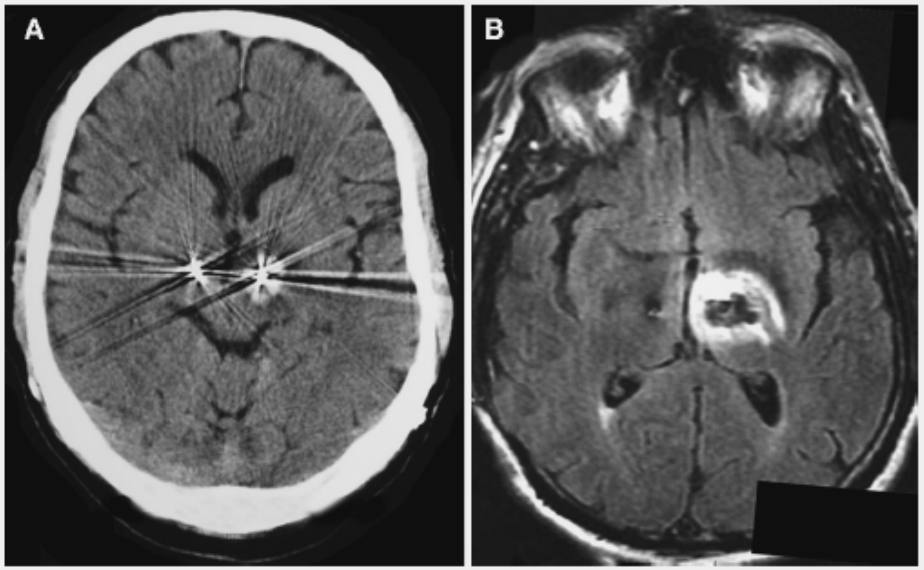
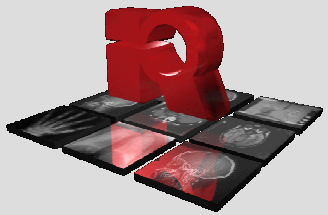


FIGURE 1. A, *computed tomographic scan performed immediately after the lumbar spine MRI scan revealed evidence of a hemorrhage surrounding the left DBS electrode.* B, *T2-weighted MRI scan of the brain showing edema around the left DBS electrode.*

Henderson JM et al., Neurosurgery 2005; 57:E1063

Hochfrequenzfeld



Gefahrenvermeidung:

- maximale SAR von 4 W/kg Körpergewicht begrenzt Erwärmung auf ca. 1 Grad (Angabe am Gerät beachten)
- Patienten mit gestörter Thermoregulation überwachen, Sequenz mit niedrigerer Leistung wählen
- keine wärmeisolierende Kleidung, keine feuchte Kleidung
- keine elektrischen Leiter, d.h. keine Metalle (auch nichtmagnetische) im MR-Tunnel

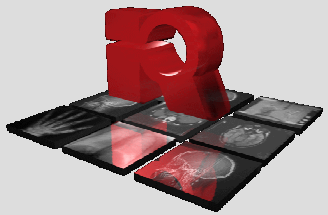
Hochfrequenzfeld

Gefahrenvermeidung:

wenn Leiter unvermeidbar:

- *Resonanzbedingungen vermeiden (Länge < 1/2 Wellenlänge), maximaler Abstand von Spulendrähten und Kapazitäten*
- *Energieeinstrahlung vermindern (niedrige SAR als Indikator): Gradientenechos statt 180°-Pulse, niedriges B_1, kleine Sendespule*
- keine brennbare Kleidung !

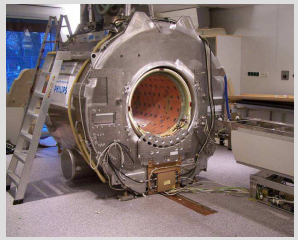
Hochfrequenzfeld



- Thermische Verletzungen werden unterschätzt:
  z.B. 81 Schrittmacher-Patienten ohne Zwischenfall gemessen, aber Erhöhung der Stimulationsschwelle bei 3 % der Kabel
  [Sommer, Circulation 2006]

- Unfallberichte der FDA: am häufigsten Verbrennungen (incl. Amputation eines Unterarmes nach Übersehen eines Pulsoxykabels)
  [FDA /MAUDE Adverse Event Report 01/19/07]

- *Berichte über erfolgreiche Untersuchungen mit Implantaten sind keine Garantie für die Gefahrlosigkeit !*



Kühlmittel LHe

Gefahren bei einem Quench:

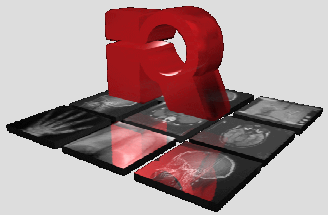
- LHe: Füllung bis ca. 1600 l,
  770-fache Ausdehnung beim Verdampfen -> 1232 m^3

  Raumgröße minimal ca. 3,5 m x 6 m x 2,35 m = 47 m^3,
  bei Quench in den Raum: 26,2 atü !

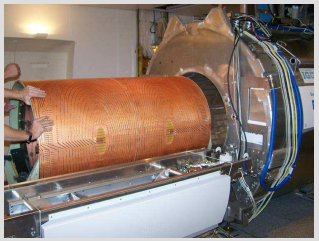
- Gefahrenabwehr: Quenchleitungen kontrollieren;
  bei Quenchgefahr (z.B. Arbeiten an den He-Armaturen)
  Fluchtweg freihalten, Türen offen halten

- an Rohrleitungen kondensiert Luft –
  Verbrennungsgefahr beim Kontakt mit den Tropfen
  flüssiger Sauerstoff -> Feuergefahr !

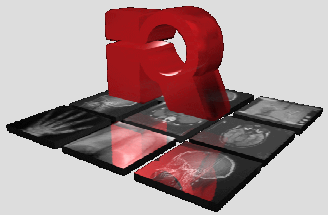
Gefahrenpotential



Feld:	**Statisches Feld B_0**	
wirkt auf:	ferromagnetische Metalle	elektronische Hilfsmittel (Herzschrittmacher etc.)
wirkt wie:	Anziehungskraft, Drehmoment	Funktionsstörung
Gefahr:	hoch	mittel
Schutz:	Überwachung durch Personal	Zugangskontrolle und Warnhinweis

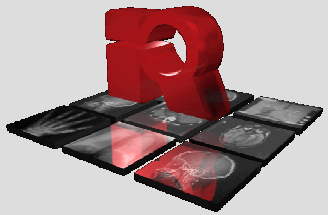


Gefahrenpotential



Feld:	**Gradientenfeld G**	
wirkt auf:	(lange) Nervenbahnen	Gehör
wirkt wie:	Nervenstimulation	Lärmbelastung
Gefahr:	gering	mittel
Schutz:	Begrenzung durch MR-Gerät	Überwachung durch Personal

Gefahrenpotential



Feld:	**Hochfrequenzfeld B_1**	
wirkt auf:	leitendes Material: alle Metalle	Körpergewebe (Patient)
wirkt wie:	Induktion, Erhitzung von Metall	Erwärmung des Körpers
Gefahr:	hoch	gering
Schutz:	Überwachung durch Personal	Begrenzung durch MR-Gerät

Danke für Ihre Aufmerksamkeit !