



SUPERLEDERE

Prosjektrapport i FY1303,
Elektrisitet og Magnetisme,
høsten 2004.

Av:
Solveig Andersen
Erik Frøset
Bård Olav Johannessen

08.11.2004



Innholdsfortegnelse

Forord / Innledning	3
Sammendrag	3
Historie	4
BCS-teori	6
Cooperpar	6
Energigap	9
Type 1 og type 2 superledere	10
Type 1	10
Type 2	11
Andre egenskaper	12
Coherence lengde	13
Meissner-effekten	14
Diamagnetisme	14
Pinning	15
Forsøk	15
Superledere i dag	17
Maglevtog	17
MRI	19
SQUID	20
Er superledere fremtiden?	21
Strømledninger	21
Generatorer	21
Motorer	21
SMES	22
Datamaskiner	22
Superledere i fremtiden	23
Avslutning	24
Kilder	25

Forord / Innledning

Superledere er metaller eller keramiske stoffer som ved nedkjøling under en kritisk temperatur (T_c) mister all motstand. Dette gjør superledere til perfekte ledere; de fører strøm uten tap av energi. Vi har to typer superledere: type 1 og type 2. Type 1 superledere er metaller som også leder strøm ved romtemperatur, og som blir superledende ved svært lave temperaturer. Type 2 superledere består av keramiske materialer som normalt sett er isolatorer ved romtemperatur og har høyere kritiske temperaturer enn type 1 superledere. Vi har BCS teorien som forklarer fenomenet med superledere, men denne er til nå kun satt til å gjelde type 1 superledere. Observasjoner har vist at denne teorien ofte også passer for type 2 superledere, men regnes ikke å gjelde godt nok for dem.

Superledere er et vidt område innen for fysikken, og vi har prøvd å dekke hoveddelene innen for dette området. Samtidig har vi prøvd å ordlegge oss så lite komplisert som mulig, slik at man med minst mulig bakgrunnskunnskaper skal kunne forstå mesteparten av rapporten.

Vi var også så heldig å få være med og observere en demonstrasjon av Meissner-effekten og vi retter en stor takk til Torgar Haugen som tok seg tid til å demonstrere dette for oss.

Sammendrag

I denne prosjektoppgaven har vi sett på superledere. Først og fremst har vi sett på hvordan de virker og hva de brukes til. Vi har tatt med en del teori, men har med minst mulig formel da vi fant disse vanskelige og også unødvendige for den helhetlige forståelsen. Vi har tatt for oss mange områder innenfor superledere; blant annet har vi tatt med historien bak superledere, hvem oppdaget hva, og når de oppdaget det. Selv om superledere er et ganske nytt område innen fysikkens verden, så har utviklingen og bruken av superledere kommet langt siden oppdagelsen av superledere ble gjort i 1911.

I en slik prosjektoppgave er det umulig å komme utenom det teoretiske. Vi tar for oss noen av forskjellene på de to typene superledere vi har. Vi har også tatt for oss de forskjellige teoriene om hva som skjer i en superleder. Vi kan alle observere hva en superleder gjør, men det er fremdeles ikke full enighet om hvordan den virker.

Vi var så heldige å få være med og observere da det ble gjort en demonstrasjon av Meissner effekten, der en magnet svever over en superleder. Vi har tatt med en liten lab rapport, samt en forklaring om hva som skjer.

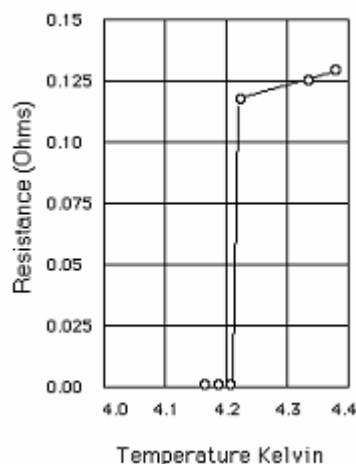
Det mest spennende med superledere er ikke hva som har skjedd og hvordan det skjer, men det er hva som skjer og hva det kan brukes til. Vi ser nærmere på noen av de vanligste bruksområdene til superledere i dag, deriblant Magnetiske levitasjons tog, MRI (Magnetic Resonance Imaging) og SQUID (Superconducting QUantum Interference Device). Vi har også med et avsnitt om hva man håper å kunne bruke superledere til i framtiden og litt om hva det har å si for økonomien.

Historie

Superledere er en av de største overskriftene i nyere vitenskapelige oppdagelser. Ikke bare vet vi at grensene for denne oppdagelsen ennå ikke er nådd, men det ser også ut til at superlederens potensielle bruksområder stadig blir utvidet.

Det hele begynte i 1908 da den nederlandske fysikeren Heike Kamerlingh Onnes først klarte å fremstille flytende Helium (som koker ved 4.2K). I 1911 kjølte han ned kvikksølv til en temperatur på 4K ved hjelp av denne oppdagelsen og oppdaget at motstanden i materialet plutselig redusertes til en umålelig liten verdi ved 4.15K!

Dette kom som en oppfølging på en diskusjon som hadde pågått i det vitenskapelige miljøet over lenger tid. På den ene siden befant det seg fysikere som hevdet at elektroner som beveget seg gjennom en leder ville stoppe opp derom temperaturen nærmet seg 0K, mens det på den andre siden befant seg fysikere som hevdet at motstanden ville forsvinne totalt. Onnes befant seg i denne gruppen, og han fikk dermed bekreftet sin teori om kalde ledere. Han kalte denne nye oppdagelsen sin for "superledning".



Figur 1: Et diagram som viser hvilke verdier Onnes fikk da han målte resistansen i kvikksølv ved ekstremt lave temperaturer.

(Kilde: <http://www.physnet.uni-hamburg.de/home/vms/reimer/htc/pt2.html>)

Etter hvert ble det oppdaget stadig flere slike superledende materialer, og Nobelpriser ble delt ut med jevne mellomrom til fysikere som forsket på dette området. Blant annet fikk Onnes til slutt utdelt Nobelprisen i 1913 for sine revolusjonerende oppdagelser og den (foreløpig) siste Nobelprisen som ble utdelt for forskning på superledere og supervæsker ble gitt til Alexei Abrikosov, Vitaly Ginzburg og Anthony Leggett i 2003.

Superlederne var og ble et mysterium. Det var ingen som klarte å komme opp med en god forklaring på hvorfor motstanden forsvant i enkelte metaller når temperaturen kom ned under en viss kritisk temperatur T_c . I 1933 kom W. Hans Meissner og Robert Ochsenfeld et lite skritt videre da de holdt på med deres undersøkelser omkring superledernes magnetiske egenskaper. Deres undersøkelser resulterte i det som er blitt kalt Meissner-effekten. Men selv om Meissner og Ochsenfeld fant et nytt fenomen ved superlederne så klarte de ikke å komme opp med en god teoretisk forklaring på det som skjedde. Det var det først brødrene Fritz og Heinz London som klarte i 1937 ved hjelp av de såkalte Londonlikningene. Meissner-effekten blir nærmere beskrevet i et senere kapittel.

En teori som kunne gi en god forklaring på Onnes oppdagelse av superlederne ble derimot ikke utviklet før de tre amerikanske fysikerne John Bardeen, Leon Cooper og Robert Schrieffer kom med deres teori; BCS-teorien, i 1957. Denne BCS-teorien forklarer hvordan enkeltelektroner slår seg sammen til Cooper-elektronpar, og at elektronene da ikke utsettes for de samme energiabsorberende kollisjonene som det de vanligvis gjør når de beveger seg gjennom en vanlig leder. BCS-teorien sier videre at for å danne Cooper-par, må et superledende materiale være under en kritisk temperatur T_c . Mer om BCS-teorien kommer i et senere kapittel.

