

Probleme der Erzeugung großvolumiger
Magnetfelder für Fusionsreaktoren

W. Kafka

IPP 4/70

März 1970

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Probleme der Erzeugung großvolumiger
Magnetfelder für Fusionsreaktoren

W. Kafka

IPP 4/70

März 1970

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

W. Kafka

March 1970

Abstract

The production of high magnetic fields in large volumes raises problems, which are studied here in a toroidal configuration with a field volume of 1000 m^3 , maximum magnetic field of 100 kOe and an energy content of 10^{10} J . When water-cooled copper lines are used for excitation the resulting power is at least 0.8 GW owing to the limited winding space. The prime costs for providing electrical energy, converting it, and transporting away the heat due to ohmic losses are about 1 milliard deutschmarks and the annual power costs are also very high. A high-purity aluminium winding at 20° K requires an expensive cooling system. Compared with a water-cooled winding, however, this affords only a small reduction of the prime costs while greatly complicating matters because of the thermal insulation needed. It is investigated here whether the prime and operating costs can be appreciably reduced by using a superconducting winding, and whether the resulting technical problems can be solved. The main problems are:

- 1) When a section of the coil reverts to normal, only a very small part of the large energy content may be converted into heat inside the thermal insulation.
- 2) The magnetic forces have to be controlled without the need for excessive winding space.
- 3) Good thermal insulation is required and losses have to be minimized so that the cooling system does not become too expensive.

In an attempt to overcome these problems it is suggested that a cable made of Nb-Ti strands insulated with loose braiding and surrounded by an aluminium alloy sheath extruded around the cable be used as superconductor for about 10 kA. The strands themselves are twisted bundled conductors with high-purity copper matrix. Inside the sheath they are in direct contact with the coolant, which is supercritical helium either in liquid form or cooled to about 4.5° K. A small part of the magnetic forces is absorbed by the conductor cable, a large part by the sheath, and the rest by an armature wound on the winding under tension. In this type of conductor the extraction of energy is encouraged by the fact that a longitudinal flow of heated coolant quickly propagates the quench over a coil section. There is therefore hope that all problems can be solved even for superconducting windings, and that the prime and operating costs can then be reduced to 10 - 20 % of those for water-cooled windings.

The appendix lists formulae for calculating hysteresis and eddy current losses of superconductors in varying fields and gives a criterion on which to base the two types of losses in bundled conductors of a given pitch.

Zusammenfassung

Die Erzeugung starker Magnetfelder in großen Rauminhalten wirft Probleme auf, die am Beispiel einer Torus-Anordnung mit 1000 m^3 Feldvolumen, 100 kOe größter Magnetfeldstärke und etwa 10^{10} J Energieinhalt studiert werden. Bei Erregung mit wassergekühlten Kupferleitungen ist wegen des begrenzten Wickelraumes die Erregerleistung mindestens 0,8 GW. Für die Bereitstellung der elektrischen Energie, ihre Umformung und das Wegkühlen der Verluste betragen die Anschaffungskosten etwa 1 Milliarde DM und die jährlichen Stromkosten sind sehr erheblich. Eine Wicklung aus hochreinem Aluminium bei 20° K erfordert eine kostspielige Kühleinrichtung und bringt gegenüber der wassergekühlten Wicklung nur eine kleine Verringerung der Anschaffungskosten, dagegen durch die notwendige Wärmeisolierung eine beträchtliche Komplizierung der Anlage. Es wird untersucht, ob eine supraleitende Wicklung die Anschaffungs- und Betriebskosten wesentlich senken kann und die dabei auftretenden technischen Probleme lösbar sind. Die Hauptprobleme sind:

1. der große Energieinhalt, der beim Normalleitendwerden eines Teiles der Spule nur zum kleinsten Teil innerhalb der Wärmeisolierung in Wärme umgesetzt werden darf.
2. Die Beherrschung der magnetischen Kräfte ohne übermäßige Inanspruchnahme von Wickelraum
3. Die Wärmeisolierung und das Kleinhalten von Verlusten, damit die Kühleinrichtung nicht zu kostspielig wird.

Zur Bewältigung dieser drei Probleme wird als Supraleiter für etwa 10 kA ein Seil aus durch lockere Umspinnung isolierten Nb-Ti-Adern, umgeben von einer um das Seil herum stranggepreßten Hülle aus einer Aluminium-Legierung vorgeschlagen. Die Adern selbst sind verdrehte Bündelleiter mit hochreinem Kupfer als Matrizen-Metall. Sie sind innerhalb der Hülle in unmittelbarer Berührung mit dem Kühlmittel, das entweder flüssiges oder auf etwa $4,5^\circ \text{ K}$ gekühltes überkritisches Helium ist. Die magnetischen Kräfte werden zu einem kleinen Teil vom Leiterseil, zu einem größeren Teil von der Hülle und der Rest von einer über die Wicklung unter Vorspannung aufgewickelten Armierung aufgenommen. Die Auskupplung der Energie wird bei dieser Leiterbauart

dadurch unterstützt, daß eine Längsströmung von erwärmtem Kühlmittel den Quench schnell über eine Teilspule ausbreitet. So kann man hoffen, alle Probleme auch bei einer supraleitenden Wicklung zu lösen und dadurch die Anschaffungs- und Betriebskosten auf 10 - 20% der bei wassergekühlten Wicklungen herabzusetzen.

Im Anhang sind Formeln für die Berechnung der Hysterese- und Wirbelstromverluste von Supraleitern in veränderlichen Feldern abgeleitet sowie ein Kriterium, welche der beiden Verlustarten bei Bündelleitern mit gegebener Steigungslänge zugrunde zu legen ist.

Die Probleme bei der Erzeugung starker Magnetfelder in großen Rauminhalten waren zu studieren.

Unter starken Magnetfeldern meinen wir Feldstärken über 40 kG und unter großen Rauminhalten etwa 1000 m^3 . Dabei kann es sich sowohl um gestreckte, zylinderförmige oder zum Torus gebogene Felder handeln. Als Beispiel für meine folgenden Berechnungen beziehe ich mich auf die Torus-Hauptspule des Tokamak-Fusionsreaktors nach der Veröffentlichung von Golowin, mit einem großen Torus-Radius von 5,2 m und einem inneren Spulen-Radius von 3,1 m mit einer Magnetfeldstärke in der Torus-Seele von 40 kOe, einer Maximalfeldstärke von 100 kOe und einem Feldvolumen von etwa 1000 m^3 . Die magnetische Energie dieser Spule ist etwa $0,72 \times 10^{10} \text{Ws} = 2000 \text{ kWh} = 1,7 \times 10^6 \text{ kCal}$. Zuerst soll die Frage untersucht werden, ob derartige Spulen mit Normalleitern wirtschaftlich sind. Die stationäre Erregerleistung $P_e \cong \rho \times j \times H_{\max} \times 2\pi \times r_s \times l_s$.

Sie wächst also mit dem spezifischen Widerstand der Leiter, der Stromdichte, der Maximalfeldstärke und der Spulen-Zylinderfläche. Bei Torusspulen ist die Feldstärke in der Torus-Seele und die Länge der Torus-Seele einzusetzen. Bei Torusspulen gibt es nicht beliebig Platz für die Erreger-Wicklung, weil man die lichte Öffnung nur teilweise mit der Wicklung ausfüllen darf. Die Stromdichte kann nicht beliebig kleingemacht werden. Bei unserem Beispiel muß man mit etwa 20 A/mm^2 rechnen. Damit ergibt sich bei wassergekühlten Kupferleitern eine Erregerleistung von etwa 0,8 GW, das wäre fast die Hälfte der vom Fusionsreaktor erreichbaren elektrischen Leistung. Die Spulenkosten wären zwar relativ niedrig (Kupfermaterial ca. 6 MDM),

aber die Stromquellen einschließlich Gleichrichter und Kühleinrichtung muß man mit rd. 1 Milliarde DM einsetzen, da sie ja noch vor Inbetriebnahme des Fusionsreaktors Strom liefern müssen.

