

Supraleitung

Von Univ. Prof. Dr. Ferdinand Stangler, Wien

Vortrag, gehalten am 4. November 1970

Der Temperaturbereich, in dem sich unser Leben normalerweise abspielt, liegt zwischen 250 und 310° K. Die in diesem Bereich beobachtbaren Phänomene sind durch das Vorherrschen einer starken, ungeordneten Temperaturbewegung gekennzeichnet. Man könnte sagen, die Natur befindet sich in einem Zustand thermischer Unordnung. Dies ist auch die Ursache für den hohen Wert des spezifischen elektrischen Widerstands bei Raumtemperatur. Kühlen wir ein normal leitendes Metall auf tiefe Temperaturen ab, so geht das Gitter durch Abnahme der thermischen Schwingungen in einen geordneteren Zustand über. Dadurch nimmt die Streuung der Leitungselektronen an den schwingenden Gitteratomen ab, der Widerstand sinkt, wird aber nicht null, da das Gitter stets eine größere Anzahl von Baufehlern aufweist, die einen konstanten Beitrag zum Widerstand leisten, den sogenannten „Restwiderstand“ (Abb. 1).

Bei bestimmten Metallen führt der durch Abkühlen erreichbare höhere Ordnungsgrad des Gitters dazu, daß im System Ordnungskräfte in Aktion treten können, die so schwach sind, daß sie bei höheren Temperaturen in der thermischen Unordnung untergehen. Da es sich um sehr geringe Energien handelt, tritt ihre Quantisierung bereits sehr auffällig zutage und dadurch können Effekte entstehen, die von unserer in der Mittelwertswelt bei Raumtemperatur^o gewonnenen Erfahrung sehr stark abweichen. Ein solcher Quanteneffekt ist die Supraleitung, die von Kamerling-Onnes

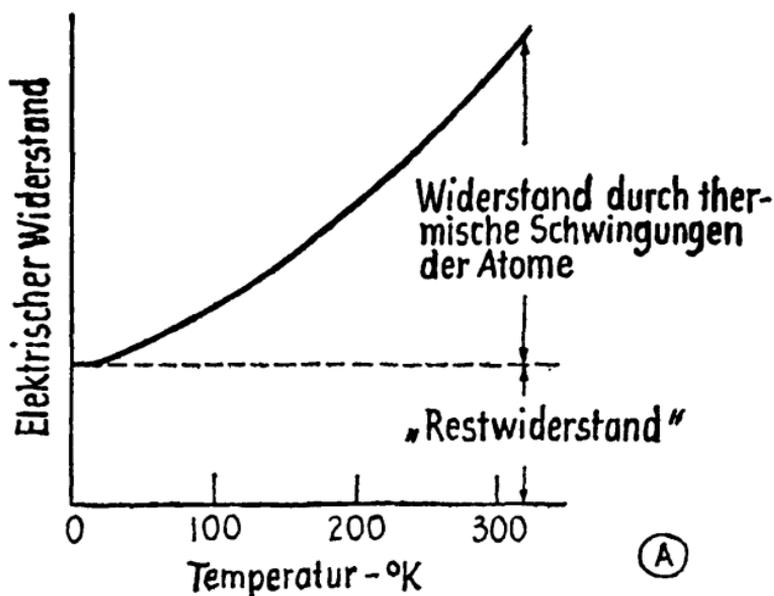


Abb. 1: Temperaturverhalten des elektrischen Widerstands normal leitender Metalle

1911 an Quecksilber entdeckt wurde. Man versteht darunter die Tatsache, daß nach Unterschreitung einer bestimmten Übergangstemperatur, „Sprungpunkt“ genannt, der elektrische Widerstand un-

