

Supergeleiding, hoe werkt dat?

Ir.Benno Aalderink

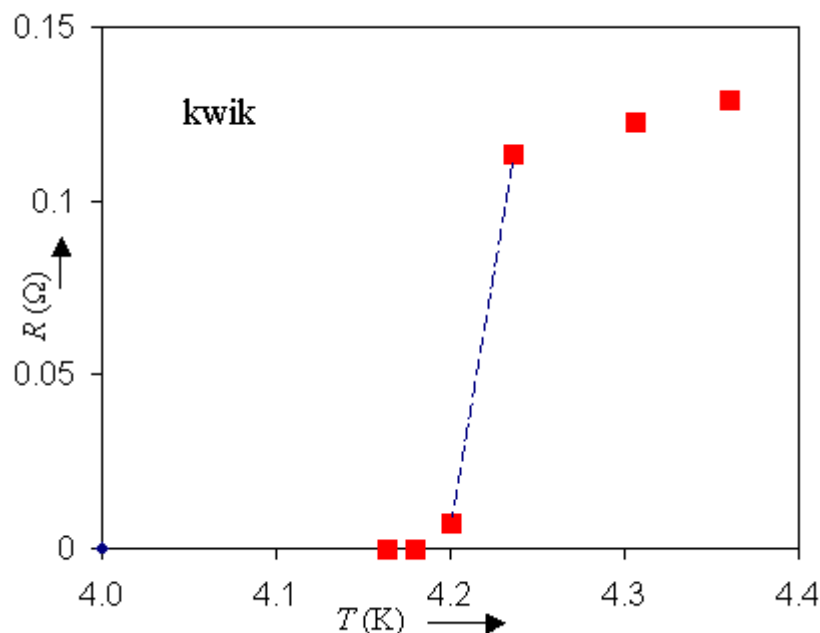
Onderwerp: [atoomfysica](#)
[elektrische stroom](#)
[elektrisch veld en magnetisch veld](#)

In 1911 deed de Nederlander Heike Kamerlingh Onnes een zeer merkwaardige ontdekking. Hij merkte dat de elektrische weerstand van een beetje kwik daalde als het werd afgekoeld. Tot zover geen verrassingen. Echter toen hij dit kwik afkoelde tot minder dan 4.2 Kelvin, merkte hij dat de weerstand plotseling totaal verdween. Met andere woorden, wakte men een stroom op in een elektrische stroomkring bestaande uit kwik dat kouder is dan 4.2 K dan zou deze stroom voor eeuwig blijven bestaan.

Samengevat

Het fenomeen van het verdwijnen van de elektrische weerstand van een materiaal wordt aangeduid met de term supergeleiding. Na de ontdekking van Onnes is er veel onderzoek gedaan naar supergeleiding. Al snel werd duidelijk dat dit fenomeen zich ook bij andere materialen voordeed. De temperatuur waarbij een bepaalde stof supergeleidend wordt, noemt men ook wel de kritische temperatuur (T_c). Pas in 1956 is er een sluitende theorie gevonden dat de supergeleiding verklaarde (BCS-theorie). Er zijn koperverbindingen ontdekt die al bij hogere temperatuur supergeleidende eigenschappen vertonen. Daarover zijn nog veel vragen. De zoektocht gaat door.

Deze pagina is een onderdeel van het thema "supergeleiding". Het thema supergeleiding omvat artikelen, interviews, uitleg, sommetjes. De schrijvers van de thema gaan in op de natuurkunde achter dit verschijnsel maar geven ook ruimschoots de aandacht aan de bijdrage die supergeleidende materialen leveren aan de techniek en de gezondheidszorg. Er wordt een beeld geschetst van een onderzoeksgroep die werkt aan supergeleiders. Het totale overzicht vind je [hier](#).



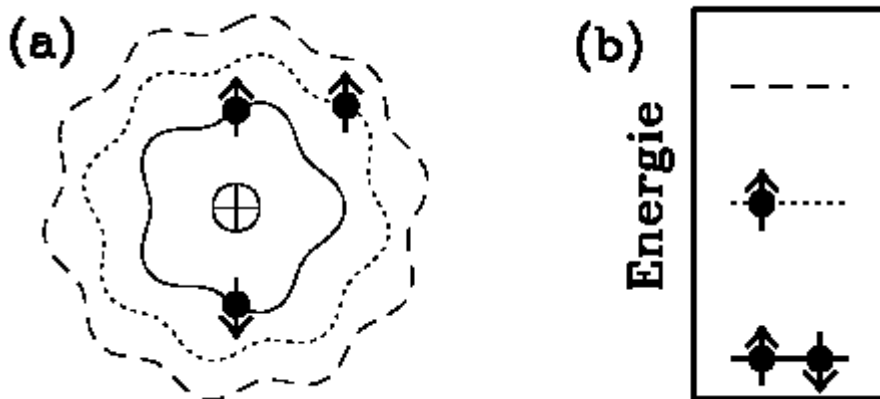
Figuur 1. De elektrische weerstand van kwik wordt nul onder een bepaalde temperatuur. Deze overgang treedt plotseling op bij $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Dit verschijnsel werd het eerst waargenomen onder leiding van de Nederlander Heike Kamerlingh Onnes.

