Technologie von tiefgekühlten und supraleitenden Elektromagneten

Autor(en): **Tschopp, P.A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **58 (1967)**

Heft 4

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916225

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

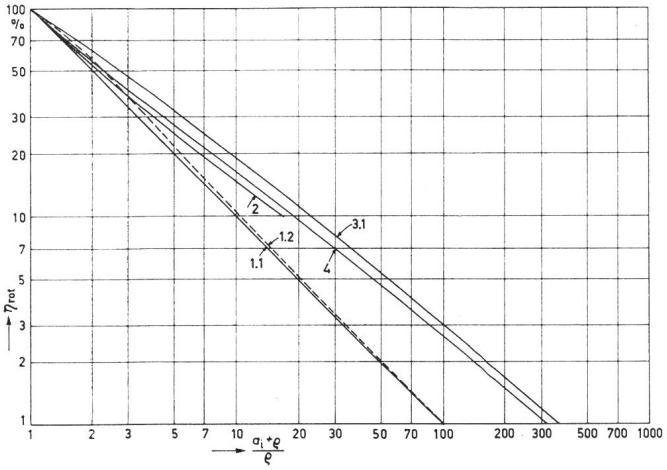


Fig. 6

Ausnutzungsfaktor η_{rot} abhängig von der geometrischen Charakteristik $\frac{a_i+\varrho}{\varrho}$ mit a_i als Elektrodenabstand und ϱ als Krümmungsradius

1.1 konzentrische Kugeln; *1.2* Kugel/Ebene; *2* konfokale Ellipsoide; *3.1* Hyperboloidspitze/Ebene; *4* Paraboloide gegeneinander

8. Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit sollte einmal mehr gezeigt werden, welche Möglichkeiten dem in der Praxis stehenden Hochspannungstechniker für die exakte Erfassung der Feldgüte von Elektrodensystemen in der Form geeigneter Koordinatensysteme zur Verfügung stehen. Weiterhin sollte dargelegt werden, wie rotatorische Felder hinsichtlich ihrer Feldqualität mit guter Näherung aus translatorischen Feldern bestimmt werden können und die Ausnutzungsfaktoren der berechneten Systeme über die geometrische Charakteristik $\frac{a_i+\varrho}{\varrho}$ miteinander vergleichbar werden.

Es wäre wünschenwert, wenn in dieser Richtung weitergearbeitet würde und noch andere Elektrodensysteme der Rechnung zugänglich gemacht werden könnten, damit dem Hochspannungstechniker im Verlaufe der nächsten Jahre Arbeitsunterlagen zur Verfügung stehen, die ihn befähigen, Elektrodensysteme besser und wirkungsvoller abzuschätzen und erforderlichenfalls auch exakt zu berechnen.

Literatur

[1] *G. Lamé:* Leçons sur les coordonnées curvilignes et leurs diverses applications. Mallet-Bachelier, Paris 1859.

[2] *C. Neumann:* Allgemeine Lösung des Problemes über den stationären Temperaturzustand eines homogenen Körpers, welcher von irgend zwei nicht concentrischen Kugelflächen begrenzt wird. Halle 1862.

[3] *C. Neumann:* Theorie der Elektricitäts- und Wärmevertheilung in einem Ringe. Halle 1864.

[4] *A. Wangerin:* Reduction der Potentialgleichung für gewisse Rotationskörper auf eine gewöhnliche Differentialgleichung. Preisschriften der fürstlichen Jablonowski'schen Gesellschaft zu Leipzig. Hirzel, Leipzig 1875.

[5] *A. Wangerin:* Über die Reduction der Gleichung

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0$$

auf gewöhnliche Differentialgleichungen. Monatsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften –(1878)2, S. 152...166.

[6] *P. Stäckel:* Über die Integration der Hamilton-Jacobischen Differentialgleichung mittels Separation der Variablen. Habilitationsschrift der philosophischen Fakultät der vereinigten Friedrichs Universität Halle Wittenberg. Halle 1891.

[7] *M. Bôcher:* Über die Reihenentwicklungen der Potentialtheorie. Preisschrift und Dissertation, Universität Göttingen 1891.

[8] *A. Schwaiger:* Beitrag zur elektrischen Festigkeitslehre, Arch. Elektrotechn. 11(1922)1, S. 41...50.

[9] *L. P. Eisenhart:* Separable Systems of Stäckel. Annals of Mathematics, Second Series 35(1934)2, S. 284...305.

[10] *L. P. Eisenhart:* Stäckel Systems in Conformal Euclidean Space. Annals of Mathematics, Second Series 36(1935)1, S. 57...70.

[11] *A. Bouwers:* Elektrische Höchstspannungen. Springer, Berlin 1939, S. 113.

[12] *P. Moon* and *D. E. Spencer:* Cylindrical and Rotational Coordinate Systems. J. Franklin Inst. 252(1951)10, S. 327...344.

[13] *P. Moon* and *D. E. Spencer:* Separability Conditions for the Laplace and Helmholtz Equatations. J. Franklin Inst. 253(1952)6, S. 585...600.

[14] *P. Moon* and *D. E. Spencer:* Recent Investigations of the Separation of the Laplace's Equatation. Proceedings of the American Mathematical Society 4(1953)2, S. 302...307.

[15] *P. Moon* and *D. E. Spencer:* Field Theory for Engineers. Van Nostrand, Princeton N. J. 1961.

[16] *P. Moon* and *D. E. Spencer:* Field Theory Handbook, Springer Berlin 1961.

[17] *G. Hilgarth:* Näherungsweise Ermittlung des Schwaigerschen Ausnutzungsfaktors. ETZ-A 87(1966)3, S. 107...109.

[18] *P. J. Lawrenson:* Numerical Methods. In: *D. Vitkovitch:* Field Analysis. Experimental and Computational Methods. Van Nostrand, London 1966.

[19] *H. Prinz:* Zur Feldberechnung von Höchstspannungs-Übertragungsanlagen. Bull. SEV 57(1966)26, S. 1199...1211.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr. *H. Prinz,* Direktor des Institutes für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, und Dipl.-Ing. *H. Singer,* Wissenschaftlicher Assistent am gleichen Institut, Arcisstrasse 21, D - 8 München 2.

Technologie von tiefgekühlten und supraleitenden Elektromagneten

Gekürzte Fassung [1]) des Vortrages, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 17. Mai 1966 in Zürich,

von *P. A. Tschopp,* Zürich

681.187

Thematisch lässt sich das Gebiet der Forschungselektromagnete in die Problemkreise «Grundlegende Feldprobleme und Berechnung», «Konstruktion und Bau» und «Prüfung und Betrieb» aufspalten, wovon in diesem Aufsatz die Probleme von Konstruktion und Herstellung – die eigentliche Technologie dieser Magnete — behandelt werden.

Nach einleitender artweiser Unterteilung in Magnete mit normalen Leitern, mit tiefgekühlten Leitern und mit Supraleitern, werden tiefgekühlte und supraleitende Magnete nach einheitlichen Gesichtspunkten beschrieben, nämlich artweise getrennt die magnetischen Kreise, die Wicklungen und Spulen, die Kühlung und die Speisung. Fallweise werden schliesslich die Anwendungsgebiete und einzelne Anwendungsbeispiele mit einem Ausblick auf die zukünftige Technologie beschrieben.

L'étude des électro-aimants utilisés dans la recherche scientifique peut être divisée en trois parties, soit «problèmes fondamentaux du champ magnétique et calcul des aimants», «conception et fabrication» et «essais de vérification et exploitation». Cet article se limite à l'étude des problèmes concernant la conception et la fabrication, c'est-à-dire à la technologie proprement dite de ces aimants. Après une classification des aimants en aimants à conducteurs normaux, à conducteurs cryogéniques et à supraconducteurs, il suit la description systématique des aimants cryogéniques et des aimants supraconducteurs, du point de vue des circuits magétiques, des enroulements et bobines, de la réfrigération et de l'alimentation en courant. Les domaines d'application sont illustrés de quelques exemples et un aperçu sur le développement futur de la technologie clôture l'article.

[1]) Der Titel des an der Tagung gehaltenen Vortrages hiess: «Elektromagnete mit normalen Leitern, mit tiefgekühlten Leitern und mit Supraleitern». Der vollständige und zusätzlich ergänzte Vortragstext erscheint als Druckschrift der Maschinenfabrik Oerlikon.

1. Allgemeines

1.1 Einleitung

Betrachtet man die Anzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften als ein Mass für die Aktivität auf einem gegebenen Forschungsgebiet, so kann man um 1955/1960 herum eine eigentliche Renaissance des Magnetismus feststellen. Seither hat eine massive Entwicklung in die Breite stattgefunden, hauptsächlich auch durch die Entdeckung von technisch verwendbaren Supraleitern.

Nachdem in den USA eine Anzahl kleinerer Magnet-Tagungen durchgeführt worden waren — hauptsächlich zwecks Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet der Herstellung von hohen und ausgedehnten Magnetfeldern für die Kernfusion und für die MHD-Energieumwandlung — gruppierte die 1961 in Cambridge (USA) durchgeführte internationale Konferenz über hohe Magnetfelder nahezu 900 Interessenten aus aller Welt [1] [2]). Seither haben in USA und Europa jährlich eine oder mehrere Magnet-Tagungen stattgefunden, hauptsächlich auch auf dem Gebiet der Supraleitung, und schliesslich versammelte die 1. Internationale Konferenz über Magnettechnologie in Stanford 1965 wiederum Fachleute aus aller Welt [2]. In zahlreichen Übersichten [3; 4] sind in der Zwischenzeit die Probleme der Herstellung von magnetischen Feldern dargestellt worden.

1.2 Unterteilung der Elektromagnete nach Arten

1.2.1 Elektromagnete mit normalen Leitern (NL)

Unter «Elektromagnete mit normalen Leitern» versteht man alle Magnete mit normalen Leitern, die bei Raumtemperatur und darüber arbeiten, d. h. oberhalb etwa 300 °K (Temperaturgebiet der konventionellen elektrischen Maschinen).

1.2.2 Elektromagnete mit tiefgekühlten Leitern (TL)

Elektromagnete mit tiefgekühlten Leitern sind Elektromagnete mit normalleitenden Spulen, die tiefgekühlt bei Temperaturen um 20 °K betrieben werden, sowie als Sonderfälle solche, die zwar auf tiefe (LH_2, LN_2) Temperaturen abgekühlt, jedoch nicht stationär bei diesen Temperaturen betrieben werden (Pulsspulen).

1.2.3 Elektromagnete mit Supraleitern (SL)

Unter «Elektromagnete mit Supraleitern» versteht man Elektromagnete mit supraleitenden Spulen, die bei ca. 4,2 °K betrieben werden.

Die drei Magnetarten sind im allgemeinen ziemlich scharf getrennt, wenn auch von verschiedener Seite [5] schon Hybrid-Magnete (Kombination NL-TL, NL-SL oder TL-SL) vorgeschlagen worden sind; bis heute ist jedoch kein solcher Magnet gebaut oder wenigstens ernsthaft projektiert worden.

Bezüglich der Höhe des Magnetfeldes lässt sich für NL-Magnete eine Grenze für stationäre Felder bei etwa 25 T (Tesla) setzen; darüber hinaus wird die Beherrschung der elektromagnetischen Kräfte (Felddruck 25 kp/mm² bei 25 T) wie auch der Kühlungsprobleme [6] schwierig, wenn auch im Prinzip Felder bis gegen 50 T möglich scheinen. Bei den TL-Magneten spielen die elektromagnetischen Kräfte eine noch weit grössere Rolle, da die dort verwendeten Leitermaterialien eine sehr kleine Festigkeit haben. Für SL-Magnete besteht schliesslich — zumindest mit den heute bekannten Supraleitern — eine natürliche Grenze bei etwa 20 T. Für Felder mit Flussdichten wesentlich über 20 T bleibt somit heute die NL- bzw. TL-Pulstechnik auch weiterhin die einzige Möglichkeit.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Verschiedentlich sind einzelne Magnetarten technisch und kostenmässig einander gegenübergestellt worden, insbesondere NL-SL für Magnete mit mittleren Feldern in grossen Volumina wie etwa Blasenkammer- und hauptsächlich MHD-Magnete [7; 8].

2. Elektromagnete mit tiefgekühlten Leitern

Die Idee, durch Verkleinerung des elektrischen Widerstandes von Magnetspulen mittels Tiefkühlen die Verlustleistung zum Herstellen eines gegebenen Magnetfeldes zu verringern, bzw. bei gegebener Leistung höhere Magnetfelder zu erreichen, ist nahezu so alt wie der Magnetbau überhaupt. Allerdings beschränkten sich — hauptsächlich weil die Kältetechnik noch in den Kinderschuhen steckte — sozusagen sämtliche frühen Anwendungen auf die labormässige Kühlung von kleinen Pulsspulen [9] mittels flüssiger Luft oder Stickstoff und vereinzelt flüssigem Wasserstoff und später Helium. Erst als durch die

— Fortschritte in der Kältetechnik infolge der Bedürfnisse der Raumfahrt, durch die

— Forschung auf Gebieten, wo ohne starke und billige Magnetfelder keine industrielle Anwendung denkbar ist, wie MHD-Energieumwandlung und Fusion, und durch die

— Herstellung von sehr reinen metallischen Leitern in genügenden Mengen auf industrieller Basis,

die Voraussetzungen dafür geschaffen waren, vereinigte das Gebiet der TL-Magnete in den 60er-Jahren das Interesse zahlreicher Forschungslaboratorien. In der Folge wurden die technischen und wirtschaftlichen Problemkreise wie Kühlung, Isolation, Konstruktionseinzelheiten und Leistungseinsparung, Kapital- und Betriebskosten eingehend studiert.

Bei der Gegenüberstellung von TL-Magneten mit NL-Magneten ist es unumgänglich, nicht nur den Magnet allein, sondern das gesamte Magnetsystem mit Kühlung und Speisung zu betrachten. Charakteristisch für die TL-Magnete ist nämlich, dass im stationären Betrieb die Magnetverlustleistung RI^2 gegenüber der von der Kältemaschine aufgenommenen Leistung [10] klein ist.

Im Folgenden sollen nun die einzelnen Teile eines TL-Magnetsystems (Magnetischer Kreis, Wicklung, Kühlung, Speisung) etwas näher betrachtet werden.

2.1 Magnetische Kreise

Die magnetischen Kreise von TL-Magneten — sofern solche überhaupt vorhanden sind — unterscheiden sich nicht von jenen von NL-Magneten. Der magnetische Kreis befindet sich dabei immer auf Raumtemperatur; es sind keine Ausführungen oder Projekte bekannt, bei denen der magnetische Kreis zusammen mit der Wicklung auf Tieftemperatur liegt.

2.2 Wicklungen, Spulen

2.2.1 Leitermaterialien

Der Widerstand eines metallischen Leiters im magnetischen Feld setzt sich bekanntlich additiv aus den drei Komponenten Intrinsicwiderstand (temperaturabhängiger Eigenwiderstand, von der thermischen Bewegung des Gitters herrührend), Magnetowiderstand (nur vom Magnetfeld abhängiger Widerstandsanteil) und Verunreinigungswiderstand (auch «Restwiderstand», von Gitterstörstellen und Fremdmaterial-Verunreinigungen herrührend, im wesentlichen temperaturunabhängig) zusammen. An ein Leitermaterial für TL-Magnete müssen deshalb folgende Anforderungen gestellt werden:

a) Kleiner Intrinsicwiderstand;
b) Kleiner Magnetowiderstand mit Sättigungscharakteristik;
c) In grosser Menge vorhanden und billig;
d) Mit vernünftigem Aufwand mit hoher Reinheit herstellbar.