Eine Wicklung aus hochreinem Kupfer oder Aluminium auf 20°K gekühlt, hat bei etwa gleicher Stromdichte etwa ein Zweihundertstel der obigen Erregerleistung, also rd. 5 MW. Sie erfordert aber eine Kühleinrichtung mit etwa der 50fachen Antriebsleistung, d.s. 250 MW. Der Preis der Wicklung einschließlich Wärmeisolation, der Kühleinrichtung, der Erregerstromquelle und der Stromquellen für die Antriebsleistung der Rückkühler kann vielleicht mit 700 MDM angesetzt werden. Die tiefgekühlte Wicklung bringt also gegenüber der wassergekühlten Wicklung hinsichtlich der Anschaffungskosten, wenn überhaupt, nur eine geringe Ersparnis. Die bedeutende Ersparnis an Erregerleistung einschließlich Strombedarf für die Kühler ist hier nicht berücksichtigt, weil wahrscheinlich die Arbeitskosten bei einem Fusionsreaktor gegenüber der Amortisierung der Anschaffungskosten kaum ins Gewicht fallen werden. Berücksichtigt man die Komplizierung durch die Wärmeisolierung, so kann man wohl behaupten, daß die tiefgekühlte normaleitende Wicklung hier noch ungünstiger ist, als die wassergekühlte Kupferwicklung, bei der die Aufnahme der gespeicherten Energie, die Beherrschung der Kräfte und die Kühlung keine besonderen Probleme darstellen.

Es ist jetzt zu untersuchen, ob die Verwendung von Supraleitern die Anschaffungskosten wesentlich senken kann und ob die damit verbundenen besonderen Probleme lösbar sind. Diese Probleme sollen zunächst einmal vorgestellt werden, denn sie bestimmen den Aufbau der Spule.

1. Das erste und größte Problem ist der große Energieinhalt von rd. 10^{10} Ws. Während er bei einer normalleitenden wassergekühlten Spule überhaupt nicht stört und von der Wicklung mit nur geringer Temperaturerhöhung aufgenommen werden kann, muß man bei einer supraleitenden Spule auf ihn besondere Rücksicht nehmen. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen muß man damit rechnen, daß sich spontan ein lokaler Übergang von der Supraleitung zur Normalleitung, eine sogenannte Transition, ereignet. Ursachen dafür sind z.B. die inneren Kräfte, die das Gefüge der Supraleiter an irgendeiner Stelle beschädigen oder lokale Erwärmungen durch innere oder von außen aufgezwungene Feldänderungen, z.B. makroskopische Flußsprünge, wenn eine supraleitende Schleife, die zunächst durch Kreisströme das Eindringen des Magnetfeldes abgeschirmt hat, den Magnetfluß plötzlich durchläßt. Schließlich sind Beschädigungen in der Wärmeisolation denkbar, die zu einer lokalen Anwärmung des Supraleiters über die kritische Temperatur führen können.

Bei kleinen und mittleren Spulen hat man die magnetische Energie auch bei einer Transition gut beherrscht. Man sorgt dafür, daß der Strom bei der Transition einen niederohmigen Parallelweg vorfindet und die lokale Wärmeerzeugung so klein bleibt, daß sie durch Verdampfung von flüssigem Helium aufgenommen werden kann. Der Widerstand des Stabilisierungsmetalls erhöht sich dann nicht wesentlich. Bei kleinen Spulen ist wegen des geringen Energieinhaltes dazu keine besonders große Heliummenge erforderlich.

Bei Spulen mittleren Energie-Inhaltes, also z.B. bei der im Bau befindlichen großen Blaskammerspule der Cern mit rd. 10^9 Ws muß man zusätzlich dafür sorgen, daß der größere Teil der magnetischen Energie außerhalb der Spule auf Raumtemperatur in Wärme umgesetzt wird, weil sonst die verdampfende Heliummenge so groß würde, daß sie in kurzer Zeit nicht aufgefangen werden kann und ins Freie entweichen müßte. Man koppelt also den Großteil der magnetischen Energie auf einen außerhalb der Wärmeisolation liegenden Auskoppelwiderstand aus. Bei ganz großen magnetischen Energien von 10^{10} Ws bedeuten aber schon 10% die Verdampfung von 4×10^5 l flüssigem Helium. Die Rückkühlung würde 10^{12} Ws elektrische Antriebsenergie erfordern, die schon 10^4 DM kosten würde. Will man die Rückkühlanlage, die ja viel Geld kostet, nicht erheblich über die stationäre Kühlleistung vergrößern, erfordert dann das Rückkühlen nach einer Transition mehrere Tage. Man sollte daher eine Spulenkonstruktion anstreben, bei der die innerhalb der Wärmeisolation umgesetzte Energie noch kleiner als 10% ist und lokale Überhitzungen ausgeschlossen sind. Darauf will ich später noch eingehen.

2. Das zweite Problem von Wichtigkeit ist die Beherrschung der magnetischen Kräfte. Spulen großer Feldstärke und großen Innendurchmessers haben auch große Kesselkräfte, die die Wicklung auf Zug beanspruchen. Sie sind bei Durchmessern von 6 m und mittleren Feldstärken von 40 kOe so groß, daß weder der Supraleiter selbst noch das hochreine Stabilisierungsmetall sie aufnehmen kann. Es ist notwendig, die Wicklung zu armieren. Die manchmal angewendete Methode, Armierungsbänder gleichzeitig mit dem

Leiter mit zu wickeln, halte ich für wenig sinnvoll. Bei gleichem Aufwickelzug verteilt sich die Zugbeanspruchung durch die Kesselkraft auf Supraleiter, Stabilisierungsmetall und Armierungsband nicht entsprechend ihrer Zugfestigkeit, sondern entsprechend ihrem Elastizitätsmodul. Dieser ist z.B. bei Kupfer $1,4 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2$, bei Edelstahl $2,1 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2$. Hochreines Kupfer läßt sich im elastischen Bereich bis höchstens 10 kp/mm^2 und einer Dehnung von $0,7\%$ belasten, der Edelstahl bei gleicher Dehnung bis 15 kp/mm^2 , obwohl seine Zugfestigkeit viel höhere Beanspruchungen zuließe. Da sich Kupfer bei Abkühlung von 300 auf 4°K um etwa $3,3\%$, der Edelstahl aber nur um 3% und der Supraleiter noch weniger zusammenzieht, ist das Kupfer in der Wicklung nach dem Abkühlen, aber noch vor dem Erregen bereits unter Zugspannung, während Edelstahl und Supraleiter unter Druck stehen. Die genauen Werte der Spannungen hängen vom Querschnittsverhältnis der drei Metalle ab. Die Folge davon ist, daß der gleichzeitig mit der Wicklung gewickelte Edelstahl mit Rücksicht auf die Grenzdehnung des Kupfers nicht einmal bis 10 kp/mm^2 beansprucht werden kann. Man hat daher den Kupferquerschnitt vielfach so weit vergrößert, daß er imstande ist, die Kesselkraft ohne weitere Armierung zu übernehmen, obwohl dies mit Rücksicht auf die Stabilisierung gar nicht erforderlich wäre. Bei sehr großen Zugkräften ergeben sich dann sehr große Wicklungsquerschnitte, die bei Torusspulen kaum unterzubringen sind. Deshalb sollte hier die Armierung in einer solchen Form durchgeführt werden, die die Ausnutzung von Material hoher Zugfestigkeit bis zur zulässigen Grenze gestattet. Diese Grenze liegt bei Edelstahl von $\sigma_z = 50 \text{ kp/mm}^2$ bei einer Dehnung von $2,5\%$. Wickelt man die Armierungsbänder erst nach dem Wickeln der Leiterspule unter höherem Zug auf, so kann man erreichen, daß nach dem Entfernen der starren Wickelunterlage die Leiter-

spule unter einer gerade noch zulässigen Druckspannung mit 0,7‰ negativer Dehnung steht. Davon geht dann die Differenz der unterschiedlichen thermischen Zusammenziehung nach dem Abkühlen ab und für die Erregung bleibt eine zulässige Ausdehnung um mehr als 1‰ übrig. Für die Edelstahlarmerung kommt noch der größte Teil der Vordehnung vom Wickeln hinzu, sodaß man in der Armierung bereits eine höhere Ausnutzung der Zugfestigkeit erreichen kann. Für sehr hohe Zugkräfte empfiehlt sich aber noch eine andere Methode. Der Supraleiter mit dem Stabilisierungskupfer wird als nicht fest vergossenes Seil ohne nennenswerten Zug gewickelt und durch eine darauf gewickelte Armierung zusammengedrückt, wobei sich das Seil lockert, ohne daß im Kupfer unzulässige Druckspannungen entstehen. Beim Erregen dehnt sich die Wicklung plus Armierung um die für die Armierung zulässige Dehnung, ohne daß die Dehnung im Kupfer 0,7‰ überschreitet.