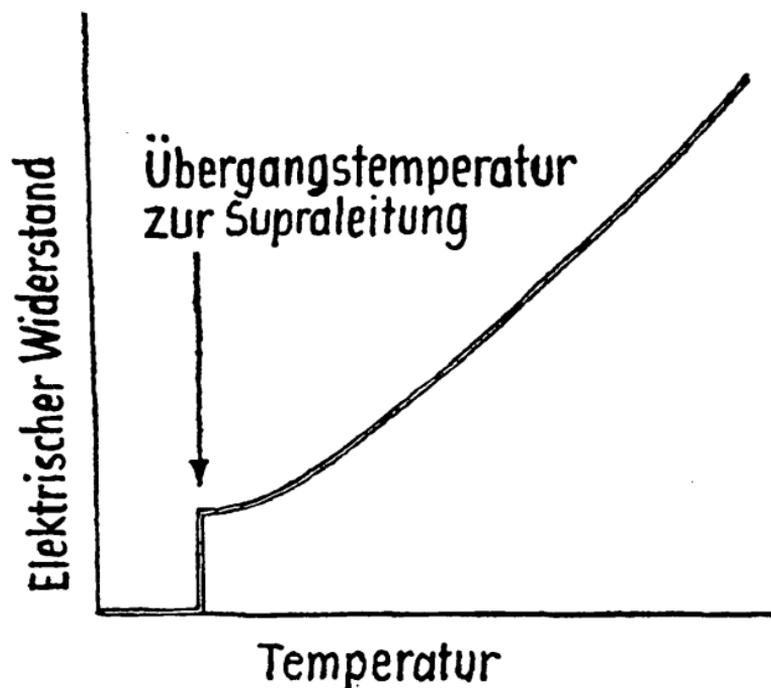


Abb. 2: Temperaturverhalten des elektrischen Widerstands von Supraleitern

meßbar klein wird (Abb. 2), das Metall also „supraleitend“ wird. Es fragt sich nun, wie klein der Widerstand wirklich geworden ist. Um dies zu untersuchen, wird folgendes Experiment durchgeführt (Abb. 3): Man bringt einen Ring in das Feld

eines eingeschalteten Elektromagneten. Dieser Ring wird durch Abkühlung supraleitend gemacht und dann das Magnetfeld abgeschaltet. Dadurch induzieren wir im Ring einen Strom, dessen Stärke jederzeit anhand des vom Strom verursachten Magnetfeldes gemessen werden kann. Man muß nun diesen Ring bei Temperaturen unterhalb

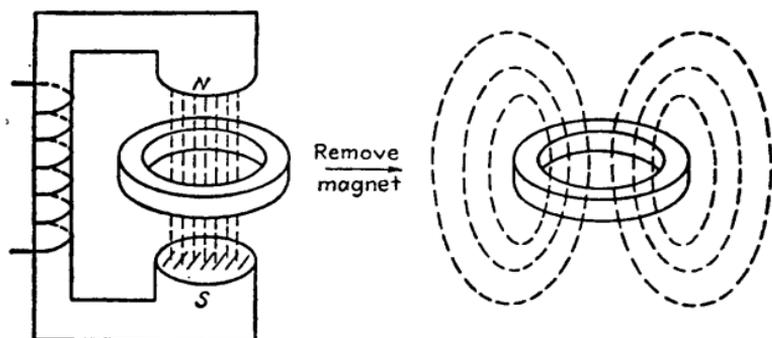


Abb. 3: Induktion eines Dauerstroms in einem Supraleiter

des Sprungpunkts aufbewahren und jeweils nach einiger Zeit mit Hilfe des Magnetfeldes überprüfen, ob der Strom kleiner wird. Ein solcher Versuch wurde 4 1/2 Jahre laufen gelassen und ergab keine meßbare Änderung des Stromes im Supraleiter. Der spezifische Widerstand beträgt daher höchstens $10^{-17} \Omega \text{ cm}$ (zum Vergleich: Kupfer bei 0° C $1,55 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$). Der Widerstand kann daher für die Praxis als unendlich klein angesehen werden.

Eine Erklärung für diese „unendlich“ gute Leitfähigkeit konnte durch 40 Jahre nicht gefunden werden. Erst in den 50er-Jahren ist es Bardeen, Cooper und Schrieffer gelungen, eine geeignete Theorie — kurz BCS-Theorie genannt — zu finden. Die Schwierigkeit der Erklärung ist in der Natur der Leitungselektronen selbst zu finden. Bekanntlich weisen Elektronen einen Spin auf, sind also unsymmetrische Teilchen. Damit gehorchen sie der Fermistatistik, und für sie gilt das Pauliverbot. Dieses besagt, daß jeder Quantenzustand nur einfach besetzt sein darf. Damit muß jedes der etwa 10^{23} Leitungselektronen eines Metalls einen anderen Energiewert besitzen. Höchstens jeweils zwei Elektronen mit antiparallem Spin können den gleichen Energiewert aufweisen. Auf Grund dieser Bedingung besetzen die Leitungselektronen ein breites Energieband, das von null bis zu der sehr hohen Energie von einigen Elektronvolt reicht; sie können als Gesamtheit nicht den Nullwert der entziehbaren Energie aufweisen. Nun bedeutet aber gerade die Tatsache des verschwindenden elektrischen Widerstands, daß Streuprozesse entfallen, die Elektronen also weder vom Gitter Energie aufnehmen noch an dieses abgeben. Dies kann aber nur dann auftreten, wenn sich die Elektronen im Null-Zustand der entziehbaren Energie befinden. Diese Überlegung wird durch das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit erhärtet, die im

supraleitenden Zustand wesentlich kleiner wird als im normalleitenden (Abb. 4). Diese Verkleinerung wird dadurch bewirkt, daß jener Prozentsatz der Elektronen, der nach Unterschreitung der Sprungtemperatur supraleitend geworden ist, keine

