



Superledning - fremtidens teknologi

Intet energitab

Ved en bestemt lav temperatur skifter nogle materialer til en tilstand, hvor de leder en elektrisk strøm uden modstand. Dette kaldes superledning. Det superledende materiale har altså resistansen 0Ω . Det betyder, at der ikke er noget energitab i superlederen, når den leder en strøm. Superlederen bliver derfor ikke varmet op af strømmen.

Dette giver sammen med andre specielle egenskaber af superledere mulighed for mange praktiske anvendelser, som vi endnu kun har set begyndelsen af.

Superstrøm – Meissner-effekt og Cooper-par

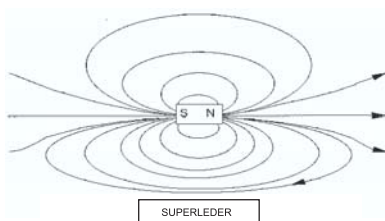
Evig strøm

En superstrøm vil blive ved med at løbe helt af sig selv i al evighed, når den først er sat i gang! Dette er helt modsat normale strømme i almindelige ledere: Her skal strømmen hele tiden drives af sted af en spændingskilde, som tilfører de strømmende ladninger energi, der opvejer tabet til lederen. Hvis man slukker for spændingskilden, går strømmen i en almindelig leder omgående i stå!

Frastødning af magnetfelter

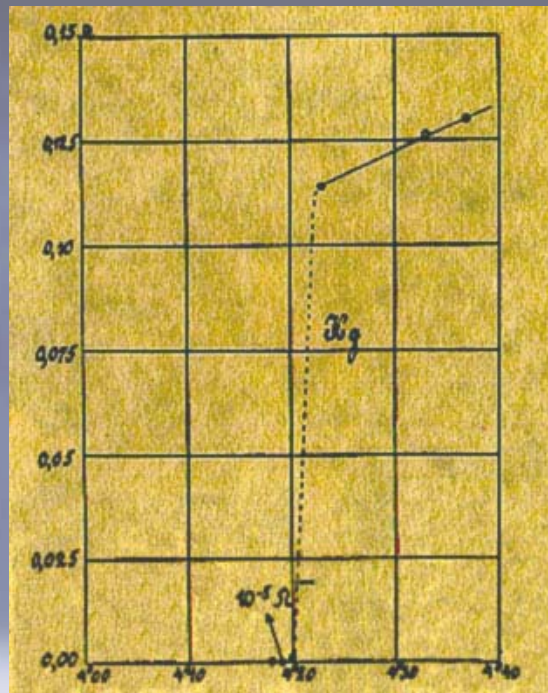
Superledere 'frastøder' ydre magnetfelter. På figur 1 er en stangmagnet anbragt over en superleder. I superlederens overflade induceres superstrømme, som skaber et modsat rettet magnetfelt, der er lige så stort som feltet fra den ydre magnet. Således vil det samlede magnetfelt overalt inde i superlederen blive nul! Dette er den såkaldte *Meissner-effekt*. Da magnetfeltlinier altid er lukkede kurver, vil der uden for superlederen være feltlinier, der 'løber tilbage'. De forløber næsten som om de kom fra en magnet helt magen til den ydre magnet, men placeret i dens 'spejl-billede' under superlederens overflade. Disse to magneter (den rigtige og 'spejlbilledet') vil frastøde hinanden, da nordpol ligger over nordpol og sydpol over sydpol. Hvis man slipper magneten vil den svæve over superlederen!

Figur 1.
Meissner-effekt



Kritisk temperatur T_c

For at gøre et materiale superledende skal man køle det ned under en vis temperatur. Det viser sig, at resistansen bliver mindre og mindre ved lavere temperatur for så lige pludselig ved en bestemt temperatur at droppe til 0Ω ! Materialet siges at være gået over i *den superledende fase*.



