Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 23

Artikel: Probleme bei der Anwendung der Supraleitung

Autor: Bürgel, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916533

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 25.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

tion beim vorstehend angegebenen Prozess um ein Mehrfaches besser ist und ausserdem das endgültig im Transformator befindliche Ölregenerat nur noch unwesentlich durch Restalterungsprodukte aus der festen Isolation verunreinigt wird.

Der bereits erwähnte Vorteil einer gleichzeitigen Trocknung des Transformators bei der «Spül-Regenerierung» wird durch die Vakuumbehandlung des während der Spülphase e) über das zirkulierende Öl aufgeheizten Aktivteils, nach raschem Ablassen des Öles aus dem Transformatorkasten, erzielt [5]. Ging der Ölregenerierung ein Umbau oder eine Reparatur des Transformators voraus, und muss daher mit einem stärkeren Feuchtigkeitsgehalt der Isolationen gerechnet werden, so empfiehlt sich eine Aufheizung des Aktivteils während des Ölumlaufs auf 80...90 °C (statt nur ca. 50 °C). Dadurch wird eine raschere und intensivere Trocknung beim nachfolgenden Evakuieren herbeigeführt. Fallen während dieser Vakuumphase f) grössere Kondenswassermengen an oder war das Öl des Transformators sehr stark gealtert, ist eine Wiederholung des Spül-(Aufheiz-)prozesses mit frisch nachregeneriertem Öl und anschliessender Vakuumbehandlung am Platze.

5. Wirtschaftlichkeit des Regenerierverfahrens, Kosten und Zeitbedarf

Durch die Regenerierung eines gealterten Öles wird, von recht seltenen Fällen (durch Bleicherdebehandlung allein nicht entfernbare Verunreinigungen) abgesehen, ein neuwertiges, einem Neuöl ebenbürtiges Öl erhalten, wobei durch Inhibieren des Regenerats dessen Alterungstendenz noch wesentlich verbessert werden kann.

Die Kosten der Aufbereitung des Öles eines Transformators nach dem «Spül-Regenerierverfahren» betragen nach den bisherigen Erfahrungen 40...50 Rp./kg Öl. Darin sind inbegriffen: Kosten für die Bleicherde, Inhibitor, Anlagemiete, Löhne, Transport, durch Regenerierung entstandener Ölverlust. Stellt man diese Kosten denen für eine Neuölfüllung gegenüber, bei einem Preis des neuen Öles von etwa 60...70 Rp./kg (in der Schweiz) und den noch zusätzlich notwendigen Kosten für die Behandlung dieses Öles in einer normalen Trocknungsanlage, so ist festzustellen, dass praktisch für die Hälfte der Kosten oder wenig mehr ein hochwertiges Regenerat erhalten werden kann, dabei aber der blossen Neuölfüllung die angegebenen erheblichen Nachteile anhaften.

Der Zeitaufwand für das «Spül-Regenerierverfahren» ist allerdings etwas grösser als bei einer blossen Neuölfüllung; bei einem Transformator mittlerer Leistung mit etwa 15 t Öl ist mit einer Aufbereitungsdauer von etwa 7 Tagen bei durchgehendem Betrieb der Regenerieranlage zu rechnen. Findet die Regenerierung aber zum Beispiel im Anschluss an einen Umbau oder eine Reparatur des Transformators statt, kann von einem zusätzlichen Zeitaufwand überhaupt nicht mehr gesprochen werden, wäre doch auch bei Neuölfüllung zur Trocknung des Aktivteils ebenfalls mit 7...10 Tagen Behandlungsdauer zu rechnen.

Die Ölregenerierung darf also in jeder Hinsicht als ein technisch voll befriedigendes und wirtschaftlich günstiges Verfahren zur Pflege von Grosstransformatoren und Sicherung eines guten dielektrischen Zustandes auf lange Zeit angesehen werden.

Literatur

[1] *Schweizerischer Elektrotechnischer Verein:* Regeln für Transformator- und Schalteröl. 5. Aufl.; Publ. Nr. 0124.1960. Zürich: SEV 1960.

[2] *Stoll, P.* und *R. Schmid:* Neue Erkenntnisse über die Eigenschaften der Mineralöle im Hinblick auf die Pflege von Transformatorenölen. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. 26(1960)12, S. 455...477.

[3] *Berger, K.:* Der Wärmedurchschlag fester Isolierstoffe. Brown Boveri Mitt. 13(1926)5, S. 115...121.

[4] *Goldstein, A.:* Trocknung und Vakuumimprägnierung von Hochspannungstransformatoren. Bull. SEV 52(1961)19, S. 757...764.

[5] *Hartmann, H.:* Vakuumanwendung bei der Inbetriebnahme und Reparatur von Hochspannungstransformatoren. Bull. SEV 52 (1961)19, S. 70...774.