Diese Überlegungen sind auch für kleinere Spulen, z.B. beim Projekt W 6 von Bedeutung. Hier soll ein Nb₃-Sn-Band Verwendung finden, weil nur dieses Material eine genügend hohe kritische Temperatur besitzt. Davon sind 2 Bauarten lieferbar. Die eine verwendet aus der Gasphase auf ein Stahlband niedergeschlagenen Supraleiter mit einer Kupferschicht, die andere ein Niob-Band, aus dem der Supraleiter durch Eindiffundieren von Zinn erzeugt wird, worauf ebenfalls das Stabilisierungskupfer aufgebracht wird. Bereits beim Abkühlen erleidet das Stabilisierungskupfer bei beiden Bauarten eine Dehnung. Wird jetzt der Leiter beim Erregen weiter gedehnt, so ist die zulässige Dehnung von 0,7‰ bereits bei einer

äußeren Zugspannung von weniger als 10 kp/mm^2 erreicht. Das Stahlband und das Niob-Band können nur wenig Zug übernehmen. Ob jedoch das spröde $\text{Nb}_3\text{-Sn}$ ohne Beeinträchtigung der Supraleitfähigkeit Dehnungen dieser Größe aushält, scheint noch nicht erwiesen. Es kann also notwendig werden, eine zusätzliche Armierung vorzusehen. Beim W 6 ist daran gedacht, als Wärmespeicher Quecksilber in Verbindung mit der Wicklung anzuordnen. Dabei muß geprüft werden, ob Quecksilber bei Abkühlung vom Schmelzpunkt bis 4°K sich stärker oder schwächer zusammenzieht als die Wicklung. Je nach der thermischen Zusammenziehung kann das Quecksilber als günstige Armierung wirken oder einen schädlichen Druck auf den Supraleiter ausüben oder sich bei der Abkühlung von der Spule lösen, was seine Wirkung als Wärmespeicher vielleicht beeinträchtigt. Hier wäre zu prüfen, ob sich nicht ein Wärmespeicher finden läßt, der gleichzeitig als Armierung wirkt und die Wicklung vom magnetischen Zug entlastet. Ein solcher Speicher wäre z.B. Helium in verschlossenen Rohren solcher Festigkeit, daß sie den Druck bei Erwärmung auf Raumtemperatur aushalten. Wärmebehandeltes Berylliumkupfer hat eine so große Festigkeit, daß Rohre von einer Wandstärke von 20% des Innendurchmessers einen Innendruck von 1000 Atü aushalten. Man kann sie also mit flüssigem Helium füllen, ohne daß sie bei Raumtemperatur platzen. Füllt man mit solchen Rohren den für den Wärmespeicher vorgesehenen Querschnitt aus, erhält man eine größere Wärmespeicherung bis 20°K als bei Quecksilber und darüber hinaus bei Wickeln der Speicherröhrchen mit Vorspannung eine wesentliche Zugentlastung der Supraleiter, die für die Betriebssicherheit der Wicklung entscheidend sein kann.

Bei Spulen hoher Feldstärke spielt nicht nur die Kesselkraft eine Rolle, sondern auch die Längszusammenpressung einer Zylinderspule sowie die Zentripetalkraft von Einzelspulen bei einer Toruswicklung. Können sich bei einer Toruswicklung die Einzelspulen gegeneinander abstützen, so ergibt sich ebenfalls, wie bei der Zylinderspule, eine Längszusammenpressung. Diese Druckkraft kann von metallischen Zwischenstücken und elektrischer Isolierung ohne weiteres aufgenommen werden. Soll sie aber über eine Wärmeisolation zwischen Einzelspulen übertragen werden, dann ist die meist vorgesehene Superisolation in einem Vakuumzwischenraum nicht dazu geeignet. Superisolation kann praktisch überhaupt keine mechanische Kraft übertragen, nicht einmal das Gewicht der Spule. Das Gewicht läßt sich durch Zuganker mit größerer Länge und dünnem Querschnitt ohne große Wärmeeinströmung aufhängen. Die magnetischen Zentripetalkräfte sind aber bis zu tausendmal größer als das Gewicht und ändern sich mit der Erregung. Die Zentripetalkraft einer großen Torusspule wie im Beispiel ist praktisch durch Abstützungen, die eine Wärmeisolation durchdringen, nicht wirtschaftlich aufzufangen. Man muß sie also durch zwischen die Einzelspulen gelegte keilförmige Abstandsstücke innerhalb der Wärmeisolation aufnehmen. Die Abstandsstücke bieten genügend Raum für Rohre und Stützen, die wärmeisoliert in das Innere der Spule führen.

3. Das dritte, vor allem wirtschaftliche Problem bei supraleitenden Spulen solcher Größe, ist die Wärmeisolation und Rückkühleinrichtung. Die innere und äußere Oberfläche einer Torusspule nach Beispiel einschließlich

der ins Innere führenden Rohre und Halterungen ist etwa 1500 m^2 . Bei $0,5 \text{ W/m}^2$ erhält man 750 W Wärmeeinströmung. Das Gewicht der ganzen Spule einschließlich Abstandsstücken beträgt etwa 300 t . Zuganker aus Chrom-Nickel-Stahl werden bei Zwischenkühlung durch flüssigen Stickstoff etwa 400 W einleiten. Wollte man die Zentripetalkraft durch Wärmeisolierung hindurch abstützen, so erhielte man eine Wärmeleitung bis zu 400 kW , was mit dem Kühlfaktor 500 eine Rückkühler-Antriebsleistung von 200 MW erfordern würde. Diese Lösung scheidet also aus. Bei unserem Beispiel wäre also für den stationären Betrieb eine Rückkühlanlage für rd. 2000 W ausreichend. Um das Spulengewicht von 300 t Kupfer und sonstiges Metall von 300°K auf 4° abzukühlen, wird man zweckmäßig eine Vorkühlung durch flüssigen Stickstoff bis auf etwa 80°K vorsehen. Dazu müssen etwa $1,5 \times 10^{10} \text{ Ws}$ weggeschafft werden. Das kann durch $50\,000 \text{ l}$ flüssigen Stickstoff in kurzer Zeit erfolgen, wenn ein entsprechender Vorrat gespeichert wurde. Um die Temperatur von 80°K auf 4°K herabzusetzen, müssen etwa $2 \times 10^9 \text{ Ws}$ abgeführt werden. Da gleichzeitig auch Wärme einströmt, muß die Rückkühlanlage mindestens doppelt so groß sein, wie für den stationären Betrieb notwendig. Eine Rückkühlanlage für 4000 W braucht dann rd. 1 Woche, um die Abkühlung von 80°K auf 4°K durchzuführen. Die Rückkühlanlage wird zweckmäßig in 2 Einheiten von je 2 kW Wärmeleistung bei 4°K unterteilt, um auch bei Störung einer Anlage den Betrieb des Fusionsreaktors weiterführen zu können.