Figur 2. Den temperatur, hvor et materiale bliver superledende, kaldes den kritiske temperatur T_c . For temperaturer under den kritiske temperatur er materialet superledende. Grafen viser Kamerlingh Onnes målinger af resistansen ($i \Omega$) i kviksølv som funktion af absolut temperatur ($i K$).

Faseovergang

Overgangen fra den normalt ledende fase til den superledende fase kan man sammenligne med vands overgang fra væskefase (flydende vand) til fast stof (is). Denne sker som bekendt også pludseligt ved en ganske bestemt temperatur, nemlig $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Forskellige materialer har forskellige værdier af T_c , ligesom forskellige materialer har forskellige smeltepunkter. Rene metaller har kritiske temperaturer på nogle få K. Det grundstof, der har den højeste kritiske temperatur er niobium (Nb) med en kritisk temperatur på $9,3 \text{ K} = -263,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Andre forhold, så som størrelsen af det magnetfelt, der omgiver superlederen, påvirker også T_c – jo større magnetfelt, desto mindre T_c .

Superledende materialer

Lav- T_c materialer

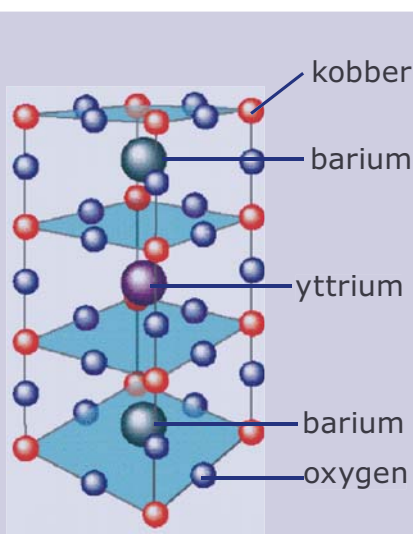
De første superledere man opdagede var rene metaller. Superledningen for disse stoffer sætter ind ved temperaturer mindre end 20 K ($-253\text{ }^\circ\text{C}$). Stort set alle de umagnetiske metaller kan blive superledende ved passende temperatur og tryk. Desuden er legeringer (blandinger) af disse også superledere. Fx er en legering af Nb og Ti en superleder med $T_c = 10\text{ K}$. Denne legering kaldes Nb:Ti (niobium-titan). Den er meget brugt som leder i stærke elektromagneter, fx i hospitalernes MR-scannere.

Høj- T_c materialer

Nogle keramiske materialer (visse metaloxider), som er ret dårlige ledere ved stuetemperatur, er superledere med en T_c , der er meget højere end metal-superledernes T_c . Rekordens er i dag 133 K = $-140\text{ }^\circ\text{C}$ for materialet $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$.

Hvordan foregår superledning?

Resistansen i en leder skyldes, at elektronerne ved sammenstød overfører energi til de positive ioner i materialet. Resistansen falder med aftagende temperatur mod en værdi forskellig fra nul, inden man når det absolutte nulpunkt, se figur 2. Denne restmodstand svarer til en blivende uorden i materialet, som skyldes de 'fremmede' atomer og fejl i metalgitteret.



Figur 3. En vigtig egenskab ved keramiske superledere er tilstedeværelsen af planer, hvor oxygen og kobber er kemisk bundet til hinanden. Kuglemodellen viser $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Når metallet bliver superledende danner elektronerne par, såkaldte Cooper-par, som holdes sammen af svingninger i atomgitteret. Cooper-parrene overfører ikke energi til de positive ioner og kan derfor sive helt frit gennem materialet.

Grænser for superstrømmen

Maksimal temperatur

Når en krystal varmes op vil dette i sig selv give anledning til gittersvingninger. Hvis disse bliver for kraftige, vil de helt "overdøve" de gittersvingninger, der bliver skabt af elektronerne bevægelse. Derfor holder superledningen op ved en tilstrækkelig høj temperatur.