Adresse des Autors:
K. Wolff, Ingenieur, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Probleme bei der Anwendung der Supraleitung

Von *B. Bürgel,* Baden

537.312.62

Die für die Technik wichtigsten Begriffe und Tatsachen werden zusammengestellt und erläutert, und die Herstellungsmethoden für Hochfeld-Supraleiter kurz erwähnt. Anschliessend wird ein Überblick über die bekannten Vorschläge zur Anwendung der Supraleiter gegeben. Es zeigt sich, dass sich die ursprünglichen Hoffnungen wahrscheinlich nicht so leicht erfüllen lassen: Bei den bisher bekannten Hochfeld-Supraleitern treten Wirbelstromverluste auf, und bei den Schaltelementen der Elektronik können die an sich möglichen hohen Schaltfrequenzen infolge Schwierigkeiten bei der Wärmeableitung bei weitem nicht erreicht werden. Auf die Theorie der Supraleitung wird nicht eingegangen. Die angegebene Literatur ermöglicht ein tieferes Eindringen in die besprochenen Probleme.

L'auteur énumère et explique les notions et les faits les plus importants au sujet de la supraconductivité et il mentionne les méthodes de fabrication de supraconducteurs pour champ intense. Il donne également un aperçu des propositions faites pour l'utilisation des supraconducteurs. Les espoirs que l'on avait formulés dans ce domaine ne pourront probablement pas être réalisés facilement. Dans les supraconducteurs pour champ intense, il se produit des pertes par courants de Foucault et, pour des éléments de couplage de l'électronique, les hautes fréquences de couplage qui seraient en soi possibles ne peuvent pas être atteintes, à cause des difficultés dues à l'évacuation de la chaleur. L'auteur ne s'étend pas sur la théorie de la supraconductivité. La bibliographie qu'il indique permet une étude plus approfondie de ces problèmes.

1. Einleitung

Bei einem Metall sinkt der elektrische Widerstand mit abnehmender Temperatur zunächst linear, dann viel rascher. Im allgemeinen fällt er bis auf den sog. Restwiderstand, welcher häufig ein Tausendstel bis ein Hundertstel seines Wertes bei Zimmertemperatur beträgt [1][1]). Bei einem Supraleiter ist der Widerstand unterhalb der Sprungtemperatur unmessbar klein.

Das Verschwinden des Widerstandes wurde zum ersten Mal von *Kamerlingh Onnes* [2] im Jahre 1911 bei der Abkühlung

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

von Quecksilber beobachtet. Bei etwa 4,2 °K fiel der Widerstand fast plötzlich auf Null. Es ist natürlich experimentell, wegen der immer vorhandenen Messfehler, nicht möglich, festzustellen, ob der Widerstand genau Null sei, oder ob er nur in der Nähe von Null liegt. Jedenfalls muss er sehr klein sein, denn in einem supraleitenden Stromkreis können Ströme fliessen, die auch nach Jahren keine merkliche Abnahme zeigen. Man spricht dann von «persistenten Strömen». In der Folge wurde dieser Effekt bei manchen anderen Metallen gefunden. *Kammerlingh Onnes* und seine Mitarbeiter [3] versuchten schon frühzeitig, supraleitende Spulen zu bauen in der Absicht, die Ohmschen Verluste zu vermeiden. Sie mussten bei ihren Versuchen jedoch feststellen, dass die Supraleitung verschwand, wenn das Magnetfeld oder der Erregerstrom hinreichend gross war. Mit den damaligen Supraleitern konnte man nur Feldstärken von einigen hundert Oersted erreichen. Die Supraleitung bedeutete daher für die Technik nicht viel mehr als eine physikalische Kuriosität.

Diese Lage änderte sich aber grundlegend, als 1956 *Buck* [4] ein supraleitendes Schaltelement für die Elektronik, das «Cryotron», erfand. Für dieses Schaltelement reichen die damals bekannten Supraleiter aus. Es ist einfach im Bau, von hoher Lebensdauer und rauscharm. Als Folge der Entdeckung des hohen kritischen Feldes von Nb_3Sn durch *Kunzler* und Mitarbeiter [5] im Jahre 1961 wurde auch das Interesse der Starkstromtechnik geweckt. Doch sind bis jetzt die ursprünglichen Hoffnungen nicht erfüllt worden. Die heute bekannten Hochfeld-Supraleiter scheinen sich nicht für Wechselstrom zu eignen, weil hier, trotz der Supraleitung, Wärme in den stromdurchflossenen Wicklungen entsteht.

Im folgenden sollen die technisch wichtigen Begriffe, Tatsachen und Vorstellungen aus dem Gebiet der Supraleitung besprochen werden.