Nach dieser grundsätzlichen Schilderung der Hauptprobleme so großer supraleitender Spulen, soll nun der günstigste Aufbau der Spule für das eingangs erwähnte Beispiel

des Tokamak-Fusionsreaktors gesucht werden. Beim Tokamak ist nicht nur das konstante Gleichfeld der Hauptspule vorhanden, sondern es treten auch veränderliche Magnetfelder auf, die die Hauptspule durchdringen. Veränderliche Felder erzeugen in jedem harten Supraleiter Hysterese-Verluste und im Stabilisierungskupfer Wirbelstromverluste. Auch die Feldänderungen beim Auf-erregen der Hauptspule und beim schnelleren Entregen sind zu berücksichtigen. Die Hysteresearbeit ist etwa proportional der Fläche, die von Supraleiterschleifen eingeschlossen wird, dem kritischen Leiterstrom beim Feld Null und der Feldänderung. Sie ist unabhängig von der Zeit in der die Feldänderung erfolgt. Dies gilt aber nur, wenn die Schleife vollständig supraleitend ist. Enthält sie einen geringen Ohmschen Widerstand und erfolgt die Feldänderung in einer Zeit, die viel größer ist als die durch Induktivität der Schleife und inneren Widerstand definierte Zeitkonstante, so verschwindet die Hysteresearbeit praktisch. Durch Verkleinern der Schleifenzeitkonstante kann also diese Verlustquelle günstig beeinflusst werden.

Die Wirbelstromarbeit dagegen ist proportional dem Volumen, dem Quadrat der Feldstärkenänderung und der Leiterausdehnung quer zur Feldrichtung und umgekehrt proportional dem spezifischen Widerstand des Materials und der Zeit der Feldänderung. Man sieht, daß man sie durch kleine Leiterdicke herabsetzen kann. Durch diese beiden Maßnahmen wird man Hysterese und Wirbelstromarbeit auf erträgliche Werte vermindern. Dadurch wird nicht nur die wegzukühlende Wärme beim Auf- und Ab-erregen und im Betrieb auf wirtschaftlich erträgliche Werte gebracht, sondern es wird auch die Betriebssicherheit der Spule erhöht, weil die Gefahr von lokalen Er-

wärmungen und Transitionen herabgesetzt wird. Die Gefahr von makroskopischen Flußsprüngen in Schleifen großer Zeitkonstanten steigt mit der Größe der Leiterströme und der Länge der Leiter, weil ohne Anwendung einer Verdrillung von Teilleitern die Zeitkonstante der Schleife mit dem Quadrat der Leiterlänge zunimmt. Bei einem Kompaktleiter der großen Blasenkammerspule von Cern ergeben sich Schleifenzeitkonstanten von vielen Monaten und die Wärmeerzeugung durch die Flußänderung kann dort wohl nur durch die reichliche Durchflutung mit flüssigem Helium beherrscht werden. Bei der noch viel größeren Spule nach unserem Beispiel scheint mir dieser Aufbau zu viel Risiko zu enthalten, denn eine schnelle Verdampfung großer Heliummengen kann zu Überdrücken in Heliumbehältern führen. Ich möchte daher dringend davon abraten, für so große Spulen Kompaktleiter mit mehreren in Kupfer oder Aluminium eingebetteten parallelen, unverdrillten Supraleiteradern vorzusehen. Als sichere Lösung bleibt nur die Verwendung von Seilen mit voneinander isolierten und verdrillten Adern. Jede Ader enthält dabei Supraleiter und Stabilisierungsmetall.

Bei Verwendung von Seilen bieten sich zwei Möglichkeiten des Spulenaufbaues. Die mit Seil gewickelten Teilspulen werden mit Gießharz vergossen und von der Oberfläche aus gekühlt. Die Teilspulen dürfen daher keine große Dicke haben, weil die Wärmeleitung von Windung zu Windung durch die Vergußmasse nicht gut ist. Ein solches vergossenes Seil benimmt sich hinsichtlich der Kesselkraft wie ein massiver Leiter. Die Dehnung des Stabilisierungskupfers und einer äußeren Armierung ist miteinander gekoppelt. Wie schon vorher erwähnt,

ist damit die Ausnutzung der Zugfestigkeit der Armierung eng begrenzt. Die zweite Möglichkeit besteht darin, das runde Seil in einer rechteckigen Hülle aus einer stranggepreßten Aluminiumlegierung einzuschließen und die Zwischenräume zwischen den Adern und zwischen Seil und Hülle mit Helium auszufüllen. Hier haben die Adern eine große Oberfläche zum Helium, das bei Erwärmung um 1°K etwa tausendmal so viel Wärme aufnehmen kann, als ein gleich großer Kupferquerschnitt. Die Ader wird also für Mikro- und Makro-Flußsprünge wesentlich besser gekühlt als beim vergossenen Seil. Das Seil in der Hülle wird beim Aufwickeln einer Armierung auf die fertig gewickelte Teilspule zwar verkürzt, aber dabei lockert es sich etwas und die Druckbeanspruchung im Stabilisierungskupfer ist gering. Die Armierung kann daher mit großem Zug aufgewickelt und bis zur vollen Zugfestigkeit ausgenützt werden.

Die Windungen mit Hüllenleitern brauchen nur mit einer dünnen Isolierung zueinander versehen zu sein, da die Windungsspannung auch beim Entregen kleiner als 1 V ist. Infolgedessen ist die Wärmeleitung zu einer Außenkühlung gut und man kann zu größeren Spulendicken übergehen, ohne das Helium durch die Hüllen treiben zu müssen. Das Helium in der Hülle wird nur als Wärmespeicher für den Fall einer lokalen Transition benutzt.

Der Hüllenleiter dürfte auch hinsichtlich der Auskoppelung der magnetischen Energie besonders günstig sein. Mein Entwurf der Hauptspule des Tokamak verwendet daher Hüllenleiter. Mit Rücksicht auf die Auskoppelung der magnetischen Energie von $0,7 \times 10^{10}$ Ws wählt man

zweckmäßig eine hohe Leiterstromstärke, z.B. 10 kA. Bei Erregen innerhalb von 40 Stunden braucht man eine maximale Erregerleistung von 100 kW, das ergibt eine Erregerspannung von 10 V. Beim Entregen mit einer maximalen Spannung von 5 kV, also einer Maximalleistung von 50 MW, erhält man eine Entregungszeitkonstante von 300s. Die Maximalspannung der Wicklung gegen Erde von 2,5 kV ist sicher noch beherrschbar. Die ganze Torusspule wird in 96 Teilspulen mit einem Wickelquerschnitt von $13 \times 20 \text{ cm}^2$ unterteilt. Die effektive Stromdichte ist dann 40 A/mm^2 und die Stromdichte im Stabilisierungskupfer ca. 110 A/mm^2 . Als Supraleiter für Feldstärken bis 100 kOe hat sich bis heute Niob-Titan als weitaus billigstes und betriebssicherstes Material erwiesen. In der Spule nach unserem Beispiel herrscht eine höchste Feldstärke von 100 kOe, wenn in der Torusseele 40 kOe erreicht werden sollen. Die Feldstärke nimmt in jeder Teilspule von innen nach außen linear bis Null ab. Es empfiehlt sich daher eine lagenweise Wicklung, bei der der Supraleiterquerschnitt nach außen abnimmt bei etwa gleichbleibendem Kupferquerschnitt. Man kann z.B. die Adern des Seiles aus 4 Teillängen mit verschiedenem Supraleiter-Querschnitt, aber gleichem Aderdurchmesser, zusammensetzen, um das teure Supraleiter-Material zu sparen.