Nach diesen Gesichtspunkten scheiden die Werkstoffe Kupfer, Zinn und Beryllium wegen eines zu hohen Magnetowiderstandes und ebenso Indium infolge eines zu hohen Preises aus, obwohl sie den übrigen Anforderungen entsprechen; lediglich Aluminium [11] und Natrium erfüllen alle gestellten Bedingungen.

Anhand des Gesamtwiderstands kann [10] für die totale Leistungsaufnahme P des TL-Systems für jeden Werkstoff und jedes Magnetfeld B eine optimale Betriebstemperatur T bestimmt werden, bei welcher der Leistungsgewinn-Faktor P_0/P des TL-Betriebs (Gesamtleistung P) gegenüber dem NL-Betrieb (Leistungsaufnahme P_0) sein Maximum erreicht.

Gemäss Tabelle I sind die Quotienten P_0/P für Aluminium und Natrium vergleichbar, vor allem bei mittleren Magnetfeldern, während die optimalen Temperaturen von Al um 7...10 °K höher liegen, d. h. sowohl bezüglich T wie auch P_0/P liegt Al günstiger [12].

Optimale Betriebstemperatur T [°K] und Leistungsgewinnfaktor P_0/P für Aluminium und Natrium in Funktion des Magnetfeldes B [T]

Tabelle I

B	T	0	2	5	10
T_{Al}	°K	16	17	17	17
T_{Na}	°K	6	8	8	10
P_0/P für Al		25	12	10	9
P_0/P für Na		17	10	9	7

Natrium ist in grosser Reinheit billig erhältlich und hat eine kleine Dichte (ca. 1 kg/dm³), wird jedoch bei tiefen Temperaturen u. U. zu brüchig, hat eine sehr kleine mechanische Festigkeit und ist zudem chemisch aggressiv.

Aluminium ist mechanisch etwas fester und chemisch wenig aktiv, ist jedoch gegenüber Kaltverformung im Gegensatz zu Natrium ziemlich empfindlich und muss vor der Verwendung sorgfältig geglüht werden. Positiv wirkt sich aus, dass ein Aluminiumleiter leicht in beliebigen Profilformen hergestellt werden kann. Diese Materialeigenschaften haben dazu geführt, dass für die Herstellung von Wicklungen zu TL-Magneten das Aluminium dem Natrium allgemein vorgezogen wird.

2.2.2 Isolationen

a) Elektrische Isolation. Über dielektrische Eigenschaften von Isolierstoffen bei tiefen Temperaturen [13] existieren relativ wenig Unterlagen, jedoch sind die bei TL-Magneten vorkommenden Spannungen von höchstens einigen 10 V so klein, dass diese Frage gegenüber jener nach der mechanischen Festigkeit zurücktritt. Wichtig ist die Restflexibilität der Isolationsstoffe bei tiefen Temperaturen; diese nimmt allerdings für zahlreiche Materialien auf kleine Werte ab. Meistverwendete Isolationsstoffe sind Polyäthylen, Silikonkautschuk, Nylon, Teflon, Mylar und ähnliche Kunststoffe, die auch als Isolationsmaterialien bei Raumtemperatur gebräuchlich sind.

b) Thermische Isolation. Über Wärmeisolationen bestehen aus der Kältetechnik ausgezeichnete Unterlagen, auch über neueste Entwicklungen [14], so dass in diesem Rahmen nicht weiter darauf eingegangen werden muss.

2.2.3 Spulenaufbau, Konstruktion

Spulen von TL-Magneten [12; 15], vornehmlich aus Aluminium [16; 17], werden meist mit Bändern und Folien in Scheiben [18] gewickelt, die entweder voll sind und dann radial gekühlt oder mit Kühlschlitzen versehen und dann achsial gekühlt werden. In allen Fällen sind die Querschnittsfüllfaktoren ziemlich klein (0,4 bis max. 0,6) infolge der zahlreichen Kühlkanäle, weil deren Querschnitt und Anordnung den Wärmeübergang Leiter – Kühlmittel bestimmt [19]; der Platzbedarf für eine TL-Spule entspricht somit weitgehend demjenigen einer entsprechenden NL-Wicklung.

Eine enorme Bedeutung kommt der Abstützung der magnetischen Kräfte und der Wahl der Konstruktionswerkstoffe [20] zu. Die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe wie E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit usw. ändern zum Teil bei tiefen Temperaturen stark gegenüber Raumtemperatur. Manche Werkstoffe, wie z. B. ferritische Stähle, werden bei tiefen Temperaturen spröde und andere, wie z. B. austenitische Stähle, sowie Kupfer, Nickel, Aluminium und verschiedene Legierungen, verbessern ihre mechanische Festigkeit wesentlich (z. B. beträgt die Streckgrenze von Kupfer 27 kp/mm² bei 300 °K und 50 kp/mm² bei 4 °K; diejenige von Aluminium 12 kp/mm² bei 300 °K und 50 kp/mm² bei 4 °K).

Für die Werte der mechanischen Festigkeit sämtlicher interessierender Baustoffe bestehen in Kältetechnik-Werkstoffhandbüchern umfangreiche Unterlagen, so dass sich weitere Ausführungen darüber an dieser Stelle erübrigen.

2.2.4 Spulenherstellung

Primäre Anforderung für die Herstellung von TL-Spulen ist peinliche Sauberkeit in allen Stadien der Fabrikation, damit nicht das Leitermaterial während der Herstellung der Spulen kontaminiert wird. Es besteht nämlich die Gefahr, dass Verunreinigungen in die Leiter hineindiffundieren und durch Einbau in die Kristallgitter widerstandserhöhend wirken, speziell wenn zum Abbau der Kaltverformungseffekte die Spule nach dem Wickeln thermisch behandelt werden muss. Leider bestehen über diesen Mechanismus recht wenig Unterlagen; es ist auch möglich, dass ins Leiterinnere diffundierte Verunreinigungen sich bloss querschnittsvermindernd auswirken. Auch die Technologie der Leiterverbindungen ist noch wenig erforscht. Bei Aluminium besteht hier prinzipiell die Möglichkeit, mittels einfachem Kaltpreßschweissen widerstandsarme Leiterverbindungen herzustellen.

Im übrigen ist die Technik des Wickelns, Isolierens und allenfalls des Imprägnierens von TL-Spulen weitgehend analog zu jener bei NL-Spulen, wobei für die letztere Prozedur genügend Kunstharzformulierungen bekannt sind, die sich für die Verwendung bei tiefen Temperaturen eignen.

2.3 Kühlung und Zubehör

Die von der Kältemaschine für den stationären Betrieb von tiefgekühlten Spulen aufzubringende Leistung ist die Summe der folgenden Einzelanteile:

a) Ohmsche Verluste der TL-Wicklung;
b) Ohmsche Verluste in den elektrischen Zuführungen und Verbindungen;
c) Wärmeeinströmung durch die Stromzuführungen und Abstützungen;
d) Wärmeeinströmung in den Cryostat von aussen infolge nichtidealer Isolation;
e) Verluste durch Reibung des Kühlstromes,

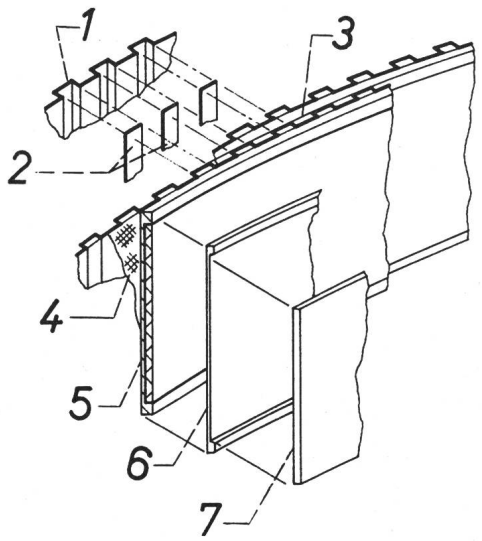


Fig. 1
Aufbau einer tiefgekühlten Aluminium-Spule
Achsial gekühlte, von *Laurence* [26] für die NASA gebaute Spule. Spulenaufbau: 0,08 mm dickes Wellenleiter-Band (*1*) hält die Distanzstreifen (*2*) aus rostfreiem Stahl zur Bildung der Kühlkanäle (*3*) mit Fiberglas-Band (*4*) als Isolation zur Spulenwindung (*5*), die aus dem rostfreien U-Stahlprofil (*6*) als Windungsträger mit mittels aushärtbarem Kunststoff daraufgeklebten Aluminiumleiterbändern (*7*) bestehen. Mit Spulen solchen Aufbaus und einem Flüssigneon-Kühlkreislauf wurden stationäre Felder von 20 T bei 11,2 cm freier Bohrung und 8 T bei 29,2 cm freier Bohrung erreicht

wobei im allgemeinen bei entsprechend sorgfältiger Konstruktion sämtliche übrigen Anteile gegen die Stromwärmeverluste RI^2 vernachlässigbar klein sind.

Bei den für grosse Magnete relativ hohen Leistungen (z. B. 10 kW, 20 °K für einen TL-Blasenkammermagnet nach Fig. 5 bei einem Zentrumsfeld von 2,5 T) ist für ein TL-Magnetsystem die Kälteanlage in den meisten Fällen die kostenmässig (und auch bezüglich Platzbedarf) weitaus dominierende Komponente, während es für ein NL-Magnetsystem die Speisung, d. h. die kapitalisierten Stromkosten (für obiges Beispiel Leistungsaufnahme rund 5 MW) und beim SL-Magnetsystem die Wicklung ist.

2.3.1 Kühlmittel

Gemäss 2.2.1 beträgt die optimale Betriebstemperatur für Aluminium 17 °K und für Natrium 8...10 °K. Als Kühlmittel kommen deshalb gemäss Tab. II gasförmiges Helium und flüssiger Wasserstoff in Frage, eventuell auch flüssiges Neon, während flüssiger Stickstoff gelegentlich zum Abkühlen von kleinen Pulsspulen verwendet wird.

Einige Eigenschaften der für TL-Magnete verwendbaren Kühlmittel

Tabelle II

Kühlmitteleigenschaften		He^4	H_2	Ne	N_2
Siedepunkt bei 1 at	°K	4,2	20,4	27,2	77,4
Flüssig verwendet		(+)	+	+	(+)
Gasförmig verwendet		+	(+)	—	—
Verdampfungswärme	Wh/l	0,72	8,8	29	45

Flüssiges Helium hat den Nachteil einer kleinen Verdampfungswärme, und bei Wasserstoff verlangt die Explosionsgefahr besondere Sicherheitsmassnahmen. Neon hat den Vorteil einer hohen Verdampfungswärme, ist inert und industriell in vernünftigen Mengen erhältlich. Allerdings ist es sehr teuer (z. B. 250 Fr./l, d. h. ein Mehrfaches von z. B. 40 Fr./l für Helium), da es nur in der Luft mit etwa 0,002 % Volumenanteil vorkommt.

2.3.2 Cryostaten und Zubehör

Cryostaten für TL-Magnete sind im Prinzip vereinfachte Ausführungen jener, die für SL-Magnete verwendet werden.

a) Bauformen. Was die Bauformen betrifft, sei deshalb auf die entsprechenden Ausführungen unter 3.3.2 verwiesen. Allerdings wird bei TL-Cryostaten im Gegensatz zu SL-Cryostaten die Isolation mit flüssigem Stickstoff meistens weggelassen, da im Normalfall die Wärmeeinströmung gegenüber den Ohmschen Verlusten der Spule völlig vernachlässigbar ist. Moderne Superisolationen [21], wie sie seit etwa 1960 industriell in grösserem Maßstab verwendet werden, ergeben nämlich bei einer Dicke von z. B. 50 mm Wärmeeinströmungen von nur etwa 0,05 W/m² bei 20 °K.

b) Stromzuführungen. Auch die Stromzuführungen stellen als Pfade für Wärmeeinströmung keine ernsthaften Probleme dar. Die einströmende Wärme nimmt mit abnehmendem Querschnitt der Zuführungen ab; die in den Zuführungen produzierte Joulesche Wärme nimmt hingegen zu. Das dazwischenliegende Optimum kann nach *McFee* für Kupfer und nach *Mallon* für Aluminium und Natrium berechnet werden [22]. Solcherart optimierte Zuführungen produzieren «ungekühlt» totale Verluste (Stromwärme und Einströmung) von etwa 0,04 W/A und mit flüssigem Stickstoff gekühlt nur noch 0,01 W/A, d. h. zwei gute 10-kA-Zuführungen ergeben Verluste von rund 200 W, was bei grösseren Magneten gegen das RI^2 der Spulen selbst vernachlässigbar ist.

c) Zubehör. Bei mit flüssigem Wasserstoff gekühlten TL-Magneten sind grosse Mengen dieses Mediums bei hohen

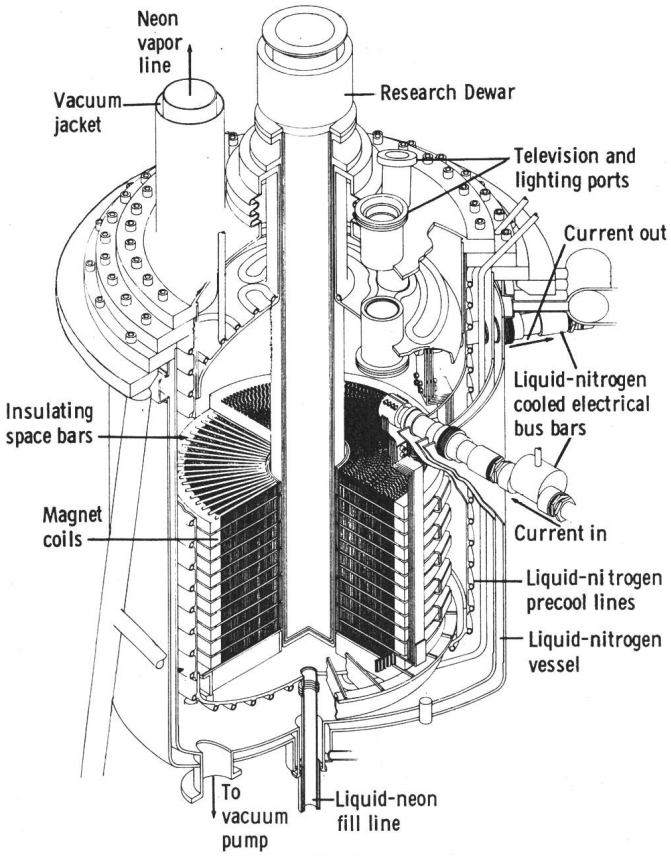


Fig. 2
Darstellung des Magnettanks mit NASA-Solenoid [26]
Die bezeichneten Teile sind im Uhrzeigersinn: Der Dewar-Einsatz, die Stutzen für TV-Überwachung und Innenbeleuchtung, die LN_2-gekühlten Stromanschlüsse, die Vorkühlrohrschlangen (LN_2), der LN_2-Tank, die Anschlüsse für LNe und Vakuumpumpe, die Magnetspulen, die radialen Isolationszwischenlagen und der vakuumisolierte Neongas-Austrittsstutzen (Zeichnung NASA)

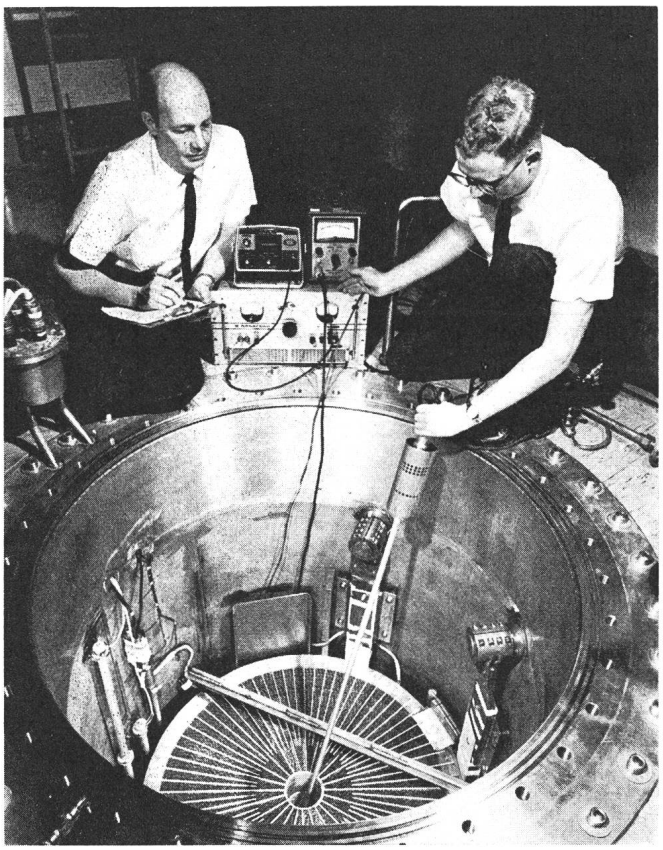


Photo NASA

Fig. 3
NASA-Solenoid 11,2 cm, 20 T [26]
Magnettank geöffnet nach Betrieb mit maximaler Leistung (Feld 20 ± 0,1 T). Stromanschlüsse, LNe-Niveauanzeiger, Isolationsstreifen-Spulenzwischenlagen sind sichtbar. Der 20-T-Solenoid hat rund 90 Windungen pro Spulenlage

Durchflussraten im Kontakt mit stromführenden Leitern. Zur Sicherung gegen Unfälle sind deshalb multiple Sicherheitsvorrichtungen wie Filter, Drucküberwachung, Leckabdichtung, Sicherheitsexpansion usw. notwendig.

