Eine supraleitende Gleichstrommaschine

A Superconducting DC Power Source

W. Kafka

IPP 4/90 September 1971

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Eine supraleitende Gleichstrommaschine

A Superconducting DC Power Source

W. Kafka

IPP 4/90 September 1971

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

W. Kafka

Eine supraleitende Gleichstrom-maschine

A Superconducting DC Power Source

IPP 4/90

September 1971

Abstract

A superconducting DC power source for superconducting coils is described and its losses are compared with these of DC sources working at room temperature. It consists of a stationary superconducting winding and a rotating field magnet. The commutator usually needed in DC machines is replaced by power cryotrons controlled by the rotating field. Commutation losses are largely avoided by, for example, switch chokes. The device works at very low frequencies, and so hard superconductors can be used. Economy of operation is governed by the losses occuring at low temperature. Losses due to hysteresis, self-field hysteresis, and eddy currents can be kept sufficiently low by using finely subdivided, interlaced filament conductors. It is then the cryotron losses that are crucial. They can only be reduced by means of longer cryotron conductors and appropriate superconductor material. Formulae for calculating the losses and the most important machine data are given. Calculations are made for a machine with 20 kA, 0.5 V, and 10 kW as example.

W. Kafka

Eine supraleitende Gleichstrommaschine

A Superconducting DC Power Source

IPP 4/90

September 1971

Abstract

Eine supraleitende Gleichstromquelle zur Speisung von supraleitenden Wicklungen wird beschrieben und hinsichtlich Verlusten den Gleichstromquellen auf Raumtemperatur gegenübergestellt. Sie besteht aus einer ruhenden supraleitenden Wicklung und einem rotierenden Polrad. Den sonst bei Gleichstrommaschinen erforderlichen Kommutator ersetzen durch das Polrad gesteuerte Leistungskryotrons. Durch Kommutierungshilfen, wie Schaltdrosseln, werden die Kommutierungsverluste weitgehend vermieden. Die Maschine arbeitet mit sehr niedriger Frequenz, so daß harte Supraleiter verwendbar sind. Für die Wirtschaftlichkeit sind die auf niedriger Temperatur entstehenden Verluste ausschlaggebend. Bei Verwendung von fein unterteilten und geflochtenen Filamentleitern können die Verluste durch Hysterese, Eigenfeldhysterese und Wirbelströme genügend klein gehalten werden. Dann sind die Sperrverluste in den Kryotrons maßgebend. Diese können nur durch größere Kryotronleiterlängen und Wahl des Supraleitermaterials herabgesetzt werden. Formeln für die Berechnung der Verluste und der wichtigsten Maschinengrößen werden aufgestellt. Als Beispiel wird eine Maschine für 20 kA, 0 5 V, 10 kW durchgerechnet.

Inhalt

1. Einleitung

2. Beschreibung der Maschine

3. Bemessungsformeln

4. Hystereseverluste durch das in die Supraleiter eindringende Polfeld B

5. Die Eigenfeldhysterese in den verdrillten Adern

6. Die Wirbelstromverluste in den verdrillten Adern

7. Die Sperrverluste in den Kryotrons

8. Die Kommutierungsverluste

9. Verlustbilanz

10. Die Schaltdrosseln

11. Der Aufwand an Supraleitern

12. Die Kupferwicklungen im Polrad

13. Das Polrad

14. Anwendungsbereich

15. Beispiel einer supraleitenden Maschine

16. Literatur

1. Einleitung

Zur Erregung von supraleitenden Magnetwicklungen und induktiven Energiespeichern würde eine supraleitende Gleichstromquelle gegenüber den bisher allgemein eingesetzten, auf Raumtemperatur arbeitenden Gleichrichtern den Vorteil bringen, daß die Wärmeeinströmung durch die beiden Stromzuführungen in Höhe von etwa 3×10^{-3} W/A entfallen könnte. Entsprechende Vorschläge sind schon vor Jahren gemacht worden:

a) Flußpumpen nach Volger und Admiraal[1], Wipf[2] und Laquer[3] mit normalleitenden Bereichen in einem flächenhaften Supraleiter, erzeugt durch bewegte Magnetpole oder Wärmesteuerung. Untersuchungen[4] zeigten, daß derartige Apparate mit erheblichen Verlusten auf niedriger Temperatur verbunden sind, die lediglich bei Ausgangsspannungen von mV kleiner sind als die üblichen Zuführungsverluste. Es handelt sich hier um Sperrverluste im normalleitend gewordenen Supraleiter, $P_S \sim U^2/R_S$ und um Kommutierungsverluste beim Verlagern der Ströme von einer Stelle zur anderen, $P_K \sim I^2 \times L$. Man kann durch Bemessen von R_S und L immer nur die eine Verlustart auf Kosten der anderen verkleinern. Diese Apparate sind daher aus der Praxis verschwunden.

b) Supraleitende Gleichrichter nach Buchhold[5]. Es handelt sich eigentlich um Kontakt-Umformer[6], bei denen die synchron vom Netz gesteuerten mechanischen Kontakte durch vom Netz magnetisch gesteuerte Leistungskryotrons ersetzt sind. Wie beim Kontaktumformer sind Schaltdrosseln eingesetzt, die eine stromlose Pause erzeugen, in der die Kommutierung durch die Kryotrons vorgenommen wird. Dadurch können die Kommutierungsverluste weitgehend vermieden werden und man ist frei, die Kryotrons so zu bemessen, daß auch die Sperrverluste relativ klein sind. Nachteilig sind hier die in den Supraleitern bei Feld- und Stromänderungen entstehenden Verluste, die mit der Frequenz steigen und den Übergang zu niedrigen Betriebsfrequenzen nahelegen. Das

bedingt aber wieder größere Transformatoren und Drosseln und damit wieder höhere Verluste. Dies scheint der Grund zu sein, daß auch diese Gleichrichter sich in der Praxis nicht durchsetzen konnten.

c) Vorschlag von E. Grünwald und W. Kafka[7] für eine supraleitende Gleichstrommaschine. Sie besteht aus einer im Raum still-stehenden supraleitenden Wicklung und aus einem rotierenden Polrad, bei der Leistungskryotrons durch das Polrad gesteuert werden und den Kommutator ersetzen, und bei der die Kommutierungsverluste durch Kommutierungshilfen ebenfalls weitgehend vermieden sind. Gegenüber den Gleichrichtern nach b) bietet diese Maschine die Möglichkeit, mit ganz niedrigen Frequenzen zu arbeiten, so daß harte Supraleiter Verwendung finden können, ohne nennenswerte zusätzliche Verluste in Kauf nehmen zu müssen. Bis jetzt scheint diese Maschine nicht gebaut worden zu sein, was wohl damit zusammenhängt, daß die bis heute auftretenden Anforderungen mit auf Raumtemperatur arbeitenden Gleichrichtern annähernd befriedigend erfüllt werden konnten.