Energiehuishouding door elektronen

Hoe ontstaat supergeleiding nou? Daarvoor moeten we eerst wat vertellen over de energiehuishouding van elektronen in metalen. Elektronen rond een atoom kunnen niet iedere willekeurige hoeveelheid energie hebben. Ze hebben bepaalde discrete energiewaarden, de zogenaamde energietoestanden.

Naast een bepaalde energie hebben de elektronen ook een zogenaamde spin. Een spin is een bepaalde rotatie om zijn eigen as. Maar ook hier blijkt dat alleen een beperkt aantal spins mogelijk is. Een spin omhoog en een spin omlaag zijn de enige mogelijkheden (zie ook figuur 2).

Het Pauli-verbod. Niet ieder willekeurig elektron kan zich in iedere energietoestand begeven. In één energietoestand mogen zich geen elektronen met een gelijke spin bevinden (het zogenaamde Pauli-verbod). Indien een metaal wordt afgekoeld, zullen de elektronen terugzakken naar steeds lagere energietoestanden. Hierbij volgen ze dus de regels van het Pauli-verbod. Dat betekent dat alleen een elektron met een spin omhoog en een elektron met een spin omlaag zich in dezelfde energietoestand kunnen bevinden. Wat is dus de laagste energetische toestand van de elektronen? Dat is een toestand waarbij laag voor laag de laagste energetische toestanden zijn volgestapeld met paren van elektronen met ongelijke spin.



Figuur 2. a. Elektronen kunnen zich slechts in bepaalde energietoestanden bevinden. Dit wordt ook goed beschreven door het model van Bohr en de hypothese van Broglie.

De Broglie hypothese. Broglie beschouwde het elektron als staande golf. Dit wordt ook wel het 'golf-deeltje dualisme' genoemd. De gehele kwantummechanica is gebaseerd op dit principe. Er kunnen geen twee elektronen met gelijke spin in een gelijke energietoestand zijn. De elektronen worden als het ware gestapeld. Te beginnen bij de plaatsen met het laagste energieniveau. Wil je meer weten over de elektronconfiguratie van een atoom of molecuul? Kijk dan eens op de volgende pagina van wikipedia.org.

In metalen zijn de atomen gerangschikt in een rooster. Daarbij zijn de elektronen, die zich vrij kunnen bewegen, de ladingsdragers. Gaat er een stroom lopen door een metaal, dan wil dat zeggen dat de elektronen zich verplaatsen door het rooster. Hierbij worden ze gehinderd door de metaal-atomen. Door botsingen met deze atomen verliezen de elektronen energie en zo ontstaat er elektrische weerstand.



Figuur 3. In deze animatie is te zien dat vrije elektronen in een geleider gehinderd worden door het rooster.

De botsingen zijn niet elastisch en dus komt er warmte vrij. Aan dit verschijnsel kun je veel plezier beleven. Denk maar aan de de warmteontwikkeling in een elctrisch kachelkje. In sommige toepassingen is deze warmteontwikkeling echter zeer ongewenst .

Twee voorbeelden waar warmteontwikkeling gewoon energieverlies betekent en bovendien technische problemen veroorzaakt zijn MRI en de zweeftrein. Zie "gerelateerde artikelen" bovenaan.

Cooperparen

Onder deze kritische temperatuur gaan de twee elektronen in dezelfde energetische toestand paren vormen. Daardoor wordt de energie per elektron nog verder verlaagd. Deze paren die zo gevormd zijn heten Cooperparen.

Bij een stof onder de kritische temperatuur zijn de ladingsdragers dus niet de afzonderlijke elektronen, maar de Cooperparen (met een lading $2e^-$). De afstand tussen de twee elektronen van een Cooperpaar is echter relatief groot. Hierdoor is het voor een Cooperpaar als geheel erg moeilijk om te botsen met een enkel atoom. Dit gebeurt dus ook zeer weinig. De paren kunnen ongehinderd voortbewegen door de stof. Daardoor is ook de elektrische weerstand verdwenen. Mensen die geïnteresseerd zijn in de exacte manier waarop Cooperparen ontstaan, moedigen wij aan om de literatuurverwijzingen te raadplegen.

Literatuurverwijzing: M. Cyrot en D. Pavuna, Introduction to superconductivity and high-Tc materials, World Scientific, 1991. M. Tinkham, Introduction to superconductivity, McGraw-Hill, 1996.