2.4 Speisung von TL-Magneten

Die für die Speisung von TL-Magneten verwendeten Geräte unterscheiden sich kaum von jenen der NL-Magnete [23; 24]. Mit Rücksicht auf die naturgemäss hohen bis sehr hohen Ströme bei extrem kleinen Spannungen sind aber zwei Speisungsvarianten noch zu erwähnen:

a) Unipolargeneratoren [25] mit z. B. 20000 A bei 5 V Spannung. Sie haben den Vorteil sehr kleiner Stromwelligkeit (hohe Drehzahlen, z. B. 6000 U./min) von z. B. $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ und praktisch beliebig hoher Ströme, während diese bei konventionellen Gleichstromgeneratoren auf etwa 10 kA pro Kollektor begrenzt sind.

b) Alternativ ist ein «*Kalter Gleichrichter*» vorgeschlagen worden als Kombination von teilweise kaltem Transformator mit kalter Gleichrichtung innerhalb des Cryostats, nachdem festgestellt worden war, dass einige kommerzielle Halbleitergleichrichter in flüssigem Stickstoff mit bis zum Zehnfachen ihres Nennstroms belastet werden können.

2.5 Anwendungen, Beispiele, Zukunftsaussichten

2.5.1 Anwendungsgebiete

Ausser einer Vielzahl von kleinen Pulsspulen und einigen wenigen Hochfeldsolenoiden mit bescheidenem Feldvolumen sind bis heute keine TL-Magnete gebaut worden. Die Anwendung der TL-Technik für die Herstellung von stationären kleinvolumigen Magnetfeldern bis hinauf zu 20 T ist angesichts der neueren Ergebnisse auf dem Gebiet der Hochfeldsupraleiter uninteressant geworden; weiterhin bleibt auch das Feld der schnell gepulsten Magnete mit höheren Feldern der NL-Technik vorbehalten. Als mögliche Anwendungsgebiete für die TL-Technik lassen sich dann vorsehen:

a) Langsam gepulste Magnete zur Produktion von kurzzeitigen mittleren und hohen Feldern mit kleinem und grösserem Feldvolumen. Durch die Herabsetzung des Spulenwiderstandes wird die Zeitkonstante sowie die Stromamplitude erhöht. Meist findet während der Pulsdauer kein nennenswerter Wärmeübergang zum Kühlmedium statt, sondern die tiefgekühlte Spule nimmt vermöge ihrer Wärmekapazität die Pulsleistung auf, erwärmt sich und wird in der Pause zwischen zwei Pulsen wieder auf die Ausgangstemperatur rückgekühlt. Für diese Betriebsart haben TL-Magnete gegenüber NL-Magneten enorme Vorteile, weil der sonst die Anwendung einschränkende Nachteil einer grossen und teuren Kälteanlage entfällt — sofern nur die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen genügend lang ist.

b) Magnete mit kleinem Belastungszyklus, nämlich solche, die mit kleiner Kälteleistung während vergleichsweise langer Zeit abgekühlt werden, um dann während bedeutend kürzerer Zeit bei verdampfender Kühlflüssigkeit ein hohes stationäres Feld zu liefern, so dass auch hier der unter a) genannte Vorteil bezüglich Kälteanlage zutrifft.

c) Grossmagnete mit stationärem Feld, nämlich Magnete, die infolge grossen Feldvolumens bei mittleren und höheren Feldern in NL-Ausführung prohibitiv hohe Speiseleistungen erfordern. Dies ist speziell der Fall bei Blasenkammermagneten, MHD-Magneten und sehr grossen Experimentiermagneten.

2.5.2 Anwendungsbeispiele

Die Fig. 1 bis 5 zeigen zwei Anwendungsbeispiele für TL-Magnete, nämlich einen Hochfeldsolenoid (ausgeführt) und einen Blasenkammermagnet mittlerer Grösse (Projekt).

a) Hochfeldsolenoid. Fig. 1 zeigt die Einzelheiten des Spulenaufbaus von zwei Hochfeldsolenoiden für stationäre Felder von 8 bzw. 20 T, die am Lewis Research Center (Cleveland, Ohio) der NASA gebaut wurden [26] und deren Haupt-

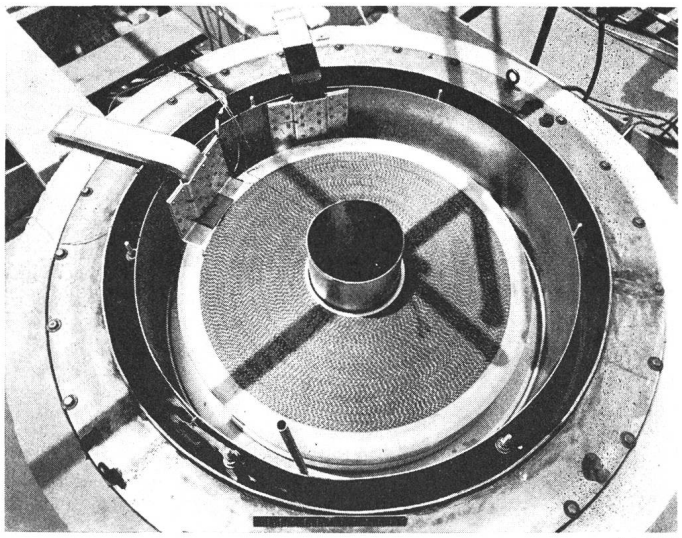


Photo NASA

Fig. 4
NASA-Solenoid 29,2 cm, 8 T [26]
Ansicht eines in ein Versuchsdewar eingebauten Spulenpaars, aus welcher die Art der Teilspulen-Stromanschlüsse zu ersehen ist. Der 8-T-Solenoid hat rund 75 Windungen pro Spulenlage

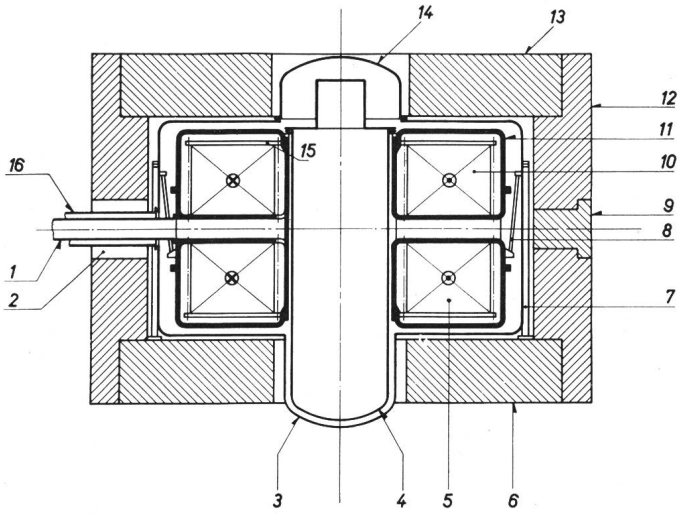


Fig. 5
Tiefgekühlter Aluminium-Blasenkammermagnet (Projekt MFO)
Magnetfeld 4 T, Strom 6975 A, Spannung 4 V, Stromdichte 7,75 A/mm², Leistung 27,8 kW, Gesamtleistung der Heliumgas-Kälteanlage 29,5 kW, Leiterquerschnitt 32 mm × 32 mm mit Kühllochdurchmesser 12 mm
1 Heliumzuführung; *2* Öffnungen für Durchführungen und Strahleinschuss; *3* Vakuumkammer zur Wärmeisolation; *4* Blasenkammergehäuse; *5* untere Spule; *6* untere Polplatte; *7* Stützen; *8* Aufhängung für das Spulengehäuse; *9* Füllstücke im seitlichen Rückschlussjoch der Strahleintrittsseite; *10* obere Spule; *11* Druckfestes Spulengehäuse; *12* Seitenjoch; *13* obere Polplatte; *14* Vakuumbehälter; *15* Spulenpressung; *16* Vakuumrohr

daten Tabelle III angibt. Der Bandleiter der aus Scheibenspulen mit achsialer Kühlung zusammengesetzten Solenoide besteht aus 99,9983 % reinem Aluminium und ist auf ein Stahlträgerband geklebt, wobei die Kühlkanäle durch den mitgewickelten, rechteckwellblechartigen Stahlstreifen gebildet werden, so dass ein Querschnittsfüllfaktor von ca. 0,4 resultiert. Die Spulen werden in geschlossenem Kreislauf mit flüssigem Neon gekühlt. Allerdings reicht die vorhandene Kälteleistung (10 MJ in Form von LNe) für einen Dauerbetrieb bei höheren Feldern bei weitem nicht aus, so dass man das Neon wegsieden lassen muss. Da die Wiederverflüssigung 20 h dauert, ist nur ein Belastungszyklus pro Tag möglich.

Die hauptsächlichsten Daten der beiden Hochfeldsolenoide sind in Tabelle III zusammengestellt.

In der Fig. 2 ist der gesamte Magnettank dargestellt, während aus den Fig. 3 bzw. 4 der Aufbau der 20-T-Spule bzw. der 8-T-Spule ersichtlich ist.

b) Blasenkammermagnet. Der auf der Fig. 5 dargestellte TL-Blasenkammermagnet hat ein Zentrumsfeld von 4 T bei einem Kammernutzraum von 1 m Durchmesser und entsprechender Höhe. Der Eisenkörper hat einen Durchmesser von 5,2 m und eine Höhe von 3,6 m und wiegt rund 325 t. Für Spulengehäuse und Abstützungen ergibt sich ein Gewicht von ca. 17 t und für die Spule selbst von rund 20 t, so dass der ganze Magnet etwa 360 t wiegt.

Die Spulen bestehen aus Reinstaluminium (Superraffinal)-Hohlleitern mit dem Leiterquerschnitt 32 mm × 32 mm und einem Kühllochdurchmesser von 12 mm. Die Kühlung erfolgt mit gasförmigem Helium bei 20 °K in geschlossenem Kreislauf. Jede Halbspule hat einen Innendurchmesser von 1,3 m, einen Aussendurchmesser von 3,1 m und eine Höhe von 0,72 m; der gegenseitige Abstand beträgt 0,28 m. Die Spulen werden in Serie mit einem Strom von 6975 A erregt, die Magnetspannung beträgt dann 4 V und die Leistung 27,8 kW, entsprechend einer Leiterstromdichte von 7,75 A/mm².

Wärmeeinströmung und Verluste verschiedener Art erhöhen die von der Kältemaschine aufzubringende Kühlleistung auf 29,5 kW. Die gesamte Kälteanlage ist wesentlich grösser als der Magnet, so dass für Magnet mit Kältemaschine eine resultierende Bodenfläche von 17 m × 8 m bei einer maximalen Höhe von 7,5 m benötigt wird.

Daten von zwei mit flüssigem Neon gekühlten TL-Hochfeldsolenoiden der NASA (USA)

Tabelle III

			Solenoid 8	Solenoid 20
Freie Bohrung Durchmesser	d_0	cm	29,2	11,2
Anzahl Spulen	n		6	8
Spulen-Innendurchmesser	d_1	cm	30,5	13
Spulen-Aussendurchmesser	d_2	cm	94	94
Spulenlänge	l	cm	40	52
Magnetfeld	B	T	8,0	19,9
Strom	I	kA	10	30,4
Spannung	$U = RI$	V	22,9	34,3
Leistung	$P = RI^2$	kW	229	1042
Feldenergie	$\frac{L}{2} I^2$	MJ	3,6	9,4

2.5.3 Zukunftsaussichten

Obwohl bis heute kein grösseres TL-Magnetprojekt zur industriellen Ausführung gediehen ist, sind die Probleme der TL-Magnettechnik theoretisch und experimentell soweit untersucht, dass deren Anwendung keine prinzipiellen Schwierigkeiten mehr bieten sollte. Auch in Zukunft wird einerseits die TL-Technik für Pulsmagnete zur Anwendung kommen, wenn auch nur für mittlere und langsam gepulste Felder, vornehmlich in mittleren und grösseren Feldvolumina — sowie auch für Magnete mit kleinem Belastungszyklus bei intermittierendem Betrieb. Anderseits erscheint im Lichte der neueren Entwicklungen auf dem SL-Gebiet die Zukunft der tiefgekühlten Magnete unsicher und schwierig vorauszusagen. Ziemlich sicher wird diese Technik auf Einzelfälle von grossvolumigen Magnetfeldern beschränkt bleiben, wo durch eine Begrenzung irgendwelcher Art die Anwendung von Supraleitern nicht sinnvoll oder unökonomisch erscheint.

Es hängt weitgehend von den in nächster Zukunft auf dem Gebiet der Hochfeldsupraleiter zu erwartenden Fortschritten ab, ob je eine wirklich grosse TL-Magnet-Installation gebaut wird.

3. Elektromagnete mit Supraleitern

Schon bald nach der Entdeckung der Hochfeld-Supraleiter im Jahre 1961 stellte man beim Betrieb der ersten kleinen Solenoide [27; 28; 29] fest, dass die Stromtragfähigkeit eines SL-Drahts in einer Spule beträchtlich kleiner war als der an kurzen Drahtproben ermittelte Wert [30]. In der Folge fand man eine ganze Anzahl weiterer Effekte [31] und begann nach Mitteln zum Verhindern bzw. Reduzieren dieser die Herstellung grösserer SL-Spulen in Frage stellenden, wenn nicht gar verunmöglichenden Applikationseffekte zu suchen. Die verschiedenen daraufhin entwickelten Konstruktionsprinzipien [32; 33] sind alle dadurch charakterisiert, dass man NL-Material (bis heute ausschliesslich Kupfer) mit einem Mehrfachen des Querschnitts des SL-Drahts zu diesem parallel führt und einen möglichst engen elektrischen und thermischen Kontakt zwischen NL (d. h. eigentlich TL) und SL herstellt. Sorgt man zusätzlich für ausreichende Kühlung an jeder Stelle der Spule, erhält man sog. stabilisierte SL-Magnete, d. h. solche, bei

denen die vorgenannten Applikationseffekte grösstenteils unschädlich gemacht sind und die insbesondere keinen abrupten, sondern einen fliessenden Übergang vom SL- in den NL-Zustand zeigen.