Maksimal strøm

Da resistansen i en superleder er nul, kan der løbe en strøm på flere tusinde ampere per mm^2 ledning. Der er dog en øvre grænse, for når strømstyrken bliver for høj, brydes Cooper-parrene og superledningen ophører. Denne såkaldte kritiske strømtæthed, J_c afhænger af temperaturen, så jo koldere superlederen holdes, desto større strømstyrke kan den klare.

Maksimalt magnetfelt

Der er også en grænse for, hvor store magnetfelter, der kan være udenom en superleder, uden at superledningen bryder sammen. Store ydre magnetfelter kræver store skærmstrømme i superlederen, og hvis disse skærmstrømme når op på den kritiske strømtæthed J_c , bryder superlederen sammen. Den værdi af magnetfeltet, hvor dette sker, kaldes det kritiske magnetfelt B_c .

Alt i alt bestemmes superledningen af en kombination af temperatur, strømstyrke og magnetfelt. •

Superledning – et felt i stadig udvikling

Opdagelsen

I 1911 opdagede den hollandske forsker Heike Kamerlingh Onnes og hans gruppe ved Leiden Universitetet en mærkelig opførsel af kviksølv ved lave temperaturer. Kamerlingh Onnes laboratorium var det førende i verden inden for lave temperaturer. I 1882 kunne man her lave flydende oxygen og flydende atmosfærisk luft. I 1895 blev helium opdaget i atmosfæren og mange forsøg på at kondensere det mislykkedes, så man begyndte at tro, at helium slet ikke kunne blive flydende. Men i 1908 lykkedes det Leiden-gruppen som den første i verden at kondensere heliumgas til væskefasen. Med flydende helium kunne man lave undersøgelser med temperaturer fra 4,3 K til 1,2 K, og fysikerne i Leiden undersøgte især gassers opførsel men også metallers resistans ved lave temperaturer. Da de målte resistansen i kviksølv, viste det sig højst uventet, at den faldt brat til nul ved 4,2 K. Se figur 2.

Forventninger og frustrationer

Opdagelsen medførte, at man undersøgte andre metalliske grundstoffer og legeringer og håbede at kunne udnytte superlederes egenskaber praktisk. Men alle stofferne skulle køles med det sjældne og derfor dyre helium for at blive superledende. Det så derfor ud til, at superledning blot var et eksotisk fænomen, som ikke havde muligheder for bredere praktiske anvendelser. Samtidig viste det sig umuligt at beskrive superledning med en grundlæggende fysisk teori.

Ny fysik og nye fænomener

I 1933 opdagede F. W. Meissner og R. Ochsenfeld at et superledende stof frastøder et magnetfelt – den såkaldte Meissnereffekt, og i 1935 gav F. London en sammenhængende beskrivelse af superlederes elektromagnetiske egenskaber. Men nu var det samtidig klart, at en egentlig fysisk teori måtte baseres på kvantemekanikken, og sådan én kom først med BCS-teorien i 1957. Teorien er opkaldt efter fysikerne der fremsatte den, nemlig John Bardeen, Leon N. Cooper og John R. Schrieffer, der blev belønnet med nobelprisen i 1972. Bardeen havde allerede én nobelpris i forvejen. Den havde han fået i 1956 sammen med Shockley og Brattain for opfindelsen af transistoren.

Det store boom – høj- T_c superledere

Efter lang tids stilstand i udviklingen af nye superledere viste den danske fysiker Klaus Bechgaards gruppe ved Københavns Universitet i 1980, at man kan fremstille organiske superledere. Efter en udbredt og verdensomspændende, men forgæves jagt på organiske materialer med høje T_c 'er, fandt Bednorz og Müller i 1986 superledning ved 30 K i et keramisk kobberoxid (bestående af La, Ba, Cu og O), og allerede i 1987 kunne man rendyrke $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (se figur 3) med $T_c \approx 93$ K (afhængig af δ). Hermed havde man passeret den 'magiske grænse', hvor man kan 'nøjes' med at køle med det meget billigere flydende nitrogen, som koger ved 77 K (-196 °C).

