

Het verschijnsel supergeleiding

D. Blank, Vakgroep Lage Temperaturen, Faculteit Technische Natuurkunde, Universiteit Twente

De ontdekking van nieuwe supergeleidende materialen met overgangstemperaturen boven het kookpunt van vloeibaar stikstof heeft interessante (nieuwe) toepassingsmogelijkheden voor supergeleiding aangeboord. Voor de grootschalige toepassing van supergeleiders zoals magneten zullen we voorlopig aangewezen zijn op de klassieke supergeleiders. De toepassing van supergeleiding in de dunnelagentechnologie zal door de nieuwe ontdekking steeds meer zijn intrede doen.

De eerste toepassing van deze nieuwe klasse van supergeleiders is het ondersteunen van het natuurkunde-onderwijs, door het tonen van het Meissner-effect en het weerstandsgedrag als functie van de temperatuur, immers het verschijnsel blijft fascinerend.

Inleiding

Begin 1987 werd het wereldje van de natuurkundigen opgeschrikt met een nieuwe ontdekking, namelijk supergeleiding boven het kookpunt van stikstof. Wat bijna niemand voor mogelijk had gehouden werd realiteit. Een golf van publiciteit met zich mee trekkend, gingen vele onderzoekers aan de slag. In diverse magazines verschenen beschouwende artikelen over de veranderingen die "de ontdekking van de afgelopen jaren" tot gevolg zou hebben. Hoe is de stand van zaken na twee jaren van wereldwijd onderzoek? Heeft de nieuwe supergeleider de klassieke supergeleider verdrongen? De auteur wil met behulp van dit artikel daar enig inzicht in te geven, maar eerst wordt stilgestaan bij het verschijnsel supergeleiding, de ontwikkeling die het heeft meegemaakt en de toepassingen die het heeft verworven.

Geleiding

Geleiding van elektriciteit vindt plaats door middel van het bewegen van ladingdragers. In metalen zijn dit elektronen en in halfgeleiders elektronen en "gaten". In vloeistoffen zijn het positieve en/of negatieve ionen en in gassen zowel elektronen als ionen. Het geleidingsvermogen is van stof tot stof verschillend. Stoffen met een groot geleidingsvermogen noemt men geleiders, die met een zeer klein geleidingsvermogen, isolatoren.

De elektronen die deelnemen aan de beweging zijn de vrije elektronen. In de meeste metalen zijn er per atoom een à twee vrije elektronen beschikbaar, die zonder uitwendig elektrische krachten een willekeurige beweging

uitvoeren en dus netto geen elektrische stroom opleveren. Een uitwendig elektrisch veld daarentegen zorgt voor een netto stroom van de vrije elektronen in een richting tegengesteld aan die van de veldsterkte. De geleiding, die men daarbij meet, is per stof verschillend. Het geleidingsvermogen σ is afhankelijk van de beweeglijkheid $[\mu]$ van de ladingdragers en het aantal $[N]$. Er geldt

$$\sigma = N \cdot e \cdot \mu,$$

waarin e de lading van een elektron is. In metalen is het aantal ladingdragers, dat voor de geleiding beschikbaar is, $\approx 10^{28}$ per m^3 en vrijwel temperatuur-onafhankelijk. De beweeglijkheid

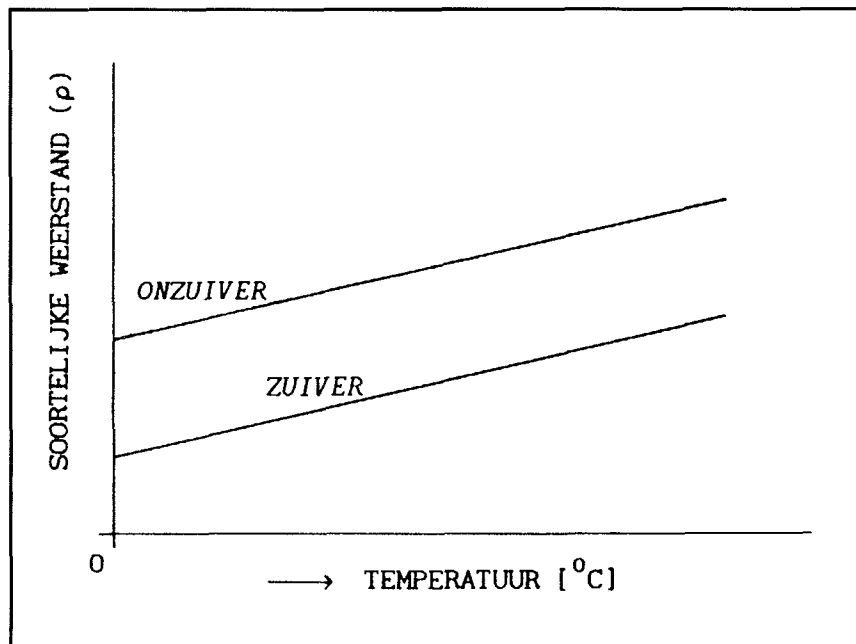
hangt af van het aantal botsingen die de ladingdragers ondergaan. Men spreekt ook wel van de vrije weglengte. Deze wordt kleiner naarmate er meer botsingen plaatsvinden. Dit is het geval wanneer de temperatuur stijgt. De amplitude van de thermische vibratie van de atomen wordt groter, waardoor de kans op botsingen toeneemt. De beweeglijkheid (vrije weglengte) is dus wel temperatuurafhankelijk. In een groot temperatuurgebied, rond $0^\circ C$, is de vrije weglengte omgekeerd evenredig met de temperatuur. Voor de specifieke weerstand geldt daarom

$$\rho_{(t)} = \rho_{(0)}(1 + \alpha t),$$

waarin $\rho_{(0)}$ de specifieke weerstand is bij $0^\circ C$ en α de temperatuurcoëfficiënt.

Voor de meeste metalen ligt α tussen de 20 à 50×10^{-4} . Constantaan (50% Cu - 50% Ni) en manganien (84% Cu, 4% Ni en 12% Mn) hebben een zeer kleine α , vandaar dat deze materialen gebruikt worden voor precisieweerstandgebruik (ze zijn immers temperatuur-onafhankelijk).