Wenn auch bis heute noch keine wirklich grossen SL-Magnete gebaut worden sind, so scheinen diese durchaus nicht nur technisch, sondern auch kostenmässig vertretbar [34]. Auch auf dem Gebiet der kleinen Laborsolenoide [35; 36] zeigt sich eine Entwicklung in die Breite und obwohl solche SL-Magnete nur für beschränkte Zwecke [37; 38] verwendet werden, rechnet man beispielsweise in den USA für 1966 mit einem Markt von mindestens $5 \cdot 10^6$ sFr. für diese SL-Magnete und -Magnetsysteme.

Allgemein umfasst ein SL-Magnetsystem neben dem eigentlichen Magnet die Kühlungseinrichtung mit Cryostat, ein Speisegerät und verschiedenes Zubehör. Im Folgenden sollen die einzelnen Systemkomponenten etwas näher betrachtet werden.

3.1 Magnetische Kreise

Soweit bei SL-Magneten überhaupt magnetische Kreise vorgesehen werden, die analoge Funktionen wie bei den NL- und TL-Magneten erfüllen, d. h. welche zur Feldformung und Feldverstärkung dienen und nicht lediglich zur Abschirmung der Streufelder nach aussen, bestehen diese normalerweise aus den gleichen ferromagnetischen Materialien, wie sie auch bei Raumtemperatur (RT) verwendet werden, d. h. insbesondere aus Magnetstahl. Bis anhin sind so verschiedene SL-Magnete mit RT-Ferromagnetika entworfen oder gebaut worden [39; 40; 41; 42].

3.1.1 RT-Ferromagnetika

Bei kleinen Magneten befindet sich das Eisen selbst im flüssigen Helium, während bei grösseren Magneten eine solche Anordnung infolge der grossen abzukühlenden Massen normalerweise kaum denkbar ist.

Zahlreiche Vorteile begleiten die erste Lösung. Legt man den magnetischen Kreis nämlich auf Flüssigheliumtemperatur, so wirkt er als Kältespeicher und hat damit wahrscheinlich eine stabilisierende Wirkung auf den Supraleiter; er reduziert ferner das Magnetfeld am Supraleiter und ebenso die auf diesen wirkenden magnetischen Kräfte; er schirmt das Streufeld ab bzw. begrenzt es, und er leistet schliesslich einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum Luftspaltfeld. Für die Konstruktion ist dabei zu berücksichtigen, dass beim Magnetstahl die mechanische Festigkeit bei Heliumtemperatur schlecht ist (bei 4 °K etwa 2...5 % von jener bei RT) und dass die $B(H)$-Kurve insofern und ziemlich stark verzerrt wird, als die Permeabilitäten bei kleinen Feldern abnehmen, die Sättigungsflussdichte hingegen etwas (ca. 6 %) ansteigt [43].

Für die Anwendung bei Tieftemperaturen (TT) und insbesondere im Flüssighelium bieten sich neuerdings als potentielle Konkurrenten des Eisens die teilweise erst kürzlich entdeckten TT-Ferromagnetika an.

3.1.2 TT-Ferromagnetika

TT-Ferromagnetika sind vor allem seltene Erden und deren Verbindungen, wie z. B. Dysprosium und Holmium oder etwa Europiumoxyd. Dysprosium und Holmium sind unterhalb 85 bzw. 20 °K ferromagnetisch und haben Sättigungsmagnetisierungen von ca. 3,9 T, d. h. nahezu doppelt soviel wie Fe bei RT [29]. Allerdings sind diese Elemente magnetisch sehr hart. Europiumoxyd hat eine Sättigungsmagnetisierung von ca. 2,40 T bei 4 °K (Fe hat 2,17 T bei RT), ist ferromagnetisch unterhalb der Curie-Temperatur von 77 °K, hat eine Dichte von 8,25 kg/dm³, ist dielektrisch, hat eine fast vernachlässigbare Hysterese und einen spezifischen Widerstand von $10^7 ... 10^8$ Ωm, d. h. ist ein ferromagnetischer Isolator [44].

Die angeführten Materialien sind vorerst technisch kaum verwendbar und noch sehr teuer, doch dürften sich dank ihrer interessanten Eigenschaften in naher Zukunft entsprechende Anwendungen [45] ergeben, allerdings wohl nur für kleine und kleinste SL-Magnete.

3.2 Spulen für SL-Magnete

SL-Magnete sind für Wechselstromanwendungen und auch für Pulsbetrieb infolge der beträchtlichen Hystereseverluste zumindest heute noch gänzlich uninteressant, d. h. bis auf weiteres beschränkt sich die Verwendung von Supraleitern auf Magnete mit stationären Feldern. Für dieses Gebiet sind bereits SL-Spulen mit Feldern von etwa 7 T in Volumina von einigen dm³ und solche von bis zu 14 T in Volumina von einigen cm³ gebaut und mit Erfolg betrieben worden.

Bei den ersten Anwendungen von Hochfeldsupraleitern [46; 47] in den letzten Jahren hat man nach und nach eine ganze Reihe von teilweise unerklärlichen Applikationseffekten gefunden, welche die Verwendung von solchen Materialien für den Bau technisch verwendbarer SL-Magnete drastisch zu begrenzen schienen, nämlich:

a) Trainings-Effekt, d. h. eine Spule erreicht erst nach mehrmaligem Erregen nach und nach ihren maximalen kritischen Strom;

b) Degradations-Effekt oder Längen-Effekt («short-sample-effect»), d. i. die starke Abnahme der Stromtragfähigkeit eines SL-Materials in einer Spule gegenüber der an kurzen Drahtproben gemessenen, insbesondere auch bei kleineren Magnetfeldern;

c) Stromanstiegs-Effekt, d. h. das kritische Feld bzw. der kritische Strom einer Spule ist von der Stromanstiegsgeschwindigkeit abhängig;

d) Verschiedene Form-Effekte und Grössen-Effekte, wie den (unechten) «proximity-effect» (kritischer Strom von der Packungsdichte der Leiter abhängig), den «split-coil-effect» (kritischer Strom für koaxiales Spulenpaar kleiner als für jede Spule separat), den «coil-size-effect» (kritischer Strom für grosse Spulen kleiner als für kleine Spulen aus demselben Material), u. a. m.;

e) Instabilitäts-Effekt, nämlich dass eine im SL-Zustand bei Strömen unterhalb des kritischen Stromes stationär betriebene Spule plötzlich in den NL-Zustand kippte.

Es war deshalb von primärer Wichtigkeit, eine SL-Spule zu «stabilisieren», d. h. sie so zu konstruieren, dass sie mit einem Teil des Leiters im NL-Zustand betrieben werden kann, ohne dass sich die NL-Region von selbst ausbreitet [48]. Dies erreichte man durch das schon erwähnte Parallelschalten von NL-Material und durch gleichzeitige intensive Kühlung der ganzen Spule. Eine solche Spule [49] zeigt beim Erhöhen des Erregerstroms über den kritischen Wert hinaus einen gradualen und reversiblen Übergang vom SL- in den NL-Zustand und kehrt nach einer Störung wieder in den SL-Zustand zurück — wobei solche Störungen sowohl interner (Flußsprünge) wie auch externer (Vibrationen, rasche Änderungen des Aussenfelds, kurzzeitiges Überschreiten des kritischen Stroms) Natur sein können, und schliesslich ist eine so stabilisierte SL-Spule auch weitgehend frei von Applikationseffekten irgendwelcher Art.

Wie aus den obigen Darlegungen unschwer zu entnehmen ist, hat diese Stabilisierung einer SL-Spule mittels grosser Mengen normalleitenden Materials zwei hauptsächliche Funktionen. Das NL-Material wirkt nämlich vermöge seiner Wärmekapazität erstens als thermischer Puffer (Kältespeicher) und bewirkt so die Wiederabkühlung auf unterkritische Temperatur an einer z. B. durch Flußsprünge aufgeheizten Stelle, und zweitens übernimmt es als elektrischer Nebenschluss temporär die Stromleitung an allen jenen Stellen, wo der Supraleiter aus irgend einem Grunde normalleitend geworden ist.

3.2.1 Supraleiter für SL-Spulen

Supraleiter für die Herstellung von SL-Spulen werden sowohl als SL-Einzelleiter (Drähte und Bänder) wie auch als eigentliche SL-Kabel und als Mischkabel (stabilisierte SL) in verschiedenster Ausführung verwendet. Von den unzähligen heute bekannten supraleitenden Elementen, Verbindungen, Legierungen und Mischungen [50] sind jedoch nur sehr wenige technisch interessant.

a) SL-Einzelleiter. Supraleitende Materialien mit hoher Stromtragfähigkeit I_c, hohem kritischen Feld H_c und brauchbarer kritischer Temperatur T_c existieren in zwei Varianten, nämlich:

I. Intermetallische Verbindungen, wie z. B. Nb_3Sn, V_3Ga, V_3Si, Nb_3Al. Sie sind meistens spröde, haben jedoch höhere H_c und T_c als die SL unter II.

II. Legierungen wie z. B. NbZr, NbTi u. a. m., welche hingegen mechanisch ziemlich zäh sind.

Fast ausschliesslich verwendet werden technisch Drähte aus $Nb_{75}Zr_{25}$ [51; 52] und $Nb_{67}Zr_{33}$ (kritisches Feld etwa 7 T) sowie NbTi (seltener, kritisches Feld rund 12 T, d. h. $H_c \approx 10$ MA/m) -Drähte [53] oder Bänder aus Nb_3Sn [54] (kritisches Feld über 20 T). In Fig. 6 sind als Beispiele Querschnitte von zwei solchen Einzelleitern in den hauptsächlichst verwendeten Abmessungen im gleichen Maßstab aufgezeichnet, während in Fig. 7 die $I(H)$-Kurven für verschiedene SL-Einzelleiter zusammengestellt sind.

b) SL-Kabel. Verschiedene unstabilisierte und stabilisierte SL-Kabel sind bis heute zum Bau von SL-Spulen verwendet worden, doch haben nur die stabilisierten Kabel technische Bedeutung erlangt, weil bis zum heutigen Zeitpunkt sie allein die Herstellung grösserer SL-Magnete erlauben.

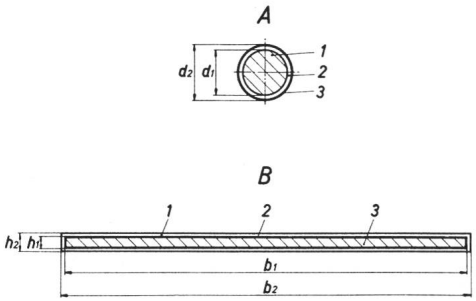


Fig. 6
SL-Einzelleiter-Varianten

A $Nb_{75}Zr_{25}$-Draht (bzw. $Nb_{67}Zr_{33}$) mit Kupferplattierung (Supercon)
1 NbZr mit Durchmesser d_1 = 0,254 mm (0,010″); *2* Cu-Plattierung; *3* Nylon- bzw. Teflonisolation; d_2 Gesamtdurchmesser 0,305 mm (0,012″)
B NB_3Sn-Band (RCA)
3 Band aus rostfreiem Stahl mit einer dünnen Schicht Nb_3Sn (*2*) und gleicher Schichtdicke Silberplattierung (*1*), mit h_1 = 0,046 mm, h_2 = 0,061 mm, b_1 = 2,235 mm und b_2 = 2,243 mm

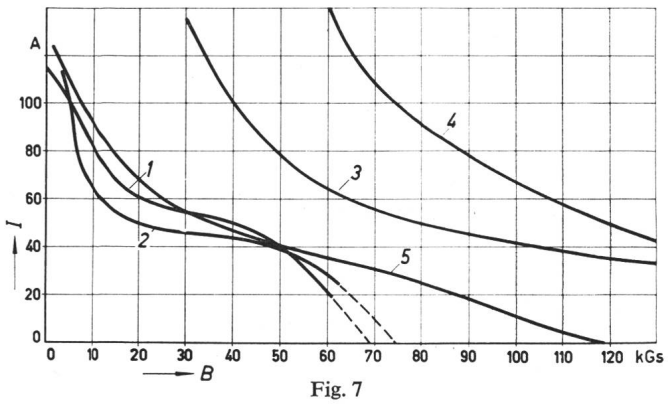


Fig. 7
$I_c(H_c)$-Kurven für SL-Einzelleiter

Strom-Feld-Belastungskurven verschiedener nichtstabilisierter Supraleiter für kleinere bis mittelgrosse Spulen
1 $Nb_{75}Zr_{25}$-Draht; *2* $Nb_{67}Zr_{33}$-Draht; *3, 4* Nb_3Sn-Band; *5* NbTi-Draht
Für den NbZr-Draht nach Kurve *1* kann durch Wärmebehandlung (600 °C, einige Minuten, Argon-Atmosphäre) die Stromtragfähigkeit bei allen Feldern unterhalb 4T etwa verdoppelt werden

Für die Herstellung eines stabilisierten SL-Kabels sind die Auswahl und Form des SL-Materials, die thermischen und elektrischen sowie mechanischen Eigenschaften des stabilisierenden NL-Materials und schliesslich die Art und Methode der Verbindung zwischen NL- und SL-Material von Bedeutung. Bis heute ist für die Herstellung von stabilisierten SL-Kabeln fast ausschliesslich der auch für die Fabrikation kleiner SL-Spulen meistverbreitete $Nb_{75}Zr_{25}$-Draht und Kupfer als NL-Material verwendet worden, seltener wurde jedoch auch mit NbTi-Kabeln [55] experimentiert. Prinzipiell ist jedoch diese Technik nicht auf Drähte beschränkt, und es könnten ohne weiteres stabilisierte SL-Kabel unter Verwendung von z. B. Nb_3Sn-Bändern hergestellt werden.

Bezüglich der Herstellungsart kann man verschiedene Varianten von SL-Kabeln unterscheiden, nämlich:

I. Mit NL-Drähten verseilte SL-Drähte (z. B. Fig. 8A...D).
Diese Technik ist hauptsächlich von *Laverick* [49] verwendet worden. Praktische Vorteile von solchen Kabeln mit einer grösseren Anzahl SL-Drähte sind:
— grosse Flexibilität der Anwendung mit gleichbleibendem Ausgangsmaterial,
— kleine Änderung der Stromtragfähigkeit der Spule bei Fehlern in einem Teil eines Einzeldrahts,
— kleine Windungszahl pro Spule, deshalb wenig SL-SL-Kontakte, kleine Herstellungszeit, kleine Induktivität,
— mechanisch widerstandsfähig (z. B. durch Mitverseilen von Stahldrähten),
— kühlungsmässig vorteilhaft (relativ grosse wirksame Kühloberfläche)
Herstellungsmässig in diese Kategorie fallen auch unstabilisierte verseilte SL-Kabel [56] (keine mitverseilten NL-Drähte).

II. Mit NL-Material umhüllte SL-Einzelleiter, (z. B. Fig. 8F).
Diese Technik ist ebenfalls sehr flexibel und weist die meisten Vorteile der Variante I auf, ist leicht auch für SL-Bänder (z. B. Nb_3Sn gemäss Fig 6B) verwendbar und ergibt zudem einen beseren Kontakt zwischen NL- und SL-Material, ist aber in der Herstellung bedeutend teurer.

III. NL-Profilleiter mit eingebetteten SL-Einzelleitern (z. B. Fig. 8E).
Diese Technik weist ebenfalls eine Anzahl der Vorteile der Variante I auf und gibt Spulen von hoher mechanischer Stabilität, kann aber nicht ohne weiteres auch für SL-Bänder verwendet werden und hat zudem — beschränkt ist dies auch bei Variante II der Fall — eine ausgesprochene Biege-Vorzugsrichtung, was die Herstellung von dreidimensionalen Spulen u. U. beträchtlich erschwert.

