

M. Pillsticker

Grundlegende Betrachtungen zur  
Entwicklung von schnell wirkenden  
SL/NL Strombegrenzern (Kryotron)

M. Pillsticker

IPP 4/127

Dezember 1974

**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**GARCHING BEI MÜNCHEN**

# MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

## GARCHING BEI MÜNCHEN

### Grundlegende Betrachtungen zur Entwicklung von schnell wirkenden SL/NL Strombegrenzern (Kryotron)

M. Pillsticker

IPP 4/127

Dezember 1974

The special technical problems of fast switching of the current breakers are discussed. At first typical requirements for such breakers are given. The special technical problems of fast switching are discussed. The special possibilities of triggering a breaker are discussed. Advantages and disadvantages of triggering by current-pulse and magnetic field are given. Because these are the methods for triggering fast switching breakers, some breaker concepts are given, which are based on the fundamentals of large fast switching breakers. By connecting these parts in parallel and/or in series one is able to switch very high currents; the resistance of the breaker can be changed as necessary, and the breakdown voltage of a breaker may be very high.

*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.*

IPP 4/127

Grundlegende Betrachtungen zur  
Entwicklung von schnell wirkenden  
SL/NL-Strombegrenzern (Kryotron)

M. Pillsticker

Dezember 1974

Abstract

Special technical problems of fast switching SC/NC current breakers (cryotrons) are reported. At first typical requirements for these breakers are defined. The importance of specific parameters, for instance relations between ohmic resistance of superconductors, temperature, and materials; as well as parameters affecting the switching time, for example trigger energy and electrical conditions of the trigger circuit are explained. The stability of the breaker material in the superconductive state is considered in general, while constructive possibilities bearing upon the stability are discussed more exactly. Problems of dimensioning taking notice of important facts are reported and formal relations are given.

The special possibilities of triggering a breaker are discussed. Advantages and disadvantages of triggering by current-pulse and magnetic field pulse are explained, because these are the methods for triggering fast switching breakers. Some breaker concepts are given, which may be suitable as the fundamentals of large fast switching breakers. By connecting this parts in parallel and/or in series one is able to switch very high currents, the resistance of the breaker can be changed as necessary, and the breakdown voltage of a breaker may be very high.

## Inhaltsverzeichnis

|   | Seite |
|---|-------|
| 1. Einleitung   | 1     |
| 2. Allgemeine Zusammenhänge   | 2     |
| 3. Anwendungsmöglichkeiten  | 3     |
| 4. Forderungen an schnelle SL/NL-Abschalter                                 | 6     |
| .1 Normalleitender Widerstand   | 6     |
| .2 Stabilitätsverhalten   | 7     |
| .3 Beeinflussung der Schaltzeiten   | 8     |
| .4 Energiebedarf bei der Auslösung  | 8     |
| 5. Dimensionierungsfragen   | 10    |
| .1 Stromtragfähigkeit   | 10    |
| .2 Thermische Belastbarkeit   | 11    |
| .3 Konstruktive Gesichtspunkte  | 13    |
| .4 Kühlverfahren  | 15    |
| .5 Mechanische Festigkeit   | 17    |
| 6. Betrachtung der Auslöseverfahren   | 19    |
| .1 Definitionen   | 19    |
| .2 Technische Konzepte für Schalter aus<br>Multifilament-Supraleiterdrähten | 20    |
| .2.1 Thermische Auslösung   |       |
| .2.2 Strompulsauslösung   | 22    |
| .2.3 Magnetfeldpulsauslösung  | 26    |
| .3 Sonstige Schalterkonzepte  | 28    |
| 7. Zusammenfassung  | 30    |
| Literatur   | 31    |
| Bildteil  | 34    |

## 1. Einleitung

Für Ein- und Ausschaltvorgänge bei kleinen Strömen werden häufig "Kryotrons" benutzt. Da hierbei die elektrischen Verluste im Ausschaltzustand klein sind, ergeben sich keine kühltechnischen Probleme, so daß auch Einschaltfunktionen ausgeführt werden können. Kryotrons finden Anwendung im elektronischen Bereich (mA-Betrieb) und als Schaltelemente in Flußpumpen (A-Betrieb) (1 bis 10). Ferner gibt es Vorschläge und Patente für elektrische Gleichstrommaschinen, die nur funktionieren, wenn man präzise schaltende Kryotrons benutzt. Bei Kryotrons für Ein- und Ausschaltzwecke kann die Stromtragfähigkeit eines Leiters im supraleitenden Zustand nur in geringem Maße ausgenutzt werden.

Wenn ein Kryotron im stromlosen Zustand eingeschaltet wird, um es nur für Stromabschaltungen zu benutzen, kann man die Stromtragfähigkeit des supraleitenden Leiters voll ausnutzen. Es lassen sich hohe Ströme im kA-Bereich schalten, da hohe elektrische Verluste im Ausschaltzustand hingenommen werden können, ohne daß die Ausschaltfunktion und die spätere stromlose Wiedereinschaltung gestört werden. Gegenüber einem konventionellen Schalter hat ein SL/NL-Abschalter einige entscheidende Vorteile, die seinen Einsatz insbesondere bei der schnellen Kommutierung von Strömen erfordern. Im Hinblick hierauf wurden grundlegende Überlegungen angestellt, um die Voraussetzungen für gezielte Entwurfsarbeiten zu schaffen.

## 2. Allgemeine Zusammenhänge

Beim Kryotron oder supraleitenden Schalter nutzt man als Schaltfunktion die Widerstandsänderung beim Phasenübergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand oder umgekehrt aus. Im supraleitenden Zustand tragen "harte Supraleiter" hohe stationäre Ströme. Die kritischen Stromwerte eines Supraleiters, bei denen der Übergang vom supraleitenden (SL) in den normalleitenden (NL) Zustand erfolgt, hängen vom Material, vom äußeren Magnetfeld und der Temperatur ab. Der Übergang vom NL- in den SL-Zustand erfolgt beim "Recoverystrom", der ebenfalls vom Material, vom äußeren Magnetfeld, von der Temperatur und stark vom gewählten Kühlverfahren abhängt.

Einschaltfunktionen lassen als obere Stromgrenze den Recoverystrom zu. Ausschaltungen kann man unterhalb des kritischen Stromes vornehmen, der größer als der Recoverystrom ist. Das Kryotron bietet sich daher besonders als SL/NL-Schalter, d.h. als Ausschalter, an.

Der SL/NL-Phasenübergang und damit das Auslösen eines Ausschaltvorgangs kann durch drei Prozesse induziert werden. Wie aus Bild 1 ersichtlich, erfolgt die Auslösung durch Verschiebung des Zustandspunktes A in die normalleitende Zone entweder durch Temperaturerhöhung, Stromerhöhung, Erhöhung des äußeren Magnetfeldes oder Erhöhung aller Parameter.

### 3. Anwendungsmöglichkeiten

Da die Schaltfunktion eines Kryotron-Abschalters auf der Widerstandsveränderung beim Übergang von SL- in den NL-Zustand beruht, erfolgt keine Stromunterbrechung. Man kann Kryotrons nur als Strombegrenzer einsetzen. Für viele Anwendungen bewirkt die Begrenzung des Stromes einen befriedigenden Schalteffekt. Da die Zustandsänderung im Supraleiter grundsätzlich schnell erfolgt, eignen sich Kryotrons gut als schnell wirkende Abschalter, wenn auf eine schnelle vollständige Stromunterbrechung verzichtet werden kann. Zahlreiche Veröffentlichungen (11 bis 17) zeigen, daß besonders bei raschen Stromkommutierungen SL/NL-Abschalter vorteilhaft einzusetzen sind. Des weiteren gibt es schon Überlegungen, SL/NL-Abschalter als IS-Begrenzer in Energieübertragungsanlagen zu benutzen. Beim Einsatz supraleitender Energieübertragungskabel bietet sich diese Art der Strombegrenzung an.

#### Schalterbedingungen bei Stromkommutierung

Stromkommutierungen können angewandt werden, um zeitlich veränderliche Stromverläufe in Verbrauchern zu ermöglichen, die von verfügbaren Stromgeneratoren in den gewünschten Verläufen nicht erzeugt werden können. Durch schritt-, teilweise oder auch vollständige Kommutierung eines Stromes aus einem Schaltzweig in einen Verbraucher kann man in guter Näherung beliebige Stromverläufe erzielen, die in dem durch Schaltereigenschaften und schaltungsmäßige Voraussetzungen begrenzten Bereich eingestellt werden können. Diese Methode der Erzeugung definierter Stromverläufe bietet sich besonders für physikalische Experimente an, da hierfür Fragen des Wirkungsgrades einer Anlage von sekundärem Interesse sind.

Schnelle Stromkommutierungen lassen sich nur in dafür geeigneten Netzwerken wirkungsvoll vornehmen. Die Höhe des Kommutierungsstromes wird vom Stromgenerator festgelegt. Ob man hochinduktive Speicherspulen mit großem Energieinhalt, Gleichstrommaschinen oder sonstige Generatoren mit ausreichender Leistung benutzt, ist für den Ablauf einer schnellen Kommutierung unwesentlich. Der Kommutierungsvorgang wird entscheidend

- a) von der Schalterinduktivität  $L_S$ ,
- b) der Störinduktivität der Verbindungsleitung zwischen Schalter und Verbraucher  $L_{zu}$  und
- c) vom Verbraucher selbst

beeinflußt.

Die Störinduktivität  $L_{zu}$  liegt im Verbraucherkreis, was Stromkommutierungen in rein ohmsche oder rein kapazitive Verbraucher ausschließt. Wenn man schnelle Stromkommutierungen anstrebt, muß  $L_{zu}$  möglichst klein sein. Durch entsprechende Auslegung der Stromzuleitungen läßt sich dies erreichen.

Schnelle Stromänderungen in Verbrauchern mit hohen Induktivitäten verursachen hohe Spannungen am Verbraucher und am Schalter. Bei einer Kommutierungszeit von  $1 \mu s$  erhält man beispielsweise an einer Verbraucherinduktivität von  $1 mH$  und einem Spitzenstrom von  $1 kA$  bereits die Spannung von  $1 MV$ . Dies zeigt, daß am Schalter und am Verbraucher erhebliche spannungsmäßige Probleme auftreten, die bei Kommutierungszeiten im ns-Bereich praktisch nicht lösbar sind. Langsame Stromkommutierungen in Verbrauchern mit hohen Induktivitäten, die im ms- oder s-Bereich ablaufen, erscheinen hingegen realisierbar.

In Verbrauchern mit sehr kleinen Induktivitäten aber großen ohmschen Widerstands- oder Kapazitätswerten kann man Ströme schnell kommutieren, ohne daß mit

überhöhten Spannungen zu rechnen ist. Die Spannung wird wesentlich entweder vom Strombetrag oder vom Zeitintegral des Stromes bestimmt. Der Kommutierungsablauf wird vom zeitlichen Widerstandsverhalten des Schalters bestimmt.

Wegen der nicht idealen Eigenschaften von SL/NL-Schaltern (endlicher Widerstand im ausgeschalteten Zustand) muß man zwischen Kommutierungsverlusten und Verlusten im sogenannten Ausschaltzustand unterscheiden. Die Gesamtverluste des Schalters sind damit vom zeitveränderlichen Schalterwiderstand, der Generatorspannung und von der gesamten Einschaltzeit abhängig.

Bei der Kommutierung des Stromes in einen Verbraucher mit einer großen induktiven Komponente kann zwar die Kommutierungszeit beeinflußt werden, aber die Verluste im Schalter während der Kommutierung sind von dem Verhältnis der Verbraucher- zur Speicherinduktivität vorgeschrieben. Im Idealfall (rein induktives Verhalten angenommen) beträgt die vom Schalter aufzunehmende Energie 50 % der gespeicherten Energie, was neben der erwähnten Hochspannungsbeanspruchung auch zu erheblichen thermischen Belastungen des Schalters führt.

In Näherung treten im Schalter die gleichen Stromänderungen pro Zeiteinheit wie im Verbraucher auf. Deswegen muß ein Schalter für schnelle Stromkommutierung extrem niederinduktiv sein. Weitere Überlegungen, die in den folgenden Kapiteln eingehend erläutert werden, erfordern ebenfalls einen niederinduktiven Schalteraufbau.