Opdagelsen gav Bednorz og Müller nobelprisen allerede i 1987 'for their important breakthrough in the discovery of superconductivity in ceramic materials'.



Kamerlingh Onnes fik nobelprisen i 1913 'for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium'.

Citatet er fra præsentationstalen, der begrundede prisuddelingen. Som det ses, fik han først og fremmest prisen for

fremstillingen af flydende helium og for undersøgelser af stoffet ved meget lave temperaturer. Ordet 'superledning' blev slet ikke brugt dengang, og der er kun en mindre omtale af resistansmålinger. Til gengæld konkluderes det ud fra disse og undersøgelser af den specifikke varmekapacitet ved meget lave temperaturer, at 'It has become more and more clear that a change in the whole theory of electrons is necessary'. Det var netop i 1913, at Niels Bohr fremsatte sin atomteori, der startede udviklingen af kvantemekanikken.



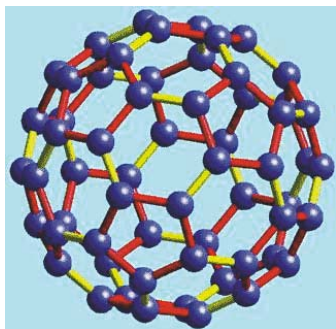
Nye idéer i modvind – kampen mellem Josephson og Bardeen

Bardeen blev i 1962 involveret i en strid, hvor hans berømmelse og status næsten kom i vejen for en vigtig ny opdagelse. Den 22-årige Brian Josephson var i 1962 Ph.D-studerende ved Cambridge Universitetet i England, hvor han studerede forskellige matematiske formuleringer af BCS-teorien.

Hans beregninger viste nogle meget overraskende effekter. Hvis man adskiller to superledere med en tynd isolator, vil man se en oscillerende superledende strøm mellem dem med en frekvens givet ved: $f = (2e/h) \cdot U$, hvor e er elektronens ladning, h Plancks konstant og U spændingsforskellen over isolatoren.



Blandt andre senere opdagelser af nye superledere kan nævnes alkalimetaldoteret C-60 (kulstof-60 er en fodboldlignende variant af kulstof) med T_c -værdier op til ca. 50 K.



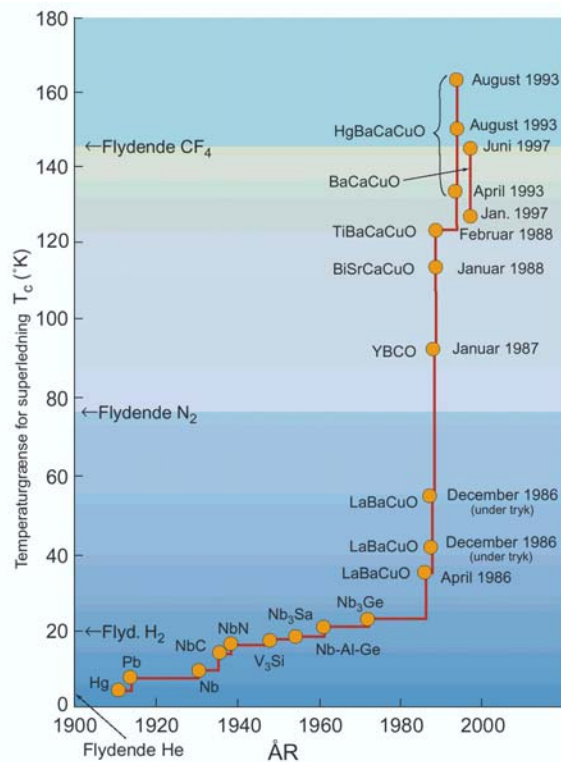
Figur 4.
Model af et C-60 molekyle.

