

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

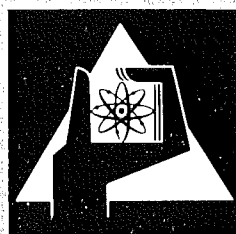
Februar 1975

KFK 2064

Institut für Experimentelle Kernphysik

**Stromtransformation und Feldabschirmung
mit supraleitenden Spulen**

M. Scherer, P. Turowski



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2064

Institut für Experimentelle Kernphysik

Stromtransformation und Feldabschirmung

mit supraleitenden Spulen

M. Scherer, P. Turowski

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H.

Karlsruhe

Zusammenfassung:

Untersuchungen über die induktive Anregung von elektrischen Strömen in supraleitenden Spulen wurden durchgeführt. Die induzierten Ströme waren durch die I_c , B-Charakteristik des Supraleiters begrenzt, so daß es bei gewissen Werten des Magnetfeldes zu einem Stromzusammenbruch kam; im kontinuierlich ansteigenden Magnetfeld wurde erneut ein Strom induziert. Die Auswertung der Strom- und Feldwerte an den Punkten der Stromzusammenbrüche ergaben die kritischen I_c , B-Werte des Supraleiters. In einer Spule aus einem supraleitenden Kabel konnte eine maximale Stromstärke von 4000 A erreicht werden. Die induktive Abschirmung eines Magnetfeldes mit einer supraleitenden Spule ist mit einem negativen Feld im Zentrum gekoppelt.

Current Transformation and Field Screening with Superconducting Coils

Abstract:

Investigations on the inductive generation of electrical currents in superconducting coils are reported. The induced currents are limited by the I_c , B-curve of the superconductor so that they break-down at certain values of magnetic field; after each break-down a current is induced again if the field increases continuously. From an examination of the current-field values at the break-down points the I_c , B-curve for the superconducting material can be derived. As a maximum, currents of 4000 A were induced in a coil made of superconducting cable. Inductive screening of a magnetic field by a superconducting coil is correlated with a negative field in the centre.

E I N L E I T U N G

Die induktive Anregung von Gleichströmen in supraleitenden Kreisen ist insbesondere bei hohen Strömen über 500 A von Vorteil, da man dann ohne aufwendige und voluminöse, abgasgekühlte Stromzuführungen auskommt. Bei Kurzdrahtmessungen oder bei supraleitenden Magneten, die mit hohem Dauerstrom bei geringen thermischen Verlusten betrieben werden sollen, läßt sich dieses Prinzip vorteilhaft anwenden.

Die induktive Stromanregung mit supraleitenden Transformatorspulen hängt von den Eigenschaften des Supraleiters und von der Belastung der Sekundärspule ab. Entsprechend dem eingangs genannten Anwendungsbereich liegen die Stromanstiegszeiten im Minutenbereich, so daß die Frequenz keine Begrenzung darstellt, während aber die Abhängigkeit des kritischen Stromes I_c des Supraleiters vom Magnetfeld B und die Größe der Belastung den supraleitenden Gleichstromtransformator in seinen übertragbaren Stromstärken begrenzen.

Es war nun Aufgabe der vorliegenden Arbeit, die vom Supraleitermaterial bestimmten Grenzen und Eigenschaften von Gleichstromtransformatoren unter verschiedenen Lastbedingungen zu untersuchen. Da es um Fragen der Strom- und Feldgrenzen der Übertragerspulen ging, wurde die Transformator-Anordnung so gewählt, daß die Primärspule ein supraleitendes Solenoid war, in dessen Zentralfeld sich die supraleitende Sekundärspule befand. In dieser speziellen Anordnung sollten dann neben dem Zusammenhang von Feld und transformiertem Strom auch noch die Abschirmwirkungen unbelasteter, d.h. kurzgeschlossener supraleitender Spulen, die den einen Grenzfall des Gleichstromtransformators darstellen, näher untersucht werden. Wie sich später zeigte, konnte man mit dieser speziellen Transformation-Anordnung die Kurzdrahtwerte des in der Sekundärspule verwendeten Supraleiters ermitteln.

I. VERSUCHSANORDNUNG UND MESSUNGEN

1. Transformator-Anordnung

Die Versuchsanordnung für die Stromtransformationsexperimente mit supraleitenden Spulen bestand aus einem supraleitenden Solenoid als Primärwicklung, in das supraleitende Sekundärspulen eingesetzt werden konnten, vgl. Abb. 1. Die Sekundärspule hatte eine solche Länge, daß sie im homogenen Feldbereich des Primärsolenoiden, innerhalb einer Feldabweichung von 2,5 % lag. Der Sekundärkreis dieser Transformator-Anordnung ließ sich mit verschiedenen supraleitenden Induktivitäten belasten, die außerhalb des Primärsolenoiden vertikal angebracht waren. Die Feldstärke am Ort der Lastspulen betrug weniger als 3 % der zentralen Feldstärke. Die Lastinduktivitäten waren somit nahezu vom Primärkreis entkoppelt.

Die Sekundärströme wurden durch das sich zeitlich ändernde Primärfeld induziert. Die Stromversorgung des Primärsolenoiden erfolgte über ein im zeitlichen Stromanstieg von 1 A/min bis 60 A/min regelbares Netzgerät. Der kalte Teil der Versuchsanordnung befand sich in einem Kryostaten üblicher Bauweise (Abb. 1), dessen Heliumgefäß durch ein flüssiges Stickstoff-Bad als Temperaturschild gegen Wärmeeinstrahlung abgeschirmt war. Der Sekundärkreis ist mittels einer Flanschverbindung am Kopf des Kryostaten, auch bei kaltem Primärsolenoiden, austauschbar.

Das Solenoid mußte unempfindlich gegen schnelle Feldänderungen sein, wie sie beim Zusammenbruch der Induktionsströme auftraten. Ein getwisteter Supraleiter mit einem Kupfer-Supraleiter-Verhältnis von 2 : 1 erwies sich hier als brauchbar.

