

ORATIE
12 MEI 2011



SUPER-
GELEIDING:
EEN KOUD
KUNSTJE!

PROF.DR.IR. H.J.M. TER BRAKE



UNIVERSITEIT TWENTE.



PROF.DR.IR. H.J.M. TER BRAKE

SUPERGELEIDING: EEN KOUD KUNSTJE!

REDE UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING
VAN HET AMBT VAN HOGLERAAR

ENERGY, MATERIALS AND SYSTEMS

AAN DE FACULTEIT TECHNISCHE
NATUURWETENSCHAPPEN
VAN DE UNIVERSITEIT TWENTE
OP DONDERDAG 12 MEI 2011

DOOR

PROF.DR.IR. H.J.M. TER BRAKE

SUPERGELEIDING: EEN KOUD KUNSTJE!

Tekst bij oratie prof.dr.ir. H.J.M. ter Brake,
Universiteit Twente, 12 mei 2011

Rechten voorbehouden H.J.M. ter Brake

JUBILEUM

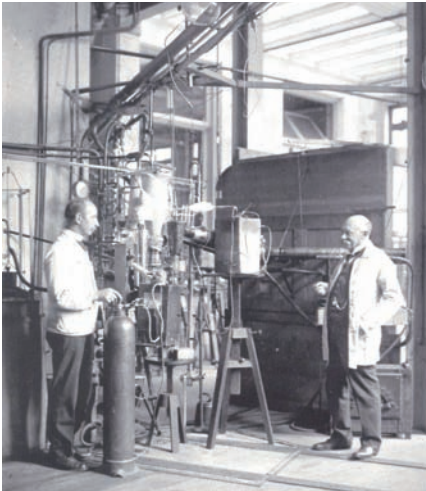
MIJNHEER DE RECTOR MAGNIFICUS, WAARDE COLLEGA'S, DAMES EN HEREN,

Het is me een waar genoegen u op dit moment toe te mogen spreken. Natuurlijk is het een genoegen dat als hoogleraar te mogen doen, maar zeker is het ook een genoegen dat op dit moment te mogen doen, of beter, in dit jaar 2011; Een historisch jaar want zoals velen van u weten bestaat de universiteit alhier dit jaar formeel 50 jaar, ze viert haar 50e dies natalis (figuur 1). Er zijn echter meer jubilea te vieren. Zo kan ik, in de aanwezigheid van haar voorzitter, niet onvermeld laten dat de Nederlandse Natuurkundige Vereniging dit jaar 90 jaar bestaat. Het is echter ook een historisch jaar omdat het precies 100 jaar geleden is dat in Leiden supergeleiding werd ontdekt, een natuurkundig verschijnsel dat nog steeds volop tot de verbeelding spreekt. Eerder, in 1908, had Kamerlingh Onnes in Leiden heliumgas vloeibaar weten te maken. Een uitermate moeilijke en moeizame klus, waar een hele "koudefabriek" en een uitgebreide technische staf voor nodig was onder leiding van meester Gerrit Jan Flim (figuur 2). Helium was, nadat in Engeland James Dewar waterstof vloeibaar had weten te maken in 1898, het laatste "gewone" gas dat nog vloeibaar gemaakt moest worden. En daar was afkoeling voor nodig tot een extreem lage temperatuur: tot 4,2 Kelvin, 4,2 graden Celsius boven het absolute nulpunt.



Figuur 1: 1961: Burgemeester Thomassen viert feest nadat bekend is geworden dat de 3e Technische Hogeschool in Enschede gevestigd zal worden. (<http://www.utwente.nl/organisatie/lustrum/sneak-preview>)

Dat absolute nulpunt is natuurlijk ook een vreemd verschijnsel an sich. Je kunt iets afkoelen door er op de een of andere manier energie uit te trekken, maar op zeker moment houdt dat op; Een absoluut minimum aan energie is bereikt. In de 17e eeuw was Robert Boyle één van de eersten die hierover theoretische bespiegelingen presenteerde. De discussie was natuurlijk waar dan, in de zin van temperatuur, dat minimum aan energie zou moeten liggen. Voorspellingen hieromtrent werden pas ondersteund met experimenten toen men voor thermometrie gebruik ging maken van zogenaamde gasthermometers. Een pionier op dat vlak was Guillaume Amontons die van een vast volume gas de druk mat bij verschillende temperaturen. Hij zag dat daarbij de druk lineair afnam met de temperatuur. Bij extrapolatie naar druk nul moest je dus in het absolute nulpunt terecht komen. Vanuit zijn metingen voorspelde Amontons op die manier een waarde van $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Geenszins een slechte schatting want uit nauwkeuriger metingen volgde later een waarde van $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Internationaal is afgesproken hier het nulpunt te leggen van de absolute temperatuurschaal in Kelvin, waarbij een temperatuurverschil van 1 Kelvin (of kortweg 1 K) overeenkomt met 1 graad Celsius (of $1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

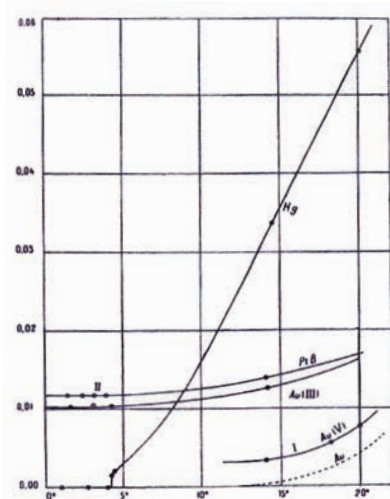


Figuur 2: Kamerlingh Onnes (rechts) en Gerrit Jan Flim bij een deel van de heliuminstallatie in Leiden (uit Dirk van Delft: Jacht op het absolute nulpunt, uitg. Bert Bakker, 2008)

Na dit uitstapje over thermometrie is het zaak terug te keren naar Leiden. Aan het begin van de 20e eeuw woedde er onder theoretisch fysici een hevige discussie over de vraag hoe de elektrische weerstand van een materiaal zich zou gedragen bij afkoeling richting het absolute nulpunt. Men wist al dat de weerstand van een geleidend materiaal afnam naarmate de temperatuur daalde. Dat werd verklaard vanuit een ballistisch model waarbij elektronen door een rooster bewogen dat door trillingen de beweging van de elektronen verstoorte. Lagere temperatuur betekende minder heftige roostertrillingen en dus minder weerstand. Maar wat nu als alles stil zou komen te staan bij het absolute nulpunt? Dan zou het rooster niet meer trillen, dus heel kleine weerstand, maar dan zouden misschien ook de elektronen niet meer bewegen, dus heel grote weerstand. De verwachtingen liepen uiteen van een weerstand die met dalende temperatuur geleidelijk af zou nemen tot nul bij het absolute nulpunt (o.a. Kamerlingh Onnes), tot een oneindig hoge weerstand bij dat nulpunt (o.a. Lord Kelvin). Ook werd er gedacht aan een constante restweerstand, die zou overblijven wanneer het rooster stil zou komen te staan.

Toen dus Kamerlingh Onnes helium vloeibaar had weten te maken en daarmee het absolute nulpunt weer wat dichterbij bereik was gekomen, werd als eerste gekeken hoe de weerstand van een geleider zich zou gedragen bij verdere afkoeling tot die nieuwe nog lagere temperatuur. Onnes werkte hierin samen met Gerrit Jan Flim, Cornelis Dorsman en Gilles Holst. Holst zat aan de knoppen voor de metingen van de weerstand, terwijl Onnes en Flim de kranen voor het heliumbad bedienden. Dorsman assisteerde bij de temperatuurmetingen. Er moest natuurlijk wel gewerkt worden met een zo zuiver mogelijk materiaal omdat anders de weerstandseffecten van verontreinigingen bepalend zouden kunnen zijn. Na pogingen met goud en platina werd daarom gekozen voor kwik; Op kamertemperatuur vloeibaar en dus goed te zuiveren via herhaalde destillatie, en op $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ bevriest het tot een vaste stof, een metaal zoals we dat min of meer gewend zijn.

Met dat kwik bleek evenwel iets vreemds aan de hand. Zoals Onnes hoopte nam de weerstand van kwik gestaag af en bleef niet hangen op een constante waarde zoals dat bij goud en platina wel het geval was. Maar het gekke was dat al bij een temperatuur van 3 K de weerstand onmeetbaar klein was geworden (zie figuur 3). Op 8 april 1911 om 16.00 uur schreef Kamerlingh Onnes in zijn notitieboekje "Kwik nagenoeg nul" (figuur 4). Supergeleiding was ontdekt, hoewel Onnes zich dat nog niet realiseerde. In de daarop volgende maanden verbeterde hij de opstelling en op 26 oktober 1911 kon heel gedetailleerd een sprong in de weerstand van kwik gemeten worden (figuur 5). In nog geen honderdste graad sprong de weerstand van het kwikdraadje van onmeetbaar klein ($< 10^{-5} \Omega$) naar een heel goed meetbare waarde van 0.1Ω . Hoewel nog totaal onbegrepen, was het Kamerlingh Onnes volstrekt duidelijk dat het hier om een nieuw fenomeen ging dat Onnes "supra-geleiding" noemde. In december 1912 bleken ook tin en lood supergeleidend in dit temperatuurgebied. Voor zijn werk ontving Onnes in 1913 de Nobelprijs voor de natuurkunde. Zijn assistent Gilles Holst werd in 1914 de eerste directeur van het Philips Natuurkundig Laboratorium (kortweg NatLab).



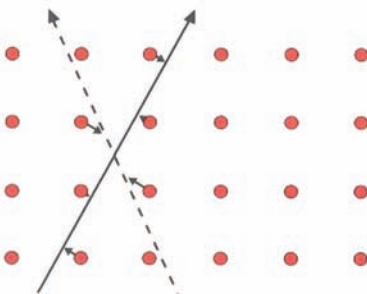
Figuur 3: Meting van Kamerlingh Onnes van de weerstand van een kwikdraadje, weergegeven samen met metingen aan platina en goud. De meting aan kwik is van 8 april 1911.

SUPERGELEIDING

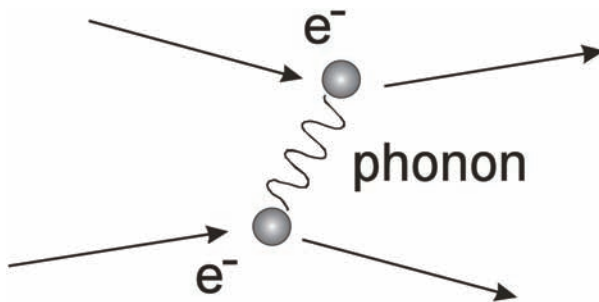
Maar nu natuurlijk de vraag: hoe kan dat dan, supergeleiding? En met de beantwoording van deze vraag waag ik me echt op glad ijs. U moet zich voorstellen dat het na de ontdekking in 1911 tot maar liefst 1957 heeft geduurd voordat een sluitende theoretische verklaring kon worden geformuleerd. En met de kennis van nu hebben we voor masterstudenten natuurkunde een volledig vak over supergeleiding waaraan ze 120 uur tijd moeten besteden, en dat heet dan nog slechts "Introduction to superconductivity". U begrijpt dat het mij niet zal lukken u in te wijden in de geheimen van supergeleiding in de beperkte tijd die me is gegeven. Toch wil ik een poging wagen in deze oratie het verschijnsel supergeleiding voor een breed publiek enigszins bevatbaar te maken. Ik realiseer me dat mijn collega's van tijd tot tijd hun wenkbrauwen zullen fronzen.

Laten we kijken naar een metalen geleider. Op microscopische schaal is zo'n metaal te zien als aan netjes geordend rooster van atomen, waarbij die atomen bestaan uit positief geladen kernen met daaromheen bewegend elektronen (die de negatieve lading vormen). Nu is het zo dat in een geleidend materiaal de buitenste elektronen relatief weinig binding hebben met de kern van het atoom. Ze zijn dus relatief makkelijk door een elektrisch veld uit het atoom vandaan te trekken, en zo het atoom te ioniseren. Wanneer je nu over een geleidend materiaal een elektrisch potentiaalverschil aanbrengt met een spanningsbron (b.v. een batterij), dan zullen de elektronen uit de buitenste elektronenschillen van de atomen collectief aan de wandel gaan en bewegen richting de positieve kant van het spanningsverschil. Die collectieve beweging van elektronen is de elektrische stroom, en dat gaat om gigantische aantallen. Bij een minuscuul stroompje van 1 nA, ofwel een miljardste van een Ampere, passeren per seconde toch maar liefst 6 miljard elektronen.