Nachstehend soll diese Maschine beschrieben, Bemessungsformeln entwickelt und für typische Anwendungen die Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

2. Beschreibung der Maschine

Bild 1) zeigt die supraleitende Ankerwicklung einer einpoligen Maschine. Auf die gesamte Polteilung τ_p sind z Zweige räumlich gleichmäßig verteilt und parallel geschaltet. Jeder Zweig besteht aus w in Reihe geschalteten Windungen. Im Bild ist w = 1. Jede Windung enthält eine vom Polrad induzierte Leiterstrecke l_i aus einem Supraleiter, der die Feldstärke des Polrades unter Vollaststrom aushält, eine Kryotronstrecke l_s

aus einem Supraleiter, der unter der Polrad-Feldstärke auch bei Strombelastung null normalleitend wird, und den supraleitenden Stirnverbindungen, die außerhalb der Polrad-Feldstärke liegen. Die Strecke l_s ist im allgemeinen wesentlich größer als die Strecke l_i. Sie ist deshalb als Zickzack-Linie gezeichnet. Die Parallelschaltung der z Zweige erfolgt unter Einschaltung je einer Schaltdrossel. Sie ist im Bild als Rohrkern dargestellt, der den Supraleiter mit seiner Wärmeisolation auf Raumtemperatur umschließt. Die Vormagnetisierungs-Wicklung der Rohrkerne ist im Bild nicht dargestellt. Der schraffierte, in einer Augenblickslage eingezeichnete Magnetpol hat eine Breite b_p in Umfangsrichtung, die etwa um die Kryotronbreite kleiner ist als die halbe Polteilung.

Bild 2) zeigt die Polfläche $b_p \times l_i$, die an der Ankerwicklung vorbeibewegt wird,mit den zugehörigen Wicklungen, nämlich einer Kompensationswicklung zur Kompensation der Anker-Rückwirkung und einer Erregerwicklung. Die Kompensationswicklung, die die Durchflutung der Ankerwicklung in entgegengesetzter Richtung aufbringen muß, wird zweckmäßig in die Polschuhe des Magnetpols eingebettet und in mindestens so viele Stäbe unterteilt, als Ankerwicklungszweige auf die Polfläche entfallen. Die Rückleitungen für die Kompensationswicklungsstäbe liegen in den Pollücken zu beiden Seiten des Poles, um die Stirnverbindungen möglichst zu verkürzen. Die Kompensationswicklung liegt auf Raumtemperatur und besteht aus Kupfer. Sie wird bei kleinen Maschinen mit Luft und bei großen Leistungen mit Wasser gekühlt. Die Speisung der Kompensationswicklung erfolgt über mitrotierende Stromrichter aus einem Drehstrom-Hilfsnetz, das ohne Schleifringe induktiv auf das Polrad übertragen werden kann. Der Strom der Kompensationswicklung wird durch eine schnelle Steuerung oder Regelung dem über Gleichstromwandler gemessenen Ankerstrom genau angepaßt.

Die Erregerwicklung umschließt den Magnetpol möglichst nahe dem Luftspalt oberhalb der Kompensationswicklung. Sie besteht eben-

falls aus Kupfer und wird auch durch Stromrichter gespeist, die von einer Spannungsregel-Einrichtung beeinflußt werden. Beide Wicklungen sind in 2 Hälften unterteilt und zu beiden Seiten des Luftspaltes angeordnet.

Die Bilder 1) und 2) zeigen die Wicklungen einer einpoligen Ausführung. Werden mehrpolige Ausführungen gewählt, so werden die Ankerwicklungen und die Kompensationswicklungen der Pole jeweils in Reihe geschaltet. Die Pole haben dabei die gleiche Polarität, so daß sich die Spannungen der Ankerwicklungen addieren. Erregt man die Pole entgegengesetzt, so subtrahieren sich die beiden Ankerspannungen, und man kann auf diese Weise die Summenspannung null und auch Zwischenspannungen bei hoher Polfeldstärke einstellen. Durch Verminderung der Magnetpol-Feldstärke einer einpoligen Maschine läßt sich die Spannung nur in einem gewissen Bereich ändern, denn die Polfeldstärke darf nie unter den Wert sinken, der notwendig ist, um die Kryotrons zu sperren. Eine langsame Spannungsregelung ist durch Verändern der Drehzahl des Polrades möglich.

Bild 3) zeigt als Beispiel, wie die Wicklungen und das Polrad angeordnet sein können. Die Ankerwicklung ist hier in einem ringförmigen Kryostaten untergebracht, der sich in dem senkrechten Luftspalt δ des zangenförmigen Magnetpoles befindet. Der Magnetfluß schließt sich von links nach rechts durch die Ankerwicklung und unterhalb des Kryostaten von rechts nach links. Kompensations- und Erreger-Wicklung sitzen fest auf dem Magnetpol, der durch Arme mit der senkrechten Antriebswelle verbunden ist. Bei einpoliger Ausführung muß das Polgewicht durch entsprechende unmagnetische Gegengewichte ausgeglichen werden. Es ist wahrscheinlich günstig, den Magnetpol aus isolierten, evtl. keilförmigen Blechen aufzubauen, um bei schnellen Feldänderungen Wirbelströme im Eisen klein zu halten. Der Luftspalt δ sollte selbst auf Kosten einer größeren Wärmeeinströmung ins Innere des Kryostaten klein gehalten werden, um das Ausstreuen der

Feldlinien an den Polkanten möglichst zu verhindern und um die Erregerleistung klein zu halten.

Der Kryostat mit der Ankerwicklung wird von oben festgehalten. Die Ankerwicklung muß gegenüber dem Kryostaten abgestützt sein, weil auf sie bedeutende azimutale Kräfte ausgeübt werden. Die Schaltdrosseln sind im Bild 3 als Rohrkerne[8] dargestellt. Das dürfte nur bei niedrigen Spannungen und hohen Stromstärken der einzelnen Zweige die günstigste Bauart sein, weil sie eine einfache Wärmeisolierung zwischen Supraleiter und Schaltdrosseleisen ermöglicht. Bei höheren Spannungen wird man die Drosselwicklung als wärmeisolierte Zylinderspule und das Drosseleisen als U-Kern oder Topf-Kern ausbilden. Um die Magnetisierungsleistung und die dafür erforderliche Thyristor-Einrichtung klein zu halten, wird es sich empfehlen, für das Drosseleisen eine 50 %ige Nickel-Eisen-Legierung, z.B. Permenorm 5000 Z, zu verwenden[9].

3. Bemessungsformeln

Nachstehend werden Formeln für die Bemessung der Maschine und die Bestimmung ihrer Verluste zusammengestellt, um den Einfluß der verschiedenen Parameter überschauen zu können. Die Formeln sind nur angenähert, sie vernachlässigen den induktiven Spannungsabfall, die Streuung des Polfeldes und die Oberwellen im Feld, in der Spannung und im Strom. Für die genaue Vorausberechnung einer großen Maschine müßten weitere eingehende Untersuchungen durchgeführt werden.

