SUPERLEDERES GENERELLE EGENSKABER

Torsten Freltoft, NKT

Superledning blev første gang iagttaget i 1911 på universitetet i Leiden af den hollandske videnskabsmand Kamerlingh Onnes. Onnes opdagede, at rent kviksølv fuldstændigt taber sin elektriske modstand, når temperaturen er under 4 K. Onnes blev også klar over, at kviksølv ved denne temperatur fremtræder i en ny tilstand, hvor de elektriske egenskaber er meget forskellige fra de hidtil kendte; denne nye tilstand blev kaldt den "superledende tilstand".

Det viste sig hurtigt, at man ved anvendelse af et tilstrækkeligt stærkt magnetfelt eller ved at føre en stærk strøm gennem en prøve kunne ødelægge dennes superledende egenskaber og genoprette dens normale specifikke modstand. Der gik imidlertid mere end 20 år før det blev opdaget, at et superledende metal også er karakteriseret ved usædvanlige *magnetiske* egenskaber helt forskellige fra de egenskaber, der normalt kendetegner metaller.

Indtil 1986 var der fundet superledning i 26 metalliske grundstoffer og i utallige legeringer. Den temperatur T_c, hvor overgangen fra normalt ledende til superledende tilstand sker, afhænger af stoffet. Tabel 1 viser nogle eksempler. I årene siden 1986 er der fundet superledning i en række kermaiske materialer: kobberoxider og bismuthoxider med overgangstemperaturer, som er langt større end de tidligere kendte. Tre eksempler herpå er ligeledes vist i Tabel 1.

Tabel 1 Eksempler på superledende grundstoffer, legeringer og oxider.

Grundstoffer	**T_c (K)**	**Legeringer**	**T_c (K)**
Al	1.2	Nb_3Sn	18
Hg	4.2	Nb_3Ge	23
In	3.4	**Oxider**	**T_c (K)**
Nb	9.3	$YBa_2Cu_3O_7$	92
Pb	7.2	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110
Sn	3.7	$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	122

Teoretisk forstod man ikke superledning før sidst i 50erne, hvor Bardeen, Cooper og Schriefer fremsatte en teori (nu kendt som BCS-teorien), der giver en forklaring på fænomenet. Teorien er baseret på en kvantemekanisk behandling af elektronerne og gittersvingningerne (fononerne) i metaller, men en detaljeret gennemgang af denne teori ville blive for omfattende i denne sammenhæng. Derfor gives kun en kort fremstilling med henblik på at forklare de begreber og parametre, som er vigtige for at diskutere superledning. Grundlæggende teoretiske aspekter omtales mere indgående i Per Hedegårds artikel i dette nummer af KVANT.