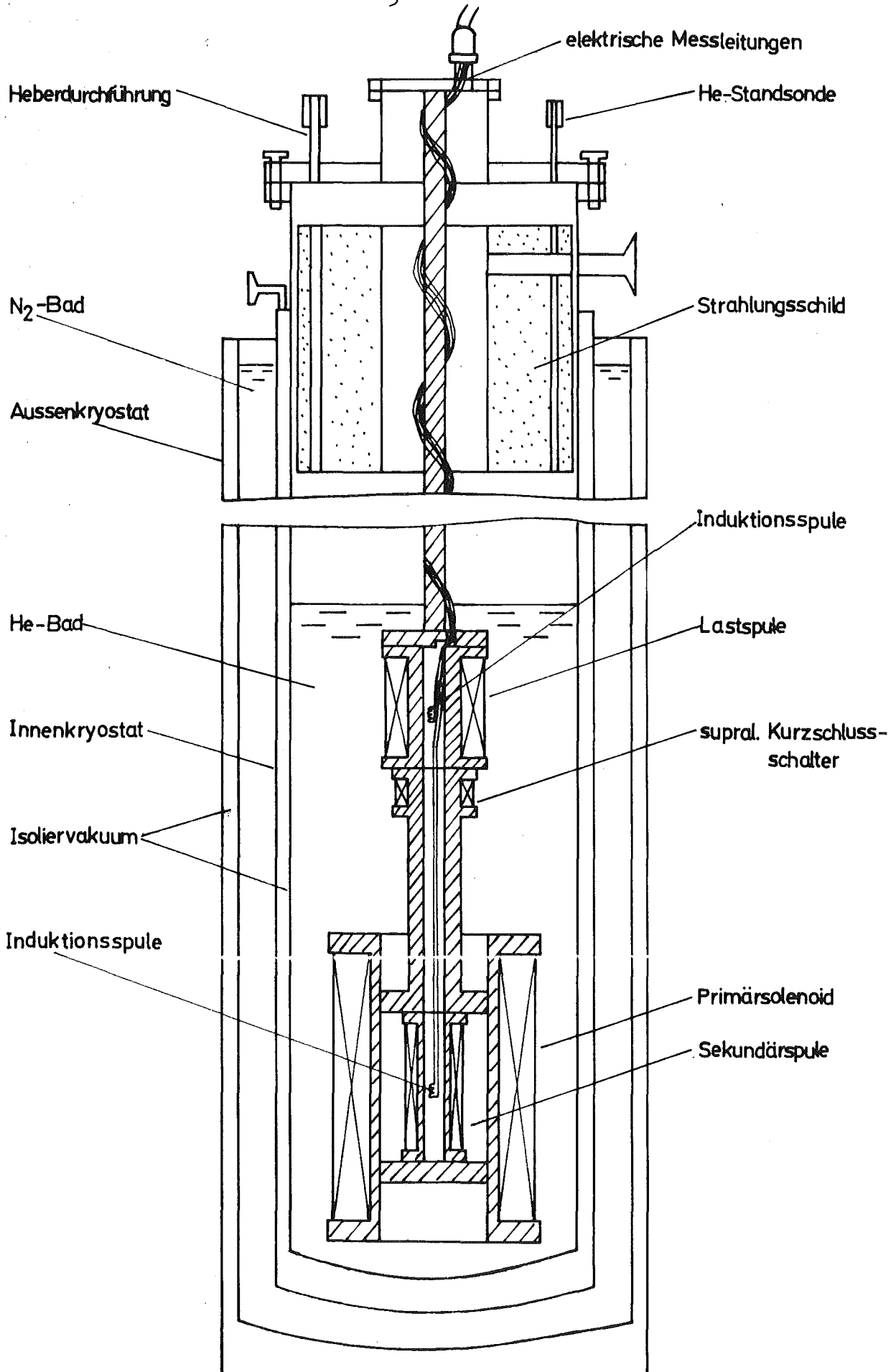


Abb. 1 He-Kryostat mit Versuchsanordnung

2. Der Sekundärkreis

Der Sekundärkreis bestand aus der Sekundärspule und einer angeschlossenen Lastspule. Um die Anordnung auch als Flußpumpe betreiben zu können, ließ sich die Lastspule über einen bifilar gewickelten, supraleitenden Schalter kurzschließen und der Sekundärstrom über einen thermischen Schalter unterbrechen.

Die Sekundärspule war auf einem Kunststoffspulenkörper (glasfaserverstärktes Epoxyharz) von 2 cm Durchmesser und 6 cm Länge gewickelt und mit Epoxyharz vergossen. Sie war mit ihren Verbindungen zur Lastinduktivität im Magneten so aufgehängt und abgestützt, daß auftretende Lorentzkräfte nicht zu Normalleitung auslösenden Bewegungen im Sekundärsystem und am Supraleiter führen sollten.

Da im Sekundärkreis Lötverbindungen waren, mußte die Meßzeit klein gegenüber der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ des Sekundärkreises sein, damit die von der Supraleitung bestimmten Effekte nicht durch normalleitende Effekte überdeckt wurden. Durch Verlöten mit Indium auf einer Länge von 4 cm und gutes Aufeinanderpressen der Kontaktstellen beim Löten konnten Übergangswiderstände von ca. $2 \cdot 10^{-8} \Omega$ erreicht werden, was zu Zeitkonstanten größer 30 Minuten führte. Die Meßzeit betrug im allgemeinen ca. 3 Minuten.

Alle Sekundärspulen waren an einer leicht zugänglichen Stelle mit einer Heizwicklung aus Manganindraht versehen. Mit diesem thermischen Schalter wurden vor jeder Messung Restströme im Sekundärkreis unterbrochen, um die Sekundärspule in einen entmagnetisierten Ausgangszustand zu bringen.

3. Durchführung der Versuche

In der Sekundärspule, die in den Primärsolenoiden eingesetzt war, wurde durch langsamen Feldanstieg ein Strom induziert. Eine geeichte Induktionsspule mit angeschlossenem Integrator registrierte auf einem x-y-Schreiber die Änderungen des Magnetfeldes im Zentrum der Sekundärspule in Abhängigkeit vom Primärstrom bzw. vom außen angelegten Feld. Diese Feldinformation und die Spulengeometrie der Sekundärspule waren für Berechnungen des induzierten Stromes notwendig. Bei Transformationsversuchen mit induktiven Lasten wurde zur Kontrolle des berechneten Stromes auch noch das Feld in der Lastspule gemessen.

Der Stromanstieg in der Primärspule betrug im allgemeinen 30 A/min. oder 1,25 Tesla/min., was im Hinblick auf die Zeitkonstanten im Sekundärkreis von ungefähr 30 min. ein völlig ausreichender Feldanstieg war und von dem als Gleichstrommagneten konzipierten Solenoiden auch noch ohne Schwierigkeiten erreicht wurde.

Von den vielen denkbaren Parameterkombinationen im Sekundärkreis wurden folgende Möglichkeiten näher untersucht:

- 1) Einlagige Sekundärspule im Kurzschluß und mit verschiedenen supraleitenden Lastinduktivitäten.
- 2) Erhöhung der in Lastinduktivitäten transformierten Stromstärken durch Strompumpen in mehreren Stufen.
- 3) Mehrlagige Sekundärspulen.
- 4) Sekundärspulen aus supraleitenden Einzeldrähten und Kabelleitern.

Abb. 2 zeigt den Feldverlauf in einer kurzgeschlossenen, einlagigen Spule beim Erhöhen und anschließenden Erniedrigen des äußeren Magnetfeldes.

Da die an der Kurzschlußspule beobachteten Phänomene von grundlegender Bedeutung auch für die anderen Kombinationen im Sekundärkreis sind, soll das Ergebnis zunächst diskutiert werden.