Nennleistung $P = I \cdot U \approx I \cdot U_o$

Leerlaufspannung $U_o = v \cdot B \cdot w \cdot p \cdot l_i = 2\pi \cdot R \cdot n \cdot B \cdot w \cdot p \cdot l_i$

R ist der Kreisradius der Ankerwicklung

w ist die Zahl der in Reihe liegenden Windungen je Zweig und Pol
z ist die Zahl der parallelen Zweige je Polteilung
v ist die Relativgeschwindigkeit des Magnetfeldes gegenüber der Ankerwicklung, $v = 2\pi R \cdot n$
n ist die Drehzahl des Polrades je Sekunde
p ist die Polzahl, f ist die Frequenz $f = n \cdot p$
B ist die Flußdichte an der Ankerwicklung, also im Luftspalt des Magnetpoles

Vereinfachend wird nun angenommen, daß von den z Zweigen je Polteilung z/2 den Strom I führen, wobei der Strom sich gleichmäßig verteilt, ferner daß z/2 Zweige durch die Kryotrons gesperrt sind.

Für die weitere Berechnung wird eine Supraleiterbauart zugrundegelegt, bei der die Kryotrons und die induzierten Leiter gleichen Querschnitt und gleiche kritische Stromdichte, jedoch verschiedene kritische Feldstärken haben, was beispielsweise durch verschiedene Betriebstemperaturen des gleichen Leitermaterials erreichbar ist.

q_{SL} ist der Supraleiterquerschnitt eines Zweiges. Dann ist
der Vollaststrom $I = q_{SL} \cdot J_{Kr} \cdot z/2$
$P = q_{SL} \cdot J_{Kr} \; z/2 \cdot v \cdot B \cdot w \cdot p \cdot l_i$

Für wirtschaftliche Betrachtungen interessieren nun das Verhältnis der Verluste zur Nutzleistung, die Größe der Schaltdrosseln, die Magnetisierungsleistung der Schaltdrosseln, das Gewicht der Supraleiter als Anhaltspunkt für ihre Kosten, die Kupferverluste und die Kupfer- und Eisen-Gewichte.

Die Verluste der Maschine auf niedriger Temperatur setzen sich aus folgenden Teilverlusten zusammen[10]:

4. Hystereseverluste durch das in die Supraleiter eindringende Polfeld B.

Bezogen auf die Volumeneinheit sind sie $P'_H = 2\, f \triangle B \cdot J_{Kr} \cdot h/4$ $\triangle B$ kann = B gesetzt werden. h ist etwa der Durchmesser der Filamente, wenn der Supraleiter aus verdrillten Vielkernleitern besteht. Als Leitervolumen kann man die Summe aus induzierten und einem Bruchteil β der Kryotron-Supraleiter einsetzen, wogegen die Stirnverbindungen wohl außer acht gelassen werden können, weil sie außerhalb des Polfeldes liegen. Das Volumen für die Hystereseverluste ist also $z \cdot w \cdot p \cdot l_i\ (1 + \beta b) \cdot q_{SL}$. b ist dabei das Verhältnis von Kryotronlänge zu induzierter Länge, $b = l_S/l_i$, β berücksichtigt, daß beim Kryotron die mittlere kritische Stromdichte kleiner als J_{Kr} ist.

$$\frac{P_H}{P} \cong \frac{p \cdot h \cdot (1+\beta b)}{2\pi \cdot R} \qquad (1)$$

5. Die Eigenfeldhysterese in den verdrillten Adern

Die Eigenfeldverluste in einem Supraleiter entstehen in den einzelnen Adern, die aus den Filamenten verdrillt, aber nicht transponiert sind. Wenn der Gesamtsupraleiter aus transponierten Adern zusammengesetzt ist, ist für die Eigenverluste nur der Aderstrom einzusetzen. Auf die Volumeneinheit bezogen sind sie $P'_{HE} = 2\, f \cdot I_a \cdot J_{Kr} \cdot \mu/16\pi$.

I_a ist der Strom der Ader, die lediglich verdrillte Filamente enthält. Für die Eigenfeldverluste muß man die gesamte Supraleiterlänge einschließlich Stirnverbindungen und Kryotron einsetzen. Rechnet man die Länge der Stirnverbindungen je Windung zu $a \cdot l_i$, so erhält man

$$\frac{P_{HE}}{P} \cong \frac{p \cdot I_a \mu \cdot (1+a+b)}{8\pi^2 \cdot R \cdot B} \qquad (2)$$

6. Die Wirbelstromverluste in den verdrillten Adern

Auf die Volumeneinheit bezogen sind die Wirbelstromverluste

$$P'_W = \frac{(\Delta B)^2 \cdot 2 f d_L^2}{12 \varrho \Delta t} \left\{ \frac{\varepsilon^2 \sqrt{\alpha+1}}{\xi(\sqrt{\alpha+1}-1} + \frac{\alpha}{\alpha+1} \right\}$$

$$\varepsilon = \frac{\ell_V}{d_L} \quad , \quad \alpha = \frac{q_{SL}}{q_M}$$

Δt ist die Zeit, in der das Magnetfeld für jeden einzelnen Leiter von null auf den Endwert ansteigt. Für eine sprunghafte Änderung der Induktion, die an sich hier für die Entwicklung der Formeln zugrundegelegt wurde, wäre die Zeit null, was unendlich hohe Wirbelstromverluste ergäbe. In Wirklichkeit kann man wegen der Streuung des Feldes an der Polkante vielleicht für $\Delta t = \frac{d}{2 \pi R n}$ zugrundelegen.

$$\frac{P_W}{P} \cong \frac{B \cdot n \cdot p \cdot (1+b) d_L^2}{6 \varrho \cdot J_{Kr}} \cdot \left\{ \frac{\varepsilon^2 \sqrt{\alpha+1}}{\xi(\sqrt{\alpha+1}-1} + \frac{\alpha}{\alpha+1} \right\} \quad (3)$$

7. Die Sperrverluste in den Kryotrons

$$P_S = \frac{U_S^2}{R_S} \cdot \frac{T_S}{T} \cdot z \cdot w \cdot p \quad , \quad T_S \cong \frac{T}{2} \quad , \quad T = \frac{1}{np}$$

$$U_S \cong \frac{2 U_0}{w \cdot p} \cdot \left[1 + \frac{2 T_D}{T} \right] , \quad T_D = \text{stromlose Pause durch Schaltdrossel}$$

$$R_S = \varrho_S \frac{\ell_i \cdot b}{q_{SL}}$$

$$\frac{P_S}{P} \cong \frac{8 \pi \cdot R \cdot n \cdot B \left[1 + \frac{2 T_D}{T} \right]^2}{\varrho_S \cdot J_{Kr} \cdot b} \cong \frac{4 U_0 \left[1 + \frac{2 T_D}{T} \right]^2}{w \cdot p \cdot \ell_i \cdot b \cdot \varrho_S \cdot J_{Kr}} \quad (4)$$

8. Die Kommutierungsverluste

Die Kommutierungsverluste je Windung $P_K = f \cdot L_W \cdot I_K^2/2$ entstehen im Kryotron, wenn im Augenblick, wo dieses vom supralei-

leitenden Zustand in den normalleitenden übergeführt wird, also der Widerstand R_S auftritt, ein Strom I_K in der Windung fließt, der größer ist als der Strom $I_S = U_S/R_S$. Ist der Strom I_K kleiner als der Sperrstrom I_S und hat er die gleiche Richtung wie dieser, so ist der Kommutierungsverlust null. Es ist also Aufgabe der Kommutierungshilfen, diese Bedingung zumindest im stationären Betrieb bei allen Belastungsströmen und allen Ausgangsspannungen zu erfüllen. Die vorgesehenen Schaltdrosseln könnten durch entsprechende Vormagnetisierung diese Bedingung einhalten; dann müßte aber die stromlose Pause sehr groß sein, was wahrscheinlich zumindest bei höheren Spannungen zu hohe Kosten der Schaltdrosseln und ihrer Rückmagnetisierungs-Einrichtung bedingen würde.

