

Sikkerhed af magnetisk resonans-skanning hos patienter med pacemaker og implanterbar defibrillator

1. reservelæge Kifah Hekmat Al-Sabagh, bioanalytiker Britta Ege Christensen, overlæge Anna Margrethe Thøgersen, overlæge Helen Høgh Petersen, overlæge Regitze Videbæk, overlæge Steen Pehrson, overlæge Xu Chen, professor Carsten Thomsen & professor Jesper Hastrup Svendsen

ORIGINALARTIKEL

Rigshospitalet, Hjertecentret, Kardiologisk Klinik B, Aalborg Sygehus Syd, Kardiologisk Afdeling, Rigshospitalet, Radiologisk Klinik X, København Universitet, Det Sundhedsvidenskabelige Fakultet, Institut for Medicin og Kirurgi, og The Danish National Research Foundation Centre for Cardiac Arrhythmia (DARC)

RESUME

INTRODUKTION: Tilstedeværelse af pacemakere (PM) og implanterbare kardioverterdefibrillatorer (ICD) anses som en kontraindikation for magnetisk resonans-skanning (MR-skanning). Nylige studier tyder på, at MR-skanning er en relativ sikker undersøgelse hos patienter, som har fået implanteret de nye generationer af PM. Formålet med denne opgørelse er at undersøge sikkerheden af MR-skanning samt skanningens effekt på *sense*-værdier, stimulationstærskel og elektrodeimpedans hos patienter med PM og ICD, der har fået udført en velindiceret MR-skanning.

MATERIALE OG METODER: I løbet af en niårsperiode blev i alt 65 patienter (60 med PM og fem med ICD) inkluderet i undersøgelsen. De eventuelle kliniske hændelser blev registreret. *Sense*-værdier, stimulationstærskel og elektrodeimpedans blev målt og registreret før og umiddelbart efter gennemført MR-skanning.

RESULTATER: Hos en PM-afhængig patient registreredes et signifikant fald i batterikapacitet og hos en patient med ICD opstod der ventrikelflimmer (VF). Tærskelstigning på 1,0 V påvist hos 1% af alle elektroder. Der var ingen signifikant effekt på PM's og ICD's programmerede indstillinger, gemte data eller interrogationsevner, men en ICD konverterede til »reset mode«, blev påvirket af MR-feltet og inducerede VF via hurtig takypacing.

KONKLUSION: MR-skanning er en mulig diagnostisk undersøgelse hos patienter med implanterbare enheder.

Permanente implanterbare enheder i form af pacemakere (PM) og implanterbare kardioverterdefibrillatorer (ICD) anvendes til behandling af patienter med henholdsvis bradykardi og/eller takyarytmi [1]. I slutningen af 2007 levede henholdsvis 19.099 danske patienter med en PM og 3.402 med ICD [2], og der forventes en yderligere stigning i fremtiden.

MR-skanning er en vigtig billeddiagnostisk undersøgelse, som kan anvendes til udredning af både kardielle og ekstrakardielle lidelser. Denne kombination af en stigende MR-skanning anvendelse og stigning i antallet af kardielle implanterbare enheder resulterer i en estimeret 50-75% mulighed for, at en patient med implanteret enhed bliver udsat for en MR-undersøgelse over de leveår, de har deres enheder [3]. Disse patienter bliver normalt ekskluderet fra MR-skanning, idet tilstedeværelsen af PM og ICD ofte

anses for at være en absolut kontraindikation for MR-skanning [4-6].

De potentielle effekter af MR-skanning på PM og ICD inkluderer PM-displacering [7], myokardieskade som følge af opvarmning af PM-elektroder [8, 9], induktion af livstruende arytmier [10], midlertidige eller persisterende ændringer i *device*-programmering og beskadigelse af elektroder og elektromekaniske komponenter [11]. For ICD-elektroder er der særlig stor risiko for opvarmning af myokardievæv, der har kontakt med elektrodecoil pga. elektrodens opbygning uden isolationslag ved elektrodespidsen til forskel fra PM-elektroder, der har et isolationslag og dermed mindre risiko for opvarmning i MR-feltet.