De beweging van elektronen wordt verstoord door de ionen in het rooster en ondervindt zo weerstand. Zoals al gezegd, is bij lagere temperatuur die verstoring minder groot omdat de ionen steeds minder heftig bewegen. Van belang is nu dat bij het dalen van de temperatuur op zeker moment de Coulombse interactie tussen ionen en elektronen bepalend gaat worden. Dat is de aantrekkende kracht ten gevolge van het ladingsverschil tussen elektron en ion. Als nu een elektron op zijn vlucht door het rooster langs een ion schiet, zullen ion en elektron iets naar elkaar toe willen bewegen. De beweging van het elektron wordt dus beïnvloed, of zo u wilt iets vertraagd. Omdat de massa van een ion duizenden malen groter is dan die van een elektron, beweegt het ion echter relatief traag. Tegen de tijd dat het ion goed en wel in beweging komt, is het elektron al in geen velden of wegen meer te bekennen. Er zijn echter inmiddels wel andere elektronen in de buurt gekomen en die worden door de veranderde ladingsverdeling in het rooster (lokaal meer positief) aangetrokken. Van zo'n elektron wordt, door de ionbeweging in het rooster, dus op zijn beurt de baan beïnvloed en, zo u wilt, zijn beweging versneld. Je zou kunnen zeggen dat de energie die het ene elektron verliest aan het rooster, via beweging van de ionen in het rooster, wordt overgedragen op een ander elektron (figuur 6).



Figuur 6: Beweging van elektronen in een metaalrooster. De bolletjes stellen de ionen voor in het rooster en de pijlen representeren banen van elektronen (uit V.L. Ginzburg en E.A. Andryushin: Superconductivity, uitg. World Scientific, 2004).

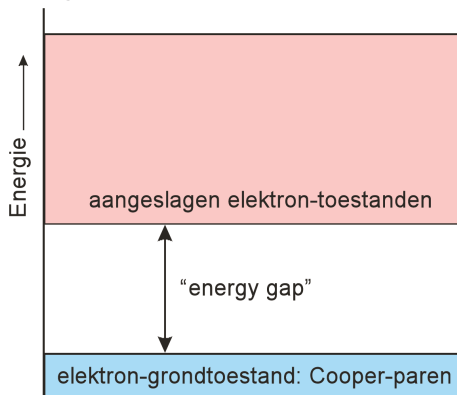


Figuur 7: Feynman-diagram waarin de interactie tussen twee elektronen via een roostertrilling (phonon) wordt geschetst

Richard Feynman introduceerde een diagram waarmee deze interactie goed is te illustreren, zie figuur 7. De beweging van de ionen in het rooster, die de koppeling tussen de elektronen verzorgt, wordt een phonon genoemd. Zoals te zien in dit Feynman-diagram is het netto effect van de interactie dat zowel energie als impuls behouden blijft. Twee elektronen die via het rooster interactie hebben worden een Cooper-paar genoemd naar Leon Cooper, die samen met John Bardeen en John Robert Schrieffer, in 1957 de BCS theorie publiceerde waarin supergeleiding theoretisch werd verklaard.

Belangrijk is dat het gaat om een verschijnsel dat zich voordoet in de beweging van de elektronen als collectief. Hoewel de interactie zich afspeelt tussen elektronparen, is het geenszins zo dat elektronen als paren gekoppeld zijn en paarsgewijs door het rooster bewegen. Nee, de beschreven interactie speelt zich telkens in heel vluchtige contacten af, en over relatief grote afstand, de zogenaamde coherentielengte. Deze afstand is in de orde van grootte 100 nanometer, een tien-duizendste millimeter. Dat lijkt misschien weinig maar u moet zich realiseren dat de afstand tussen de afzonderlijke ionen in het rooster slechts een paar tienden nanometer is, dus zo'n factor duizend kleiner.

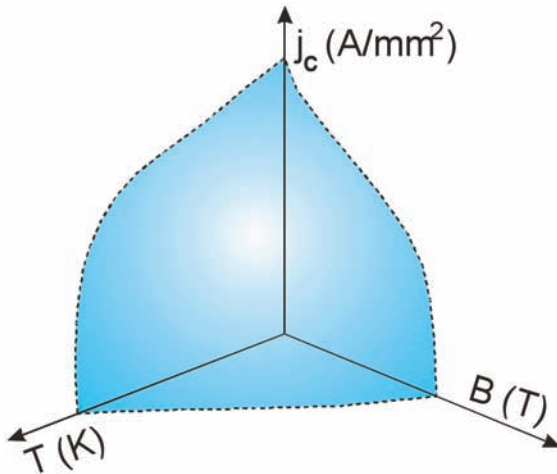
Door die relatief grote coherentielengte heeft elk elektron meer dan een miljoen andere elektronen binnen interactie-bereik. Een collectief gebeuren dus. In het collectief van de elektronen levert deze interactie via het rooster een energetisch gunstige toestand, een grondtoestand. En in een supergeleider moet aan dit collectief minstens een bepaalde hoeveelheid energie worden toegevoegd om in een hogere energie-toestand te geraken, de zogenaamde "energy gap", zie figuur 8. De elektronen in dit supergeleidend collectief kunnen dus niet willekeurig kleine hoeveelheden energie opnemen of afstaan, zoals in een normale geleider wel het geval is, en ze bewegen als collectief dus zonder energieverlies.



Figuur 8: Schematische weergave van de "energy gap" die de supergeleidende grondtoestand van de elektronen scheidt van de aangeslagen toestanden

Om de "energy gap" te overbruggen is extra energie nodig in het systeem. Allereerst kan dat door de temperatuur te verhogen; Als de thermische energie kT de gap overschrijdt dan verliest het collectief haar supergeleidende eigenschappen. Er is dus een sprongtemperatuur, zoals Kamerlingh Onnes had gemeten ondermeer aan kwik, zie figuur 5. Een tweede manier om extra energie in het elektronen-collectief te brengen is meer potentiaalverschil aan te bieden, en zo

de stroomsterkte te verhogen. Ook het bestaan van een kritische stroomdichtheid is experimenteel door Onnes aangetoond. Het derde mechanisme dat supergeleiding kan opheffen is de aanwezigheid van een magnetisch veld. Wanneer op een supergeleidend materiaal een magnetisch veld wordt aangelegd, zal in het materiaal een stroom geïnduceerd worden, die dat magnetisch veld zal afschermen (Meissner effect). Die inductiestroom zorgt ervoor dat binnenin de supergeleider geen magnetisch veld bestaat. Die inductiestroom kan echter niet onbeperkt groot worden, en er bestaat dus ook een kritisch magnetisch veld waarboven supergeleiding verdwijnt. Zo hebben we dus drie grootheden die bepalen of een supergeleidend materiaal zich inderdaad in de supergeleidende toestand bevindt of dat het zich gedraagt als een normale geleider, zie figuur 9.



Figuur 9: Supergeleider weergegeven in j_c , B , T vlak (respectievelijk stroomdichtheid, magnetisch veld, en temperatuur)

TOEPASSING VAN SUPERGELEIDING

Na de ontdekking van supergeleiding in 1911 was Kamerlingh Onnes de eerste die de enorme toepassingsmogelijkheden ervan erkende.

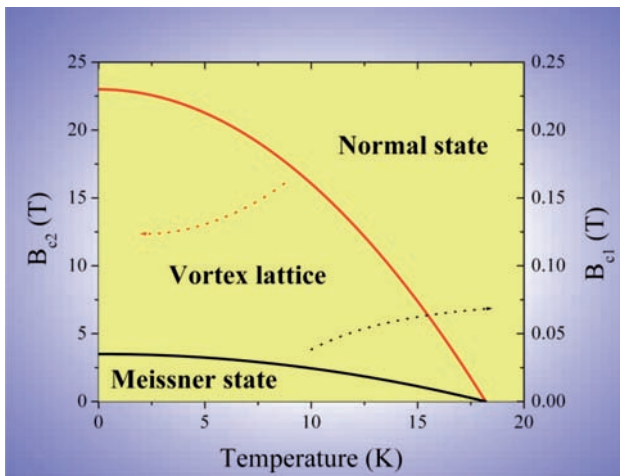
Ook op dat punt was hij absoluut een pionier, met name op experimenteel vlak, theoretisch werd het verschijnsel supergeleiding immers nog totaal niet begrepen. Nadat Onnes had geconstateerd dat een kwikdraad wel 1000 A per mm² kon voeren, rees bij hem de gedachte om een ijzerloze supermagneet te ontwikkelen. Testjes met kleine spoeltjes (o.a. met looddraad, zie figuur 10) wezen echter uit dat in een spoel bij lange na niet de stroom kon worden gevoerd die in een enkele draad wel te realiseren was. Een enorme frustratie voor Onnes, die later verklaard kon worden door het effect van het eigen magnetisch veld van de spoel. Ter plekke van de supergeleidende draad werd het kritisch magnetisch veld overschreden. Onnes liet ook als eerste zien dat elektrische stroom geïnduceerd in een supergeleidende magneetspoel persisteerde, bleef bestaan, bleef rondlopen omdat de stroom in de spoel geen weerstand ondervond.



Figuur 10: Klosje met looddraad dat in Leiden is gebruikt voor experimenten aan supergeleidende magneetspoelen (uit Dirk van Delft: Jacht op het absolute nulpunt, uitg. Bert Bakker, 2008)

De zuivere metalen, waarmee Kamerlingh Onnes werkte, zoals kwik, tin, en lood, zijn zogenaamde type-I supergeleiders. Een aanwezig magnetisch veld wordt door deze materialen volledig afgeschermd tot een zekere kritische waarde (Meissner-toestand). Boven die waar-

de dringt het magnetisch veld het materiaal binnen en verdwijnt de supergeleiding. Deze type-I supergeleiding werd in 1957 verklaard door de BCS-theorie. Het probleem bij deze materialen was dat de kritische waarde van het magnetisch veld vrij gering was, orde van grootte 0.1 Tesla. Om een zinvolle uitbreiding te bieden op permanente magneten en elektromagneten moest dat kritische veld flink hoger komen te liggen. De uitweg werd gevonden in de zogenaamde type-II supergeleiders: V_3Si in 1953, een jaar later gevolgd door Nb_3Sn . Ook deze materialen kennen een Meissner-toestand, maar bij het overschrijden van het kritische veld verdwijnt de supergeleiding niet, maar wordt het magnetisch veld in kleine pakketjes (fluxquanta) toegelaten in het materiaal. Het materiaal bevindt zich dan in een overgangstoestand, waarbij kleine delen normaal geleidend zijn (en de magnetische fluxquanta bevatten), terwijl de rest van het materiaal supergeleidend is. Deze gemengde overgangstoestand blijft bestaan tot erg grote velden (tientallen Tesla). Voor Nb_3Sn zijn beide overgangen weergegeven in figuur 11.



Figuur 11: Kritische magneetvelden van Nb_3Sn . De onderste curve geeft, aangeduid op de rechteras, het veld waarbij de Meissnertoestand verdwijnt (B_{c1}) en de bovenste curve geeft, aangeduid op de linker as, het veld waarbij het materiaal normaal geleidend wordt (B_{c2}).

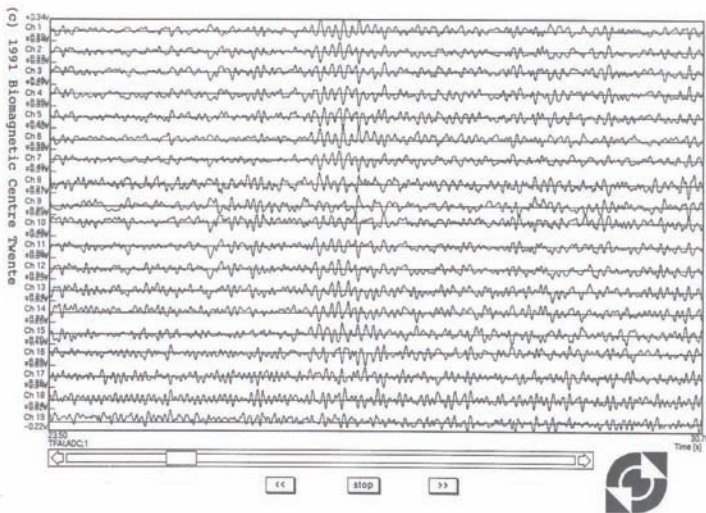
In hetzelfde jaar als de BCS-theorie voor type-I supergeleiding, 1957 dus, werd type-II supergeleiding verklaard door Alexei Abrikosov, die zijn verklaring baseerde op een theorie gepubliceerd in 1950 door twee andere Russen, Vitaly Ginzburg en Lev Landau. Met deze type-II supergeleiders konden veel grotere magneetvelden en stroomdichtheden gerealiseerd worden. Vanaf begin jaren '60 is de toepassing van supergeleiding ontwikkeld waarbij twee lijnen te onderscheiden zijn. Ten eerste toepassing van het quantummechanische karakter van supergeleiding met type-I supergeleiders, en ten tweede toepassing van de enorme stroomdichtheden die in type-II supergeleiders te realiseren zijn.