Ich möchte hier noch auf die Vorgänge bei einer lokalen Transition eingehen, um zu zeigen, daß bei der gewählten Spulenbauart trotz der großen magnetischen Energie keine Schäden in der Spule oder große Wärmeverluste innerhalb der Wärmeisolation zu befürchten sind. Man kann annehmen, daß eine lokale Transition zuerst in

einer der 96 Teilspulen beginnt. Durch elektronische Signalgeber kann man das Erscheinen von Ohmschem Widerstand in irgendeiner Spule innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde zum Abschalten der Stromquellen und Einschalten eines äußeren Entregungswiderstandes benutzen. Bei 5 kV Entregungsspannung würde es allerdings 300 s dauern, bis der Strom auf 37% abgesunken ist. Dabei würde das Stabilisierungskupfer an der normalerweise leitenden Stelle weit über 300°K erwärmt. Um dies zu verhindern, empfiehlt es sich, den Auskoppelwiderstand in 96 Teilwiderstände zu unterteilen und mit jeder Teilspule durch eine Leitung zu verbinden, die nur im Entregungsfalle Strom führt und bei guter Kühlung mit einem sehr kleinen Leiterquerschnitt bemessen werden kann. Diese Leitung kann mit der Heliumzuleitung zu den Hüllenleitern vereinigt werden und wird nur wenig Wärme im Normalbetrieb in das Innere der Spule einführen. Sobald in einer Teilspule an einer Stelle Wärme erzeugt wird, wird das Helium innerhalb der Hülle erwärmt, dehnt sich aus und verbreitet die lokale Transition innerhalb weniger Sekunden auf die ganze Teilspule. Infolgedessen erwärmt sich das Stabilisierungskupfer der ganzen Teilspule und bei etwa 50° K hat es einen solchen Ohmschen Widerstand, daß der Spulenstrom aus dieser Teilspule in wenigen Sekunden verdrängt wird, denn die Teilinduktivität einer Teilspule ist kleiner als ein Tausendstel der Induktivität der Gesamtspule. Die Temperatur der Teilspule steigt also nicht viel höher als 50°K. Die anderen Teilspulen bleiben supraleitend und werden durch den restlichen Auskoppelwiderstand mit der Zeitkonstante von 300 s entregt.

Die innerhalb der Wärmeisolation in Wärme umgesetzte magnetische Energie bleibt weit unter 1% der magnetischen Energie der Gesamtspule. Sollte sich zufällig eine lokale Transition gleichzeitig in mehreren Teilspulen einstellen, so geht die Entregung in gleicher Weise vor sich, nur wird die innerhalb der Wärmeisolation entstehende Energie mit der Zahl dieser Teilspulen vervielfacht.

Der Preis des Supraleiters einschließlich Stabilisierungskupfer und Aluminiumhülle kann mit rd. 100 Millionen DM veranschlagt werden. Dazu kommt Armierungsstahl mit etwa 2 Millionen DM.

Die Wicklungs- und Prüfkosten, die Kosten der Kühlrohre, der Heliumfüllung, der Abstandsstücke zwischen den Teilspulen, der Wärmeisolation und der Rückkühl-einrichtung für 4 kW Wärmeleistung ergeben einen Gesamtpreis für die betriebsbereite Hauptspule von schätzungsweise 150 Millionen DM. Bezogen auf eine elektrische Leistung von 2 GW sind das also 75 DM/kW.

Zusammenfassend glaube ich, daß die eingangs erwähnten Probleme der supraleitenden Spule bei entsprechendem Spulenaufbau gelöst werden können und auch so große Spulen betriebssicher möglich sind. Technologisch ist wahrscheinlich die schwierigste Aufgabe, den Vakuumraum der Wärmeisolation mit den vielen Durchführungen und Stützen so porenfrei herzustellen, daß der Aufwand für die Vakuumpumpen nicht zu groß wird. Der wirtschaftliche Gewinn der supraleitenden Wicklung gegenüber einer

wassergekühlten Wicklung scheint mir derart groß, daß nur die Supraleitung für die Zukunft in Frage kommt. Ich möchte noch darauf hinweisen, daß eine Hauptspule für einen Tokamak von doppeltem Torusdurchmesser und gleicher Feldstärke in der Torusseele und vermutlich doppelter Leistung im Supraleitermaterial nur etwa die Hälfte kostet wie bei der beschriebenen Spule, weil bei der niedrigen Maximalfeldstärke von 57 kOe die Supraleiter eine viel höhere Stromdichte vertragen.

A N H A N G

Verluste in Supraleitern bei Feldänderung.

In weichen und harten Supraleitern konnten bei reinem Gleichstrom und konstantem Feld keine Verluste gemessen werden. Bei Strom- oder Feldänderungen dagegen treten sowohl im weichen wie im harten Supraleiter Verluste auf. Während Wirbelstromverluste in Normalleitern eine quadratische Abhängigkeit von der Frequenz zeigen, sind die beobachteten Verluste in Supraleitern praktisch der Frequenz proportional, sie sind also Hysterese-Verluste und durch das Eindringen von Magnetfeldern in supraleitende Schleifen zu erklären. Bei weichen Supraleitern kann man sich solche Schleifen vermittelt der Oberflächen-Rauhigkeit vorstellen und man hat auch eine Abhängigkeit der Wechselstromverluste von der Oberflächenbeschaffenheit der weichen Supraleiter festgestellt.

Bei harten Supraleitern werden im folgenden die Verhältnisse für verschiedene Leiterformen untersucht:

Unter der Annahme einer Fadenstruktur, deren Fäden supraleitend miteinander verbunden sind, erhält man eine Vielzahl von supraleitenden Schleifen. Das einfachste Modell ist in Bild 1 dargestellt.

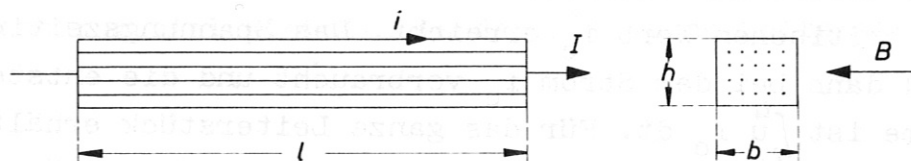


Bild 1

n supraleitende Fäden sind an den Enden supraleitend miteinander verbunden. Der kritische Strom jedes Fadens sei i_c . Er ist abhängig von der Magnetfeldstärke. Beim Feld null ist er am größten. Die Summe aller Teilströme ist der Gesamtstrom I . Er kann nur dann $n \times i_c$ und gleich dem Kurzprobenwert sein, wenn keine Kreisströme vorhanden sind, das Feld B also den Leiter und alle supraleitenden Schleifen durchdringt. Steigt das Feld gemäß Bild 2

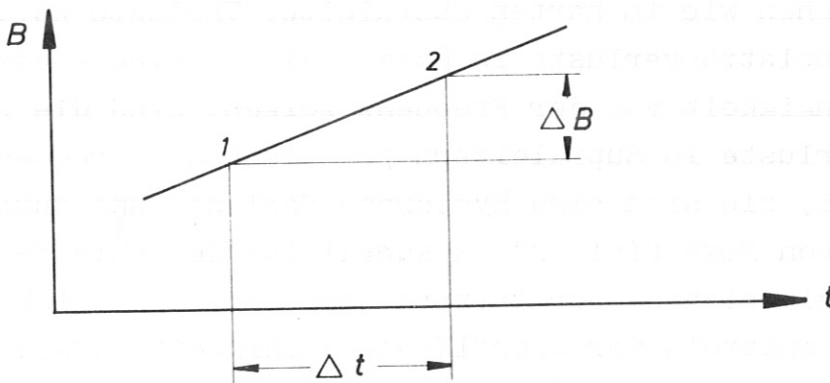


Bild 2

in der Zeit Δt um den Betrag ΔB an, so dringt in jede Schleife ein Fluß $\Phi = \Delta B \times F$ wenn F die Schleifenfläche ist. Das in der Schleife dabei induzierte Spannungszeitintegral $\int_{t_1}^{t_2} u dt = \Phi_2 - \Phi_1 = \Delta B \times F$. Damit der Fluß in die Schleife eindringen kann, muß der Kreisstrom in dieser Schleife verschwinden und das Spannungszeitintegral durch Ohmschen Widerstand verbraucht werden. Dieser tritt in der Schleife auf, sobald der Fadenstrom an einer Stelle der Schleife den kritischen Wert i_c erreicht. Das Spannungszeitintegral wird dann bei dem Strom i_c verbraucht und die entstehende Wärme ist $\int_{t_1}^{t_2} i_c dt$. Für das ganze Leiterstück erhält man unter Voraussetzung, daß n sehr groß und die Abhängigkeit der kritischen Stromdichte j_c von der Feldstärke linear und die Feldstärke für das ganze Leiterstück gleich groß

ist, die Hysteresewärme $W_H = (B_2 - B_1) \cdot \frac{j_{c2} + j_{c1}}{2} \cdot \frac{h}{4} \cdot l \cdot b \cdot h$ (1)