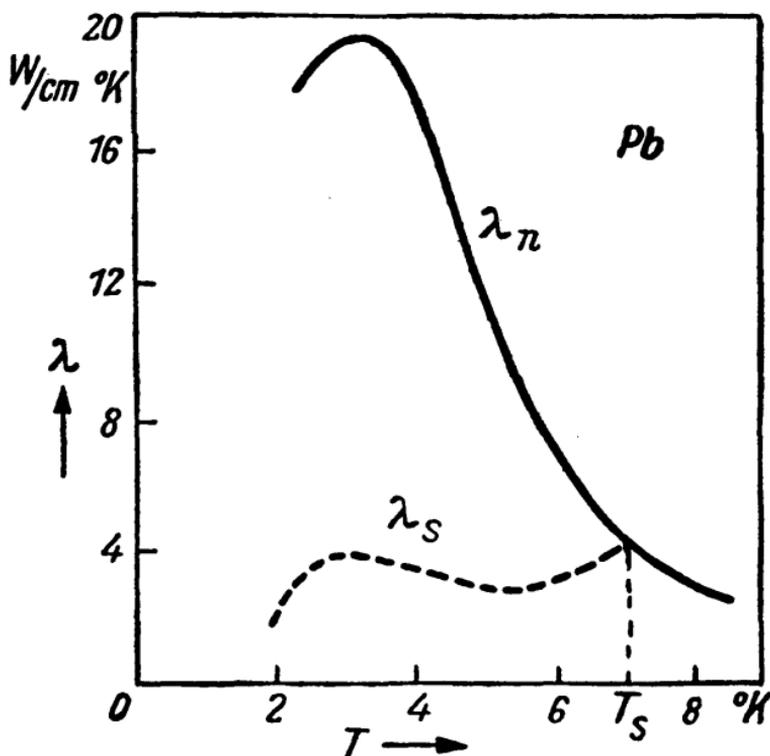


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit eines Supraleiters im supraleitenden — und im normal leitenden — Zustand (der normal leitende Zustand wird durch Aufbringen eines überkritischen Magnetfelds erzielt)

Wärme transportiert — das heißt: vom Gitter weder Energie aufnimmt noch solche an dieses abgibt. Aus der Abbildung ist auch ersichtlich, daß mit fallender Temperatur der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit immer mehr zunimmt, was nichts anderes bedeutet, als daß die Anzahl der supraleitenden Elektronen mit fallender Temperatur anwächst.

Die BCS-Theorie geht nun von der Annahme aus, daß sich im Supraleiter jeweils zwei Elektronen gleicher Energie aber antiparallelen Spins zu Elektronenpaaren zusammenschließen. Jedes solche Paar kann wegen der Spinabsättigung als symmetrisches Teilchen aufgefaßt werden. Für symmetrische Teilchen gilt die Bose-Statistik, die es allen Teilchen eines Systems erlaubt, den gleichen Energiewert aufzuweisen, der ohneweiters auch null sein darf. Damit ist die vorher gestellte Forderung — alle Leitungselektronen, die supraleitend sind, müssen sich im energetischen Grundzustand befinden — erfüllbar geworden. Nun fehlt nur noch ein Mechanismus der zur Entstehung der Elektronenpaare führt. Hier kann man sich aufgrund der Theorie folgendes vorstellen. Bei tiefen Temperaturen gelangt das Gitter in einen fast schwingungsfreien Zustand. Unter diesen Umständen kann es vorkommen, daß die Schwingungen der Netzebenen des Gitters den Dichteschwankungen der Elektronen folgen müssen. Bildlich kann

man sich dies so vorstellen (Abb. 5), daß ein Elektron, das durch das Gitter hindurchfliegt, infolge seiner negativen Ladung die benachbarten positiven Gitterionen zu sich heranzieht. Die dem Elektron benachbarten Gitterebenen werden also zur Bahn des fliegenden Elektrons hin deformiert. Dieser Deformationszustand wird noch einige Atomdistanzen hinter dem fliegenden Elektron erhalten bleiben und entspricht einer positiven Überschußladung in dieser Zone. Ist nun die Dichte der Leitungselektronen im Gitter hoch genug, so kann ein zweites Elektron gleicher Energie, also gleicher Geschwindigkeit und mit antiparallelem Spin von diesem positiven Ladungsüberschuß angezogen werden und läuft nun in einem bestimmten Abstand vom ersten