#### 4. Forderungen an schnelle SL/NL-Abschalter

##### 4.1 Normalleitender Widerstand

Da ein SL/NL-Schalter keine galvanische Trennung beim Schaltvorgang bewirkt, kann ein befriedigender Ausschalteffekt nur erreicht werden, wenn der elektrische Widerstand des Schalters bereits unmittelbar oberhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  einen großen Wert annimmt. Bei Kommutierungsschaltungen (Bild 2) muß ein Widerstandsverhältnis  $R_{SN}/R_L$  entsprechend dem gewünschten oder technisch zulässigen Stromverhältnis  $I_L/I_{SN}$  vorliegen. Bei Unterbrechungsschaltungen (Bild 2) übernimmt der SL/NL-Schalter die Funktion eines veränderlichen, schnell wirkenden Strombegrenzers. Die endgültige Unterbrechung kann mit einem langsam arbeitenden mechanischen Ausschalter erfolgen. Ein Widerstandsverhältnis  $R_{SN}/R_L = 10^2$  bis  $10^4$  dürfte allen technischen Erfordernissen bei Hochstromabschaltungen genügen. Die technischen Voraussetzungen für die Herstellung eines SL/NL-Schalters bei niedrigem  $R_L$  sind günstig, da das Schaltervolumen klein sein darf.

Um einen hohen Schalterwiderstand mit erträglichem technischem Aufwand zu realisieren, muß der spezifische Widerstand des SL-Materials hoch sein. Eine Zusammenstellung geeigneter Supraleiter für Schaltzwecke zeigt Tabelle I.

TABELLE I

| Material          | $\rho$ ( $\Omega\text{cm}$ ) | $j$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Pb-Bi in por.Glas | $5 \times 10^{-3}$           | $10^5$                         |
| Pb-Bi             | $5 \times 10^{-5}$           | $4 \times 10^5$                |
| NbTi              | $5 \times 10^{-5}$           | $10^6$                         |
| Nb N              | $2 \times 10^{-3}$           | $10^7$                         |

Werte bei  $T = 10 \text{ K}$

Für technische Anwendungen kann man gegenwärtig nur NbTi benutzen. Daher führten wir bisherige experimentelle Untersuchungen mit diesem Material durch. Als Matrixmaterial ist dabei Kupfer wegen seiner zu großen Leitfähigkeit ungeeignet. Man benutzt bei Leitern für Schaltzwecke CuNi-Matrixmaterial. Die Leitfähigkeit dieses Materials entspricht etwa der des Supraleiters NbTi.

In letzter Zeit wurden spezielle Untersuchungen angestellt <sup>\*)</sup>, um Schalter aus Nb N herzustellen. Man kann dünne Schichten dieses Materials auf Keramik aufbringen und erhält einen für Schaltzwecke geeigneten Supraleiter. Der hohe  $\varphi$ -Wert von Nb N läßt es zu, Schalter mit sehr kurzen Längen aus leitendem Material herzustellen, so daß eine technische Anwendung auch mit sprödem keramischem Trägermaterial durchaus vernünftig erscheint.

#### 4.2 Stabilitätsverhalten

Ein Supraleiter für Schaltzwecke muß bei großer Stromdichte stabil bleiben und auch ein befriedigendes AC-Verhalten aufweisen.

Flußsprünge dürfen keinen Schaltvorgang einleiten. Leiterbewegungen muß man durch konstruktive Maßnahmen unterbinden, bzw. müssen das Kühlsystem und der Supraleiter so dimensioniert sein, daß keine unerlaubte Temperaturerhöhung auftritt. NbTi wird deswegen als Filamentleiter mit einem Durchmesser der Filamente von 20  $\mu\text{m}$  oder kleiner und als gewisteter Leiter benutzt. Der hohe spez. Widerstand des Matrixmaterials Cu N garantiert hervorragendes AC-Verhalten.

Einschlägige Erfahrungen für Nb N liegen noch nicht vor. Sicher ist, daß die auf den Keramikträger aufzubringenden Schichten extrem dünn (wenig  $\mu\text{m}$ ) sein

---

\*) Krupp, Essen  
Nickl, Universität München

müssen. Genau untersucht werden muß, wie sich die Breite der Schicht, die Form der Oberfläche des Keramikträgers, die Lage der Leiterschicht zu einem äußeren Magnetfeld sowie der Abstand der Leiterschichten bei elektrischer Parallelschaltung mehrerer Leiter auf die Stabilität auswirken. Erfahrungen mit  $Nb_3Sn$  Bandleitern dürften hinsichtlich der Fertigung und Verarbeitung hilfreich sein.

#### 4.3 Beeinflussung der Schaltzeiten

Um kurze Schaltzeiten in Verbindung mit kleiner Streuung dieser Zeiten zu erreichen, muß man verschiedene Punkte beachten:

- a) Der spezifische Widerstand muß für  $T = T_c + \Delta T$  (unmittelbar oberhalb der kritischen Temperatur  $T_c$ ) einen hohen Wert annehmen. Dann kann man mit einem Minimum an Energiezufuhr den Phasenübergang bewirken und einen wirksamen Ausschalteffekt erzielen.
  
- b) Für die Auslösung des Schalters muß eine leistungsstarke Energiequelle zur Verfügung stehen, damit schnelle Abschaltungen erreicht werden können. Die Leistungsanstiegszeit des Auslöse-Generators muß klein sein. Das erfordert extrem niederohmige und niederinduktive Geräte für den Auslöseimpuls. Die detaillierten Forderungen an das Auslösegerät müssen nach dem jeweils gewählten Auslöseverfahren artspezifisch definiert und gelöst werden.

#### 4.4 Energiebedarf bei der Auslösung

Der für die Auslösung notwendige Energiebedarf sollte gering sein. Das Energieminimum für die Auslösung ergibt sich aus der Bedingung, daß am Ende einer Schaltung die kritische Temperatur des Supraleiters

erreicht sein muß. Es gilt:

$$E_{s \text{ min}} = V_s \int_{T_{LHe}}^{T_c} \rho c_p dT, \text{ mit } \textcircled{1}$$

- $T_{LHe}$  Flüssig Helium-Temperatur
- $T_c$  kritische Supraleitertemperatur
- $V_s$  Volumen des Schaltermaterials
- $c_p$  Wärmekapazität des Schaltermaterials
- $\rho$  spezifisches Gewicht

Der errechnete Wert für NbTi-Supraleiter mit Cu Ni-Matrix beträgt etwa  $20 \text{ mJ/cm}^3$ , wobei der genaue Werte vom Verhältnis Supraleiter/Matrix und den Verhältnissen der einzelnen Komponenten im Supraleiter und der Matrix abhängt. Der  $E_{s \text{ min}}$ -Wert für NbN ergibt sich etwa um den Faktor  $10^{-2}$  niedriger als für NbTi-Leiter mit Cu-Matrix. Detaillierte Betrachtungen können nur im Zusammenhang mit dem gewählten Auslöseverfahren und der Schaltung, in der ein Schalter eingesetzt ist, angestellt werden.

## 5. Dimensionierungsfragen

Bei der Dimensionierung eines schnellen Ausschalters sind mehrere Hauptkriterien zu beachten.

### 5.1 Stromtragfähigkeit

Die Stromtragfähigkeit des Schalters vor dem Schalten muß gewährleistet sein. Dementsprechend ist der Querschnitt des Schaltermaterials

$$A_s = \frac{I_0}{j_{zul}}$$

$A_s$  = Supraleiterquerschnitt

$I_0$  = zulässiger Strom im Supraleiter

festzulegen. Die zulässige Stromdichte  $j_{zul}$  muß aus Sicherheitsgründen kleiner als die kritische Spulenstromdichte  $j_{cs}$  sein, wobei  $j_{cs}$  wiederum von der Kurzprobenstromdichte  $j_{ck}$  abweicht. Das Verhältnis  $\frac{j_{cs}}{j_{ck}}$  gilt als Maß für die technische Qualität eines Schalters. Der maximale Wert wäre 1, der jedoch praktisch nie erreicht wird. Dies hat verschiedene Gründe:

- a) Wegen der komplizierten Herstellung von NTi-Filamentleitern mit Matrix und NbN-Bandleitern kann man einen homogenen Aufbau nicht erwarten. Mit hoher Wahrscheinlichkeit befinden sich schwächere Zonen in einem Leiter als es das Ergebnis einer Kurzprobe liefert, so daß beim Test der Gesamtlänge des Schalterdrahtes  $j_{cs} < j_{ck}$  sein wird.
- b) Bei der Parallelschaltung vieler Leiter befinden sich die Filamente eines Supraleiters im stark inhomogenen magnetischen Nahfeld der benachbarten Leiter. Die Vorausbestimmung der Feldwerte im Bereich eines Leiters kann nur näherungsweise erfolgen, so daß praktisch höhere und niedrigere Magnetfelder auftreten werden als durch Berechnungen ermittelt werden kann. Daher gibt es immer Leitergebiete mit  $j_{cs} < j_{ck}$ , weil die Kurzprobenwerte in exakt definierbaren Feldern gemessen aber mit gerechneten Werten des Schalters verglichen werden.

- c) Beim Aufbau des Schalters muß man berücksichtigen, daß die Kühlung der Leiter und die mechanische Stabilität der Schalteranordnung (feste Arrittierung der Einzelleiter) gewährleistet sein müssen. Die Kunst der Schalterherstellung ist es, diese sich gegenseitig ungünstig beeinflussenden Faktoren zu optimieren. Unzureichende Kühlung führt zu einer Erhöhung der Temperatur in einzelnen Zonen des Leiters und damit zu einer Verringerung von  $j_{CS}$ . Leiterbewegungen, die bei unzureichender mechanischer Stabilität auftreten, verursachen örtlich unzulässig hohe Erwärmung und können auch die Ursache für Flußsprünge sein. Auch dieses bewirkt eine Absenkung von  $j_{CS}$  gegenüber  $j_{CK}$ ; zumindest muß man an solchen Schalteranordnungen unerwünschte Trainingseffekte erwarten.

## 5.2 Thermische Belastbarkeit

Einer thermischen Zerstörung des Schalters ist vorzubeugen durch die Wahl eines hinreichenden Schaltervolumens, damit die beim Schalten anfallende Verlustenergie oder Schaltenergie vom Material (SL- und Strukturmaterial) aufgenommen werden kann, ohne daß zu große Überhitzung (Verglühen; Verkohlen; Durchbrennen) auftritt. Als oberer Grenzwert kann mit Rücksicht auf das Strukturmaterial ca. 450 K angesehen werden. Die maximale Verlustenergiedichte wird dann

$$e'_{s \max} = \frac{E_{s \max}}{V_s} = \int_{4 \text{ K}}^{450 \text{ K}} \gamma c_p dT \approx 10^3 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3} \quad (2)$$

Bei Kommutierungsschaltungen mit ohmscher Belastung und induktivem Energiespeicher entsprechend Bild 2a ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Schaltenergie und der induktiv gespeicherten Energie:

$$E_{Lsp} = E_s (1 + r), \quad (3)$$

mit  $r = \frac{R_{SN}}{R_L}$  und den Abkürzungen

- $E_{Lsp}$  gespeicherte Energie in der Spule  $L_{sp}$ ,
- $E_s$  Schaltenergie (Verluste im Schalter),
- $R_{SN}$  Schalterwiderstand (normalleitender Zustand),
- $R_L$  Belastungswiderstand.

Aus den Gleichungen 2 und 3 folgt für das minimale Volumen des Schalters:

$$V_s \min = \frac{E_{Lsp}}{(1+r) e'_{s \max}}. \quad (4)$$

Ersetzt man in Gleichung 4 die gespeicherte Energie durch

$$E_{Lsp} = \frac{I_{zul}^2 \tau R_p}{2} \quad (5)$$

und verwendet außerdem die Beziehungen

$$R_p = \frac{R_{SN} \cdot R_L}{R_{SN} + R_L}$$

$$\tau = \frac{L_{sp}}{R_p}$$

$$j_{zul} = \frac{I_{zul}}{A_s}$$

$$V_s = A_s \ell_s$$

$$R_{SN} = \rho_s \frac{\ell_s}{A_s}$$

mit  $I_{zul}$  = zulässiger Strom im Supraleiter

$\rho_s$  = spezifischer Widerstand des normalleitenden Supraleiters

$\ell_s$  = Länge des Supraleiters im Schalter

ergibt sich für das minimale Widerstandsverhältnis bei dem kleinsten zulässigen Schaltervolumen:

$$r_{\min} = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{L_{sp} \cdot j_{zul}^2 \varrho_s}{R_L \cdot 2 \cdot e'_{s \max}}} \quad (6)$$

Im Bild 3 ist für charakteristische NbTi und Nb N Supraleiterdaten der Zusammenhang zwischen  $r_{\min}$  und  $\tau_L = L_{sp}/R_L$  dargestellt. Bei hochohmigen Belastungen, d.h. kleinem  $\tau_L$ , wird aus schaltungstechnischen Gründen  $r \gg r_{\min}$  gewählt werden müssen. Die Gefahr der thermischen Schalterzerstörung ist hier nicht gegeben. Für niederohmige Lasten in Verbindung mit großen induktiven Speichern muß  $r_{\min}$  Grundlage der Schalterdimensionierung sein. Befriedigende Schalteffekte könnten in diesem Fall schon für  $r < r_{\min}$  erzielt werden. Dies gilt in besonderem Maße für Nb N-Schalter.