MATERIALE OG METODER

Denne prospektive opgørelse blev foretaget på Hjertemedicinsk Afdeling B og Kardiologisk Laboratorium, Rigshospitalet. Patienter, som havde en implanteret PM eller ICD og fik udført en klinisk indiceret MR-skanning i perioden fra september 1998 til juni 2007, indgik i undersøgelsen.

Informeret samtykke blev indhentet fra alle patienter, som informeredes om MR-risici. *Sense*-værdier, stimulationstærskel og elektrodeimpedans blev registreret før og efter gennemført MR-skanning.

Alle MR skanninger blev udført på Magnetom Vision, Siemens Medical System, Erlangen. Feltstyrken var 1,5 Tesla (T). Maksimum gradientstyrke var 25 milliTesla/meter (mT/m). *Specific energy absorption rate* (SAR) for hele kroppen var begrænset til 1,5 Watt/kg hos alle MR-skanninger af columna, og ved anvendelse af hovedspolen var den lokale SAR-grænse for hovedet 5 Watt/kg. Den totale skanningstid var begrænset til 30 minutter.

PACEMAKER/IMPLANTERBAR KARDIOVERTERDEFIBRILLATOR-PROGRAMMERING FØR MAGNETISK RESONANS-SKANNING

Alle MR-skanninger blev planlagt i samarbejde mellem den pacemakeransvarlige læger og røntgenafdelingen. Alle data vedrørende PM-systemet dvs. *sense*-værdier, tærskel- og elektrodeimpedans for atrium- og ventrikel-elektrode blev registreret. Hos 59 ud af 65

patienter var PM i forbindelse med MR-skanning indstillet til AOO, VOO eller DOO med en hjertefrekvens 80-110 slag pr. minut, og PM-frekvens blev sat 20 slag pr. min. over den aktuelle hjerte/pacefrekvens, uanset om de var PM-afhængige eller ej for at forhindre MR-induceret PM-inhibition. I mange tilfælde har man valgt at øge PM-output for en sikkerheds skyld for at undgå risiko for exitblok ved eventuel elektrodebeskadigelse/displacering. Hos en enkelt patient med VVI-PM indstilledes PM til OVO, da patienten ikke kunne tolerere høj pacefrekvens, idet dette udløste angina pectoris, og patienten var ikke PM-afhængig.

Andre PM-funktioner som *rate response*-funktion og *mode switch*-funktion blev inaktiveret før MR-skanning.

Hos fire ud af fem patienter indstilledes ICD-enheder til *sensing-only mode* (OVO eller ODO), og takykarditerapi blev inaktiveret før MR-skanning pga. risiko for at afgive utilsigtet terapi fra enheden. Hos en patient med en VVI-ICD, som ikke havde programmeringsvariablen OVO, kunne denne omprogrammering ikke foretages, hvorfor den forblev i VVI-mode, mens terapierne blev programmeret *off*.

MONITORERING UNDER MAGNETISK RESONANS-SKANNING

Blodtryk, elektrokardiogram og ilt saturation blev monitoreret kontinuerligt under MR-skanning ved pulsoximetri under anvendelse af MR-kompatibelt monitoreringsudstyr fra Invivo Research Inc. Model 3150 og Millennia Patient Monitor fra Invivo Research Inc. USA, Model 3155.

En læge, en bioanalytiker og genoplivningsudstyr var til stede ved alle MR-undersøgelser. Patienterne blev opfordret til at informere om eventuelle palpitationer, opvarmningsfornemmelse, nærsynkope, brystsmerte eller andre symptomer under MR-skanning.

PACEMAKER/IMPLANTERBAR KARDIOVERTERDEFIBRILLATOR-PROGRAMMERING EFTER MAGNETISK RESONANS-SKANNING

Efter MR-skanning blev PM/ICD kontrolleret med måling af senseværdier, tærskel og elektrodeimpedans for atrium og ventrikel elektrode. En klinisk signifikant ændring af pacetærskel defineredes som tærskelstigning på $\geq 1,0$ volt (V).

Røntgen af thorax udførtes i tilfælde af signifikant ændring i pacetærskel for at udelukke elektrode-displacering eller elektrodefrakturer.

PM programmeredes efter MR-skanning tilbage til de oprindelige parametre.