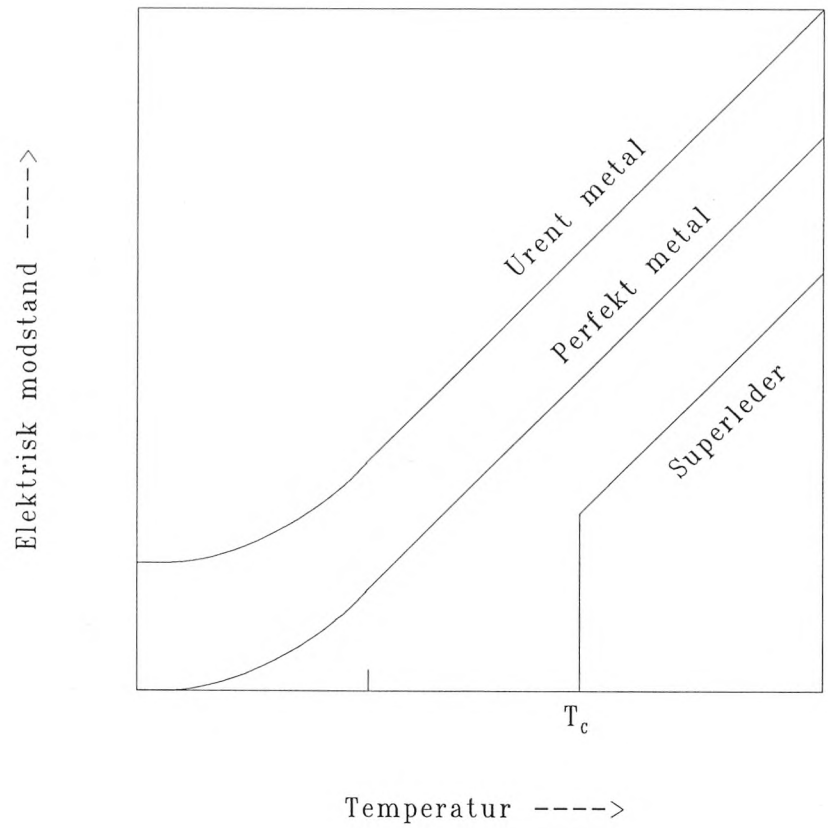
Et mikroskopisk billede

Når en elektrisk strøm føres gennem et normalt metal, undergår elektronerne til stadighed elektronspredningsprocesser som følge af den gensidige vekselvirkning mellem elektronerne og enten urenheder eller krystallernes gittersvingninger (fononerne). Spredningen er generelt uelastisk og forårsager derfor tab af energi (varme) til omgivelserne, og elektrisk modstand opstår. I et helt ideelt, rent og perfekt metal ville elektronspredningen alene foregå ved hjælp af gittersvingninger. Her ville modstanden forsvinde helt, når temperaturen nærmer sig nul. Fononerne "fryses ud" ved lave temperaturer. I alle virkelige, normaltledende metaller bliver der imidlertid en restmodstand tilbage ved lave temperaturer. Restmodstandens størrelse afhænger blandt andet af metallets renhed. I figur 1 vises skematisk den specifikke modstand som funktion af temperaturen for et helt rent, et urent og et superledende metal.

Ved høje temperaturer vil en superleder opføre sig som et almindeligt metal. Ved afkøling under en vis temperatur T_c overgår elektronerne til den superledende fase. T_c kaldes den kritiske temperatur eller overgangstemperaturen. I den superledende fase vil elektronerne parvis kredse om hinanden og danne danne par, de såkaldte "Cooper par". Parret har en karakteristisk udstrækning, ξ, kohærenslængden. Derfor vil ξ også være den typiske tykkelse af et eventuelt overgangslag mellem et superledende og et normalt domæne i et materiale. I tabel 2 vises værdier af ξ for forskellige typer superledere. ξ er normalt meget større end udstrækningen af de fejl, der begrænser ledningsevnen, for eksempel omfanget af gitterdeformationer eller størrelsen af forurenende atomer.

Cooper parrenes eksistens kan forklares udfra kvantemekanikken, som det forklares i den følgende artikel. Kvantemekanisk set beskrives en partikel eller et partikelsystem ved at det er i en givet tilstand, der kan beskrives ved en bølgefunktion. Elektroner, protoner, neutroner har den egenskab at der kun kan være én partikel i en givet tilstand, som angivet af Paulis udelukkelses princip. Disse partikler kaldes under et for fermioner.

Andre partikler er bosoner, og der er ingen begrænsning på hvor mange af disse der kan være i den samme tilstand. To fermioner kan knytte sig sammen og blive til en boson - det sker blandt andet med elektron-parret i et Cooper par. Når temperaturen kommer ned under T_c vil Cooper parrene havne i en tilstand, hvor de har mindre energi end de enkelte elektroner. Dette betyder, at der er en energimængde, som skal tilføres for igen at skille elektronparret ad. Energigabet, betegnet 2Δ, kan betragtes som en bin-



Figur 1. Den elektriske modstand som funktion af temperaturen for et urent, et perfekt og et superledende metal.

dingsenergi mellem elektronerne i parret. Δ afhænger af temperaturen som vist i figur 2.