2. Die Sprungtemperatur

Die Temperatur, bei der im Laufe der Abkühlung der Übergang zum supraleitenden Zustand eintritt, nennt man Sprungtemperatur. Dieser Name drückt die Tatsache aus, dass dieser Übergang im allgemeinen sehr rasch erfolgt, häufig in einem Intervall von einigen 10^{-3} °K. Man findet aber auch Übergänge, die sich auf einige Zehntelsgrade erstrecken. Daher versteht man unter der Sprungtemperatur z. B. oft die Temperatur, bei der der Widerstand auf die Hälfte seines Wertes, unmittelbar vor dem Übergang, gesunken ist (Fig. 1).

Die Sprungtemperatur hängt ab von der Zusammensetzung und der Vorbehandlung der Probe sowie vom Magnetfeld, in dem sich die Probe befindet, vom Strom, der in ihr fliesst und von den herrschenden mechanischen Spannungen. Spricht man von Sprungtemperatur schlechthin, so meint man die Sprungtemperatur bei Abwesenheit von Magnetfeldern, Strömen und mechanischen Spannungen. Alle diese Einflüsse

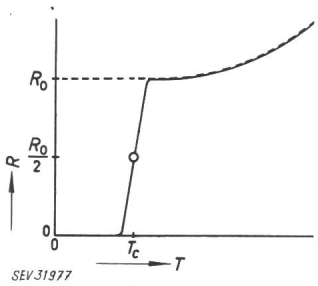
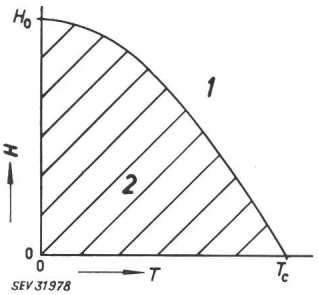


Fig. 1
Der elektrische Widerstand R bei tiefen Temperaturen T
Widerstandsverlauf:
---- Normal-Leiter
——— Supra-Leiter
T_c kritische Temperatur

Fig. 2
Phasengrenze zwischen normalleitendem und supraleitendem Zustand in der H-T-Ebene (Threshold-Kurve)
1 normale Leitung;
2 Supraleitung; H Feldstärke;
T Temperatur



erniedrigen die Sprungtemperatur. Die bis heute bekannten Sprungtemperaturen liegen alle unter 20 °K. Mit 18,1 °K besitzt Nb_3Sn die höchste Sprungtemperatur (Tabelle I).

Sprungtemperaturen

Tabelle I

Material	Sprungtemperatur °K
Nb_3Sn	18,1
Mo-Re	12,6
Nb-Zr	≈ 11
Nb	9
Pb	7,2
Hg	4,15

3. Supraleiter im Magnetfeld

Die meisten bekannten Untersuchungen beziehen sich auf das Verhalten der Supraleiter in zeitlich konstanten Feldern, welche in diesem Abschnitt allein berücksichtigt werden sollen.

3.1 Die kritische Feldstärke

Bringt man eine supraleitende Probe in ein hinreichend starkes Magnetfeld, so wird sie normalleitend. Die Feldstärke, welche hiezu gerade ausreicht, nennt man die kritische Feldstärke H_c der betreffenden Probe. Sie hängt von der Temperatur ab. Bei vielen Supraleitern lässt sich diese Beziehung angenähert durch:

$$H_c(T) = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \qquad (1)$$

ausdrücken. Hierin bedeuten $H_c(T)$ die kritische Feldstärke bei der Temperatur T, T_c die Sprungtemperatur und H_0 die kritische Feldstärke für den Grenzfall $T = 0$. Bei den Hochfeld-Supraleitern gilt die Relation (1) nicht mehr.

Die Parabel *1* teilt den rechten oberen Quadranten der T-H-Ebene in zwei Gebiete (Fig. 2). Im einen Gebiet ist die Probe supraleitend, im anderen ist sie normalleitend (Fig. 2).

Die kritischen Feldstärken liegen im allgemeinen bei einigen hundert oder tausend Oersted, ausser bei den Hochfeld-Supraleitern, wo sie über 100 kOe betragen können (Tabelle II). Man vermutet, dass eine Grenze für das kritische Feld H_0 besteht, die nur von der Sprungtemperatur T_c gemäss

$$H_0 = 18{,}4\, T_c \qquad [H_0 \text{ in kOe}]$$

abhängt [6].

Kritische Feldstärken

Tabelle II

Material	Kritische Feldstärke Oe
Hg	410
Pb	800
Nb	2 600
Pb Bi	20 000
Nb-Zr	≈ 80 000...100 000
Nb_3Sn	> 200 000
V_3Ga	> 500 000

Um genau zu sein, muss man angeben, wie das Magnetfeld zur Probe steht. Da man als Probe in der Regel einen zylinderförmigen Draht benutzt, unterscheidet man meistens die beiden folgenden Fälle: Magnetfeld senkrecht zur Drahtachse und Magnetfeld parallel zur Drahtachse. Der erste dieser beiden Fälle ist der gebräuchliche. Das Eigenfeld des Messstromes muss natürlich dabei gegenüber dem von aussen angelegten Magnetfeld zu vernachlässigen sein.