De grootte van $\rho_{(0)}$ is sterk afhankelijk van de zuiverheid van het materiaal, dit in tegenstelling tot de helling



Figuur 1 Soortgelijke weerstand als functie van de temperatuur voor zuivere en onzuivere metalen (de regel van Mathiessen)

$\alpha \cdot \rho_{(0)}$, die vrijwel onafhankelijk van de mate van zuiverheid is, zie *figuur 1* (bekend als de regel van Mathiessen) Bij zeer lage temperaturen voldoet bovengaande betrekking niet meer Bij de meeste metalen gaat de specifieke weerstand naar een restwaarde toe. In sommige vaste stoffen is het aantal vrije elektronen zeer gering De elektronen zijn gebonden en slechts door temperatuurbewegingen krijgt een gering aantal voldoende energie om die verbinding te verbreken We noemen deze materialen *halfgeleiders* Halfgeleiders hebben een negatieve temperatuurcoëfficiënt ($\alpha < 0$), terwijl temperatuurfuctuaties een veel grotere invloed hebben op het geleidingsvermogen van halfgeleiders dan dat van geleiders Bekende halfgeleiders zijn germanium en silicium Ze worden door hun eigenschappen veel gebruikt in de elektronica, zoals halfgeleiderdiodes en transistoren Ze zijn ook uitermate geschikt als thermometer voor het meten van lage temperaturen

Stoffen waarvan de soortelijke weerstand zeer groot is ($\rho \geq 10^6 \Omega m$), noemt men isolatoren. Vrijwel alle kunststoffen, maar ook porcelein en kwartsglas zijn voorbeelden van isolatoren

Supergeleiding

Nadat in 1908 het edelgas helium vloeibaar gemaakt was door Kamerlingh Onnes te Leiden bij een temperatuur van 4,2 K [-269 °C], lag het voor de hand de weerstand van verschillende materialen als functie van de temperatuur te bepalen Bij die experimenten ontdekten de onderzoekers te Leiden in 1911 het verschijnsel supergeleiding Bij het meten aan kwik zag men bij 4,15 K de weerstand plotseling onmeetbaar klein worden. Na eerst enig wantrouwen en ongeloof had men toch een verschijnsel waargenomen, dat de op dat moment algemeen geldende theorieën over het weerstandsgedrag bij lage temperaturen danig in de war schopte Inmiddels is supergeleiding een algemeen begrip geworden in de natuurkunde. Vele fysici hebben theorieën opgesteld, die de supergeleiding enigszins verklaren en vele methoden zijn gevonden om supergeleiding in de praktijk toe te passen, waarover later meer Eerst zullen we wat dieper op het verschijnsel supergeleiding in gaan.

Eigenschappen en kenmerken

a. Elektrische eigenschappen

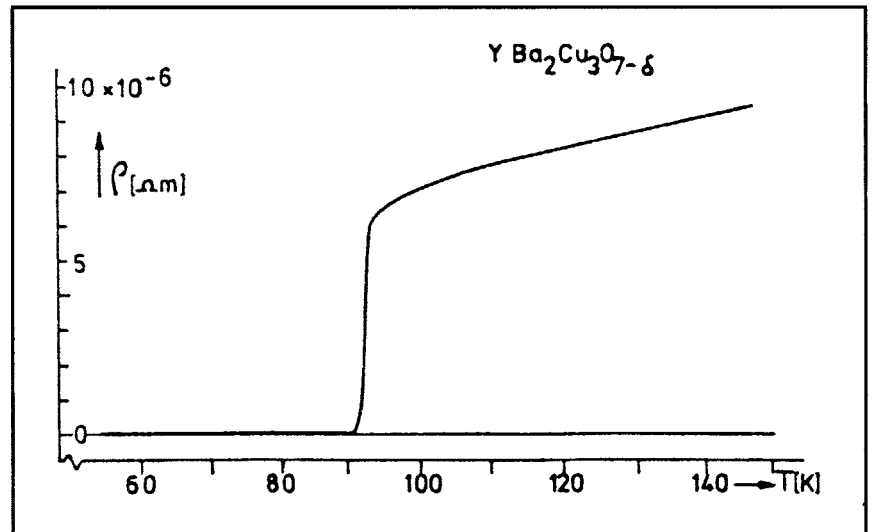
De bekendste eigenschap van een su-

pergeleider betreft zijn elektrische weerstand Deze is onmeetbaar klein. Wanneer we een stroom door een supergeleider sturen zal de spanning over het preparaat binnen de meetnauwkeurigheid nul zijn Een kringstroom die in de supergeleider loopt zal dus niet uitdempen De temperatuur waarbij het materiaal van de normale naar de supergeleidende toestand gaat noemen we de kritische overgangstemperatuur T_c . Deze overgang is meestal zeer scherp (minder dan 0,1 °C) en hangt af van de zuiverheid van het materiaal, des te zuiverder, des te scherper de overgang. In *figuur 2* is een voorbeeld gegeven van zo'n overgang. De stroom die we door een supergeleider sturen kan niet onbepaald groot zijn Wanneer de stroomsterkte een kritische grens overschrijdt, dan wordt de supergeleider weer normaal Deze kritieke

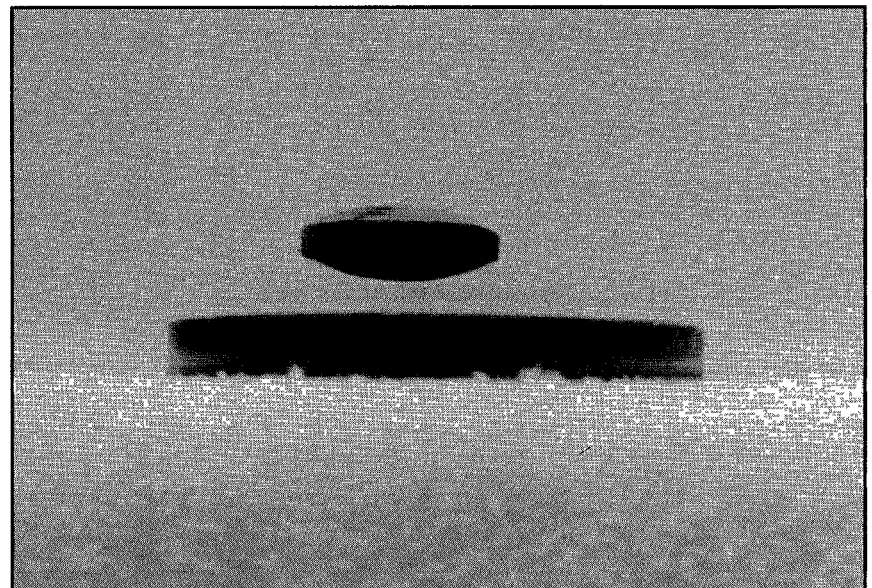
stroom is afhankelijk van het materiaal en de temperatuur van de supergeleider Een supergeleider krijgt ook een weerstand wanneer we er een wisselstroom met een te hoge frequentie door sturen

b. Magnetische eigenschappen

Een supergeleider die beneden zijn overgangstemperatuur wordt afgekoeld zal het magneetveld, wat zich binnen de supergeleider bevindt, uitstoten. Binnen een supergeleider is de magnetische inductie nul We noemen dat het Meissner-effect. Stel de supergeleider bestaat uit een schijfje Wanneer we deze afkoelen beneden T_c dan zullen aan het oppervlak stromen gaan lopen, die een magneetveld representeren gelijk (maar wel tegengesteld) aan het magneetveld dat zich in het schijfje bevond voordat het supergeleidend werd