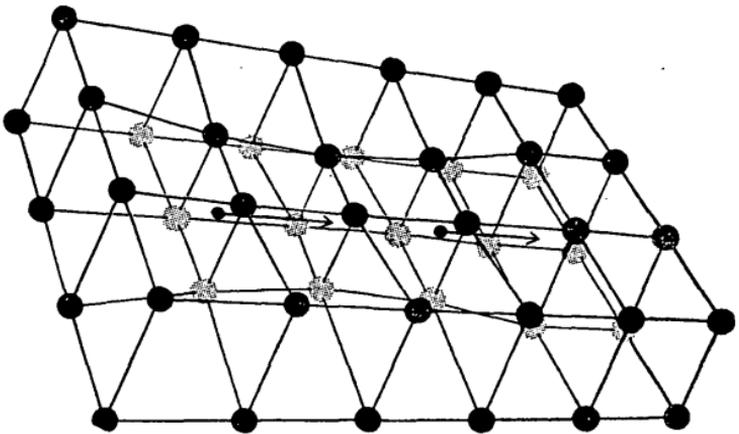


Abb. 5: Paarbildung von Elektronen durch Wechselwirkung mit dem Gitter (· Elektronen, O Gitterionen)

Elektron durch das Gitter. Der Abstand wird durch die gleichnamige Ladung der Elektronen notwendig. Die Kopplung der Partner des supraleitenden Elektronenpaares erfolgt also durch Wechselwirkung mit dem Gitter. Die Quantentheorie spricht von einer Kopplung durch virtuellen Phononenaustausch. Das erste Elektron führt durch die Deformation der Netzebenen dem Gitter schwingende Energie, ein Phonon, zu. Dieses kommt dem zweiten Elektron zugute, wird also von diesem absorbiert. Das zweite Elektron trägt aber auch seinerseits zur Gitterdeformation bei, wodurch es dem ersten Elektron ermöglicht wird, in der für die Paarbildung richtigen Schwingungsphase durch das Gitter zu laufen. Das heißt aber, daß das vom zweiten Elektron absorbierte Phonon über das Gitter wieder dem ersten Elektron zugeführt wird.

Aus diesem Modell wird klar, daß für das Auftreten der Supraleitung eine relativ hohe Anzahl von freien Leitungselektronen notwendig ist. Ebenso ist aber auch eine große Packungsdichte der Gitterionen nötig, damit ausreichende Gitterdeformationen möglich werden. Dies läßt sich anhand des Periodensystems der Elemente (Abb. 6) zeigen, in dem die supraleitenden Elemente mit ihren Sprungtemperaturen dick umrandet dargestellt sind. Man sieht, daß die guten Leiter der Gruppe Ib — Kupfer, Silber und Gold — nicht supraleitend werden, da sie die zu geringe Elektronenkonzen-

tration von nur 1 Elektron/Atom aufweisen, während gerade schlechte Leiter wie z. B. Zink, Cadmium, Zinn usw. wegen ihrer hohen Leitungselektronendichte supraleitend werden. Die Sprungtemperatur eines Supraleiters liegt um so höher, je

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
H	•	•	•	•	•	•	He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al 1.14	Si	P	S	Cl	Ar

Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb
K	Ca	Sc	Ti 1.81	V 4.3	Cr	Mn	Fe Co Ni	Cu	Zn 0.79	Ga 1.07	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr 0.7	Nb 9.22	Mo	Ma	Ru	Rb Pd	Ag	Cd 0.54	In 3.37	Sn 3.69	Sb	Te	I Xe
Cs	Ba	La 4.71	Hf 0.35	Ta 4.38	W	Re	Os	Ir Pt	Au	Hg 4.12	Tl 2.38	Pb 7.26	Bi	Po	• Rn
•	Ra	Ac	Th 1.30	Pa	U	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Abb. 6: Supraleiter im Periodensystem
(Supraleiter und deren Sprungpunkt dick eingerahmt)

besser seine Elektronenkonfiguration den Bedingungen der Supraleitung entspricht.