Je nach der Neigung der «threshold curve» (Fig. 2) in der Nähe der Abszissenachse spricht man von «weichen» und «harten» Supraleitern [7]. Weiche Supraleiter haben eine kleine Steigung (H_0/T_c liegt etwa zwischen 50 und 100 Oe/°K), harte Supraleiter dagegen eine grössere. Zu den harten Supraleitern gehören auch die Hochfeld-Supraleiter.

3.2 Der Meissner-Ochsenfeld-Effekt

Unter dem Meissner-Ochsenfeld-Effekt [8] versteht man die Tatsache, dass beim Übergang in den supraleitenden Zustand die Induktion B im Innern des Leiters verschwindet; der magnetische Fluss wird nach aussen gedrängt.

Diese Tatsache ist offenbar nicht zu verstehen mit der Annahme, dass der supraleitende Zustand sich vom Normalzustand nur dadurch unterscheide, dass bei ihm der spezifische Widerstand verschwinde. Also kann man zur Beschreibung der Supraleiter nicht einfach die üblichen Formeln nehmen und in ihnen den spezifischen Widerstand gleich Null setzen.

Das Ohmsche Gesetz verknüpft Feldstärke und Stromdichte am gleichen Ort. Bei den Supraleitern ist nach *Pippard* [9] der Zusammenhang zwischen Stromdichte und Feldstärke nicht mehr durch eine lokale Funktion zu beschreiben: Die Stromdichte J im Punkt P ist im wesentlichen bestimmt durch die Werte der Feldstärke E innerhalb einer Kugel mit P als Zentrum. Der Radius dieser Kugel, die sog. «Kohärenzlänge», ist von der Grössenordnung 10^{-4} cm [10].

Im Zusammenhang mit dem Meissner-Ochsenfeld-Effekt steht auch die Flussquantisierung. Das ist die Tatsache, dass der von einem supraleitenden Stromkreis eingeschlossene Fluss nur ganzzahlige Vielfache von $2{,}07 \cdot 10^{-15}$ T[2]) betragen kann [11].

3.3 Die Eindringtiefe

Im supraleitenden Zustand verschwindet wegen des Meissner-Ochsenfeld-Effektes die magnetische Induktion im Innern. Nach dem Ampèreschen Verkettungsgesetz $J = \text{rot}\, H$ müssen daher Oberflächenströme fliessen, welche das Magnetfeld abschirmen. Diese Oberflächenströme fliessen in einer dünnen Randschicht von etwa 10^{-5} cm Dicke. Bis zu dieser Tiefe dringt das Magnetfeld ein, man spricht daher von der «Eindringtiefe». In der Randschicht fällt das Magnetfeld i. a. nicht monoton auf den Wert Null, wie man zunächst erwarten würde. In einem gewissen Bereich ist das Feld sogar umgekehrt gerichtet, wie das Aussenfeld. Diese Feldumkehr hängt mit der nichtlokalen Verknüpfung zwischen Stromdichte J und Feldstärke E zusammen. Diese Feldumkehr wurde experimentell beobachtet [12].

3.4 Der Zwischenzustand

Bringt man eine supraleitende Kugel aus einem weichen Supraleiter in ein homogenes Magnetfeld der Feldstärke H, so nimmt die Feldstärke an der Kugeloberfläche verschiedene Werte an. Sie ist am grössten auf dem Äquator, dem Grosskreis, dessen Ebene senkrecht zum ursprünglichen, ungestörten Magnetfeld steht. Auf diesem Äquator hat die Feldstärke den Wert $3/2 \cdot H$. Man hat nun drei Fälle zu unterscheiden [13]:

a) $H < \frac{2}{3} H_c$ — Das Magnetfeld auf der Kugeloberfläche ist überall kleiner als die kritische Feldstärke H_c. Die Kugel befindet sich im supraleitenden Zustand.

b) $\frac{2}{3} H_c < H < H_c$ — Würde das Magnetfeld nicht in die Kugel eindringen, so wäre es in der Nähe des Äquators grösser als die kritische Feldstärke H_c. Das ist aber nicht möglich. Die Kugel befindet sich im Zwischenzustand. Sie besteht aus supraleitenden und normalleitenden Lamellen in Richtung des Feldes H. Das Magnetfeld dringt auf diese Weise in die Kugel ein. Das Feld am Äquator ist immer gleich H_c.

c) $H > H_c$ — Die Kugel ist normalleitend. Die Feldstärke ist überall gleich H.