I 1986 klarte Georg Bednorz og Alex Müller det ingen før dem hadde klart; gjennom sitt arbeid med ulike materialer fant de indikasjoner på superledning ved 35K, hele 12K "varmere" enn den tidligere rekorden! Dette var en viktig oppdagelse og det var en av årsakene til at forskere fra hele verden snart satte i gang med å forske på denne nye typen superledere. I februar 1987 tok Bednorz og Müller verden enda et skritt videre da de fant et keramisk materiale som var superledende ved 92K! Dette var en meget økonomibesparende oppdagelse siden det nå ble mulig å bruke flytende nitrogen til nedkjølingsprosessen istedenfor flytende helium som var mye dyrere og vanskeligere å fremstille. Siden disse materialene ble superledende ved så merkbart mye høyere temperaturer, refererer vi gjerne til den som høy-temperatur superledere.

Fra 1987 og frem til i dag har utviklingen på superlederområdet nådd stadig nye høyder. I dag er rekorden for et superledende materiale på 138K, og det forventes at den blir høyere med tiden. Superledere er allerede tatt i bruk dagens teknologi og det arbeides på spreng for at vi skal kunne ta dem i bruk på stadig nye områder. Mer om bruk av superledere i dag og i fremtiden er det skrevet om i et senere kapittel.

BCS-teori

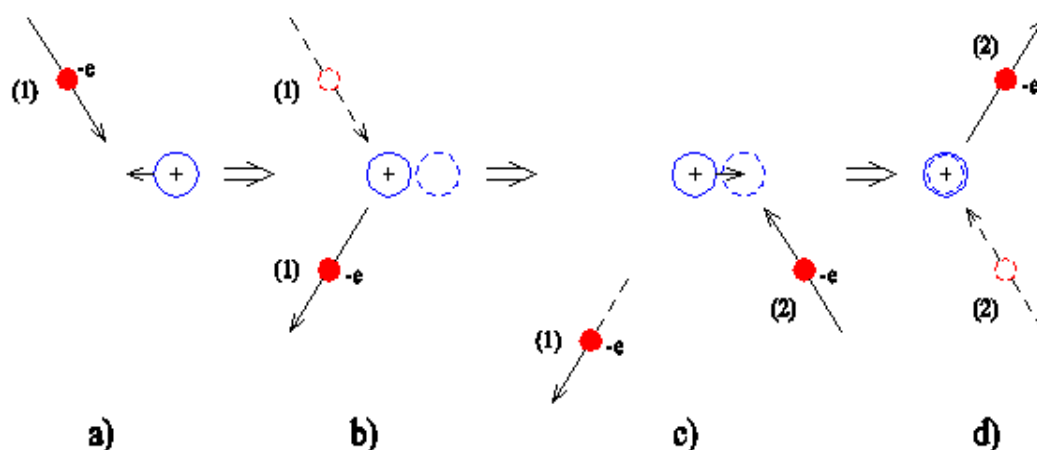
I 1957 kom den første aksepterte teorien som kunne forklare de mikroskopiske aspektene ved superlederen. Mennene bak denne teorien var John Bardeen, Leon Cooper og John Schreiffer, og teorien har dermed fått navnet BCS-teorien.

Teorien kom som et resultat av at Cooper begynte å det velkjente klassiske fenomenet om at like ladninger frastøter hverandre, mens ulike ladninger tiltrekker hverandre (Coloumb-vekselvirkningen). Cooper tok nå utgangspunkt i det faktum at dersom de ladete partiklene er inne i et eller annet fast stoff, for eksempel metall, så får vi en annen situasjon enn den klassiske fordi vi her har både positive og negative ladninger side og side og dermed kan det skje endringer i Coloum-vekselvirkningen. Spørsmålet Cooper nå stilte seg var: kan vi få tilfeller der det motsatt av det logiske skjer; nemlig at like ladninger tiltrekker hverandre? Cooper hadde tidligere studert vekselvirkningen mellom to elektroner i en "gass" av frie ladningsbærere i et metall, og han visste at det var en grunnleggende ustabilitet i et slikt system dersom det fantes den minste tiltrekkende vekselvirkning mellom de to elektronene. Cooper hadde en hypotese om at dersom han kunne komme videre med dette, så kunne han kanskje forstå hemmeligheten ved superledningen.

Cooper, Bardeen og Schreiffer arbeidet sammen som et team i lang tid før de kom frem til det som skulle bli et stort gjennombrudd innen forskningen på superledere, og i 1957 hadde de altså løsningen på et av de store mysteriene rundt type I superledere. (For type II superledere finnes det ennå ingen allment akseptert teori.)

Cooperpar

BCS-teorien påpeker det faktum at når et elektron passerer gjennom et ionegitter, påvirkes det av ionenes ladning og svingninger, såkalte fononer. Disse fononene skaper positiv ladning i området som er med på å tiltrekke det neste elektronet som passerer det samme området. For å lettere forstå hva som skjer kan vi se på figur 2:



Figur 2: Dannelse av et Cooperpar
(Kilde: <http://www.phys.ntnu.no/brukdef/prosjekter/super/Library/index.html>)

Forklaring til figur 2:

a) Her ser vi at det første elektronet beveger seg i retning av et positivt ladet ion. På grunn av at ionet og elektronet har motsatte ladninger er det en tiltrekkende vekselvirkning mellom disse. Dette fører til en polarisering av mediet, og det vil videre si at ionet beveger seg mot elektronet. Ionet er nå ute av den likevektsposisjonen som den normalt vil ha på grunn av bindingene til de andre nærliggende ionene.

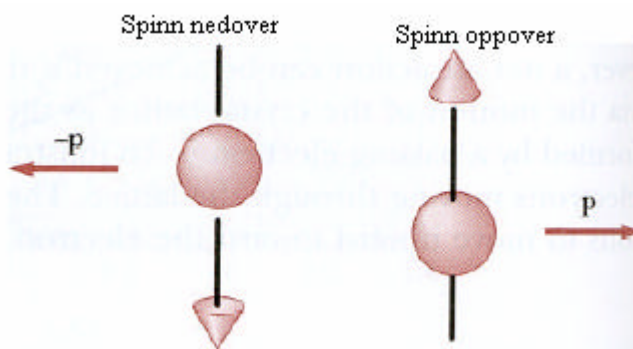
b) Her vises situasjonen etter at elektronet har blitt spreidd mot ionet og deretter er på vei bort. Siden elektronet har en mye større fart enn ionet, vil ionet bevege seg svært lite i løpet av denne tiden.

c) Nå ser vi at ionet fortsatt ligger med omtrent samme forskyvning fra likevektsstedet som tidligere i det et nytt elektron nærmer seg ionet med samme fart som det første elektronet, men i motsatt retning. Også dette elektronet blir tiltrukket av ionet og det drar ionet i retning tilbake til sin opprinnelige likevektsposisjon i gitteret.

d) Til slutt forsvinner også elektron nummer to ut av bildet, og ionet er omtrent tilbake der det startet i figur a).

Når vi ser på denne prosessen som en helhet, så ser vi at dette samarbeidet mellom to elektroner og et ion er i bunn og grunn tilnærmet en netto tiltrekningsvekselvirkning mellom de to elektronene. Dermed ser vi at to elektroner som i utgangspunktet skulle frastøte hverandre, nå i realiteten tiltrekker hverandre når vi tar med et ion inn i prosessen. En ting som er verdt å merke seg er at det er viktig at de to elektronene ikke er nær ionet samtidig slik at de ikke frastøter hverandre. Dette er mulig på grunn av at ionet har en relativt lav svingefrekvens sett i forhold til hastigheten på et elektron.