Figuur 2 Weerstandsverloop van een supergeleider als functie van de temperatuur De overgangstemperatuur is 93 Kelvin



Figuur 3 Een magneetje "zweeft" boven supergeleidend materiaal

Leggen we een magneetje op de supergeleider dan zal, wanneer we het afkoelen tot onder zijn overgangstemperatuur, de supergeleider proberen het opgelegde magneetveld uit te stoten. Het resultaat zal zijn een afstotende kracht, die het magneetje doet zweven, zie *figuur 3*. De opgewekte stromen blijven lopen, zij ondervinden immers geen weerstand. We kunnen ook de supergeleider zonder magneetje afkoelen en wan-

neer het supergeleidend is er langzaam een magneetje boven plaatsen. In dat geval zullen t.g.v. het magneetveld, stroompjes in de supergeleider gaan lopen, die het magneetveld tegen zullen werken met hetzelfde resultaat: het zweven van het magneetje.

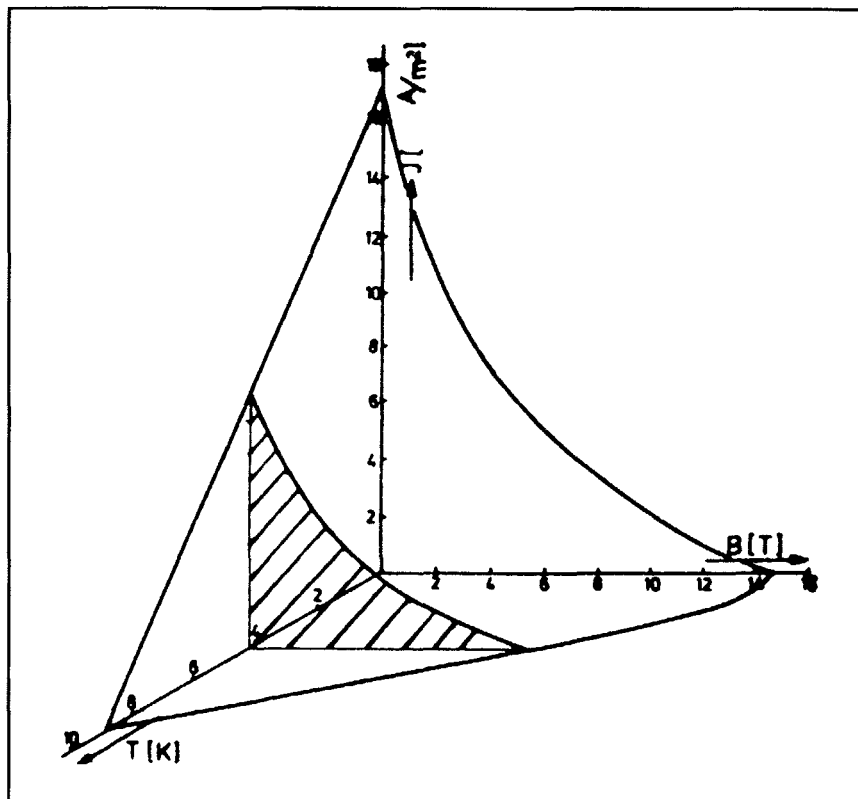
Ook deze magnetische eigenschappen van een supergeleider kennen hun beperkingen. Wanneer het aangelegde magneetveld te groot is (we

noemen dat de kritieke veldsterkte), wordt de supergeleider weer normaal. Daarnaast is het uitstoten van het magnetisch veld niet voor alle supergeleiders gelijk. Bij een type I supergeleider is het Meissner-effect (het uitsluiten van het magnetisch veld) volledig. Voor een type II supergeleider is dat niet het geval. Het veld dringt in de vorm van fluxlijnen, die een normaal gebiedje vormen, het materiaal binnen. Deze normale gebiedjes zijn bijvoorbeeld roosterfouten of verontreinigingen in het materiaal. De zuivere metalen, welke supergeleidend worden, zijn vrijwel allemaal type I supergeleiders. De meeste supergeleiders die in de praktijk gebruikt worden, zijn type II supergeleiders. Ze hebben namelijk een veel grotere kritieke stroomdichtheid en een hogere kritieke veldsterkte.

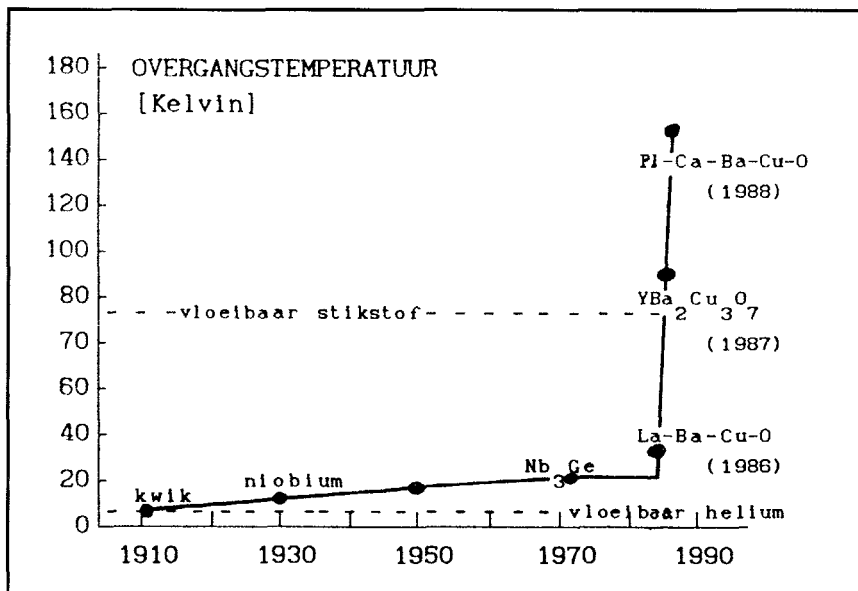
De eigenschappen en beperkingen van supergeleiders kunnen in één grafiek ondergebracht worden, zie *figuur 4*. Hierin is duidelijk de temperatuurafhankelijkheid van de kritieke stroomdichtheid en veldsterkte te zien. Het gearceerde oppervlak geeft de eigenschappen van de supergeleider weer bij 4,2 K, het kookpunt van vloeibaar helium.