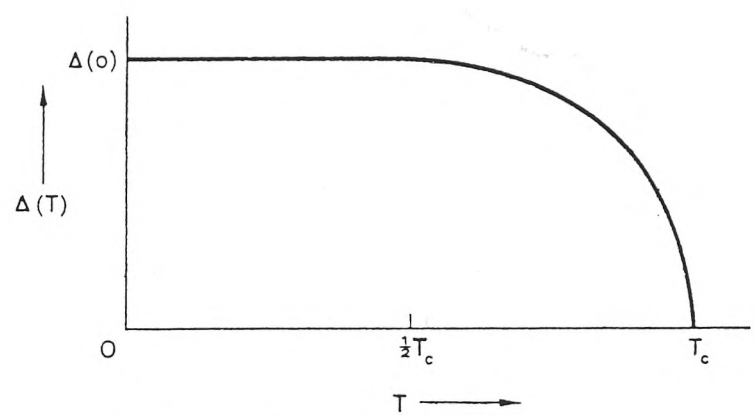
Som det kan ses af figuren, når Δ en næsten konstant værdi Δ(0) omkring $0.75T_c$. For at opnå stabile betingelser er det derfor ved de fleste anvendelser vigtigt, at den temperatur, man arbejder med, er lavere end den ovenfor anførte temperatur.

BCS teorien forudsiger en simpel sammenhæng mellem Δ(0) og den kritiske temperatur:

$$2\Delta(0) = 3.5kT_c,$$

hvor k er Boltzman konstanten. Hvis det antages, at relationen også gælder for de nye oxid superledere med kritiske temperaturer på omkring 100K, betyder det, at de har energigab, der svarer til foton bølgelængder omkring 5 μm (det infrarøde område). Dette gør dem blandt andet til potentielle kandidater for anvendelser som detektorer for infrarød stråling. Det betyder også, at de til elektroniske anvendelser i princippet kan fungere ved langt højere frekvenser end traditionelle superledere - potentielt helt op i THz området (1 THz = 10^{12} Hz).

Δ kan blandt andet måles ved at iagttage infrarød absorbtion i materialet. I den superledende tilstand vil



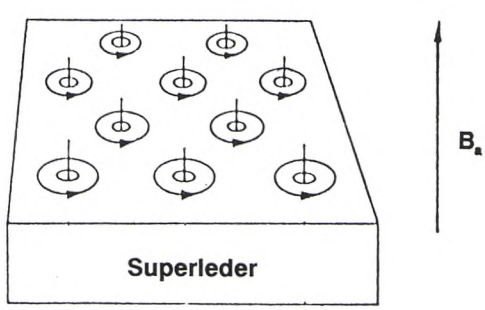
Figur 2. Variation af energigabet Δ som funktion af temperaturen.

fotoner med energi over 2Δ kunne opløse Cooper par, mens fotoner med lavere energier ikke kan. Man observerer derfor en kant eller et trin i absorptionskurven ved passage af energien 2Δ. Δ kan også findes ved iagttagelse af den kvantemekaniske tunneleffekt eller ved varmefyldemålinger.

I den superledende tilstand er Cooper parrene låst sammen i en fælles kollektiv kvantetilstand, hvor de alle har samme translatoriske hastighed, v. Derfor er det kun muligt at påvirke en elektron, d.v.s. tage energi fra den, ved at bryde et par. Dette kræver imidlertid en energi på 2Δ, som må tages enten fra elektronens kinetiske energi eller fra gittersvingningerne. Elektronernes kinetiske energi er direkte forbundet med strømtætheden, j; derfor nås en øvre grænse for j, benævnt j_c, når den elektroniske kinetiske energi er lig 2Δ. Da Δ afhænger af temperaturen, vil j_c også afhænge af temperaturen. Typiske j_c værdier for $T = 0$ vises i tabel 2.