Een typisch voorbeeld van de eerste ontwikkelingslijn zijn zogenaamde SQUIDs, Superconducting Quantum Interference Devices; Een hele mondvol, en het voert te ver om hier de werking van deze SQUIDs te beschrijven. Het gaat evenwel om supergeleidende magnetometers waarmee extreem gevoelig magnetische velden gemeten kunnen worden. De Universiteit Twente heeft een rijke historie in dit verband. In de leerstoel Lage Temperaturen (LT) van professor Horst Rogalla heb ik samen met collega's Jaap Flokstra en Riet Peters gewerkt aan een 19-kanaals neuromagnetometer waarmee op 19 posities boven het hoofd simultaan hersenactiviteit gemeten kon worden, een zogenaamd magneto-encefalogram, zie figuren 12 en 13.

Dit onderzoek is zeer voortvarend ontwikkeld binnen de leerstoel LT en is voortgezet met name door Jaap Flokstra in de leerstoel "Interfaces and Correlated Electron systems" (kortweg ICE) van professor Hans Hilgenkamp. In algemene zin richt ICE zich op onderzoek aan het quantummechanische karakter van supergeleiding waarbij ook andere elektronensystemen worden beschouwd met gerelateerde interacties. Medische toepassingen van SQUIDs worden verder verkend door Bennie ten Haken, onderzoek dat zich vanuit LT ontwikkelt richting Technische Geneeskunde.

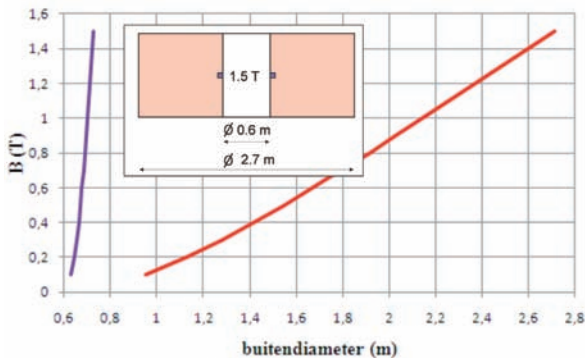


Figuur 12: Auteur dezes met professor Zbigniew Dunajski onder de 19-kanaals neuromagnetometer



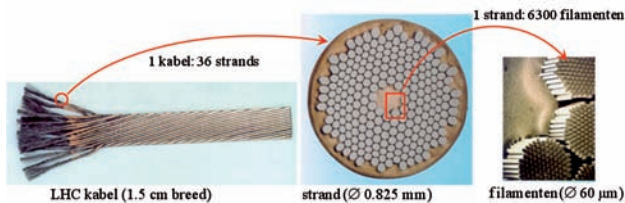
Figuur 13: Eerste registratie op de UT van 19-kanaals magneto-encephalogram met halverwege alpha ritme (gemeten op 27 september 1991, ofwel 20 jaar geleden)

De toepassing van supergeleiding in de tweede lijn, dus van de enorme stroomdichtheden die in supergeleiders te realiseren zijn, is onderwerp van studie in mijn leerstoel “Energy, Materials and Systems” (kortweg EMS). De stroomdichtheid in supergeleiders zoals NbTi ligt twee ordes van grootte boven die van koper, typisch 200 A/mm^2 ten opzichte van slechts 2 A/mm^2 . Het voordeel daarvan is dat je veel hogere magneetvelden kunt realiseren met veel compactere windingpakketten, zie figuur 14. Dit voordeel wordt bijvoorbeeld uitgebuit bij MRI-scanners, wereldwijd dé toepassing van supergeleiding op dit moment. Ook zou een deeltjesversneller zoals de Large Hadron Collider (LHC) op het CERN onmogelijk zijn zonder supergeleiding. De rondsuisende protonen zouden niet in hun baan te houden zijn. Relatief grote motoren (bijvoorbeeld in schepen) en generatoren (bijvoorbeeld in windturbines) zijn ruwweg een factor 3 compacter te maken. Ik kom hier later nog op terug. Wel nog wil ik melden dat de grote stroomdichtheden ook grote gradiënten mogelijk maken in een magneetveld, en dat biedt extra mogelijkheden bij het magnetisch scheiden van materialen in afvalstromen.



Figuur 14: Magnetisch veld in een spoel met een vierkant windingpakket en een binnendiameter van 60 cm als functie van de buitendiameter; Rode curve voor een stroomdichtheid van 2 A/mm^2 (typisch voor koper) en paars voor 200 A/mm^2 (typisch voor een supergeleider). Ook is in schaal aangegeven het verschil tussen beide geleiders voor een magneetveld van 1.5 T ; rood geeft de doorsnede van een koperspoel en paars de doorsnede van een supergeleidende spoel.

Wanneer een supergeleider een continue stroom voert, treden geen verliezen op en kan een elektrische stroom in een supergeleidende lus weerstandsloos blijven lopen. Wanneer echter de stroom, en dienstegevolge het magnetisch veld, verandert treden wel degelijk verlies-effecten op. Dit is het geval bij wisselstroom-toepassingen, maar ook bij het op- en afregelen van een supergeleidende magneetspoel. Deze zogenaamde AC-verliezen zijn onder te verdelen in magnetisatieverliezen en verliezen ten gevolge van inductieve koppeling. Magnetisatieverliezen treden op in de supergeleider ten gevolge van het veranderend magnetisch veld, en schalen met het doorsnee-oppervlak van de supergeleidende draad. Deze verliezen zijn dus te beperken door met heel dunne supergeleidende draden te werken (te vergelijken met het gebruik van dunne lamellen in een transformator). In de praktijk worden daarom zogenaamde “strands” opgebouwd uit supergeleidende filamenten met een diameter van slechts enkele tientallen μm . De filamenten zijn daarbij geplaatst in een goed geleidende matrix (van bijvoorbeeld koper). Een kabel wordt gevormd door meerdere strands samen te nemen. Inductieve koppeling treedt op doordat de strands, of in de strands de filamenten, lussen vormen. Als het aanwezige magnetisch veld verandert, worden in die lussen stromen opgewekt. Die inductiestromen lopen voor een deel door de matrix, en geven dus verliezen. Om deze koppelingsverliezen te beperken worden de strands in de kabel getwist, om zodoende de lussen te verkleinen en om het effect van de opvolgende lussen elkaar om-en-om op te laten heffen. Ter illustratie is in figuur 15 de opbouw van de NbTi kabel weergegeven die is gebruikt voor de LHC.

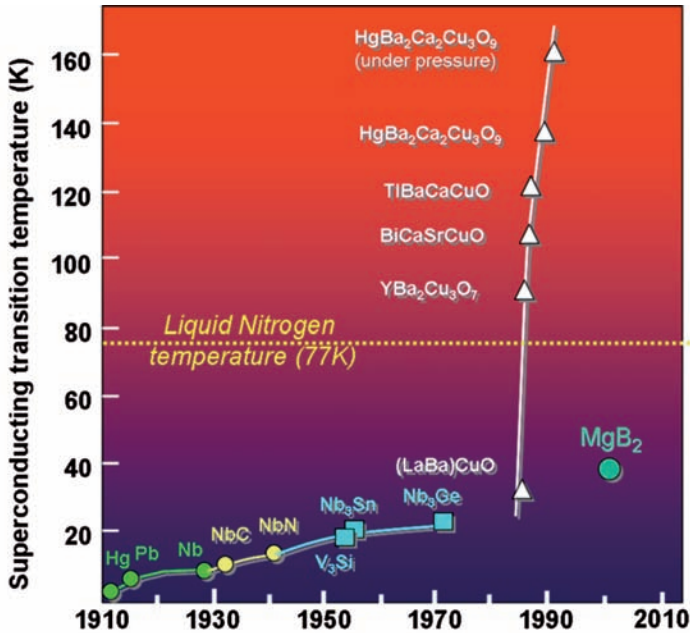


Figuur 15: Opbouw van de NbTi kabel voor de LHC

NOG EEN JUBILEUM

Tot midden jaren '80 was algemeen het idee dat supergeleiding een zaak was van metalen en metaallegeringen, en dat supergeleiding tot temperaturen beneden 30 K beperkt zou blijven. De hoogste overgangstemperatuur toentertijd was die van Nb_3Ge bij ruwweg 23 K. Groot was dan ook de opwindings die ontstond toen in 1986, 25 jaar geleden dus, Georg Bednorz en Alex Muller van IBM Zürich een nieuw materiaal presenteerden: een koper-oxide keramisch materiaal dat supergeleidend bleek te zijn tot 30 K. Vele onderzoekers wereldwijd stortten zich op dit materiaal en de ontdekkingen van nieuwe keramische supergeleiders met steeds hogere overgangstemperaturen volgden elkaar in recordtempo op, zie figuur 16. Heel belangrijk in dit verband was $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (kortweg YBCO). Paul Chu en collega's ontdekten in 1987 dat dit materiaal supergeleidend werd bij een temperatuur van maar liefst 93 K. Voor de koeling was niet langer vloeibaar helium nodig, maar kon volstaan worden met stikstof, kokend bij 77 K, een relatief goedkope cryogene vloeistof, en bovendien ruimschoots voorhanden.

De eerste generatie hoge-temperatuur supergeleidende draad (1G) wordt gemaakt met $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (kortweg BSCCO), met een kritieke temperatuur rond 110 K. De gebruikte productiemethode is dezelfde als tegenwoordig toegepast bij Nb_3Sn : "powder-in-tube". Een mengsel van verschillende poeders met de globale chemische samenstelling van BSCCO wordt in een zilver buisje geperst dat vervolgens getrokken wordt naar een veel kleinere diameter. Meerdere van die kleine buisjes worden in een relatief grote zilver buis gestapeld die op zijn beurt weer getrokken wordt tot een kleine diameter, en in het geval van BSCCO gewalst tot een platte tape. Vervolgens wordt de tape uitgegloeid op hoge temperatuur, waarbij een chemische reactie de poeders omvormt tot BSCCO kristallen die goed uitgelijnd liggen in de tape. Het probleem met BSCCO is echter dat het op temperaturen rond 77 K (vloeibaar stikstof) onvoldoende bestand is tegen magnetische velden. Bovendien maakt het nodige zilver het productieproces te duur.