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 proef. Een vaak gebruikte demonstratie van het Meissnereffect - in combinatie met een hoge-Tc supergeleider - is de proef waarin men een klein magneetje in de lucht laat zweven. De proef gaat als volgt. Neem een stukje hoge-Tc supergeleidend materiaal, met een kritische temperatuur boven het kookpunt van stikstof. Leg dit materiaal in een open piepschuimen bakje. Vervolgens giet je er vloeibaar stikstof over. Dan is dit materiaal supergeleidend gemaakt. Als je nu een klein stukje magnetisch materiaal boven de supergeleider brengt, induceert dit magneetje een magneetveld in de supergeleider. Dat magneetveld stoot het magneetje zelf af. Als het magneetje niet te groot is, kan deze afstotende kracht de zwaartekracht overwinnen. Zo kun je het magneetje laten zweven!

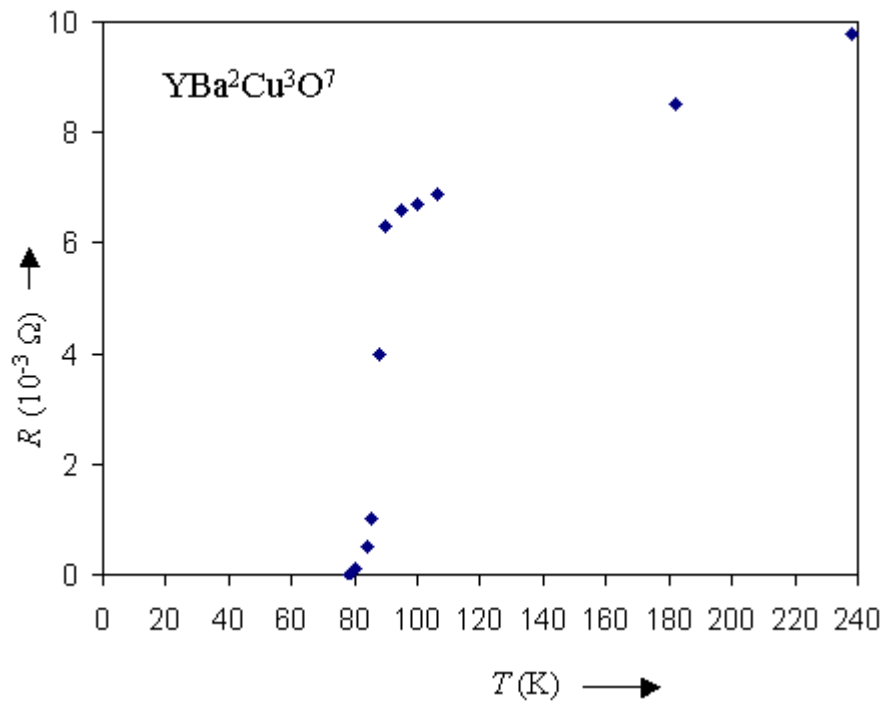
Figuur 4. Het Meissnereffect in beeld gebracht

Het blijkt wel dat dit effect niet onbegrensd is. Als het externe magneetveld namelijk groot genoeg is, kan het de Cooperparen verbreken. Daarmee is het ook gedaan met de supergeleiding en het Meissnereffect. Deze grenssterkte van het magnetische veld wordt het kritische veld (B_c) genoemd. Deze waarde ligt hoger, wanneer de supergeleider verder onder de kritische temperatuur ligt. B_c is dus temperatuursafhankelijk.

Hoge-Tc supergeleiders

Sinds de ontdekking van de supergeleiding heeft men grote mogelijkheden gezien voor de toepassing ervan. Denk aan stroomkabels waarbij geen verliezen meer optreden, enorm sterke elektromagneten voor bijvoorbeeld zweeftreinen etc. Het grote probleem is echter dat de kritische temperatuur zeer laag ligt. Voor kwik heeft men bijvoorbeeld vloeibaar helium nodig om het te koelen. Dit is extreem duur en kost meer dan het op zal leveren. Men is dus op zoek naar stoffen die supergeleidend worden bij veel minder lage temperaturen.

In 1986 ontdekten Bednorz en Müller, onderzoekers van IBM, dat verschillende koper oxiden ook supergeleidende eigenschappen hebben. Het grote verschil is echter dat de kritische temperatuur van deze stoffen veel hoger liggen dan die van andere supergeleiders. De stof $Tl_2Ca_2Ba_2Cu_3O_{10}$ heeft bijvoorbeeld een kritische temperatuur van 125 K.



Figuur 5. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ is een voorbeeld van een koperlegering die supergeleidend wordt bij "hoge" temperaturen. Supergeleiding bij kamertemperatuur is nog lang geen realiteit.

Opeens kwamen de dagelijkse toepassingen een stuk dichterbij. Ook momenteel wordt er nog zeer veel onderzoek verricht, met name op het gebied van de hoge- T_c supergeleiders. Er is echter nog geen sluitende verklaring gevonden voor het supergeleidende gedrag van deze stoffen.