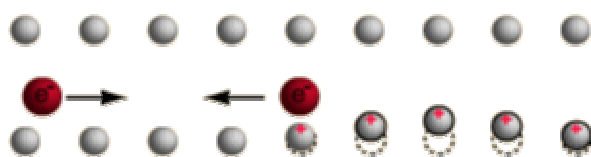
De to elektronene i et Cooperpar har motsatt rettet spinn og impuls i forhold til hverandre slik at total spinn i paret er lik null. Siden Cooperparet ikke har noen total spinn, kan alle parene være i samme tilstand i motsetning til vanlige elektroner som alle må være i ulike tilstander.



Figur 3: Her ser vi en skjematisk fremstilling av et Cooperpar. Elektronet til høyre har en impuls p og spinnretning oppover, mens elektronet til venstre har en impuls $-p$ og en spinnretning nedover. Dermed er total impuls og total spinn for systemet lik null.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Selv om vi nå har sett på en relativt enkelt fremstilling av hvordan et Cooperpar oppstår, så må vi huske på at det i realiteten ikke er snakk om svingninger på bare ett ion, men snarere en kollektiv bevegelse i ionegitteret. Selve fysikken er i midlertid den samme, bare i en større skala selvfølgelig. (Se figur 4)



Figur 4a: Et passerende elektron tiltrekker seg de positive ionene langs gitteret og forårsaker en liten endring i deres posisjon.



Figur 4b: Et annet elektron som passerer i motsatt retning blir tiltrukket av den lille endringen i positiv ladning.

(Kilde: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/supcon.html)

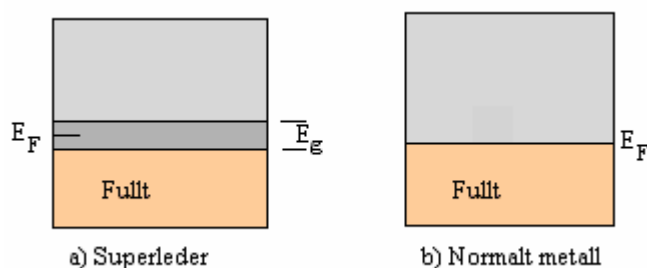
Denne prosessen med danning av Cooperpar er i store trekk innholdet i den revolusjonerende BCS-teorien for lavtemperatures superledere.

Et annet viktig resultat av BCS-teorien er forklaringen på hvordan vi kan oppnå null motstand og tilsvarende evigvarende strøm. Dette kan forklares med at ikke-perfekte ionegitter og gittervibrasjoner som vanligvis sprer elektronene ikke har noen innvirkning på Cooperparene. Det er noe av dette som er det utrolige med superledere; at de gittervibrasjonene som vanligvis er delvis ansvarlig for motstanden i vanlige metaller også er del i den interaksjonen som gir grunnlag for superkonduktiviteten. Dermed ser vi at de metallene som ved romtemperatur har liten gittervibrasjon og dermed er gode ledere, for eksempel kobber, sølv og gull, ikke er superledere, mens tinn og kvikksølv, som ved romtemperatur bare er middels gode ledere fordi de har relativt mye gittervibrasjon, blir til superledere ved lave nok temperaturer.

I en superleder nytter det ikke å se på Cooperparene individuelt siden kondenseringen av alle parene til samme kvantetilstand får systemet til å oppføre seg som et stort kvantemekanisk system. Alt som vi vil gjøre med ett Cooperpar, er vi nødt til å gjøre med alle de andre Cooperparene samtidig. Dersom vi nå kobler en krets med spenningskilde og superleder, og deretter fjerner spenningskilden så vil strømmen fortsette å bevege seg i superlederen. Dette kan greit forklares med at dersom strømmen skal stoppe opp, så er alle Cooperparene nødt til å stanse sin bevegelse samtidig siden de er i samme kvantetilstand og det er lite trolig at dette skjer.

Energigap

Stabiliteten til et superledende stadium er sterkt avhengig av korrelasjonen mellom Cooperparene. BCS-teorien forklarer superledning som en funksjon av energinivåene til et slags "makromolekyl" og eksistensen av et energigap E_g . (Figur 5a)



Figur 5:

- a) En enkel energibånd struktur for en superleder. Her ser vi energigapet mellom de lave nivåene som er fulle og de øvre tomme nivåene.
- b) Energibåndstrukturen for en vanlig leder. Legg merke til at her har vi ikke noe energigap. Ved $T = 0K$ er alle nivåene under fermi-energien E_F fulle, mens alle nivåene ovenfor er tomme.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

I en normal leder representerer fermi-energien E_F den største kinetiske energien som et fritt elektron kan ha ved temperatur $0K$. Energigapet i en superleder er veldig lite ved $T = 0K$ sammenliknet med energigapet i en halvleder og fermi-energien til et metall. Vi snakker om en størrelsesorden der E_g i en superleder $\approx 10^{-3}eV$, E_g i en halvleder $\approx 1eV$ og E_F i et metall $\approx 5eV$.

BCS-teorien hevder at når $T = 0K$ så er $E_g = 3.53 k_B T_c$, der k_B er Boltzmanns konstanten ($\approx 8.617 \times 10^{-5} eV/K$) og T_c er superlederens kritiske temperatur. Siden energigapet representerer den energien som er nødvendig for å bryte opp et Cooperpar vil det si at superledere som har store energigap har relativt høy kritisk temperatur. Siden de to elektronene i et Cooperpar har motsatt rettet spinn, vil et ytre magnetisk felt øke energien til det ene elektronet og senke energien til det andre. Hvis det magnetiske feltet blir stort nok, søker elektronparet en tilstand der begge kan spinne i samme retning. Resultatet er at paret bryter opp forbindelsen og den superledende fasen er ødelagt.

Type 1 og Type 2 superledere

Type 1 superledere

Kritisk temperatur (T_c) og kritisk magnetfelt (B_c):

Tabell 1 lister opp noen stoffer med superledende egenskaper som er klassifisert som type 1 superledere. Legg merke til at verken kobber, sølv eller gull er med, for selv om disse har utmerkede strømførende egenskaper ved normale temperaturer så blir de ikke superledende ved lave temperaturer.

Tabell 1:

Superleder	Kritisk temperatur (K)	Kritisk magnetfelt (T)
Al	1,196	0,0105
Ga	1,083	0,0058
Hg	4,153	0,0411
In	3,408	0,0281
Nb	9,26	0,1991
Pb	7,193	0,0803
Sn	3,722	0,0305
Ta	4,47	0,0829
Ti	0,39	0,01
V	5,3	0,1023
W	0,015	0,000115
Zn	0,85	0,0054

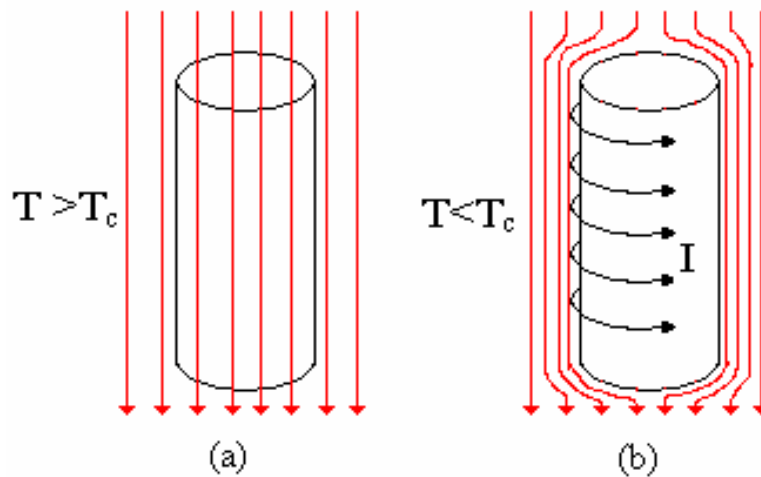
Når et magnetfelt er til stede så blir den kritiske temperaturen lavere med økende magnetfelt. Hvis magnetfeltet stiger over den kritiske verdien for magnetfeltet, så blir den superledende egenskapen ødelagt, og materialet oppfører seg som en normal leder med motstand.