STATISTIK OG ANALYSE

Kvantitative data om *sensing*, stimulationstærskel og

elektrodeimpedans blev registreret før og straks efter MR-skanning og sammenligning af data blev foretaget ved anvendelse af parret Student t-test. En p-værdi på $\leq 0,05$ blev anset for at være statistisk signifikant.

RESULTATER

I alt blev 60 patienter med PM (33 med DDD, 19 med VVI og otte med AAI) og fem med ICD enhed (tre med DDD og to med VVI) inkluderet i undersøgelsen. I alt var 46 patienter (71%) mænd, og 19 (29%) var kvinder. Kun otte patienter med PM var paceafhængige.

Enhederne var af følgende fabrikat: PM: 35 Medtronic. Inc. og 25 St. Jude Medical; ICD: fire Medtronic. Inc. og en St. Jude Medical.

Det samlede antal elektroder i patientgruppen var 101 (93 PM og otte ICD) elektroder, heraf var 44 atrieelektroder og 57 ventrikel elektroder.

MAGNETISK RESONANS-UNDERSØGELSER

Der blev udført i alt 73 MR-undersøgelser, idet otte patienter fik udført flere end en MR-skanning. MR af cerebrum efterfulgt af MR-skanning af columna var blandt de hyppigste MR-undersøgelser. Indikationen for MR-skanning var mistanke om hjernetumor, cerebral metastase eller tværsnitsyndrom, som var årsagen til to tredjedele af alle MR-undersøgelser (Tabel 1).

To MR-undersøgelser blev afbrudt pga. alvorlige kliniske hændelser. De diagnostiske spørgsmål, der foranledigede MR-skanning, kunne besvares hos 70/73 (96%) af de undersøgte patienter. Kvaliteten af MR-skanningerne blev bedømt som tilfredsstillende (Figur 1) bortset fra en enkelt insufficient MR-skanning af columna hos en patient med DDDR-PM, hvor det ikke var muligt at supplere med yderligere sekvenser af den lumbosakrale overgang pga. betyde-

TABEL 1

Tabellen viser, hvilke organer eller regioner der er udført magnetisk resonans (MR)-skanning på. Der blev udført i alt 73 magnetisk resonans-undersøgelser på i alt 65 patienter.

MR-skanning-type	Antal undersøgelser
Cerebrum	26
Columna	23
Hals	6
Underekstremitet	6
Abdomen	2
Thorax	1
Bækken	1
Cor	1
Andre	7
Total	73



FORKORTELSER

AAI = enkeltkammerpacemaker (kun atrieelektrode)
 AOO = asynkron eller fikseret frekvens, atriepacing
 DDD = dobbeltkammerpacemaker (atriet og ventrikelektroder)
 DDDR = dobbeltkammerpacemaker (atriet og ventrikelektroder), som både pacer og *senser* atriet og ventriklen, og som er *rate responsive*
 DOO = asynkron eller fikseret frekvens, atrioventrikulær sekvenspacing
 ODO = atrioventrikulær *sensing only mode*
 OVO = ventrikulær *sensing only mode*
 SAR = *specific absorption rate*
 VOO = asynkron eller fikseret frekvens, ventrikelpacing
 VVI = enkeltkammerpacemaker (kun ventrikelektrode), som kun pacer og *senser* ventriklen

lig forringelse af signalet. Patienten måtte betragtes som værende uegnet til fremtidig MR-skanning pga. pacemaker.

KLINISKE HÆNDELSER UNDER MAGNETISK REZONANS-SKANNING

Alle MR-undersøgelser blev gennemført uden problemer bortset fra to tilfælde (3%):

1. I et tilfælde skiftede pacemakeren fra DOO til *safety pacing mode* (VVI) pga. et pludseligt fald i batterikapacitet. Før MR-skanning blev patientens PM omprogrammeret til at pace med en frekvens, der var 20 bpm. over grundfrekvensen, og dette har muligvis bidraget til accelereret tab af batterikapacitet, således at pacemakeren under MR-skanning gik fra DOO til *safety pacing mode* (VVI). Patienten blev klinisk dårlig med nærsynkope pga. svær bradykardi grundet PM-inhibition, hvorfor MR undersøgelsen blev afbrudt, og patienten blev taget ud af MR-skanneren, hvorefter VVI-mode vendte tilbage, og patienten fik det bedre. Patienten havde 11 år tidligere fået implanteret en DDDR-pacemaker (Medtronic 7950) pga. syg sinusknude. Patienten havde været indkaldt til elektivt batteriskift, men øn-

skede selv at få indgrebet udsat. Patienten var PM-afhængig, hvorfor der blev udført subakut batteriskift. Begge pancelektroder var velfungerende.

