

SupergeleidingZX ronde 27 december 2015

Sinds de ontdekking van supergeleiding in 1911 door de Nederlandse fysicus Heike Kamerlingh Onnes, merkte men dat dit speciale fenomeen alleen optrad bij extreem lage temperaturen, niet hoger dan 30 Kelvin, of $-243\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Later werd een microscopische beschrijving op basis van de kwantumfysica gegeven voor supergeleiding door de zogenaamde BCS-theorie.

Deze theoretische beschrijving van supergeleiding kwam pas in 1957. De Amerikaanse professor John Bardeen, zijn postdoc Leon Cooper en masterstudent John Schrieffer formuleerden een uitleg waarin de elektronen in een supergeleider paren vormen.

Deze zogenaamde 'Cooper-paren' gedragen zich heel anders dan gewone elektronen. Om die paren te breken is een hogere energie nodig dan botsingen tegen de atomen in het metaal kunnen leveren. Het resultaat is dat ze vrij, zonder weerstand, door het metaal kunnen bewegen.

De verklarende theorie stelt dat een Cooperpaar altijd in zijn laagste mogelijke energietoestand zit. Het gevolg daarvan is dat de deeltjes bij een mogelijke botsing met een atoom simpelweg geen energie meer *kunnen* overdragen aan dat atoom.

Bovendien kan het atoom óók geen energie overdragen aan het Cooperpaar, want door de lage temperatuur bezit het materiaal te weinig energie om het stel in een hogere energietoestand te brengen.

Het resultaat is dat de elektronen en de atomen op geen enkele manier energie met elkaar kunnen uitwisselen; eenmaal op snelheid gebracht, blijven de elektronen gewoon doorreizen.

Ze botsen niet meer met de atomen in het geleidende materiaal, want dat zou onvermijdelijk een uitwisseling van energie betekenen.

Deze theorie leek erop te wijzen dat de hoogste temperatuur waarbij supergeleiding op zou kunnen treden inderdaad rond de 30 K lag (-243 graden Celcius. Boven deze temperatuur kunnen vanwege de sterke roostertrillingen geen cooper-paren meer vormen.

De BCS theorie bleek precies te kloppen met het gedrag van metalen bij lage temperaturen. Maar in 1986 liep hij een deuk op: er werd supergeleiding ontdekt bij een aangename 'warme' temperatuur van maar liefst 35 Kelvin. (-238 graden Celsius)

De Keramische supergeleiders

Eind 1986 publiceerden Bednorz en Müller de ontdekking van supergeleiding bij 35 kelvin in een verbinding van koperoxide, barium en lanthaan. Er volgde een wereldwijde supergeleiders koorts.

In snel tempo werden vergelijkbare keramische verbindingen gevonden waarin bij steeds hogere temperaturen supergeleiding optrad.

Een doorbraak was de verbinding met yttrium in plaats van lanthaan; deze heeft een kritische temperatuur van ongeveer 95 kelvin (*-178 graden Celcius*) en dat is boven de temperatuur van vloeibaar stikstof 77 kelvin. (*-198 graden Celcius*)

Vloeibaar stikstof is makkelijk en goedkoop te maken, en kan voor het koelen van dit soort supergeleiders dan ook goed toegepast worden.

Hoewel BCS-theorie een groot succesverhaal is in het begrijpen en beschrijven van supergeleiding, blijkt dat niet elke supergeleider kan worden beschreven met deze theorie.

Dit betreft de materialen, welke supergeleidend blijven tot temperaturen boven 30 K. Dit in tegenstelling tot wat de BCS-theorie voorspelt.

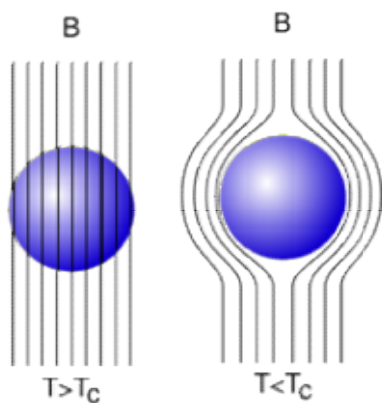
Dit wijst er op dat deze materialen - ook wel onconventionele supergeleiders genoemd - dus onmogelijk vallen te beschrijven. Het ontwikkelen van een goede theorie van onconventionele supergeleiders is een onopgelost probleem en vormt nog steeds een grote uitdaging voor hedendaags onderzoek in de fysica.