$B_c(0)$ er det minimale magnetfeltet som kreves for å ødelegge superlederen i hvilket som helst materiale. Hvis magnetfeltet overstiger $B_c(0)$ så blir ikke metallet superledende for noen temperaturer. Som vi kan se av tabellen over, så er det kritiske magnetfeltet ganske så lavt for type 1 superledere. Av denne grunn er ikke type 1 superledere brukt til å konstruere superledende magneter fordi magnetfeltet som genereres ødelegger de superledende egenskapene.

Magnetiske egenskaper for type 1 superledere:

Ved hjelp av enkle argumenter basert på lover fra elektrisiteten og magnetismen kan man vise at det magnetiske feltet inne i en superleder ikke kan forandres over tid. I følge Ohms lov er det elektriske feltet inne i en leder proporsjonalt med motstanden i lederen. Siden $R = 0$ for en superleder, så må den elektriske fluksen inne i superlederen være null.

Før 1933 trodde man at superledende egenskaper var manifestet til en perfekt leder. Hvis en perfekt leder er kjølt ned under dens kritiske temperatur når den er utsatt for et magnetfelt, så skal feltet være fanget inne i lederen, selv etter at feltet er fjernet. Slutt-tilstanden til en perfekt leder er avhengig av om man setter superlederen inn i magnetfeltet før eller etter man kjøler den ned under den kritiske temperaturen. Hvis feltet kommer etter at den er kjølt ned under T_c så vil feltet bli avvist av superlederen. På den annen side, hvis den er satt inn i feltet etter nedkjølingen så vil den ikke bli avvist av superlederen.



(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Figur 6: En type 1 superleder som har form som en sylinder i et magnetfelt. (a) For temperaturer over T_c , går felt linjene gjennom prøven fordi den er i sin normale tilstand. (b) Når den er kjølt ned slik at den blir superledende, så blir den magnetiske fluksen utvist fra lederen ved at det induseres en overflate strøm.

Type 2 superledere

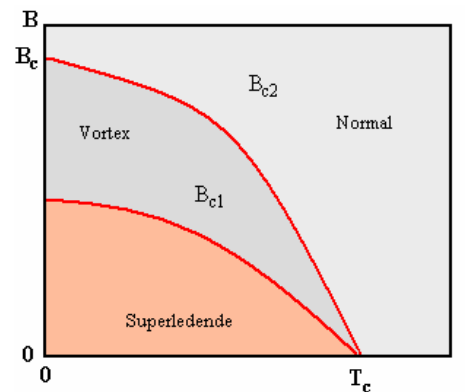
Type 2 superledere er karakterisert av to kritiske magnetfelt, kalt B_{c1} og B_{c2} i figur 7. Når det utvendige magnetfeltet er mindre enn det laveste kritiske feltet B_{c1} , er materialet helt superledende og ingen flukslinjer trenger gjennom, akkurat slik som ved type 1 superledere. Når det utvendige magnetfeltet overstiger en øvre kritisk grense B_{c2} , trenger fluksen igjennom og den superledende tilstanden er ødelagt. Akkurat slik som for type 1 superledere. I feltet mellom B_{c1} og B_{c2} , er materialet i en blandet tilstand. I denne tilstanden kan materialet ha null motstand og samtidig ha fluks som går igjennom. Det som skjer er at deler av superlederen mister sin superledende egenskap, og samtidig er det deler som forblir superledende. Se figur 8.

Tabell 2 viser noen kritiske temperaturer og kritisk magnetfelt der superlederen mister sine superledende egenskaper B_{c2} .

Tabell 2:

Superleder	Kritisk temperatur (K)	Kritisk magnetfelt (T)
Nb ₃ Al	18,7	32,4
Nb ₃ Sn	18	24,5
Nb ₃ Ge	23	38
NbN	15,7	15,3
NbTi	9,3	15
Nb ₃ (AlGe)	21	44
V ₃ Si	16,9	23,5
V ₃ Ga	14,8	20,8
PbMos	14,4	60

Verdiene til B_{c2} er store i forhold til B_c for type 1 superledere, av denne grunn er type 2 superledere best egnet for konstruksjon av magneter med et sterkt felt.



Figur 7: Kritisk magnetfelt som en funksjon av temperatur for en type 2 superleder. Under B_{c1} oppfører materialet seg som en type 1 superleder. Over B_{c2} oppfører materialet seg som en normal leder. Mellom disse to tilstandene er superlederen i en blandet (vortex) tilstand.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Type 2 superledere kan brukes til å skape et magnetfelt av styrke 5 til 10 T og de krever ingen strøm for å opprettholde denne tilstanden (annet enn nedkjøling). Vanlige elektromagneter med jernkjerne klarer sjeldent og lage et magnetfelt som er sterkere enn 2 T, og bruker i tillegg strøm for å opprettholde feltet.

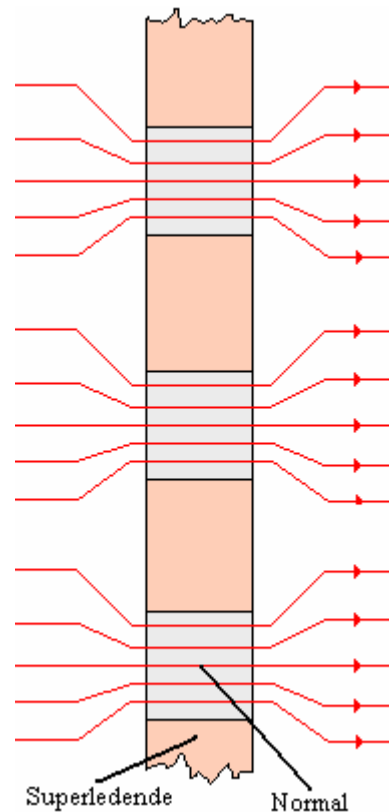
Andre egenskaper til superledere

Vedvarende strøm:

Fordi motstanden i en superleder er null under en kritisk temperatur, så vil man med en gang en strøm er satt i lederen oppdage at den er konstant, uten at man tilfører ny strøm (fra Ohms lov). Disse vedvarende strømmene, noen ganger kalt superstrøm, har blitt observert til å vare flere år, uten noe målbart tap av strøm.

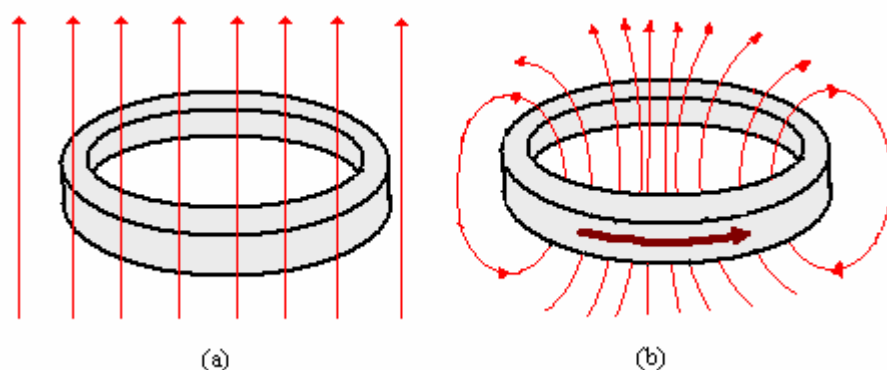
For å bedre forstå opprinnelsen til slike strømkretser kan du se for deg en ring laget av et superledende materiale. Dersom den er i normalt tilstand ($T > T_c$) i et magnetfelt, og temperaturen siden senkes under T_c , så blir ringen superledende (vist i figur 9a). I likhet som med en sylinder, blir fluksen avvist fra det indre av ringen pga induisert overflatestrøm. Fremdeles så passerer flukslinjene gjennom hullet i ringen. Når det påførte magnetfeltet skrues av, slik som i figur X3b, så blir fluksen gjennom hullet i ringen fanget fordi fluksen i superlederen ikke kan forandres.

