

Toepassing van hoge- T_c supergeleiding in een 7-kanaals hartscanner

Marcel ter Brake *Op de valreep van 1995 werd in de leerstoel Lage Temperaturen van de Universiteit Twente de laatste hand gelegd aan een 7-kanaals magnetometer, uitgerust met zogenaamde hoge- T_c SQUIDs. In januari 1996 werden hiermee de eerste hartmetingen in een magnetisch afgeschermd kamer verricht en werden magnetocardiogrammen geregistreerd. De 7-kanaals hartscanner is de eerste stap in de ontwikkeling van een magnetometer die eenvoudig te gebruiken is in standaard klinische omgevingen. In het hiernavolgend artikel wordt dit onderzoek, het zogenaamde hartscanner-project, beschreven.*

Supergeleiding en Lage Temperaturen

In 1908 was Kamerlingh Onnes in Leiden de eerste ter wereld die het edelgas helium vloeibaar wist te maken, kokend bij een temperatuur van 4,2 K (-269 °C). Het lag voor de hand daarna de weerstand van verschillende materialen in dit lage-temperatuur gebied te bepalen (door te pompen aan het heliumbad kon hiervoor de temperatuur nog verder verlaagd worden). Bij die experimenten ontdekten de Leidse onderzoekers in 1911 het verschijnsel supergeleiding. Tijdens het meten aan kwik zag men bij 4,15 K de weerstand plotseling onmeetbaar klein worden. Aanvankelijk dacht men aan een systematische fout in de meetopstelling, maar later bleek een fundamenteel natuurkundig effect te zijn ontdekt: supergeleiding. Voor zijn werk kreeg Kamerlingh Onnes in 1913 de Nobelprijs. Sinds die tijd is vooral gewerkt met metallische supergeleiders als lood, tin en niobium, en pas later aan legeringen als niobium-titaan. Lange tijd was de 'recordhouder' niobium-germanium (Nb_3Ge) met een overgangstemperatuur van 23,3 K. Maar in de jaren 1986 en 1987 werd de natuurkundewereld opgeschrikt door de ontdekking van de keramische supergeleiders. Volgend op het werk van Bednorz en Müller van IBM in Zurich, ontdekte Chu van de universiteit van Houston het materiaal $YBa_2Cu_3O_x$ dat een overgangstemperatuur toonde van maar liefst 90 K. Dit betekende dat supergeleiding ver-

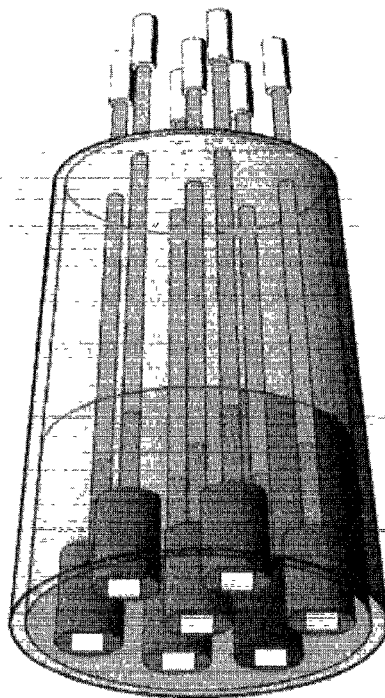
kregen kon worden middels koeling door vloeibaar stikstof (77 K) in plaats van het veel duurdere, en moeilijk te hanteren, vloeibare helium. Later zijn nog exotischer verbindingen ontwikkeld met nog hogere overgangstemperaturen (recordhouder is momenteel

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$ met 135 K)

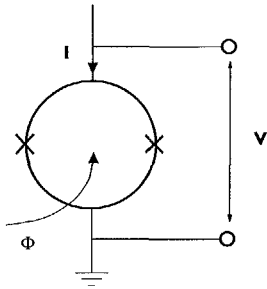
Niettemin wordt wereldwijd het meest gewerkt met het materiaal van Chu $YBa_2Cu_3O_x$. Het verschijnsel supergeleiding is in een eerder artikel in *Mikroniek* uitgebreid beschreven door Dave Blank.