Magnetiske egenskaber

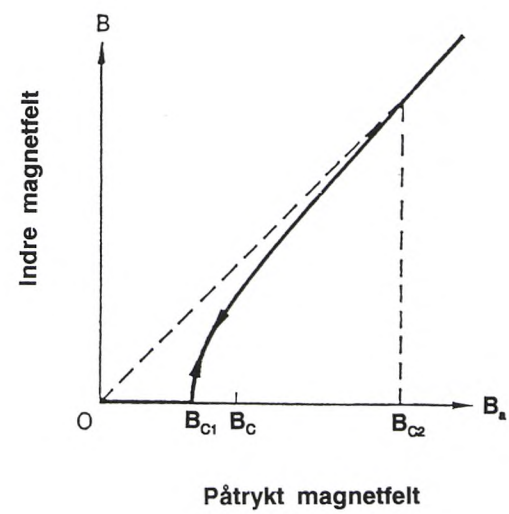
Superledere har også meget usædvanlige magnetiske egenskaber: Et metal i den superledende tilstand tillader aldrig eksistensen af magnetisk flux i sit indre. Dette betyder, at inden i et superledende metal, er den magnetiske induktion B altid lig 0. Superlederen siges at være en perfekt diamagnet. Dette betegnes også som Meissner effekten opkaldt efter Meissner og Ochsenfeld, der først opdagede fænomenet i 1933. Da superledere på denne måde ''frastøder'' magnetfelter, kan en permanent magnet svæve i luften over en superledende prøve. Dette er en meget enkel måde at demonstrere Meissner effekten på. Man kan betragte Meissner effekten som en virkning af skærmstrømme, der løber langs overfladen af superlederen og danner et magnetfelt, som nøjagtigt udligner og derfor *fjerner* det påtrykte felt. Dette er forskelligt fra en perfekt leder, som ville omgive sig med skærmstrømme, alene for at *opretholde* de indre feltforhold.



Figur 3. Fluxkerner i en Type II superleder med en påtrykt magnetfelt $B_a > B_{c1}$.

Betragt et metal, som bliver påtrykt et ydre magnetfelt, B_a, i den superledende tilstand. Udenfor superlederen er den magnetiske fluxtæthed derfor B_a, og inde i superlederen er $B = 0$ som anført ovenfor. Af elektrodynamiske årsager (Maxwell's ligninger) ændres B ikke diskontinuerligt på overfladen, og derfor er der i overfladen af superlederen et tyndt lag, hvor skærmstrømmene løber, og som feltet trænger delvist igennem. Tykkelsen af dette lag hedder London indtrængningsdybden, λ, efter de to engelske videnskabsmænd, F. og H. London, som i 1935 forudsagde tilstedeværelsen af denne. Typiske værdier for λ vises i tabel 2.

Det koster en energi svarende til den magnetiske feltenergi ved den anvendte feltstyrke i det superledende volumen for at udelukke det magnetiske felt. Hvis denne energi overstiger den totale kondensationsenergi, 2Δ, i alle Cooper parrene i volumenet, vil parrene deles og derved lade det magnetiske felt trænge ind; dvs. superledningsevnen er ødelagt. Dette antyder eksistensen af et kritisk felt, B_c, over hvilket et superledende metal vender tilbage til normaltilstanden.



Figur 4. Det gennemsnitlige indre magnetfelt som funktion af det påtrykte felt i en type II superleder.

Dette enkle billede kan anvendes ved de fleste superledende metalliske grundstoffer, hvor $\xi > \lambda$. ξ er, som omtalt ovenfor, den korteste afstand, indenfor hvilken materialet kan skifte fra superledende til normal tilstand. Disse stoffer benævnes Type I superledere. I mange superledende legeringer og i de keramiske superledere er $\xi < \lambda$ (se tabel 2), og der er derfor ikke brug for noget stort volumen for at skabe en tynd kerne i normal tilstand gennem superlederen. Derfor kan disse materialer, der kaldes Type II superledere, tillade, at flux trænger ind i deres indre ved at skabe en tynd kerne af radius ξ; denne kerne vil være i normal tilstand (se Figur 3). Det kræver anvendelse af en vis (lav) feltstyrke, før fluxkerner dannes. Dette kaldes det lavere kritiske magnetfelt, B_{c1}, og for anvendelser lavere end B_{c1} opfører Type II superledere sig som Type I. Hvis $B_a > B_{c1}$ dannes fluxkerner, indtil superlederen ved en eller anden høj feltstyrke fyldes fuldstændigt med fluxkerner (normal tilstand), og der ikke er noget superledende volumen tilbage. Ved dette øvre kritiske

Tabel 2 Typiske parameter værdier for superledere.