Den superledende ringen hindrer fluksen fra å gå tilbake til null, fordi den induerte strømmen i ringen ikke forsvinner når det utvendige magnetfeltet skrues av. Eksperimentelle forsøk der man har brukt en teknikk som er kjent som nuclear magnetic resonance indikerer at slike strømmer vil vare lenger enn 10^5 år.



Figur 8: Et skjematisk diagram av en type 2 superleder i en blandet (vortex) tilstand. Prøven inneholder fyllrom med normalt materiale, slik at magnetiske feltlinjer kan passere. Disse felt linjene er holdt ute fra de superledende regionene.

(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)



(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

Figur 9: (a) Når en superledende ring plasseres i et magnetfelt ved temperatur $T > T_c$, og temperaturen så senkes til $T < T_c$, så passerer fluksen gjennom hullet i ringen selv om det ikke passerer gjennom materialet som lager ringen. (b) Når det påførte magnetfeltet skrues av, blir fluksen gjennom hullet fanget, og en induert strøm oppstår i materialet.

Det som skjer hvis ringen er kjølt ned slik at $T < T_c$ før det blir påført et ytre magnetfelt, er at fluksen da blir holdt ute av hele ringen (ingen flukslinjer gjennom hullet i ringen). Det blir da induisert en strøm (når ringen er i magnetfeltet) slik at det blir opprettholdt null fluks gjennom hullet i ringen. I dette tilfellet forsvinner den induerte strømmen når det ytre magnetfeltet skrues av.

Coherence lengde

En annen viktig parameter i sammenheng med superledere er coherence lengde (ξ). Coherence lengde er den minste dimensjonen hvor en superleder kan bli opprettet eller ødelagt. Tabell X1 lister opp noen av disse for noen utvalgte superledere.

Superleder	ξ (nm)	λ (nm)
Al	16	160
Cd	110	760
Pd	37	83
Nb	39	38
Sn	34	23

Tabell 3: Inntrengningsdybde og coherence lengde til noen superledere ved $T = 0$ K
(Kilde: Serway, Moses, Moyer 1997)

En superleder er av type 1 hvis $\xi > \lambda$. De fleste av de rene metaller som er superledende faller under denne kategorien.

En økning i forholdet λ/ξ impliserer i de fleste tilfeller at det er en type 2 superleder.

En detaljert analyse viser at coherence lengde og inntrengningsdybde begge er avhengige av den gjennomsnittelige frie veien til elektronene i normal tilstand. Dette betyr også at man ved å tilføre urenheter kan redusere den frie veien til elektronene; noe som medfører at inntrengningsdybden øker og coherence lengden synker. På denne måten kan man få et metall til å skifte fra type 1 leder til type 2. Ett eksempel er bly som er en type 1 superleder, men som ved å tilføre 2% indium skifter til å bli en type 2 leder.

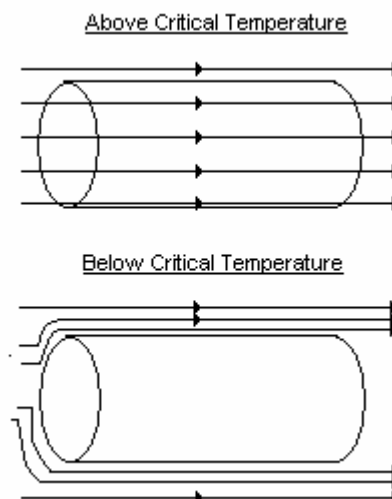
Meissner-effekten

Da det ble oppdaget at superledere ikke bare var perfekte ledere for strøm, men at de også hadde muligheten til å ekskludere et magnetisk felt, ble dette et nytt og spennende forskningsområde. De som først oppdaget denne muligheten i 1933 var Walther Meissner og R. Ochsenfeld. De oppdaget at en superleder ikke vil tillate at et magnetisk felt gjennomtrenger selve superlederen. Denne effekten kalles Meissner-effekten. Den blir også ofte referert til som perfekt diamagnetisme eller Meissner-Ochsenfeld effekten. Vi fikk demonstrert Meissner-effekten i løpet av prosjektperioden, og mye av det vi lærte og observerte i løpet av denne demonstrasjonen vil vi bruke til å forklare hva Meissner-effekten egentlig går ut på.

Meissner-effekt, diamagnetisme

Diamagnetisme er en svak form av magnetisme som bare opptrer når du har et ytre magnetisk felt. Diamagnetismen kommer av forandringer i elektronbanene på grunn av dette feltet. Det induerte feltet er vanligvis veldig lite og har motsatt retning i forhold til det påførte feltet. Superledere har det som vi kaller perfekt diamagnetisme. Da vil det bli induert et slikt felt som er akkurat like stort som det påførte feltet, med et resultat av at feltet inne i superlederen blir lik null. Dette fordi motstanden i superlederen er lik null.

Figur 10: Meissner-effekten opptrer når vi har et ytre felt på en superleder og superlederen blir nedkjølt til kritisk temperatur.

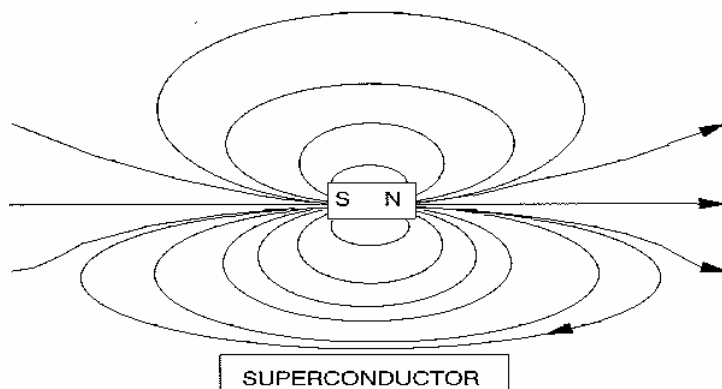


Meissner-effekten vil bare være tilstede dersom det magnetiske feltet er relativt lite. Dersom det magnetiske feltet blir for stort, vil det gjennomtrengte metallet og metallet vil miste sin superlederevne.

Magnetisk sveving, pinning

Ved å ha et ytre felt på superlederen mens vi kjøler den ned får vi et frastøtende magnetisk felt. I følge Earsnhaws teorem kan ikke en magnet sveve på et slikt felt da det ikke er noen stabil posisjon magneten kan befinne seg i, men i en superleder vil dette kunne gå på grunn av såkalt "pinning".

Pinning kommer av det man kan se på som huller i superlederen; små deler i superlederen som ikke er superledende. Disse hullene vil bli magnetisert av magnetfeltet slik at det blir dannet et felt som går samme vei som det ytre magnetfeltet. Summen av feltene fra alle disse små magnetene gir et relativt sterkt felt. Dette feltet vil holde en magnet i en fast avstand fra en superleder.