In het onderzoek van de leerstoel Lage Temperaturen (geleid door professor Horst Rogalla) speelt supergeleiding een sleutelrol. Supergeleiding maakt het mogelijk grenzen te verleggen, zoals het opwekken van zeer sterke magneetvelden tot 25 Tesla, het meten van zeer kleine magnetische velden van 10^{-13} Tesla, en het ontwikkelen van zeer gevoelige sensoren voor ondermeer ruimtevaarttoepassingen, en het ontwikkelen van ultrasnelle elec-

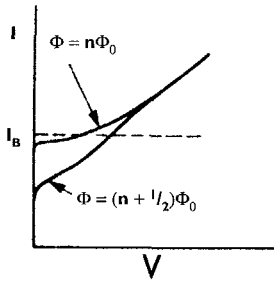
tronica. Een specifiek voorbeeld van een supergeleidend device is een SQUID, waarmee extreem gevoelig magnetische velden gemeten kunnen worden. In de leerstoel LT is al ruim twee decennia ervaring met SQUIDs. Zo is op basis van lage- T_c niobium SQUIDs een 19-kanaals neuromagnetometer gebouwd die momenteel voor biomagnetische experimenten wordt gebruikt in het Biomagnetisch Centrum op de campus van de Universiteit Twente.



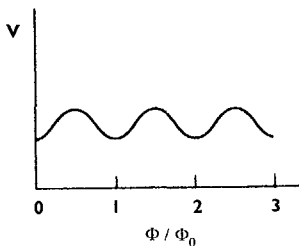
Toepassing van hoge- T_c supergeleiding in een 7-kanaals hartscanner



Figuur 1
Schematische weergave van een dc-SQUID



Figuur 2 Stroom-spannings karakteristiek van een dc-SQUID



Figuur 3 Spanning over het SQUID als functie van de aangeboden flux

Hartscanner-project

In het begin van 1994 is het hartscanner-project gestart met als doel een magnetometer te ontwikkelen, op basis van hoge- T_c SQUIDs, die gebruikt kan worden in standaard klinische omgevingen. Verder werden als eisen gesteld dat het systeem transportabel, simpel in gebruik, en relatief goedkoop moest zijn. In dit project spelen veel aspecten een rol van dunne-laag fabricage, via sensor-ontwikkeling en instrumentatie tot biomagnetische toepassing. Ook wordt op het vlak van ruisonderdrukking en koeling binnen de faculteit Technische Natuurkunde samengewerkt met de leerstoel Meet- en SysteemTechniek. Het project is financieel gesteund door de Stichting Technische Wetenschappen, het Nationaal Onderzoek Programma 'Hoge- T_c Supergeleiding', en Philips.

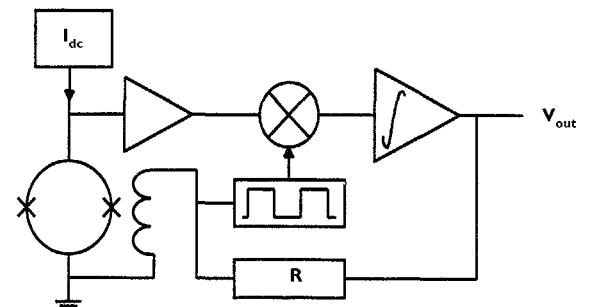
SQUIDs

Als we ons beperken tot de zogenaamde dc-SQUIDs, dan is een SQUID te beschouwen als een ring van supergeleidend materiaal met daarin twee zwakke punten (zie figuur 1). Deze zwakke punten kunnen ten opzichte van de rest van het materiaal zeer weinig stroom voeren zonder hun supergeleidende eigenschappen te verliezen (de grens wordt de kritieke stroom genoemd, en deze bedraagt enkele μA). Ze zijn te realiseren door bijvoorbeeld een vernauwing in de ring, maar ook door een kleine isolerende barrière aan te brengen. De supergeleidende stroom is in staat door zo'n barrière heen te 'tunnelen'. Het quantummechanische gedrag van dergelijke zwakke punten of juncties werd voor het eerst beschreven door de Engelse student Brian Josephson in 1962, die daar in 1973 de Nobelprijs voor kreeg. De juncties worden dan ook Josephson juncties genoemd.