Durch Beeinflussung des Polfeldes mit Hilfe einer bestimmten Ausbildung der Kompensationswicklung in azimutaler Richtung und evtl. bestimmte Anpassung des Stromes in der Kompensationswicklung an die Belastung kann man wahrscheinlich erreichen, daß der Windungsstrom jedes Zweiges bei verschiedenen Belastungen und Spannungen genau bei einer bestimmten Lage des Polrades zu null wird. Dann genügt eine sehr kurze, durch die Schaltdrosseln erzwungene stromlose Pause.

9. Verlustbilanz

Bei Betrachtung der verschiedenen Verlustanteile erkennt man, daß die Verluste nach den Formeln (1), (2) und (3) durch den Aufbau des Supraleiters verändert werden können. Durch Wahl dünner Filamente, also sehr kleines h, hält man die Hystereseverluste niedrig. Durch Verminderung des Aderstromes I_a, also ein Geflecht sehr dünner Adern, vermindert man die Eigenfeldhysterese. Durch Verkleinerung der Verdrillungslänge l_V und Vergrößerung des spezifischen Widerstandes des Matritzenmetalls

können die Wirbelstromverluste gesenkt werden. Die Sperrverluste nach Formel (4) dagegen können nur durch Vergrößerung des Produktes von $\varrho_S \times J_{Kr}$, also physikalische Eigenschaften des Kryotronleiter-Materials und Vergrößerung der Kryotronlänge (b), vermindert werden. Die Vergrößerung von b verteuert aber die Maschine. Der Einfluß von Polzahl p, Windungszahl w und Zahl der Zweige z läßt sich aus den Formeln entnehmen. Vermutlich wird es zweckmäßig sein, die Polzahl möglichst klein, also 1, zu wählen, wenn keine Spannungsregelung erforderlich ist, und p = 2 zu wählen, wenn die Spannung schnell geändert werden soll.

Die Größe B ist durch den Sättigungsknick des Poleisens nach oben begrenzt. Man erhält damit $B \cong 1{,}5$ T. Höhere Werte geben große Polstreuung, niedrige nützen das Eisen nicht aus, senken aber die Erregerleistung. Es wird sich nicht lohnen, ein Eisen mit besonders hohem Sättigungsknick vorzusehen, wenn es wesentlich höhere Kosten verursacht.

10. Die Schaltdrosseln

Die Zahl der Schaltdrosseln entspricht der Zahl der parallelen Zweige z. Die Größe jeder Drossel ist durch den Strom und das Spannungs-Zeitintegral = $w_D \cdot \phi_D$ gegeben. Der Strom jeder Drossel $I_D = 2\ I/z$. Das Spannungs-Zeitintegral ist $2\ U_o \cdot T_D$. Darin ist T_D die stromlose Pause. Die Erfahrung wird erst zeigen müssen, auf welche kleinsten Werte diese Zeit herabgesetzt werden kann. Wahrscheinlich wird T_D mehrere ms betragen. Baut man die Drossel als Einwindungsdrossel mit einem den Supraleiter umschließenden Rohrkern, so ist das Gewicht des Rohrkerns die Größe, die die Kosten der Drossel bestimmt. Der Innendurchmesser des Rohrkerns r_i ist durch den Außendurchmesser des den Supraleiter umgebenden Kryostaten festgelegt. Wenn der Außendurchmesser des Rohrkerns $r_a = 2\ r_i$ gewählt wird, ist der Eisen-

querschnitt $q_e = l_D \times r_i = \phi_D/2\ B_S = U_o \cdot T_D/B_S$. B_S beträgt für 50 % Nickel-Eisen 1,4 T.

Das Eisengewicht aller Schaltdrosseln G_{ED} =

$$= \gamma\ 3\pi \cdot r_i \cdot z \cdot U_o\ T_D/B_S. \qquad (5)$$

Die Rückmagnetisierungsleistung je Drossel ergibt sich aus der Rückmagnetisierungsspannung U_{DR} und dem Rückmagnetisierungsstrom I_{DR}.

$$U_{DR} = 2\ U_o \cdot T_D/T \qquad (6)$$

$$I_{DR} = 2\ U_o/R_S + 8\ \Delta H_D\ r_i \qquad (7)$$

ΔH_D ist die Breite der dynamischen Schleife.

Die Rückmagnetisierungsleistung wird abhängig von der Pollage über einen Thyristor aus einer Gleichstromquelle auf die Rückmagnetisierungswicklung aufgeschaltet, wobei man durch Wahl der Windungszahl Strom und Spannung wählen kann.

11. Der Aufwand an Supraleitern

Das Gewicht $G_{SL} = \gamma_{SL} \cdot q_{SL} \cdot w \cdot p \cdot z \cdot l_i\ (1 + a + b)$ (8)

$q_{SL} = 2\ I/z\ J_{kr}$

Bei der Unterbringung der Supraleiter im Kryostaten ist zu beachten, daß die effektive Stromdichte erheblich kleiner ist als J_{kr}, da der geflochtene Leiter nicht nur das Matrix-Metall, sondern auch viel Zwischenraum für Kühlmittel enthält und die Abstützung der Leiter gegen die wechselnden Kräfte ebenfalls Platz beansprucht.

12. Die Kupferwicklung im Polrad

Die Verluste der Kompensations-Wicklung

$$P_K = J_{Cu} \cdot \rho_{Cu} \cdot I \cdot w \cdot p \cdot l_i\ (2 + a/4) \qquad (9)$$

Das Kupfergewicht der Kompensations-Wicklung

$$G_K = \gamma_{Cu} \cdot p \cdot (I \quad w/J_{Cu}) \quad l_i \quad (2 + a/4) \qquad (10)$$

Die Verluste der Erregerwicklung bei voller Spannung

$$P_E = J_{Cu} \cdot \varrho_{Cu} \cdot p \cdot (B\delta/\mu) \quad l_i \cdot (2 + a) \qquad (11)$$

Das Kupfergewicht der Erregerwicklung

$$G_E = \gamma_{Cu} \cdot p \cdot (B\delta/\mu \quad J_{Cu}) \cdot l_i \cdot (2 + a) \qquad (12)$$

13. Das Polrad

Das aktive Eisengewicht des Polrades ohne Arme, Welle und Gegengewicht

$$G_p \cong \gamma_e \cdot (l_i + \delta)^2 \cdot \pi \cdot R \qquad (13)$$

Die kinetische Energie des Polrades bei voller Drehzahl

$$W_p = (G_P + G_K + G_E) \cdot v^2/2 = (G_P + G_K + G_E) \cdot 2\pi^2 \cdot R^2 \cdot n^2 \qquad (14)$$