Nieuwe keramische supergeleiders

In de afgelopen jaren is er veel onderzoek verricht aan het verbeteren van de eigenschappen van supergeleiders. Daarvan is het verhogen van de supergeleidende overgangstemperatuur er een. De eerst ontdekte supergeleiders hadden een T_c (kritische overgangstemperatuur) van 3 à 5 K. Het duurde tot 1972 voordat men een legering (Nb_3Ge) gevonden had met een $T_c = 23,3$ K. Het baarde dan ook enige opschudding toen in 1986 *Bednorz* en *Muller* van I.B.M. te Zurich een materiaal vonden, dat bij 30 Kelvin reeds supergeleiding vertoonde. Vooral de combinatie van stoffen: lanthaan, barium, koper en zuurstof gaf aan dat vele onderzoekers in de verkeerde richting hadden gezocht. Met het resultaat van C. Chu van de universiteit van Houston (U.S.A.), onstond echt het besef dat er een geheel nieuwe klasse van materialen supergeleidend kan worden, en wat belangrijk is, met een supergeleidende overgangstemperatuur van ongeveer 90 K. Dit betekent dat het voldoende is om het materiaal te koelen met vloeibaar stikstof met een kooktemperatuur van 77 K i.p.v. het veel duurder vloeibare helium. In *figuur 5* staat het verloop van de overgangstemperatuur in de loop der jaren weergegeven, waarin duidelijk



Figuur 4 Eigenschappen van een supergeleider. Binnen het oppervlak is het materiaal supergeleidend. Het gearceerde oppervlak geeft de veldsterkte B [Tesla] en de stroomdichtheid J [A/m^2] bij 4,2 Kelvin.



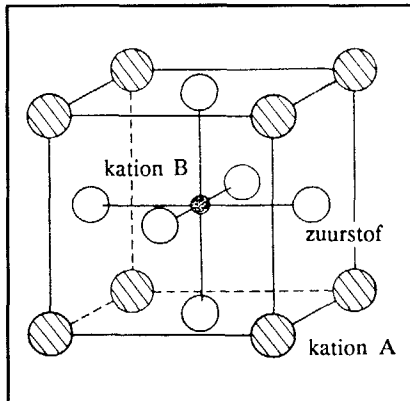
Figuur 5 Verloop van de supergeleidende overgangstemperatuur in de loop der jaren.

tot uiting komt de aanzet die Bednorz en Muller gegeven hebben om te komen tot supergeleiders met hoger T_c 's

Na de ontdekking van de groep uit Houston hebben vele onderzoekers zich op dit thema gestort. Hierbij heeft een aantal zich geconcentreerd op het vinden van nieuwe verbindingen, anderen hebben geprobeerd de eigenschappen van het ontdekte materiaal te verbeteren. Inmiddels is de hoogste overgangstemperatuur 140 Kelvin (juni 1989), gemeten aan een keramische verbinding met thallium, barium, calcium, koper en zuurstof

De hoge T_c supergeleider $Y_1Ba_2Cu_3O_7$

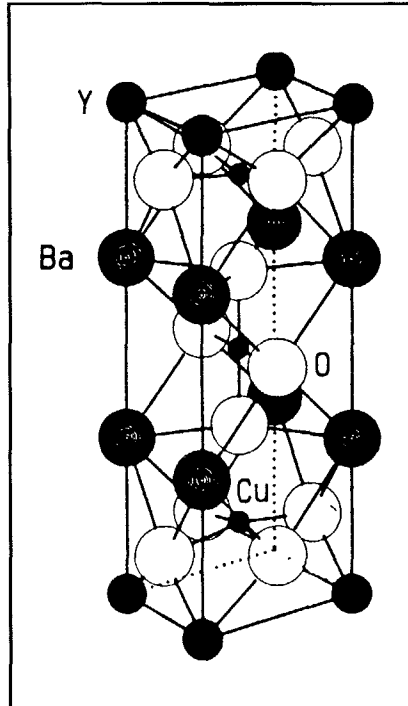
De structuur van de nieuwe keramische materialen lijkt sterk op een bekende reeks, de z.g. perovskieten. Perovskieten zijn materialen (veelal oxydes) die bestaan uit een opstapeling van kubische eenheidscellen. Het eenvoudigste rooster heeft een ABO_3 structuur (zie *figuur 6*, met



Figuur 6 Het ABO_3 -rooster

het A kation op de hoekpunten, het B kation in het centrum en de zuurstof in de vlakken. Uit de figuur valt te zien dat het kation A omringd wordt door 12 zuurstof atomen en het kation B door 6. Vele soorten perovskieten zijn gevonden. De afgelopen jaren zijn er ook veel meer toepassingen gekomen. Deze liggen op het gebied van de ferro- piezo-elektricititeit en in de optica. In het verleden zijn er ook perovskieten gevonden die supergeleidend werden, zij het met een lage overgangstemperatuur.