År 2001 har bragt den overraskende opdagelse, at det relativt simple materiale MgB_2 (magnesiumdiborid), som kemikerne har haft stående på hylenderne i 50 år, faktisk er en superleder med en T_c på 39 K. MgB_2 er typemæssigt et metal med en simpel krystalstruktur og med en relativ høj koncentration af elektroner.

Opdagelsen har igangsat en voldsom forskningsaktivitet, bl.a. fordi de foreløbige undersøgelser tyder på, at MgB_2 er attraktivt til tekniske anvendelser.

Ny fysik og ny teknologi – superledere ved stuetemperatur?

De nye høj- T_c superledere har givet anledning til nye teoretiske problemer, fordi superledningen i de keramiske og organiske materialer ikke kan forklares med BCS-teorien. Der skal altså en ny teori for superledning på banen! Samtidig med at man kæmper for at forstå, hvad der egentlig foregår inde i superlederne, forsøger man på livet løs for at finde nye mate-



Figur 5. Den historiske udvikling for den højeste kendte kritiske temperatur for forskellige superledende materialer. Kilde: Ole Tønnesen og Niels Falsig Pedersen.

rialer med endnu højere T_c . Målet er bl.a. et let, fleksibelt og billigt materiale, der er superledende ved stuetemperatur, og som har store værdier af kritisk strøm og magnetfelt.

Ingen ved om dette mål kan nås... •

Hvis man derimod påtrykker systemet et varierende elektrisk felt, vil spændingen over isolatoren være givet ved $U = n \cdot (h \cdot f/2e)$, hvor n er et helt tal. Disse resultater var i modstrid med Bardeens forudsigelser. En anden konsekvens af Josephsons beregninger var, at superstrømmen gennem isolatoren afhænger af det magnetiske felt, der omgiver den.

Josephson publicerede sine resultater i juni 1962, og en måned senere kom en artikel med Bardeens kritik af Josephsons teori. Der var ikke mange, som dengang var tilstrækkeligt inde i BCS-teorien til at kunne vurdere Josephsons resultater, og Bardeen var den tids mest berømte faststoffysiker. Ved en konference i London i september 1962 gav de begge en forelæsning over deres teorier, og her var Josephson så overbevisende, at flere eksperimentalfysikere fik lyst til at efterprøve hans forudsigelser. I januar 1963 havde man set, at superstrømmen virkelig afhænger af magnetfeltets størrelse, og knap et halvt år senere så man, at spændingen over isolatoren netop varierer i spring, når systemet udsættes for mikrobølger. Efter disse eksperimenter indrømmede Bardeen at

have taget fejl, og i 1973 fik Josephson Nobelprisen sammen med to andre fysikere, Esaki og Giaever for 'their discoveries regarding phenomena in solids.'

Bardeen - Josephson striden er interessant af flere grunde. Man kan kun være imponeret over det mod Josephson viste ved at holde fast ved sine egne resultater på trods af Bardeens modstand. Endelig er det karakteristisk for naturvidenskaben, at meningsforskelle i sidste ende bliver afgjort ved eksperimenter og ikke ved hvem, der har den største prestige. Josephsons opdagelser har gjort, at man kan bestemme e/h med den helt utrolige nøjagtighed på 10 decimaler, og de danner i dag grundlag for en ny stribe af ultrapræcise og følsomme metoder til måling af bl.a. spændingsforskelle og magnetfelter. Definitionen af måleenheden volt er i dag baseret på Josephson-effekten.

Superledning – eksempler på

Superledende kabler

Ved fremstilling af superledende kabler skal der tages hensyn til mange ting, bl.a. fremstillingsprisen og driftsomkostningerne ved brug af kablet. Det er først og fremmest udgifter til køling. Da flydende nitrogen er langt billigere end flydende helium, er man nødt til at bruge de meget sprøde keramiske superledere, der kan køles med nitrogen.