Aufgrund der BCS-Theorie läßt sich auch das Verhalten von Supraleitern gegenüber äußeren Magnetfeldern sehr gut verstehen. Wie Abb. 7 zeigt, verlagert sich der Sprungpunkt zu um so tieferen Temperaturen, je höher das äußere Mag-

netfeld wird. Bei Überschreitung eines kritischen Feldes H_c unterbleibt die Supraleitung vollständig. Interpretation mithilfe der BCS-Theorie: „Der Spin eines Elektrons bedingt ein magnetisches Moment. Wirkt ein Magnetfeld auf ein spinabge-

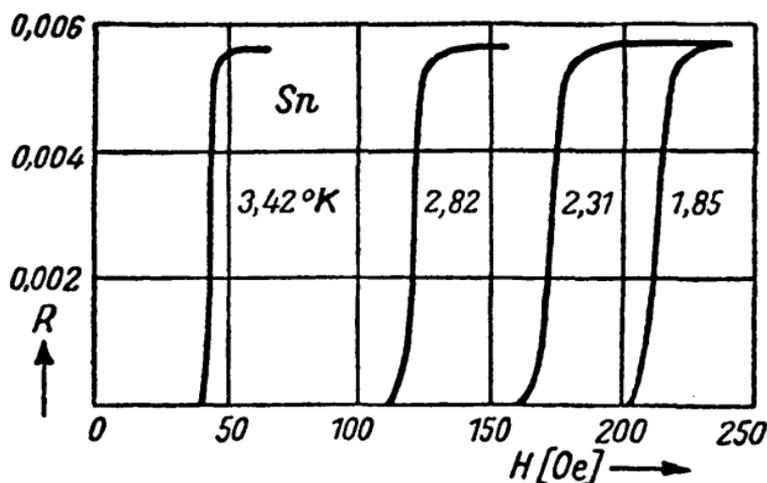


Abb. 7: Änderung des Sprungpunkts durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes

sättigtes Elektronenpaar, dann versucht das Feld die Spinachsen des Paares parallel zu richten. Damit wird aber die Supraleitung zerstört. Je tiefer die Temperatur desto fester ist die Bindung des Elektronenpaares und desto höher wird das zur Zerstörung der Supraleitung nötige Magnetfeld.“ Zeichnet man diesen Tatbestand in ein Temperatur-Feld-Diagramm ein, so erhält man für

jedes Material eine typische Grenzkurve (Abb. 8), unterhalb derer die Substanz supraleitend und oberhalb derer sie normalleitend ist. Man ersieht

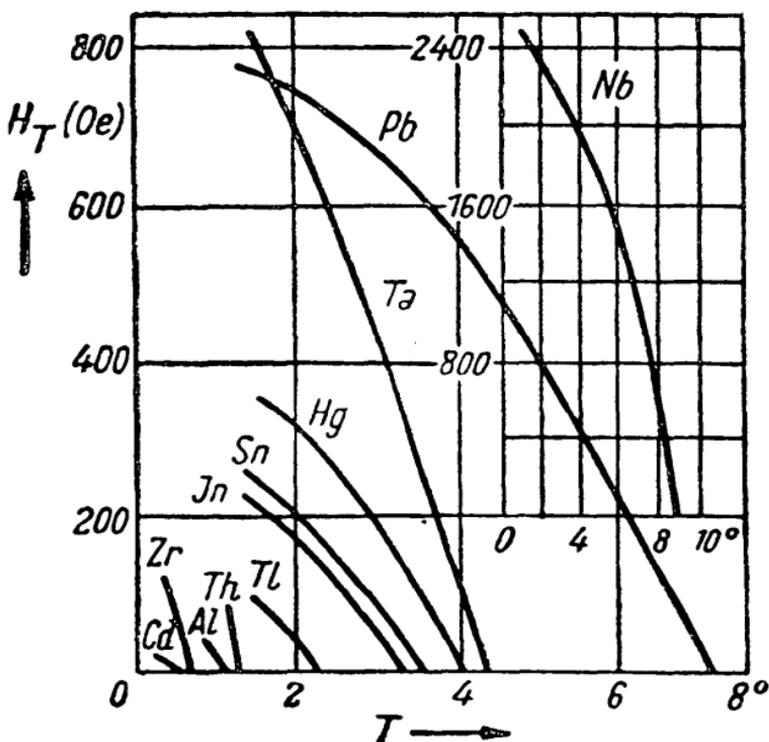


Abb. 8: Magnetische Grenzkurven von supraleitenden Elementen

aus dem Diagramm, daß die bei etwa $0,2^\circ$ K maximal zulässige Feldstärke um so höher liegt, je höher die Sprungtemperatur eines Metalls ist. Man spricht davon, daß ein Material um so „mag-

netisch härter“ ist, je höher sein feldfreier Sprungpunkt liegt. Man sieht aus Abb. 8, daß die chemischen Elemente „weiche“ Supraleiter sind. Meist genügen einige Hundert Gauß, um die Supraleitung völlig zu unterbinden. Der härteste Supraleiter unter den Elementen ist Niob mit etwa 2500 Oe maximal zulässiger Feldstärke bei 0° K.