Door het SQUID wordt een geringe zogenaamde biasstroom gestuurd, en de spanning wordt gemeten in een soort vier-punts meting (zie figuur 1). De verkregen stroom-spanningskarakteristiek is gegeven in figuur 2. Voor een geringe stroom is de spanning nul omdat het gehele SQUID in de supergeleidende toestand is. Als echter de kritieke stroom van een junctie wordt overschreden, ontstaat een spanning over het SQUID.

Als nu een magnetisch veld op het SQUID wordt aangelegd, zal door inductie een kringstroom door de SQUIDring gaan lopen (wet van Lenz). Deze geïnduceerde kringstroom interfereert met de biasstroom en daarom hangt het verloop van de stroom-spanningskarakteristiek af van de hoeveelheid magnetische flux door het SQUID. In figuur 2 is te zien dat er twee uiterste curves zijn waarbinnen de karakteristiek kan liggen: één curve voor een SQUID flux van een geheel aantal fluxquanta, en de andere curve voor een geheel plus een half aantal fluxquanta (de magnetische flux is gequantiseerd in eenheden $\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Tm}^2$, het fluxquantum).

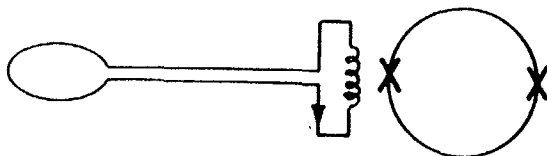
Door nu de biasstroom een geschikte waarde te geven, wordt de spanning over het SQUID periodiek afhankelijk van de magnetische flux in het SQUID (zie de figuren 2 en 3). De periode hierin is $1 \Phi_0$. In essentie heb je nu een zeer gevoelige fluxmeter beschikbaar. Het nadeel is echter dat deze meter niet lineair is, de calibratie ligt niet vast: je weet niet welke fluxverandering bij een gemeten spanningsverandering hoort. Dat hangt immers af van waar je toevallig op de $V-\Phi$ curve zit. Om deze niet-lineaire overdracht op te vangen wordt terugkoppeling toegepast (zie figuur 4). De gemeten uitgangsspanning wordt teruggekoppeld naar het SQUID via een spoeltje dichtbij het SQUID, zodanig dat de fluxverandering die als signaal in het SQUID komt wordt gecompenseerd door de teruggekoppelde flux. Het SQUID wordt nu gebruikt als zogenaamde nul-detector, en de overdracht is geheel bepaald door de weerstand in het terugkoppelcircuit en de wederkerige inductie tussen terugkoppelspoeltje en het SQUID. Om de ruisbijdrage van de eerste versterkertrap te onderdrukken wordt in de regel een modulatie toegepast van de flux in het SQUID met een frequentie in de orde van 100 kHz (zie ook figuur 4).



Figuur 4 Blokschema van een SQUID-magnetometer

Toepassing van hoge- T_c supergeleiding in een 7-kanaals hartscanner

Tot zover is het SQUID uitsluitend een zeer gevoelige fluxmeter. Wat we echter willen is een zeer gevoelige veldmeter, en omdat het SQUIDringetje zeer klein is (orde 0,1 mm²) hebben we een probleem. we hebben toch nog vrij veel veld nodig om weinig flux te maken. De oplossing hiervoor die bij lage- T_c SQUIDs wordt toegepast is het gebruik van een zogenaamde fluxtransformer. Dit is een gesloten supergeleidend circuit dat bestaat uit een relatief grote meetspoel (orde cm²) in serie gekoppeld aan een klein spoeltje dichtbij het SQUID (zie figuur 5). Deze methode geeft ruwweg een factor 100 verbetering in de veldgevoeligheid.