Kategori	Max T_c K	ξ nm	2Δ meV	j_c A/cm^2	B_{c1} T	B_{c2} T	λ nm
Lav T_c type I	7.2	1000	2	$10^{4*)}$	0.01-0.1		50
Lav T_c type II	23	10	6	10^7	0.01	10	50
Høj T_c bulk	125	1	35	10^3	0.01	(100)	100
Høj T_c film	120	1	35	10^6	0.01	100	100

*) j_c for en type I superleder afhænger af geometrien.

magnetfelt, B_{c2}, er hele materialet således i normal tilstand. Typiske værdier for de omtalte parametre vises i tabel 2, og figur 4 viser fluxtætheden B inde i materialet som funktion af det påtrykte magnetfelt B_a.

På grund af den kvantemekaniske natur af den superledende fase vil den fluxmængde, der går gennem et normal område omkranset af en superleder, være kvantiseret til et helt antal *fluxkvanter*. Fluxkvantet kaldes Φ_0, og $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Weber (h og e er henholdsvis Planck's konstant og elektronladningen). I en type II superleder vil de ovenfor nævnte fluxkerner i normal tilstanden, der gennemtrænger superlederen ved påtrykte felter mellem B_{c1} og B_{c2} netop, indeholde ét fluxkvant hver.

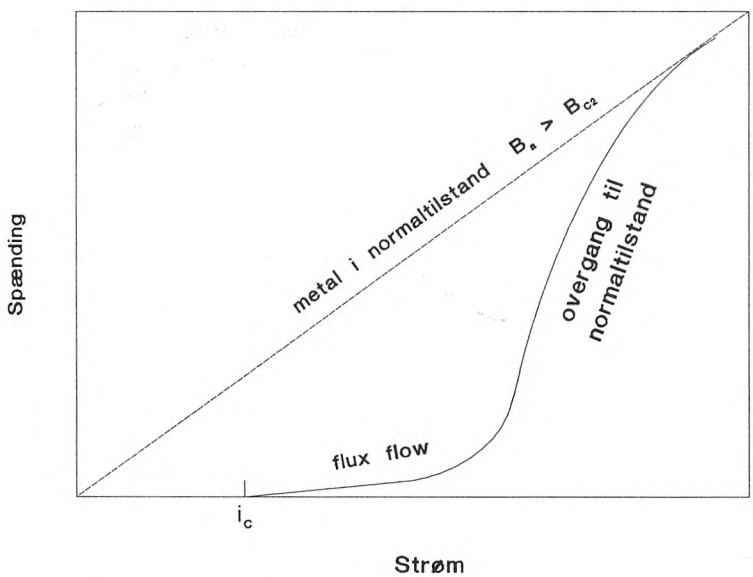
Dette kan forklares på følgende måde. Da $\xi < \lambda$, er energiomkostningen ved at bryde Cooper par i kernen mindre end besparelsen i feltenergi. En type II superleder vil derfor søge at fordele den indtrængende magnetiske flux i så mange fluxkerner som muligt. Fluxkvantiseringen sætter imidlertid en nedre grænse for fluxen i en kerne, sådan at hver fluxkerne i en type II superleder netop indeholder ét fluxkvant.

Hver fluxkerne har omtrentligt et tværsnitsareal på $\pi\xi^2$. Det øvre kritiske felt B_{c2} nås, når kernerne fylder hele materialet. Man har altså

$$B_{c2} \approx n \pi \xi^2,$$

hvor n er antal fluxkerner pr. arealenhed.

Fluxkvanterne genereres af konstante strømhvirvler omkring kernen. Hvirvelstrømmene fra forskellige flux-



Figur 5. *I-V* kurve for Type II superledere med påtrykt magnetfelt mellem B_{c1} og B_{c2}.

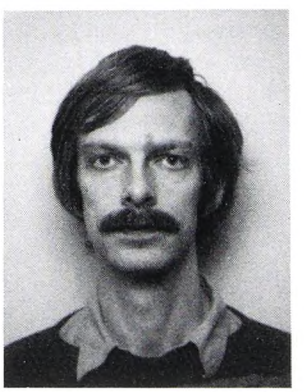
kerner påvirker gensidigt hinanden, og som en konsekvens heraf frastøder to fluxkerner hinanden. Kernerne er derfor ikke tilfældigt fordelt, men danner sædvanligvis et hexagonalt gitter, der kaldes fluxgitteret (Figur 3). Termisk inducerede vibrationer kan i visse tilfælde bryde fluxgitteret ved temperaturer lavere end den kritiske temperatur. Man kan betragte dette som en slags ''smeltning''.