Figuur 16: Ontdekking van nieuwe supergeleidende materialen in historisch perspectief

Ook bij de tweede generatie (2G) hoge-temperatuur supergeleidende draad is niet zozeer sprake van een draad maar meer van een tape. Uitgangsmateriaal is een dun lint van een nikkellegering (ca. 50 μm dik) dat eerst bedekt wordt met een bufferlaag van CeO_2 . Daarop wordt yttrium-gestabiliseerd zirconia (YSZ) aangebracht van 100 tot 200 nm dik en weer daar bovenop wordt epitaxiaal een laagje YBCO gegroeid van ruwweg 1 μm dik. Het YBCO wordt afgedekt door een laagje zilver (ca. 2 μm), en vervolgens wordt op de tape rondom circa 20 μm koper aangebracht voor thermische stabilisatie. Naast hun betere prestatie in magneetveld hebben 2G supergeleiders ook het voordeel dat de productie potentieel goedkoper is dan die van 1G draad. Een probleem is echter dat slechts 1 % van de totale tape supergeleidend

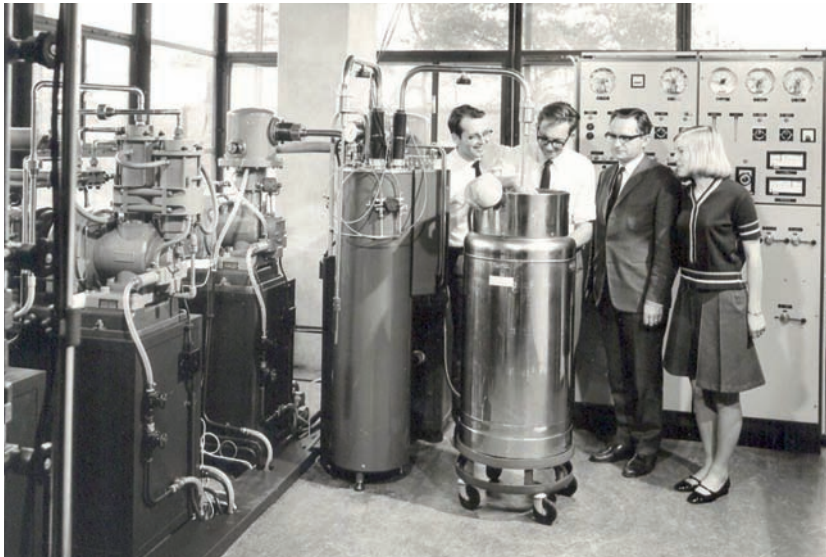
is, en dus is de stroomdichtheid berekend over de gehele doorsnede (de zogenaamde "engineering current density") aanmerkelijk lager dan in de supergeleider zelf. De eerste korte stukjes 2G draad werden geproduceerd in 2002 (orde 1 m lang) tot producties van meer dan 1 km in 2009. Een belangrijke parameter daarbij is het product van maximale stroom en lengte. Je zou kunnen zeggen: de beschikbare draad mag wel een factor twee te kort zijn, als je er dan maar wel twee keer zoveel stroom door kunt laten lopen. Dan kun je in een spoel toch een vergelijkbaar magneetveld genereren. In de periode 2002 tot 2009 nam deze parameter toe van ruwweg 100 A-m tot meer dan 300.000 A-m. Voor de meeste toepassingen is die laatste waarde toereikend. De ontwikkelingen zijn er nu dan ook met name op gericht om de kosten te drukken. Momenteel liggen die rond € 200-300/kA-m. Om een toepassing in de markt te kunnen introduceren zal een niveau van € 50 - 70/kA-m gerealiseerd moeten worden, terwijl voor echte commercialisatie het kostenniveau onder € 20/kA-m moet zakken. Ten opzichte van het huidige niveau moeten de kosten dus met een factor 10 omlaag gebracht worden. Één der belangrijkste producenten (Superpower) verwacht rond 2015 zo ver te zijn.

"COOLING PENALTY"

Naast de eerder genoemde voordelen van supergeleiding, is het belangrijkste nadeel het feit dat een supergeleider voldoende ver afgekoeld moet worden om in de supergeleidende toestand te geraken. En liefst nog wat verder om voldoende stroom te kunnen voeren. Het benodigde koelsysteem vraagt zijn eigen inputvermogen, heeft zekere afmetingen, brengt extra kosten en onderhoud met zich mee, en men spreekt daarom ook van de "cooling penalty". In de leerstoel EMS richten we ons erop deze "penalty" zo draaglijk mogelijk te maken, de nadelen die koeling met zich meebrengt, zo veel mogelijk te beperken.

Ook op het vlak van cryogene koeling heeft de Universiteit Twente een lange en rijke geschiedenis. Eind jaren '60 startte professor Leen van

der Marel de leerstoel Lage Temperaturen. En dat geheel in Leidse traditie gericht op onderzoek aan materiaaleigenschappen bij lage temperaturen. Vaak ging het dan om magnetische eigenschappen. Medewerkers in die eerste jaren waren Gerrit Gerritsma, Louis van de Klundert, Riet Peters en iets later Jaap Flokstra. De lage temperaturen voor het materialenonderzoek werden gerealiseerd met een Philips heliumliquefactor. Heliumoperators van het eerste uur waren Johan Ulfman en Harry Steffens, zie figuur 17. In die tijd waren de cryogene technieken een voorziening om onderzoek te kunnen verrichten, aanvankelijk aan magnetische materialen, later ook aan supergeleiders en supergeleidende devices. De cryogene techniek zelf was niet zo zeer een onderwerp van onderzoek.



Figuur 17: Prof. van der Marel bij de Philips heliumliquefactor (2e van rechts). Geheel links Johan Ulfman (1968)

Begin jaren '90 ben ik me binnen LT gaan richten op de ontwikkeling van nieuwe koeltechnieken, daartoe gedreven door twee ontwikkelingen.

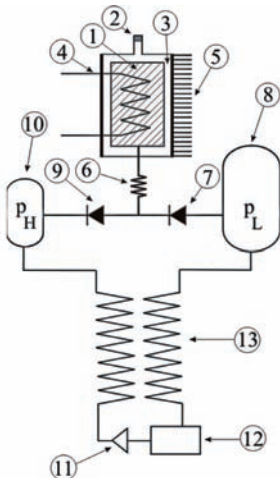
Ten eerste was de leerstoel LT in toenemende mate succesvol in de ontwikkeling van supergeleidende magnetometers (zie figuren 14 en 15), en om die magnetometers buiten het cryogene lab toegepast te krijgen moesten koeltechnieken ontwikkeld worden die geen storing genereerden, weinig input vroegen, minimaal onderhoud vergden, niet te duur waren, kortom “onzichtbaar” waren voor de niet-cryogeen-geschoolde gebruiker. Ten tweede waren, zoals gezegd, in 1986 de hoge-temperatuur supergeleiders ontdekt, die door de hogere werktemperatuur een minder zware “cooling penalty” hadden, en onderzoek werd gestart om kleine koelers te maken met behulp van micro-mechanica (microkoeling). Twee van de ontwikkelingen op het vlak van koeltechniek beschrijf ik hierna in meer detail.

SORPTIEKOELING

In 1997 heb ik een onderzoeksproject gestart, met Johannes Burger als promovendus, dat gericht was op microkoeling. We begonnen dat project met de vraag welke thermodynamische koelprincipes geschikt waren om te verkleinen, en kwamen daarbij uit op een cyclus die verrassend veel lijkt op de huis-tuin-en-vooral-keuken koelkast. Belangrijkst verschil is dat we geen gebruik maakten van een mechanische compressor maar van een thermische compressor, werkend op basis van sorptie. De sorptiecompressor werkt met actieve kool, een materiaal dat in de industrie veelvuldig in filters gebruikt wordt. Actieve kool heeft door de poreuze structuur een zeer groot inwendig oppervlak, orde van grootte 2000 m² per gram kool, ofwel de oppervlakte van een voetbalveld in 2 gram! Door dit extreme inwendige oppervlak kan actieve kool grote hoeveelheden gas aan zich binden (adsorptie). Door de kool te verwarmen komt het gas weer vrij (desorptie), en kan in een beperkt volume een hoge druk opgebouwd worden. Door dit hoge-druk gas gecontroleerd te laten expanderen is koeling te verkrijgen. De werking van deze koeltechniek wordt nader uitgelegd aan de hand van de schematische weergave in figuur 18.

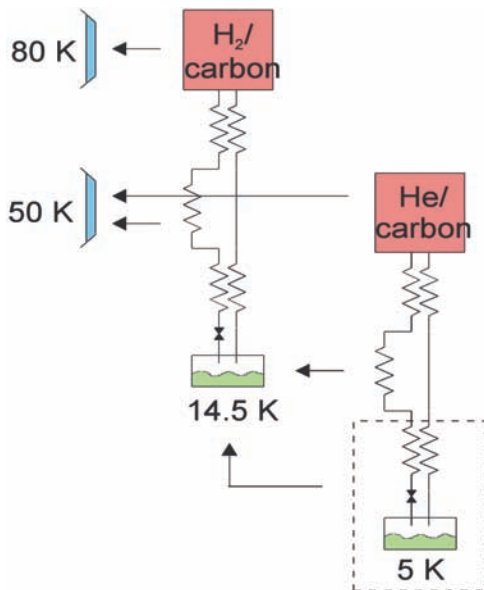
De actieve kool bevindt zich in een container (1) die middels een gas-gap (3) gescheiden is van een heat sink (5). In de gas-gap actuator (2) bevindt zich een kleine hoeveelheid kool met een speciaal geselecteerd contactgas. Door de kool van die gas-gap actuator te verwarmen komt het contactgas vrij dat de gap vult en zo goed thermisch contact bewerkstelligt tussen container en heat sink. De kool in de container koelt zo af tot de heat-sink temperatuur, en adsorbeert werkgas in de container tot de druk zo laag is dat de lage-druk klep (7) opent en werkgas uit de lage-druk buffer (8) door de kool in de container wordt opgenomen. Als de kool in de container verzadigd is met werkgas, wordt het verwarmen van de gas-gap actuator gestaakt zodat het contactgas uit de gas-gap wordt opgenomen in de kool van die actuator. De container wordt zo thermisch geïsoleerd van de heat sink. Vervolgens wordt de kool in de container verwarmd met een inwendige heater (4) waardoor het werkgas wordt gedesorbeerd en druk in de container wordt opgebouwd. Zodra de druk in de container hoger is dan die in de hoge-druk buffer (10) opent de hoge-druk klep (9) en stroomt werkgas onder hoge druk van de container via de

aftercooler (6) naar de hoge-druk buffer. Vandaar loopt het werkgas via een tegenstroom-warmtewisselaar (13) door een restrictie (11) waar het expandeert en aldus afkoelt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het Joule-Thomson effect. Door de afkoeling condenseert het werkgas en vloeistof verzamelt zich in de verdamper (12). Hier is het koelvermogen van de koeler beschikbaar. Warmte wordt



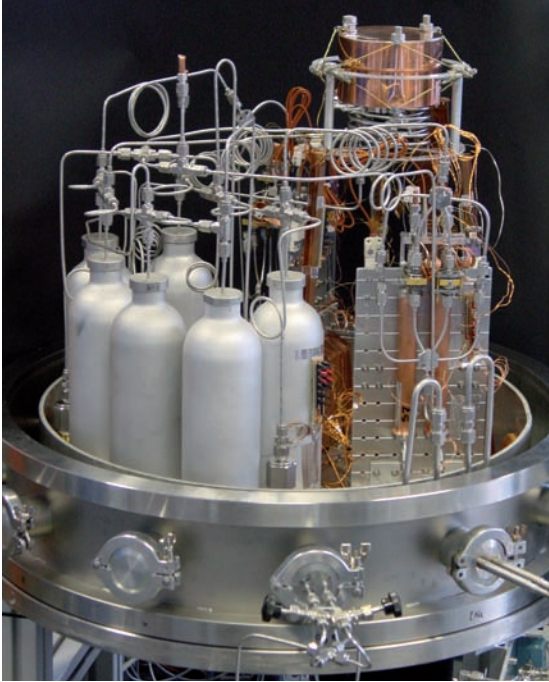
Figuur 18: Schematische weergave van een koeler met sorptie-compressor: 1: container; 2: gas-gap actuator; 3: gas-gap; 4: heater; 5: heat sink; 6: aftercooler; 7: lage-druk klep; lage-druk buffer; 9: hoge-druk klep; hoge-druk buffer; 11: restrictie; 12: verdamper; tegenstroom-warmtewisselaar.

uit de omgeving van de verdamper opgenomen waardoor de vloeistof verdampt en door de tegenstroom-warmtewisselaar terug stroomt naar de lage-druk buffer. Onderweg neemt het terugstromende lagedruk gas warmte op van het instromende hogedruk gas dat aldus wordt afgekoeld op weg naar de restrictie. Om de efficiëntie van de koeler te verhogen kan gebruik gemaakt worden van een extra voor-koeler die het werkgas voorkoelt voordat het de tegenstroom-warmtewisselaar instroomt.



Figuur 19: Darwin-sorptiekoelerconfiguratie.