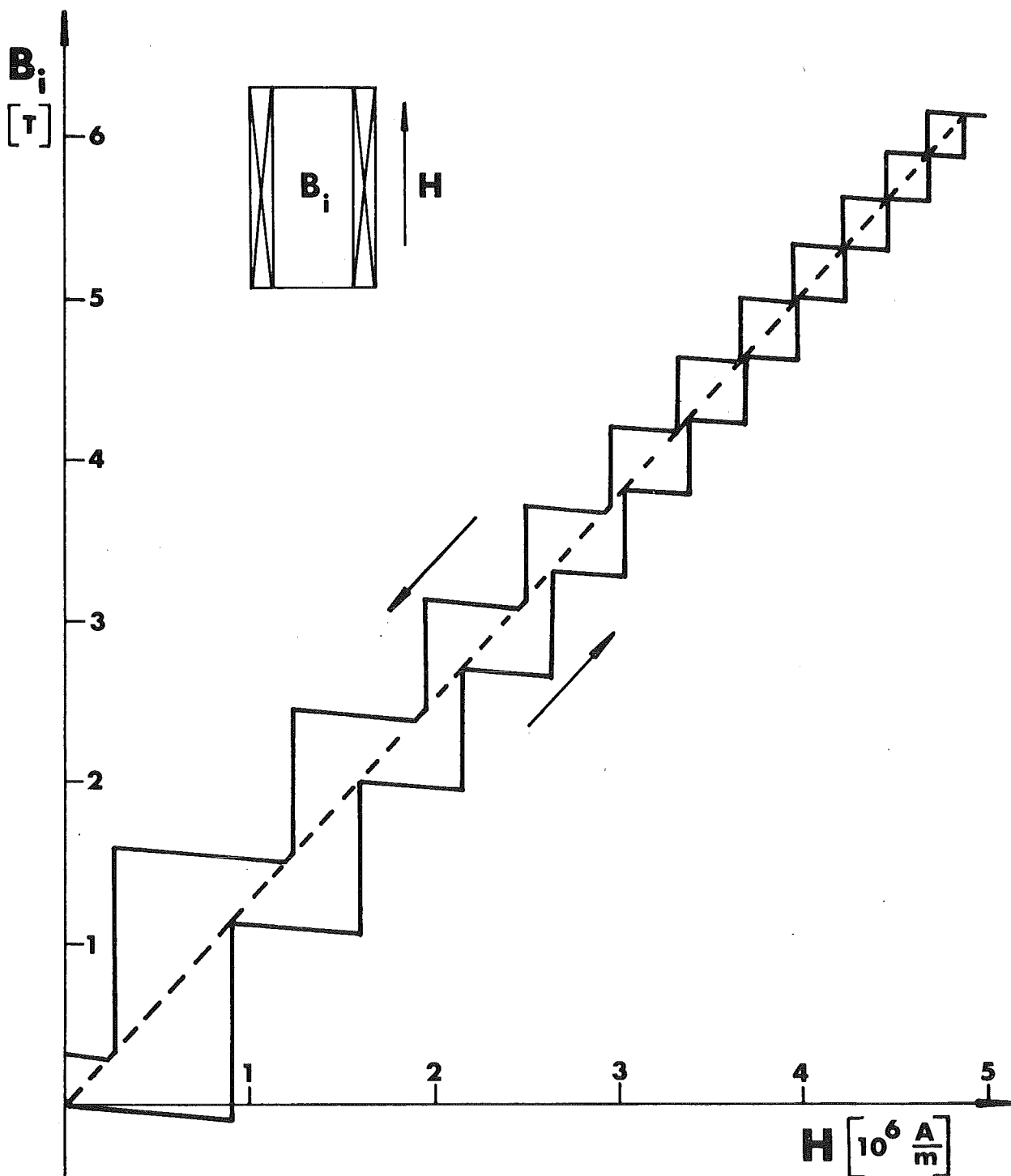


Abb. 2 Das Feld B_i im Inneren einer supraleitenden Kurzschlußspule in Abhängigkeit vom außen angelegten Magnetfeld H bei steigendem und fallendem Feld.

II. MAKROSKOPISCHE FLUßSPRÜNGE IN KURZGESCHLOSSENEN SPULEN

Die Abb. 2 zeigt, daß das außen angelegte Magnetfeld nicht kontinuierlich sondern sprungweise in das Innere der kurzgeschlossenen Spule eindringt. Es wird bis zu einem gewissen Wert abgeschirmt und bricht offensichtlich in das Innere der Sekundärspule ein, wenn Magnetfeld und Induktionsstrom kritische Werte erreicht haben. Dieser Induktionsvorgang mit Abschirmung des äußeren Feldes setzt von neuem ein, sobald die Sekundärspule wieder supraleitend ist. So erhält man bis zu den höchsten Feldern eine Treppenkurve im ansteigenden äußeren Magnetfeld. Eine ganz ähnliche Treppenkurve erhält man für das eingeschlossene Magnetfeld beim Erniedrigen des äußeren Feldes. Hier ist dann offenbar für die kritischen Strom-Feldwerte das eingeschlossene Feld bestimmend, das beim Zusammenbruch des Induktionsstromes den außen noch existierenden Feldwert annimmt.⁺⁾ Beim Durchfahren von positiven und negativen Feldern des primären Magnetfeldes erhielt man eine Hystereseschleife dieses supraleitenden Kreises.

Der Induktionsstrom stellt sich in seiner Stromdichte entsprechend den vorhandenen Magnetfeldern ein [1] [2]. Wenn er den gesamten supraleitenden Querschnitt ausfüllt, ist die kritische Stromstärke des Supraleiters erreicht. Eine stetige Anpassung der Stromdichte der Induktionsströme an die äußeren Feldbedingungen, wie sie bei den induzierten Magnetisierungsströmen im Supraleiter auftritt, ist offenbar in einer Spule nicht möglich. Denn die Flußänderungen bei der Stromdichtean-

⁺⁾ Im unteren Teil der Treppenkurve im abnehmenden Feld nimmt das Innenfeld nach einem Stromzusammenbruch kurzzeitig parallel zum Außenfeld ab, was darauf hindeutet, daß die Spule noch nicht wieder supraleitend ist. Aus der Länge dieser gemeinsamen Feldänderung ergibt sich, daß die Spule noch ca. 2 sec normalleitend ist.

passung über den kritischen Stromwert hinaus, sind nicht mehr auf den Supraleiter selbst beschränkt, sondern umfassen auch das vom Supraleiter umrandete Volumen. Damit steigt die in Wärme umgewandelte Feldenergie um Größenordnungen an und bringt den Supraleiter im ganzen Querschnitt zur Normalleitung. In einem lawinenartigen Prozeß dringt das äußere Feld unter weiterer Wärmeerzeugung voll ein. Man kann diesen Feldeinbruch als makroskopischen Flußsprung ansehen. Die mit zunehmendem Feld abnehmenden abgeschirmten Felder deuten auf einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen angelegtem Magnetfeld und Induktionsstromdichte. Wie an späterer Stelle gezeigt wird, kann dieses Verhalten ausgenutzt werden, um Kurzdrahtwerte von Supraleitern zu bestimmen.

Die beobachteten negativen Felder im Zentrum der Sekundärspule bei induktiver Stromerregung sind eine Folge der endlichen Spulengeometrie in Verbindung mit dem Flußerhaltungssatz in widerstandslosen Kreisen. Eine eingehende Diskussion wird im Zusammenhang mit Feldverteilungsmessungen an mehrlagigen Kurzschlußspulen gegeben.

III. STROMTRANSFORMATION IN SUPRALEITENDE SEKUNDÄRKREISE

1. Einlagige Sekundärspule mit verschiedenen supraleitenden Lastinduktivitäten

Die Belastung der Sekundärspule mit einer supraleitenden Induktivität, die außerhalb des Primärfeldes angeordnet ist, ändert die Feldverhältnisse im Zentrum der Sekundärspule deutlich, indem nur noch ein Teil des äußeren Magnetfeldes B_p kompensiert wird.

Abb. 3 zeigt das Magnetfeld im Zentrum der Sekundärspule in Abhängigkeit vom außen angelegten Primärfeld für verschiedene Lastfälle. Die Felddifferenz zwischen Primär- und Innenfeld,