Bei einem gegebenen Kabeltyp wächst, stark vereinfacht betrachtet, die stabilisierende Wirkung des NL-Materials mit dessen Querschnitt. Die SL-Füllfaktoren werden deshalb für vollstabilisierte Kabel sehr klein und betragen z. B. rund 3 % für Variante III und rund 7 % für Variante I. Deshalb rechnet man unter Berücksichtigung der zahlreichen notwendigen Kühlkanäle für grosse SL-Spulen aus solchen Kabeln (NbZr) für Felder von 2...4 T mit praktischen mittleren Nettostromdichten von $J_{med} = 40...80$ A/mm², womit der untere Grenzwert sich etwa an die höchsten in NL-Strahltransportmagneten verwendeten Stromdichten anschliesst.

Fig. 9 zeigt, wie etwa die $U(I)$- bzw. $U(B)$-Kennlinie einer stabilisierten SL-Kabelspule aussehen kann. Der an einem bestimmten Punkt erfolgende Übergang vom SL- in den NL-Zustand ist kontinuierlich, reproduzierbar, reversibel und völlig hysteresefrei.

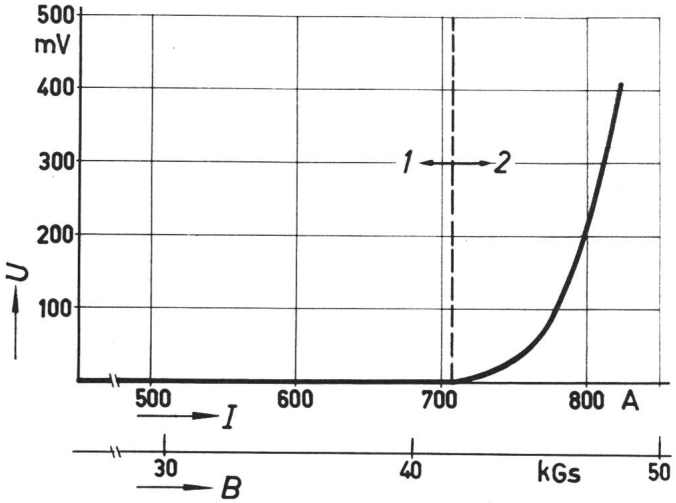


Fig. 9
$U(I)$-Kennlinie einer vollstabilisierten Kabelspule
Gemessene Kurve für eine Spule mit 13 cm Bohrung und 33 cm Länge aus SL-Kabel nach Fig. 8E. Der Übergang zwischen dem voll supraleitenden Zustand (*1*) und dem partiell supraleitenden Zustand (*2*) erfolgt bei 710 A, genau gleich dem an kurzen Proben gemessenen kritischen Strom bei der entsprechenden Flussdichte von ca. 4,15 T. Die Spule zeigt keine Degradation und kein Training. Das SL-Kabel hat einen Querschnitt von 0,13 cm² mit einem Supraleiter-Querschnitt von $4{,}55 \cdot 10^{-4}$ cm² total (d. h. Füllfaktor 3,5 %) und ein Gewicht von 0,105 kg/m
U Klemmenspannung; *I* Spulenstrom; *B* Magnetfeld im Spulenzentrum

3.2.2 Isolationen

Sämtliche SL-Einzeldrähte sind isoliert. Auch stabilisierte SL-Kabel werden wenigstens teilweise isoliert; hiefür können Kunststoffe verwendet werden, welche auch als Lagenisolationen Anwendung finden.

Die benötigten Isolationsdicken zwischen einzelnen Lagen sind im allgemeinen sehr klein. Beispielsweise genügen bei mittelgrossen Laborsolenoiden Mylar-Folien von 0,05 mm Dicke, um die dort vorkommenden Spannungen von etwa 2 kV/Lage (bei SL-NL-Übergängen) zuverlässig zu halten. Besondere Aufmerksamkeit erheischt aber die Randisolation, z. B. zwischen der SL-Wicklung und den Flanschen des Spulenkörpers sowie jene der Leiterdurchführungen durch metallische Teile, wo je nach Spulengrösse und äusserer Schaltung der Spule Spannungen bis etwa 5 kV und mehr auftreten können.

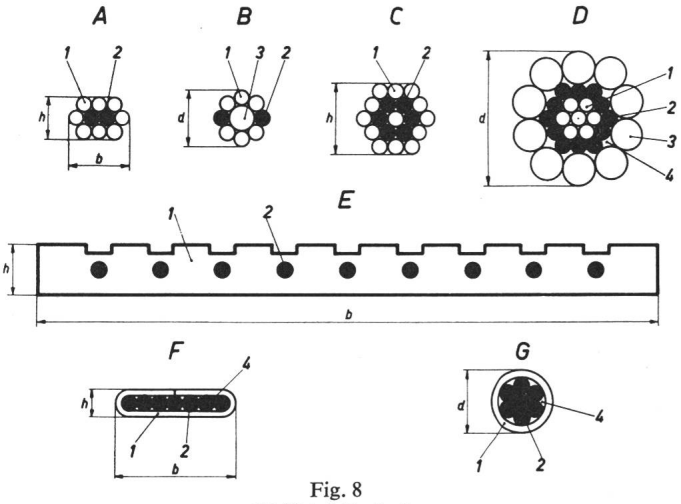


Fig. 8
SL-Kabel-Varianten
A...D mehr oder weniger stabilisierte, mit Indium verlötete supraleitende Kabel von Laverick (Argonne National Laboratory)
A 1 Cu-Draht mit 0,3 mm ϕ; *2* NbZr-Draht mit 0,3 mm ϕ; Breite b = 1,22 mm, Höhe h = 0,84 mm
B *1* Cu-Draht mit 0,3 mm ϕ; *2* NbZr-Draht mit 0,3 mm ϕ; *3* Cu-Draht mit 0,5 mm ϕ; Durchmesser des verseilten Kabels d = 1,12 mm
C *1* Cu-Draht mit 0,3 mm ϕ; *2* NbZr-Draht von 0,3 mm ϕ; Dicke des verseilten Kabels h = 1,36 mm
D *1* Cu-Draht mit 0,3 mm ϕ; *2* NbZr-Draht mit 0,3 mm ϕ; *3* Cu-Draht mit 0,5 mm ϕ; *4* Indium-Füllmasse; Kabeldurchmesser d = 2,39 mm
E vollstabilisiertes «Stekly-Kabel» von Avco-Everett
1 Cu-Band mit Breite b = 12,7 mm und Höhe h = 1,02 mm; *2* neun im Band eingebettete, wärmebehandelte $Nb_{75}Zr_{25}$-Einzelleiter mit 0,3 mm ϕ; Stromtragfähigkeit 2200 A bei 1 T, 1720 A bei 2 T, 1250 A bei 3 T, 780 A bei 4 T, 320 A bei 5 T
F halbstabilisiertes Kabel von MFO, mit Indium verlötet
1 Kupfer-Umhüllung; *2* sieben NbZr-Drähte mit 0,3 mm ϕ; *4* Indium-Füllmasse; Kabelbreite b = 2,54 mm; Kabelhöhe h = 0,56 mm
G nichtstabilisiertes NbZr-Kabel von Laverick, mit Indium verlötet
1 äussere Teflon(Nylon)-Isolation; *2* sieben NbZr-Drähte mit 0,3 mm ϕ, verseilt; *4* Indium-Füllmasse; Kabeldurchmesser d = 1,22 mm

3.2.3 Bauformen von SL-Spulen

Neben den von den NL-Magneten her bekannten Spulenbauformen stellt die Fig. 10 eine Anzahl von bevorzugten Bauformen für SL-Magnete dar.

a) Solenoide und Spulensysteme. Charakteristisch für diese Spulenbauformen (Fig. 10A...C) ist, dass infolge des hohen Preises des SL-Materials diese Spulen auf minimale Leiterlänge optimiert [57] werden, was für gewöhnliche Solenoide (Fig. 10A), endkorrigierte [58] Solenoide (Fig. 10B), Helmholtz-Spulenpaare (Fig. 10C) und beliebige koaxiale Systeme [59] von Zylinder- und Scheiben-Spulen relativ einfach ist [60], da alle diese Spulen rechteckige oder aus rechteckigen Elementen zusammengesetzte Querschnitte haben.

Kleine Solenoide mit Feldern über etwa 5...6 T sowie grössere Solenoide mit Feldern über rund 3 T werden dabei allgemein als konzentrische ineinandergeschobene Zylinderspulen gebaut, wobei bis zu 4 ineinandergeschobene Spulen [55] mit jeweils anderem Leitermaterial verwendet worden sind.

b) Sonderbauformen. Neben den unter *a)* genannten Formen existieren zahlreiche Sonderbauformen [61] von SL-Spulen. Zwei solche, für den Bau von SL-Strahltransportmagneten vorgeschlagen, sind in Fig. 10D...E dargestellt. Es sind dies prinzipiell seit langem bekannte und auch für NL-Magnete schon verwendete Bauformen, die sich aber wegen der gebietsweise homogenen Stromdichte um die kreisförmige Apertur für die SL-Technik besonders eignen, umsomehr als sich so koaxiale zylindrische Anordnungen von Cryostat, Wicklung und Eisen-Aussenschirm erzielen lassen.

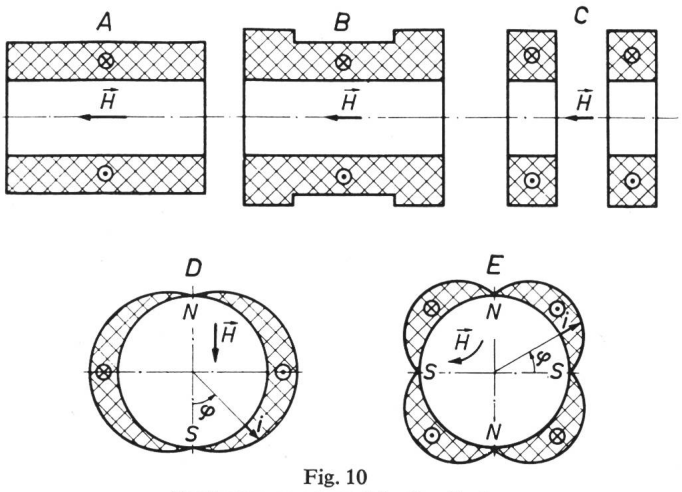


Fig. 10
Bauformen von supraleitenden Spulen

A Solenoid. Normalbauform für gewöhnliche SL-Labormagnete
B endkorrigierte Spule. Labor-Solenoide für Felder hoher Homogenität, z. B. für Kernresonanzmessungen. Bei Solenoiden von sog. 6. Ordnung ist z. B. eine Homogenität von 10^{-7} in 150 mm³ [58] bei 5,8 T erreicht worden
C Helmholtz-Spulenpaar. Charakteristische Bauform für Blasenkommer-Magnete
D Ablenkmagnet mit sinusförmigem Strombelag $i = I_0 \sin \varphi$ für koaxiale Bauform von Strahltransportablenkmagneten. Bei exakter Realisierung des geforderten Strombelages ist theoretisch das Ablenkfeld ideal homogen im ganzen Aperturbereich
E Quadrupol mit sinusförmiger Stromverteilung $i = I_0 \sin 2\varphi$ für koaxiale Bauform von Strahltransport-Vierpollinsen. Bei idealem Strombelag ist theoretisch der Feldgradient im ganzen Kreisquerschnitt konstant

3.2.4 Konstruktion und Herstellung von SL-Spulen

a) Allgemeines. Für die Konstruktion [62] und Herstellung von TL-Magneten und SL-Magneten gibt es zahlreiche gemeinsame Probleme, insbesondere jene der bei der Abkühlung von Raumtemperatur auf Betriebstemperatur entstehenden thermischen Spannungen und Ausdehnungen, sowie jene der im Betrieb auftretenden magnetischen Kräfte und deren Abstützung. Um z. B. eine satt gewickelte, kompakte Drahtspule bei Betriebstemperatur zu erhalten, müssen Material des Spulenkörpers, Art und Anordnung der Lagenisolationen und Wickelzug sorgfältig auf die thermische Ausdehnung des SL-Drahtes abgestimmt werden. Dies erfordert dementsprechend grosse Sorgfalt bei der Fabrikation.

Bei SL-Spulen zur Herstellung sehr homogener Felder (z. B. endkorrigierte Laborsolenoide nach Fig. 10B) müssen weitere Einzelheiten beachtet werden, wie etwa die Feldwelligkeit durch die «Quantelung» der Erregung (endlich grosser Drahtdurchmesser), die Lage der Zuführungen, Verbindungen und Kontakte, die Hysterese der SL-Materialien usw., die jedoch bei entsprechend sorgfältiger Auslegung [63] keine prinzipiellen Schwierigkeiten bieten.

Im Betrieb erfahren die Windungen einer SL-Spule Zugspannungen sowie eine achsiale Kompression. Die Zugspannung wird normalerweise bei kleinen und mittelgrossen Magneten bei den in Frage kommenden Feldern vom Supraleiter ohne weiteres aufgenommen, während die achsiale Kompression eine Verschiebung der Windungen gegeneinander verursachen kann, sofern diese nicht entsprechend fixiert sind. Besonders NbZr-Drähte haben (infolge der intensiven Kaltverformung durch das Herunterziehen bei der Herstellung) eine hohe mechanische Festigkeit, und bei Nb_3Sn-Bändern ist der Stahlträger für die Zugfestigkeit massgebend.

b) Spulenkörper. Die Spulenkörper bestehen wie alle anderen Bauteile an SL-Spulen aus para- oder diamagnetischem Material, insbesondere aus Aluminiumlegierungen (z. B. Anticorodal), rostfreiem Stahl (z. B. üblicher CrNi-Stahl 18/8) und Kupfer [64], welche alle den Vorteil eines tiefen Preises für sich haben. Andere fallweise verwendete Materialien sind Bronzen, Nickel und Nickellegierungen, Messing, Titan und Titanlegierungen sowie in seltenen Ausnahmen auch Isolierstoffe.

Kleine Spulenkörper werden oft aus dem Vollen gedreht, grössere meist aus Rohren und Flanschscheiben mittels Verschrauben, Hartlöten, Schweissen und seltener Aufschrumpfen zusammengesetzt. Zur Verringerung des Gewichtes, Verbesserung der Zugänglichkeit für Kontakte und zur Vergrösserung der Kühlfläche sind die Spulenflansche oft siebartig gelocht.

c) Wickeln. Beim Wickeln von SL-Spulen muss auf satte Drahtspannung (z. B. 2...3 kp für einen 0,25 mm dicken NbZr-Draht) und genaue Fixierung von Windungen und Wicklungsenden sowie von Verbindungen und Kontakten geachtet werden, damit bei Erregung keine Leiterverschiebungen vorkommen, welche wahrscheinlich die Ursache für einzelne Applikationseffekte sind. Weiter muss auf genügend grosse Biegeradien (etwa 20 × Drahtdurchmesser für NbZr-Draht) geachtet werden, und besondere Wichtigkeit kommt schliesslich der Frage der Kontakte zu.

d) Kontakte SL-SL und SL-NL. Solche Kontakte sollen einen möglichst kleinen Widerstand haben und müssen deshalb mit grosser Sorgfalt hergestellt werden. Kontakte SL-SL werden, nach Möglichkeit in Gebieten mit kleinem Magnetfeld, mittels Klemmen oder Punktschweissen und seltener Löten hergestellt, während für SL-NL-Kontakte neben diesen Techniken vielfach Ultraschallöten mit Indium verwendet wird. Solche Verbindungen haben Widerstände bei Betriebsstrom von z. B. $10^{-6}...10^{-11}$ Ω, je nach Güte der Herstellung.

e) Verschiedenes. Zwecks exakter Fixierung der Spule werden SL-Wicklungen gelegentlich mit Epoxydharzen vakuumimprägniert. Dies hat den Nachteil, dass eine Reparatur der Spule nach einem Defekt unmöglich wird. Aus diesem Grunde wurden SL-Spulen auch schon mit plastischen Stoffen (z. B. Silikonfett, Glycerinmasse) gefüllt, die dann bei Flüssigheliumtemperatur in erstarrtem Zustand die gewünschte Fixierung bewirken.