14. Anwendungsbereich

Man kann sich nun überlegen, für welche Anwendungen[11] die beschriebene Maschine wirtschaftlich sein könnte. Grundsätzlich kann man wohl sagen, daß bei Stromstärken, wo die mit dem Kühlfaktor multiplizierte Wärmeeinströmung warmer Stromzuführungen keine wirtschaftliche Rolle spielt, die obige Maschine nicht in Frage kommt, denn gegenüber einem Stromrichter auf Raumtemperatur ist sie schon wegen des rotierenden Polrades wesentlich komplizierter. Dann wird man schon eher einen supraleitenden Gleichrichter nach Buchhold einsetzen, der

einen ruhenden Apparat darstellt. Wo aber die kalten Verluste dieses Gleichrichters, die wahrscheinlich kaum unter 5 % der Nutzleistung herabgesetzt werden können,bzw. die Wärmeeinströmung warmer Stromzuführungen wirtschaftlich nicht mehr tragbar sind, beginnt der Leistungsbereich der obigen Maschine. Besonders zweckmäßig dürfte die Maschine dort sein, wo es sich um sehr große Stromstärken und relativ kleine Spannungen handelt, weil dann die Sperrverluste und die Schaltdrosselleistung am günstigsten sind. Solche Verhältnisse liegen z.B. beim langsamen Auferregen großer supraleitender Wicklungen oder Speicher vor. Erregt man z.B. eine Wicklung mit einem Energieinhalt von 10^7 J, einem Maximalstrom von I = 20 kA in einer Aufladezeit von 2×10^3 s, so wird die Erregerspannung 0,5 V. Die maximale Auferregungsleistung ist 10 kW. Stromeinführungen von Raumtemperatur würden etwa $2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ W/A $\cdot$ $2 \cdot 10^4$ A = 60 W der Wicklung zuführen, das sind 6 ‰ der Erregerleistung. Man sieht, daß hier der Gleichrichter nach Buchhold mit mehreren Prozent Verlusten nicht konkurrieren könnte.

15. Beispiel einer supraleitenden Maschine

W = 10^7 J, I = 20 kA, $t_E = 2 \cdot 10^3$ s, U_o = 0,5 V, P = 10 kW

Für die Maschine kann man zunächst die Parameter B = 1,5 T, p = 2 (um ein Gegengewicht zu vermeiden) und die Zahl der parallelen Zweige z = 20 festlegen. Der Zweigstrom beträgt dann 2000 A. Die übrigen Parameter müssen durch wiederholte Entwürfe so optimiert werden, daß sich für Kosten und Verluste ein Minimum ergibt und die konstruktiven Einzelheiten zusammenpassen.
Die erste Wahl könnte z.B. sein:
l_i = 0,25 m, w = 1, R = 1 m, dann erhält man für n = 0,106 s^{-1}.
Die Umfanggeschwindigkeit v = 0,66 m/s, f = 0,212 s^{-1}, das Verhältnis von Stirnverbindung zu l_i = a = 12,5, wählt man b = 20, so nimmt der Kryotronleiter in azimutaler Richtung die zehnfache

Breite des induzierten harten Supraleiters ein, wenn für beide die gleiche kritische Stromdichte J_{kr} gilt.

Als Leitermaterial wird Nb-Ti solcher Zusammensetzung gewählt, für die im Rutherford-Bericht 1969 Paper V (Spurway, Levin, Smith) in Fig. 6 die kritische Stromdichte in Abhängigkeit der Betriebstemperatur für Feldstärken zwischen 70 und 20 kG angegeben wurde. Da keine Messungen für die Feldstärken zwischen 20 kG und Null vorliegen, wurden diese Werte, wie in Bild 5 dargestellt, geschätzt. Dabei bleibt unsicher, ob man diese Extrapolation bis zur Feldstärke Null durchführen darf. Danach könnte man das Kryotron bei 8,4 K betreiben, dann verträgt es beim Feld Null $4 \cdot 10^4$ A/cm^2. Betreibt man den induzierten harten Supraleiter bei 7,6 K, verträgt er bei 1,5 T ebenfalls $4 \cdot 10^4$ A/cm^2. Man braucht den Leiter einer Windung nicht aus zwei verschiedenen Stücken zusammenzusetzen, sondern muß lediglich in den Stirnverbindungen den Temperaturunterschied von 0,8 K sicherstellen.

Der Supraleiter für 2000 A ist eine transponierte Litze aus verdrillten Filamentleitern in einem möglichst hochohmigen Matrixmetall. Das Verhältnis von Supraleiter zu Matrixmetall $\alpha = 1$. Als Durchmesser der Filamente ist h = 5 µm angenommen. Der oben erwähnte Faktor β wird zu 0,5 geschätzt. Der Durchmesser jeder Ader d_L = 0,1 mm. Der Aderstrom ist 1,6 A. Die Zahl der Adern in jeder Litze ist 1250. Der Supraleiterquerschnitt q_{SL} = 0,05 cm^2. Die Verdrillungslänge der Ader l_V = 1 mm, dann ist ξ = 10. ξ wird wegen des hochohmigen Matrixmetalles zu 1 eingesetzt. ϱ_M des Matrixmetalles = $0,4 \cdot 10^{-4}$ Ωcm. ϱ_{SL} wird hier ebenfalls zu $0,4 \cdot 10^{-4}$ Ωcm geschätzt. Dann erhält man ϱ_S auf den Supraleiterquerschnitt bezogen zu $0,2 \cdot 10^{-4}$ Ωcm. Das für Kryotrons kennzeichnende Produkt $\varrho_S \cdot J_{kr}$ = 80 V/m.

Die effektive Stromdichte des Leiters wird wegen des Matrixmetalles und der Flechtung zu einem Fünftel der kritischen Supraleiterstromdichte angenommen. Damit wird der effektive

Querschnitt des Leiters für 2000 A 0,25 cm^2 = 5 mm · 5 mm. Die radiale Höhe des Kryotrons beträgt dann etwa 12 mm, so daß man bei knapper Bemessung des Kryostaten mit einem Luftspalt δ = 25 mm auskommen könnte. Die Breite des Kryotrons in azimutaler Richtung beträgt etwa 50 mm, so daß vom Gesamt-Umfang rund 36 % durch die Wicklung in Anspruch genommen werden. Die Zeit Δt = 19 ms; die Zeit, in der die Polkante über die Kryotronbreite läuft, ist etwa 76 ms, die Summe beider also 95 ms. Für die Schaltdrossel dürfte ein Bruchteil als stromlose Pause genügen. Man kann vielleicht T_D zu 10 ms wählen.

Die Verluste der Maschine auf der niedrigen Temperatur erhält man nach Formel 1) $P_H/P = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$, P_H = 0,18 W
nach Formel 2) $P_{HE}/P = 1{,}05 \cdot 10^{-6}$, P_{HE} = 0,01 W
nach Formel 3) $P_W/P = 1 \cdot 10^{-6}$, P_W = 0,01 W
nach Formel 4) $P_S/P = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$, P_S = 25 W

Man sieht aus diesem Beispiel, daß die Verluste nach (1) - (3) gegenüber den Sperrverlusten vernachlässigbar sind, und wie wichtig es daher ist, für die Kryotrons ein Material mit einem möglichst großen Produkt $\varrho_S \cdot J_{kr}$ einzusetzen.