Omdat zo'n sorptiekoeler geen bewegende delen bevat (naast enkele passieve kleppen) kan die in principe heel klein gemaakt worden. Een belangrijk bijkomend voordeel is dat geen trillingen worden gegenereerd. Dit maakt de sorptie-koeltechniek zeer interessant voor de koeling van gevoelige instrumenten, zoals de eerder genoemde SQUIDs of optische detectoren. Voor de Europese ruimtevaartorganisatie ESA



Figuur 20: Demonstrator van de Darwin-koeler heliumtrap. Rechtsonder een aluminium paneel met twee compressor cellen; links: zes buffervaatjes die gezamenlijk de vereiste buffervolumes vormen; het koperen potje bovenop de opstelling bevat het koudste deel met de verdamper op 5 K.

hebben we een sorptiekoeler ontworpen gericht op de Darwin-missie. Daarbij moet een detectortemperatuur van 5 K gerealiseerd worden, startend vanaf een heat-sink temperatuur van 50 K. Onze Darwin-koelerconfiguratie bestaat uit twee trappen, zie figuur 19. De eerste trap werkt met waterstofgas en sorptiecellen op 80 K. Het waterstofgas wordt voorgekoeld tot 50 K en levert na Joule-Thomson expansie 14.5 K. De tweede trap werkt met heliumgas vanaf 50 K. Het heliumgas wordt voorgekoeld door de waterstofkoeler, en levert na expansie de werkt temperatuur van 5 K. Figuur 20 toont de demonstrator van de heliumtrap die in 2006 gerealiseerd is. Momenteel werken we aan de water-

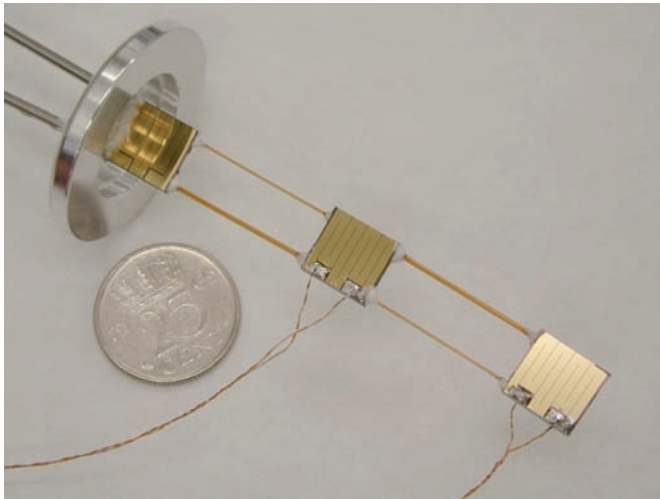
stoftrap en hopen deze aan het eind van 2011 operationeel te hebben. Ook werken we aan het opschalen van deze koeltechniek naar grotere koelvermogens specifiek voor de koeling van een detector in METIS. Dat is een mid-infrarood detector in een nieuwe grote telescoop die gebouwd gaat worden in Chili (de Extremely Large Telescope van European Southern Observatory met een spiegeldiameter van ruwweg 40 m).

Deze koeltechniek met sorptiecompressoren heeft, naast de storingsvrije werking en de schaalbaarheid naar kleine afmetingen, het voordeel dat verschillende temperaturen te bereiken zijn afhankelijk van het gekozen werkgas. Dit maakt de techniek dus ook geschikt voor koeling rond kamertemperatuur, bijvoorbeeld voor airconditioning. Ook aan die toepassing wordt door EMS gewerkt in directe samenwerking met de firma Cool Sustainable Energy Solutions, een spin-off bedrijf getrokken door Johannes Burger, Stefan van Uffelen en Robert-Jan Meijer.

MICROKOELING

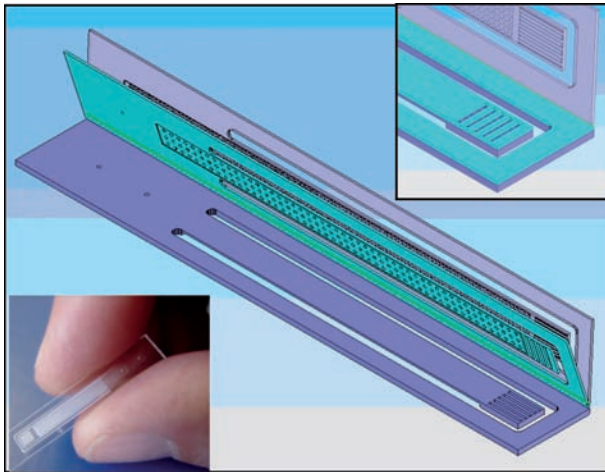
In het eerste microkoeling project werkten we aanvankelijk met een sorptiecompressor bestaand uit vijf sorptiecellen die uit fase bedreven moesten worden om een min of meer constante gasstroom te bewerkstelligen. De extreme vereenvoudiging door het gebruik van de buffers, zoals aangegeven in figuur 19, is van recenter datum. De koeltrap in het eerste microkoeling-project was destijds opgebouwd uit silicium chips verbonden door glazen buisjes, zie figuur 21. Het systeem behaalde, gevuld met ethyleen, een temperatuur van 170K. Die koeler was eigenlijk met een lengte van 7 cm nog "te groot", en bovendien lastig te maken, met bijvoorbeeld veel handwerk bij de verlijming van de glazen buisjes in de silicium chips. Daarom werd in een vervolgproject met Pieter Lerou als promovendus ingezet op de verdere verkleining en optimalisatie van de koeltrap. Gemikt werd op een lengte van ongeveer 2 cm. Al snel werd besloten de hele koeltrap uit

één materiaal te maken en gezien de lage thermische geleidingscoëfficiënt werd voor glas gekozen (warmtegeleiding van de warme naar de koude kant is de belangrijkste verliesfactor). De tegenstroom-warmtewisselaar werd geoptimaliseerd door de productie van entropie te minimaliseren (hoe minder entropie er geproduceerd wordt in een thermodynamisch systeem, hoe minder verliezen). Voor de productie van de glazen microkoelers hebben we een samenwerking gestart met de UT-spin-off Micronit. De opbouw van de koeltrap is schematisch weergegeven in figuur 22. De microkoeler bestaat uit drie glasplaatjes waar structuren in gemaakt zijn door nat chemisch etsen. Het hoge-druk kanaal wordt gevormd door het middelste en het bovenste glasplaatje in de figuur.



Figuur 21: Koeltrap van demo-microkoeler, opgebouwd uit drie silicium chips van 9×9 mm verbonden door glazen buisjes. De dickere buisjes zijn feitelijk twee buisjes binnen elkaar die gezamenlijk de tegenstroom-warmtewisselaar vormen (hoge-druk gas gaat door het binnenste buisje, lage-druk gas loopt door de spleet tussen beide buisjes terug). De dunne glazen buisjes zijn alleen toegevoegd voor mechanische stabiliteit. De chip linksboven is de "splitter" waar de tegenstroom-warmtewisselaar wordt gesplitst naar twee gaslijnen; de middelste chip is een "condenser". Hier wordt het werkgas met een thermo-electrisch element al zover voorgekoeld dat het condenseert. In de chip rechtsonder expandeert de vloeistof en koelt nog verder af. Deze chip bevat ook de verdamer.

Gezien de grote drukverschillen worden de glasplaatjes ondersteund door pilaartjes als een Egyptische tempel-galerij in miniatuur. Het hoge-druk kanaal eindigt in een breed kanaal van enkele tienden μm hoog. Deze nauwe doorgang vormt de Joule-Thomson restrictie. Na de restrictie wordt de vloeistof opgevangen in een kleine verdamper die uit een paar sleufjes bestaat. Hier wordt ook de verbinding gemaakt met het lage-druk retourkanaal dat gevormd wordt door het middelste en het onderste glasplaatje.



Figuur 22: Schematische weergave van de microkoeler opgebouwd uit drie glasplaatjes. Rechts in detail de pilaartjes in het hoge-druk kanaal, de restrictie en de verdamper. Linksonder, één van de gerealiseerde microkoelers.

Extreem kleine koelertjes zijn zo gerealiseerd (zie ook figuur 22), en deze kunnen een tiptemperatuur van 100 K bereiken. Inmiddels worden deze microkoelers als commercieel product ontwikkeld door Kryoz Technologies, een spin-off getrokken door Pieter Lerou en Erik-Jan de Hoon. Koeling van elektronica en detectoren is in zijn algemeenheid zinvol om de ruis in die devices te verminderen. Er kan dus met gekoelde elektronica gevoeliger gemeten worden. Eén van de

toepassingen ligt op medisch vlak in de ontwikkeling van een cryo-magnetische techniek waarmee uitzaaiing van borstkanker naar lymfeklieren te detecteren is. Hierbij worden ijzer-oxide nanodeeltjes geïnjecteerd in de buurt van de tumor, en die verzamelen zich in aangetaste lymfeknopen. Met een techniek, die qua principe te vergelijken is met een gewone metaaldetector, wordt gemeten hoeveel deeltjes zich waar verzameld hebben, en zo kan bepaald worden welke klieren moeten worden verwijderd. Door het meetspoeltje in dit detectie-systeem af te koelen, is gevoeliger te meten en kan deze zogenaamde poortwachterprocedure nauwkeuriger uitgevoerd worden en zonder radioactief materiaal zoals gewoonlijk het geval is. In een met 3 miljoen euro door Pieken-in-de-Delta ondersteund project werkt Bennie ten Haken aan deze toepassing in directe samenwerking met Kryoz Technologies.

De derde microkoeler-promovendus op rij, Haishan Cao, richt zich nu op een verdere verlaging van de tiptemperatuur van 100 K naar 30 K. Daarmee zou een hoge-temperatuur supergeleidende chip gekoeld kunnen worden. De lagere temperatuur wordt gerealiseerd door twee trappen te combineren. De eerste trap werkend met stikstof koelt tot 100 K en die koelt de tweede trap voor. Die tweede trap werkt met waterstofgas en gaat dus tot 30 K. Het ontwerp is gemaakt en de realisatie ligt nu bij Micronit. Rond de zomer hopen we de nieuwe twee-traps microkoelers te kunnen gaan testen.

SUPERGELEIDING EN KOELING: SYNERGIE IN EMS

In de leerstoel “Energy, Materials and Systems” (EMS) worden de onderzoeksinspanningen op het vlak van sterkstroomsupergeleiding en cryogene koeling gecombineerd. De combinatie van beide expertises geeft de leerstoel een sterke en vrijwel unieke positie in de wereld. Naast ambitieuze internationale projecten is het de bedoeling onze expertise en infrastructuur in te zetten voor onderzoek met name op het vlak van duurzame energie.

Ambitieuze internationale onderzoeksprojecten waar EMS in betrokken is, en wil blijven, zijn ondermeer in het kader van:

- CERN (supergeleidende magneten in deeltjesversnellers, b.v. LHC)
- ESA (trillingsvrije koeling van optische detectoren in wetenschappelijke missies)
- ITER (supergeleidende magneetsystemen)
- E-ELT ("European Extremely Large Telescope", trillingsvrije koeling van detector)

Deze projecten zijn belangrijk voor de internationale contacten en daaruit resulterende samenwerking; ze zijn door de ambitieuze doelstellingen per definitie grensverleggend in de vereiste technologie; ze zijn dus uitdagend voor onderzoekers en aantrekkelijk voor studenten. Zo zie ik het persoonlijk als een uitdaging om ooit technologie gebaseerd op mijn werk in LT/EMS toegepast te zien in een ruimtevaartmissie, en dus daadwerkelijk gevlogen te krijgen "in space". Noem het een jongensdroom, hoewel, inmiddels naar mijn inschatting, zeer reëel.

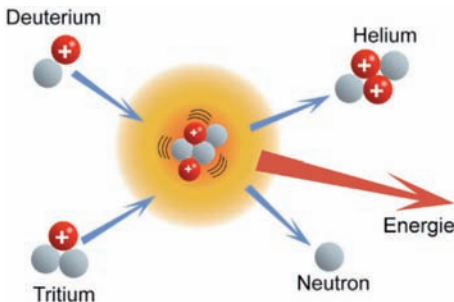
DE E VAN EMS

De energiescenario's zoals die geschetst worden voor de toekomst hangen sterk af van de verantwoordelijke instantie, en er is volop sprake van "wishfull thinking". Alle scenario's zijn het er echter over eens dat het belang van koolwaterstoffen als energiedrager minder belangrijk zal worden. Wel wordt verwacht dat het aandeel van aardgas zal toenemen tot ongeveer het midden van deze eeuw. Afhankelijk van het succes van de biomassa-ontwikkeling, zullen de koolwaterstoffen schaarser worden, terwijl ze naast energieopwekking ook nodig zijn als grondstof voor allerlei producten ("feedstock"). Alternatieve bronnen zullen daarom meer en meer ingeschakeld moeten worden voor de energievoorziening. Elektriciteit zal daarbij de bepalende energiedrager zijn, met mogelijk ook waterstof in combinatie met brandstofcellen.