Wesentlich übersichtlichere Ergebnisse erhält man für die Dimensionierungsbedingungen eines SL-Schalters, der in einer Unterbrechungsschaltung als Strombegrenzer eingesetzt wird. Das Minimalvolumen ergibt sich zu

$$V_{s \min} = \frac{U_{gen}^2 \Delta t}{e'_{s \max} R_L (1+r)} \quad (7)$$

mit  $U_{gen}$  als Generatorspannung und  $\Delta t$  als Zeitdauer zwischen SL-Schalterauslösung und Öffnen des mech. Trenners.

### 5.3 Konstruktive Gesichtspunkte

Für die Funktion eines schnellen Abschalters ist die Wahl des konstruktiven Prinzips mit entscheidend. Kleine Abschaltzeiten erfordern Auslösesignale mit kleinen Anstiegszeiten und deswegen Schalter mit extrem niederinduktivem Aufbau. Die Schalterinduktivität kann nicht

beliebig verkleinert werden, da Schalter aus NbTi-Drähten mit Cu Ni-Matrix aus sehr langen Drähten gewickelt werden müssen, um hinreichend große Widerstandswerte  $R_{SN}$  zu erhalten. Treten, wie in Bild 4 angedeutet, in einem Kommutierungskreis Störinduktivitäten auf, ergeben sich am Schalter hohe Spannungen. Zusätzlich beeinträchtigen daher isola-tionstechnische Forderungen einen niederinduktiven Schalteraufbau.

Die Wirkung der unvermeidbaren Schalterinduktivität  $L_S$  kann durch Überdimensionierung des Auslösesignals kompensiert werden. Dies erfordert Auslösesignale mit hoher Spannung, um die notwendige Steilheit der Signale zu erzielen. Wenn die Spannung der Auslösesignale ungleich mehr erhöht werden kann als die Schalterinduktivität auf Grund der isola-tionstechnischen Notwendigkeit ansteigt, ist diese Methode wirksam. Hochspannungstechnische Erfahrungen und Untersuchungen lehren, daß dies nicht unbegrenzt möglich ist. Da aber die Hochspannungsforschung bei tiefen Temperaturen im Helium noch am Anfang steht, kann man erwarten, daß die elektrischen Festigkeitsgrenzen merklich zu höheren Spannungen verschoben werden können. Die Einführung der "gekapselten Hochspannungsbauweise" im SL-Schalterbau ist daher notwendig und wird von uns näher untersucht.

Aus supraleitendem Draht-Material hergestellte Schalter mit kleinen Induktivitäten erfordern meanderförmigen oder spulenförmigen Aufbau, wobei bifilare oder auch Kreuzspulen-Wicklungen angewandt werden müssen. Die im Bild 5 dargestellten Anordnungen geben einen prinzipiellen Überblick. Entsprechend dem gewählten Auslöseverfahren für den Schalter müssen noch gezielte Änderungen vorgenommen werden \*):

- a) Einbringen von Heizleitern bei thermischer Auslösung.

---

\*) Detaillierte Ausführungen über die Eignung der Anordnungen für die einzelnen Auslöseverfahren erfolgen im Abschnitt 6.

- b) Einbringen von Leitern oder einer Spule zur Magnetfeldpulserzeugung bei Magnetspulsauslösung.
- c) Zusätzliches Aufbringen von bifilaren Windungen zur Erzeugung einer "doppelt bifilaren" Wicklung bei Strompulsauslösung.

Hierdurch werden weitere elektrische Isolationsprobleme aufgeworfen, insbesondere für a) und b), weil Stromkreise, die hohe Spannungen gegeneinander annehmen, zu isolieren sind. Normale Drahtisolierungen in Form von Lacken sind unzureichend. Man muß zusätzliche isolierende Trennfolien zwischen den Leitern der unterschiedlichen Stromkreise anbringen.

#### 5.4 Kühlverfahren

Die zweckmäßige Kühlung eines Schalters sollte nach anderen Gesichtspunkten erfolgen als die Kühlung von SL-Magneten.

Als Kühlverfahren stehen zur Diskussion die Zwangsumlaufkühlung und die statische Badkühlung, wobei als Kühlmittel Flüssighelium, Heliumkaltgas, überkritisches Helium und superfluides Helium zu nennen sind.

Die bisher am häufigsten angewandte Kühlart ist die Flüssighelium-Badkühlung. Daher ist die Technik dieses Kühlverfahrens auch am weitesten entwickelt und bereitet die geringsten Schwierigkeiten bei der Anwendung. Die thermodynamischen Eigenschaften wie Wärmeübergang von Metall zu Flüssighelium, die Wärmeleitfähigkeit, der spezifische Wärmewert und die Möglichkeit der Ausnutzung der zwar nur geringen Verdampfungsenergie für den Kühleffekt prädestinieren die Flüssighelium-Badkühlung gegenüber der Heliumkaltgaskühlung, die nur bei Zwangsumlauf des Gases denkbar ist. Die Badkühlung ist billiger und wirkungsvoller. Nachteilig wirkt sich der kleine Wert der Verdampfungsenergie aus.

Der Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase erfolgt sehr schnell und führt infolge etwa 700-facher Volumenvergrößerung bei gleichem Druck zu Problemen bei der Heliumabgasabführung. Bei großem Heliumvolumen muß mit erheblichen Druckanstiegen im Kryostaten gerechnet werden, die sehr leicht kritische Werte annehmen.

Wenn Badkühlung beim SL-Abschalter angewandt wird, muß die Helium-Siedetemperatur überschritten werden, um  $T_c$  zu erreichen. Bei jedem Abschaltvorgang muß das Verdampfen des gesamten im Kryostaten befindlichen Flüssigheliums im Schalterbereich in Kauf genommen werden. Dies führt zu erheblichen Heliumverlusten.

Bei Kühlung mit überkritischem Helium [18] läßt sich dieser Nachteil vermeiden. Die den Kühleffekt bestimmenden Daten (Wärmeübergang, Wärmeleitfähigkeit) sind besser als beim Heliumgas und ähnlich den Daten bei Flüssighelium. Jedoch muß Zwangsumlaufkühlung angewandt werden, was den technischen Aufwand gegenüber der Badkühlung erheblich erhöht. Durch Steuerung des Kühlkreislaufes (Bypass zum Schalter) kann der SL-Schalter vor der Auslösung vom Kreis getrennt werden. Dies erleichtert die Schaltbedingungen und es ergeben sich keine Rückwirkungen durch den raschen Temperaturanstieg im Schalter auf den Kühlkreis. Die Heliumverluste lassen sich wesentlich gegenüber der Badkühlung reduzieren.

Obwohl sich superfluides Helium durch hervorragende Wärmeleitfähigkeit als Kühlmittel anbietet, sollte es aus verschiedenen Erwägungen für SL-Schalterkühlung nicht angewandt werden. Der Kühlbetrieb ist bei großen Einheiten sehr aufwendig, da temperaturbedingte Druckanstiege durch entsprechende Pumpleistung aufgefangen werden müssen. Bei großem Wärmeeinfall wird der Betrieb sehr unsicher. Der superfluide Zustand geht bei jedem Schaltvorgang verloren und kann nicht beliebig schnell wieder erreicht werden, weil der kritische Punkt mit extrem hoher Wärmeleitfähigkeit zu überschreiten ist.

Die Dichtigkeitsanforderungen an die das superfluide Helium einschließenden Bauteile sind extrem, da es eine sehr kleine innere Reibung besitzt und in atomare Spalten mit einer Geschwindigkeit von etwa 25 cm/s eindringt.

Die Wahl des Kühlverfahrens legt das konstruktive Konzept eines SL-Schalters in einigen Punkten fest. Bei Kühlung mit überkritischem Helium muß man wie bei der Badkühlung beachten, daß ausreichend große Oberflächen des Supraleiters mit dem Kühlmittel in Berührung kommen und daß darüber hinaus die Anordnung der Kühlkanäle strömungstechnisch günstig gewählt wird, um gleichmäßige Temperaturverteilung am Schalter zu gewährleisten.

Detaillierte Überlegungen zeigen, daß bei Schaltern aus Drahtleitern in pan-cake-Spulenform radiale Kühlschlitze möglich sind. Mäanderförmig ausgeführte Schalteranordnungen eignen sich für Kühlung mit überkritischem Helium nicht gut; es sei denn, man benutzt supraleitende Hohlleiter. Diese Leiter sind aber für den Aufbau niederinduktiver Schalter ungeeignet.

### 5.5 Mechanische Festigkeit

Kraftbeanspruchungen eines Schalters werden durch  $j \times B$ -Kräfte an den Leitern und durch unterschiedliche thermische Ausdehnung von Leitermaterial und Strukturmaterial beim Erwärmen während des Schaltvorganges verursacht. Die  $j \times B$  Kräfte an Schalterwickeln in Spulenbauweise sind im Vergleich zu Magnetfeldspulen wegen der feldkompensierenden Bauweise nur klein. Geringfügig beansprucht werden lediglich die Leiter am Wickelrand; im Zentrum des Wickels kompensieren sich die Kräfte. Die durch thermische Dehnung verursachten Kräfte hingegen sind beim Schalter außerordentlich kritisch. Man kann diese Kräfte begrenzen,

wenn maximale Dimensionen des Schalters nicht überschritten werden. Daher sollten große Einheiten aus kleineren Einzelementen in elektrischer Parallelschaltung oder Reihenschaltung gebildet werden. Untersuchungen ergaben, daß gemagertes Epoxydgießharz mit hohem Martenspunkt als Strukturmaterial gut geeignet ist. Örtliche Leiterbewegungen können vollständig unterbunden werden. Jedoch müssen Temperaturen von mehr als 450 K vermieden werden, da sonst die organischen Verbindungen des Gießharzformstoffes zerstört würden. Bei vielen Einzelproblemen kann auf Erfahrungen, die an Magneten studiert wurden, zurückgegriffen werden.

## 6. Betrachtung der Auslöseverfahren

### 6.1 Definitionen

Die im Abschnitt 2 gewählten Definitionen für die Auslösemöglichkeiten von Schaltern erfolgten auf Grund der die Schaltung auslösenden physikalischen Effekte.

Praktisch läßt sich die Auslösung eines SL/NL-Schalters streng im Sinne des physikalischen Begriffes nicht realisieren. Zwar benutzt man bei technischen Auslöseverfahren ebenfalls die Begriffe thermische Auslösung, Magnetfeldpulsauslösung und Strompulsauslösung, aber diese Definitionen beziehen sich nur auf den die Auslösung dominierend beeinflussenden physikalischen Effekt und erklären das jeweilige Auslöseverfahren nur unvollständig. Im folgenden werden die einzelnen Auslöseverfahren näher erläutert:

- 1) Bei der thermischen Auslösung führt man dem Supraleiter durch Fremdheizung Wärme zu. Wenn dies mit elektrischen Heizleitern in unmittelbarer Nachbarschaft des Supraleiters (Bild 6) geschieht, ergibt sich im Bereich des Supraleiters auch eine Felderhöhung  $\Delta H$ . Somit bewirkt die Überlagerung von zwei physikalischen Vorgängen die Auslösung. Da der Heizeffekt überwiegt, wird dieses Verfahren als "thermische Auslösung" bezeichnet.
  
- 2) Bei Strompuls-Auslösung beaufschlagt man den Supraleiter mit einem pulsformigen Strom. Dabei muß die kritische Stromdichte überschritten werden. Außerdem tritt als Folge der AC-Verluste eine geringfügige Wärmezufuhr und als Folge der Leiteranordnung eine Magnetfelderhöhung über das Eigenfeld hinaus auf. Dominierender Effekt für die Auslösung ist die Anhebung der Stromdichte über den kritischen Wert.

- 3) Durch außerhalb des Supraleiters erzeugte Magnetfelder erfolgt die Magnetfeldpulsauslösung. Nicht vermeidbare transformatorische Wirkungen verursachen auch Stromerhöhungen im Supraleiter. AC-Verluste führen zu geringfügiger Wärmezufuhr. Maßgebend wird aber der Phasenübergang durch das Pulsmagnetfeld ausgelöst.

Soll der Supraleiter nach erfolgter Strompuls- oder Magnetfeldpuls-Auslösung einenendlichen Widerstand behalten, muß ihm Heizenergie (Gl. 1) zugeführt werden. Die Energie wird bei Strompulsung vom Pulsgenerator und vom Hauptstromgenerator bzw. induktiven Speicher (Bild 4) geliefert. Bei Magnetfeldpulsung liefert der Hauptstrom-Generator bzw. induktive Speicher (Bild 2) den Hauptanteil der Heizenergie. Der kleine Anteil des Pulsgenerators wird durch die nicht völlig vermeidbare Koppelung zwischen den Leitern des Schalters und der Pulswicklung verursacht. Bei thermischer Auslösung liefert der Heizgenerator nahezu die gesamte Aufheizenergie. Aufheizung durch den Hauptgenerator oder induktiven Speicher erfolgt erst oberhalb des  $T_c$ -Wertes und wirkt sich nur bei inhomogenem Schalteraufbau auf das Schaltverhalten aus.