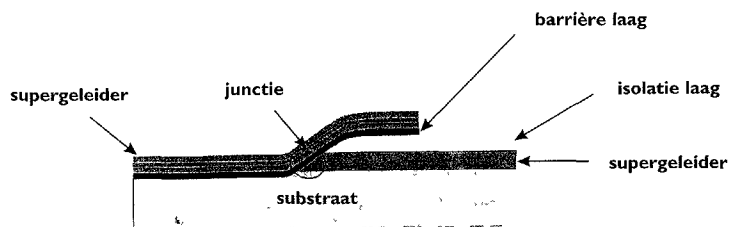
Figuur 5
Fluxtransformer inductief gekoppeld aan een dc-SQUID

SQUIDs van hoge- T_c materiaal

Bij het maken van SQUID-magnetometers van hoge- T_c supergeleidend materiaal treden twee problemen op de voorgrond

1. Het hoge- T_c materiaal is zeer anisotroop
2. Er is geen hoge- T_c supergeleidend draad beschikbaar

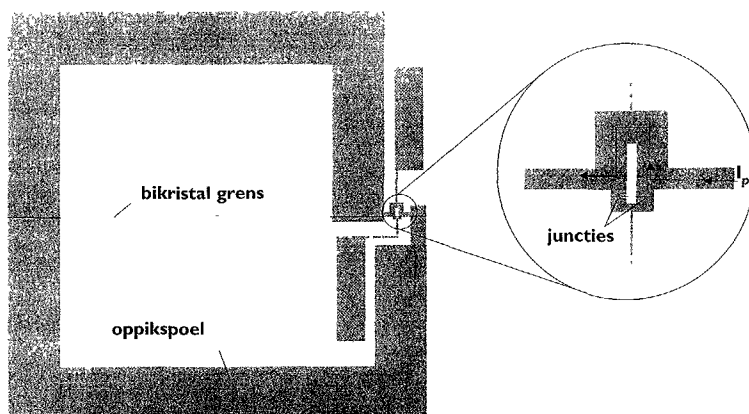
Het eerste probleem heeft betrekking op de supergeleidende eigenschappen en meer concreet op de zogenaamde coherentielengte. Deze lengte is min of meer gekoppeld te denken aan de afstand waarover een supergeleidende stroom een barrière kan passeren. Nu is in hoge- T_c supergeleidende lagen in de regel de coherentielengte in het vlak van de laag een orde van grootte meer dan die loodrecht op de laag. Dit heeft tot gevolg dat het zeer moeilijk is Josephson juncties te realiseren door lagen op elkaar te stapelen zoals dat bij lage- T_c SQUIDs gebruikelijk is. Eerst een supergeleidende laag, daarop een dunne isolerende laag en daarop weer supergeleider. De conclusie was dat juncties ontwikkeld moesten worden die in het



Figuur 6 Schematische doorsnede van een 'ramp-type' junctie

vlak van de dunne film lagen. In 1990 had de leerstoel Lage Temperaturen een wereldprimeur met de zogenaamde 'ramp-type' junctie (figuur 6), die nadien door vele groepen in de wereld waaronder IBM is gebruikt. In het hartscanner-project gebruiken we echter een ander type junctie dat eenvoudiger is te realiseren, de bij IBM ontwikkelde 'grain-boundary' junctie. De truuik hierbij is dat een dunne strip hoge- T_c materiaal wordt aangebracht op een zogenaamd bi-kristal, een substraat dat bestaat uit twee aan elkaar gelijmde kristallen met een verschillende kristalrichting (verdraaiing ca. 24°). Op de overgang van de twee kristallen ontstaan defecten in de dunne laag met als gevolg plaatselijk een aanmerkelijk lagere kritieke stroom. De strip gedraagt zich bij de overgang als een Josephson-junctie.