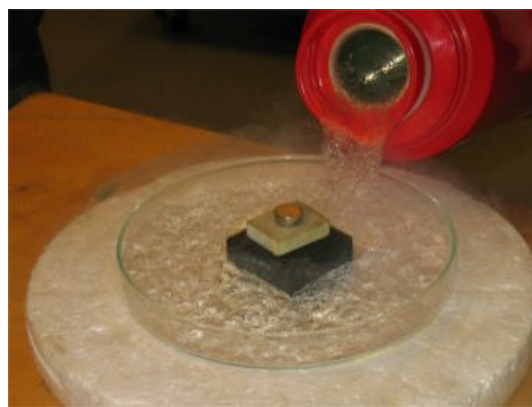
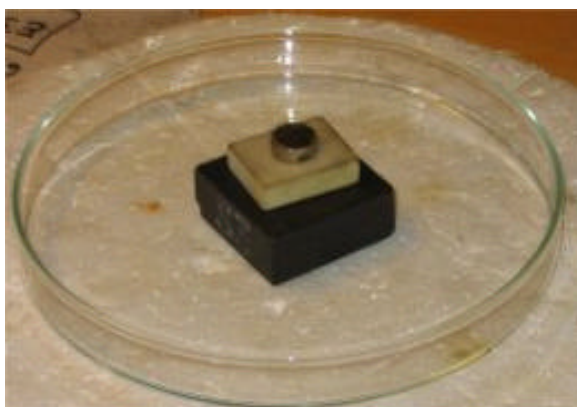


Figur 11: Tegning av flukslinjene til en magnet som svever over en superleder
(Kilde: www.physnet.uni-hamburg.de/home/vms/reimer/htc/pt2.html)

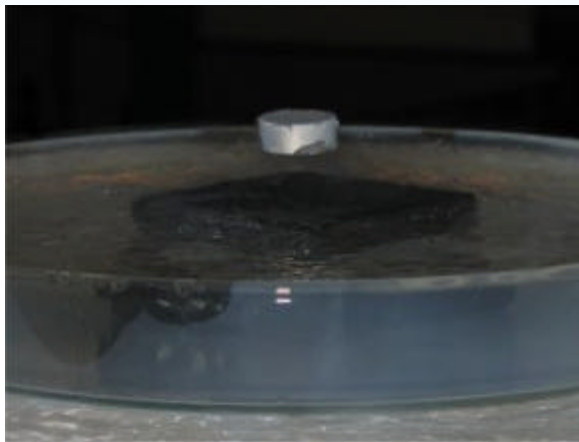
Forsøk med Meissner-effekt

I dette forsøket skulle vi få en magnet til å sveve over en superleder. Vi brukte $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ som superleder og flytende nitrogen til å kjøle superlederen ned. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ blir superledende ved 93K.

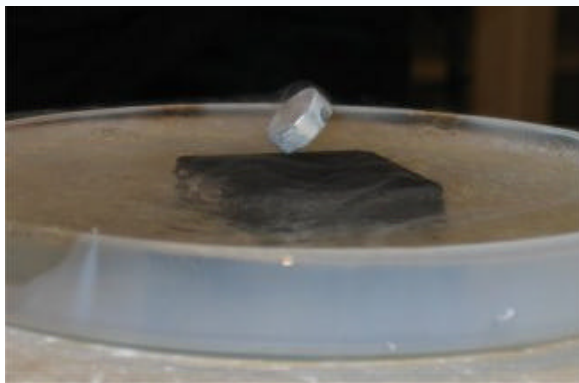
Vi la superlederen i en glassbolle og la en magnet oppå den. Mellom superlederen og magneten ble det lagt et viskelær. Så helte vi flytende nitrogen i skåla og ventet på at temperaturen til superlederen skulle nå 93K.



Når magneten var nedkjølt nok kunne vi ta vekk viskelæret mellom superlederen og magneten. Vi kunne da se at magneten svedde over superlederen.



Ved å bruke fysisk kraft på magneten kunne vi forandre flukslinjene slik at magneten ble stående i en annen posisjon. Ved å gi magneten en dytt kunne vi få den til å spinne. Når magneten spinner uten å forandre flukslinjene vil den kunne spinne veldig lenge. Dette fordi friksjonen fra lufta på magneten er svært liten.



Vi kunne også løfte opp superlederen og snu den på hodet. Vi ser at magneten fremdeles holder seg i samme posisjon.



Etterhvert som superlederen ble varmere så vi at magneten datt lenger nedover. Til slutt, når temperaturen ble for høy, lå magneten helt nede på superlederen.

Superledere i dag

Maglevtog

Hvis du har planer om å reise fra en plass til en annen har du mange muligheter. Du kan gå, sykle, kjøre bil, ta tog eller fly. Over en lengre distanse er det som regel fly som er den beste løsningen. Men tenk hvis vi hadde et tog som kunne konkurrere med hastigheten til et fly; et tog som kunne komme opp i en hastighet på 500km/t og som i tillegg nesten ikke forurenses og bråker mye mindre enn et vanlig tog.

Dette toget finnes allerede. Det finns flere prøvebaner for slike tog i Japan, Tyskland og USA. I Shanghai er det faktisk et kommersielt maglevtog i full bruk. Dette toget går fra Longyang Road Station til Pudong Airport, og bruker under 10 minutter på en 30km lang strekning. Gjennomsnittshastigheten til toget er på hele 430km/t. Så hvorfor bygges det ikke flere slike togbaner? Vi har jo teknologien til å bygge det, har vi ikke?

Problemet med en slik bane som er i Shanghai er at det koster altfor mye å bygge og er forholdsvis dyr i drift, en bane slik som den som er beskrevet nedenfor er mer aktuell for fremtiden fordi denne bruker superledende magneter som gjør at den er billigere i drift og også billigere å produsere.



Miyazaki Maglev testbane i Japan. (Kilde: www.rtri.or.jp)

Forskning og utvikling av maglev-teknologi med superledere har holdt på siden 1970. Etter en god del testing på laboratoriet kunne byggingen av en 7km lang testbane i Miyazaki Prefecture begynne 1975, og i 1987 kom toget MLU001 opp i en fart på 400,8km/t på denne banen.

En annen milepel innenfor Maglev kom i 1990 når det fikk status som nasjonalt sponset prosjekt i Japan, og Yamanashi Maglev Test Line ble bestemt bygd. Banen sto ferdig i 1997 og blir nå brukt til test kjøring. 24. desember samme året kom et maglevtog opp i 550km/t på denne banen og 2. desember 2003 kom et annet tog opp i en fart på 581km/t.

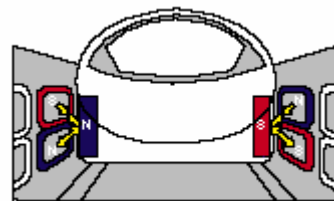
Forsking og utvikling av maglevtog har også vært under utvikling i Tyskland, men banene har ikke basert togene sine på superledende magneter.

“The Maglev 2000 of Florida Corporation” er godt i gang med å utvikle en ny type maglevtog basert på den japanske modellen og på de nyere maglev-opptdagelsene til Dr. Powell og Danby. Dette systemet har forbedret ytelse og svært reduserte kostnader. Dette gjør byggingen av nye maglevtog og baner mye mer attraktivt, da det nå er mulig å kunne tjene penger på det. Maglev 2000 har planer om å bygge en slik togbane i Florida.

Vi har valgt å se på den japanske modellen siden det er denne som bruker superledende magneter i maglevtoget. Denne modellen er også utgangspunktet for banen som skal bygges i Florida.

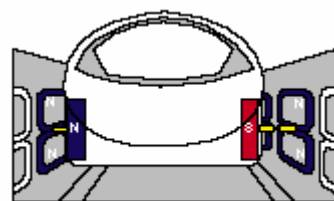
Figur 12a: *Prinsipp om sveving:*

Levitasjonsspoler er montert på sideveggene av banen. Når de superledende magnetene som er om bord på toget passerer i høy hastighet noen cm nedenfor disse spolene blir det induisert en elektrisk strøm i spolene. Et resultat av dette er krefter som presser den superledende magneten oppover og krefter som presser den nedover samtidig, og på den måten får toget til å sveve.