Eine weitere merkwürdige Eigenschaft von

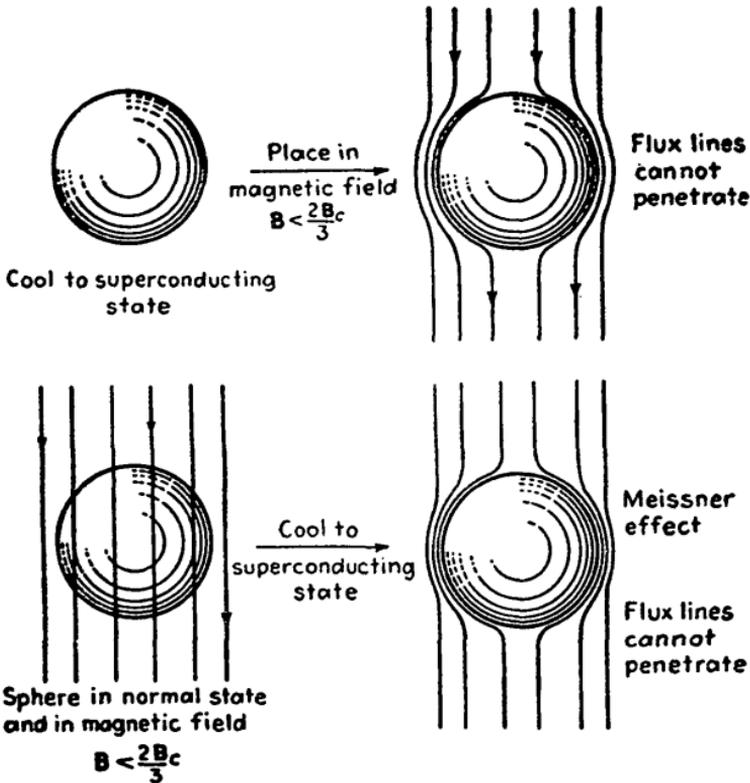


Abb. 9: Experimente zum Meissner-Effekt

Supraleitern, der sogenannte Meissner-Effekt, kann ebenfalls mittels der BCS-Theorie interpretiert werden. Man versteht darunter die Tatsache, daß magnetische Kraftlinien zwar ein Loch in einem Supraleiter, niemals aber einen kompakten Supraleiter selbst durchsetzen können (falls nicht durch Überschreitung der kritischen Feldstärke die Supraleitung unmöglich wird). Dies soll anhand von zwei Versuchen klar gemacht werden, die in Abb. 9 dargestellt sind. Bei dem oberen Experiment wird eine Kugel zunächst durch Abkühlen unter T_s supraleitend gemacht. Legen wir nun ein äußeres Feld an, so wird im gleichen Moment durch Induktion ein solcher Strom induziert, daß das dadurch entstehende Magnetfeld entgegengesetzt gleich ist dem äußeren Feld. Dadurch können Kraftlinien des Außenfeldes nicht in die Kugel eindringen. Viel erstaunlicher ist das untere Experiment, bei dem jede Induktion verhindert wird. Hier wird nämlich die Kugel in das Magnetfeld eingebracht, solange sie normalleitend ist. Beim Einschalten des Magnetfeldes entsteht zwar auch Induktion, doch klingt der Strom wegen des elektrischen Widerstandes rasch ab und wird null. Die Kraftlinien durchsetzen nun die Kugel (Bild links unten). Kühlt man nun unter die Sprungtemperatur, so sollte sich nichts ändern, da ja keine Induktion auftritt. In Wirklichkeit aber werden auch hier die Kraftlinien aus der Kugel verdrängt

