



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Low-field MRI gradient coils: design, optimisation and characterisation

Vos, B. de

Citation

Vos, B. de. (2024, November 19). *Low-field MRI gradient coils: design, optimisation and characterisation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4149869>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4149869>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

NEDERLANDSE SAMENVATTING

De afgelopen vijf jaar is een hernieuwde interesse ontstaan in laagveld MRI. Dit is voornamelijk te danken aan de ontwikkeling van draagbare en kosteneffectieve systemen, die ideaal zijn voor zorg op locatie (point-of-care (POC)). Het doel van dit doctoraalonderzoek was om gradiëntspoelen te ontwerpen voor een specifiek POC-systeem waarbij het hoofdmagneetveld gemaakt wordt met permanente magneten die zijn geplaatst in een Halbachoriëntatie. Bovendien wilden we ongewenste effecten als gevolg van deze gradiëntvelden karakteriseren en waar nodig minimaliseren. De gradiëntspoelen werden ontworpen voor een POC-systeem dat, in tegenstelling tot scanners voor het hele lichaam, is ontworpen voor specifieke toepassingen. Om deze reden werd een holistische ontwerpbenedering voorgesteld waarbij het ontwerp van magneetgradiënten en RF-spoelen voortvloeit uit de eisen voor beeldvorming. Dit leidde tot een geïntegreerd ontwerp kader dat kan worden gebruikt voor het ontwerpen van laagveld POC-systemen.

In hoofdstuk 2 wordt het ontwerp van gradiëntspoelen besproken waarbij het inverse-bronprobleem analytisch wordt opgelost om een gewenst veld te maken. De methode maakt gebruik van cilindrische symmetrie en ruimtelijke Fouriertransformaties om een enkele vergelijking per gradiëntspoel te verkrijgen. De standaard gewenstveldmethode, bedacht door R. Turner, werd aangepast voor cilindrische spoelen met een transversaal B_0 -veld, dat overeenkomt met het hoofdmagneetveld van een Halbachmagneet. Draadpatronen werden bepaald door evenwijdige lijnen van de streamfuncties te nemen. De draadpatronen werden vervolgens gesimuleerd met behulp van een commercieel simulatiepakket en we ontdekten dat het resulterende veld goed overeenkwam met het voorgeschreven doelveld. De spoelen werden gebouwd met behulp van ge-3D-printe houders en geëmailleerd koperdraad. Met behulp van een veldsonde en een meetrobot werd het veld van één van de gradiëntspoelen in kaart gebracht. Het resulterende veld vertoont een grote overeenkomst met het gesimuleerde veld. Deze spoelen maakten het mogelijk om de eerste 3D-beelden met het Halbachsysteem te maken.

In hoofdstuk 3 worden hardwareverbeteringen en systeemkarakterisering besproken. Een andere methode voor het ontwerpen van gradiëntspoelen wordt geïntroduceerd, waarbij een som van sinusvormige basisfuncties wordt gebruikt om de stroomdichtheid op een cilinder te beschrijven. Deze basisfuncties werden in de Biot-Savart vergelijking gesubstitueerd, wat resulteerde in een lineair stelsel van vergelijkingen. Het inverse-bronprobleem werd opgelost met behulp van een geregulariseerde kleinstekwadratenbenadering, waarbij we regularisatie met betrekking tot het vermogensverlies van de gradiëntspoel gebruikten. In tegenstelling tot de methode geïntroduceerd in hoofdstuk twee, hoeven bij deze methode de doelvelden niet langer gedefinieerd te worden op een concentrische cilinder. Hierdoor is het mogelijk om de velden in elk soort volume of schil te definiëren. Dit verbetert de nauwkeurigheid van de gradiëntvelden. Daarnaast



hebben de basisfuncties een ingebouwde beperking met betrekking tot een eindige lengte. Dit creëerde de mogelijkheid om korte gradiëntspoelen te maken die lineaire velden produceren met een hoge nauwkeurigheid in het interessegebied. Tegelijkertijd is de methode nog steeds snel, aangezien het aantal onbekenden tot een minimum wordt beperkt. Convergentie binnen enkele minuten is mogelijk met een standaard PC. De gelijkmatig variërende stroomdichtheden kunnen worden gerepresenteerd met slechts een paar basisfuncties en dankzij voorkennis over de dominante modi van deze basisfuncties (hoofdstuk 2) kunnen andere modi worden genegeerd. De gradiëntspoel die een lineair veld langs de as van de magneet maakt, werd ontworpen en geconstrueerd met de nieuwe methode en vergeleken met de eerder gebouwde gradiëntspoel uit hoofdstuk 2. Fantoom- en hersenbeelden gemaakt met de gradiëntspoel ontworpen met deze nieuwe methode vertoonden minder vervormingen. Dit hoofdstuk bespreekt ook de vooruitgang met een multi-channel RF-spoel die wordt gebruikt voor kniebeeldvorming en een open-source RF- en gradiëntversterker. De kenmerken van deze versterkers worden besproken en tot slot wordt een kwaliteitsborgingsprotocol voor laagveldsystemen voorgesteld.