Das Gewicht der Rohrkerne aller 20 Schaltdrosseln ist nach Formel (5) bei r_i = 1 cm G_e = 54 kg.

Die Rückmagnetisierungsspannung je Drossel ist auf eine Windung bezogen nach Formel (6) $U_{DR} = 1 \cdot 10^{-3}$ V.
Der Rückmagnetisierungsstrom auf eine Windung bezogen ist nach Formel (7) I_{DR} = 5 + 7,5 = 12,5 A.
Das Gewicht der reinen Supraleiter ohne Matrixmetall ist nach Formel (8) G_{SL} = 10 kg.
Die Verluste der Kompensationswicklung nach Formel (9) P_K = 26 W.
Das Kupfergewicht der Kompensationswicklung nach Formel (10) G_K = 46 kg.

Die Verluste der Erregerwicklung nach Formel (11) P_E = 230 W.
Das Gewicht der Erregerwicklung nach Formel (12) G_E = 415 kg.
Das Eisengewicht des Polrades nach Formel (13) $G_P \cong$ 1840 kg.
Die kinetische Energie des Polrades nach Formel(14) W_P = 500 J.

Ein weiteres Beispiel soll erwähnt werden, obwohl es ohne große Fortschritte auf dem Gebiet der Kryotrons nicht wirtschaftlich gebaut werden kann:

Für die Erregung eines supraleitenden Protonen-Synchrotons für rund 1000 GeV ist eine Stromquelle zu bauen, die die magnetische Energie der Magnete in der Größenordnung von 10^8 J in wenigen Sekunden auf- und abbaut und den Strom in der supraleitenden Magnetwicklung sowohl beim Höchstwert wie beim Wert Null aufrecht erhalten kann. Die Quelle muß demnach rund 100 MW sowohl abgeben als auch aufnehmen. Bei einem Maximalstrom von 20 kA erhält man Spannungen von $\pm$ 5 kV. Die Wärmeeinströmung warmer Stromzuführungen in Höhe von 60 W ist in diesem Falle kein Hinderungsgrund für die Verwendung einer konventionellen Gleichstromquelle, bestehend aus Stromrichtern und Wechselstrommaschine mit Schwungrad.

Es wäre zu überlegen, ob eine supraleitende Gleichstrommaschine wirtschaftlicher sein könnte.

Für P = 100 MW, I = 20 kA, U_o = 5 kV und eine kinetische Energie $W_P = 2 \cdot 10^8$ J könnte man folgende Maschinen-Parameter wählen:
v = 100 m/s, p = 2, B = 1,5 T, R = 10 m, n = 1,6 s^{-1}, z = 40, l_i = 2,1 m, w = 8, b = 20, Zweigstrom = 1000 A.

Verlangt man, daß die Sperrverluste P_S multipliziert mit einem Kühlfaktor von 500 höchstens 5 % der abgegebenen Leistung

betragen, so darf P_S/P den Wert 10^{-4} nicht übersteigen. Damit erhält man $\varrho_S \cdot J_{kr} \geq 3 \cdot 10^5$.

Durch Vergrößerung der Maschine unter Inkaufnahme höherer Kosten kann dieser Grenzwert noch herabgesetzt werden, doch ist er auf jeden Fall von den heute erreichbaren Werten weit entfernt. Verkleinert man die Maschinenspannung unter entsprechender Erhöhung des Stromes, so tritt trotzdem keine Ersparnis an Supraleitern ein, weil der Gewinn an Supraleiterlänge durch entsprechende Vergrößerung des Querschnitts wieder ausgeglichen wird.

16. Literatur

(1) J. Volger und P.S. Admiraal: A dynamo for generating a persistent current in a superconducting circuit. Physics letters Vol. 2 no 5, 1.10.62, S 257-259

(2) S.L. Wipf: A superconducting direct-current generator. Proceedings of the 1963 Cryogenic Eng. Conference. 19.-21.8.1963, S 342-348

(3) H.L. Laquer: An electric flux pump for powering superconducting magnet coils. Cryogenics 3.27. (1963), S 27-30

(4) H. Voigt: Eine Untersuchung der Vorgänge in supraleitenden Flußpumpen. Zeitschrift f. Naturforschung, Bd. 21, Heft 5, 1966, S. 51o-514.

(5) T. Buchhold: Superconductive power supply and its application for electrical flux pumping. Cryogenics August 1964, S 212-217

(6) E. Rolf: Der Kontaktumformer. Berlin, Springer-Verlag, 1957.

(7) Schweizer Patentschrift 461 654.

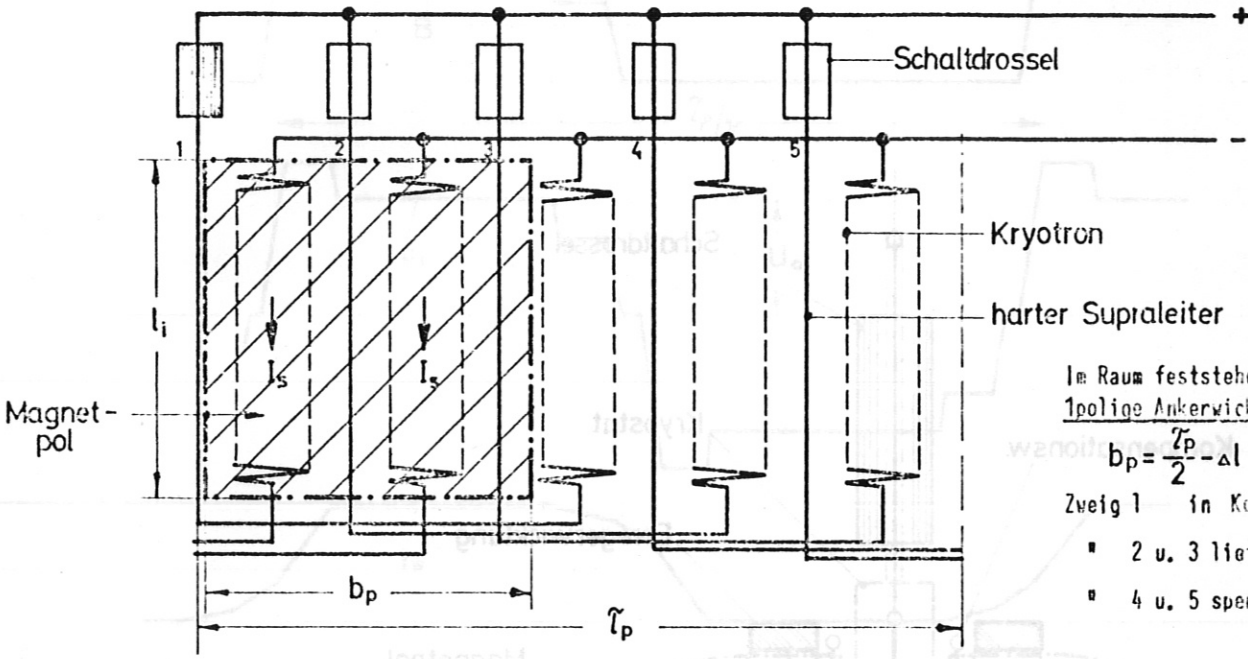
(8) W. Kafka: Der Transduktor - ein Baustein der Automatisierung. R. v. Deckers Verlag G. Schenk, Hamburg, 1959.