(Bild rechts unten), sodaß der Supraleiter wie ein extrem diamagnetischer Körper wirkt. Zur Erklärung muß man von der Annahme ausgehen, daß auch hier Abschirmströme an der Kugeloberfläche fließen müssen, jedoch ohne daß diese durch Induktion entstanden sein können. Anhand der BCS-Theorie läßt sich auch dies verstehen: „Die korrelierten Paare von supraleitenden Elektronen können sich ja im Gitter reibungsfrei bewegen. Ihre sonst geradlinige Bahn wird nun durch ein äußeres Magnetfeld zu einer Kreisbahn umgeformt und zwar so, daß das durch die Kreisbewegung (den Kreisstrom) entstehende Magnetfeld genau gleich groß und entgegengesetzt gerichtet wird wie das äußere Magnetfeld.“ Diese Eigenschaft — Undurchdringlichkeit von Supraleitern gegenüber äußeren Magnetfeldern — macht diese zum idealen Abschirmmaterial gegen Magnetfelder. Sie erlaubt auch die Ausführung eines schönen Demonstrationsexperimentes für Supraleitung (Bild 10). Legt man einen gewöhnlichen Stabmagneten in eine Schale aus Blei und kühlt das ganze ab, so wird nach Unterschreitung der Sprungtemperatur des Bleies (ca 7° K) der Magnet über der Schale schweben, da seine Kraftlinien in die supraleitende Schale nicht eindringen können. Die Wirkung ist die gleiche, als hätte man einen zweiten gleich starken und gleich gepolten Magneten symmetrisch unterhalb der Schale angebracht.

Die praktische Anwendung der Supraleitung, die ja dem Techniker äußerst wünschenswert erscheint, hat wegen der Bindung dieses Phänomens an extrem tiefe Temperaturen lange Zeit auf sich warten lassen. Erst in den Fünfzigerjahren hat sich die Technik der tiefsten Temperaturen so weit

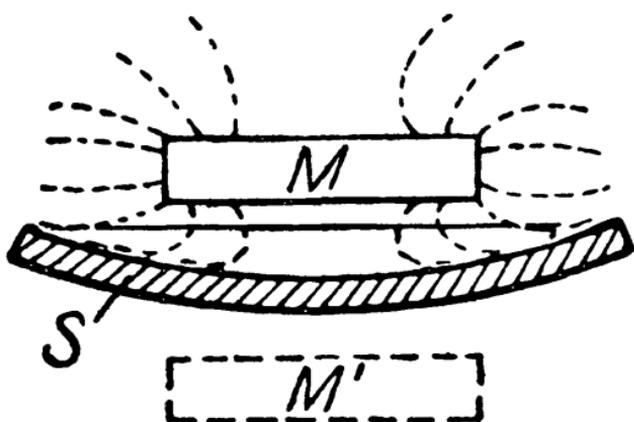


Abb. 10: Demonstrationsexperiment zum Meissner-Effekt

entwickelt, daß die Anwendung in den Bereich des möglichen gerückt ist. In der Folge sollen Beispiele berichtet werden. Das erste ist die Erzeugung extrem hoher Magnetfelder. Wie bekannt, können infolge der magnetischen Sättigung des Eisens Elektromagnete mit Eisenkernen nur bis zu etwa 50 kOe hergestellt werden. Will man höhere Magnetfelder, so muß man auf eisenlose Spulen zurückgreifen. Nun hängt aber das Magnetfeld

einer solchen Spule außer von der Geometrie nur von der Windungszahl und der Stromstärke in der Spule ab. Baut man nun eine solche Spule aus Kupfer, so muß wegen dessen Ohmschem Widerstand eine erhebliche Spannung angelegt werden, um die notwendige Stromstärke zu erreichen. Ein solcher Magnet braucht daher erhebliche elektrische Leistung. In den USA wurde nach dem zweiten Weltkrieg ein eisenloser Magnet gebaut, der in einem würfelförmigen Raum von 4 cm Kantenlänge ein Magnetfeld von 88 kOe erzeugte. Zu seiner Versorgung war eine elektrische Leistung von 1,6 MegaWatt und eine entsprechend ungeheure Kühlwassermenge notwendig. Ideal wäre daher ein Magnet aus supraleitendem Draht ohne elektrischen Widerstand, bei dem zwar große Ströme fließen, jedoch kein Spannungsabfall auftritt und der somit keine Leistung verbraucht. Leider besitzen die chemischen Elemente, wie schon erwähnt, zu geringe kritische Feldstärken, sind also magnetisch zu „weich“. Dies hat die Physiker veranlaßt, nachzudenken, ob nicht Substanzen zu synthetisieren wären, die günstigere Bedingungen in bezug auf Elektronendichte und Gittereigenschaften aufweisen als die Elemente. Das Ergebnis waren Legierungen und chemische Verbindungen, deren Elektronendichten zwischen 5 und 7 pro Atom liegen. Der günstigste Wert liegt bei 6,5. Diese Materialien zeigen erheblich höhere Sprung-