In *figuur 7* staat de kristalstructuur van de keramische hogetemperatuur supergeleider $YBa_2Cu_3O_7$ weergegeven. De overeenkomsten met de perovskieten is duidelijk te zien. Het zijn eigenlijk drie eenheidscellen op elkaar. Het grote verschil is het aantal zuurstofatomen. Een aantal zuurstofposities is onbezet. Juist voor de su-



Figuur 7 Het rooster van de keramische supergeleider $YBa_2Cu_3O_7$

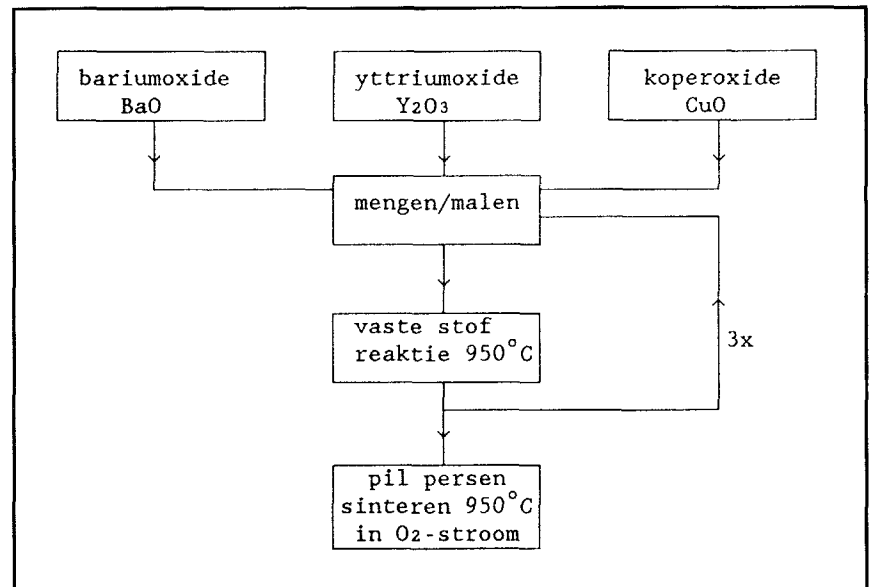
pergeleidende eigenschappen blijkt het zuurstofgehalte bijzonder belangrijk. Bij een nadere bestudering van het rooster valt op dat er twee verschillende posities van het koperatoom zijn:

- Cu1: Deze wordt door vier zuurstofatomen omringd en komt één keer voor per eenheidscel.
- Cu2: Deze wordt door vijf zuurstofatomen omringd en komt twee keer voor per eenheidscel.

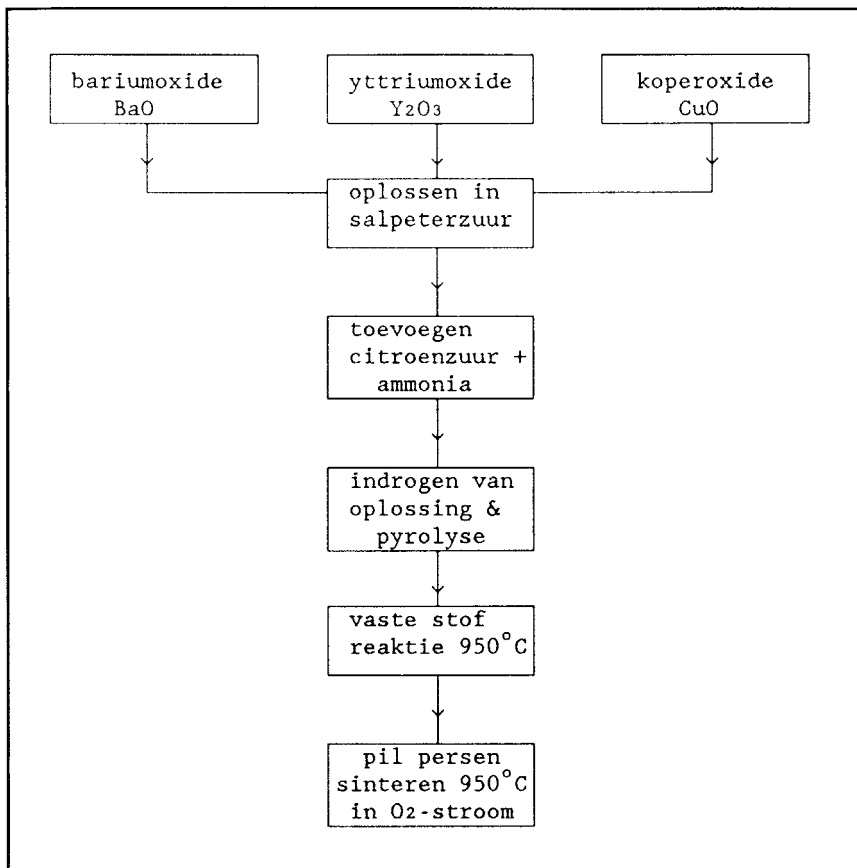
Met behulp van neutronendiffractie zijn de eenheidscelparameters bepaald. Hieruit volgt dat de a- en b-as bijna aan elkaar gelijk zijn (respectievelijk 3,82 Å en 3,88 Å), terwijl de c-as

ongeveer 3 maal de b-as is (11,67 Å) [$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$]