Der Spulenkopf ist ein aus Isolierstoff hergestellter Hohlzylinder, der normalerweise auf einem Flanschende von kleineren SL-Spulen sitzt und die Kontakte sowie die Aufhänge- bzw. Abstützvorrichtungen enthält bzw. trägt, oft aber auch in seinem Innern einen Dauerstromschalter verbirgt.

3.3 Kühlung und Zubehör

Der stabile Betrieb von SL-Spulen aus NbZr-Draht und den übrigen heute kommerziell erhältlichen Supraleitern bei deren maximalen Stromdichten braucht entsprechend gute Kühlung zwecks Reduktion der Wahrscheinlichkeit eines SL-NL-Übergangs und der nachfolgenden Ausbreitung der NL-Region auf die ganze Spule, während stabilisierte SL-Kabelspulen so gut gekühlt sein müssen, dass der Supraleiter selbst dann unterhalb seiner dem bestehenden Strom und Magnetfeld entsprechenden kritischen Temperatur bleibt, wenn der Strom stellenweise oder ganz im stabilisierenden Normalleiter fliesst.

3.3.1 Kühlmittel, Kühlaggregate

Für die Kühlung von SL-Wicklungen aus den heute bekannten Supraleitern kommt ausschliesslich Helium in flüssigem, allenfalls auch gasförmigem Zustand in Frage. Bezüglich der Betriebsart kann man dabei zwei Varianten unterscheiden:

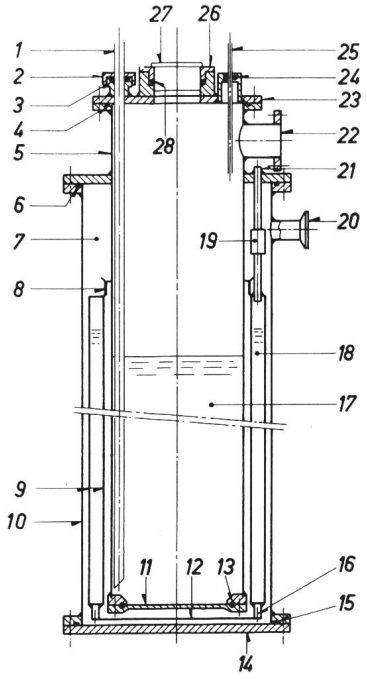


Fig. 11
Cryostat für kleine SL-Laborsolenoide (MFO)
Vakuumisolierter Cryostat mit Flüssigstickstoff-Wärmeschutzschild und Superisolation im Vakuum für Betriebstemperatur 4,2 °K im Spulenraum. Baukasten-System mit verschiedenen «hot-hole»-Möglichkeiten
1 He-Einfüllrohr; *2* Stopfbüchsenmutter; *3, 4, 6, 15, 24, 28* Gummidichtungen; *5* He-Gefäss aus CrNi-St. 18.8; *7* Vakuumraum; *8* thermische Abfangung auf Flüssigstickstoff-Temperatur; *9* Stickstoffbehälter aus Kupfer; *10* Mantel der Vakuumkammer; *11* demontierbarer He-Gefässboden; *12* auswechselbarer, angeschraubter Cu-Wärmeschild; *13* Indium-Dichtung; *14* auswechselbarer Boden der Vakuumkammer; *16* Verschraubung Wärmeschutzschild-Stickstoffbehälter; *17* flüssiges He; *18* flüssiger Stickstoff; *19* vakuumdichte Verschraubung; *20* drei am Umfang verteilte Stutzen für Vakuumhahn, Sicherheitsventil und Messelemente; *21* Aufhängung des Stickstoffbehälters (3 am Umfang verteilt) und zugleich Einfüllrohr und Abgasrohr; *22* Stutzen für He-Abgas; *23* Deckel des He-Behälters; *25* He-Pegelmesser; *26* Stopfbüchse; *27* der nach Belieben durch andere Einsätze ersetzbare Verschlusszapfen

a) Badbetrieb, wo die Spule einfach in ein periodisch nachgefülltes Flüssigheliumbad eingetaucht ist, kommt ausschliesslich für kleinere SL-Spulen, insbesondere Laborsolenoide, in Betracht.

b) Umlaufbetrieb mit einem geschlossenen Kühlkreislauf mit entsprechender Kältemaschine für grössere Spulen. Leider sind trotz der grossen Fortschritte auf dem Gebiet der Kältetechnik in den letzten Jahren kleine, billige Flüssighelium-Kältemaschinen mit hoher Betriebssicherheit und geringen Ansprüchen an Wartung und Unterhalt auf dem Markt noch kaum erhältlich.

3.3.2 Cryostaten

Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen TL-Cryostaten müssen für SL-Magnete durch sorgfältige Konstruktion möglichst verlustarme Cryostaten gebaut werden, da deren Verluste massgebend die Ökonomie des ganzen Magnetsystems beeinflussen.

a) Verluste des Cryostaten allein. Der Flüssighelium-Raum wird normalerweise mit verschiedenen «konzentrierten» Wärmebarrieren umgeben, um den notwendigen thermischen Wirkungsgrad zu erreichen. Meistens verwendet man 3 konzentrische Kammern, nämlich eine innere Vakuumkammer um das aus dünnem, rostfreiem Stahl bestehende eigentliche Heliumgefäss, eine Kammer mit flüssigem Stickstoff als zusätzlichem Strahlungsschild und eine äussere Vakuumkammer, die meistens mit der inneren Vakuumkammer kommunizierend, oft aber auch in sich geschlossen ist. Die Aussenwand besteht wiederum aus rostfreiem Stahl.

Zum Kleinhalten der Wärmeeinströmungen ist generell darauf zu achten, dass möglichst nur glatte, hochpolierte Oberflächen aus Material mit kleinem Emissionsvermögen verwendet werden. Zusätzlich werden noch die äussere und innere Vakuumkammer ganz oder teilweise mit sog. Superisolation ausgefüllt. Auf diese Weise erhält man für Cryostaten zu kleinen SL-Laborsolenoiden (Badbetrieb) Flüssighelium-Verlustraten von etwa 0,05...0,2 l/h.

b) Verluste durch Abstützungen. Normalerweise ist bei einem Solenoid oder einem Spulensystem (z. B. Helmholtz-Paar) keine Volumenkraft vorhanden, so dass die Aufhängung lediglich das Spulengewicht aufnehmen muss und deshalb mit kleinem Querschnitt gebaut werden kann. Die Wärmeeinströmung kann dann vergleichsweise kleingehalten werden. Sobald aber ein nicht vollständig symmetrischer magnetischer Kreis vorhanden ist (Fe auf RT), muss die Spule gegen die oft beträchtlichen magnetischen Kräfte abgestützt werden. Man versucht dann, durch günstige Konstruktion steife Strukturen kleinen Querschnitts zu erhalten und verwendet dazu Materialien mit kleiner Wärmeleitfähigkeit und möglichst hoher mechanischer Festigkeit.

c) Verluste durch Stromzuführungen. Die RI^2-Verluste sowie die Wärmeeinströmung durch die Zuführungen müssen durch sorgfältige Konstruktion kleingehalten werden. Bei Verwendung eines Dauerstromschalters an der SL-Wicklung können steckbare Stromzuführungen verwendet werden, so dass die Wärmeeinströmungen durch die Zuleitungen gleichzeitig mit den RI^2-Verlusten Null werden.

d) Bauformen. Fig. 11 zeigt einen Querschnitt durch einen SL-Cryostaten für die Verwendung mit kleinen Laborsolenoiden, an dem aber sämtliche Konstruktionsmerkmale grösserer Cryostaten ersichtlich sind. In der Fig. 12 sind Prinzipskizzen für solche Klein-Cryostaten mit verschiedenen «hot-hole»-Einsätzen dargestellt, d. h. Raumtemperatur-Zugängen zum Feldraum. Der Arbeitsraum-Durchmesser bei RT wird dabei typischerweise etwa 10...15 mm kleiner als der Aussendurchmesser des Einsatzes.

3.3.3 Stromzuführungen und Zubehör

a) Stromzuführungen. Zwecks Reduktion des Verbrauchs an Flüssighelium bei Badbetrieb bzw. der Leistung der Kältemaschine bei Umlaufbetrieb muss im wesentlichen die benetzte Fläche der Zuführungsleitungen, bezogen auf den effektiven Querschnitt, so gross wie möglich gemacht werden; damit kann ausserhalb des He-Bads die Enthalpie des aus dem Bad aufsteigenden gasförmigen Heliums optimal ausgenutzt werden. Bei zusätzlicher Verwendung von Gegenstromkühlern konnten so die Gesamtverluste von z. B. zwei 150-A-Zuführungen in SL-Cryostaten gemäss Fig. 11 auf ca. 12 cal/min (entsprechend

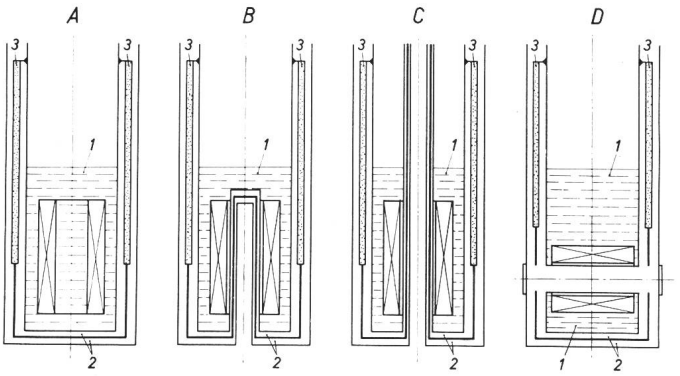


Fig. 12
Prinzip-Ausführungen von Cryostaten für kleine SL-Laborsolenoide
A Standard-Cryostat nach Fig. 11; *B* Cryostat mit hot-hole-Zugang von unten; *C* Cryostat mit durchgehendem vertikalem hot-hole; *D* Cryostat mit horizontalem Vakuum-hot-hole; *1* Flüssighelium; *2* Vakuum; *3* Flüssigstickstoff

ca. 1,15 l/h Flüssighelium-Verdampfung) gesenkt werden. Für Ströme oberhalb etwa 200 A ist eine Flüssigstickstoff-Vorkühlung der Zuleitungen vorteilhaft.

b) Zubehör. Hiezu zählen Helium-Pegelmesser, Überdruckventile und andere Sicherheitseinrichtungen, sowie für Badbetrieb Helium-Überheberleitungen zum Auf- bzw. Nachfüllen der Cryostaten mit Flüssighelium aus Vorratsbehältern (Dewargefässen), schliesslich Vakuumpumpen zum Evakuieren der Cryostatvakuumkammern und weiteres Zubehör, auf das in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen werden kann.

3.4 Speisung von SL-Spulen

Das grundlegende Problem bei der Speisung von supraleitenden Magneten besteht darin, die u. U. sehr grossen Erregerströme so in die Spule zu bringen, dass die kälteseitigen Gesamtverluste minimal werden. Hinzu kommt die prinzipielle Schwierigkeit, bei den im allgemein aus technischen (Speisung innerhalb Cryostat) oder ökonomischen (Speisung ausserhalb Cryostat) Gründen kleinen Ausgangsspannungen der SL-Speisegeräte derart hochinduktive Lasten, wie sie die SL-Spulen meistens darstellen, in vernünftiger Zeit zu speisen. Die für die Erregung des Magnets notwendige Zeit ist ja durch die Zeitkonstante L/R des Magnets gegeben, die von einigen Sekunden bis zu einigen 10 min betragen kann, so etwa für einen SL-Solenoid mit 2,5 cm Innendurchmesser und $B_0 = 5$ T (L = ca. 5 H) etwa $T = 25$ s und für einen Solenoid mit 10 cm Innendurchmesser und $B_0 = 3$ T (L = ca. 30 H) etwa $T = 2{,}5$ min.

Betriebsseitig unterscheidet man für SL-Spulen zwei Varianten, nämlich den sog. «*regulierten Betrieb*» (d. h. die [externe] Speisequelle befindet sich dauernd im Spulenstromkreis) und den sog. «*Dauerstrombetrieb*» unter Verwendung eines die Spule in sich selbst kurzschliessenden Dauerstromschalters (DSS), d. h. in diesem Fall fliesst kein Strom mehr von aussen in den Cryostat. Schliesslich kann man nach der Speisungsart zwei Hauptarten von Speisungen unterscheiden, nämlich entweder befindet sich das gesamte *Speisegerät ausserhalb des Cryostats,* oder es befinden sich zumindest wesentliche (Verluste produzierende) Teile von diesem *Speisegerät innerhalb des Cryostats.* Im Folgenden soll auf diese beiden Speisungsarten kurz eingegangen werden.

3.4.1 Speisung ausserhalb des Cryostats

Im wesentlichen wird das Speisegerät und dessen Regulierung nach den gleichen Prinzipien gebaut wie bei NL-Magneten [23; 24], doch sind durch die besonderen Erfordernisse für die Erregung einer SL-Spule einige bemerkenswerte Zusätze vorhanden. Normalerweise werden für die Gleichstromspeisung von SL-Spulen geregelte, stabilisierte Netzgeräte mit einstellbarem, linearem Stromanstieg und -abfall verwendet, die fallweise auch einen zum Hauptstrom verriegelten Hilfsstrom für die Speisung eines DSS liefern. Dabei ist zu bemerken, dass zum Offenhalten des DSS dessen Heizstrom z. B. 0,2 l/h Flüssighelium verdampft, so dass bei länger dauerndem reguliertem Betrieb die Verbindungen des DSS an der Spule mit Vorteil gelöst werden.

3.4.2 Speisung innerhalb des Cryostats

Selbst die nach den weiter oben dargelegten Prinzipien optimierten Stromzuführungen verursachen noch beträchtliche Kälteverluste, insbesondere bei hohen Strömen. Nun wachsen aber diese bei den stabilisierten Kabelspulen ständig an und betragen bald einige 1000 A, so dass man nach Mitteln gesucht hat, die ein Erregen der SL-Spulen mit hohen Strömen erlauben, ohne dass solche Ströme auch von aussen in den Cryostat eingeführt werden müssen.

Die Lösung dieses Problems liegt in supraleitenden Speiseeinrichtungen wie sog. Flusspumpen, Generatoren und Transformator-Gleichrichter-Systemen. Flusspumpen bzw. SL-Generatoren sind in vielen, teilweise ingeniösen Varianten und ausgeklügelten Ausführungen bereits bekannt geworden [65], die fallweise ohne bewegte Teile bzw. ohne oder mit rotierenden Teilen funktionieren, welche jedoch ausnahmslos auf dem Prinzip des Schalter-Modells bzw. nach dem Prinzip der gleitenden Normalzone arbeiten. In Fig. 13 ist das Funktionsprinzip eines SL-Generators in seiner einfachsten Ausführung dargelegt.

3.4.3 Energieentzug

Im magnetischen Feld von Spulen wird pro Volumeneinheit eine beträchtliche Energie gespeichert. Gemäss $W = B^2/2\mu_0$ steigt diese mit dem Feldbetrag sehr rasch an und beträgt etwa $W = 100$ J/l bei $B = 0{,}5$ T, $W = 3{,}6$ kJ/l bei $B = 3{,}0$ T oder $W = 10$ kJ/l bei $B = 5{,}0$ T (10 MJ/m³).