Pinning

Som nævnt ovenfor nedbrydes superledningsevnen hvis en strømttæthed større end j_c passerer gennem prøven. Samtidigt vides det, at enhver strømbevægelse vil skabe et magnetfelt og derfor, da flux kun er tilladeligt inden for overfladelaget, λ, kan strømmen kun løbe i dette tynde lag. Det blev nævnt ovenfor, hvorledes Meissner effekten kan betragtes som om superlederen opretter skærmstrømme ved overfladen. Dette medfører nu en sammenhæng mellem den kritiske strømtæthed, j_c og B_c på følgende måde: B_c nås, når de skærmstrømme, der anvendes til at udligne feltet, overstiger j_c. Hvis en transportstrøm passerer gennem superlederen, mens et ydre magnetfelt påtrykkes, reduceres den effektive kritiske transportstrøm med den styrke, der kræves for at afskærme feltet. Dette gælder dog kun for Type I superledere. De kritiske strømstyrker observeret i Type II superledere er generelt meget lavere end forventet, hvis man sætter dem i forhold til de meget høje øvre kritiske feltstyrker, der er fundet for disse materialer (se tabel 2). Denne afvigelse finder sin oprindelse i fluxkernernes opførsel. Når en strøm passer gennem en Type II superleder, hvor fluxkerner er til stede, vil der på hver strømhvirvel virke en Lorentzkraft vinkelret på både transportstrømmen og på fluxlinien. Hvis intet hindrer dem, vil fluxlinierne bevæge sig i retning af Lorentzkraften. Denne bevægelse viser sig imidlertid at være viskøs, det vil sige, at der er en gnidningskraft, der modsætter sig deres bevægelse. Der må derfor udføres et arbejde for at opretholde bevægelsen, og et sådan arbejde kan kun blive udført af transportstrømmen, hvilket medfører et spændingsfald i materialet; prøven udviser modstand. Figur 5 viser I-V kurven skematisk for type II superledere med påtrykt magnetfelt mellem B_{c1} og B_{c2}.

Det er muligt at begrænse energitabet, der opstår på grund af fluxlinie bevægelserne. Urenheder og uregelmæssigheder i superlederen har en tendens til at fastholde fluxlinierne. Dette betyder, at en højere Lorenzkraft (d.v.s. en højere transportstrøm) er nødvendig, før fluxbevægelsen starter, og derfor bliver j_c højere. Specielt hvis fluxlinierne er fastfrosne i et fluxgitter, behøver man kun forholdsvis få, men stærke pinning centre for at fastholde hele gitteret. Det har på denne måde været muligt at trimme Nb_3Sn tråde til at føre mere end 10^7 A/cm^2 selv i felter på flere Tesla ved 4.2 K. For de nye keramiske superledere er problemerne omkring en kontrol af flux pinning endnu ikke løst, men forsøg har vist, at blandt andet neutron strålings beskadigelse af keramiske superledere har kunnet øge den kritiske strøm i høje magnetfelter.

I denne artikel har vi forsøgt at give en basal introduktion til de parametre og fænomener, der er vigtige indenfor superledning - og specielt for anvendelser baseret på superlederes strømbærende egenskaber. En mere detaljeret introduktion til en teoretisk behandling af superledning findes i Per Hedegårds artikel senere i dette nummer, og en kort introduktion til elektroniske anvendelser gives i Jørn Bindslev Hansens artikel.



Torsten Freltoft Civilingeniør fra Danmarks Tekniske Højskole (1983). Afgangsprojekt ved fysikafdelingen, RISØ, hvor han også gennemførte licentiatarbejdet indenfor småvinkel neutronspredning i fraktale strukturer. Efter to års ophold i neutron gruppen på Brookhaven National Laboratory, New York, blev han i 1988 ansat ved NKT's koncernudviklingscenter, hvor han er projektleder for virksomhedens aktiviteter indenfor højtemperatur superledning.