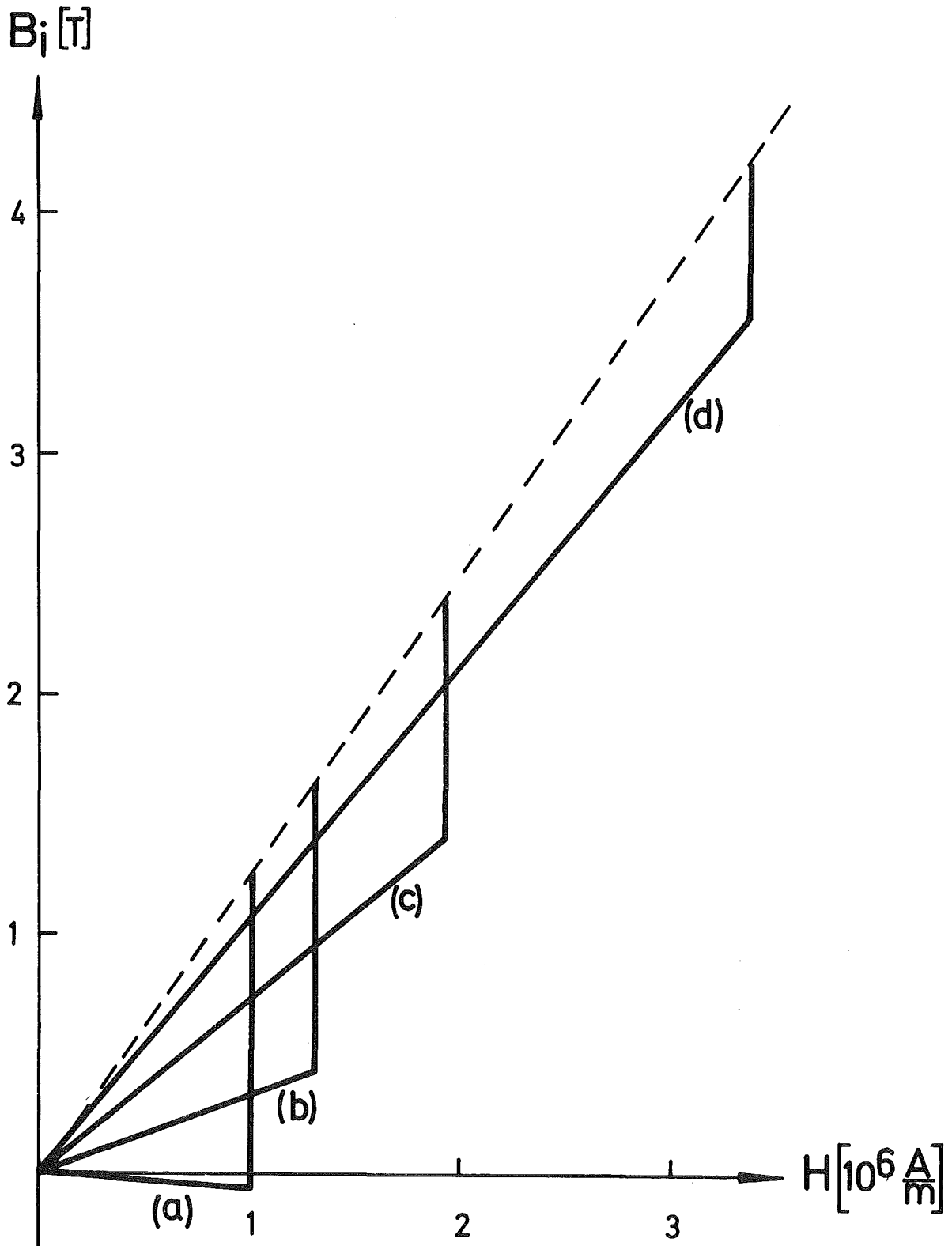


Abb. 3 Das Feld B_i in der induktiv belasteten Sekundärspule ($8,8 \times 10^{-5}$ Hy) in Abhängigkeit vom angelegten Magnetfeld H im ansteigenden Feld für verschiedene Lastinduktivitäten:

a) Kurzschluß	b) $3,8 \times 10^{-5}$ Hy
c) $1,5 \times 10^{-4}$ Hy	d) 6×10^{-4} Hy

d.h. das abgeschirmte Magnetfeld wird bei gleichem Primärfeld umso kleiner, je größer die Lastinduktivität ist. Die Stromtransformation für Dauerströme wird bei einmaligem Feldanstieg schließlich von einem "Flußsprung" begrenzt, der bei den kritischen Strom-Feldbedingungen in der Sekundärspule ausgelöst wird. Diese kritischen Bedingungen werden mit zunehmenden Lasten erst bei immer höheren Feldern erreicht, da die induzierten Abschirmströme immer kleiner werden.

Die Flußverteilung und der Induktionsstrom in der mit einer supraleitenden Induktivität belasteten Sekundärspule verhält sich gemäß den elektrodynamischen Gleichungen für widerstandslose Kreise, für die die Erhaltung des Gesamtflusses gilt. Die Begrenzungen in der einfachen Stromtransformation sind durch die Materialeigenschaften des Supraleiters in der Sekundärspule gegeben.

$$\begin{aligned}\phi_n + \phi_s &= 0 \\ -L_n I_s + (\phi_p - L_s I_s) &= 0 \\ I_s &= \phi_p / (L_n + L_s) \quad (1)\end{aligned}$$

ϕ_n = Fluß in der Lastspule

ϕ_s = Fluß in der Sekundärspule

ϕ_p = mit der Sekundärspule gekoppelter
Fluß des Primärfeldes

In einer anderen Schreibweise mit dem Primärstrom anstelle des primären Flusses lautet die obige Gleichung [3]

$$I_s = -k (L_p/L_s)^{1/2} \{1/(1 + L_n/L_s)\} I_p \quad (2)$$

I_p und L_p bedeuten die Stromstärke bzw. die Induktivität der Primärspule. Die Formeln zeigen, daß mit zunehmender induktiver Belastung L_n die Induktionsströme I_s kleiner werden.

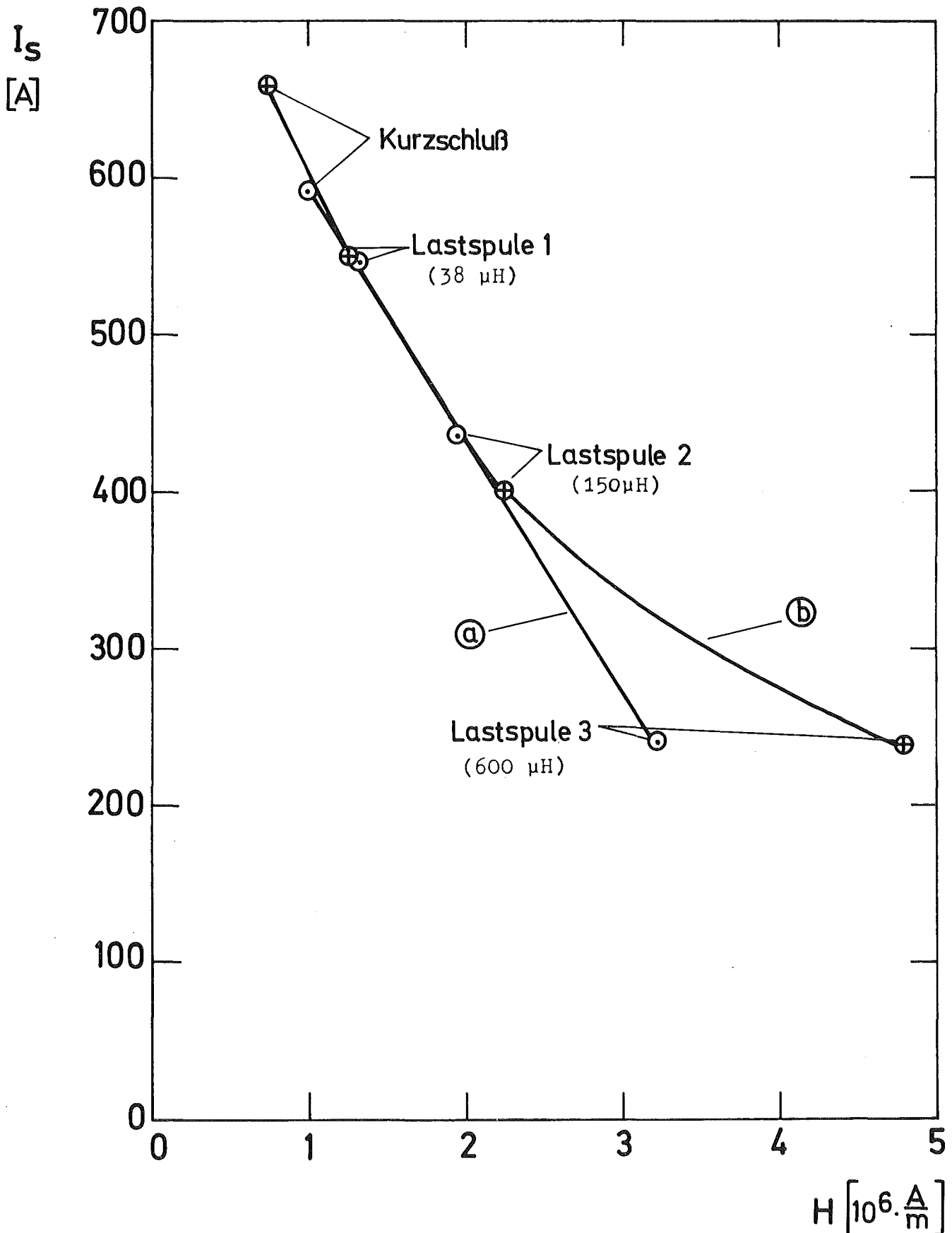


Abb. 4 Die maximalen Sekundärströme I_s im induktiv belasteten Sekundärkreis in Abhängigkeit vom Magnetfeld für zwei verschiedene Sekundärspulen (a) und (b)