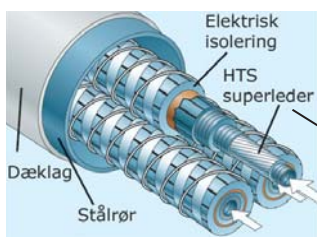
Det er ikke helt let at fremstille et bøjeligt kabel med en keramisk leder, uden at den går i stykker. Man har klaret problemet ved at fylde et rør af sølv med det superledende stof på pulverform. Røret udvales til meget mindre dimensioner, hvorefter en række udvalsede rør anbringes i et nyt sølvrør, som udvales til et langt, tyndt, fladt bånd, hvor de enkelte superleder-korn ligger tæt ved hinanden og holdes sammen af sølvet. Strømmen kan så løbe fra korn til korn ad den vej, der giver mindst modstand. Der er selvfølgelig mange steder, hvor der ikke er god forbindelse, og de bidrager ikke til ladningstransporten.

Kabeltyper

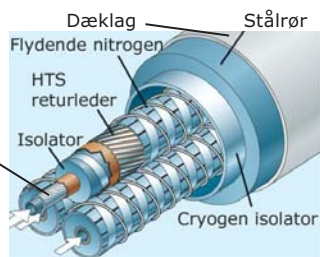
Der findes to typer superledende kabler. Man kan enten lægge varmeisoleringen inde omkring superlederen og den elektriske isolering og den skærmende leder udenpå, eller også kan man lægge både den elektriske isolering og en superledende skærm inderst og varmeisoleringen udenpå.

Den første type, RTD (room temperature dielectric), består af et fleksibelt rør til den flydende nitrogen. Udenom er viklet et lag af superledende bånd og varmeisolering, herpå en elektrisk isolator (et dielektrikum), en skærm og armering, se figur 6. Denne type anvender en velkendt type dielektrikum og har et lavt varmetab. Til gengæld er der et elektrisk felt uden om kablet, og det har en begrænset strømstyrke.

I den anden type, CD (cryogenic dielectric), lægges et elektrisk isolerende lag udenpå superlederen og derpå en superledende skærm efterfulgt af et varmeisolerende lag, se figur 7. Fordelen ved denne konstruktion er, at der ikke er en øvre grænse for strømstyrken, og at der ikke er noget ydre elektrisk felt, så det er muligt at anbringe kablet til 3 faser tæt sammen. Ulemperne er en mere kompliceret konstruktion med to lag superledere, hvilket øger fremstillingsprisen, og dertil kommer et større varmetab.



Figur 6. Superledende kabel, type RTD.



Figur 7. Superledende kabel, type CD.



Figur 8. MRI-scanner.

Foto: Siemens

MRI – 'magnetic resonance imaging', billeddannelse ved magnetisk resonans

På store hospitaler har man de såkaldte MRI-scannere, ofte blot kaldet MR-scannere, hvor man kan få 3-dimensionale højkvalitetsbilleder af patientens indre med en rumlig opløsning på ca. 3 mm³.

Måleprincippet

MRI er baseret på, at en atomkerne fungerer som en lille stangmagnet. Hvis man anbringer kernen i et magnetfelt, vil den rette sig ind efter feltet. Man kan så få den til at vippe væk fra denne retning ved at 'skubbe' til den med en puls af elektromagnetisk stråling i radiobølgeområdet (omkring 10 MHz). Herefter vil kernen svinge tilbage i feltets retning og udsende elektromagnetisk stråling med en frekvens f , der er proportional med magnetfeltets størrelse B : $f = g \cdot B$. Proportionalitetskonstanten g , kaldes kernens gyromagnetiske forhold. g er karakteristisk for et bestemt nuklid.

Scanneren

MRI-scanneren består af meget kraftige elektromagneter og af mange radioantenner til udsendelse og måling af radiobølgerne. Feltet skal være kraftigt for at reducere indflydelsen af tilfældige signaler ('støj'). Måling af f identificerer kernen, og signalets styrke afslører hvor mange kerner, der er. Det er hovedsageligt hydrogenkerner man måler på, da 63% af et menneske er hydrogenatomer. Disse befinder sig mest i vand og fedt. For ¹H er $g = 6,777$ MHz/T.