4. Der stromdurchflossene Supraleiter

4.1 Die kritische Stromstärke

Überschreitet die Stromstärke in einem supraleitenden Draht einen gewissen Wert, die kritische Stromstärke, so wird er normalleitend («Quenching effect»).

Die kritische Stromstärke hängt ab vom Material, seiner Vorbehandlung und dem Magnetfeld, in dem sich die Probe befindet. Mit zunehmender Feldstärke sinkt die kritische Stromstärke. Der Zusammenhang dieser beiden Grössen ist aus der «Quenching characteristic» der betreffenden Probe zu ersehen (Fig. 3).

4.2 Verteilung des Stromes über den Leiterquerschnitt

Bei den weichen Supraleitern fliesst der Strom auf einer dünnen Oberflächenschicht von der Dicke der Eindringtiefe. Man wird daher erwarten, dass der kritische Strom, den ein Draht führen kann, proportional zu seinem Durchmesser ist. Dieses Verhalten wird tatsächlich beobachtet.

Bei den Hochfeld-Supraleitern hingegen findet man, dass die kritische Stromstärke ungefähr proportional dem Drahtquerschnitt ist [7]. Man erwartet daher, dass sich der Strom gleichmässig über den Querschnitt verteilt. Man stellt sich vor, dass die Stromleitung in einem Hochfeld-Supraleiter durch eine schwammartige Struktur von supraleitendem Material besorgt wird, welches in normalleitendes Material eingebettet ist [14]. Der Durchmesser der supraleitenden Fäden ist kleiner als die Eindringtiefe. Es ist möglich, das Verhalten solcher Schwammstrukturen durch Modellversuche experimentell zu untersuchen [15]. Man nimmt dazu Vycor-Glass, dessen Poren unter Druck mit Quecksilber gefüllt wurden.

Diesen beiden Leitungsarten entsprechend unterscheidet man zwei Klassen von Supraleitern. Zur Klasse 1 gehören die Supraleiter, bei denen die Leitung in einer dünnen Oberflächenschicht erfolgt, zur Klasse 2 gehören die Supraleiter, bei denen die Leitung durch eine schwammartige Struktur von supraleitenden Fäden erfolgt.

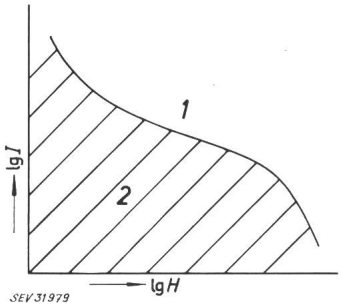


Fig. 3
«Quenching-characteristic» eines Drahtes, der vom Strom I durchflossen wird und sich in einem zusätzlichen Magnetfeld von der Feldstärke H befindet

1 normale Leitung
2 Supraleitung

[2]) T = Tesla

5. Supraleitende Werkstoffe

Supraleitung findet man unter den Metallen, den Übergangselementen, intermetallischen Verbindungen und Legierungen. Die guten Leiter wie Ag, Cu, Al werden nicht supraleitend. Nach den Matthiasschen Regeln [16] sollte die Zahl der Valenz-Elektronen pro Atom für Supraleiter etwa 5 oder 7 betragen.

Für die Starkstromtechnik scheinen vor allem die Hochfeld-Supraleiter interessant zu sein. Diese sind entweder intermetallische Verbindungen wie Nb_3Sn oder Legierungen verschiedener Zusammensetzungen eines Systems, wie Nb-Zr.

5.1 Intermetallische Verbindungen

Die intermetallischen Verbindungen (z. B. Nb_3Sn, V_3Ga, V_3Si, V_3Sn, Nb_3Al), sind vom β-Wolfram-Typ und sind sehr spröde. Ihre Eignung als Hochfeld-Supraleiter hängt sehr von der Zusammensetzung und der Verarbeitung ab (Fig. 4 und 5).

Man kennt heute drei Verfahren zur Herstellung von Drähten.

a) *Kunzler-Drähte* [5]. Ein Niob-Rohr von 6 mm Aussendurchmesser und 1,5 mm Wandstärke wird auf einer Seite verschlossen, dann mit einem (3Nb+Sn)-Pulvergemisch (oder mit Nb_3Sn-Pulver) gefüllt. Nach Verschliessen des zweiten Rohrendes wird das gefüllte Rohr durch Rundhämmern auf einen Aussendurchmesser von 0,2 bis 0,4 mm gebracht. Nach dem Wickeln des so erhaltenen Drahtes wird dieser gesintert (Fig. 5) und erhält dabei seine Hochfeldeigenschaften. Durch diese Behandlung wird die kritische Stromstärke um einen Faktor 100 bis 1000 verbessert, verglichen mit einer entsprechenden geschmolzenen Nb_3Sn-Probe.

b) *Hanak* und Mitarbeiter [17] stellen supraleitende Schichten, die aus einem Gasgemisch auf beliebigen Unterlagen niedergeschlagen werden können, her.

c) *Saur* und *Wurm* [18] beschreiben ein Verfahren zur Herstellung dünner Nb_3Sn-Schichten auf Nb-Draht oder -Band durch Diffusion von Zinn, aus einer Schmelze oder aus der Dampfphase in Niob, bei hohen Temperaturen.