temperaturen und kritische Feldstärken als die Elemente. Als Beispiel wäre Niob-Zirkon zu nennen. Der heutige Rekordwert wird von der Verbindung Nb_3Sn mit $T_s = 18^\circ \text{K}$ und einer kritischen Feldstärke von etwa 200 kOe erreicht. Mit Hilfe dieser Materialien werden heute in steigendem Maß Elektromagnete gebaut, beginnend von kleinen Labormagneten, die — mit einem 2 Voltakkumulator betrieben — Feldstärken von 80 kOe erreichen, bis zu Riesenmagneten für Teilchenbeschleuniger und Wasserstoff-Blasenkammern. Der größte bisher gebaute Magnet befindet sich im Argonne National Laboratory in den USA mit einem Innendurchmesser von 3,65 m und einem Gewicht von 45 t, der bei einem Strom von 1.700 A ein Magnetfeld von etwa 30 kOe erzeugt. Zurzeit sind auch Versuche im Gange, supraleitende Magnete als Feldgeber für Kraftwerksgeneratoren zu verwenden.

Eine weitere Anwendung, die sich noch in Entwicklung befindet, sind supraleitende Kabel. Es stellt sich heute als zunehmend schwierig heraus, große elektrische Energiemengen in Gebiete hoher Ballungsdichten von Industrie und Bevölkerung zu bringen. Bei Hochspannungsfreileitungen ist die Spannung aus Verlustgründen mit etwa 500 kV limitiert, ebenso aber auch die Leiterstärke aus Gewichtsründen. Erdkabel zeigen zu starke Erwärmung. Als Ausweg wären supraleitende Kabel

in Betracht zu ziehen. Natürlich ist der technische Aufwand für die Kühlung des Kabels sehr hoch, der Supraleiter muß ja mit flüssigem Helium auf $4,2^{\circ}$ K gekühlt sein. Versuche dieser Art werden derzeit in den USA, in Großbritannien und an der Technischen Hochschule in Graz ausgeführt. Bild 11

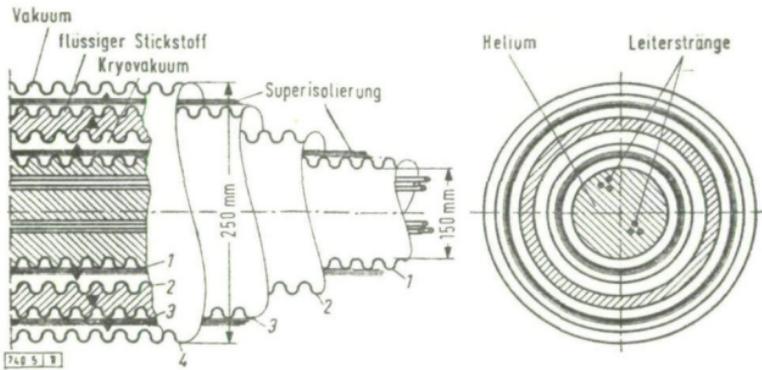


Abb. 11: Supraleitendes Kabel (nach Klaudy)

zeigt einen Schnitt durch ein solches Kabel, das aus vier konzentrischen Federrohren besteht. Im innersten Rohr verlaufen in flüssigem Helium die supraleitenden Kabel, die aus verbleiten Kupferdrähten bestehen. Jeder Leiter baut sich aus 80 Einzeldrähten von $4\text{ mm } \phi$ auf und ist für einen Strom von 10.000 A geeignet. Das Innenrohr ist von einem Vakuummantel umgeben. Nach außen hin folgt dann als Strahlungsschutz eine Schicht flüssigen Stickstoffs und ein weiterer Vakuummantel.

tel. Die Gesamtstärke des Kabels beträgt 25 cm. Alle 5 km muß ein Helium- und ein Stickstoffverflüssiger angedordnet sein. Die geschätzten Kosten für 1 km Kabel betragen etwa 1,000.000 S. Bis jetzt sind positive Versuche mit einem 30 m Stück ausgeführt.

Im vorliegenden Aufsatz wurde versucht, einen Überblick über das Phänomen der Supraleitung sowohl in experimenteller als auch in theoretischer Hinsicht zu geben. Einige Ausblicke auf die praktische Anwendung der Supraleitung zeigen, daß in dieser Hinsicht in Zukunft noch viel zu erwarten ist.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien](#)

Jahr/Year: 1971

Band/Volume: [111](#)

Autor(en)/Author(s): Stangler Ferdinand

Artikel/Article: [Supraleitung. 1-20](#)