Het tweede probleem is ook zeer ernstig want we kunnen geen draadgewonden grote meetspoelen maken, en dus ook geen fluxtransformers om de veldgevoeligheid van de SQUIDs op te krikken. Als oplossing hiervoor is de direct gekoppelde, of ook wel inductief geshunte, SQUID ontwikkeld, die schematisch is weergegeven in figuur 7. In wezen is het SQUID zelf hier een lange



Figuur 7 Schematische weergave van een inductief geshunte SQUID

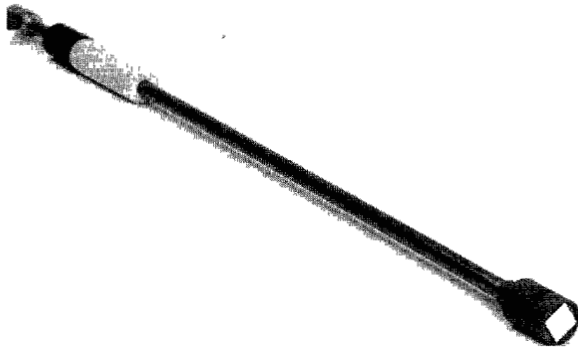
Toepassing van hoge- T_c supergeleiding in een 7-kanaals hartscanner

sleuf met daaraan parallel een grote vierkante lus. Door een uitwendig magnetisch veld wordt in de lus een stroom geïnduceerd die ook vlak voorbij de SQUID sleuf komt, en daar dus een magnetische flux in koppelt. De inkoppeling is niet zo efficiënt als met een fluxtransformer, maar er blijkt goed mee te werken.

7-kanaals hartscanner

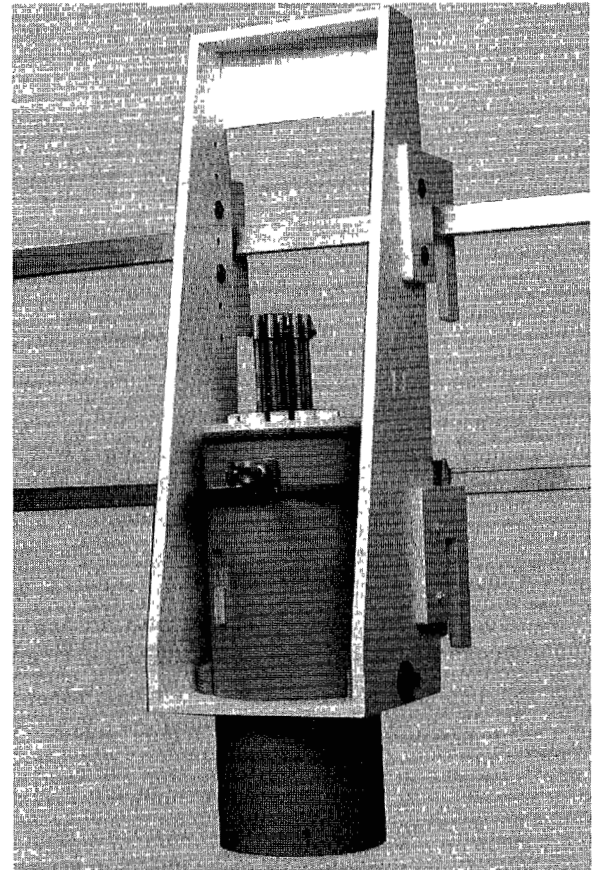
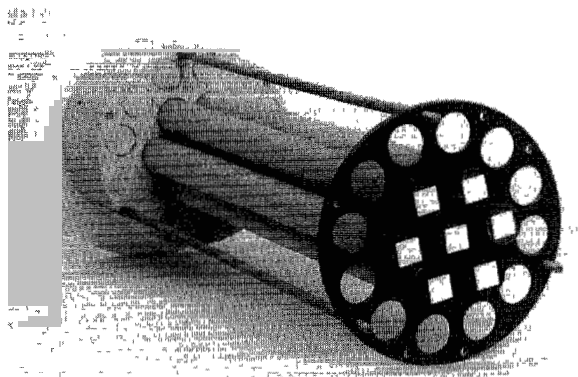
Voor het hartscanner-project zijn hoge- T_c SQUIDs ontwikkeld met een buitenafmeting van 10 mm x 10 mm. Gebruik is gemaakt van SrTiO_3 bi-kristallen, waarop een 100 nm laag $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ is aangebracht middels laser-ablatie. De laag is tot een SQUID gestructureerd via standaard foto-lithografie en fysisch etsen met een argon-ionen bundel. Om de SQUIDs te beschermen tegen vocht (dat de supergeleidende eigenschappen sterk verslechtert) zijn ze ingepakt in speciaal geselecteerde, niet-magnetsche, keramische chip carriers.