2. I det tilfælde, hvor ICD ikke kunne omprogrammeres til OVO før MR-skanning, fik patienten hjertestop med dokumenteret ventrikelflimmer (VF) i forbindelse med undersøgelsen. Patienten havde fået implanteret ICD-enhed to år tidligere pga. iskæmisk kardiomyopati, svært nedsat venstre ventrikels uddrivningsfraktion (LVEF 25%) og recidiverende ventrikulær takykardi. Under MR-skanning gik ICD i *reset mode* og inducerede VF på patienten, hvorefter undersøgelsen blev afbrudt. Umiddelbart efter detekterede ICD-enheden VF og afgav succesfuld stødterapi. Patienten fik ingen men. ICD-enheden blev gennemmålt og kunne omprogrammeres til den initiale indstilling.

Ingen af de øvrige patienter rapporterede abnorme eller ubehagelige symptomer i forbindelse med MR-skanning.

PACEMAKERPARAMETRE

Der blev registreret en beskeden (< 1,0 V) tærskelstigning hos fem af 44 (11%) atrieelektroder og fire af 57 (7%) ventrikelektroder og kun en klinisk betydende tærskelstigning af en atrieelektrode på 1,0 V fra 0,25 V til 1,25 V (svarende til 1% af alle elektroder) hos en patient med DDD-PM. Røntgen af thorax afkræftede pancelektrodedisplacering. Patientens PM blev efterfølgende kontrolleret, og der var vedvarende tærskel for atrieelektrode på 1 V i gennemsnit.

Der var signifikant fald i atrieelektrodeimpedans efter MR-skanning ($p = 0,03$) og ikke signifikant fald i ventrikelektrodeimpedansmiddelverdi ($p = 0,17$). Der var ingen signifikante ændringer i de øvrige pacemakervariable (Tabel 2).

DISKUSSION

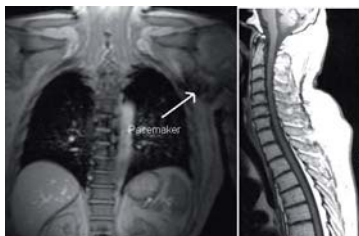
Trods at der er sket en massiv udvikling i PM-konstruktion, hvor der er brugt PM'er, som er mindre i størrelsen med mindre ferromagnetisk indhold end før ved at udskifte jern med titanium i så mange dele af PM som muligt og deraf følgende reduktion af elektromagnetisk interferens [12], er der generel enighed om, at MR-skanning af patienter med PM/ICD ikke bør gennemføres rutinemæssigt.

Food and Drug Administration, USA, mener fortsat, at en mere grundig evaluering af problemer relateret til opvarmning, arytmier, korrekt PM/ICD-funktion under og efter MR samt validerede MR-pro-



FIGUR 1

Magnetisk rezonans-skanning af columna viser et beskedent artefakt fra pacemakeren (pil), som ikke er til stede på det sagittale T1-vægtede billede.





TABEL 2

Pacemakerinterrogationsparametre før og efter magnetisk resonans (MR)-skanning. Resultater opgives som middelværdi \pm standardafvigelse.

	Atrieelektroder (n = 44)			Ventrikelektroder (n = 56)		
	senseværdi	pacetærskel	impedans	senseværdi	pacetærskel	impedans
Før MR-skanning	2,70 \pm 1,8 mV	0,74 \pm 0,67 V	556 \pm 220 Ω	12,83 \pm 5,68 mV	0,75 \pm 0,40 V	570 \pm 147 Ω
Efter MR-skanning	2,70 \pm 1,8 mV	0,78 \pm 0,65 V	542 \pm 223 Ω	12,20 \pm 5,88 mV	0,76 \pm 0,39 V	560 \pm 147 Ω
p-værdi	0,65	0,50	0,03*	0,07	0,57	0,17

*) Statistisk signifikans-niveau.

tokoller bør foreligge, før godkendelsen af brug af MR-skanning for PM/ICD-patienter kan opnåes [13].