Dan het Meissnereffect

Een zeer belangrijk gevolg van supergeleiding is het Meissnereffect. Stel je brengt een geleider (zoals een metaal) in een magneetveld. Dan zal in deze geleider een stroom geïnduceerd worden, die op zijn beurt weer een magneetveld oproept.

Het blijkt dat dit geïnduceerde magneetveld tegengesteld van richting is aan het externe magneetveld (wet van Lenz).

Is deze geleider nu echter geen gewone geleider maar een supergeleider is, zal de geïnduceerde stroom geen elektrische weerstand ondervinden.



Het is dus mogelijk voor deze supergeleider om een intern magneetveld te creëren dat even groot is als het externe magneetveld.

Het gevolg is dat magnetische veldlijnen van een extern magneetveld een supergeleidende stof nooit kunnen penetreren. Dit effect is vernoemd naar zijn ontdekker Walther Meissner (1882-1974).

De weg van de minste weerstand

Naarmate er meer verschillende en makkelijker te produceren supergeleiders werden ontdekt, begonnen ook de toepassingen zich aan te dienen. Hoewel supergeleiders magnetische velden buitensluiten, zijn supergeleidende magneten bijzonder sterk. De ontwikkeling van deze magneten maakte het mogelijk om magnetisme te gebruiken voor medisch onderzoek in MRI- en NMR-scanners. Ze vonden toepassingen in massaspectrometers die de precieze samenstelling van stoffen kunnen achterhalen, en maakten het mogelijk om deeltjesversnellers op te schroeven naar extreem hoge energieën.

Het bijzondere gedrag van supergeleiders in magnetische velden leidde ook tot de ontwikkeling van de SQUID (superconducting quantum interference device). Met dit apparaatje kunnen zelfs de kleinste magnetische velden met microscopische precisie in kaart gebracht worden.

De meest tot de verbeelding sprekende toepassing van supergeleiding tot nu toe is ongetwijfeld de magneet zweeftrein. Een rails van supergeleidende magneten stoot de magnetische onderkant van een magneet zweeftrein af, zodat de trein een paar centimeter boven de rails blijft hangen. De trein beweegt dan zo goed als wrijvingsloos: een klein duwtje is al genoeg om de trein lange tijd in beweging te houden. Helaas betekent dat nog niet dat de trein weinig energie verbruikt. Het koelen van de supergeleidende magneten kost namelijk een heleboel stroom, vloeibaar stikstof en vloeibare helium.

Een nieuwe toepassing van supergeleiding is een demonstratieproject van TenneT met supergeleidende kabels om 150kV /50Hz te transporteren door stedelijk gebied.

Hoogspanningsnetbeheerder TenneT, de HAN, TU Delft, Universiteit Twente, IWO en Imtech Marine starten een demonstratieproject rondom supergeleiding. De partijen leggen de eerste supergeleidende kabel in het Nederlandse elektriciteitsnet, die tevens de langste supergeleidende hoogspanningskabel ter wereld wordt.

HAN = Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Hiermee wil men tegemoet komen aan de wens van de samenleving om meer hoogspanningsverbindingen ondergronds te brengen. Met deze supergeleidende kabels zou het in de toekomst makkelijker moeten zijn om hoogspanningsverbindingen in stedelijk gebied in te passen."

Superkabel

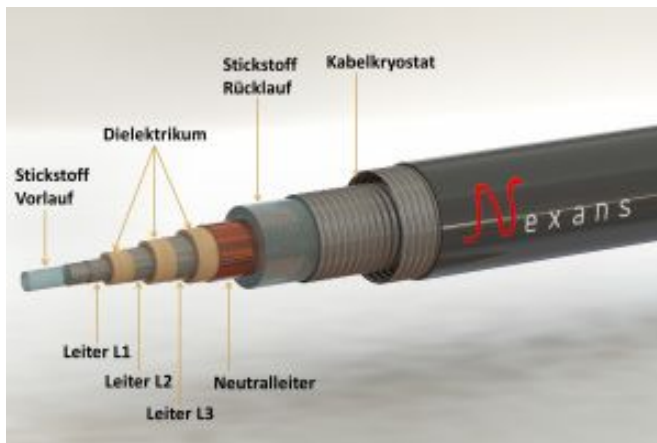
HTSC staat voor High Temperature Super Conducting. De supergeleider kan tot duizend maal meer stroom transporteren dan koper, waar de huidige ondergrondse hoogspanningsverbindingen meestal van worden gemaakt. Een supergeleidende kabel heeft door koeling tot -200 graden Celsius geen weerstand en creëert geen verliezen.