Figuur 8 Eén van de 7 SQUID sticks (rechts in wit de chip carrier met daarin het SQUID)

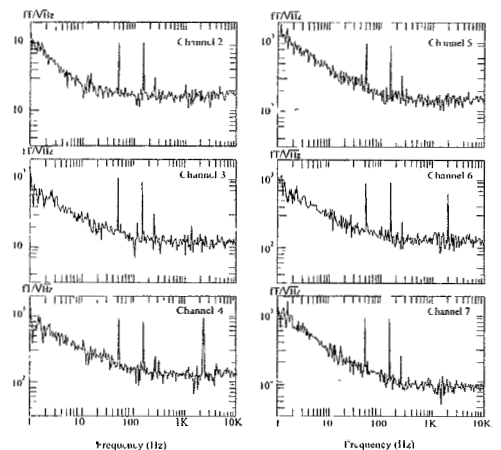
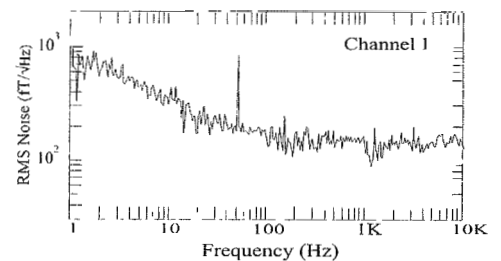


De 7-kanaals magnetometer bevat 7 afzonderlijke sticks. Elke stick bestaat uit een koper-nikkel buis met aan het ene eind een SQUID en aan het andere eind een connector (zie figuur 8). De positie van elke stick wordt gefixeerd middels een dunwandige buis in de insert, die is weergegeven in figuur 9. Deze insert kan geplaatst worden in een kunststof cryostaat, gevuld met vloeibaar stikstof (figuur 10).

Figuur 9 Hartscanner insert 7 sticks in hexagonale verdeling



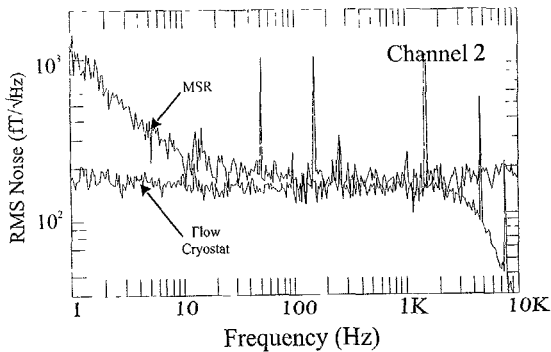
Figuur 10 7-kanaals hartscanner insert geplaatst in kunststof cryostaat



Figuur 11 Ruisspectra van de 7 kanalen gemeten in de magnetisch afgeschermdede kamer

Toepassing van hoge- T_c supergeleiding in een 7-kanaals hartscanner

Figuur 12
Ruisspectrum van
kanaal 2 gemeten in
de magnetisch afge-
schermde kamer
(MSR), en in een zeer
goed afgeschermde
'flow cryostat'



De 7-kanaals magnetometer is in januari 1996 afgekoeld in de magnetisch afgeschermde kamer van het Biomagnetisch Centrum Twente. De ruisspectra van de 7 kanalen zijn weergegeven in figuur 11. Het gemiddelde witte-ruis niveau is 120 fT/√Hz. De hogere ruis bij lage frequenties wordt veroorzaakt door de geringe afschermding van de kamer. Dit komt ook naar voren in figuur 12, waar het ruisspectrum van kanaal 2 is vergeleken met dat gemeten in een zeer goed afgeschermde zogenaamde flow-cryostaat. Een 7-kanaals magnetocardiogram gemeten met een frequentieband 0,1 Hz tot 125 Hz is weergegeven in figuur 13. De signaal-ruis verhouding is aanmerkelijk te vergroten door een aantal hartslagen in de tijd te middelen.