I vores undersøgelse blev der observeret et enkelt tilfælde med signifikant pacetærskelstigning på 1,0 V, hvilket svarer til 1% af alle elektroder. Fænomenet kan forklares ved radiofrekvens (RF)-induceret opvarmning af myokardiet omkring elektrodespidsen.

Sommer *et al* [14] har observeret signifikant tærskelstigning \geq 1,0 V ($p = 0,017$) fra præ- til postekstratorakal MR-skanning, magnetfeltstyrke 1,5 T hos seks af 195 pacemakerelektroder (3,1%), fire heraf blev observeret straks efter MR-skanning, og to blev observeret efter tre måneders opfølgning. PM var programmeret før MR-skanning til asynkron *mode*, og der påvistes ingen påvirkning af PM-output eller fremkomst af arytmie. Den sene tærskelstigning er formentlig forårsaget af udvikling af arvæv i området omkring pancelektrodespidsen efter RF-relateret opvarmningsskade [15]. Graden af opvarmning er bl.a. afhængig af SAR af den anvendte sekvens, den tredimensionale orientering af PM-elektrodeslyngen i RF-feltet, specifik elektrodemodel og den totale aktive skanningseksponeeringstid [14].

Displacering af PM-elektroder som forklaring på pacetærskelstigning anses ikke for sandsynligt, idet magnetfelt styrke på 1,5 T ikke har betydende *force* og *torque*-effekt [16].

Vores resultater viser et signifikant fald i atrieelektrodeimpedans efter MR-skanning, hvilket også er beskrevet af Sommer *et al* [14], som derudover har registreret et signifikant fald i ventrikelektrodeimpedans i modsætning til vores resultater.

Nazarian *et al* [17] har udført 68 kardiaale og nonkardiaale MR-skanninger med en magnetfeltstyrke på 1,5 T hos 31 PM- og 24 ICD-patienter. *Pacing mode* var programmeret til asynkron *pacing*. Raterespons, ventrikulær *sense*-respons, *mode switch*-funktion, antitakykardi-*pacing* og defibrillering var sat ude af funktion på alle enheder. I modsætning til vores undersøgelse registreredes ingen signifikante ændringer i pacetærskel og elektrodeimpedans efter MR-skanning.

Vi har registreret et enkelt tilfælde af signifikant fald i batterivoltage hos en pacemakerafhængig pa-

tient. Sommer *et al* [14] har observeret midlertidig og beskeden, men signifikant reduktion af batterivoltage straks efter MR-skanning. Dette ansås ikke for at have nogen klinisk betydning, idet et fald i batterivoltage på 0,05 V estimeres til at reducere PM-batteri levetiden med ca. to måneder [18].

Derfor tilrådes, at man sikrer, at der er acceptable PM-parametre (batterivoltage $>$ 2,7 V, batteriimpedans $<$ 2.000 Ω , en estimeret batterilevetiden $>$ 6 måneder, elektrodeimpedans mellem 200-2.000 Ω , *pacing capture*-tærskel $<$ 2,5 V på pulsvarighed af 0,4



TABEL 3

Anbefalinger for varetagelsen af magnetisk resonans-undersøgelser hos patienter med pacemaker/implanterbar kardioverterdefibrillator.