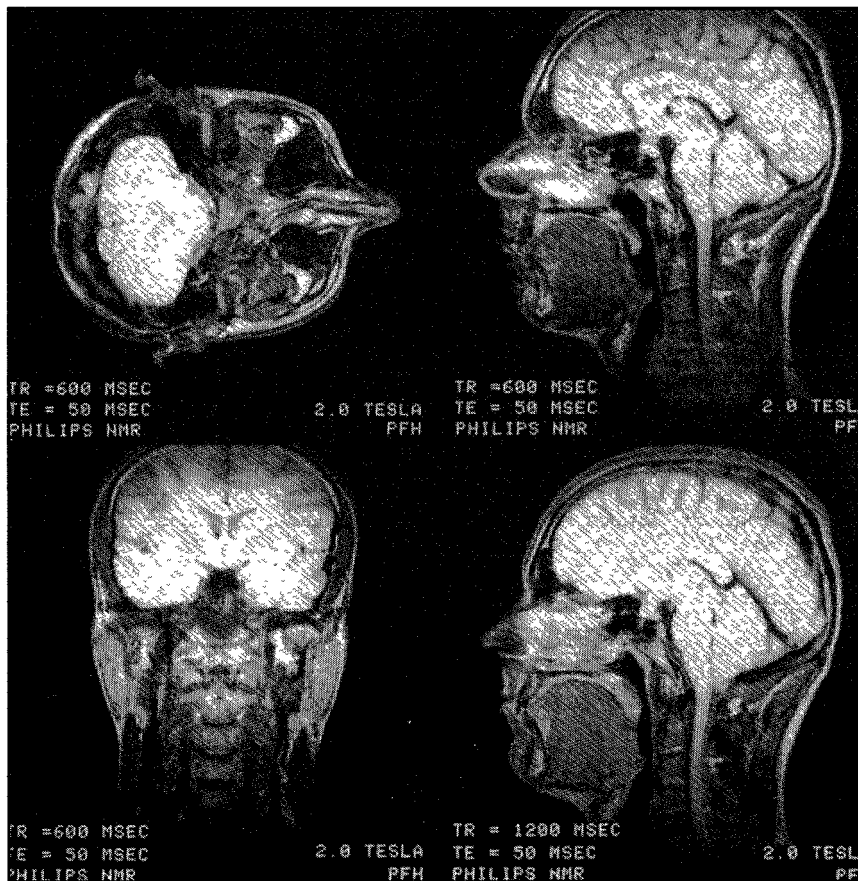
Er zijn verschillende preparatiemethoden voor deze supergeleiders. De meest gebruikte is die van de vastestofreactie, zie *figuur 8a*. Als uitgangsubstanties worden de oxydes van de metalen genomen: Y_2O_3 , CuO en BaO . Ze worden in de juiste verhouding in poedervorm bij elkaar gevoegd en grondig gemalen en gemengd. Het mengsel wordt gedurende enkele uren verhit tot $950^\circ C$, waarbij er een (vastestof)-reactie plaatsvindt. Het verkregen poeder wordt weer gemalen en het geheel wordt een aantal malen herhaald om een zo homogeen mogelijk materiaal te krijgen. Vervolgens wordt het poeder in een pilletje geperst en vindt de laatste warmtebehandeling plaats. Het geperste poeder wordt hierbij gesinterd bij ongeveer $950^\circ C$. Belangrijk is dat dit gebeurt in een zuurstofrijke omgeving. De beste supergeleidende eigenschappen krijgt het materiaal wanneer er zoveel mogelijk zuurstof inzit. De zuurstofopname vindt plaats tijdens het afkoelen. Dat moet dan ook langzaam gebeuren. Op zich is deze methode eenvoudig en doeltreffend. Het is echter bijna onvermijdelijk dat er verontreinigingen in het materiaal gaan zitten, die de supergeleidende eigenschappen nadelig beïnvloeden. Vandaar dat op de universiteit Twente een alternatieve methode is ontwikkeld (zie *figuur 8b*). Hierbij worden de oxyden in de juiste hoeveelheden in salpeterzuur opgelost. Bij deze oplossing wordt citroenzuur toegevoegd en het geheel wordt geneutraliseerd met ammonia tot een $pH = 7$. De oplossing is nu helder. Het betekent dat alle metaalionen die in de oplossing zitten goed gemengd kunnen worden. Vervolgens wordt de



Figuur 8a Preparatie via de vastestof-methode



Figuur 8b Preparatie via de nat-chemische-methode



Figuur 9 Scan-foto met behulp van M R I. De afbeelding toont een "magnetische doorsnede" van het hoofd. Hiermee wordt de hoeveelheid waterstofkernen zichtbaar gemaakt.

oplossing met kleine beetjes tegelijk ingedroogd op een kookplaatje. Bij voldoende dikte (en temperatuur) zwelt de ingedikte vloeistof en er ontstaat een zelfontbranding, ook wel pyrolyse genoemd, welke gepaard gaat met een grote koolzuurontwikkeling. Wat er naderhand overblijft is een bekersglas vol zeer fijn poeder met de juiste mengverhouding. Dit poeder hoeft slechts een keer verhit te worden tot 950 °C om de vastestofreactie plaats te laten hebben en het is klaar voor verder gebruik. Grote voordelen van deze methode zijn, de zuiverheid van het poeder (b.v. geen verontreinigingen door het malen), de snellere manier van bereiden en gemak om grotere hoeveelheden ineens te maken.

Toepassingen van supergeleiding

Door de speciale eigenschappen van de supergeleiding is het voor een aantal toepassingen bijzonder geschikt. Voor de duidelijkheid splitsen we deze in twee gebieden, te weten, de grootschalige en de kleinschalige toepassingen.

Grootschalige toepassingen

Bij grootschalige toepassingen denken we aan magneet-technologie en lange transportgeleiders voor stroom. Met behulp van supergeleidend draad zijn grote en sterke magneten te maken. Deze magneten worden gebruikt bij energieproductie zoals kernfusie, in de hoge-energie-fysica (deeltjesversnellers) of in zweeftreinen. Supergeleidende magneten worden ook toegepast bij magnetische separatie. De laatste jaren heeft ook een andere toepassing een enorme vlucht genomen: de Magnetische Resonantie Imaging. Hierbij wordt een mens in een magneet geplaatst en is men in staat zogenaamde magnetische dwarsdoorsneden te maken. Met deze nieuwe techniek zijn bijvoorbeeld weefselafwijkingen en botbreuken goed op te sporen, zie *figuur 9*.

Het opslaan en transporteren van grote hoeveelheden energie kan ook met behulp van supergeleidende kabels worden verwezenlijkt. Bij energie overschot "pompt" men deze in de vorm van een stroom in een supergeleidende lus om die bij energieschaarste weer uit de lus te onttrekken. In de tussentijd zijn er geen verliezen opgetreden.

Als laatste moet het gebruik van supergeleidende magneten in de wetenschap niet ongemeld blijven.

Het gebruik van grootschalige supergeleiders in de elektrotechniek vindt zijn toepassing, vooral in combinatie

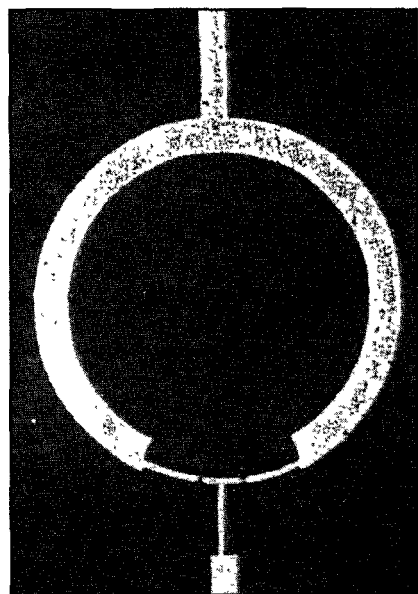
met grote supergeleidende magneten, in schakelaars, gelijkrichters, transformatoren, generatoren en magnetische afscherming

Kleinschalige toepassingen

Bij kleinschalige toepassingen denken we aan dunne supergeleidende lagen, zoals we die kennen uit de chip-technologie. Deze lagen worden gebruikt voor

- zeer nauwkeurige en gevoelige meetinstrumenten,
- snelle schakelaars en transportbaantjes in de micro-elektronica