(a) getwisteter Multicore Leiter, $L = 4.3 \cdot 10^{-5}$ Hy

(b) ungetwisteter Multicore Leiter, $L = 8.8 \cdot 10^{-5}$ Hy

Die Abb. 4 zeigt zwei Beispiele für die Grenzstromstärken von Sekundärspulen aus verschiedenen Supraleitermaterialien bei induktiver Belastung. Die Grenzstromstärken sind, wie schon oben erwähnt, gegeben durch die Materialeigenschaften der Supraleiter. In Abb. 5 sind die beobachteten Stromübersetzungen I_s/I_p ^{+) für diese beiden Beispiele gegen den Lastfaktor $f = 1/(1 + L_n/L_s)$ aufgetragen.}

Die Beobachtungen an dem supraleitenden Sekundärspulensystem zeigen nun, daß abhängig von den externen Lastinduktivitäten in der Sekundärspule verschieden hohe Magnetfelder eindringen, ohne daß die kritischen Strom-Feld-Bedingungen irgendwo im supraleitenden Kreis erreicht worden sind. Diese anscheinend im Widerspruch zu den supraleitenden Eigenschaften stehende Beobachtung läßt sich durch induzierte Wirbelstromsysteme im Supraleiter erklären.

Die Verhältnisse im Sekundärkreis lassen sich in einer einfachen supraleitenden Schleife darstellen, die in einem Gradientenfeld liegt, s. Abb. 6. Entsprechend den Modellvorstellungen zu der Stromverteilung in einem Supraleiter von Bean [1] und Kim [2] dringt das außen angelegte Primärfeld B_p teilweise in den Supraleiter der Sekundärspule ein und erzeugt den Abschirmstrom I_p . Um im Falle der induktiv belasteten Sekundärspule den Gleichungen der Elektrodynamik zu genügen, muß sich der primäre Abschirmstrom I_p im inhomogenen Feldbereich aufteilen in einen Wirbelstrom I_w und den Sekundärstrom I_s . Mit dem Wirbelstrom I_w ist das Feld im Inneren der Sekundärspule gekoppelt. Bei Erhöhung des primären Magnetfeldes nehmen sowohl der primäre Abschirmstrom als auch der Wirbelstrom I_w zu, so daß schließlich der supraleitende Querschnitt mit Transport- und Wirbelstrom ausgefüllt ist. Bei weiterer Zunahme des Außenfeldes verschwindet allmählich das Wirbelstromsystem zu Gunsten eines reinen Transportstromes $I_p = I_s$ unter ständiger Zunahme des Innenfeldes. Mit dem vollen Transportstrom im supraleitenden Querschnitt ist der kritische Strom erreicht und ein Überschreiten dieser Grenze läßt den Dauerstrom zusammenbrechen.

+) Die Methode zur exakten Berechnung der Induktionsströme wird in Abschnitt VI. 2 diskutiert.

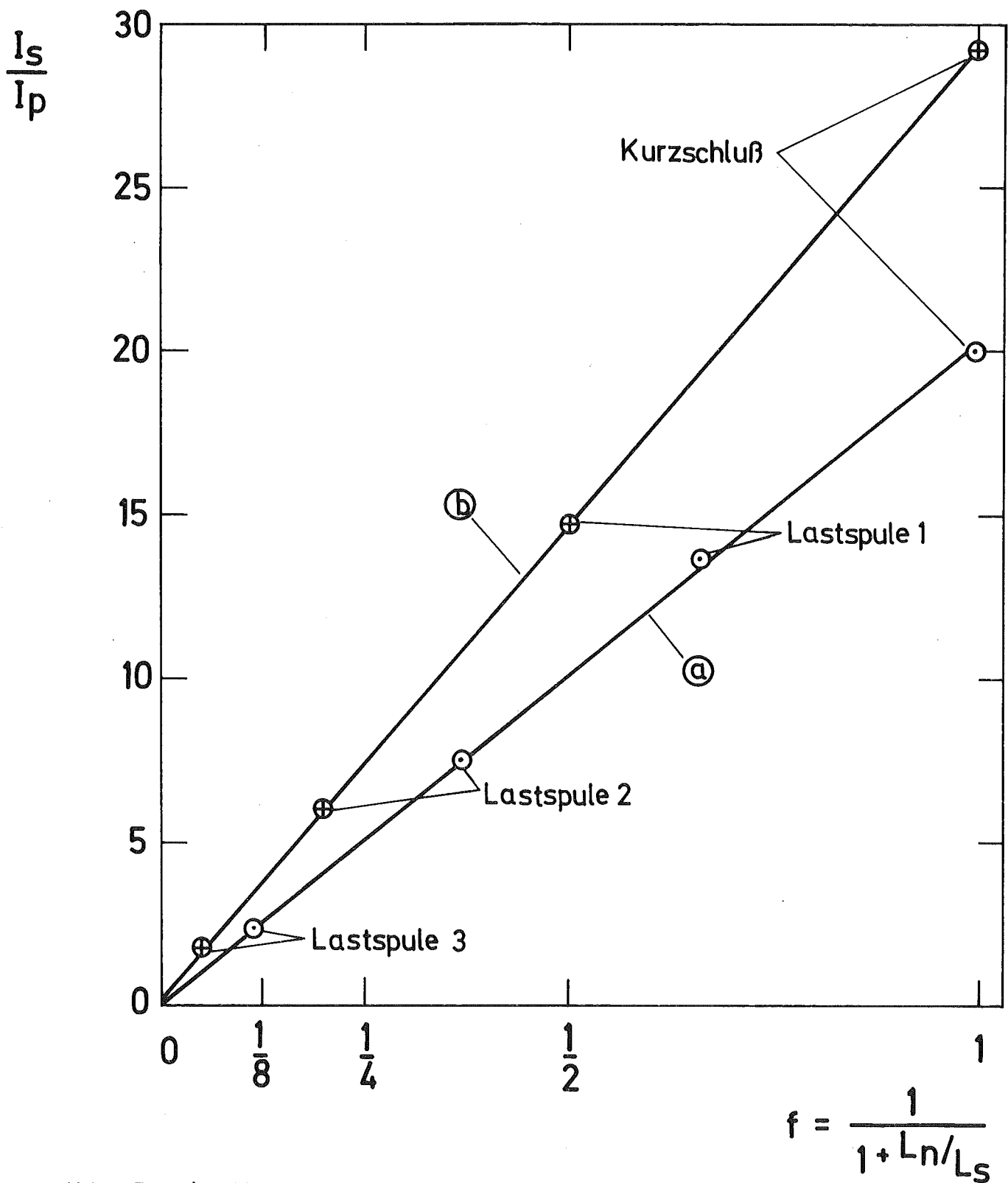


Abb. 5 Die Stromübersetzung I_s/I_p zwischen Sekundär- und Primärstrom in Abhängigkeit vom Verhältnis Lastinduktivität L_n zu Sekundärinduktivität L_s für zwei verschiedene Sekundärspulen. a) $L_s = 4.3 \cdot 10^{-5}$ Hy, b) $L_s = 8.8 \cdot 10^{-5}$ Hy