Die mittlere Hysterese-Verlustleistung $P_H = \frac{\Delta B}{\Delta t} \cdot \frac{j_{c2} + j_{c1}}{2} \cdot \frac{h}{4} \cdot l \cdot b \cdot h$ (2)

Darin sind j_{c2} und j_{c1} die kritischen Stromdichten im Leiter bei den Feldstärken B_2 und B_1 . Das Produkt $l \times b \times h$ ist das Leitervolumen.

Man kann die Formel 1 auch schreiben

$$W_H = \Delta B \cdot \frac{I_{c2} + I_{c1}}{2} \cdot \frac{lh}{4} \quad (3)$$

Darin sind I_{c2} und I_{c1} die kritischen Stromstärken des ganzen Leiters bei den Feldstärken B_2 und B_1 .

Erregt man eine Spule vom Strom null bis zu dem kritischen Leiterstrom und dem entsprechenden Feldwert B_m , so ist die Hysteresearbeit

$$W_H = B_m \cdot \frac{I_{co} + I_{cm}}{2} \cdot \frac{lh}{4} \quad (4)$$

Die Wärme ist von der Zeit, in der die Feldänderung stattfindet, unabhängig. Die Hysterese-Verluste setzen ein, sobald die Feldstärke einen solchen Wert erreicht hat, daß der Kreisstrom der äußersten Schleife den kritischen Fadenstrom überschreitet. Bei großer Zahl n sind sie etwa umgekehrt proportional der Zeit der Erregung.

Bei Spulen mit gleichbleibendem Supraleiter-Querschnitt für die innerste und äußerste Lage ist für die äußeren Lagen der maximale Spulenstrom viel kleiner als der kritische Leiterstrom.

Das Spulenfeld dringt daher in die supraleitenden Schleifen nur zum Teil ein, es bleiben in den äußeren Lagen Kreisströme erhalten und die Hysterese-Verluste sind für die äußeren Lagen kleiner als nach der obigen Formel 2 berechnet.

Sind dagegen in den Schleifen auch ohne Erreichen des kritischen Fadenstromes geringe Ohmsche Widerstände enthalten, wie dies z.B. bei den später erwähnten Kompaktleitern der Fall ist, so dringt das Feld allmählich, lange nach dem Erreichen des Endwertes des Spulenstromes auch in das Innere der Leiter der äußeren Lagen ein. Dabei werden die zunächst ersparten Hysterese-Verluste wieder nachgeholt. Eine Folge dieser langsamen Änderung der Kreisströme und damit der magnetischen Leitfähigkeit des Leitervolumens ist eine Änderung der Feldform und Feldstärke der Spule trotz konstant gehaltenen Spulenstromes.

Die Formeln 1 und 2 gelten sowohl für einen einzelnen dünnen harten Supraleiter (wegen seiner Fadenstruktur), als auch für Kompaktleiter mit zahlreichen in Kupfer oder Aluminium eingebetteten supraleitenden Drähten, wenn man die supraleitenden Drähte an den Leiterenden auch supraleitend parallel schaltet. Ist dies nicht der Fall, sondern sind die einzelnen Drähte nur über den Ohmschen Widerstand des Matritzenmetalles parallel geschaltet, so wird schon vor Erreichen der kritischen Stromstärke jedes einzelnen Drahtes Magnetfluß in die Drahtschleifen eindringen und die Hysterese-Arbeit wird verkleinert, wobei eine zusätzliche Verlustleistung durch den Spannungsverbrauch bei einem konstanten Kreiswiderstand hinzukommt. Eine derartige Verlustleistung durch konstanten Widerstand entspricht einem Wirbelstrom-Verlust.

Untersucht man nun Spulen mit Kompaktleitern großer Leiterlänge, so zeigt sich, daß der Widerstand zwischen den einzelnen Drähten des Kompaktleiters, verursacht durch das normalleitende Matritzenmetall, mit der Leiterlänge abnimmt, während das in der Drahtschleife induzierte Spannungszeitintegral mit der Leiterlänge zunimmt.

Der während der Zeit der Feldänderung nach Art eines Wirbelstromverlustes verbrauchte Anteil der Schleifen- spannung nimmt also quadratisch mit der Leiterlänge ab. Zur Beurteilung der Aufteilung von Hystereseleistung und Wirbelstromleistung kann man die Zeitkonstante der Drahtschleife mit der Feldänderungszeit in Vergleich setzen. Ist die Zeitkonstante der Drahtschleife viel größer als die Feldänderungszeit, so tritt praktisch die volle Hysteresearbeit auf. Ist die Zeitkonstante viel kleiner als die Feldänderungszeit, so kann man die auftretenden Verluste nach Art von Wirbelstromverlusten berechnen, bei der die Feldänderungsspannung jeder Schleife in jedem Augenblick durch den Ohmschen Widerstand der Schleife verbraucht wird.

Die Wirbelstromverluste in einem Leiter nach Bild 1, bei dem die supraleitenden Fäden in ein normalleitendes Material eingebettet sind, kann man folgendermaßen berechnen:

Die in der Schleife induzierte Spannung ist $u = \frac{d\phi}{dt}$ und die in der Schleife erzeugte Verlustleistung ist $\frac{u^2}{R}$

Für den ganzen Leiter erhält man die Wirbelstromverlustleistung.

$$P_W = \left(\frac{\Delta B}{\Delta t}\right)^2 \frac{h^2}{\xi} \cdot \frac{1 \cdot b \cdot h}{12} \quad (5)$$

Die Wirbelstrom-Arbeit $W_W = \frac{(\Delta B)^2}{\Delta t} \cdot \frac{h^2}{9} \cdot \frac{l \cdot b \cdot h}{12}$ (6)

Der Vergleich der Formeln 2 und 5 zeigt, daß das Verhältnis von Wirbelstrom-zu Hysterese-Verlusten ist

$$\frac{P_W}{P_H} = \frac{\Delta B}{\Delta t} \cdot \frac{h}{3 \cdot \frac{j_{c1} + j_{c2}}{2}} = \frac{\text{Wirbelstromdichte am Leiterrand}}{3 \times \text{mittlere kritische Stromdichte}} \quad (7)$$

Bei den Wirbelstromverlusten wird die induzierte Spannung bei einer der momentan vorherrschenden Spannung proportionalen Stromdichte verbraten, bei den Hystereseverlusten bei einer von der Spannung unabhängigen kritischen Stromdichte.