## 6.2 Technische Konzepte für Schalter aus Multifilament-Supraleiterdrähten

### 6.2.1 Thermische Auslösung

Wenn man einen möglichst schnellen, d.h. gleichzeitigen Phasenübergang im Schalterdraht anstrebt, erscheint die elektrische Aufheizung eines Heizleiters sinnvoll, der sich in unmittelbarer Nachbarschaft des supraleitenden Schalterdrahtes befindet (Bild 6). Zwei sich ungünstig beeinflussende Effekte sind zu beachten:

- a) Der Heizleiter sollte aus Gründen der schnellen Wärmeüberganges einen großflächigen gut wärmeleitenden Kontakt mit dem Supraleiter haben.

- b) Der Heizleiter muß vom Supraleiter elektrisch isoliert sein, damit der Heizstrom nicht über Kontaktstellen in den Supraleiter kommutiert.

Da gute elektrische Isolierstoffe auch gleichzeitig schlechte Wärmeleiter sind, ergeben sich für Schalter mit thermischer Auslösung ungünstige Voraussetzungen. Zur Wahl stehen Kunststoffisolationen (Lacküberzug, Glasfasergewebe, Gießharz, Polyimide) oder das Kühlmittel (Liq He, He-Gas, überkritisches He) dient als Isolation, wobei zwischen Supraleiter und Heizleiter ein hinreichend großer Abstand gewählt werden muß. Die rechnerische Erfassung der Vorgänge beim Auslösen bereitet Schwierigkeiten, da sich Zusammenhänge ergeben, für die es keine allgemeinen analytischen Lösungen gibt. Spezielle Näherungsbetrachtungen zeigen, daß wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoff bzw. Heliumgas sowie wegen des großen aufzuheizenden inaktiven Volumens der Energiebedarf für die Auslösung sehr groß ist. Um schnelle Schaltvorgänge zu gewährleisten, müssen leistungsstarke Generatoren vorhanden sein, mit kleinen Stromanstiegszeiten beim Einschalten. Dies bedingt kleine Generator- und Schalterinduktivitäten. Ferner wird der Schaltvorgang durch schlechte Wärmeleitung und schlechten Wärmeübergang zwischen Heiz- und Supraleiter sowie technisch bedingten Inhomogenitäten des Schalters, die ungleichmäßige Aufheizung verursachen, verlangsamt.

Mit den in Bild 6 angegebenen Schalterkabeln lassen sich niederinduktive Schalteranordnungen in Spulenform herstellen. Ein Schalter kann spiralförmig bifilar gewickelt werden, wobei er nach Baukastensystem aus mehreren pan cakes bestehen kann. Ein- oder mehrlagige Zylinderspulen können außer in bifilarer Wickeltechnik auch nach dem Kreuzwickelprinzip gebaut werden. Spulenordnungen sind mit hinreichender mechanischer Festigkeit ausführbar. Mäanderförmige Schalteranordnungen sind sowohl in niederinduktiver als auch in mechanischer Hinsicht ungünstiger. Die

Herstellung scheint aber weniger aufwendig, so daß bei langsam wirkenden Schaltern für thermische Auslösung diese Version durchaus interessant sein kann.

Wenn an thermisch auszulösende Schalter hohe Ansprüche an die Spannungsfestigkeit gestellt werden, können schnelle Abschaltungen nicht realisiert werden. Die große Isolationsstärke erschwert den Wärmeübergang vom Heizleiter zum Supraleiter und bewirkt zeitliche Verzögerungen bei der Auslösung, die am Schalterkabel örtlich sehr unterschiedlich sind.

### 6.2.2 Strompulsauslösung

Schalter und Strompulsgeneratoren können bei diesem Auslöseverfahren sehr niederinduktiv gebaut werden. Man kann sehr steile Stromanstiege erzielen, so daß der Phasenübergang im Schalter in wenigen ns zu erwarten ist. Da die Stromkommutierung dementsprechend schnell von  $R_S$  in  $R_L$  (Bild 4) erfolgt, treten in  $L_{zu}$  und  $L_L$  hohe induktive Spannungen auf, die den Schalter belasten und größer als der ohmsche Spannungsabfall an  $R_L$  sind. Bei der Strompulsung sollte der Hauptkreis (Bild 4) möglichst nicht mit Strompulsen aus dem Pulsgenerator belastet werden. Verfahren, bei denen Schalter, Belastung und Pulsgenerator parallel geschaltet sind, scheiden daher aus. In Bild 7 ist ein gebräuchliches Verfahren der Strompulsung angegeben. Bei linearem elektrischen Verhalten aller Elemente erfolgt Spannungskompensation. Somit ist im supraleitenden Zustand die Summenspannung am Schalter auch bei Pulsung Null. Da in einer Schalterhälfte Stromaddition des Puls- und Ruhestromes in der anderen aber eine Subtraktion der Ströme erfolgt, ergeben sich zeitlich verschobene Phasenübergänge in den Schalterzweigen. Dadurch wird die Kompensationsschaltung kurzfristig unwirksam, was zu unerwünschten zusätzlichen Spannungsbelastungen am Schalter führt. Ein Teil der Energie der Strompuls-kondensatorbatterien (Bild 7) ent-

läßt sich über die Belastung teilweise in Richtung und teilweise in Gegenrichtung zum kommutierten Dauerstrom. Dadurch ergeben sich extrem hohe Pulsstrombelastungen im Lastwiderstand. Diese Nachteile des für schnelle Abschaltung geeigneten Prinzipes können durch aufwendige Strompulsschaltungen vermindert werden (Bild 8). Die angegebene Schaltung eignet sich für Schalter mit hochohmigem RSN aber kleinen Schalterpulsinduktivitäten. Schnelle Abschaltungen sind somit möglich. Vollständig können Störungen des Pulskreises im Hauptkreis nicht vermieden werden.

Um die notwendige Energie für Strompulsauslösungen abzuschätzen, reicht die Bedingung nach Gl. 1 nicht aus. Wenn, wie im Bild 9 eingezeichnet, der Übergang von supraleitenden in den normalleitenden Zustand beim Strom  $\hat{I}_c$  eintritt, ist im Schalter bereits die Energie

$$E_{s1} = L_s \hat{I}_c^2 \frac{1}{2} \cdot n \quad (8)$$

gespeichert. Falls zur Bereitstellung der Energie ein kapazitiver Speicher benutzt wird, beträgt bei Vernachlässigung von Verlusten die gespeicherte Energie:

$$E_{c1} = (L_s + L_{KB}) \hat{I}_c^2 \frac{n}{2} = C_p U_{c1}^2 \frac{n}{2} \quad (9)$$

Bei Voraussetzung von homogenem Schaltermaterial und Schalteraufbau gibt Gl. 9 die Mindestenergie für eine Schalterauslösung an, wenn

$$\hat{I}_c^2 \leq \hat{I}_{\max}^2$$

und

$$L_s > L_{skr} = \frac{2 V_s \int_0^T g^c c_p dT}{n \hat{I}_c^2} \quad (10)$$

sind. Theoretisch kann  $L_{skr} > L_s$  sein. Dann berechnet sich die erforderliche Mindestenergie zur Auslösung nach

G1. 1. Dieser Fall wird jedoch auch bei sehr niederinduktivem Aufbau des Schalters nicht realisiert werden können. Vom Leiterabstand der Supraleiter wird die kleinste erzielbare Induktivität festgelegt. Man erhält angenähert:

$$L_s = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{l_{sup}}{2n \cdot m} (1 + 4 \ln \frac{a}{r}) \quad (11)$$

- mit n Anzahl der Segmente (Bild 8)  
 m Anzahl der parallelen Schalterdrähte  
 a mittlerer Abstand der Schalterdrähte  
 r aktiver Radius der Schalterdrähte  
 l<sub>sup</sub> Länge eines Supraleiterdrahtes.

Dient als Energiequelle ein Kondensatorgenerator, gelten folgende Beziehungen näherungsweise für den Entladungskreis:

$$\hat{i}_{max} = U_{co} \sqrt{\frac{C_p}{L_s + L_{KB}}} \quad (12)$$

$$\frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{(L_s + L_{KB}) C_p} \quad (13)$$

Setzt man einen Bandleiter- oder Kabelgenerator ein, gilt:

$$i = \frac{U_0}{Z} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (14)$$

mit  $\tau = \frac{L_s + L_{KB}}{Z} \quad (15)$

$$Z = \sqrt{\frac{L'_B}{C'_B}} \quad (16)$$

In den Gleichungen 12 bis 16 ist (Bild 7):

- U<sub>co</sub> Ladespannung des Kondensators  
 L<sub>KB</sub> Zuleitungs- und Batterieinduktivität  
 L<sub>K</sub> Zuleitungs-Induktivität  
 L'<sub>B</sub> Bandleiterinduktivität/Länge  
 C'<sub>B</sub> Bandleiterkapazität/Länge

Die optimale Ausnutzung eines Generators liegt vor, wenn  $\hat{I}_C = \hat{I}_{\max}$  (Kondensatorgenerator) oder  $i = I_{\max} = U_0/Z$  (Kabelgenerator) ist. Muß, wie im Bild 9 angedeutet,  $\hat{I}_{\max} > \hat{I}_C$  sein, um den Endwert des Schalterwiderstandes  $R_{SN}$  zu erreichen, liegen technische Mängel vor:

Örtlich unterschiedliche Magnetfelderhöhungen beeinflussen die Auslösung; fertigungstechnische Veränderungen (kleine Schäden) bedingen örtlich unterschiedliche  $\hat{I}_C$ -Werte, so daß nicht alle Zonen gleichzeitig in den Normalzustand übergehen können; der Schalter ist inhomogen und unsorgfältig hergestellt; eine ungünstige konstruktive Lösung wurde gewählt; das Supraleitermaterial ist fehlerhaft; u.s.w....

Zur Beurteilung eines Schalters läßt sich ein Qualitätsfaktor definieren:

$$K_Q = \frac{L_S \hat{I}_C^2}{C_p U_{CK}^2 - L_{KB} \hat{I}_C^2} \quad (17)$$

In Gl. 17 ist  $U_{CK}$  die kleinste Kondensatorladespannung bei der im gesamten Schalter Normalleitung erreicht werden kann. Infolge der ohmschen Verluste im ständig normalleitenden Teil des Pulsauslösekreises und der erwähnten technischen Mängel, die  $\hat{I}_C < \hat{I}_{\max}$  bewirken, muß der Maximalwert für  $K_Q < 1$  sein. Je kleiner  $K_Q$  ist, desto mehr weicht ein Schalter vom idealen Konzept ab.

Um rasch und mit geringer Energie schalten zu können, muß  $L_S$  möglichst klein sein. Es können die in Bild 5 angegebenen Wickelanordnungen angewendet werden, wobei Stromkompensation im Schalter für den Pulsstrom und den Hauptstrom vorliegen muß. Auf eine Verseihung der Supraleiterdrähte wie beim thermisch ausgelösten Schalter kann verzichtet werden. Im Bild 10 sind die Konstruktionszeichnungen von zwei Schaltern für Badkühlung angegeben, die alle oben aufgeführten Bedingungen erfüllen.

Die Strompulsauslösung ist von allen Auslöseverfahren mit einem Minimum an Energieaufwand durchzuführen, weil nur aktives Schaltervolumen zu erregen ist, um den Phasenübergang zu erzielen. Dementsprechend ergeben sich auch kleine Schaltzeiten, da die Auslöseenergie schnell bereitgestellt werden kann.

### 6.2.3 Magnetfeldpulsauslösung

Bei diesem Auslöseverfahren muß auch inaktives Volumen mit magnetisiert werden. Der Pulsenergiebedarf ist daher immer größer als bei der Strompulsung; bei ungünstigen Anordnungen ist der Pulsenergiebedarf sogar wesentlich höher als bei thermischer Auslösung. Da das Schaltervolumen magnetisiert werden muß, können keine induktivitäts-kompensierenden Anordnungen für den Erreger teil des Schalters gewählt werden. Man kann lediglich durch geschicktes Verschalten eine kleine resultierende Erregerinduktivität des Schalters anstreben. Das Pulssignal wird wegen dieser funktionell bedingten Schaltererregerinduktivität eine größere Anstiegszeit aufweisen als bei der Strompulsung. Hieraus darf aber nicht unbedingt auch eine große Durchschaltzeit gefolgert werden. Wenn es gelingt, den kritischen Feldwert für den Phasenübergang im Schaltervolumen gleichzeitig zu erreichen, ergeben sich kleine Schaltzeiten. Man muß daher ein räumlich homogenes Pulsfeld anstreben. Da dies unbeeinflusst vom Supraleiter erfolgen kann, läßt sich grundsätzlich eine elektromagnetische günstigere Lösung finden als bei der Strompulsung. Man darf also erwarten, daß aus diesem Grunde ähnlich kleine Schaltzeiten wie bei der Strompulsung erreichbar sind.