Magnetfeltet

Det kraftige magnetfelt får man fra elektromagneter med kortsluttede superledende spoler, hvori der løber meget store strømme. Da resistansen er nul, vil strømmen i spolen ikke ændre sig, og dermed holdes magnetfeltet konstant. Dette er vigtigt for at frekvensen af den udsendte stråling ikke ændrer sig med tiden.

anvendelser

Billeddannelse – 'Imaging'

Hvis man kan give hvert lille område af kroppen (på stedet x) sin egen magnetfeltstyrke, $B(x)$, kan man ud fra den målte frekvens afgøre, hvorfra strålingen stammer. Det gøres med ekstra spoler kaldet gradientspoler, der tilføjer et svagt ekstra felt med varierende styrke (gradientfelt) i en given retning (typisk 100 gange svagere end hovedfeltet). Med tre sæt spoler orienteret vinkelret på hinanden, kan man rette gradientfeltet i enhver ønsket retning. Når B -feltet fx varierer på en kendt måde med højden (lodret gradientfelt), så kan man bestemme fra hvilket vandret lag strålingen kommer. Drejer man gradientfeltet fx 90° , så det er vandret, kan man bestemme strålingsintensiteten fra et lodret snit. Ved at lave mange sådanne målinger fra mange drejningsvinkler kan man få et tredimensionalt billede af fordelingen af hydrogenatomer. Dette kræver enormt mange beregninger på enormt mange data, og det er kun blevet muligt at lave MRI efter fremkomsten af kraftige computere.

SQUID

– Superconducting Quantum Interference Device, superledende kvanteinterferens apparat

Josephson-effekten førte til opfindelsen af de såkaldte SQUIDs. Hvis to Josephsondioder parallelforbinderes i en lukket kredsløb vil de elektroner, der tunnelerer gennem dioderne interferere. Den resulterende superstrøm afhænger stærkt af styrken af magnetfeltet gennem kredsløbet, som derfor kan registrere meget små ændringer i feltstyrken, helt ned til ca. 1 fT (10^{-15} T), hvilket er tilstrækkeligt til at måle magnetfelter i hjernen. Magnetfeltet fra hjertet er på 50.000 fT . Til sammenligning er Jordens magnetfelt ca. $50 \text{ } \mu\text{T}$.

Foruden de biomagnetiske anvendelser benytter geofysikerne SQUID til målinger af Jordens magnetfelt bl.a. ved efterforskning af olie, forudsigelser af jord-skælv og geotermisk energi.

SQUID benyttes i stigende grad til at undersøge stoffers magnetiske egenskaber, idet de kan måle på områder af størrelsesordenen mikrometer.

Maglev

Maglev er en sammentrækning af 'magnetically levitating train', et tog, der er magnetisk løftet. Togvognene løftes nogle få cm op over banelegemet af elektromagneter på toget og holdes på plads af elektromagnetiske kræfter.

Fordele ved maglev-tog

Maglev-tog kan gøres mindre end sædvanlige tog, da de ikke har brug for tunge systemer til fremdrivning og bremsning. Da togene ikke har så mange

bevægelige dele, har de heller ikke så stort behov for vedligeholdelse. Der er ingen friktion mellem tog og banelegeme, så toget bliver både mere stille og brændstoføkonomisk. Togets hastighed bliver også større og rejsetiden mindre. Ulemperne er, at maglev-systemer er dyre at bygge, da de kræver konstruktion af helt nye banelegemer. Til trods for de åbenlyse fordele har der været store problemer med at udvikle rentable maglev-systemer og mange står i dag og samler rust.

Maglevbaner

I England havde man en kort strækning mellem to terminaler i Birminghams lufthavn, men den blev nedlagt af økonomiske grunde i 1980'erne. Siden 1970 har man haft et forsøgsanlæg i Tyskland. Her havde man planlagt en maglev-bane med en hastighed på over 400 km/h mellem Berlin og Hamburg, men projektet blev opgivet i februar 2000.