Bei einem Kompaktleiter mit parallelen unverdrillten Supraleiterdrähten treten Hysterese und Wirbelstromverluste gleichzeitig auf. Die Wirbelstromverluste werden aber durch den Vorgang des Eindringens des Feldes in die supraleitenden Schleifen beeinflusst. Erst wenn die supraleitende Schleife wegen des Erreichens ihrer kritischen Stromdichte Fluß eindringen läßt, können auch im Matrizenmetall Wirbelstromverluste entstehen. Bei stufenweisem Eindringen des Feldes können sie also größer sein als beim gleichmäßigen Eindringen in den Leiter. Eine exakte Berechnung ist bei stufenweisem Eindringen des Feldes kaum möglich. Ein stufenweises Eindringen könnte dadurch entstehen, daß beim Erreichen der kritischen Stromdichte eine lokale Erwärmung des Supraleiters auf eine begrenzte Länge eintritt, wobei der kritische Strom der betreffenden Schleife stark absinkt und der Kreisstrom evtl. für einen Augenblick ganz verschwindet. Solche Vorgänge können je nach der Konstruktion der Spule und dem Aufbau des Supraleiters verschieden sein.

Wie die Formel 2 zeigt, entstehen in jedem harten Supraleiter Hysterese-Verluste. Es ist bekannt, daß diese bei den normalen

Supraleiterdrähten nicht kontinuierlich, sondern zum großen Teil in Form von sogenannten Flußsprüngen auftreten. Sie können wegen der damit verbundenen lokalen Erwärmung zur Transition des ganzen Drahtes führen und wurden lange Zeit durch die sogenannte Vollstabilisierung unschädlich gemacht. Die Formel 2 zeigt nun, daß die Hysterese-Verluste durch Verkleinern von h , also der Leiterdicke, in gleichem Maß verkleinert werden können. Man kann h so klein machen, daß die möglichen Flußsprünge nicht mehr imstande sind, die Leitertemperatur nennenswert zu erhöhen und eine Transition einzuleiten. Man erhält dann eigenstabile Leiter. Die Herstellung solcher dünnen Supraleiter ist aber nur innerhalb eines Matritzenmetalles technisch durchführbar. Man kann aber eine Vielzahl von einzelnen Supraleitern in einer gemeinsamen Matritze vorsehen, wenn man dafür sorgt, daß die einzelnen Supraleiter keine Schleifen bilden können, die einen nennenswerten Fluß umschließen. Dies erreicht man durch Verdrillung des Leiterbündels um seine eigene Achse und zwar mit einer so kleinen Steighöhe, daß die Zeitkonstante der Schleife von halber Steighöhe viel kleiner ist als die Außerregungszeit. Dann werden sich in diesem Bündelleiter hauptsächlich nur Wirbelstromverluste einstellen, die nach Formel 5 berechnet werden können. Hysterese-Verluste im Supraleiter sind dann nur noch mit der Leiterdicke der Einzelfäden zu berechnen. Bei kleinen Steighöhen ist der spezifische Widerstand der Formel 5 vielleicht mit einem Drittel bis einem Zehntel des spezifischen Widerstandes des Matritzenmetalles einzusetzen, weil die Wirbelstromschleife auch supraleitende Teilstrecken enthält. Die Zeitkonstante, die mit der Feldänderungszeit in Vergleich zu setzen ist, errechnet sich zu

$$T \approx \frac{\mu l^2}{- \rho F} \quad (8)$$

In dieser Formel ist l die Steighöhe, d der Leiterdurchmesser und a die Dicke des einzelnen supraleitenden Fadens.

Aus diesen Formeln und Zusammenhängen kann man folgende Folgerungen ziehen:

Für große Spulen, die wegen des großen Energieinhaltes auf außenliegende Widerstände geschaltet und schnell entregt werden müssen oder deren Feld aus sonstigen Gründen innerhalb von wenigen hundert Sekunden geändert werden muß, sind die Hysterese-Verluste in Einzel-Supraleiterdrähten mit Durchmessern über 0,5 mm und von Kompaktleitern mit mehreren in Metall eingebetteten unverdrillten Supraleiter-Drähten mit derartigen wirtschaftlichen und technischen Nachteilen verbunden, daß man auf verdrillte Leiter kleinen Durchmessers der Einzelader übergehen sollte. Auch bei den Niob-Zinn-Bändern sind die Hysterese-Verluste von Bedeutung. Ich empfehle daher für alle Anwendungen mit Leiterstromstärken über rd. 1000 A Seile mit voneinander isolierten verdrillten Adern. In solchen Seilen bilden die Adern miteinander keine Schleifen, die einen nennenswerten Fluß umschließen. Die Hysterese-Verluste reduzieren sich also auf die Hysterese-Verluste, die innerhalb jeder einzelnen Ader entstehen. Deshalb sollten die Supraleiter jeder einzelnen Ader einen möglichst kleinen Durchmesser haben. Aber auch bei Durchmessern bis herab zu 0,1 mm sind wegen der immer noch merkbaren Flußsprünge Stabilisierungs-Maßnahmen für jede Ader erforderlich. Wahrscheinlich ist es am wirtschaftlichsten, die einzelnen Adern aus eigenstabilen Bündelleitern aufzubauen, bei denen die einzelnen supraleitenden Fäden eine Dicke von weniger als 0,1 mm haben. Die einzelnen Adern müssen um ihre Achse mit kleiner Steighöhe verdrillt sein, damit die Schleifenzeitkonstante wesentlich kleiner als die Feldänderungszeit ist. Bei Leitern, die schnellen Feldänderungen ausgesetzt sind, sollte das Matritzenmetall der Seiladern einen hohen spezifischen Widerstand haben.

Nachstehend will ich die Verluste für einige Beispiele nach den oben angegebenen Formeln berechnen:

1. Supraleiterdraht aus Nb-Ti mit 0,34 mm Durchmesser, 0,09 mm² Querschnitt für 90 A bei 50 kG. $j_{c0} = \text{ca. } 8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $j_{c50} = 10^5 \text{ A/cm}^2$. Die Feldänderung soll in 100 s von 0 auf 50 kG vorgenommen werden. Dann ist $\Delta B / \Delta t = 5 \times 10^{-6} \text{ V/cm}^2$. Nach Formel 2 ist der Hysterese-Verlust $P_H = 2 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^3$. Die Energie eines Flußsprunges, der die Hystereseverluste von 1 s Dauer auf einmal entladet, würde die Temperatur des Supraleiters von 4,2°K auf 12°K erhöhen und damit eine Transition auslösen, wenn kein Stabilisierungsmetall den Strom aufnehmen kann.

Die Wirbelstromverluste innerhalb des Drahtes ohne Stabilisierungsmetall sind dagegen sehr klein, etwa 10^{-10} W/cm^3 .

Versieht man den Supraleiter mit einem hochreinen Kupfermantel, sodaß der Durchmesser 0,5 mm beträgt, so steigen die Wirbelstromverluste auf etwa 10^{-8} W/cm^3 . Wegen der Speicherung der Hysterese-Arbeit und Entladung in Flußsprüngen ist dieser Leiter auch bei langsamer Auferregung auf eine Vollstabilisierung angewiesen.

2. Kompaktleiter, wie bei der Cern-Blasen-kammer verwendet, für 6,5 kA bei 50 kG. Der Leiter besteht aus Flachkupfer von $61 \times 3 \text{ mm} = 1,83 \text{ cm}^2$ mit etwa 200 eingebetteten Supraleiteradern aus Nb-Ti.

$j_{c0\text{eff}} = \text{ca. } 3 \times 10^4 \text{ A cm}^2$, $j_{c38\text{eff}} = \text{ca. } 6 \times 10^3 \text{ A cm}^2$
Bei einer Entregung in 200 s ist $\Delta B / \Delta t = 1,9 \times 10^{-6} \text{ V/cm}^2$.

Die Hysterese-Verluste ergeben sich zu $P_H = 5,2 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^3$ und die Wirbelstromverluste $P_W = \text{ca. } 9,5 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^3$.

Die Hysterese-Verluste würden innerhalb von 1 s die Temperatur des Leiters von 4,2 auf 13°K erhöhen, sodaß nur eine intensive Kühlung durch flüssiges Helium eine Transition des ganzen Leiters verhindern kann.