Ein Schalter für Magnetfeldauslösung ist mit dem Hauptkreis nicht galvanisch verbunden. Außerdem kann man den Schalter so bauen, daß nur vernachlässigbare transformatorische Kopplung zwischen Pulskreis und Hauptkreis vorliegt. Dadurch treten nur unwesentliche Spannungs-

störungen durch die Pulsung im Hauptkreis auf. Der Kommutierungsvorgang erfolgt sauber, da kaum Energie vom Pulskreis in den Hauptkreis gelangt. Dieses sind entscheidende Vorteile der Magnetpulsung gegenüber der Strompulsung bei sonst ähnlichem Verhalten.

Da keine extrem kleinen Schaltererregerinduktivitäten möglich sind, sollte der Pulsgenerator sehr niederinduktiv aufgebaut werden. Für schnelle Abschaltungen erscheinen Bandleitergeneratoren gut geeignet.

Da der Schalter im Hinblick auf kleine Schaltererregerinduktivität, auf vernachlässigbar geringe transformatorische Kopplung zwischen Puls- und Hauptkreis, auf minimalen Energiebedarf zur Aufbringung des Pulsfeldes und auf ausreichend großen Widerstand im normalleitenden Zustand hergestellt werden muß, kann keine "Schalterspule" mit umlagerter "Pulsspule" benutzt werden. Der Energiebedarf würde unerträglich hoch und die Induktivitäten zu groß sein, um noch schnelle Abschaltungen zu ermöglichen. Eine geeignete Schalterform für Badkühlung und Zwangskühlung mit überkritischem Helium liegt vor, wenn das Schaltermaterial zwischen Bandleitern (Bild 11) angebracht wird. Ein solcher Schalter kann isoliertechnisch und kühltechnisch bei einem Minimum an inaktivem Volumen gut beherrscht werden. Die Schalterdrähte lassen sich ohne Verseilung parallel anbringen und durch bifilare Anordnung tritt nur eine kleine Schalterhauptkreisinduktivität sowie geringfügige transformatorische Kopplung zwischen Puls- und Hauptkreis auf. Die Schaltererregerinduktivität läßt sich durch Parallelschaltung und/oder Veränderung der Bandleiterlänge und -breite gut an einen Pulsgenerator anpassen.

Für Schalter mit Magnetfeldpulsauslösung gelten analoge energetische Betrachtungen wie bei stromgepulsten Schaltern, so daß die Gl.8 bis 10 entsprechend gelten. Für  $\hat{I}_C$  muß der Strom angesetzt werden, bei dem  $\hat{H}_C$  zwischen den Bandleitern vorliegt. Zwischen Strom und Feld besteht folgende Beziehung in einem Bandleiter:

$$\hat{H}_y = \frac{\hat{I}/m}{2\pi_b h} \left\{ i (G_1 - G_3) + j (G_2 - G_4) \right\} \quad (18)$$

$$\hat{H}_x = i\hat{H}_y + j\hat{H}_x \quad (19)$$

Die Geometriefaktoren  $G_1 - G_3$  und  $G_2 - G_4$  sind im Anhang I angegeben.

Als Schaltererregerinduktivität gilt für diesen Schalter:

$$L_s = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{1}{m} \ln \frac{h+d}{h} \quad (20)$$

mit  $m$  als Anzahl der parallelen Bänder.

Zur Bestimmung der elektrischen Generatoraten gelten wie bei der Strompulsung die Gleichungen 14 bis 15.

Schwieriger als bei der Strompulsung ist bei der Magnetfeldpulsung die Herstellung induktivitätsarmer Zuleitungen in den kalten Bereich. Ein Mindestquerschnitt kann für die Bandleitung nicht unterschritten werden und die notwendige induktivitätsarme Durchführung in den kalten Bereich kann nicht nach kryotechnisch vernünftigen Gesichtspunkten hergestellt werden. Höhere Heliumverluste als bei Strompulsung müssen in Kauf genommen werden.

### 6.3 Sonstige Schalterkonzepte

Die bisher beschriebenen technischen Schalterkonzepte gehen davon aus, daß das Schaltermaterial in Drahtform vorliegt (NbTi Multifilamentleiter mit CuNi-Matrix). Sollten andere Materialien wie z.B. Niobnitrit zum Einsatz kommen, muß die Herstellung eines Schalters

nach anderen konstruktiven Gesichtspunkten erfolgen. Niobnitrit liegt in unveränderlicher Form als dünne Schicht auf einem Materialträger vor. Der Materialträger muß bei Schaltern aus Kunststoff bestehen. Ob man die dünne Niobnitritschicht als schmales Band oder als geschlossenes Röhrchen herstellt, muß durch Stabilitätsuntersuchungen geklärt werden. Komplizierte Konfigurationen (bifilare Bänder auf einem Trägerrohr mit großem Durchmesser) wären zweckmäßig; jedoch müssen zu diesem Zwecke noch geeignete Herstellungsverfahren entwickelt und erprobt werden. Bei Abscheidung von Niobnitrit aus der Gasphase und der Herstellung durch Sputterverfahren können komplizierte Konfigurationen gefertigt werden.

Grundsätzliche Gesichtspunkte für die Anwendung der einzelnen Pulsverfahren sowie die allgemeinen Dimensionierungsrichtlinien gelten analog für Schalter aus verformbarem Drahtmaterial und nichtverformbarem Bandmaterial (Niobnitrit). Bei der Anwendung von Niobnitrit muß die thermische Belastbarkeit besonders beachtet werden, da als Folge der hohen kritischen Stromdichte und des hohen spezifischen Widerstandes nur ein kleines Schaltervolumen vorliegt. Die thermischen Auslösungsverfahren erscheinen wenig erfolgversprechend; gut geeignet sind die Pulsauslösungen durch Strom und Magnetfeld. Wegen des kleinen Schaltervolumens können sehr niederinduktive Magnetfeldpulsanordnungen hergestellt werden, so daß insbesondere dieses Verfahren bei Niobnitrit-Schaltern günstige Voraussetzungen für eine Anwendung hat.

## 7. Zusammenfassung

Im Bericht werden spezielle technische Probleme von schnell schaltenden SL/NL-Strombegrenzern erläutert.

Zunächst werden Forderungen, die man an schnell wirkende "Abschalter" stellen muß, aufgestellt. Neben der allgemeinen Bedeutung spezifischer Größen (Temperaturabhängigkeit und Materialabhängigkeit des ohmschen Widerstandes oberhalb  $T_c$ ) werden die Schaltzeiten beeinflussende Faktoren, wie Auslöseenergie und Eigenschaften des den Auslösungspuls liefernden Generators, erklärt. Auf die Stabilität des Schalters im SL-Zustand wird allgemein eingegangen; speziell wird nur auf konstruktive Maßnahmen hingewiesen, die die Stabilität beeinflussen können.

Dimensionierungsprobleme werden grundsätzlich und unter Berücksichtigung spezieller wichtiger Gesichtspunkte diskutiert. Soweit es möglich ist, werden formelle Zusammenhänge angegeben.

Die einzelnen Auslöseverfahren für SL/NL Abschalter werden diskutiert. Eingehend werden Vorteile und Nachteile der Strompuls- und Magnetfeldpulsauslösung erläutert, da beide Verfahren für die Auslösung schneller Abschalter geeignet sind. Es werden einige Schalterkonzepte vorgestellt, die als Baustein für schnell wirkende Abschalter dienen können. Man kann durch Parallelschaltung dieser Bausteine hohe Ströme abschalten und durch Serienschaltung einen hohen Widerstand erzielen sowie hohe Spannungen am Schalter zulassen.

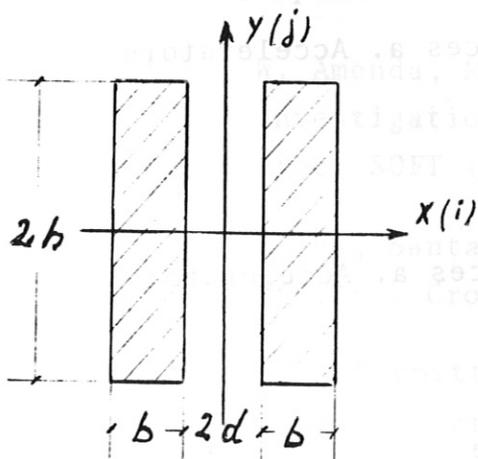
ANHANG

Geometriefaktoren zur Berechnung der Induktivität eines Bandleiters  
(Siehe Text Seite 28 Gl. 18).

$$G_1 - G_3 = \left[ (h-y) \arctan \frac{2x(y-h)(b^2+2db)}{(2x(y-h))^2 + ((y-h)^2 + (b+d)^2 - x^2)((y-h)^2 + d^2 - x^2)} \right. \\ + (h+y) \arctan \frac{2x(y+h)(b^2+2db)}{(2x(y+h))^2 + ((y+h)^2 + (b+d)^2 - x^2)((y+h)^2 + d^2 - x^2)} \\ + \frac{d+x}{2} \ln \frac{(y+h)^2 + (d+x)^2}{(y-h)^2 + (d+x)^2} - \frac{d-x}{2} \ln \frac{(y+h)^2 + (d-x)^2}{(y-h)^2 + (d-x)^2} \\ \left. + \frac{b+d-x}{2} \ln \frac{(y+h)^2 + (b+d-x)^2}{(y-h)^2 + (b+d-x)^2} - \frac{b+d+x}{2} \ln \frac{(y+h)^2 + (b+d+x)^2}{(y-h)^2 + (b+d+x)^2} \right]$$

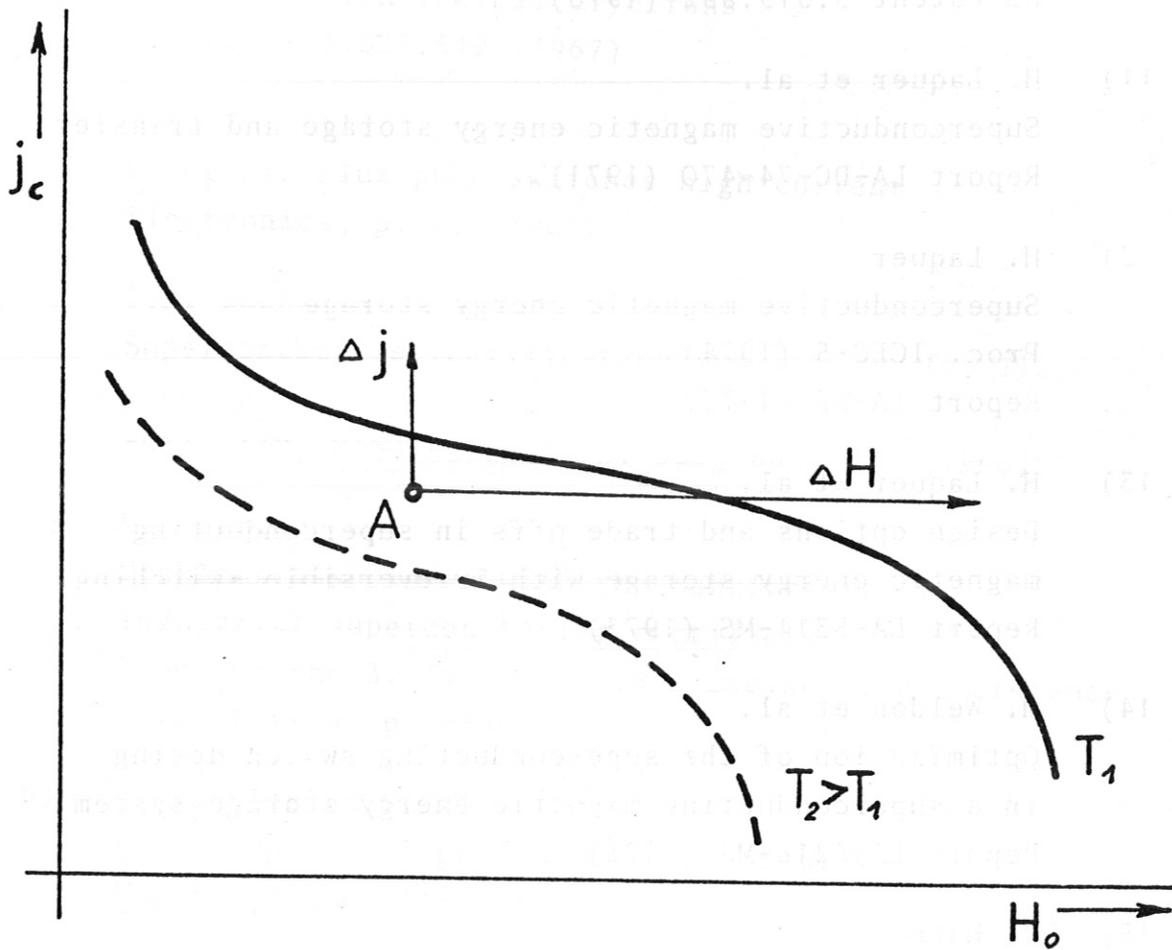
$$G_2 - G_4 = \left[ (d-x) \arctan \frac{2h(x-d)}{(x-d)^2 - h^2 + y^2} - (d+x) \arctan \frac{2h(x+d)}{(x+d)^2 - h^2 + y^2} \right. \\ + (b+d-x) \arctan \frac{2h(x-b-d)}{(x-b-d)^2 - h^2 + y^2} - (b+d+x) \arctan \frac{2h(b+d+x)}{(b+d+x)^2 - h^2 + y^2} \\ + \frac{h-y}{2} \ln \frac{((x+b+d)^2 + (h-y)^2)((x-b-d)^2 + (h-y)^2)}{((x+d)^2 + (h-y)^2)((x-d)^2 + (h-y)^2)} \\ \left. + \frac{h+y}{2} \ln \frac{((x+b+d)^2 + (h+y)^2)((x-b-d)^2 + (h+y)^2)}{((x+d)^2 + (h+y)^2)((x-d)^2 + (h+y)^2)} \right]$$