I USA overvejer man flere maglev-projekter, men det er usikkert om de er økonomisk bæredygtige.

I Kina bygges den første kommercielle maglev-bane med tysk teknologi. Det bliver en 30 km lang strækning fra Shanghais lufthavn til byens centrum. Den forventes at blive taget i brug i begyndelsen af 2003.

Japan valgte i 1970 at satse på elektromagneter med superledende spoler i stedet for almindelige elektromagneter. Som superledere valgtes NbTi , der skal køles til under 4 K dvs. med flydende helium. Det har vist sig, at energikrævende køleanlæg og sikkerhedsudstyr gør togvognene tunge og urentable. Det ser derfor ud til, at superledende maglev-tog først bliver fremtiden, når man har lært at fremstille elektromagneter med spoler, der er superledende ved højere temperaturer, måske helt op til stuetemperatur. •

Figur 9. Japansk Maglev-tog



Foto: Udlånt af Den Japanske Ambassade

Amager Koblingsstation

Mandag den 28. maj 2001 blev verdens første superledende kabler sat i drift på Amager Koblingsstation, Irlandsvej 95. En koblingsstation er en slags posthus for strøm: den modtager højspændt strøm fra flere elværker, transformerer den om til mellemhøjspændt strøm på 30 kV og sender den derefter videre til en række knudepunkter.

Der er tale om en forsøgsinstallation, som er dimensioneret til at kunne levere strøm til alle 150.000 indbyggere på Amager. Den fungerer parallelt med den eksisterende installation, så selv om der skulle opstå problemer med de superledende kabler, kommer brugerne ikke til at mangle strøm.

Installationen

Installationen består af tre 30 m lange superledende kabler, der er sat ind som et stykke af den normale 30 kV AC-forbindelse, der distribuerer strøm til Amager. Der er altså et kabel til hver af de tre faser i vekselstrømmen.

Forsøgsinstallationen skal vise, hvordan superledende kabler virker under normale driftsbetingelser. I starten kørte de kun på ca. en femtedel af kapaciteten, men belastningen bliver efterhånden sat op, så de til sidst leverer al strøm til Amager. I dag er de stadig verdens eneste superledende kabler i drift (januar 2002).

Kablerne er fremstillet af NKT i Brøndby og er af RTD-typen. De er dimensioneret til 36 kV og kan klare 2000 A før superledningen forsvinder.

Fordelene

I traditionelle kabler er der et betydeligt energitab pga. resistans, hvorved kablet varmes op til 70-80 °C af strømmen. Dette spild har man ikke i superledende kabler, men til gengæld skal man bruge strøm til at drive køle-systemet til kablerne. Tabet i de superledende kabler kan dog komme ned på halvdelen af tabet i traditionelle kabler.

Fremtiden

Forskere mener, at markedet for superledende komponenter – især til stærkstrøm – vil stige markant inden for de næste 15 år, og at verdensmarkedet for elforsyning vil nå 100 milliarder kr. inden 2010. Superledende kabler kan også blive billigere, måske kun halvt så dyre som traditionelle kabler, der i dag koster ca. 20 \$/kAm (dollar per kilo-ampere-meter). •



Foto: NKT Cables

Figur 10. Superledende kabel testes på DTU.

i PERSPEKTIV

Udgivet af Fysikforlaget med støtte fra Undervisningsministeriets tips/lottomidler og af Birch & Krogboe Fonden

Redaktion: Niels Elbrønd Hansen
Layout: Mette Qvistorff

Produktionsgruppe: Peter Husby,
Martin Schmidt (fagredaktør)
og Nils Trautner

www.perspektiv.gymfag.dk

Forsidefoto: NKT Cables

Tryk: Budolfi Tryk, Aalborg
Oplag: 12.000

ISSN: 1602-5059

ISSN 1602-5059



9 771602 505002