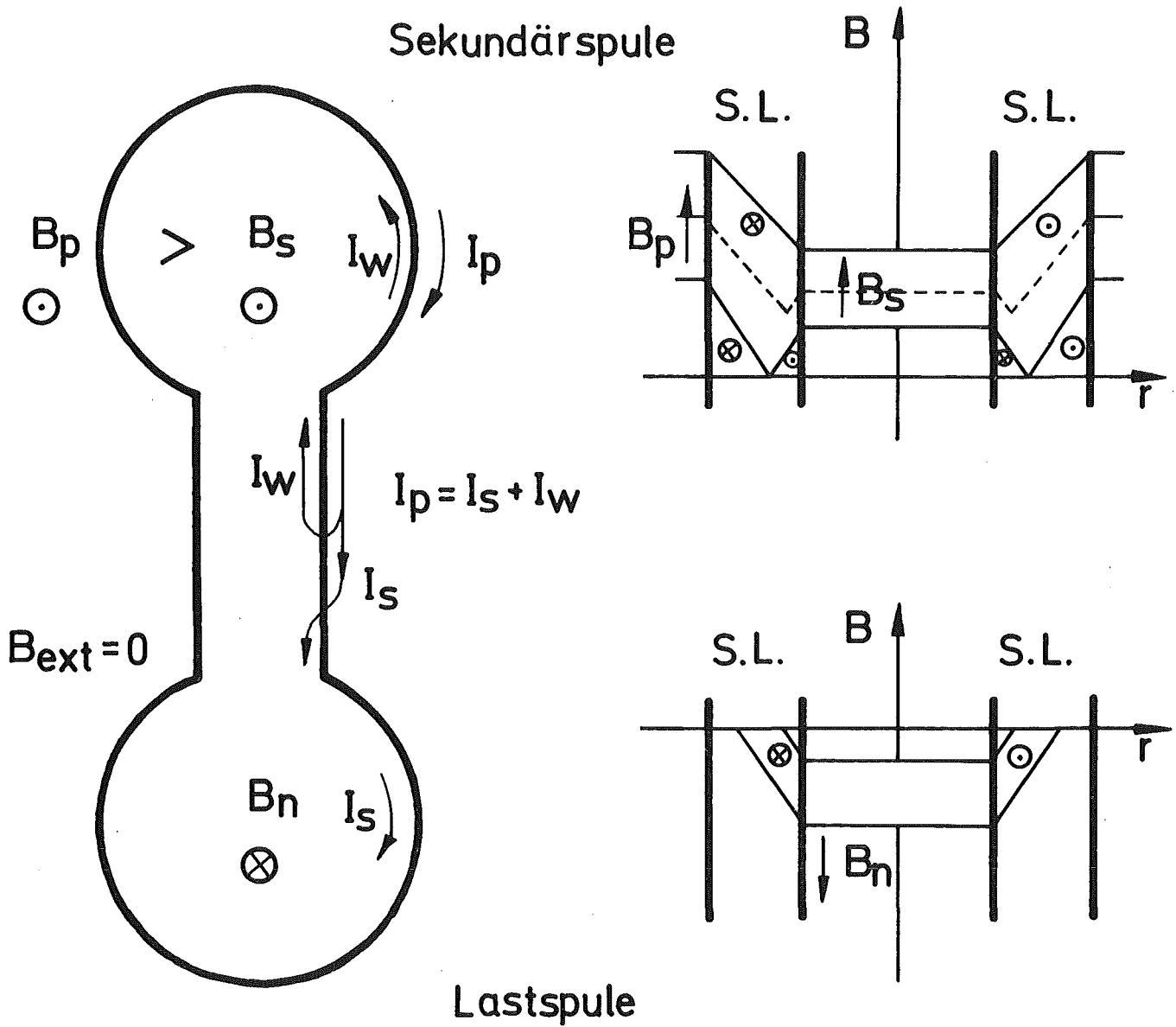


Abb. 6 Stromverteilung in einer supraleitenden Schleife, die mit einem Teil außerhalb des Magnetfeldes liegt, als Beispiel für die Verhältnisse einer induktiv belasteten Sekundärspule

2. Erhöhung der in Lastinduktivitäten transformierten Stromstärken durch Strompumpen

Der vorige Abschnitt hat gezeigt, daß die Sekundärstromstärke einerseits durch das Verhältnis von Last- und Sekundärinduktivität gegeben ist, und andererseits durch die I_c, B -Charakteristik des Supraleiters der Sekundärspule begrenzt wird. Um im Sekundärkreis trotz großer Lastinduktivitäten dennoch einen hohen Strom zu erhalten, muß man zu einer periodischen Induktion übergehen, die dem bekannten Flußpumpen äquivalent ist. Während man bei einem einmaligen Transformationsvorgang einen Strom erreicht, der durch den I_c -Wert im hohen Feld gegeben und demzufolge klein ist, kann man durch periodische und gleichgerichtete Transformation theoretisch die max. Stromstärke der kurzgeschlossenen Sekundärspule erzielen, die mit der größtmöglichen Felddifferenz gekoppelt ist, vgl. Abb. 3 (a).

Nach einer einfachen Erweiterung des Sekundärkreises mit einem thermisch schaltbaren supraleitenden Schalter, der die Lastspule kurzschließt, konnten solche Stromerhöhungsexperimente durchgeführt werden. Die Stromerhöhung gehorcht der Beziehung für Flußpumpen [4], nur daß hier die gepumpten Feldwerte auf gepumpte Stromwerte umgerechnet wurden:

$$I_s(n) = I_{so} (1 - \{m/(m+1)\}^n) \quad (3)$$

mit I_{so} = Kurzschlußstrom der Sekundärspule

$m=L_n/L_s$ = Lastinduktivität/Sekundärinduk.

n = Anzahl der Pumpschritte

Wie man sieht, strebt der gepumpte Strom $I_s(n)$ einem Sättigungswert I_{so} zu, der durch die angelegte Feldamplitude gegeben ist und mit dem Kurzschlußstrom der Sekundärspule identisch ist. Er wird also im Grenzfall völliger Flußverdrängung aus der

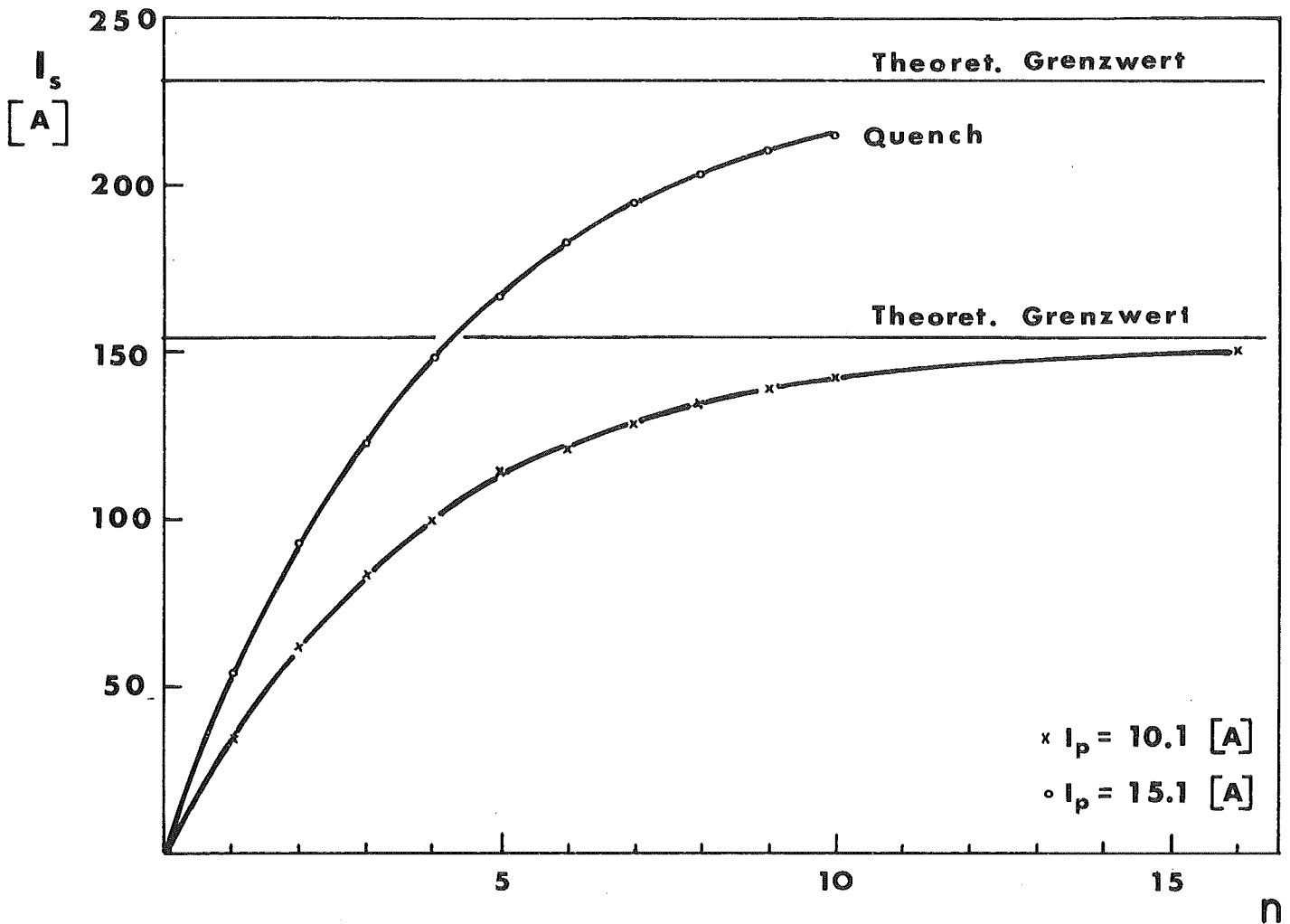


Abb. 7a Stromerhöhung im Sekundärkreis beim Strompumpen in Abhängigkeit von der Anzahl n der Pumpschritte