Bei einem Übergang SL-NL geht nun diese gespeicherte Energie in Wärme über und verdampft grosse Mengen Flüssighelium, wobei gleichzeitig hohe Überspannungen $L \cdot di/dt$ entstehen, welche Durchschläge zwischen Windungen und Lagen verursachen können, sofern nicht die Spule überhaupt durch Schmelzen des Supraleiters zerstört wird. Besonders für unstabilisierte Spulen ist deshalb der Energieentzug [66] durch entsprechende äussere Schaltung (Parallelwiderstände, schnelle Schalter u. a. m.) ein Problem, da dort mit Zeitkonstanten von z. B. $L/R = 10^{-3}$ s die Energieabgabe fast explosionsartig erfolgen kann. Bei stabilisierten Spulen hingegen kann im allgemeinen auf einen eigentlichen «Katastrophenschutz» verzichtet werden — jedoch müssen auch dort Cryostaten mit genügender Spannungsfestigkeit verwendet werden.

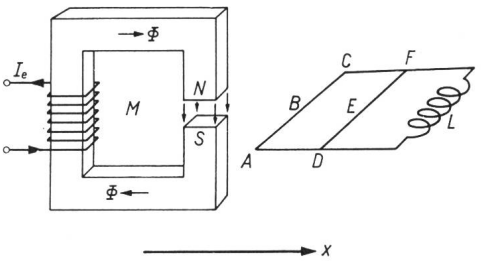
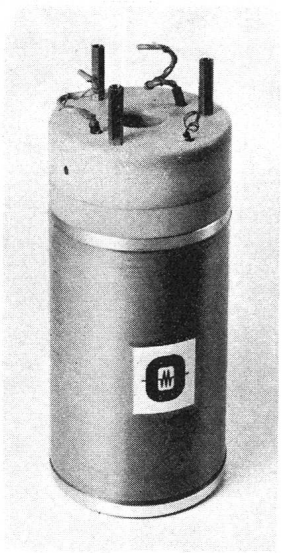


Fig. 13
Prinzip einer SL-Flusspumpe [65]

Zwei gerade Supraleiter *A-B-C* und *D-E-F* mit relativ niedrigem kritischen Feld H_c, aber mit hoher Stromtragfähigkeit sind parallel an den Solenoid *L* angeschlossen, welcher aus SL-Material mit hohem H_c besteht. Im kleinen Erregermagnet *M* links kann mittels des Erregerstromes I_e der magnetische Fluss Φ erzeugt werden. Verschiebt man nun den erregten Magnet in Richtung *x* von links nach rechts, so bringt man seinen Fluss Φ in das Gebiet *A-C-F-D-A* durch lokales Zerstören der Supraleitung in *B* im Drahtstück *ABC*. Der Spulenstrom kann ungehindert durch das Drahtstück *DEF* fliessen. Nachdem *ABC* wieder supraleitend ist, verschiebt man den Magnetfluss Φ weiter nach rechts in das Gebiet *DFLD* durch lokales Zerstören der Supraleitung in *E* im Drahtstück *DEF,* wobei der Spulenstrom über das Drahtstück *ABC* fliesst. Der Fluss Φ befindet sich jetzt im Magnetkreis. Nimmt man nun den Fluss weg, beispielsweise durch Annullieren des Erregerstromes I_e bzw. durch Verschieben des Magnets in Richtung senkrecht zu *x* über *FL* bzw. *LD* (wobei die Supraleitung dort nicht zerstört wird, da diese Stücke aus dem gleichen Material wie die Spule bestehen), so erhält man im Magnetkreis infolge der Flusskonservierungsregel einen Strom $I_1 = \Phi/L$. Dieser Vorgang wird z.B. *n*-mal wiederholt, und man hat so den Strom im Magnetkreis um den Betrag $\Delta I = n \cdot I_1$ «hochgepumpt». Man kann zudem einen Faktor 2 in der Pumpgeschwindigkeit gewinnen, wenn statt Ausschalten des Erregerstromes I_e einfach dessen Polarität umgekehrt und der Magnet über *DEF* und *ABC* in Richtung —*x* zurückbewegt wird [4]

Fig. 14
SL-Laborsolenoid (Bauart MFO)
Nennstrom 25,2 A für Nennfeld 5,0 T im Zentrum, freie Bohrung mit 25 mm Durchmesser, Spulenkonstante 0,1985 T/A, max. Zentrumfeld 5,51 T beim kritischen Strom 27,8 A, Induktivität 5,3 H, Feldhomogenität ± 1,8 % in zentraler Kugel von 25 mm Durchmesser.
Gesamte Länge 3150 m $Nb_{75}Zr_{25}$-Draht, Spulenkörper aus CrNi-Stahl



3.4.4 Dauerstromschalter

Im sog. Dauerstrombetrieb wird die SL-Spule mittels eines DSS in sich kurzgeschlossen. Dadurch werden die Zuführungsverluste auf die Wärmeeinströmung reduziert — sofern die Zuleitungen (z. B. mittels steckbaren Verbindungen) nicht auch noch mechanisch getrennt werden können — und das Magnetfeld wird nahezu ideal stabil (Feldstabilitäten von besser als 10^{-9} über Stunden sind schon gemessen worden) und hat insbesondere die Welligkeit Null.

Früher wurden mechanische, thermische und magnetische Dauerstromschalter gebaut, doch heute wird fast nur noch der thermische DSS verwendet. Er besteht aus einem die Spulenanschlüsse verbindenden SL-Draht, der im NL-Zustand bei eingeschalteter Heizwicklung einen Widerstand von z. B. 10...100 Ω hat und nach dem Ausschalten der Heizung supraleitend wird. Für grosse SL-Kabelspulen werden in Zukunft voraussichtlich DSS in Kombination mit Flusspumpen gebaut. Es ist ja eine naheliegende Lösung (siehe z. B. Fig. 13), solche SL-Generatoren durch entsprechende konstruktive Ausbildung auch als DSS zu verwenden.

3.5 Anwendungen, Beispiele, Zukunftsaussichten

3.5.1 Anwendungsgebiete

Potentiell können nahezu alle Gleichstrom-Elektromagnete als SL-Magnete gebaut werden, insbesondere solche, bei denen:

a) das Magnetfeld in NL-Ausführung infolge der Sättigung des magnetischen Kreises beschränkt ist, wunschgemäss aber höher sein sollte,

b) die durch SL-Magnete möglichen raum- und gewichtssparenden Lösungen grosse Vorteile bringen,

c) eine hohe Uniformität des magnetischen Feldes notwendig ist (zeitlich, d. h. Stabilität oder räumlich, d. h. Homogenität),

d) der Leistungsbedarf in NL-Ausführung prohibitiv gross wird,

e) das Feldvolumen sich durch die Natur des Experiments selber schon auf TT befinden muss.

Keine Anwendung ist hingegen für Magnete mit gepulsten und mit Wechselfeldern möglich, da die heutigen Supraleiter bekanntlich für Wechselstromanwendungen völlig unbrauchbar sind.

Hauptdaten der Wicklungen des Solenoidsystems nach Fig. 15
Tabelle IV

Wicklungs-Position in Fig. 15	Anzahl Windungen	Feld-konstante mT/A	Max. Strom A	Füll-faktor %	mittlere Stromdichte A/mm²
14	6225	21,6	119	15,4	60,37
13	1363	7,6	283	13,5	54,04
12	1800	8,8	134	24,26	91,88
11 (mittel)	1899	3,9	228	7,3	46,91

Ein besonders vielversprechendes Anwendungsgebiet für die SL-Technik sind grosse Blasenkammermagnete. Verschiedene Preisvergleiche scheinen zu zeigen, dass in solchen Fällen nicht nur die Betriebskosten, sondern auch die Anschaffungskosten für ein SL-System (Magnet + Speisung + Kühlung) tiefer liegen als für ein entsprechendes NL-System. Allerdings sind solche Preisvergleiche [67] oft etwas willkürlich, indem die einzelnen Preise nicht auf gleichen Voraussetzungen beruhen und insbesondere auch die Entwicklungskosten beim SL-Magnet unberücksichtigt bleiben. Zudem entsteht vielfach ein falsches Bild bezüglich der Betriebskosten und weiterer Fragen, wie Platzbedarf, Gebäude, Unterhalt und speziell auch der technischen Zuverlässigkeit der miteinander verglichenen Systeme.

3.5.2 Anwendungsbeispiele

a) SL-Laborsolenoid. Als Beispiel für solche SL-Magnete stellt Fig. 14 einen kleinen Solenoid dar, der bei 25 mm freier Bohrung ein Zentralfeld von 5 T liefert.

b) SL-Spulensystem. Fig. 15 zeigt einen Querschnitt durch ein von *Laverick* [55] im Argonne National Laboratory (USA) gebautes Spulensystem, das aus 4 verschiedenen konzentrischen Wicklungen auf 3 ineinandergeschobenen Solenoiden (der mittlere trägt zwei verschiedene Wicklungen) besteht, welche ebenfalls einzeln betrieben werden können. Die im Magnet gespeicherte Energie ist grösser als 0,6 MJ, und die beiden äusseren Solenoide können als Helmholtzpaar für Verwendung mit einer Blasenkammer von 25,4 cm Durchmesser eingesetzt werden. Alle 5 Spulen zusammen erreichen ein Zentralfeld von 6,7 T in einer Bohrung von 17,8 cm Durchmesser, die beiden äusseren allein ergeben 4,2 T bei 27,9 cm Durchmesser, und der äusserste Solenoid produziert 1,7 T bei 45,7 cm Durchmesser. Die einzelnen Wicklungen sind die innerste Wicklung (*14*) in Fig. 15 aus NbTi-Kabel (Siebnerseil mit 6 NbTi-Drähten und 1 Kupferdraht, je etwa 0,3 mm Durchmesser), die mittlere innere Wicklung (*13*) aus NbTi-Kabel (Sechsundzwanzigerseil mit 14 NbTi-Drähten und 12 Kupferdrähten), die mittlere äussere Windung (*12*) aus NbZr-Kabel (Siebnerseil) und die äusserste Wicklung (*11*) aus NbZr-Kabel (Neunzehnerseil mit 7

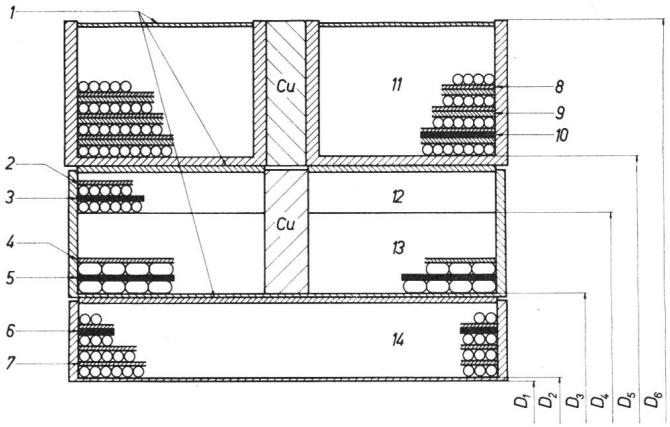


Fig. 15
SL-Solenoid 6,7 T, 7″ (Argonne) [55]
Die Durchmesser der einzelnen Wicklungen bzw. der ineinandergeschobenen Solenoide betragen D_1 = 171,5 mm, D_2 = 182 mm, D_3 = 281 mm, D_4 = 401 mm, D_5 = 457 mm, D_6 = 635 mm; *1* Pressung mit CrNi-Draht und Mylar-Band; *2* Abschirmung aus rostfreiem Stahl mit 0,33...1,65 mm Dicke; *3* Shim mit 0,05 mm Dicke; *4* Abschirmung aus rostfreiem Stahl mit 0,33...0,36 mm Dicke bzw. *7* mit 0,3 mm Dicke bzw. *8* mit 0,35 mm Dicke bzw. *9* mit 1,65 mm Dicke; *5* Shim mit 0,025 mm Dicke; *6* Mylar-Isolation mit 0,05 mm Dicke; *10* Mylar-Isolation mit 0,075 mm Dicke

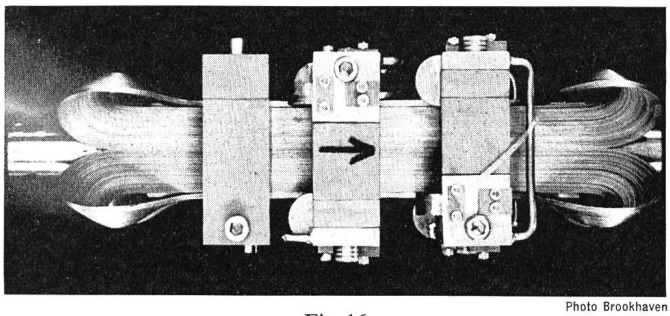


Photo Brookhaven

Fig. 16
SL-Strahltransport-Quadrupol (Brookhaven)
SL-Bänder Nb_3Sn mit zwei verschiedenen Breiten (2,25 mm und 6,50 mm) sind um eine parallelepipedische Form mit quadratischem Querschnitt von 3,2 cm Seitenlänge und rund 20 cm achsialer Länge gewickelt. Die Nutzapertur ist durch das kreisförmige Strahlrohr von 3 cm Durchmesser gegeben

Drähten NbZr und 12 Kupferdrähten). Die hauptsächlichsten Daten der einzelnen Wicklungen können Tabelle IV entnommen werden.

Der Aufbau dieses Spulensystems ist reichlich kompliziert und nicht allein durch die optimale Ausnutzung der verwendeten Materialien gerechtfertigt; der Magnet soll vielmehr auch zusätzliche Information über das Verhalten von solchen SL-Kabeln aus NbTi- und NbZr-Drähten liefern.

c) SL-Strahltransportmagnete. Fig. 16 zeigt einen vom Brookhaven National Laboratory gebauten kleinen SL-Strahltransportquadrupol. Es ist im Prinzip ein sog. Panofsky-Quadrupol mit kreisförmiger Nutzapertur, gewickelt aus Nb_3Sn-Bändern um einen Rahmen aus rostfreiem Stahl. Bei einer Stromdichte von etwa 400 A/mm² in den Wicklungen erreicht der Quadrupol einen maximalen Feldgradient von 1 T/cm; ein noch etwas bescheidener Wert, da ein konventioneller NL-Quadrupol gleicher Apertur rund 0,7 T/cm erreicht, allerdings aber bei beträchtlicher Erregerleistung.

d) Grosse SL-Blasenkammermagnete. Als Beispiel für einen grossen SL-Blasenkammermagnet ist in Fig. 17 der projektierte Magnet der Wasserstoffblasenkammer des Argonne National Laboratory dargestellt. Der Spulenwiderstand bei $B_0 = 2$ T und 4,2 °K sowie 4,22 kp/mm² (6000 psi) Zugspannung im Leiter ist im normalleitenden Zustand kleiner als 1,31 μΩ/m, d. h. der Querschnitt des stabilisierenden Normalleiters ist so gross, dass beim Strom $I = 2000$ A der Wärmeübergang zum Flüssigheliumbad bei alleiniger Kantenkühlung des Leiters $k = 0{,}1$ W/cm² nicht übersteigt, wenn der Erregerstrom auf der ganzen Länge im Kupfer fliesst.

Der Magnet umfasst total 28 Scheibenspulen mit je 90 Windungen und einem Strom von 2000 A, er braucht somit eine Gesamterregung von rund 5 MA für die Erzeugung des Zentralfeldes von 2 T. In konventioneller NL-Ausführung verschlingt der Magnet eine Gleichstromleistung von rund 10 MW bei einem Spulengewicht von etwa 90 t, während der magnetische Kreis in beiden Fällen grössenordnungsmässig 2000 t wiegt.

3.5.3 Zukunftsaussichten

In nächster Zeit sind für die Anwendung der SL-Technik auf sämtliche Typen von Forschungselektromagneten vor allem Fortschritte auf zwei Hauptgebieten notwendig und zu erwarten, nämlich auf dem Gebiet der supraleitenden Materialien und auf jenem der Kältetechnik.