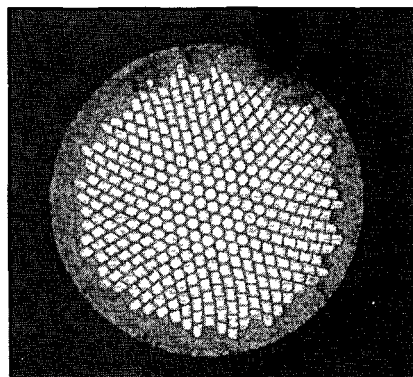
De meest in het oog springende toepassing is het SQUID (Superconducting QUantum Interface Device). Dit SQUID is in staat om zeer kleine magnetische veldveranderingen om te zetten in een meetbaar stroompje. Zo'n SQUID bestaat uit een supergeleidend ringetje met een (of twee) zwakke schakel(s), die een lagere kritieke stroom heeft, zie fig. 10. Een veran-



Figuur 10 SQUID met zwakke schakels

derend magneetveld induceert een stroompje in de supergeleidende ring. Wanneer het stroompje groter is dan de kritische stroom van de zwakke schakel zal dat zwakke gebiedje normaal worden (= een weerstand krijgen). De stroom sterft uit en het gebiedje wordt weer supergeleidend. De stroomverandering kunnen we versterken en er een meetbaar signaal van maken. Zo is men in staat om de magnetische signalen afkomstig van het hart of de hersenen te meten. Men spreekt in zo'n geval van magnetocardiogram (MCG) en magneto-encefalogram (MEG) in vergelijking met ECG en EEG. Op het ogenblik wordt op de universiteit Twente een meetinstrument ontwikkeld, dat in staat is om op 19 plaatsen tegelijkertijd de her-

senactiviteiten te registreren. De signalen zijn zo zwak dat maatregelen moeten worden getroffen om storende signalen te elimineren. Het apparaat komt dan ook in speciaal voor dat doel geschikt gebouwd op het universiteits-terrein.



Figuur 11 Dwarsdoorsnede van een supergeleidende draad, gemaakt van niobium en titaan. De diameter is 0,3 mm, waarbij er 367 filamenten in deze draad zitten.

Productie supergeleidend draad

Voor het vervaardigen van grote magneetsystemen en zijn lange supergeleidende kabels nodig. Eisen die aan zulke kabels gesteld worden zijn grote kritieke stroom en veldsterkte, goede mechanische eigenschappen, eenvoudig te vervaardigen en thermisch stabiel. Het meest wordt de supergeleider NbTi toegepast.

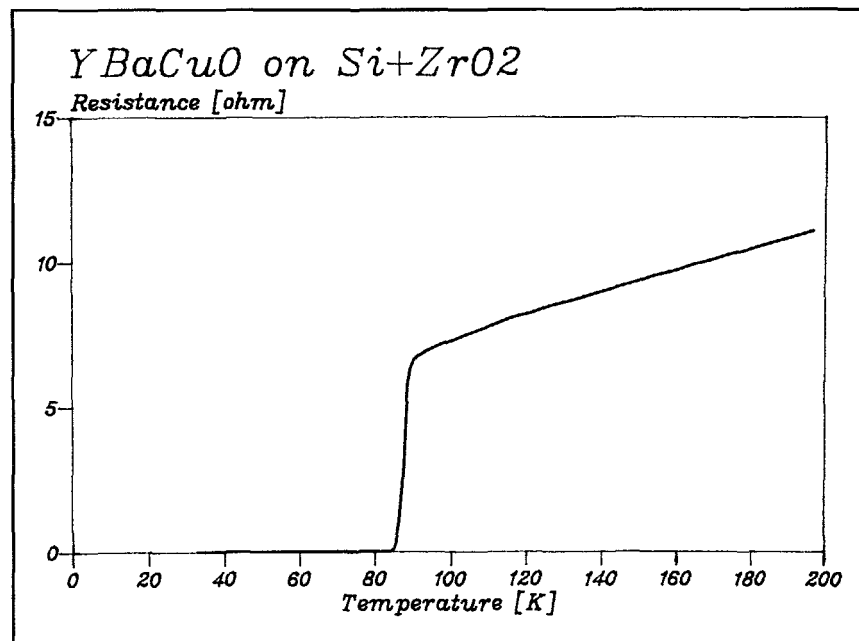
In figuur 11 staat een dwarsdoorsnede van een technische supergeleider afgebeeld. De supergeleidende draad bestaat uit een aantal zeer dunne su-

pergeleidende draadjes, filamenten genaamd. Deze filamenten zitten ingebed in een matrix, die uit koper of een legering van koper-nikkel bestaat. De draad wordt net zo lang bewerkt (trekken en/of walsen) tot de gewenste diameter is bereikt. Men is in staat om zo supergeleidende draden te maken met een diameter van 0,3 mm en 15 000 filamenten.

Een groot nadeel blijft het koelen met vloeibaar helium. Een alternatief is het gebruik van Nb₃Sn als supergeleider. Door zijn relatief hoge overgangstemperatuur (18 K) kan volstaan worden met het koelen via commercieel verkrijgbare koelmachines, waarmee circa 12 K wordt gehaald. Het materiaal is echter veel moeilijker te bewerken, het is erg bros en moet na de bewerking bij hoge temperaturen uitgeglod worden. Het grote temperatuurverschil dat de geleider ondergaat kan problemen opleveren. Vooral in Nederland bij het ECN in Petten is veel onderzoek naar de verschillende fabricage technieken van Nb₃Sn verricht.