5.2 Legierungen

Legierungen verschiedener Zusammensetzung des Systems Nb-Zr haben gute Hochfeld-Eigenschaften und sind duktil. Die höchsten kritischen Felder werden bei einem Nb-Gehalt von 65...75% erzielt (Fig. 6).

Gewisse Legierungen der Systeme Nb-Ti, V-Ti, Mo-Re, haben ebenfalls hohe kritische Stromstärken und -Magnetfelder. Sie sind jedoch um einen Faktor 5 bis 10 schlechter als bei Nb-Zr.

6. Technische Anwendungen

Es sind viele Vorschläge bekannt, wie die Supraleitung anzuwenden sei (vergl. z. B. [19; 20; 21]). Sie verwenden hauptsächlich die Widerstandslosigkeit im supraleitenden Zustand,

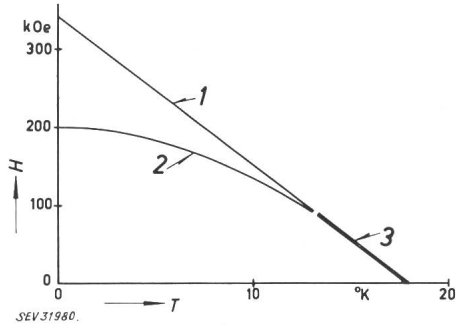


Fig. 4
Kritische Feldstärken von «Kunzler-Drähten»
Nb_3Sn-Kern in Nb-Rohr; 0,15 mm Kerndurchmesser, 0,38 mm äusserer Rohrdurchmesser
1 lineare Extrapolation; *2* quadratische Extrapolation; *3* Messwerte
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

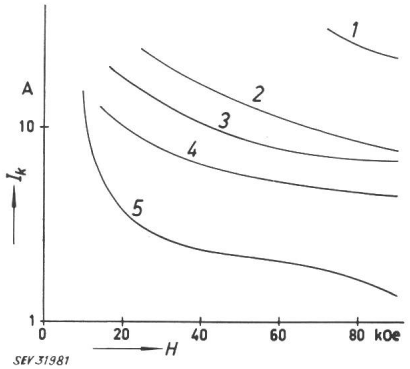


Fig. 5
Kritische Stromstärken I_k von «Kunzler-Drähten» verschiedener Zusammensetzung und Sinterbedingungen
H Feldstärke

Kurve	°K	Zusammensetzung	Sinterung
1	4,2	(3Nb+Sn+10 % Sn)	16 h bei 970 °C
2	1,5	(Nb_3Sn+10 % Sn)	16 h bei 970 °C
3	1,5	(3Nb+Sn)	16 h bei 1200 °C
4	4,2		
5	1,5	(3Nb+Sn+10 % Sn)	14 h bei 1200 °C

den Übergang vom normalleitenden in den supraleitenden Zustand oder den Meissner-Ochsenfeld-Effekt. Welche der Erscheinungen auch benützt werden mag, immer spielen sich die Vorgänge unterhalb 20 °K ab. Der Elektrotechniker muss daher über ausreichende Kenntnisse der Kältetechnik verfügen.

6.1 Ausnützung des Überganges vom normalleitenden zum supraleitenden Zustand

Das wohl bekannteste Element ist das Cryotron von *Buck* [4]. Es besteht aus zwei Supraleitern (Drähtchen oder Schichten [20]), von denen der eine ein höheres kritisches Feld als der andere besitzt. Er führt den Steuerstrom, welcher ein Magnetfeld erregt, das so gross gewählt werden kann, dass der andere Supraleiter sich im normalleitenden Zustand befindet. Der Schaltvorgang an sich dauert im besten Fall einige 10^{-10} s [22]. Es ist aber sehr schwer, die Wärme abzuführen, so dass sich heute praktisch nur Schaltfrequenzen von 10^7 Hz erreichen

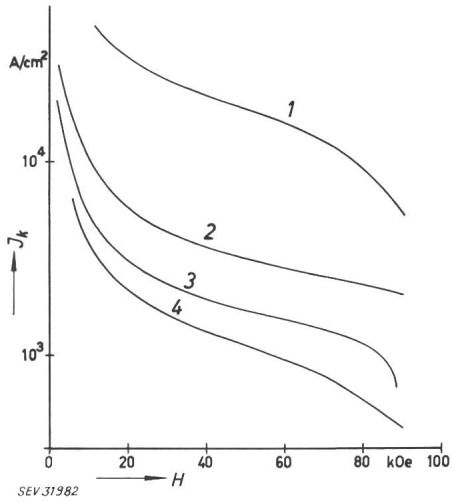


Fig. 6
Kritische Stromdichten J_k einiger Nb-Zr-Legierungen
H Feldstärke

Kurve	Zr-Gehalt	Walzgrad	Temperatur
1	33 %	97 %	1,5 °K
2	50 %	97 %	1,5 °K
3	50 %	97 %	4,2 °K
4	50 %	0	1,5 °K

lassen. Das Cryotron wird hauptsächlich in der Digitaltechnik verwendet.