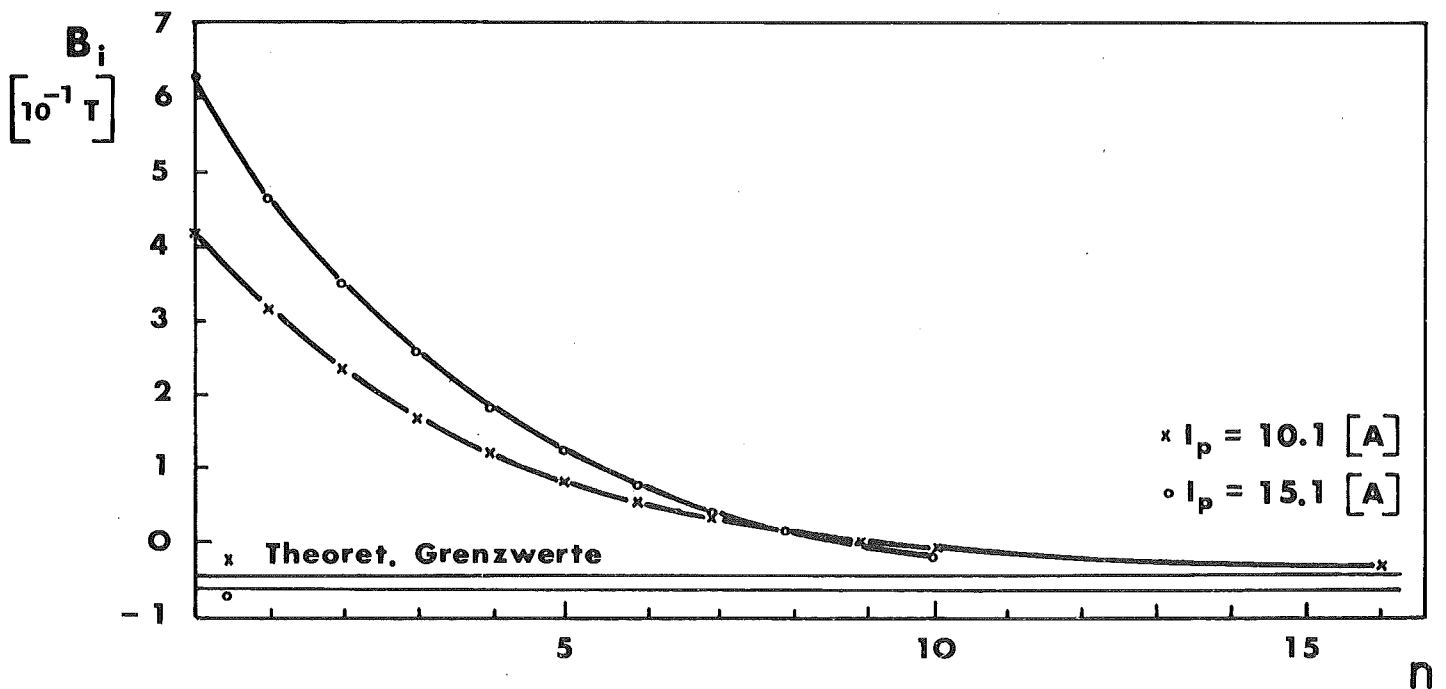


Abb. 7b Feldverdrängung in der Sekundärspule in Abhängigkeit von der Anzahl n der Pumpschritte

Sekundärspule erreicht. Demgemäß ist, wie eingangs schon erwähnt wurde, der größte Strom durch Anlegen einer Feldamplitude in Höhe des Grenzfeldes der Kurzschlußspule zu erreichen.

Die Abb. 7 zeigt die Stromerhöhung im Sekundärkreis für zwei verschiedene Feldamplituden in Abhängigkeit von der Anzahl n der Pumpschritte. In Abb. 7 a ist die Zunahme der Stromstärke beim Pumpvorgang dargestellt, während in Abb. 7 b die damit gleichzeitig verbundene Verdrängung des Magnetfeldes in der Sekundärspule wiedergegeben ist. Mit der kleineren Feldamplitude von 0,42 Tesla wurde praktisch der zu erwartende Grenzwert im Strom erreicht. Bei der Feldamplitude von 0,63 Tesla beendete ein Quench beim 10. Pumpschritt den Pumpvorgang, obwohl diese Amplitude noch deutlich unter der Grenzamplitude von 1,4 Tesla lag. Es war eine allgemeine Beobachtung, daß die Neigung zum Normalübergang immer größer wurde, je höher die Feldamplitude wurde, obwohl sie stets kleiner als die kritische Feldamplitude war. Es ist klar, daß sich die schnellen Feldänderungen beim Schalten um so empfindlicher auf Spule und Schalter auswirkten, je näher man an die kritischen Werte des Supraleiters kam.

IV. FELDABSCHIRMUNG UND I_c ,B-CHARAKTERISTIK VON SUPRALEITERN

1. Abschirmwirkung mehrlagiger Sekundärspulen

Die Untersuchungen an einlagigen kurzgeschlossenen Spulen hatten gezeigt, daß im Zentrum dieser Spulen das außen angelegte Feld nicht nur abgeschirmt, sondern durch das Auftreten eines negativen Feldes sogar überkompensiert wurde. Die entsprechenden Versuche mit mehrlagigen Spulen ergaben zwar eine mit der Lagenzahl zunehmende Abschirmung des äußeren Magnetfeldes, jedoch machten auch die negativen Felder mit zunehmender Lagenzahl einen wachsenden Anteil des außen angelegten Feldes aus. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse für Spulen gleicher Spulenkörpergeometrie und gleichen Supraleitermaterials, aber verschiedener Lagenzahl. In der 16-lagigen Spule zum Beispiel wird einerseits ein Außenfeld von 4 Tesla abgeschirmt und andererseits ein negatives Feld von ca. 1,6 Tesla erzeugt.

Die erhöhte Abschirmwirkung mit zunehmender Lagenzahl ergibt sich einfach aus der nun erhöhten Schichtdicke von stromdurchflossenem Material. I_c ,B-Charakteristik des Supraleiters und umgekehrt zur Lagenzahl reduzierter Induktionsstrom bestimmen die abschirmbaren Magnetfelder.

Das negative Feld im Zentrum der Sekundärspule hängt, wie schon eingangs vermutet, von der Spulengeometrie ab, was durch die Abhängigkeit von der Lagenzahl gezeigt wird. Die Abb. 9 zeigt die Feldverteilung längs der Achse für zwei kurzgeschlossene Sekundärspulen mit 4 und 16 Lagen. Das Feld hat innerhalb der Spulen jeweils zwei zum Zentrum symmetrische Nulldurchgänge und geht dann allmählich in das Außenfeld über. Man erkennt, daß die Nulldurchgänge mit zunehmender Lagenzahl an das Spulende wandern und gleichzeitig der negative Feldanteil im Zentrum der Spule anwächst.