Keramische supergeleiders

De draadproductie van de nieuwe hoge T_c materialen stuit op soortgelijke problemen als Nb₃Sn. Het materiaal is zeer bros. Nadat de keramische supergeleider in de vorm van bv draden is vervaardigd moet het materiaal opnieuw gesinterd worden, waarbij het zuurstofgehalte intact moet blijven. Bekijken we het materiaal nader, dan blijkt dat het bestaat uit een klustering van korrels. Aan de randen van deze korrels kunnen de supergeleidende eigenschappen anders (slechter) zijn dan in de kern van



Figuur 12 Supergeleidende overgang van een dunne film op Si met ZrO₂ tussenlaag

de korrel Deze korrelgrenzen zorgen voor een verlaging van de kritieke stroomsterkte Binnen in de korrel kan de kritieke stroomsterkte (bij 77 K) 10^6 A/cm² zijn, maar is sterk anisotroop De kritieke stroomsterkte in de *c*-as richting van het YBaCuO-kristal is beduidend lager dan in de *ab*-vlak In gesinterd polykristallijn bulkmateriaal is geen duidelijke orientatie aanwezig, zodat de kritieke stroomsterkte bepaald wordt door die in de *c*-as richting. Beide effecten (de anisotropie en korrelgrenzen) zorgen ervoor dat de kritieke stroomsterkte in bulkmateriaal een factor 1000 lager is dan in een eenkristal Voor de toepassing van de keramische supergeleiders moeten deze problemen nog afdoende opgelost worden Een veelbelovende techniek is het vervaardigen van tape Op een dragermateriaal wordt de keramische supergeleider aangebracht, bij voorkeur in een voorkeurrichting – de *c*-as loodrecht op het oppervlak Door het aantal korrelgrenzen zo klein mogelijk te maken is een hogere kritieke stroomdichtheid te bereiken Het aanbrengen van zo'n laag (of dikke film) kan geschieden met een verf- of spuittechniek, zoals plasmasproeien

Een ander probleem, dat zich bij de nieuwe supergeleiders voordoet, is hun magneetveldafhankelijkheid De supergeleider, bestaande uit gesinterd materiaal, verliest zijn superge-

leidende eigenschappen bij relatief lage magneetvelden, terwijl men dat er juist mee wil opwekken Een probleem dat de toepassingen duidelijk parten gaat spelen

Het aanbrengen van zeer dunne lagen op een dragermateriaal levert, in tegenstelling tot het bulkmateriaal, reeds nu goede resultaten op Bij een geschikte keuze van het dragermateriaal (substraat) is zelfs epitactiale groei mogelijk De *c*-as staat hierbij loodrecht op het oppervlak, zodat de stroom in het gunstige *ab*-vlak kan lopen. De transporteigenschappen van een kristal kunnen hierdoor benaderd worden

Dunne Lagen

Het aanbrengen van dunne lagen (1 μ m en kleiner) kan met verschillende depositie-technieken gebeuren In de chip-technologie zijn zowel het opdampen als het sputteren veel gebruikt In het eerste geval vindt er materiaalverdamping plaats met behulp van een elektronenbundel, in het tweede geval spreekt men van een verstuiving van materiaal door een ionenbombardement Als betrekkelijk nieuwe technieken, die vooral voor deze keramische supergeleiders uitermate geschikt blijken te zijn, zijn laserablatie (het verdampen van het materiaal met behulp van een laserbundel)

en plasmasproeien (reeds aangestipt bij de tapeproductie)

Het substraat is van groot belang omdat het groeien van de laag, of de zuurstofbehandeling achteraf, bij hoge temperaturen plaatsvindt (700 tot 900 °C). Bij deze hoge temperaturen treedt difussie van het dragermateriaal op in de supergeleider, die de supergeleidende eigenschappen beïnvloeden Zoals reeds eerder vermeld heeft de supergeleider zijn beste eigenschappen wanneer de laag epitactiaal gegroeid is en wel de *c*-as loodrecht op het oppervlak Dit maakt een geschikte keuze van het substraat zeer beperkt Zeer goede resultaten zijn bereikt met SrTiO₃ en ZrO₂ terwijl ook MgO goede resultaten oplevert Veel onderzoek vindt plaats in het vervaardigen van dunne lagen op Si of SiO al dan niet met behulp van een tussenlaag - dit in verband met de compatibiliteit met de chip-technologie In *figuur 12* is als voorbeeld een YBaCuO-dunne film op Si met tussenlaag weergegeven De film is met behulp van laserablatie gemaakt en is supergeleidend bij 84 K Hoewel het niet eenvoudig is om goede supergeleidende lagen te fabriceren zijn er reeds belangrijke resultaten geboekt Bij *c*-as georiënteerde films zijn kritieke stroomdichtheden van 10^6 A/cm² (bij 77 K) gehaald De volgende stap is het structureren van de dunne lagen om er "devices" van te maken

Actueel

Stichting OPTEL start vierde Cursus Optica en Lasers

Bij OPTEL, gevestigd in het Universitair Bedrijven Centrum van de Katholieke Universiteit Nijmegen, gaat in het najaar 1989 de vierde cursus "Optica en Lasers 89" van start

OPTEL, 3 jaar geleden gestart op initiatief van de Katholieke Universiteit Nijmegen, Philips Nijmegen en de Gelderse Ontwikkelings Maatschappij, speelt met deze cursus in op de hoge vlucht die de toepassingen van optische methoden en technieken, en het gebruik van lasers daarbij, hebben genomen De groei van deze marktsector zal, volgens ingewijden, in de komende decennia die van de computeren elektronicabranche evenaren In het voorjaar van 1987 is een uitgebreide cursus van start gegaan De

cursus, bestemd voor HTS-ers en mensen met een gelijkwaardig opleidingsniveau, legt enerzijds een stevige theoretische basis op het gebied van optica en laserfysica en verschaft anderzijds inzicht omtrent de praktische toepasbaarheid van lasers en andere geavanceerde optische systemen Dankzij de grote belangstelling voor deze cursus werd deze in het najaar van 1987 en het najaar van 1988 herhaald In het najaar van 1989 zal de vierde cursus "Optica en Lasers" uitgebreid worden met meer toegepaste technische informatie en vuistregels voor gebruik van lasers Ook een excursie naar o a TU Delft is gepland

De 50-urige cursus bestaat uit horen en werkcolleges, demonstraties en voordrachten over speciale onderwerpen De deelnemers krijgen een theoretische basis van de optica en de laserfysica, alsmede een beeld van de praktische toepasbaarheid Omdat OPTEL voor de lessen een beroep kan doen op de faciliteiten van o a de Nijmeegse Universiteit, beschikt het over veel demonstratiemateriaal en ervaren onderwijsdeskundigen De cur-

sus duurt van 20 oktober 1989 t/m 19 januari 1990 en wordt op vrijdagen gegeven De kosten bedragen f 3 400,-, inclusief lesmateriaal, exclusief B T W per persoon. Op 15 september sluit de inschrijving.

Inschrijfformulieren zijn aan te vragen bij
Stichting OPTEL
Toernooiveld
6525 ED Nijmegen

Voor nadere informatie kan men terecht bij
Mevr G van Heugten
Tel. 080 - 613111 of
Dr ir R.J.A.M. Smeulders
Tel 080 - 613111