Bringt man eine supraleitende Spule in ein axiales Magnetfeld, dessen Stärke knapp unterhalb der kritischen Feldstärke liegt, so ist ihr Widerstand stromrichtungsabhängig. Fliesst der Strom so, dass er das angelegte Magnetfeld schwächt, so bleibt die Spule supraleitend, bei umgekehrter Stromrichtung und hinreichender Stromstärke wird sie normalleitend. *Olsen* [23] benutzt diesen Effekt zur Gleichrichtung und Verstärkung.

Der Übergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand durch Erhöhung der Temperatur wird in empfindlichen Bolometern zur Feststellung von Infrarotstrahlung [24; 25] angewendet.

6.2 Ausnützung der Widerstandslosigkeit

Im supraleitenden Zustand ist der elektrische Widerstand gleich Null, allerdings nur bei Gleichstrom. Wird ein supraleitender Leiter von Wechselstrom durchflossen, so treten in ihm Verluste auf. Zwar weiss man, dass diese Verluste in weichen Supraleitern zu vernachlässigen sind, solange das Magnetfeld hinreichend schwach ist und die Frequenz unterhalb etwa 1 MHz liegt. Das Magnetfeld muss so schwach sein, dass sich der Leiter nirgends im Zwischenzustand befindet, dass er also nur aus supraleitendem Material besteht. Bei den heute bekannten Hochfeld-Supraleitern scheinen jedoch schon bei 50 Hz so grosse Verluste, vermutlich Wirbelstromverluste, aufzutreten, dass man mit ihnen nicht ohne weiteres einfach supraleitende Transformatoren, Übertragungsleitungen und Maschinen bauen kann. Da aber die Natur dieser Wechselstromverluste noch nicht richtig erforscht ist, kann die Zukunft Überraschungen bringen.

Die Frage, wie und wie weit die Supraleitung in die Starkstromtechnik Eingang finden wird, ist heute aber noch nicht geklärt [26; 27]. Zu den klassischen Anwendungsmöglichkeiten treten aber neue hinzu. Erzeugung starker Magnetfelder auf grossem Raum [17; 28] bei der Kernfusion, MHD-Generatoren, Blasenkammern usw. Da in geschlossenen, supraleitenden Stromkreisen ein permanenter Strom fliessen kann, so lassen sich mit Supraleitern auch permanente Magnete bauen. Hohlraumresonatoren aus supraleitendem Material mit hohem Q (etwa 10^8) [29] sind für den Beschleunigerbau von grossem Interesse.

6.3 Ausnützung des Meissner-Ochsenfeld-Effektes

Da im supraleitenden Zustand das Magnetfeld, abgesehen von einer dünnen Randschicht, nicht in den Supraleiter eintreten kann, so kann ein solcher Supraleiter zur Abschirmung und Führung von Magnetfeldern benützt werden. Damit lassen sich Streuflüsse vermeiden [30].

7. Schlussbemerkungen

Die Entdeckung von Materialien mit sehr hohen kritischen Feldern weckte die Hoffnung, nun endlich die Supraleitung in der Starkstromtechnik weitgehend anwenden zu können. Man erwartete nicht nur einen Wegfall der Ohmschen Verluste, sondern, wegen der möglichen starken Magnetfelder und hohen Stromdichten, auch eine besonders kompakte Bauweise. Da aber in den bisher bekannten Hochfeld-Supraleitern Wirbelstromverluste auftreten, scheint sich diese Hoffnung nicht so bald zu erfüllen. Dieser Einwand gilt jedoch nicht für von Gleichstrom durchflossene Leiter, Magnete und Erregerspulen. Die an sich bei den Cryotrons möglichen kurzen Schaltzeiten können in der Praxis wegen thermischer Schwierigkeiten nicht ausgenützt werden.

Literatur

[1] *Olsen, J. L.:* Electron Transport in Metals. New York: Interscience Publ. 1962.

[2] *Onnes, H. Kamerlingh:* Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden —(1911)120b.

[3] *Onnes, H. Kamerlingh:* Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden —(1913)133d.

[4] *Buck, D. A.:* The Cryotron — A Superconductive Computer Component. Proc. IRE 44(1956)4, S. 482...493.