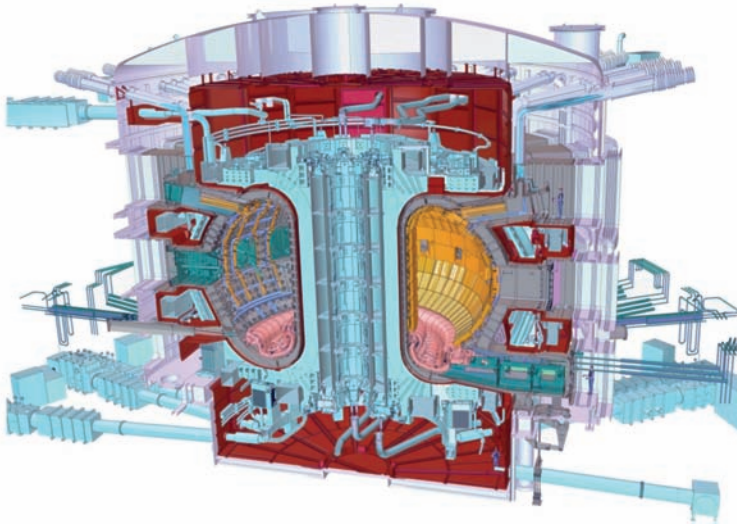
In de “electric economy” van de toekomst kan supergeleiding op een veelheid van punten toegepast worden: generatoren b.v. in windturbines, motoren met name in schepen, energie-opslag (buffering) in supergeleidende spoelen (SMES), magneetsystemen in kernfusiereactoren, transformatoren (kleiner en veiliger), kortsluit-beveiliging (“fault current limiters”), elektriciteitstransport (supergeleidende kabel), magnetische lagering (energieopslag in vliegwiel of energie-backup, UPS). Hierna worden enkele energie-gerelateerde thema’s beschouwd waarin EMS actief is of wil worden, waarbij ook ingegaan wordt op de specifieke onderzoekscomponent voor EMS. Daarbij gaat het om zowel supergeleiding als cryogene technieken.

KERNFUSIE

In een kernfusiereactor wordt een heet gas bestand uit lichte kernen (de waterstofisotopen deuterium en tritium) verhit tot extreem hoge temperatuur. De lichte kernen smelten dan samen tot een zwaardere kern (helium). Bij deze fusiereactie komt enorm veel energie vrij en geen directe radioactiviteit (zie figuur 23). Wel komen hoog-energetische neutronen vrij die de omringende materialen in de fusiereactor kunnen activeren. De resulterende radioactiviteit heeft echter een relatief korte levensduur (halfwaardetijd minder dan 10 jaar). In het internationale ITER project wordt een fusiereactor gebouwd in het Zuid-Franse Cadarache. Het doel is 500 MW te produceren met 50 MW inputvermogen.



*Figuur 23: Bij kernfusie smelten lichte kernen samen tot zwaardere. Daarbij komt enorm veel energie vrij.
Bron: FOM-Rijnhuizen*



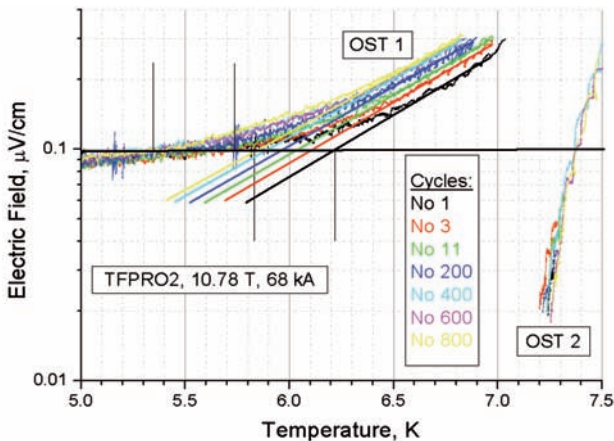
Figuur 24: Doorsnede van de ITER kernfusie-reactor. Let op de schaal, aan de rechterzijde zijn mensen in de afbeelding te zien. (Bron ITER.org) Doorsnede van de ITER kernfusie-reactor (29 meter hoog). Let op de schaal, aan de rechterzijde zijn mensen in de afbeelding te zien. (Bron ITER.org)

Door verwarming wordt het gas in de reactor eerst geïoniseerd en ontstaat een plasma, bestaand uit positief geladen atoomkernen en negatief geladen elektronen. Dit plasma bevindt zich in een torus, een rondlopende buis, een soort donut constructie (zie figuur 24). In die buis wordt een toroïdaal magneetveld aangelegd, gericht langs de as van de buis. Het plasma wordt nu gedwongen in de richting van dat veld te bewegen. Een beweging loodrecht op de as wordt direct tegengewerkt door een Lorentzkracht. Omdat het uit geladen deeltjes bestaat, is het plasma in de torus te beschouwen als een stroomlus. Door nu via een spoel, die door het gat van de torus steekt, een magnetisch veld aan te bieden wordt in die lus een stroom geïnduceerd, vergelijkbaar met de werking van een transformator. Door de tegengestelde lading bewegen in deze inductiestroom in het plasma de kernen en de elektronen in tegengestelde richting, maar wel allemaal

over de as van de torus; Volop botsingen dus. Door het gestaag opvoeren van het magneetveld van de centrale spoel, neemt ook de stroom in het plasma toe, en door de botsingen dus ook de temperatuur van het plasma. Verwacht wordt dat op die manier een temperatuur van maar liefst 150 miljoen graden bereikt kan worden, 10 maal zo heet als het binnenste van de zon. Die extreme temperatuur is vereist om de kernfusiereactie op te laten treden. De sterke magneetvelden die vereist zijn, zowel van de centrale spoel als van de toroïdale veldspoelen, zijn alleen te realiseren met supergeleiders. Zo moeten de toroïdale spoelen een veld van 12 Tesla opwekken met 68 kA door de kabels. Door die enorme stromen en sterke magneetvelden komen er op de geleiders in de kabel enorme krachten te staan (resultierend in drukken op de strands tot 200 bar, lokaal zelfs hoger). Het onderzoek van EMS richt zich met name op het effect van deze krachten op de supergeleidende eigenschappen van de geleiders, en de optimalisatie in dit verband van de draden (strands) en kabels.

Zoals eerder is aangegeven worden supergeleidende kabels opgebouwd uit strands die worden getwist om inductieve koppeling en dus AC verliezen te beperken. De grote krachten die in de kabels optreden kunnen door dat twisten lokaal in de strands verhoging van mechanische spanning en vervormingen geven. In de groep is gewerkt aan een model om de effecten van deze belasting te simuleren en de geometrie van de verkabeling te optimaliseren. De ontwikkeling van dit zogenaamde TEMLOP model is met name getrokken door Arend Nijhuis. TEMLOP staat voor "Transverse Electro-Magnetic Load Optimization". Met behulp van dit model is de kabel die voor ITER gebruikt wordt in de toroïdale veldspoelen geoptimaliseerd. Het bleek zeer voordelig de twistlengte, dat is de afstand tussen de lussen die door het twisten gevormd wordt, te vergroten. Dit was mede mogelijk omdat AC verliezen in deze spoelen geen dominante rol spelen. Een kabel gemaakt volgens de geoptimaliseerde output van TEMLOP bleek veel beter bestand tegen cyclische belasting dan de oorspronkelijke

kabelgeometrie volgens ITER specificaties. Dit werd experimenteel bevestigd in de SULTAN testfaciliteit van het Paul Scherrer Instituut in Villigen, Zwitserland, zie figuur 25. Zeer recent bleek in een publicatie in Nature (8 maart 2011, vol. 247, 150) deze problematiek ook actueel te zijn voor de centrale spoel van ITER. Metingen in SULTAN toonden aan dat de centrale spoel in het huidige ontwerp maar 2 jaren zal kunnen functioneren, in plaats van de geplande 20 jaren. Mogelijk, en natuurlijk afhankelijk van financiering, kunnen we met TEMLOP, in combinatie met andere modellen die op dit moment worden ontwikkeld, op dit vlak nog een zinvolle bijdrage leveren.



Figuur 25: Overgang naar supergeleiding gemeten in SULTAN aan twee Nb_3Sn kabels. OST 1 is de originele kabel voor de toroidale veldspoelen volgens ITER specificaties, OST 2 is dezelfde kabel maar dan met aangepaste twistlengtes (ruwweg verdubbeld). De overgangstemperatuur van OST 2 ligt ruim 1 K hoger en verslechtert niet door mechanische belasting.

Inmiddels zijn in de groep uitgebreid faciliteiten opgebouwd om geleiders cryogeen onder mechanische belasting te karakteriseren; Resultaten die mede gebruikt kunnen worden om begrip en simulatie verder te ontwikkelen. Met name wil ik hier noemen de “cryo-press” waarin onder cryogene condities geleiders belast kunnen worden met

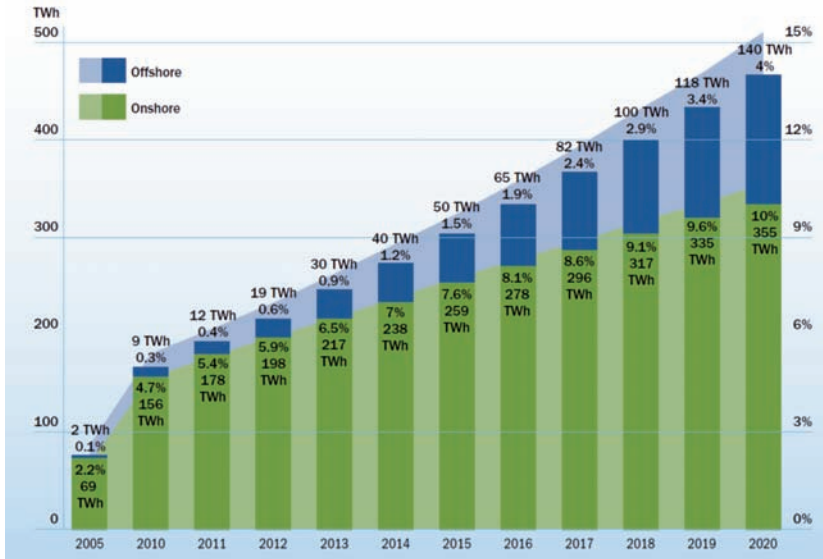
580 kN/m terwijl tegelijkertijd AC verliezen gemeten kunnen worden. Maar ook TARSIS (Test Arrangement for Strain Influence on Strands) en Pacman kan ik niet onvermeld laten. In TARSIS wordt een draad belast en vervormd zoals dat ook in een windingenpakket het geval zou zijn, waarbij de supergeleidende stroomvoerende eigenschappen gemeten kunnen worden afhankelijk van de belasting. In Pacman wordt een draad uitgerekt langs een ronding waardoor buiging en rek optreedt. Ook hierbij worden gelijktijdig de supergeleidende eigenschappen gemeten.

Het is de bedoeling deze meetfaciliteiten en de simulatiemodellen in de naaste toekomst uit te breiden naar hoge-temperatuur supergeleiders. In de experimenten zullen meerdere temperaturen gerealiseerd moeten kunnen worden en ook zal met verschillende geleiderconfiguraties gewerkt moeten kunnen worden (b.v. ook tape).

GENERATOREN IN WINDTURBINES

Het Europees Strategisch EnergieTechnologieplan (SET-plan) mikt op een elektriciteitsvoorziening in 2050 die volledig gerealiseerd wordt uit duurzame bronnen. Hiervan moet de helft uit windenergie gewonnen worden (EWEA maart 2011). Op weg daarnaartoe is de EU-doelstelling voor 2020 34% uit duurzame bronnen waarin 14% wind. Het geïnstalleerde vermogen neemt daarbij toe van 165 TWh in 2010 naar 495 TWh in 2020, zie figuur 26. De bijdrage van offshore windenergie wordt hierbij steeds belangrijker. In 2010 is 6 % van de totale windenergie afkomstig van offshore turbines, in 2020 is dat aandeel al 29 %. In 2030 wil de EU 300 GW geïnstalleerd windvermogen hebben waarvan 120 GW offshore.