Bandleiterquerschnitt



- 1) T.A. Buchhold  
Flux Pump with Thermal Cryotrons  
US-Patent 3.522.512 (1967)
- 2) T.A. Buchhold  
Cryogenic flux pump switches high current  
Electronics, p. 61 (1967)
- 3) T.A. Buchhold  
Superconductive rectification and its use for flux  
pumping  
Bull. IIR, Commission I, p. 529, Annexe 5 (1966)
- 4) M. Ferrier  
Problems associated with the manufacture of  
industrial superconducting rectifiers  
Proc. of the 3. Int. Cryogenic Engineering Conference  
1970, Berlin, p. 438
- 5) H. van Beelen et al.  
Flux pumps and superconducting solenoids  
Physics 31, p. 413-433
- 6) R.L. Rhodenizer  
Design Principle and Characteristics of the G.E. Flux  
Pumps  
Proc. Summer Study on Supercond. Devices a. Accelerators  
(1968), p. 654
- 7) H. Laquer  
Flux Pump Work at Los Alamos  
Proc. Summer Study on Supercond. Devices a. Accelerators  
(1968), p. 673
- 8) W. Kafka  
Eine supraleitende Gleichstrommaschine  
IPP 4/90 (1971)
- 9) Grünwald, Kafka  
Schweizer Patent Nr. 461 654 (1968)

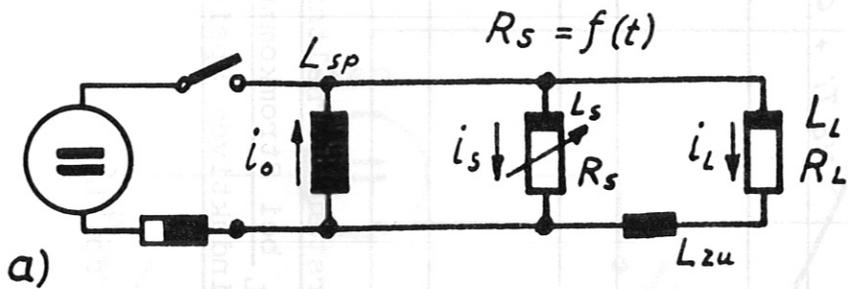
- 10) H. Voigt  
US-Patent 3.519.892 (1970)
- 11) H. Laquer et al.  
Superconductive magnetic energy storage and transfer  
Report LA-DC-74-470 (1971)
- 12) H. Laquer  
Superconductive magnetic energy storage  
Proc. ICEC-5 (1974)  
Report LA-UR-74-737
- 13) H. Laquer et al.  
Design options and trade offs in superconducting  
magnetic energy storage with irreversible switching  
Report LA-5314-MS (1973)
- 14) M. Weldon et al.  
Optimization of the superconducting switch desing  
in a superconducting magnetic energy storage system  
Report LA-5218-MS (1973)
- 15) R. Hake  
Single-short pulsed magnetic fields from inductive  
energy stores  
Report LA-4617-MS (1971)
- 16) W. Amenda, M. Pillsticker, M. Söll  
Investigations on cryotron Breakers in Garching  
Proc. SOFT (1974)
- 17) Krebs, Santamaria, Maldy  
7th Int. Croygenic Engin. Conf., p. 172 (1972)
- 18) K.H. Schmitter  
Arbeitsprogramm: Entwicklung induktiver Energie-  
speicher vom 15. Juni 1972  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching



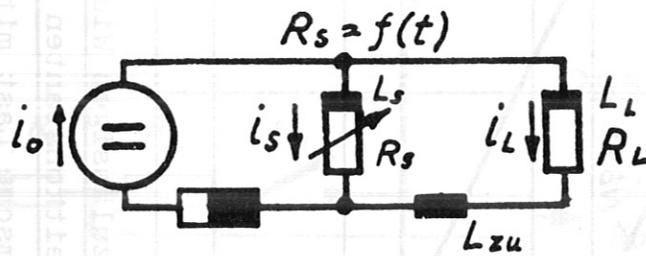
Kritische Stromdichte  $j_c$  als Funktion des magnetischen Feldes  $H_0$

Parameter: Temperatur  $T$

Bild 1



a)



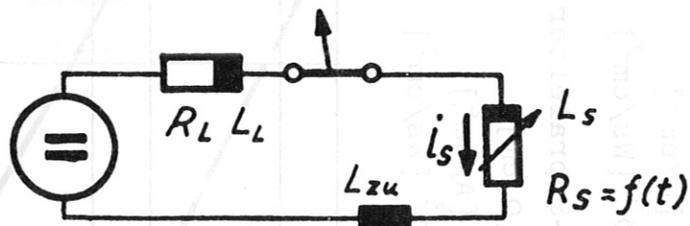
b)

Prinzipschaltbild eines Stromkommutierungskreises

a) mit einem induktiven Energiespeicher

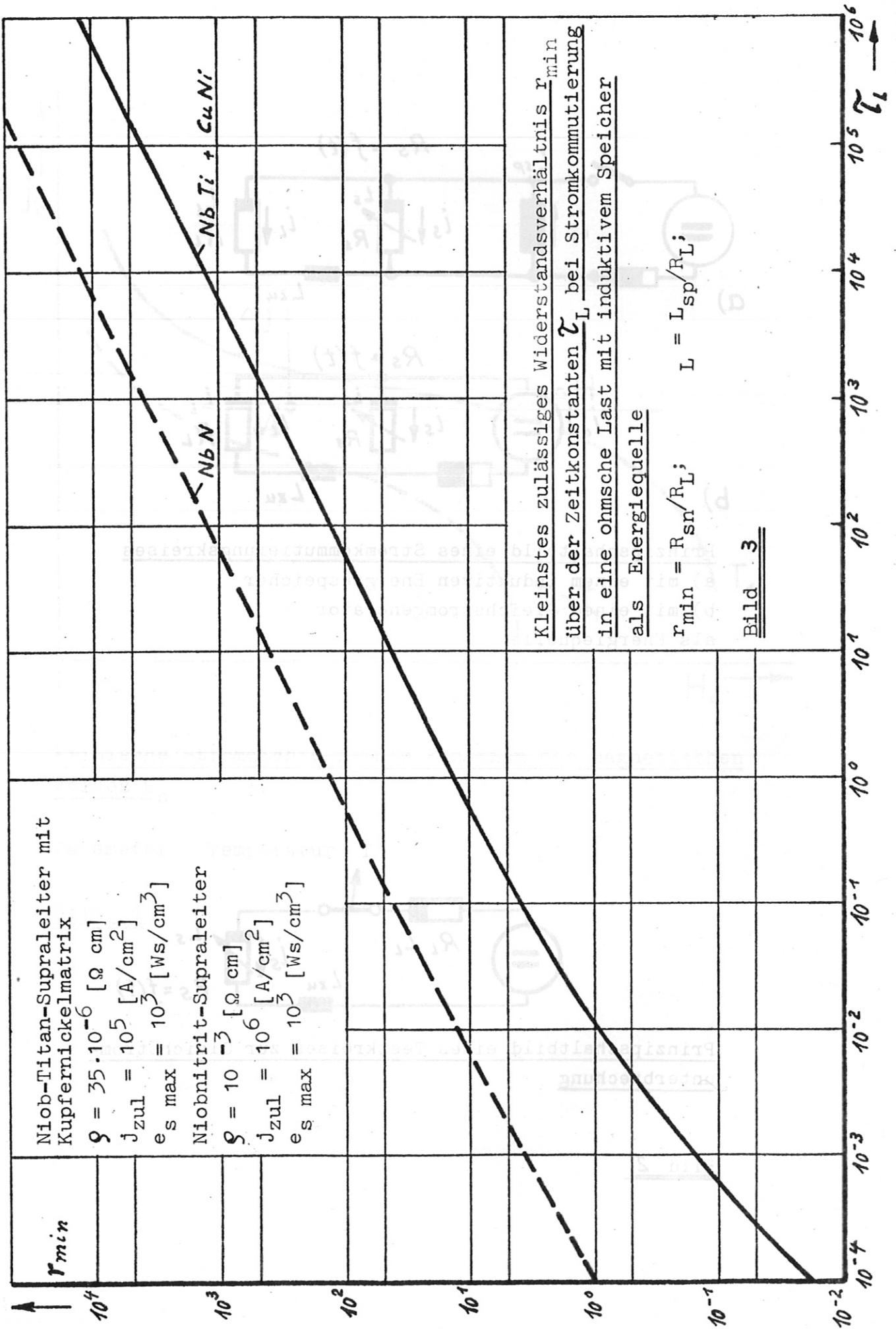
b) mit einem Gleichstromgenerator als Energiequelle