[5] *Kunzler, J. E., E. Buehler, F. S. L. Hsu* und *J. H. Wernick:* Superconductivity in Nb_3Sn at High Current Density in a Magnetic Field of 88 KGAUSS. Phys. Rev. Letters 6(1961)3, S. 89...91.

[6] *Clogston, A. M.:* Upper Limit for the Critical Field in Hard Superconductors. Phys. Rev. Letters 9(1962)6, S. 266...267.

[7] *Kunzler, J. E.:* Superconductivity in High Magnetic Fields at High Current Densities. Rev. Mod. Phys. 33(1961)4, S. 501...509.

[8] *Meissner, W.* und *R. Ochsenfeld:* Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. Naturwiss. 21(1933)44, S. 787...788.

[9] *Pippard, A. B.:* An Experimental and Theoretical Study of the Relation between Magnetic Field and Current in a Superconductor. Proc. Roy. Soc. (London) A 216(1953), 24. Febr., S. 547...568.

[10] *Pippard, A. B.:* The Coherence Concept in Superconductivity. Physica 19(1953)9, S. 765...774.

[11] *Byers, N.* und *C. N. Yang:* Theoretical Considerations Concerning Quantized Magnetic Flux in Superconducting Cylinders. Phys. Rev. Letters 7(1961)2, S. 46...49.

[12] *Drangeid, K. E.* und *R. Sommerhalder:* Observed Sign Reversal of a Magnetic Field Penetrating a Superconductor. Phys. Rev. Letters 8(1962)12, S. 467...469.

[13] *Mendelssohn, K.: Cryophysics.* New York: Interscience Publ. 1960. S. 106.

[14] *Mendelssohn, K.:* Discussion of Superconductivity. The Change of Induction. Proc. Roy. Soc. (London) A 152(1935)875, S. 34...37.

[15] *Bean, C. P., M. V. Doyle* und *A. G. Pincus:* Synthetic High-Field, High-Current Superconductor. Phys. Rev. Letters 9(1962)3, S. 93...94.

[16] *Matthias, B. T.:* Superconductivity in the Periodic System in: Progr. Low-Temp. Phys. Bd. II, Amsterdam 1957. S. 138.

[17] *Hanak, J. J., G. D. Gody, H. C. Hitchcock* und *P. R. Aron:* Some Physical Properties of Deposited Nb_3Sn. Proc. Internat. Conf. High Magnetic Fields, Cambridge, Mass. 1961. New York: Wiley 1962. S. 592.

[18] *Saur, E.* und *J. Wurm:* Präparation und Supraleitungseigenschaften von Niobdrahtproben mit Nb_3Sn Überzug. Naturwiss. 49(1962)6, S. 127...128.

[19] *Buchhold, T. A.:* Applications of Superconductivity. Sci. American. 202(1960)3, S. 74...82.

[20] *Ballmoos, F. von:* Untersuchungen an supraleitenden Schaltelementen. Diss. ETH. Zürich: Börsigs Erben 1961.

[21] *Kropschot, R. H.* und *von Arp:* Superconducting Magnets. Cryogenics 2(1961)1, S. 1...15.

[22] *Nethercot, A. H., Jr.:* Superconducting-Normal Transition Time. Phys. Rev. Letters 7(1961)6, S. 226...228.

[23] *Olsen, J. L.:* Superconducting Rectifier and Amplifier. Rev. Sci. Instrum. 29(1958)6, S. 537...538.

[24] *Andrews, D. H., R. M. Milton* und *W. de Sorbo:* A Fast Superconducting Bolometer. J. Opt. Soc. Amer. 36(1946), Sept., S. 518..524.

[25] *Martin, D. H.* und *D. Bloor:* The Application of Superconductivity to the Detection of Radiant Energy. Cryogenics 1(1960)/61)3, S. 159...165.

[26] *McFee, R.:* Superconducting Power Transformers — a Feasibility Study. Electr. Engng. 80(1961)10, S. 754...760.

[27] *McFee, R.:* Applications of Superconductivity to the Generation and Distribution of Electric Power. Electr. Engng. 81(1962)2, S. 122...129.

[28] *Boom, R. W.* und *R. S. Livingston:* Superconducting Solenoids. Proc. IRE 50(1962)3, S. 274...285.

[29] *Fairbank, W. M., J. M. Pierce* und *P. B. Wilson:* High Power Superconducting Cavities for Accelerators. 8th Internat. Congress on Low Temp. Physics. London: Butterworth (erscheint demnächst).

[30] *Cioffi, P. P.:* Approach to the Ideal Magnetic Circuit Concept Trough Superconductivity. J. appl. Phys. 33(1962)3, S. 875...879.

Adresse des Autors:

B. Bürgel, dipl. Physiker, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).