(9) W. Hartel u. H. Dietz: Transduktorschaltungen. Springer-Verlag Berlin, 1966

(10) W. Kafka: Supraleiter für Großapparate der physikalischen Forschung, ETZ-A, 92, Heft 6, Juni 1971, S 364-366

(11) A. Knobloch, K.H. Schmitter und S.L. Wipf: Elektrotechnische Probleme in Fusionsmaschinen. ETZ-A, 92, Heft 5, Mai 1971, S 265-272

Die Wicklungen einer einpoligen Maschine.



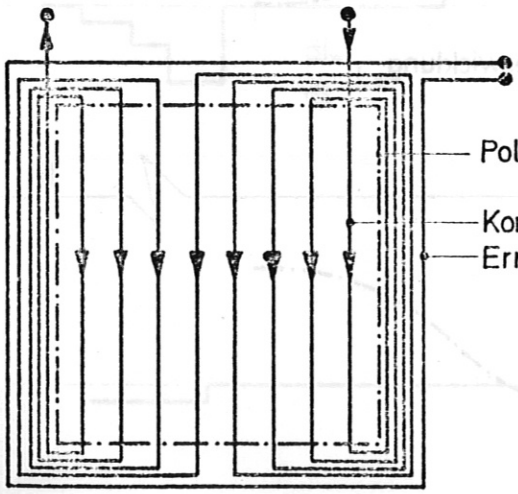
Im Raum feststehende
1polige Ankerwicklung

$$b_p = \frac{\tau_p}{2} - \Delta l$$

Zweig 1 in Kommutierung

- 2 u. 3 liefern Strom
- 4 u. 5 sperren

Bild 1



} aus Kupfer (wassergekühlt)
mit Pol mitrotierend

Beide Wicklungen werden aus mitrotierenden steuerbaren Stromrichtern und Drehfeldumformern gespeist.

Bild 2

Bei mehrpoligen Maschinen werden die Ankerwicklungen in Reihe geschaltet, ebenso die Kompensationswicklungen. Die Erregerwicklungen können für Betrieb mit Spannung Null getrennt gesteuert werden.

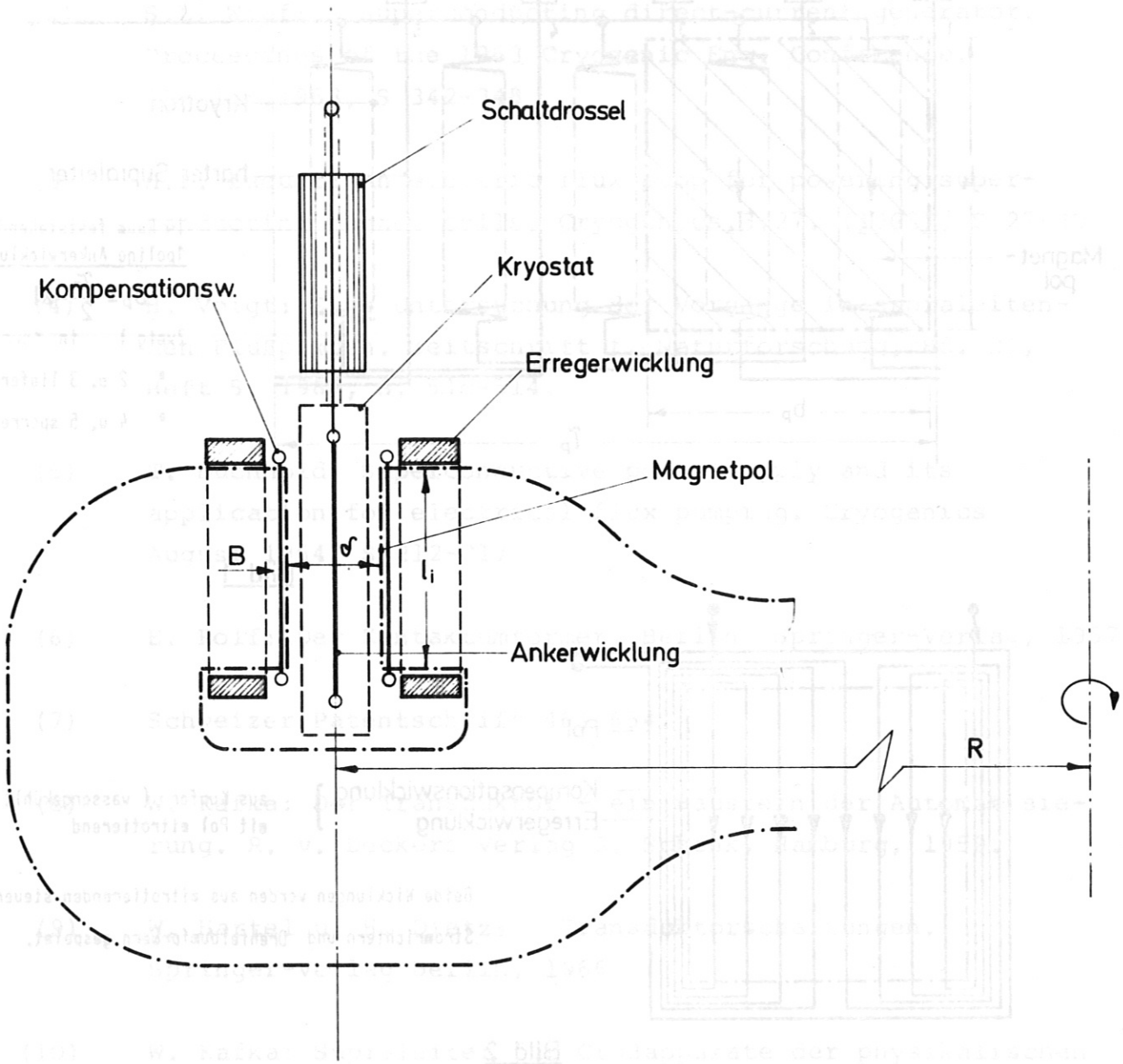
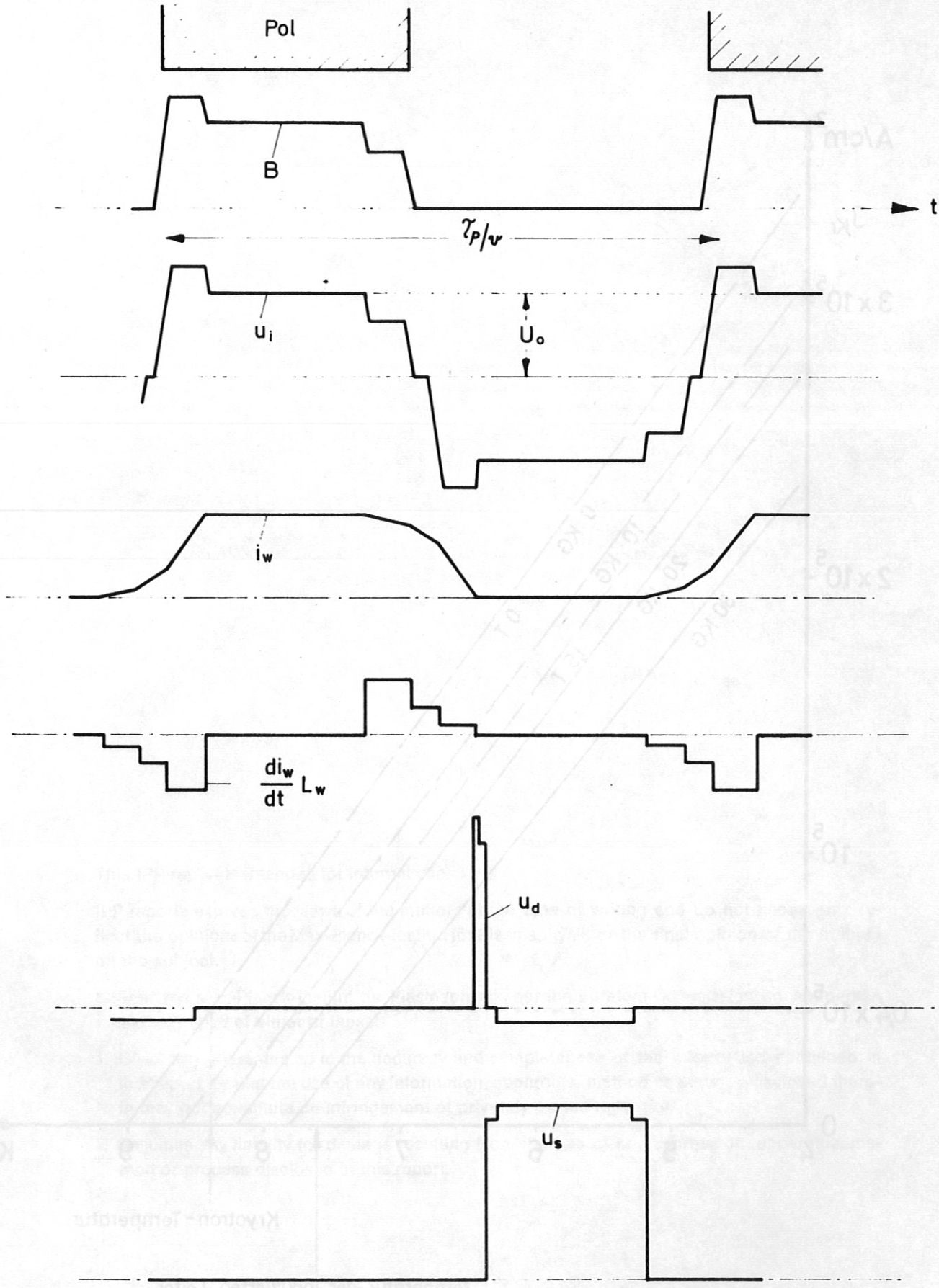