In hoofdstuk 4 worden bijkomende (concomitante)gradiëntveldcomponenten en hun effecten op beeldvorming besproken. Gradiëntvelden hebben ongewenste componenten die niet kunnen worden voorkomen. Deze velden zijn ruimtelijk afhankelijk van de geometrie van de gradiëntspoel. De bijkomende velden werden gekarakteriseerd voor Halbachsystemen en vergeleken met conventionele MRI-systemen. De fundamentele kenmerken van de concomitante veldvergelijkingen verschillen van conventionele MRI-systemen: beeldvervalsingen treden voornamelijk op in de transversale richtingen en een kruisterm bestaat alleen wanneer gradiëntpulsen van de twee transversale gradiënten tegelijkertijd worden toegepast. Een signaalmodel dat wordt gebruikt om de effecten van concomitante velden te simuleren werd afgeleid met behulp van de nieuwgevonden veldvergelijkingen. De gesimuleerde beeldartefacten werden vergeleken met fantoombeelden. De resultaten tonen aan dat zowel de vervaging van de fasecoderende gradiënten als de kruistermen vervormingen van de beelden kunnen veroorzaken. Dit gebeurt echter alleen bij pogingen om extreem korte echotijden te bereiken. Het bleek dat vervorming veroorzaakt door de uitleesgradiënt en effecten als gevolg van de afbuiging van de effectieve magnetisatie verwaarloosbaar zijn door de lage gradiëntsterktes die momenteel geassocieerd zijn met POC-systemen.

In hoofdstuk 5 worden wervelstromen en een gesegmenteerd RF-scherm besproken. Het snelle schakelen van de gradiëntspoelen veroorzaakt wervelstromen in de omliggende geleidende structuren, wat de metingen potentieel kan verstoren. De belangrijkste drager van wervelstromen in een Halbachsysteem is het koperen scherm tussen de RF- en gradiëntspoelen. We simuleerden de wervelstromen die in het scherm werden gecreëerd vóór en na voorgestelde segmentaties en vonden een factor 3.2 reductie in amplitude van de wervelstromen na de segmentatie. Vervolgens werd RF-scherm in fasen opgebouwd, waarbij segmentaties werden toegevoegd en de elektromagnetische interferentie na elke stap werd gemeten. Ruisonderdrukingsstrategieën werden gebruikt om de verhoogde elektromagnetische ruis na de segmentaties te verminderen. Dit resulteerde in een defini-

tief ontwerp dat vergelijkbare ruiskarakteristieken had als een niet-gesegmenteerd referentiescherm. Ook de wervelstroomvervaltijden van de twee afschermingen werden vergeleken en verbeteringen tot een factor drie werden gemeten met het gesegmenteerde scherm. Om de effecten op de beeldvorming te onderzoeken, werden T_1 en T_2 gewogen beelden verkregen met beide schermen en er werden aanzienlijk scherpere beelden gemaakt met de nieuwe afscherming.

In hoofdstuk 6 werd een systeemontwerpkader voorgesteld dat kan worden gebruikt om POC-Halbachsystemen te ontwerpen voor specifieke toepassingen. Om dit te bereiken werden magneet-, gradiënt- en RF-spoelontwerp geïntegreerd in een enkel wiskundig kader. Binnen dit kader wordt begonnen met het magneetontwerpen. Als eerste wordt het aantal ringen van de Halbachmagneet bepaald aan de hand van de maximale lengte van het systeem. Vervolgens wordt een homogeen veld gedefinieerd en worden de ringdiameters die het dit veld produceren gevonden met behulp van de methode van Newton. Dezelfde techniek wordt toegepast om de optimale ringafstanden te vinden. De resulterende magneetafmetingen bepalen de gradiëntspoelafmetingen die worden ontworpen met behulp van de methode beschreven in hoofdstuk 3. De ontwerper kiest een maximale lineariteitsfout en vervolgens worden de bijbehorende gradiëntspoelen met maximale efficiëntie gevonden. Ten slotte worden solenoïde RF-spoelen ontworpen op een vergelijkbare manier als de gradiëntspoelen. Echter, verschillende basisfuncties en een homogeen doelveld georiënteerd langs de as van de magneet worden hiervoor gebruikt. In de volgende stap van de methode geeft de ontwerper beperkingen op zoals het de regio waarin het object zich gaat bevinden, de minimale diameter van het systeem, de gewenste ruimtelijke resolutie, minimale veldsterkte van de hoofdmagneet en de karakteristieken van de gradiënt- en RF-versterkers. Vervolgens worden de optimale magneet-, gradiënt- en RF-spoelontwerpen gevonden op een iteratieve manier. Met optimaal bedoelen we hier de meest compacte oplossing, die nog steeds in staat is om de gewenste beeldkarakteristieken te verkrijgen met de hoogst haalbare veldsterkte. Het kader werd gedemonstreerd door ontwerpen te maken voor een neurobeeldvormings- en polsbeeldvormingssysteem.