Supraleitende Materialien. Bessere Kenntnisse der Vorgänge in SL-Materialien für technische Anwendungen, Entwicklung von neuen und verbesserten Supraleitern mit höheren I_c und T_c, Verbilligung der heute bekannten NbZr-, NbTi- und Nb_3Sn-Leiter, Herstellung von teil- oder vollstabilisierten SL-Kabeln mit hoher mechanischer Festigkeit.

Kältetechnik. Entwicklung von kleinen, billigen, zuverlässigen und möglichst wartungsfreien Flüssighelium-Kältemaschinen, Verbesserung des Wirkungsgrades und Erhöhung der Zuverlässigkeit grosser Aggregate, Entwicklung von vollautomatischen und betriebssicheren Grossanlagen, die über grosse Zeitspannen SL-Magnete mit «NL-Zuverlässigkeit» kühlen können.

Die Entwicklung der supraleitenden Magnete selbst wird in der nächsten Zeit voraussichtlich bemerkenswerte Realisierungen auf drei verschiedenen Gebieten bringen:

I. Einzelanwendungen von kleinen und mittleren SL-Magneten für den Strahltransport und als Ersatz von verschiedenen NL-Experimentier- und Spezialmagneten;

II. Grossvolumige SL-Spulen (einige dm³ bis einige m³) mit Feldern von 2..5 T für Blasenkammermagnete sowie für Experimentiermagnete in Versuchsausführungen von MHD-Generatoren und Kernfusionsreaktoren;

III. Kleine SL-Spulen (Feldvolumen einige 10 cm³ bis einige 100 cm³) mit Feldern von 15...25 T zur Ergänzung von kleinvolumigen Feldern konventioneller NL-Hochfeldsolenoide und zum Einsatz in NL-SL-Hybriden.

Im Lichte der jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der SL-Technik scheint die Realisierung auch von Feldern der Grössenordnung 10 T in grösseren Volumina durchaus im Bereich des Möglichen zu liegen — doch sind bis dahin zweifellos noch viele Probleme physikalischer und hauptsächlich technologischer Art zu lösen.

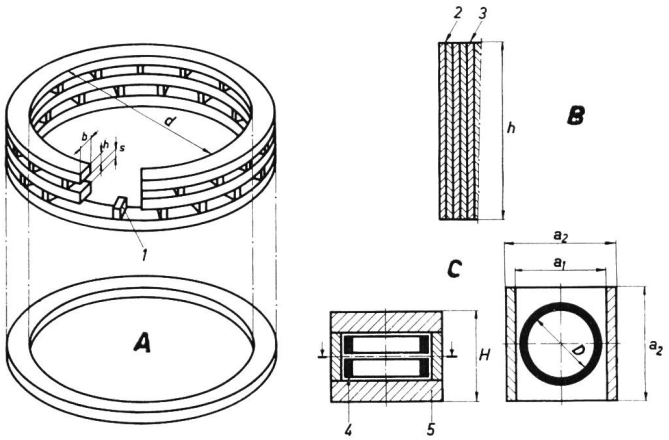


Fig. 17
SL-Blasenkammermagnet (Argonne)
A Scheibenspulen des Blasenkammer-Helmholtzpaares. Der Innendurchmesser beträgt $d = 4{,}76$ m, die Scheibenspulenbreite $b = 241$ mm, die entsprechende Spulenhöhe $h = 50{,}8$ mm und der Abstand der Scheibenspulen untereinander $s = 38{,}1$ mm
B Querschnitt der Scheibenspule mit Kantenkühlung. Der Leiter ist ein SL-Kabel nach Fig. 8E mit einer Breite von 50,8 mm und der Dicke 2,54 mm, jedoch mit mindestens 12 $Nb_{75}Zr_{25}$-Drähten zwecks Erreichens des Spulenstroms von 2000 A bei einem Feld von 2 T
C Vertikalschnitt und Horizontalschnitt durch den Blasenkammermagnet. Der Seitenjoch-Abstand misst $a_1 = 5{,}6$ m, die Gesamtbreite $a_2 = 7{,}1$ m, die Eisenhöhe $H = 5{,}6$ m, die freie Bohrung $D = 4{,}57$ m
1 Scheibenspulen-Distanzierung; *2* Windungsisolation mit einer Dicke von 0,127 mm; *3* SL-Kabel; *4* geschweisste Spulengehäuse bzw. Cryostaten mit den SL-Spulen und *5* magnetischer Kreis. Der Blasenkammermagnet ist für ein Zentralfeld von 2 T ausgelegt und erzeugt in der NL-Ausführung dieses Feld mit 90 t schweren Kupferspulen und 10 MW Verlustleistung

Literatur [3])

[1] High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields held at the Massachusetts Institute of Technology in Cambridge Massachusetts, November 1...4, 1961. M. I. T. Press Cambridge Massachusetts / John Wiley New York 1962.

[2] Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford California, September 8...10, 1965. Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, National Bureau of Standards, US Department of Commerce, Springfield Virginia 1965.

[3] *D. B. Montgomery:* The Generation of High Magnetic Fields. In: Reports on Progress in Physics 26(1963), S. 69...104.

[4] *D. de Klerk:* The Construction of High-Field Electromagnets. Newport Instruments Ltd. Newport Pagnell, Buckinghamshire 1965.

[5] *D. H. Parkinson:* Generation of Very Powerful Magnetic Fields. Electronics and Power 11(1965)3, S. 79...86.

[6] *B. Oswald:* Hohe Magnetfelder und ihre Anwendung in der Plasmaphysik. ETZ-A 86(1965)2, S. 40...47.

[7] *R. V. Harrowell* and *W. T. Norris:* Some Aspects of the Design of Magnets for MHD Generators. Proceedings of the International Symposium on Magnetohydrodynamic. Electrical Power Generation, Paris 1964. OECD/ENEA Paris 1964, Vol. II, S. 1035...1084.

[8] *G. Klein:* High Magnetic Fields for Magneto-Plasma-Dynamic Generators. Magnetoplasmadynamic Power Generation Symposium Newcastle 1963. IEE Conference Report Series 4(1963), S. 42...45.

[9] *H. Zijlstra:* Precooled Solenoids for Multisecond Pulses. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge, Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Massachusetts / John Wiley New York 1962, S. 281...286.

[10] *P. Grassmann:* Anwendung sehr tiefer Temperaturen in der Elektrotechnik. Kältetechnik 12(1960)2, S. 38...43.

[11] *R. J. Corruccini:* The Electrical Properties of Aluminium for Cryogenic Electromagnets. Technical Note 218, National Bureau of Standards, Washington 1964.

[12] *C. E. Taylor* and *R. F. Post:* Cryogenic Coils. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Massachusetts / John Wiley New York 1962, S. 101...108.

[13] *K. N. Mathes:* Electrical Insulation at Cryogenic Temperatures. Electro-Technology 72(1963)3, S. 72...77.

[14] *A. H. Cockett* and *W. Molnar:* Recent Improvements in Insulants. Cryogenics 1(1960)1, S. 21...26.

[15] *R. F. Post* and *C. E. Taylor:* Cryogenic Magnet Coils for High-Energy Physics Experimentation. In: Proceedings of an International Conference on Instrumentation of High Energy Physics held at the Ernest O. Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley, California, September 12, 13 and 14, 1960. Interscience New York 1961, S. 14...25.

[16] *J. R. Purcell:* An Aluminium Magnet Cooled with Liquid Hydrogen. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Massachusetts / John Wiley New York 1962, S. 166...169.

[17] *J. C. Laurence, G. V. Brown, J. Geist* and *K. Zeitz:* A Large Liquid-Neon-Cooled Electromagnet. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Massachusetts / John Wiley New York 1962, S. 170...179.

[18] *J. R. Purcell* and *E. G. Payne:* High-Field Liquid H_2-Cooled Aluminium-Wound Magnet. Rev. scient. Instrum. 34(1963)8, S. 893...897.

[19] *A. Boozenny* and *J. R. Payne:* Design and Fabrication of Integral Coolant Passage Cryogenic Coils for High Power Density. In: Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 630...642.

[20] *L. J. Krzycki:* Liquid N_2 Force-Cooled Electromagnet. Rev. scient. Instrum. 36(1965)3, S. 393.

[21] *R. H. Kropschot:* Multiple Layer Insulation for Cryogenic Applications. Cryogenics 1(1961)3, S. 171...177.

[22] *R. G. Mallon:* Optimum Electrical Leads of Aluminium and Sodium for Cryogenic Apparatus. Rev. scient. Instrum. 33(1962)5, S. 564...565.

[23] *F. Grütter:* Magnet-System Power Supplies. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 755...768.

[24] *F. W. Kruse:* State of the Art for Precision Current or Field Regulated Power Supplies. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 779...787.

[25] *J. C. Fakan:* The Homopolar Generator as an Electromagnet Power Supply. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 211...216.

[26] *J. C. Laurence* and *W. D. Coles:* Design, Construction and Performance of Cryogenically Cooled and Superconducting Electromagnets. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 574...587.

[27] *W. F. Gauster* and *C. E. Parker:* Some Concepts for the Design of Superconducting Solenoids. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 3...13.

[28] *S. H. Autler:* Superconducting Magnets. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 324...331.

[29] *R. H. Kropschot* and *V. Arp:* Superconducting Magnets. Cryogenics 2(1961)1, S. 1...15.

[30] *J. K. Hulm, B. S. Chandrasekhar* and *H. Riemersma:* High-Field Superconducting Magnets. Advances in Cryogenic Engineering 8(1963), S. 17...29.

[31] *M. Iwamoto, N. Kaneseki* and *T. Kawai:* Flux Jumps and Training Effects in Multi-Layer Nb-Zr Superconducting Coil. Applied Physics Letters 8(1966)2, S. 38...40.

[32] *A. R. Kantrowitz* and *Z. J. J. Stekly:* A New Principle for the Construction of Stabilized Superconducting Coils. Applied Physics Letters 6(1965)3, S. 56...57.

[33] *C. Laverick:* Progress in the Development of Superconducting Magnets. Cryogenics 5(1965)5, S. 152...158.

[34] *G. P. Haskell* and *P. F. Smith:* The Economics of Superconducting Magnets. Nuclear Instruments and Methods 30(1964)2, S. 277...282.

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

[36] *M. Sauzade:* Production de champs magnétiques homogènes et intenses à l'aide de supraconducteurs. Application à la résonance magnétique nucléaire. Onde électr. 45(1965)460/461, S. 946...957.

[37] *W. B. Sampson:* 112 kG Superconducting Magnet. Rev. scient. Instrum. 36(1965)4, S. 565...566.

[38] *J. R. Roth, D. C. Freeman* and *D. A. Haid:* Superconducting Magnet Facility for Plasma Physics Research. Rev. scient. Instrum. 36(1965)10, S. 1481...1485.

[39] *S. H. Autler:* Superconducting Electromagnets. Rev. scient. Instrum. 31(1960)4, S. 369...373.

[40] *J. O. Betterton* and *D. S. Easton:* The Use of Nb-Nb_3Sn and Nb-Zr Superconducting Coils on an Iron Magnet. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 348...357.

[41] *L. J. Donadieu* and *J. Royet:* A 45 000 Gauss Superconducting Magnet for Corpuscular Ionography Experiments Used at CERN. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 604...610.

[42] *M. A. Green:* The Feasibility of a Low-Field Superconducting Thin-Septum Magnet. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 588...593.

[43] *R. M. Bozorth:* Ferromagnetism. V. Nostrand New York 1961.

[44] DAS 1'177'265: Magnetischer Werkstoff für Anwendung bei tiefen Temperaturen. Patent-Inhaber: Western Electric Company New York, Anmeldedatum: 14. 6. 1962.

[45] *S. Methfessel:* Potential Applications of Magnetic Rare Earth Compounds. Trans. IEEE Magnetics 1(1965)3, S. 144...155.

[46] *L. J. Donadieu* and *D. J. Rose:* Conception and Design of Large Volume Superconductiong Solenoids. In: High Magnetic Fields. Procrrdings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 358...369.

[47] *E. Saur:* Supraleitende Magnetspulen. ETZ-B 14(1962)26, S. 705...708.

[48] *Z. J. J. Stekly* and *J. L. Zar:* Stable Superconducting Coils. Trans. IEEE Nuclear Science 12(1965)3, S. 367...372.

[49] *Z. J. J. Stekly, E. J. Lucas, T. A. de Winter* and *C. Laverick:* 27,6 cm Internal Diameter Superconducting Magnet. Rev. scient. Instrum. 36(1965)9, S. 1291...1296.

[50] *B. W. Roberts:* Superconductive Materials and Some of Their Properties. Progress in Cryogenics 4(1964), S. 159...231.

[51] *J. K. Hulm* et al.: A High-Field Niobium-Zirconium Superconducting Solenoid. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962.

[52] *R. R. Hake, T. G. Berlincourt* and *D. H. Leslie:* A 59 Kilogauss Niobium-Zirconium Superconducting Solenoid. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 341...343.

[53] *L. C. Salter* et al.: A Niobium-Tin Superconducting Magnet. In: High Magnetic Fields. Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields in Cambridge Massachusetts 1961. M.I.T. Press Cambridge Mass. / John Wiley New York 1962, S. 344...347.

[54] *E. R. Schrader, N. S. Freedmann* and *J. C. Fakan:* High-Field Nb_3Sn Superconducting Magnets by Magnetic-Field Stabilization. Applied Physics Letters 4(1964)6, S. 105...106.

[55] *C. Laverick* and *G. Lobell:* Large High-Field Superconducting Magnet System. Rev. scient. Instrum. 36(1965)6, S. 825...830.

[56] *C. H. Rosner* and *M. G. Benz:* Stranded Niobium-Tin Wire Solenoids: Design and Fabrication Techniques. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 597...603.

[57] *E. J. Thomas* and *C. D. Bright:* Optimizing the Design of Superconducting Solenoids. Cryogenics 6(1966)1, S. 10...13.

[58] *P. Grivet* and *M. Sauzade:* A High Homogeneity High-Field Superconducting Magnet for Nuclear Resonance. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 517...524.

[59] *W. B. Sampson* and *P. G. Kruger:* Superconducting Pseudo-Helmholtz Coil. Rev. scient. Instrum. 36(1965)8, S. 1081...1083.

[60] *H. C. Hitchcock: The* Design of Volume-Minimized Split Solenoid Systems. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 111...125.

[61] *C. E. Taylor* and *C. Laverick:* A Superconducting «Minimum B»-Magnet. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 594...594.

[62] *T. H. Fields* and *C. Laverick:* Some Supermagnet Design Considerations. Trans. IEEE Nuclear Science 12(1965)3, S. 362...366.

[63] *L. Donadieu:* Etude de quelques problèmes relatifs aux bobinages en câbles supraconducteurs. Onde électr. 45(1965)460/461, S. 958...965.

[64] *H. Desportes* and *B. Tsai:* A High Homogeneous Field Superconducting Magnet for a Polarized Proton Target. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 509...516.

[65] *S. L. Wipf:* Flux Pumps as Power Supplies for Superconducting Coils. Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology Stanford California 1965. NBS Springfield Virginia 1965, S. 615...624.

[66] *P. F. Smith:* Protection of Superconducting Coils. Rev. scient. Instrum. 34(1963)4, S. 368...373.

[67] *C. Laverick:* Superconducting Magnets. Nucleonics 24(1966)1, S. 46...53.

[3]) Das Literaturverzeichnis enthält nur Veröffentlichungen, die seit dem Jahr 1960 erschienen sind und schliesst, wie der Artikel selbst, mit dem Stand von März 1966 ab.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. *P. Tschopp,* Maschinenfabrik Oerlikon, 8050 Zürich.