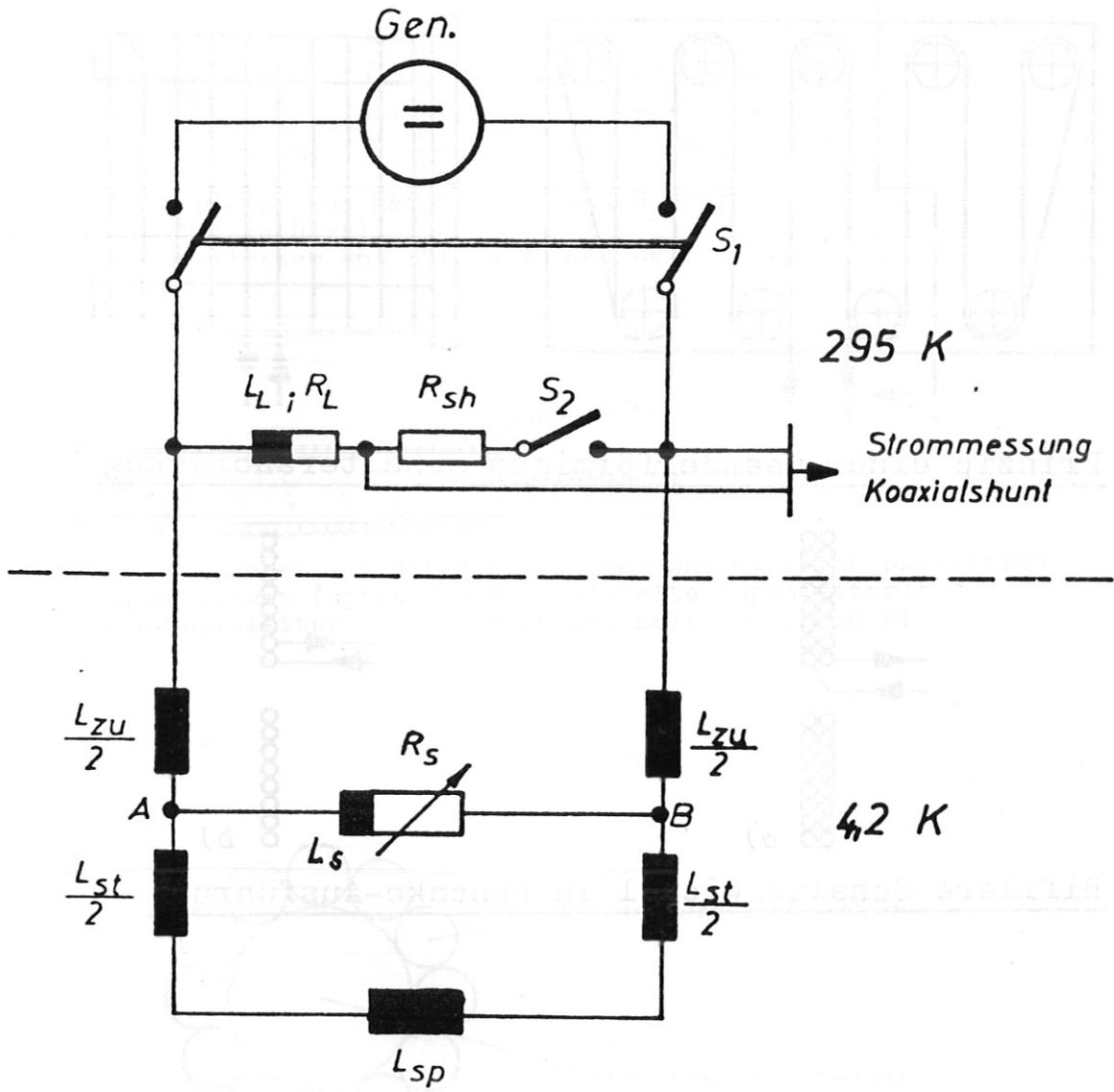
als Energiequelle



Prinzipschaltbild eines Testkreises zur Gleichstromunterbrechung

Bild 2



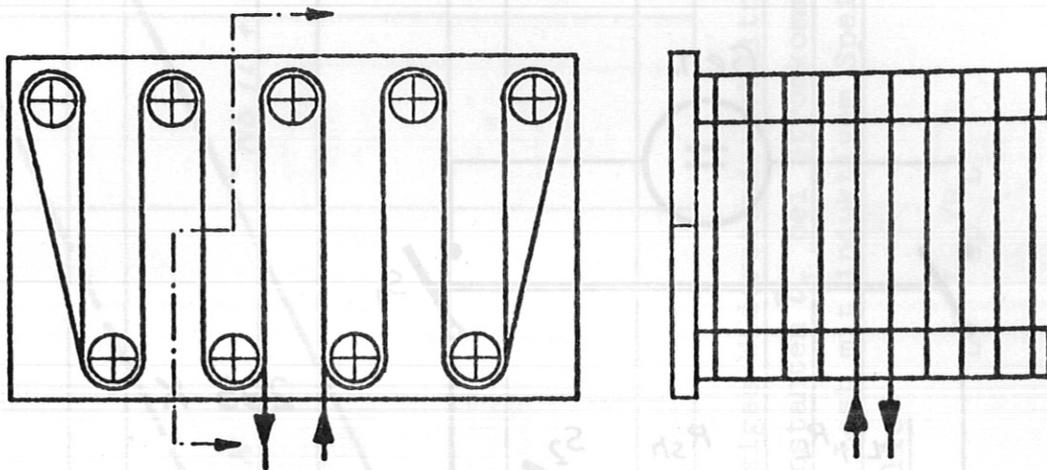


Kommutierungskreis mit Störinduktivitäten

Bild 4

Schalter in Zylinderform

Bild 5



Prinzip einer mäanderförmigen Schalteranordnung



Bifilare Schalterwickel in Pancake-Ausführung

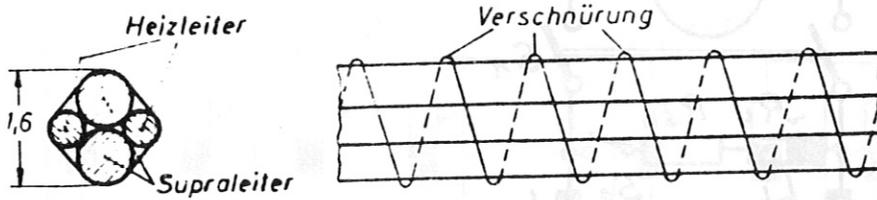


Bifilare Schalterwickel

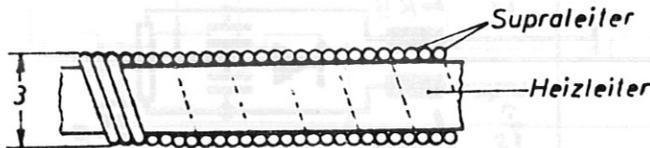
Kreuzspulenwickel

Schalter in Zylinderspulenform

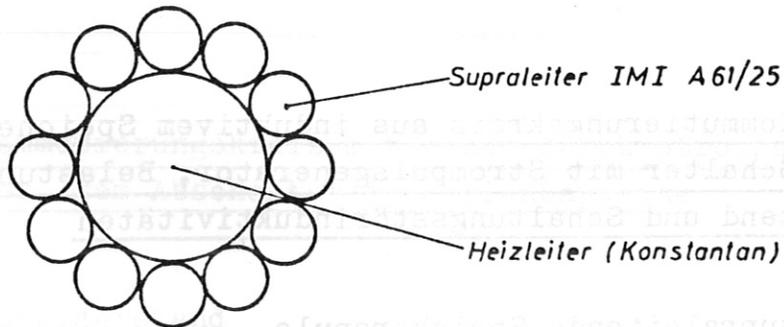
Bild 5



- a) Schalterkabel aus Heizleitern und Supraleitern  
(parallel geführt)  
MCA-Supraleiter 465 Fil. a  $25 \mu\text{m}$ ; Leiter  $0,8 \text{ mm } \phi$ ;

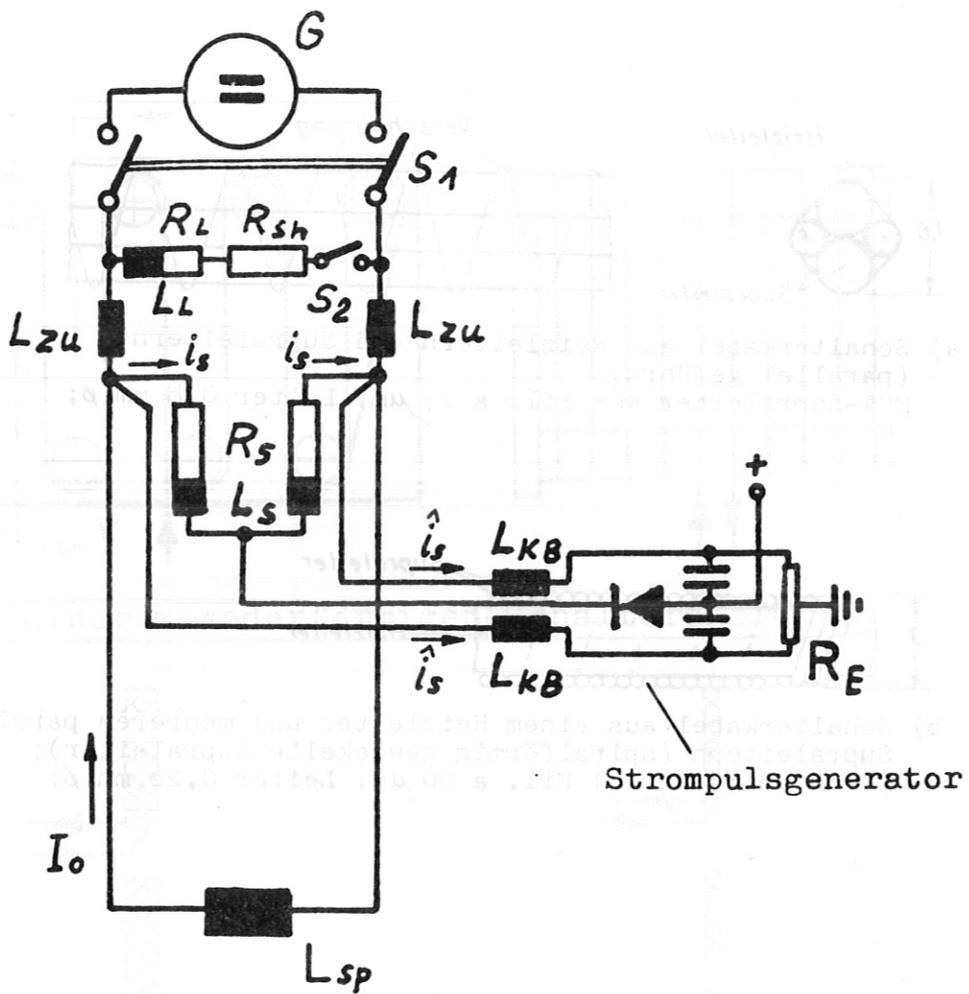


- b) Schalterkabel aus einem Heizleiter und mehreren parallelen  
Supraleitern (spiralförmig gewickelte Supraleiter);  
IMI-Supraleiter 61 Fil. a  $20 \mu\text{m}$ ; Leiter  $0,28 \text{ mm } \phi$ ;



- c) Schalterkabel aus einem Heizleiter und mehreren parallel  
geführten Supraleitern;  
IMI-Supraleiter 61 Fil. a  $20 \mu\text{m}$ ; Leiter  $0,28 \text{ mm } \phi$ ;

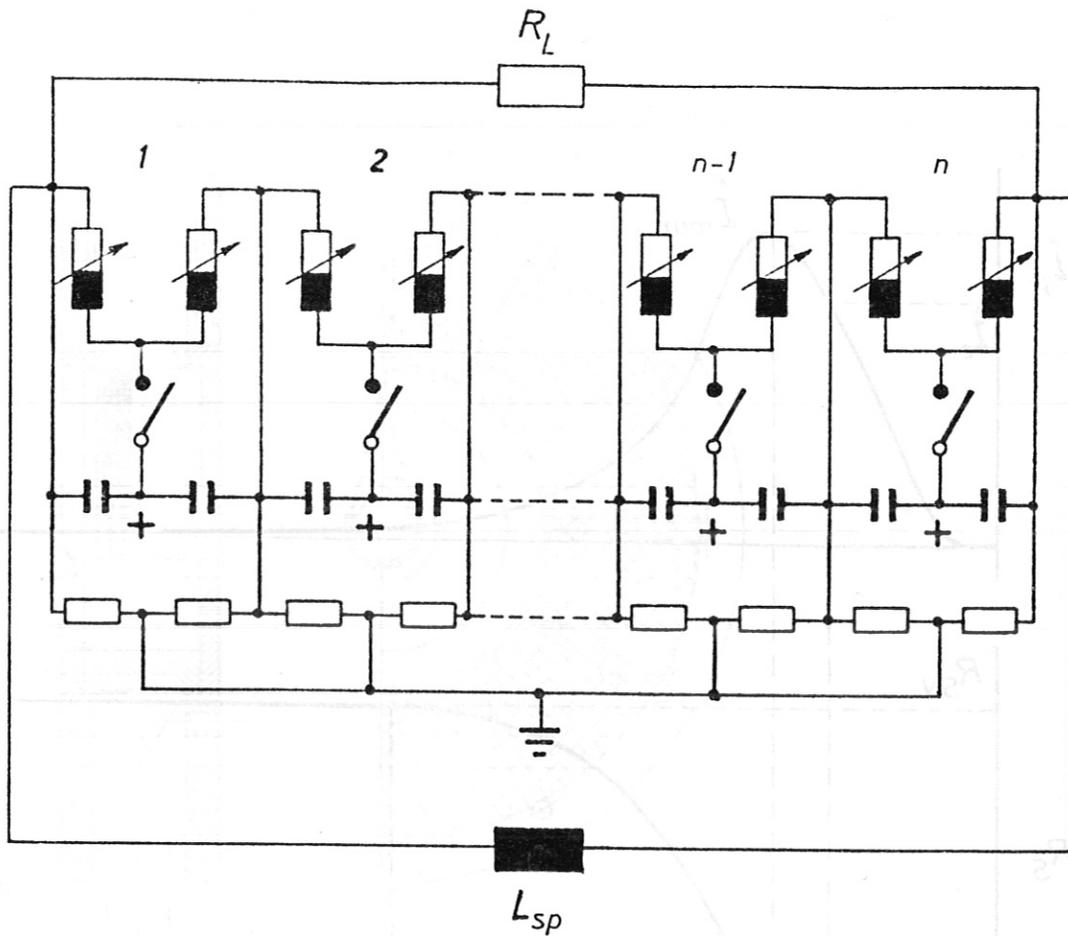
Schalterkabel für thermische Auslösung



Strom-Kommutierungskreis aus induktivem Speicher, SL/NL-Schalter mit Strompuls-generator, Belastungswiderstand und Schaltungsstörlnduktivitäten

- $L_{sp}$  = supraleitende Speicherspule
- $R_s$  = SL/NL Schalter
- $L_s$  = Schalterinduktivitäten
- $R_L$  = Belastungswiderstand
- $L_L$  = Belastungsinduktivität
- $R_{sh}$  = Meßwiderstand