3. Leiterseil für 6,5 kA bei 50 kG, entsprechend dem Kompaktleiter nach 2. Das Seil besteht aus 35 Adern von 0,8 mm Durchmesser. Jede Ader hat 25 Nb-Ti-Fäden von je 0,07 mm Durchmesser, eingebettet in hochreines Kupfer und ist um seine eigene Achse mit 5 cm Steighöhe verdrillt. Der gesamte Querschnitt ist ca. 18 mm².

$$j_{c0 \text{ eff}} = \text{ca. } 10^5 \text{ A/cm}^2, j_{c 50 \text{ eff}} = \text{ca. } 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$$

Feldänderung um 50 kG in 200 s ergibt $\Delta B/\Delta t = 2,5 \times 10^{-6} \text{ V/cm}^2$

$$P_H = 3 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^3$$

$$P_W = 8 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^3$$

Die Verluste des Seiles sind also wesentlich kleiner als des Kompaktleiters nach 2.

4. Leiterseil für 10 kA bei 100 kG, wie beim Tokamak-Beispiel eingesetzt. Das Seil besitzt 217 voneinander isolierte Adern von 0,83 mm Durchmesser mit je 25 Fäden von 0,07 mm Durchmesser. Das Matrizenmetall der Adern ist hochreines Kupfer, die Adern sind mit einer Steigung von 5 cm um die Achsen verdrillt. Der gesamte Seilquerschnitt ist 117 mm².

$$j_{c0 \text{ eff}} = \text{ca. } 10^5 \text{ A/cm}^2, j_{c 100 \text{ eff}} = \text{ca. } 10^4 \text{ A/cm}^2.$$
$$\Delta B/\Delta t = 5 \times 10^{-6} \text{ V/cm}^2$$
$$P_H = \text{ca. } 4,8 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^3 \text{ und } P_W = \text{ca. } 2 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^3$$

Bei einem solchen Seil besteht auch die Möglichkeit, die Feldänderung in einer Sekunde durchzuführen.

P_H = etwa 10^{-1} W/cm^3 und P_W ist etwa $8 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^3$. Eine solche Wärmeleistung kann ohne unzulässige Übertemperatur nur abgeführt werden, wenn zwischen den Adern Kühlmittel zirkulieren. Die Adern dürfen dann keine dichte Isolation haben. So schnelle Feldänderungen sind allerdings nur bei Spulen kleinen Energie-Inhaltes möglich, weil sonst eine zu hohe Erregerspannung notwendig wäre.

5. Niob-Zinn-Band von GE für W 6 mit 400 A bei 45 kG
2 Nb₃ - Sn - Schichten von 12,7 mm Breite mit Kupferauf-
lage, Gesamtdicke 0,06 mm, Querschnitt 0,8 mm².

$$j_{c0 \text{ eff}} = \text{ca. } 8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2, j_{c 45 \text{ eff}} = \text{ca. } 5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2,$$
$$\Delta B/\Delta t = 1,5 \times 10^{-6} \text{ V/cm}^2, \text{ bei Auferregung in } 300 \text{ s.}$$
$$P_H = \text{ca. } 3,1 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^3, P_W = \text{ca. } 0,25 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^3$$

Ein Flußsprung, der die Hysterese-Energie von einer Sekunde enthält, würde die Leitertemperatur von $4,2^{\circ}\text{K}$ auf $11,5^{\circ}\text{K}$ erhöhen.

Die Wärme muß also schnell abgeleitet werden, um eine Transition zu verhindern. Es ist fraglich, ob die Wärmeableitung zwischen Band und Wärmespeicher dafür ausreicht.

Bei Verwendung eines gleichen Bandes von 6,4 mm Breite gehen die Hysterese-Verluste auf die Hälfte zurück. Durch zusätzliches Verlängern der Erregungszeit auf 10 Minuten werden sie nochmals halbiert und betragen dann $0,8 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^3$. Ob das einen sicheren Betrieb ergibt ist fraglich.

6. Niob-Zinn-Bündelleiter nach Professor Saur, um die Achse verdrillt. Der Leiterdurchmesser ist 0,7 mm. Er besteht aus 522 Fäden von ca. 0,03 mm Dicke, der Querschnitt ist $0,38 \text{ mm}^2$ und reicht für etwa 200 A bei 45 kG aus. Er entspricht also in der Leistung dem 6,4 mm Niob-Band des Beispiels 5. Wenn man für den Bündelleiter annehmen dürfte, daß die Niob-Drähte an den Berührungslinien keine Diffusionsschicht tragen, weil das Zinn beim Ziehen des Drahtes in die Zwickel gedrängt wird, könnte man etwa folgendermaßen rechnen:

$$j_{c0 \text{ eff}} = \text{ca. } 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2, j_{c 45 \text{ eff}} = \text{ca. } 2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$$
$$\Delta B / \Delta t = 1,5 \times 10^{-6} \text{ V/cm}^2$$
$$P_H = \text{ca. } 3,4 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^3, P_W = \text{ca. } 10^{-7} \text{ W/cm}^3$$

Wenn die obige Voraussetzung richtig ist, sind wohl wegen der geringen Ausdehnung der einzelnen supraleitenden Fäden keine Flußsprünge zu erwarten. Die Hysterese-Verluste erhöhen die Temperatur des Leiters um etwa $2 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{K/s}$. Es bleibt dann genügend Zeit, die Wärme abzuführen. Dann liegt der Vorteil des Bündelleiters gegenüber dem Band nicht so sehr in der höheren kritischen Stromdichte bei sehr hohen Feldstärken, sondern in den geringeren Hysterese-Verlusten bei Feldänderungen. Diesen Vorteil hat Prof. Saur bisher in seinen Veröffentlichungen nicht erwähnt und vielleicht auch nicht erkannt. Ob er wirklich vorhanden ist und die obige Voraussetzung stimmt, müßte durch Versuche bestätigt werden. Andernfalls könnte ein geeigneter Bündelleiter durch Ziehen eines Drahtes verwirklicht werden, bei dem vorher das Zinn in Löcher eingefüllt wird, die in einen massiven Niob-Block gebohrt wurden.

7. Schließlich soll ein Supraleiter für technischen Wechselstrom von 50 Hz betrachtet werden. Die Leiterformen der Beispiele 1 - 6 hätten dann 2×10^4 größere Hysterese-Verluste und 4×10^8 größere Wirbelstromverluste, wenn die Feldstärken beibehalten werden. Derartige Wärmemengen könnten nicht abgeführt werden. Für 50 Hz müssen daher die Hysterese-Verluste mit Hilfe von Verdrillung von Bündelleitern zum größten Teil in Wirbelstrom-Verluste verwandelt und die Wirbelstrom-Verluste durch Verwendung von hochohmigem Matrizenmetall und sehr geringe Aderdicke herabgesetzt werden. Die Zeitkonstante der Schleife im Bündelleiter muß unter 10^{-3} s verringert werden, um die Hysterese-Verluste des Supraleiter-Bündels in die wesentlich kleineren Wirbelstrom-Verluste zu überführen. Das scheint möglich. Nach Formel 8 erhält man für $l = 1$ cm, $d = 0,1$ mm, $a = 0,01$ mm und $\varrho = 10^{-5} \Omega \text{cm}$ die Zeitkonstante $T = 3 \times 10^{-5}$ s.

Hysterese-Verluste treten also nur noch innerhalb der 0,01 mm dicken Fäden auf. Bei einer Änderung des Feldes von 5000 G in - 5000 G ist $\Delta B/\Delta t = 10^{-2} \text{ V/cm}^2$.

$j_{c0 \text{ eff}} \cong j_{c5 \text{ eff}} \cong 0,6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ erhält man $P_H = \text{ca. } 1,5 \text{ W/cm}^3$ und $P_W = \text{ca. } 2,5 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^3$. Ob sich Bündelleiter mit so dünnen Supraleiterfäden wirtschaftlich herstellen lassen, ist noch nicht bekannt. Davon wird es abhängen, ob man harte Supraleiter für Transformatoren, Wechselstrom-Maschinen, Schalter, Kabel usw. einsetzen kann.