MR-undersøgelse bør kun overvejes i tilfælde, hvor der er stærk klinisk indikation, og hvor fordelene klart opvejer risiciene
MR-skanning bør kun udføres af erfarne centre med ekspertise i MR-billeddannelse og elektrofysiologi
Skriftligt informeret samtykke indhentes, og patienterne bør informeres om risiciene, herunder PM/ICD-dysfunktion og/eller skader og arytmie
Det skal sikres, at der er acceptable PM-parametre (batterivoltage $>$ 2,7 V, batteriimpedans $<$ 2.000 Ω , en estimeret batterilevetid på $>$ 6 mdr., elektrodeimpedans på 200-2.000 Ω , <i>pacing capture</i> -tærskel $<$ 2,5 V på pulsvarighed af 0,4 msek., sensitivitet $>$ 5 mV og \geq 3 mdr. siden PM-implantation) før MR-skanning
PM omprogrammeres til asynkron <i>mode</i> hos alle PM-patienter, og ICD omprogrammeres til OVO/ODO og terapi <i>off</i> . Alle enheder gennemtestes før MR-skanning
Tilstedeværelse af genoplivningsfaciliteter samt kontinuerlig monitorering af elektrokardiogram og pulsoximetri er påkrævede under MR-skanning
Tilstedeværelse af en kardiolog ved MR-skanning af PM-afhængige og ICD-patienter anbefales
Fasthold visuel kontakt og stemmekontakt med patienten gennem proceduren
Instruer patienten om at advare MR-operatør om usædvanlige fornemmelser eller problemer
Personale bør trænes i at håndtere hjerte-lunge-redning i magnetfelt, herunder forflytning af patienten ud af skannerrummet for at undgå fare for personale og patienten. En defibrillator må ikke bringes i umiddelbart nærhed af MR-skanneren (risiko for at ekstern defibrillator pga. magnetpåvirkning med stor kraft trækkes ind i skanneren)
Begrænsning af SAR og aktiv skanningstid er vigtige for at minimere risiko for radiofrekvensrelateret opvarmningsskade
Efter MR-skanning gennemtestes alle enheder igen og omprogrammeres til de oprindelige indstillinger. Der anbefales PM/ICD-kontrol 3 mdr. efter MR-skanning

ICD = implanterbar kardioverterdefibrillator; MR = magnetisk resonans; ODO = atrioventrikulær *sensing only mode*; OVO = ventrikulær *sensing only mode*; PM = pacemaker; SAR = *specific energy absorption rate*.

msek., *sensing* > 5 mV og ≥ 3 måneder siden PM-implantation) før MR-skanning [14].

Vi observerede en episode med ventrikelflimmer i forbindelse med MR-skanning. Patientens ICD var pga. MR-skanning omprogrammeret med inaktivering af terapi mod ventrikulær takyarytmi. Man kan forestille sig, at episoden af VF skyldtes MR-induceret strøm (elektrisk proarytmi). Da ICD-enheden gik i *reset mode*, er det mest sandsynligt, at MR-feltet igangsatte ICD-enheden og inducerede VF via hurtigt takypacing.

Device-firmaerne (producenter af PM og ICD) har i flere år prioriteret at få udviklet systemer, der er sikre i forbindelse med MR-skanning. I et igangværende internationalt klinisk studie undersøges sikkerheden af MR-kompatible PM, og 350 patienter, som har klinisk indikation for PM-implantation vil blive rekrutteret i studiet og gennemgå elektiv MR-skanning. Den første MR-kompatible PM har allerede gennemgået en succesfuld MR-skanning [19], og disse særlige pacemakere er netop godkendt af *European Union Marketing* [20].

BEGRÆNSNINGER

Kun enheder fra firmaerne Medtronic og St. Jude indgik i opgørelsen, hvorfor vi ikke kan udtale os om produkter fra andre firmaer.

Der blev ikke fortaget troponinmåling, som er markør for myokardieskade, der kunne stige ved opvarmningsskade.

Der blev ikke udført langtidsopfølgning efter gennemført MR-skanning, hvorfor vi ikke kan udtale os om sene effekter af MR-skanning.

Der tages forbehold for det beskedne antal ICD-patienter, og dermed kan sikkerheden ved MR-skanning af ICD-patienter ikke vurderes ud fra denne opgørelse.

KONKLUSION

Vores resultater viser, at MR-skanning er en mulig diagnostisk undersøgelse hos patienter med PM/ICD, men den indebærer en vis risiko for patienten. I hvert enkelt tilfælde bør undersøgelsens diagnostiske værdi, mulighed for alternative billeddiagnostiske metoder og forhold omkring patientens PM/ICD tages med i overvejelserne (Tabel 3).