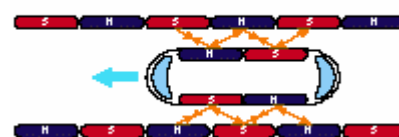
Figur 12b: *Prinsipp om sideveis styresystem:*

Levitasjonsspolene som står mot hverandre er koblet sammen under banen og utgjør en sløyfe. Når et maglevtog som vi kan tenke på som en superledende magnet, er i fart og skifter retning, vil en elektrisk strøm bli induisert i sløyfa. Dette medfører videre til en frastøtende kraft som virker på levitasjonsspolene på den siden som er nærmest toget og en tiltrekkende kraft på den sida på den sida som er lengst vekk. Toget vil da alltid ligge midt på banen.



Figur 12c: *Prinsipp om framdrift:*

En frastøtende kraft og en tiltrekkende kraft induisert mellom magnetene blir brukt til å drive toget fremover. Fremdriftsspolene på hver side av banen får kraft fra en kraftstasjon som lager et skiftende magnetisk felt på banen. De superledende magnetene om bord på toget blir tiltrukket og frastøtet av det skiftende feltet, og driver på den måten toget fremover.



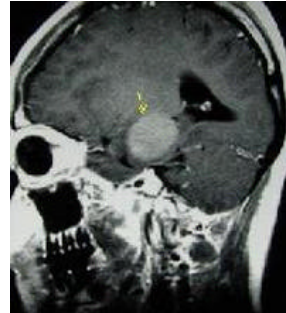
(Kilde: www.maglev2000.com/today/today-02-a.htm)

MRI

MRI (Magnetic Resonance Imaging) er en maskin som kan gi oss fantastiske bilder av hva som skjer inne i menneskekroppen. Den gir oss utallige flere detaljer enn noen annen avbildningsmetode. For at disse maskinene skal gi oss best mulig bilder, trenger vi sterke magnetiske felt.



Stor og bråkete MRI maskin



MRI-bilde av en person med svulst på hjernen

Den største og viktigste delen i et MRI system er magneten. Magneter som brukes i MRI i dag er 0,5 T – 2,0 T. For å kunne lage et så sterkt felt brukes det tre forskjellige typer magneter; elektromagneter, permanente magneter og superledendemagneter.

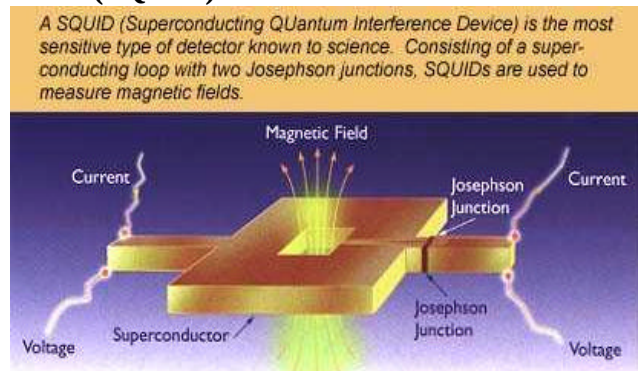
- Elektromagnetene er de billigste magnetene å produsere, men å lage et felt på 0,3 T med en slik magnet krever svært mye strøm og det blir veldig dyrt å bruke.
- En permanent magnet er (utrolig nok) permanent, men en permanent magnet med sterkt nok felt til en MRI vil veie svært mange tonn.
- En superledende magnet er den magneten som er mest vanlig. Den er forholdsvis dyr å produsere men fordi motstanden i den er lik null vil brukskostnadene være svært redusert. En slik magnet kan lett lage det ønskede 0,5 til 2,0 T feltet og vil pga dette kunne lage bilder med høyere kvalitet.

Ved å sammenligne disse tre forskjellige magnettypene er det ikke vanskelig å forstå at det er superledendemagneter som er mest brukt i MRI.

Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

SQUID kan oppdage magnetfelt som er mindre enn 1 til 10 milliarder av det som jorda lager.

SQUIDs blir brukt av fysikere i søken etter gravitasjonsbølger. Geologer bruker SQUIDs til å finne oljedepoter og andre mineraler. Olje og mineraldepoter forstyrrer jordens magnetfelt, noe som lett oppdages ved hjelp av SQUID. SQUID brukes også ombord på fly og helikopter for å sjekke ut lengde av områder.



Figur 13: SQUID er den mest sensitive typen av detektorer som vi kjenner til i fysikken
(Kilde: www.superconductors.org)

(Vi nevner også for moro skyld at det materialet som var i den superledende klossen vi brukte under Meissner forsøket er den typen materialet man lager en SQUID av.)

Er superledere fremtiden?

Superdatamaskiner, SQUIDS, elektrisk kraftstyring, motorer og magnetiske svevetog er bare noe av det superledere kan brukes til uten å kaste bort energi. Årlige brukes milliarder på forskning på høy temperaturs superledere, og superledere er i dag en milliardindustri.

Strømledninger

Strømledninger som overfører strøm uten tap av energi ville bety at mer strøm kan overføres enn tidligere. Vanlige høyspenningsledninger har i dag et tap på ca 3% av den energien som overføres. Superledende høyspenningsledninger ville bety sparte penger, samt at man ikke hadde trengt all den plassen man bruker i dag.

Generatorer

I generatorer kunne man byttet ut ledninger med jernkjerne med et superledende materiale. Dette ville gjort generatorer mindre og mer effektiv.

Motorer

Motorer som er laget med superledende ledninger ville kunne lages mindre enn de motorene vi har i dag, og vært langt mer effektive. Denne typen motorer ville vært spesielt godt egnet på ubåter og skip.

Siden superlederteknologi vil hjelpe med å redusere størrelse og vekt på motorer, generatorer og andre støttende komponenter, forventer den amerikanske marinen at dagens forskning skal hjelpe de med å gå fra vanlige forbrenningsmotorer og over til elektrisk framdrift for skipene deres.



Superledermotor
(Kilde: superconductors.org/Uses.htm)

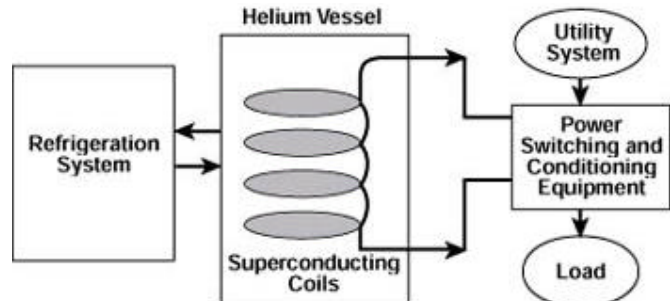
Med en motor som er bygget med superlederteknologi kan det bygges motorer som er opptil 70% mindre og lettere enn en vanlig motor, og fremdeles produsere like mye energi. Dette er inklusivt alle de ekstra kjølesystemene som trengs pga superlederne. Dette gir en kjempe fordel ute til sjøs der den sparte plassen kan brukes til ekstra lastekapasitet. En slik motor er også 1 til 2 % mer effektiv enn en vanlig motor, litt avhengig av belastningen. Til sammen så betyr dette mange millioner i året for et vanlig lasteskip.

Elektriske motorer brukes i dag i de fleste cruise skip. Årlig omsettes det for 400 millioner dollar bare på motorer og generatorer i markedet for cruise og laste skip. Det er den amerikanske marinen som betaler for testene selv om disse motorene sannsynligvis blir å finnes i det kommersielle markedet først. Daglig leder for American Superconductor's, Greg Yurek, forventer at de første høy temperaturs superledermotorer blir å finne i kommersielle skip allerede i begynnelsen av 2005.

Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

SMES lagrer elektrisitet i lengre perioder i superledende "coils". SMES vil brukes i elektriske apparaturer en dag og vil også brukes til lagring av kraft, slik at man kan redusere antall strømbrudd. Slike strømbrudd koster i dag amerikanske selskaper ca 12 milliarder dollar hvert år.

Større selskaper er svært avhengig av pålitelige og bærekraftige kraftverk for dagelig bruk. Den utvidede bruken av sofistikerte elektroniske og databaserte systemer gjør at man krever et forbedret miljøvennlig alternativ til uavbrutte strømleveranser. Dette har ført til at det nå forskes, utvikles, testes og evalueres slike systemer.



Figur 14: Basis for et SMES-system.

(Kilde: www.afrlhorizons.com/Briefs/Dec01/ML0009.html)

Årsaken til denne evalueringen er for å få nærmere kunnskaper om SMES-teknologien er noe å satse på i framtiden. United States Air Force tester og evaluerer disse produktene som senere skal brukes i det kommersielle markedet. Meningen er å bestemme om SMES-teknologien har mulighet til nok forbedring på strømkvalitet, pålitelighet og operasjonell funksjonalitet.

Et SMES-system, laget for å forbedre strømkvaliteten for kritiske belastninger, sørger for at det ikke oppleves at strømmen forsvinner ved midlertidige strømbrudd. Systemet lagrer energi i en superledende spiral senket ned i flytende helium. (se figur 14)

Nytten av et slikt system er at det fungerer som et nødaggregat. Istedenfor at strømmen går i bygget, så utlades spiralen og gir den nødvendige strømmen som er tilpasset belastningen. Kjølssystemet og heliumet holder superlederen kald slik at spiralen holder seg i en superledende tilstand.

Det har blitt gjort store forbedringer på områdene innenfor kjøling, elektronikk, overvåking og kontroll av slike systemer. Høye investering og vedlikeholdskostnader er fremdeles den største hindringen for å gjøre SMES til et økonomisk alternativ til batteri-backup og motorgeneratorer.

Kun framtiden og videreforskning på området vil vise om SMES blir et alternativ til UPS (uninterruptible power supply) batteri systemer, og dermed kunne redusere antall batteri som kreves for drift av et effektivt UPS system og samtidig redusere eller eliminere bruken av miljøfarlig batterisyre.

Datamaskiner

Hvis datamaskiner brukte superledende deler ville de vært mye raskere enn de er i dag. De ville vært mindre fordi de ikke ville trengt rom for avkjøling. Dagens datamaskiner tar mye plass fordi de trenger kjøling.

Dagens datamaskiner bruker Josephson forbindelser. Disse har navnet etter Bjarne David Josephson fra Cambridge Universitetet i England, som kom opp med Josephson effekten. Josephson effekten sier det at elektroner kan flyte fritt over et isolerende lag mellom to superledende materialer. Han fikk nobel prisen i fysikk for sine oppdagelser i 1973. Josephson forbindelser har et tynt lag med isolerende materiale i klem mellom to superledende

materialer. Siden Josephson forbindelser krever svært lite strøm for å fungere produserer de også mye mindre varme.

Superledere i fremtiden

Høy temperaturs superledere kan lede til mange viktige teknologiske framskritt, slik som høyeffektive lettvekts motorer. Men mange viktige materialproblemer må overkommes før slike apparater kan bli virkelighet. Kanskje den vanskeligste delen er å forme det skjøre keramiske materialet i brukbare former, slik som wire og tynne filmer for små apparater (SQUID). Et annet stort problem er den relativt lave strømtettheten som keramiske materialer kan bære. Hvis dette kan overkommes er det spennende å spekulere i noen av de framtidige bruksområdene til slike nye materialer.

Et åpenbart bruksområde til slike strømførere med null motstand er å bruke det i strømførende ledninger. En ikke ubetydelig del av strømmen går tapt til varme når strømmen føres gjennom normale ledere. Hvis slike strømlinjer og transformatorer kunne lages av superledende materiale kunne disse overføringstapene bli eliminert, og store mengder energi hadde blitt spart på verdensbasis.

De nye superlederne kan få en revolusjonerende innvirkning innenfor elektronikken. Hvis man kunne brukt superledende film til å binde sammen databrikker kunne størrelsen blitt betydelig redusert og hastigheten økt siden informasjon kunne blitt overført raskere og flere brikker kunne blitt plassert på samme kort. Dette fordi det blir langt mindre varmeutvikling.

Et annet viktig bruksområde til superledere er supermagneten i partikkelakseleratorer. Nå bruker alle profesjonelle partikkelakseleratorer flytende helium til nedkjøling av superlederne. Igjen kan store summer bli spart på nedkjøling og driftskostnader hvis man kan gå over til superledende elementer som bare trengs nedkjøling av flytende nitrogen.

Er superledere fremtiden? Etter at man har forstått hva superledere er for noe og hva det brukes til i dag så er forskere ganske overbevist om at superledere både er viktig i dag og i fremtiden, men mye av dette er avhengig av fremdriften innen forskning på cryogenic kjøling, da dette er den største hindringen så langt.

En dag vil superledere erstatte de strømførende materialene vi bruker i dag. Superledere vil forhåpentligvis spare milliarder for land rundt om i hele verden.

Avslutning

Superledere har langt flere bruksområder enn å føre strøm fra A til B uten energitap. De har for eksempel interessante magnetiske egenskaper som gjør at de kan brukes i forskjellige måleapparater og til konstruksjon av supermagneter på en svært gunstig måte, både med tanke på energitap og den unike funksjonen de kan få i noen tilfeller.

Superledere er et område under utvikling. I fysikkens verden er dette et relativt ferskt område hvor man først de siste 50 årene har gjort de store framskrittene. I dag er de største hindringene ikke viljen til å utvikle området, men de barrierene man møter fordi superleder må være så ekstremt kalde, og det at dagens superledere er så vanskelig å forme til noe brukbart siden de er så porøse. Investeringene innen forskning på superledere har bare de siste årene mangedoblet seg fordi det kommersielle markedet fikk opp øynene for det.

De teoriene man har utviklet så langt gjelder kun for type 1 superledere, men de er gode teorier så man regner med at man beholder dem hvis det ikke blir oppdaget noe særdeles overraskende innenfor området. Pr i dag har vi ingen gode teorier for type 2 superledere selv om BCS teorien også her virker ved de fleste empiriske observasjoner.

Pr i dag så er det keramiske materialet: $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$ den nåværende rekordholderen når det kommer til høy temperaturs superledere, og som forsiden viser så er den rekorden på 138K.

Kilder

Internett sider

<http://www.eapen.com/jacob/superconductors/chapter6.html>
<http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/jan04/0104tran1.html>
<http://www.afrlhorizons.com/Briefs/Dec01/ML0009.html>
<http://superconductors.org/Uses.htm>
<http://www.phys.ntnu.no/brukdef/grupper/materialfysikk/super/index.html#>
http://en.wikipedia.org/wiki/Meissner_effect
<http://www.maglev2000.com/today/today-02-a.html>
<http://travel.howstuffworks.com>
<http://www.physnet.uni-hamburg.de/home/vms/reimer/htc/pt2.html>
<http://www.superconductors.com>
<http://cnls.lanl.gov/Highlights/1997-06/html>
<http://www.forskning.no/Artikler/2003/oktober/1065526989.54>
<http://www.forskning.no/Artikler/erik/1075374858.74>
<http://www.kptnaturfag.no>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/supcon.html>
<http://www.ornl.gov/info/reports/m/ornlm3063r1/contents.html>
http://www.chemsoc.org/exemplarchem/entries/igrant/main_noflash.html
<http://www.phys.ntnu.no/brukdef/prosjekter/super/Library/>

Bok

Serway, Moses, Moyer: *Modern Physics (2.ed)*, 1997, side 476 - 527