Om de kosten van windmolenparken te beperken of beter, om de opbrengst te verhogen per geïnvesteerde euro, worden de molens groter en groter gemaakt. Het opgenomen windvermogen schaalt immers met het frontaal oppervlak, dus met de rotordiameter in het kwadraat. Zo was in 1990 een 500 kW turbine state-of-the-art



Figuur 26: Verwachte productie van windenergie gesplitst in onshore en offshore, gerelateerd aan de totale elektriciteitsproductie (EU Energy Policy to 2050, European Wind Energy Association, maart 2011)

te noemen met een diameter van ruwweg 40 m, en momenteel wordt al gewerkt met 5 MW turbines en rotordiameters van rond de 120 m. Gezien het verstorend effect in het landschap, optisch en akoestisch, worden grote windmolenparken niet op het continent voorzien, maar op zee. Belangrijk voordeel voor deze offshore parken is ook de hogere en meer constante windsnelheid (opgenomen windvermogen schaal met de windsnelheid tot de derde macht). Verder zal de vogelsterfte aanmerkelijk minder zijn wanneer voldoende ver uit de kust gewerkt wordt (meer dan 20 km). Met de huidige technologie (3-5 MW) bedragen in offshore parken de kosten van de turbines ruwweg de helft van de totale kosten. Om per kWh goedkoper elektriciteit te kunnen produceren zullen de molens verder opgeschaald gaan worden. Gesproken wordt over 10 MW+, met in EU documenten al vermelding van 20 MW units.

Door de hogere velden en stroomdichtheden zijn met supergeleiders de generatoren in windturbines compacter en lichter te maken (reductiefactor 2 tot 3). Bovendien kan de generator direct op de rotoras worden aangesloten, terwijl in standaard (koper + ijzer) generatoren een versnellingsbak nodig is om voldoende toeren in de generator te realiseren. Door slijtage en mankementen blijkt die versnellingsbak bepalend te zijn met betrekking tot onderhoud en reparaties, en op zee is dat een probleem met kostbare oplossingen. De zogenaamde "direct drive" koppeling is dus een groot voordeel. Als alternatief voor supergeleiders kan ook gewerkt worden met permanente magneten. Ook dan is een "direct drive" te realiseren. Een belangrijk nadeel van deze systemen is echter het gebruik van zeldzame-aard materialen, en die zijn, zoals de naam al doet vermoeden, maar zeer beperkt beschikbaar. Voor het EU doel van 120 GW in 2030 zou ongeveer 60.000 ton aan neodymium-ijzer-boor ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) nodig zijn, en dat is de gehele wereldproductie van dat materiaal op dit moment. Zelfs wanneer met permanente magneten gewerkt zou gaan worden, dan nog houdt supergeleiding het voordeel van lager gewicht en kleiner volume, niet onbelangrijk bij plaatsing in de rotorkop op een hoogte van meer dan 120 m. Het is moeilijk om aan te geven bij welk vermogen het financieel aantrekkelijk wordt om met supergeleiders te gaan werken. Algemeen wordt gesteld dat boven 5 MW supergeleiders de voorkeur verdienen.

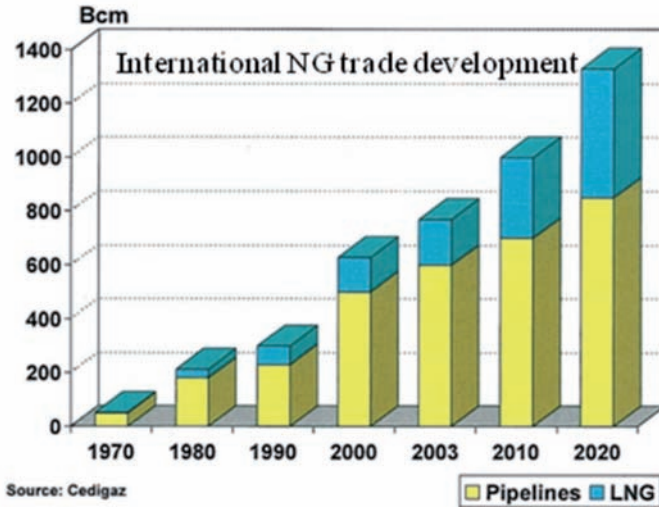
Met grotere molens is overigens niet meer windenergie uit een zeker zee-oppervlak te halen. De molens in een park nemen elkaar zogezegd de wind uit de wieken, en moeten dus op gepaste afstand van elkaar geplaatst worden. Die afstand schaalt met de rotordiameter (ruwweg factor 10). Kortom, een verdubbeling van de rotordiameter betekent weliswaar dat er per molen vier keer zoveel windenergie opgenomen wordt, maar de molens moeten twee keer zover uit elkaar geplaatst worden, en dus zijn er per vierkante kilometer vier keer zo weinig molens. Een grotere diameter levert dus niet zo zeer meer vermogen per park, maar drukt wel de kosten per kWh.

We zijn actief bezig een Europees consortium op te zetten om wezenlijk bij te dragen aan de ontwikkeling van supergeleidende generatoren. Daarbij gaat het voor EMS om onderzoeksvragen zowel op het vlak van supergeleiding als van koeling. Hoe maak je optimaal gebruik van een tape om een spoel te wikkelen? En zou je daarbij de "engineering current density" kunnen verbeteren? Hoe zit het met de mechanische belasting en het effect daarvan op de supergeleider? Men kiest er vrijwel uitsluitend voor om de rotor supergeleidend uit te voeren omdat een supergeleidende stator te veel te lijden zou hebben van AC verliezen, maar is daar niet wat aan te doen? Voor de koeling wordt gedacht aan een externe koeler die een werkgas (bijvoorbeeld helium) afkoelt en dat wordt vervolgens naar de rotor gepompt. Grootste probleem is het lek dicht krijgen van het vereiste leidingensysteem, zeker met het oog op de roterende afdichting. Ook op dit vlak zullen innovatieve oplossingen bedacht kunnen en moeten worden. Waarom bijvoorbeeld niet een meedraaiende koeler? De belangrijkste uitdaging is de levensduur en betrouwbaarheid. De koeling mag in dit verband niet de beperkende factor zijn. Reparaties op zee zijn zeer kostbaar en bovendien ruwweg de helft van de tijd onmogelijk.

AARDGAS

Het gebruik van aardgas groeit wereldwijd gestaag met ongeveer 10% per jaar (zie figuur 27). In vergelijking met olie is aardgas aantrekkelijk vanwege de veel geringere CO₂ uitstoot. Aardgas wordt voor het grootste deel via gasleidingen van bron naar gebruiker getransporteerd, maar voor grotere afstanden is transport in vloeibare vorm (LNG) via schepen financieel aantrekkelijker gezien het veel geringere volume. Voor gasleidingen in zee ligt het "break-even" punt bij ongeveer 1500 km en voor gasleidingen over land bij ruwweg 3500 km. Europa zal in de komende decennia in toenemende mate afhankelijk zijn van aardgas uit landen buiten Europa, dat dus merendeels als LNG aangevoerd zal worden. Nederland heeft nadrukkelijk de ambitie om binnen Europa als knooppunt in de opslag en distributie te fungeren, de "gasrotonde"

van Europa. Als eerste aanzet daartoe wordt een LNG overslag- en opslagterminal gebouwd op de Maasvlakte. Deze zogenaamde “gate terminal” moet 16 miljard kubieke meters LNG per jaar verwerken.



Figuur 27: Ontwikkeling van de internationale handel in aardgas (Bcm is “billion cubic meters” op 0 °C en 1 bar; 1 BCM is equivalent met 0,7 Mton, ofwel 700 miljoen kilo)

Opslag van LNG gebeurt in gigantische tanks met een inhoud van 200.000 m³. Daarin bevindt zich het LNG op atmosferische druk en heeft het een temperatuur van -160 °C. In het distributienet moet het echter gasvormig zijn en bovendien op een veel hogere druk (ca. 80 bar). Daartoe wordt het LNG eerst met cryogene pompen naar een hogere druk gebracht (ca. 80 bar, -150 °C) en vervolgens wordt het LNG verdampt en opgewarmd tot iets boven 0 °C. De standaard methode die men hiervoor gebruikt is warmteuitwisseling met zee-water. Het LNG wordt door buis-systemen gevoerd waar relatief warm zeewater overheen wordt gespoeld. In deze zogenaamde “re-gassifica-

tion" wordt de energie die is gebruikt om aardgas vloeibaar te maken volledig verspild (ruwweg 1 MJ/kg). Door de warmte niet rechtstreeks naar het LNG te voeren maar dit via een warmtemotor-cyclus te doen, is aardig wat van die energie terug te winnen.

Er zijn al zogenaamde Cold Energy Recovery plants gerealiseerd, maar die zijn alle gebaseerd op een cyclus zoals die ook in elektriciteitscentrales wordt gebruikt. In deze (Rankine) cyclus wordt door warmteopname aan de hoge-temperatuur kant de werkstof onder hoge druk gebracht, en die wordt vervolgens over een turbine geëxpandeerd, hetgeen vermogen levert. De lage-druk werkstof wordt vervolgens weer volledig gecondenseerd door warmteafvoer naar de koude kant van het systeem. Die warmte moet nu naar het LNG gevoerd worden. Een ruwe schatting leert dat met zo'n installatie voor de gate terminal circa 10 tot 20 MW aan energie terug te winnen zou zijn. EMS wil binnen een nationaal LNG-consortium concepten ontwikkelen om die opbrengst met een factor twee op te krikken. Sleutelpunt daarbij is dat LNG zich bij 80 bar ruim boven de kritische druk van 45 bar bevindt. Dat betekent dat het LNG niet verdampt bij een vaste temperatuur als kookpunt, maar geleidelijk opwarmt tot de dichtheid zover is afgenomen dat we bij het passeren van de kritische temperatuur (-83 °C) niet langer spreken van een vloeistof maar van een gas. De enthalpie van het aardgas (zeg maar de energie-inhoud) neemt daarbij nagenoeg lineair met de temperatuur toe. Dat betekent dat je niet op een vaste temperatuur warmte aan het LNG moet toevoeren (zoals bij "gewone" verdamping), maar geleidelijk over het gehele temperatuurverloop van -150 °C tot 0 °C. Voor zo'n opzet leent de Rankine cyclus zich niet omdat daar in principe met vaste temperaturen gewerkt wordt, zowel aan de warme als aan de koude kant van de cyclus.

Kortom, er zal een systeem ontworpen moeten worden dat niet met vaste temperatuurrezervoirs werkt, maar warmteuitwisseling kan hebben op meerdere temperatuurniveaus. Bij een rendement van 30% ten opzichte van het thermodynamisch maximaal haalbare rendement

(Carnot) zou de opbrengst toenemen tot ruwweg 40 MW. Naast systeemanalyse en thermodynamisch ontwerp zal veel aandacht besteed moeten worden aan hoogvermogens warmtewisselaars, waarin bijvoorbeeld carbon-nanofibers toegepast zouden kunnen worden.

ONDERWIJS: ZIEN OF KIJKEN?

Vorig jaar heb ik een gesprek gehad met een columnist van de Volkskrant. Hoewel natuurkunde wel kort ter sprake kwam, ging het om de vraag of FC Twente kampioen zou worden, en het gesprek was dan ook samen met mijn collega-hooligan Peter Ganzeboom. Toen letterlijk werd gevraagd of wij dachten dat Twente kampioen zou worden, zei ik "eerst zien". De columnist vond dat kennelijk een fraaie uitspraak, en schreef het dadelijk in zijn kleine notitieboekje. Het leek hem een leuke kop. De maandag aansluitend op het weekend stond er echter boven zijn column "Eerst kiek'n". Dat is natuurlijk met enige dichtelijke vrijheid gedaan om de uitspraak meer Twents te laten klinken, maar waar het me nu om gaat is dat er een wezenlijk verschil is tussen "kiek'n" en "zien". Je kunt uren kijken zonder wat te zien! En daar zit hem bij het universitair onderwijs heden ten dage volgens mij ook de kneep.

De gebruikelijke hoorcolleges sluiten slecht aan op de onderwijsmethoden in basis- en middelbare school. Studenten zijn tegenwoordig meer gericht op korte uitleg van stof, waarna met die stof gewerkt moet gaan worden, je zou kunnen zeggen meer probleem-gericht. De hoorcolleges in oude stijl (en ik geef die zelf ook), waarbij je 2 keer 3 kwartier nieuwe stof presenteert en uitlegt, zijn niet meer van deze tijd. Studenten zitten wel te kijken, maar ze zien niks, ze luisteren wel, maar horen niet wat je vertelt. Zo wordt de studietijd dus niet efficiënt besteed, en een deel van de aanpak van langstuderen moet ook in de aanpak van onderwijsvormen zitten. Waarbij tegelijkertijd het onderwijs aantrekkelijker gemaakt zal kunnen worden. Hoorcolleges moeten met name dienen om verbanden te leggen tussen het vak en andere vakken in de studie, maar ook verbanden binnen het vak zelf. De

colleges moeten de studenten prikkelen en uitdagen. Niets werkt zo stimulerend als een probleem dat tot nu toe niemand heeft kunnen oplossen. Reken maar dat ze erop springen! Met de veranderingen die op til zijn in het UT onderwijs denk ik dat we deze slag zeker ook moeten maken. Ik wil hier graag een bijdrage aan leveren.