Schaltdrossel
Kryostat
Kompensationsw.
Erregerwicklung
Magnetpol
B
δ
l_i
Ankerwicklung
R

Bild 3



$$u_i + \frac{di_w}{dt} L_w + u_d + u_s = U_o + u_\sim \quad \text{(induktive Last)}$$

Bild 4

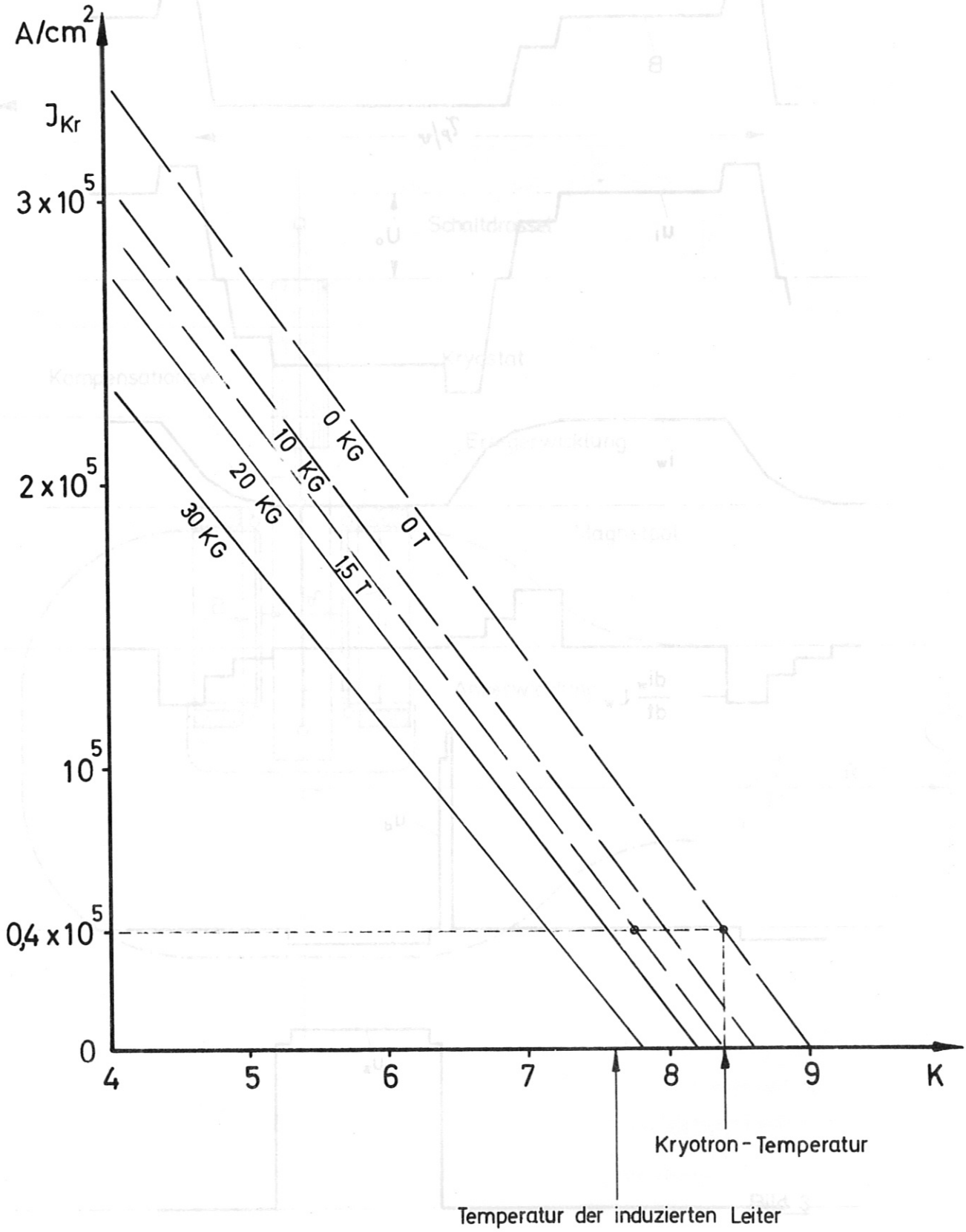

A/cm²
J_{Kr}
3 x 10⁵
2 x 10⁵
10⁵
0,4 x 10⁵
0
4
5
6
7
8
9
K
0 KG
10 KG
20 KG
30 KG
0 T
1,5 T
Kryotron - Temperatur
Temperatur der induzierten Leiter

Bild 5