KORRESPONDANCE: *Kifah Hekmat Al-Sabagh*, Kardiologisk Klinik B, Hjertecentret, Rigshospitalet, 2100 København Ø. E-mail: kifahalsabagh604@hotmail.com

ANTAGET: 7. oktober 2009

FØRST PÅ NETTET: 1. marts 2010

INTERESSEKONFLIKTER: Ingen

LITTERATUR

- Gregoratos G, Abrams J, Epstein AE et al. ACC/AHA/NASPE 2002 guideline update for implantation of cardiac pacemakers and antiarrhythmia devices: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task

- Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/NASPE Committee on Pacemaker Implantation). 2002. <http://www.acc.org/clinical/guidelines/pacemaker/pacemaker.pdf> (24. februar 2009).
- Danish pacemaker and ICD register 2007. Department of Cardiology, Odense University Hospital, Denmark.
- Kalin R, Stanton MS. Current clinical issues for MRI scanning of pacemaker and defibrillator patients. *PACE* 2005;28:326-8.
- Zimmermann BH, Faul DD. Artifacts and hazards in NMR imaging due to metal implants and cardiac pacemakers. *Diag Imaging Clin Med* 1984;53:53-6.
- Bhachu DS, Kanal E. Implantable pulse generators (pacemakers) and electrodes: Safety in the magnetic resonance imaging scanner environment. *J Magn Reson Imaging* 2000;12:201-4.
- Duru F, Luechinger R, Scheidegger MB et al. Pacing in magnetic resonance imaging environment: Clinical and technical considerations on compatibility. *Eur Heart J* 2001;22:113-24.
- Luechinger R, Duru F, Scheidegger MB et al. Force and torque effects of a 1.5 Tesla MRI scanner on cardiac pacemakers and ICDs. *Pacing Clin Electrophysiol* 2001;24:199-205.
- Luechinger R, Zejilemaker VA, Pedersen EM et al. In vivo heating of pacemaker leads during magnetic resonance imaging. *Eur Heart J* 2005;26:376-83.
- Sommer T, Valhaus C, Lauck G et al. MR imaging and cardiac pacemakers: In vitro evaluation and in vivo studies in 51 patients at 0.5 T. *Radiology* 2000;215:869-79.
- Fontaine JM, Mohamed FB, Gottlieb C et al. Rapid ventricular pacing in a pacemaker patient undergoing magnetic resonance imaging. *Pacing Clin Electrophysiol* 1998;21:1336-9.
- Fiek M, Remp T, Reithmann C et al. Complete loss of ICD programmability after magnetic resonance imaging. *Pace* 2004;27:1002-4.
- Loewy J, Loewy A, Kendall EJ. Reconsideration of pacemakers and MR imaging. *Radiographics* 2004;24:1257-68.
- Faris OP, Shein M. Food and Drug Administration perspective: magnetic resonance imaging of pacemaker and implantable cardioverter-defibrillator patients. *Circulation* 2006;114:1232-3.
- Sommer T, Naehle CP, Yang A et al. Strategy for safe performance of extrathoracic magnetic resonance imaging at 1.5 Tesla in the presence of cardiac pacemakers in non-pacemaker dependent patients: a prospective study with 115 examinations. *Circulation* 2006;114:1285-92.
- Sambelashvili AT, Nikolski VP, Efimov IR. Virtual electrode theory explains pacing threshold increase caused by cardiac tissue damage. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2004;286:H2183-H2194.
- Schmiedel A, Hackenbroch M, Yang A et al. Magnetic resonance imaging of the brain in patients with cardiac pacemakers: experimental and clinical investigations at 1.5 Tesla. *Rofo* 2005;177:731-44.
- Nazarian S, Rougin A, Zviman MM et al. Clinical utility and safety of a protocol for noncardiac and cardiac magnetic resonance imaging of patients with permanent pacemakers and implantable-cardioverter defibrillators at 1.5 tesla. *Circulation* 2006;114:1277-84.
- Valhaus C, Sommer T, Lewalter T et al. Interference with cardiac pacemakers by magnetic resonance imaging: Are there irreversible changes at 0.5 Tesla? *Pacing Clin Electrophysiol* 2001;24(4 pt 1):489-95.
- Roguin A, Schwitler J, Vahlhaus C et al. Magnetic resonance imaging in individuals with cardiovascular implantable electronic devices. *Europace* 2008;10:336-46.
- Roguin A. Magnetic resonance imaging in patients with implantable cardioverter-defibrillators and pacemakers. *J Am Coll Cardiol* 2009;54:556-7.