De supergeleidende status wordt bereikt door koeling met vloeibare stikstof. De huidige 150 kV kabels hebben vanwege warmteafgifte een ruimtebeslag nodig van 12 meter.

Doordat ze geen warmte produceren, kunnen HTSC-kabels veel dichter bij elkaar gelegd worden. Hiervoor is drie meter waarschijnlijk al voldoende. Daarnaast veroorzaakt de HTSC-kabel geen magnetisch veld.

Het grootste voordeel ten opzichte van conventionele, koperen hoogspanningskabels is dat de HTSC-kabels veel minder ruimte in beslag nemen.

Waar een bundel koperen kabels een vrije ruimte van ongeveer 12 m nodig heeft om warmte af te kunnen staan aan de omgeving, kunnen HTSC-kabels met een ruimte van ongeveer 3 m uit de voeten.



Dat maakt het een stuk aantrekkelijker om in stedelijk gebied ondergrondse hoogspanningskabels te plaatsen. 'In tegenstelling tot traditionele kabels beïnvloeden ze elkaars thermisch niet, dus kunnen ze tegen elkaar aan liggen.'

Verder heeft het halfgeleidermateriaal waaruit de kabel bestaat (yttrium-barium-koperoxide) een stroomdichtheid van 1 kA/mm^2 .

Dat is zo'n duizend keer dichter dan een koperen geleider.'

Recordlengte

Het supergeleidend materiaal wordt maar $1 \mu\text{m}$ dik aangebracht op een metalen stripje. Hieromheen komt een isolatie van papier en een metalen buis, met daaromheen nog een metalen buis.

Tussen de metalen buizen in komt vloeibaar stikstof te zitten met een temperatuur van $-200 \text{ }^\circ\text{C}$. Hierdoor heeft de kabel geen elektrische weerstand meer en dus geen energieverlies.

Het stikstof wordt onder druk door de kabel gepompt, om te zorgen dat het vloeibaar blijft.

Vervanging van de huidige hoogspanningskabels door HTSC-kabels zal nog wel enkele decennia duren, maar met het demonstratieproject zet TenneT wel de eerste stappen.

De 2 tot 4 km lengte is momenteel al grensverleggend, want de huidige langste HTSC-kabel, in Essen, is 1 km lang. Het is een proces van

geleidelijk opschalen waarbij we uitvoerig kunnen testen hoe de koelmachines, stikstof en warmtecapaciteit zich zullen gedragen.

De supergeleider kan tot 1000 maal meer stroom transporteren dan koper, waar de huidige ondergrondse hoogspanningsverbindingen meestal van worden gemaakt.

Bulktransport voor de toekomst

De mogelijkheid om grote hoeveelheden stroom te vervoeren, wordt steeds belangrijker. Dat heeft onder andere te maken met de opkomst van duurzame elektrische energie. Onder invloed van het weer ontstaan enorme energiepieken in het elektriciteitsnet.

In het noorden van Duitsland staan bijvoorbeeld veel windmolens die in relatief korte perioden grote hoeveelheden stroom produceren. De elektriciteit kan niet altijd worden verbruikt in de regio, waardoor de stroom het net flink belast.

Supergeleidende kabels kunnen die belasting wel aan. 'Met de capaciteit die deze kabels aankunnen zou er een elektriciteitssnelweg gebouwd kunnen worden naar het zuiden van Duitsland, waar veel industrie zit die de elektriciteit goed kan gebruiken.

De techniek is echter nog niet zo ver ontwikkeld dat het over lange afstanden toegepast kan worden.'

Ondergrondse kabels

Ook kortere HTSC-kabels leveren al voordelen op. De technologie komt tegemoet aan een aantal wensen uit de samenleving. Deze heeft geen magnetisch veld en kan bovendien onder de grond worden gelegd in steden.

Die verkabeling is moeilijk uit te voeren met conventionele hoogspanningskabels. Die geven, in tegenstelling tot de supergeleidende kabel, warmte en elektromagnetische velden af en hebben daardoor veel ruimte nodig. In dichtbevolkt gebied liggen riolen, glasvezelkabels, telefoonkabels en waterleidingen in de weg.