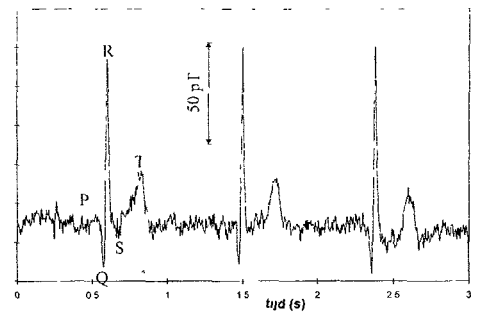
Toekomst

Na het succes van de 7-kanaals hoge- T_c hartmetingen zal in de toekomst het onderzoek in drie parallele lijnen worden voortgezet:

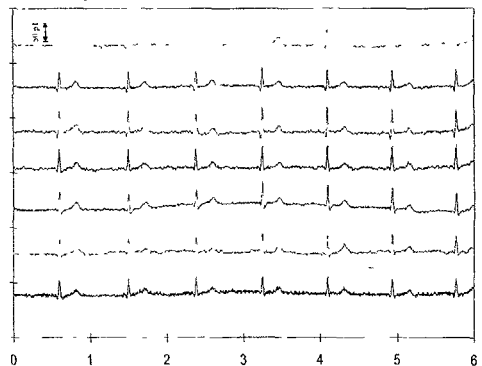
- 1 verbetering van de hoge- T_c SQUIDS,
- 2 onderdrukking van de omgevingsstoring, zodanig dat buiten een magnetisch afgeschermde kamer gemeten kan worden,
- 3 koeling van de SQUIDS met behulp van kleine koelmachines.

Ad 1. Hoewel de huidige SQUIDS afdoende zijn om hartmetingen te verrichten, streven we ernaar de resolutie met ruwweg een factor 2 te verhogen (naar een ruisniveau van 50 fT/√Hz). Dan namelijk kan ook het hartsignaal van een foetus in de moederbuik worden gemeten, hetgeen een veelbelovende toepassing van magnetocardiografie is. De verhoging van de resolutie kan gerealiseerd worden door het ontwerp van het SQUID te optimaliseren en door met grotere substraten te werken (bv. 20 mm x 20 mm).

Ad 2. Zoals in het begin is vermeld, is het doel een magnetometer te ontwikkelen voor standaard klinische omgevingen. Omdat het systeem bovendien transporta-



7 channel measurement



Figuur 13 7-kanalen MagnetoCardioGram

bel en relatief goedkoop moet zijn is het gebruik van een magnetisch afgeschermde kamer uitgesloten (kosten ca. 1,5 miljoen gulden). Als alternatief wordt gewerkt aan actieve compensatie van omgevingsstoringen. Hierbij wordt het omgevingsveld gemeten met een referentiesensor, en de uitgangsspanning van deze sensor wordt gebruikt om een compenserend magnetisch veld te regelen dat wordt opgewekt middels een magneetspoel. Ook wordt gewerkt aan methoden om vanuit de output van meerdere magnetometers, bijvoorbeeld via correlatietechnieken, de signaal-ruis-verhouding te verbeteren.

Ad 3: Het gebruik van de magnetometer zal aanzienlijk vereenvoudigd worden door koelmachines toe te passen, in plaats van vloeibaar stikstof. Dergelijke koelmachines zijn in het verleden ontwikkeld voor militaire toepassingen (koeling van infrarood sensoren), en zijn beschikbaar op de markt. We hopen nog dit kalenderjaar een hoge- T_c SQUID met een dergelijke koeler te kunnen koelen. Onderzoekaspecten die hierbij een rol spelen zijn onder meer de onderdrukking van trillingen en magnetische storingen ten gevolge van de koeler, en het thermodynamisch gedrag (afkoeltijd en temperatuurstabiliteit).

Auteursnoot

Marcel ter Brake is werkzaam aan de Universiteit Twente, Faculteit Technische Natuurkunde, Leerstoel Lage Temperaturen, Postbus 217, 7500 AE Enschede.