ONDERZOEK: FOCUSSEREN OM GEZIEN TE WORDEN!

Zelfs als u niet direct bij de UT betrokken bent, zal het u niet ontgaan zijn dat de UT zich in een proces bevindt van uitgebreide hervormingen, niet alleen in het onderwijs, maar ook in het onderzoek. Een beleid dat gericht is op focus, vastgelegd in een eerdere notitie Route 14, nu door extra bezuinigingen vanuit Den Haag aangescherpt tot Route 14+. De UT kiest expliciet voor focus en wil werken aan technologieën en problemen van de toekomst: nanotechnologie, biomedische technologie, ICT, duurzame energie en bestuurskunde ("governance"). In dit rijtje is "duurzame energie" een beetje een vreemde eend in de bijt. De overige vier zijn rechtstreeks te koppelen aan UT- onderzoeksinstituten, terwijl "duurzame energie" als een algemeen relevant toepassingsgebied tussen die instituten zweeft, met inbreng van leerstoelen die deel uitmaken van de instituten, maar ook van leerstoelen die alleen raakvlakken hebben met die instituten en niet rechtstreeks in een instituut ingebed zijn. Momenteel wordt binnen de universiteit uitgebreid discussie gevoerd over de vraag hoe dit precies georganiseerd moet gaan worden. Meest voor de hand liggend lijkt me te kiezen voor een bundeling van energie-onderzoek in een onderzoekscentrum gericht op samenwerking en profilering naar externe partijen. Om door die externe partijen gezien te worden zal het ook hier belangrijk zijn te focuseren. We zullen moeten kiezen voor dat onderzoek waar we als Twente uniek en sterk in zijn, en niet de ambitie moeten hebben aan alle aspecten van duurzame energie te willen werken. Een aanpak die ik overigens bepleit voor alle universiteiten in Nederland en die ook goed past in het kader van de 3TU federatie. Het behoeft geen betoog dat ik het onderzoek van EMS graag onder wil brengen in dit duurzame-

energie-centrum van de UT. Niet alleen is het EMS-onderzoek, zowel op het vlak van hoog-vermogens-supergeleiding als cryogene technieken, uniek in Nederland, en relevant voor duurzame energie, maar ook liggen er duidelijke verbanden naar groepen binnen het nanotechnologie-instituut Mesa+ voor het gebruik technologieën en materialen die in die groepen ontwikkeld worden. Te denken valt onder andere aan het gebruik van thermo-elektrische materialen, piëzo-elektrische materialen en nanofibers voor innovatieve cryogene technologieën, maar ook aan samenwerking op materialen en fundamentele aspecten op het vlak van supergeleiding.

Echter los van de organisatievorm gaat het me om de inhoud van ons onderzoek en ik zou dan ook willen afsluiten met een uitspraak van een groot filosoof en taaltechnicus van deze tijd: Johan Cruyff. Als trainer van Barcelona zei hij eens dat, als je voor staat met 4-0, je dan beter 3 keer tegen de paal of de lat kunt schieten zodat de mensen roepen van Ooh en Aah, dan dat je er gewoon een vijfde bij inschiet. Zo zie ik het ook met het onderzoek. Natuurlijk mik ik voortdurend op topresultaten en publicaties in toptijdschriften maar ik vind het zeker zo belangrijk dat men zegt “dat is super-cool onderzoek”.

“YOU NEVER WALK ALONE”

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren, het wordt hoog tijd om tot een afronding te komen, en aan het eind van mijn oratie past een woord van dank. Ook, en misschien is zelfs beter te zeggen: vooral, voor een hoogleraar geldt “you never walk alone”.

Mijn universitaire loopbaan is begonnen in de leerstoel Lage Temperaturen van professor Leen van der Marel, en de basis voor mijn huidige werk, en mijn manier van werken, is vooral gelegd onder de bezielende begeleiding van Jaap Flokstra. Jaap kenmerkt zich door zijn zeer gestructureerde en precieze manier van werken. Typerend is dat Jaap het kleinste en toch leesbare handschrift heeft dat ik ooit heb gezien. En ook typerend is de manier waarop Jaap een artikel of verslag doorneemt. De tekst wordt systematisch in stukjes ontleedt en stukjes tekst worden daartoe door streepjes gescheiden. Bijzonder stimulerend waren de werkbesprekingen tijdens mijn afstuderen en promotiewerk. Het lief en leed van de faculteit en ook van daarbuiten hebben we gedurende vele jaren gedeeld, en dat waardeer ik enorm.

Na mijn promotie in 1986 kreeg ik een aanstelling bij de leerstoel LT en vanaf november 1987 werd professor Horst Rogalla voorzitter van deze leerstoel. Mede door de ontdekking van hoge-temperatuur supergeleiding maar zeker ook door de inbreng van Horst heeft de leerstoel zich enorm ontwikkeld. Horst gaf daarbij zijn medewerkers grote vrijheid en hanteerde als motto dat je moest streven naar echt vernieuwend onderzoek. Aan “dat kunnen wij ook” heb je niks. Feitelijk voerde Horst een tenure-track beleid, al jaren voordat die term bedacht was. Iedere medewerker was in staat zich maximaal te ontwikkelen en zo resulteerden dan ook uit de leerstoel maar liefst zeven hoogleraarbenoemingen: in chronologische volgorde de professoren Ten Kate, Peters, Blank, Hilgenkamp, Ter Brake, Rijnders en Brinkman. Horst had en heeft een zeer breed overzicht over het supergeleidend onderzoek in de wereld en gesprekken met hem over onderzoek zijn dan ook altijd inspirerend.

Voor de geboden vrijheid, steun en inspiratie ben ik hem veel dank verschuldigd.

Natuurlijk was in mijn ontwikkeling de steun en inzet van de totale leerstoel van belang, maar ik kan niet nalaten twee medewerkers speciaal te bedanken: Harry Holland en Johannes Burger. Zij waren er vanaf 1997 bij toen ik mijn onderzoek op het vlak van microkoeling definieerde en opstartte. Harry heeft de ontwikkelingen technisch ondersteund in ontwerp en realisatie. Johannes eerst als promovendus, vervolgens als post-doc medewerker, en tenslotte als projectleider op het ESA-Darwinkoeler-project.

In de leerstoel EMS is het onderzoek aan cryogene technieken gecombineerd met het onderzoek aan hoog-vermogens supergeleiding. Dat onderzoek aan hoog-vermogens supergeleiding is aanvankelijk opgezet door wijlen professor Louis van de Klundert en heeft zich binnen LT ontwikkeld onder de stimulerende leiding van professor Herman ten Kate. Naast belangrijke bijdragen van tijdelijke medewerkers heeft dit onderzoek zijn huidige status gekregen door de inspanningen van Arend Nijhuis, Marc Dhalle, Sander Wessel, Erik Krooshoop, Hennie Knoopers en Harry Steffens. Ook zijn de bijdragen van Bennie ten Haken en Andries den Ouden, die inmiddels de groep verlaten hebben, van groot belang geweest.

Maar zoals olie in een goed lopende machine, zo belangrijk zijn ook secretaresses in de organisatie van een leerstoel. Voor EMS zijn dat mijn buurvrouwen Ans Veenstra en Inke in de Wal, en hen wil ik dan ook bedanken voor alle grote en kleine, vaak onzichtbare, schijnbaar vanzelfsprekende en zeker ondergewaardeerde acties. Correspondentie, contacten, organisatie van bijeenkomsten en reizen, website-beheer, financiële zaken en aspecten van personeelszaken, te veel om op te sommen. Mijn dank.

Mijn onderzoek in de leerstoelen LT en EMS zou ook niet mogelijk zijn geweest zonder de betrokkenheid en financiële steun van de UT-instituten Mesa+ en Impact, van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA, ITER Organization, CERN en van de Nederlandse Technologiestichting STW.

Tenslotte wil ik niet onvermeld laten dat ik zes jaren een deeltijdhoogleraarschap heb bekleed aan de technische Universiteit Eindhoven bij de leerstoel Lage Temperaturen aldaar. Ik wil professor Fons de Waele en Jos Zeegers danken voor de zeer prettige samenwerking.

Dames en heren, ik ben geboren in het jaar dat de BCS theorie is gepubliceerd. Toeval? Wie zal het zeggen? In ieder geval is het zo dat ik totaal onwetend van die BCS theorie ben opgegroeid in geborgenheid en vertrouwen, waarvoor ik mijn ouders wil bedanken. Mijn vader, helaas al 15 jaar geleden overleden, was vormer in de ijzergieterij van Stork in Hengelo. Hoewel hij dat zelf absoluut niet zou erkennen, was hij socialist in hart en nieren. Niet verwonderlijk dat hij lid was van de centrale ondernemingsraad van VMF, de Verenigde Machine Fabrieken. Van hem heb ik de interesse in techniek geërfd. Ik herinner me nog erg goed dat hij in het schuurtje bezig was een flipperkast te maken, en dat ik me er als kind over verwonderde dat die flipperkast nooit af kwam. Later begreep ik het pas: dat ding hoefde helemaal niet af! Het ging om de uitdagingen onderweg. Hoe kan ik dit of dat voor elkaar krijgen? Met eindeloos geduld. Ook dat heb ik denk ik wel geërfd. Van mijn moeder, hier gelukkig wel aanwezig, heb ik vooral zelfvertrouwen, bij mezelf soms doorslaand naar eigenwijsheid (voor fysici evenwel een goede eigenschap). Mijn moeder is een volhouder, zit niet bij de pakken neer, pakt telkens zo goed mogelijk de draad weer op, en gaat door. Die eigenschap gecombineerd met het al genoemde geduld blijkt sterk in het analyseren van problemen en het zoeken naar oplossingen. En, dames en heren, om de lijst van jubilea nog verder uit te breiden, de verlovingsdatum van mijn ouders was 12 mei 1951. Vandaag op de kop af 60 jaar geleden, is dat toeval?

In dit dankwoord wil ik ook mijn schoonfamilie betrekken. Vanaf de tijd van mijn vakantiewerk in de bollen tot op heden hebben zij voortdurend belangstelling getoond voor mijn werk en loopbaan. Ik waardeer dat bijzonder.

Tenslotte mijn thuisbasis, Lia en mijn dochters, Tanja, Lindy en Arinda, alle vier prachtmeiden. Het is niet dat ik jullie bedank voor het feit dat jullie me stimuleren in mijn werk, dat is zeker het geval, maar veel meer voor het feit dat jullie me van tijd tot tijd laten beseffen waar het eigenlijk om gaat in het leven, me van tijd tot tijd afremmen in mijn gedrevenheid. Zoals een voorsprong remmend kan werken, heb ik gemerkt dat af en toe remmen je juist beter in staat stelt vorderingen te maken. Tanja, Lindy en Arinda, jullie hebben vaak gezegd dat het zo moeilijk was om aan anderen uit te leggen welk werk je vader deed, en ik antwoordde dan steevast met "dat vind ik ook". Ik hoop dat deze oratie jullie toch een beetje een duidelijker beeld gegeven heeft.

En Lia, voor jou heel veel dank en waardering. Jij was destijds bereid om familie en contacten te verlaten en te verhuizen naar de andere kant van het land. Zodat ik mijn universitaire loopbaan kon beginnen, en zonder die keuze had ik hier dus simpelweg niet gestaan. Je hebt het niet altijd makkelijk gehad; lichamelijke problemen, een gezinsleven met alle hectiek van dien, en mijn veel te drukke studie en werkzaamheden. Ondanks dat alles heb je zelf een loopbaan opgebouwd waar je ontzettend trots op kunt zijn en die zeker zoveel waardering verdient als de mijne, zo niet meer. En ook jij, Lia, moet me geregeld afremmen als ik weer eens doordender. Blijf dat vooral doen zodat ik kan blijven genieten van de mooie momenten samen.

Ik heb gezegd.