Bild 7



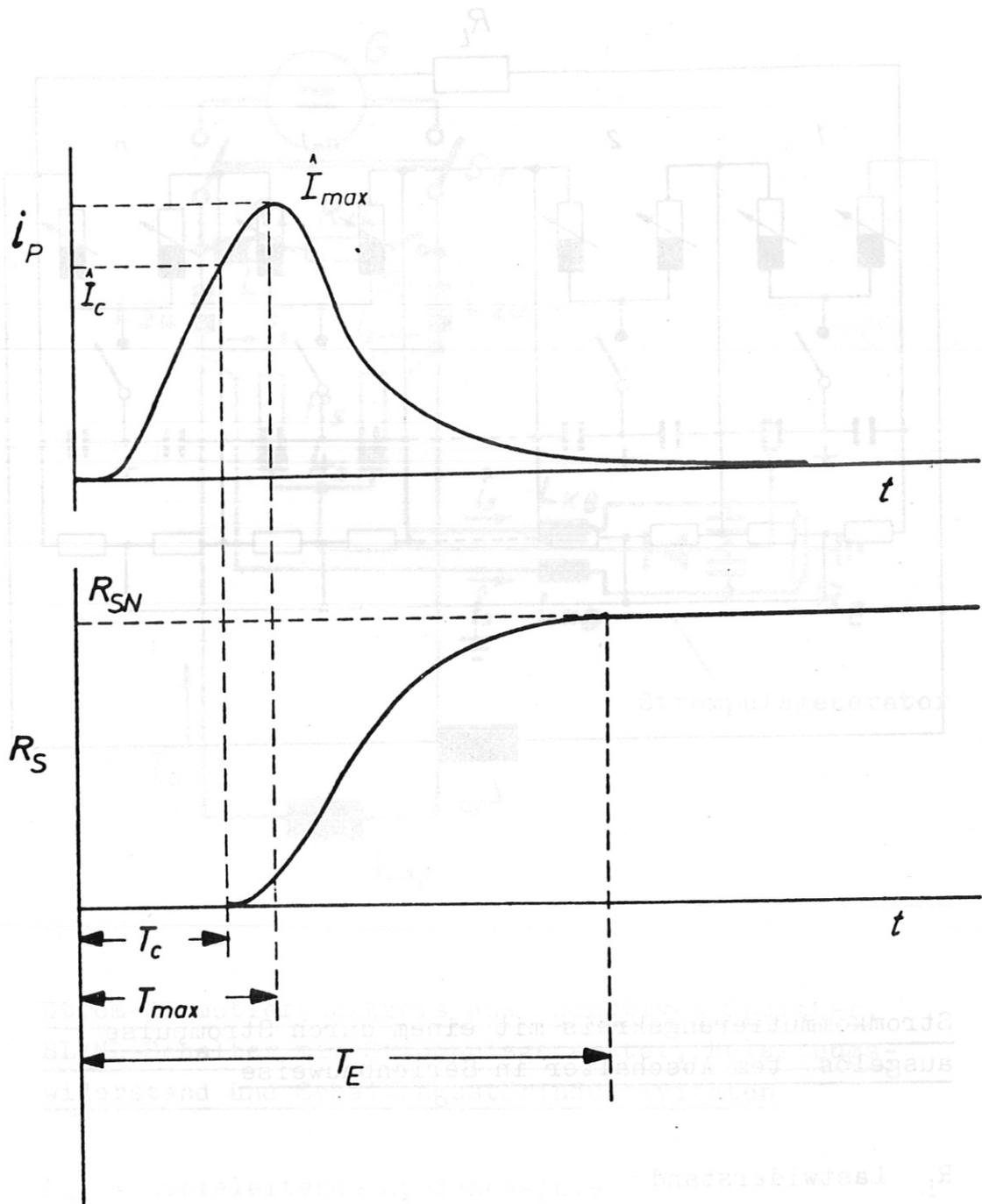
Stromkommutierungskreis mit einem durch Strompulse  
ausgelöstem Abschalter in Serienbauweise

$R_L$  Lastwiderstand

$L_{sp}$  supraleitende Speicherspule

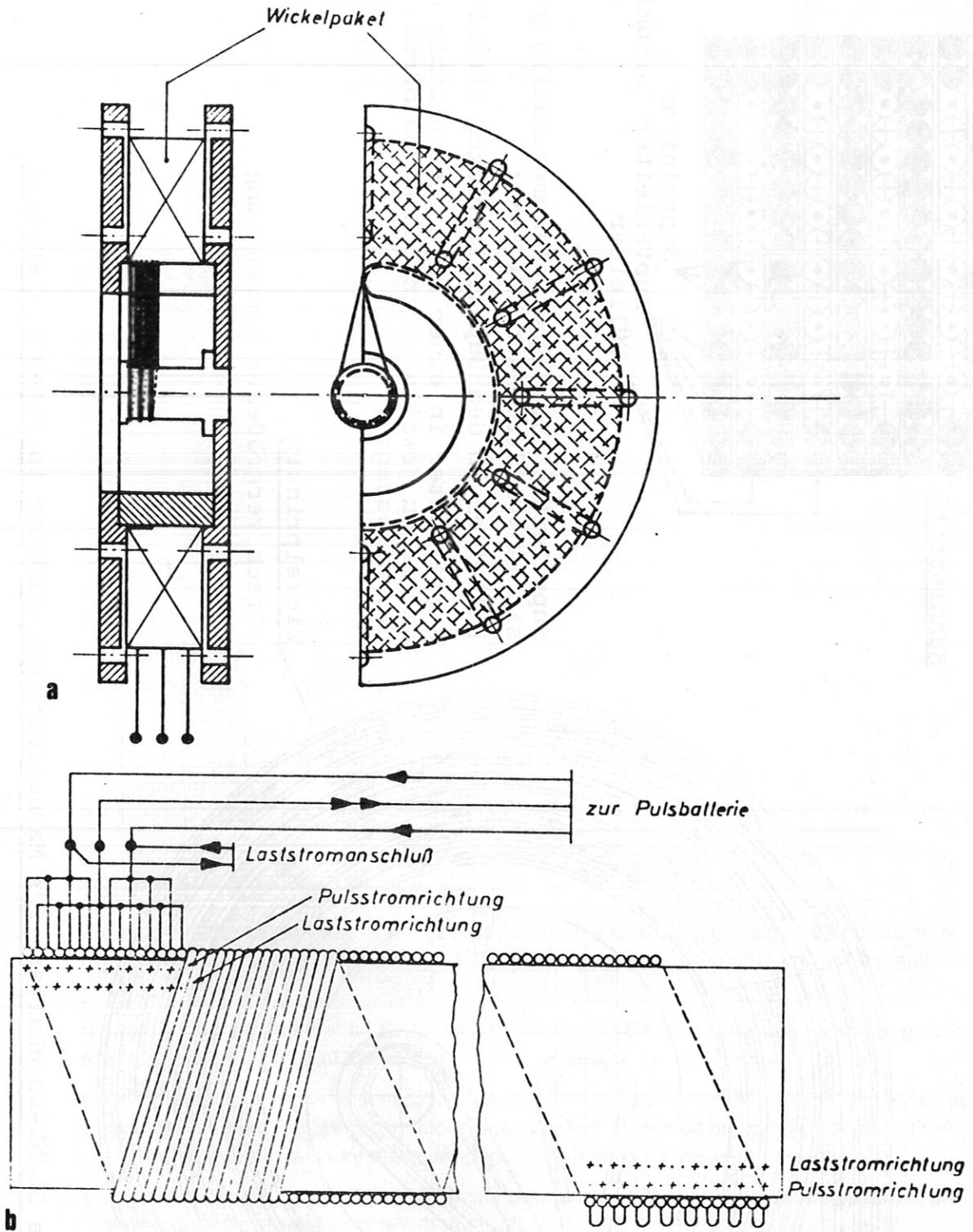
Störinduktivitäten sind nicht eingetragen

Bild 8



Schematische Darstellung des zeitlichen Widerstands-  
verhaltens eines durch Strompuls ausgelösten Abschalters  
ohne Gleichstrombelastung

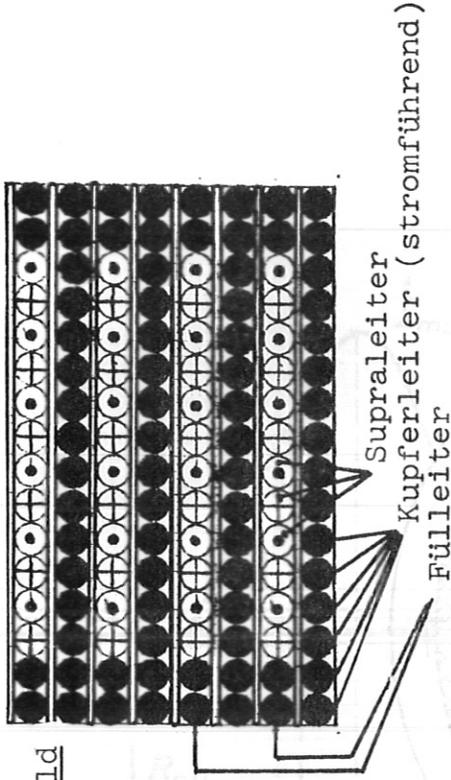
Bild 9



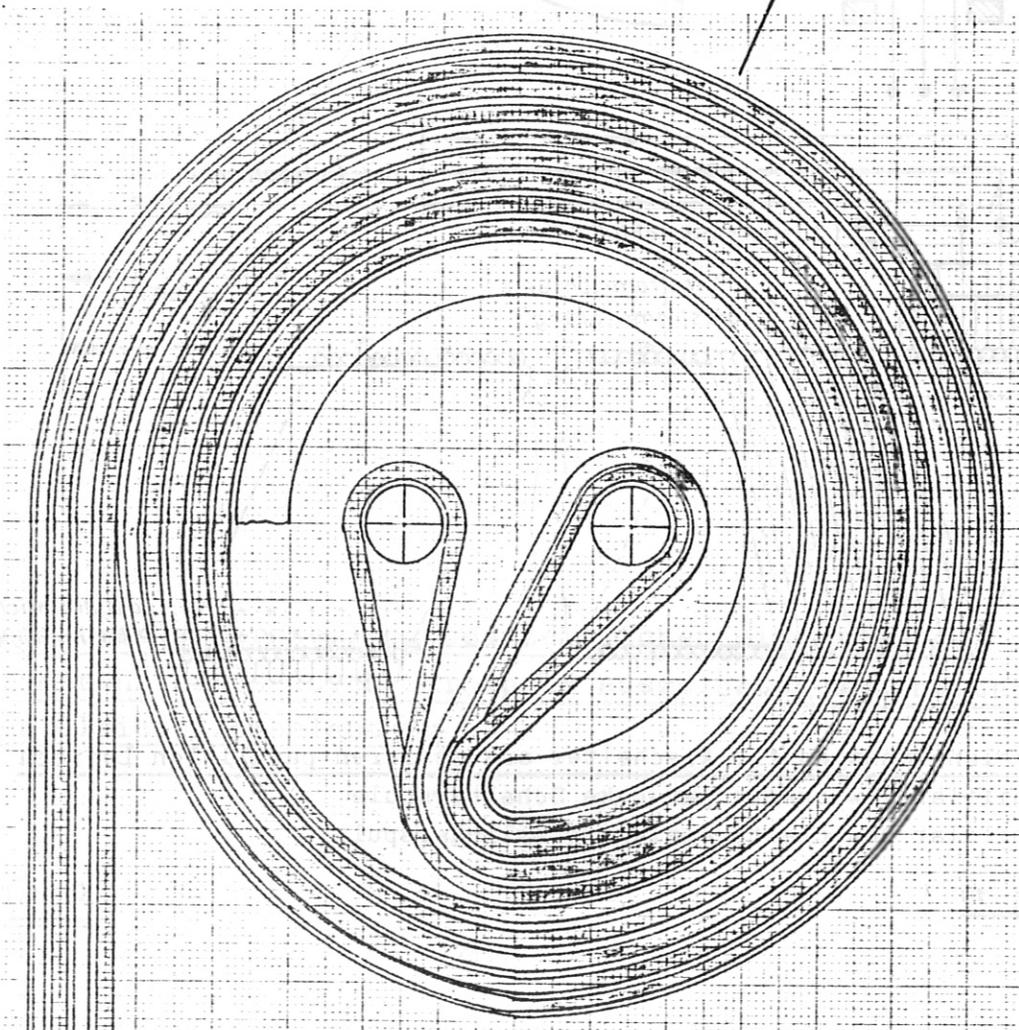
Wickelanordnungen für Abschalter aus mehreren parallelen Leitern  
a) bifilar gewickelte pan-cake Schalterspule  
b) bifilar gewickelte einlagige Zylinderspule

Bild 10

Schnittbild



Supraleiter zur Magnetfeldkompensation gegen-  
sinnig vom Strom durchfließen;  
Füller in den Supraleiterlagen stromlos;  
Kupferleiter in einer Lage gleichsinnig und  
die Lagen jeweils gegensinnig vom Strom  
durchfließen;



Wickelprinzip  
10fach vergrößerte Darstellung

Prinzip eines SL/NL-Abschalters für Magnetfeldpulsauslösung in pan-cake-Bauweise