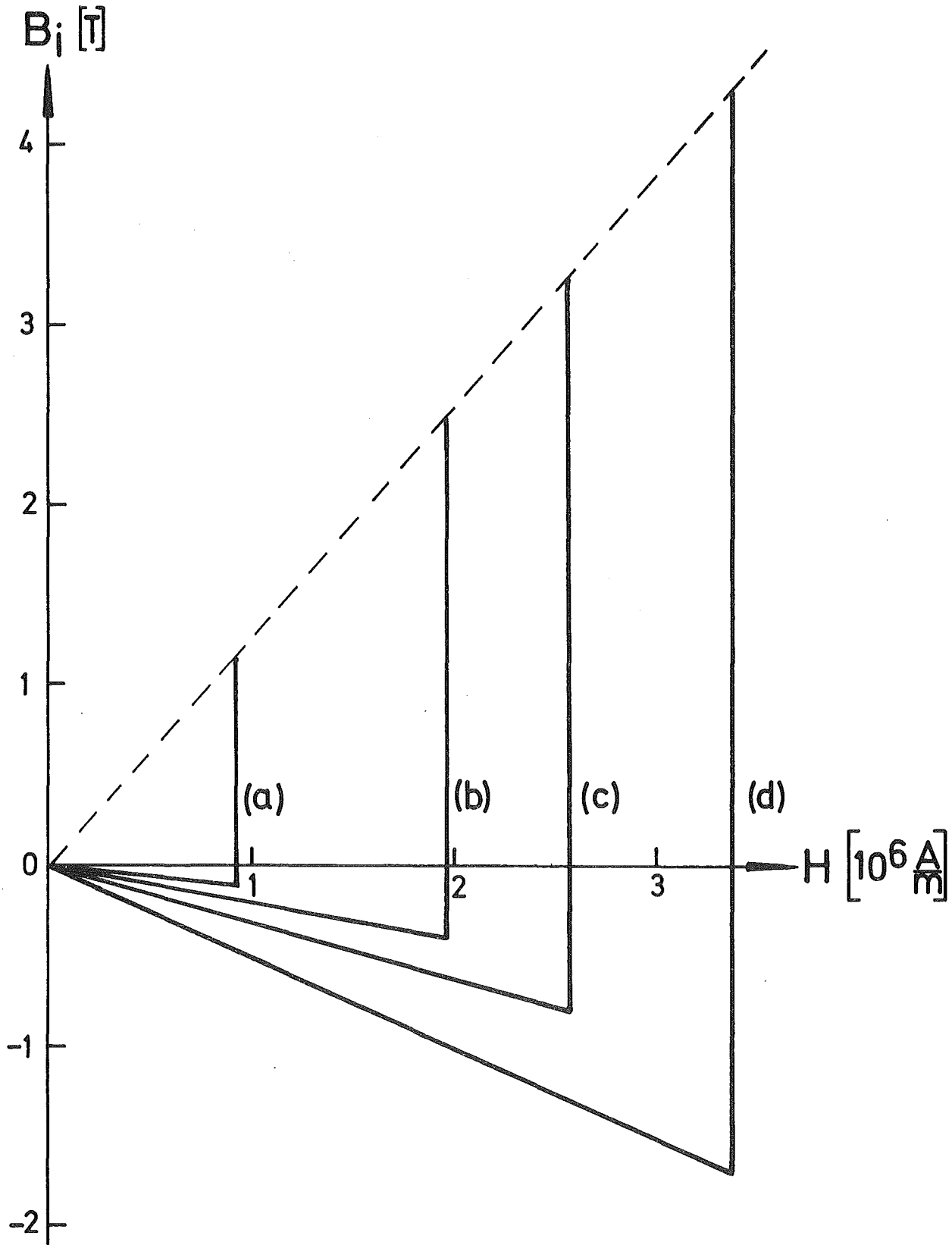


Abb. 8 Das negative Feld im Zentrum von mehrlagigen Kurzschlußspulen bei der induktiven Abschirmung in Abhängigkeit vom Außenfeld H . (a), (b), (c), (d): 1, 4, 8, 16 Lagen

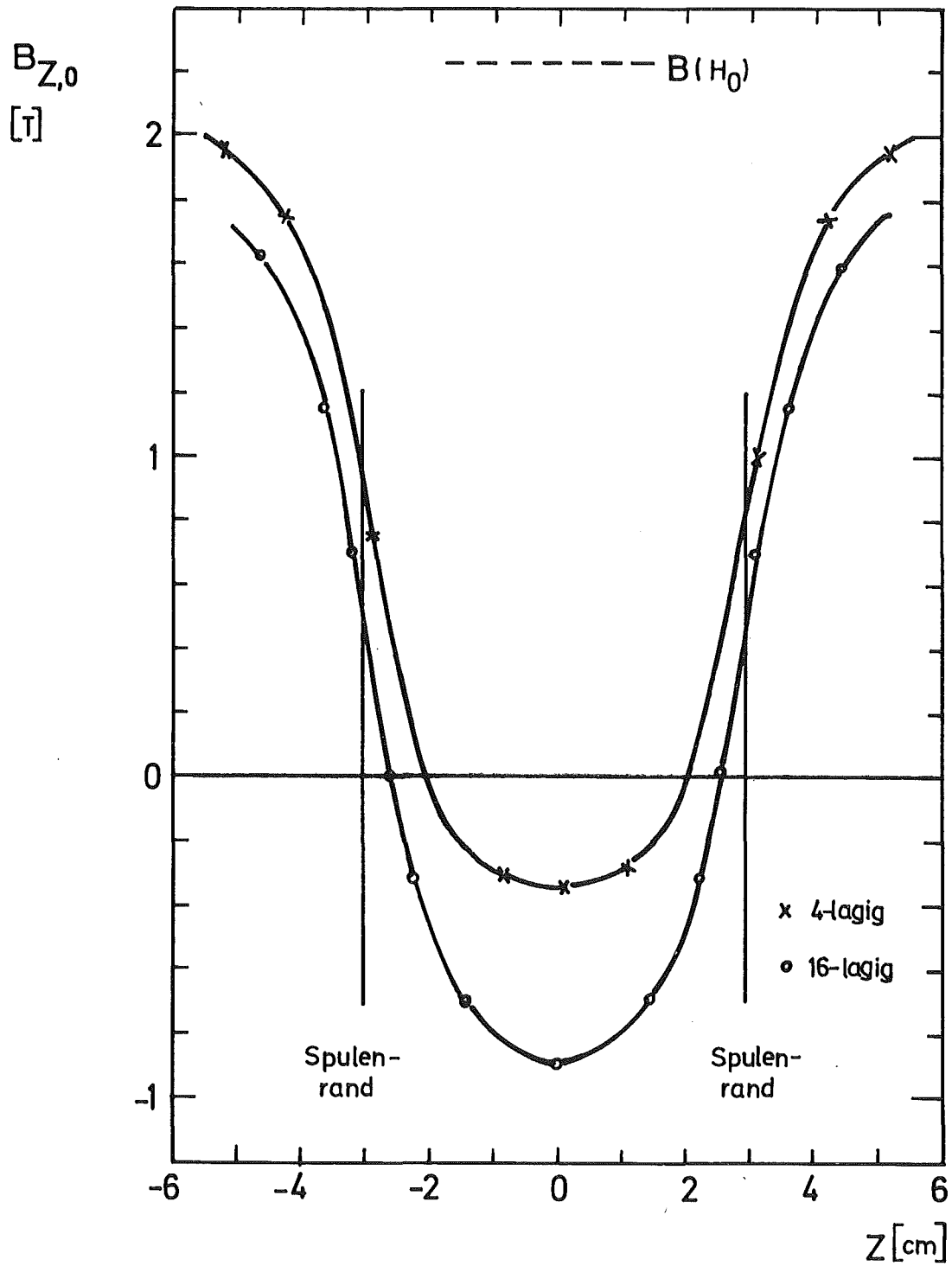


Abb. 9 Das Feld im Inneren einer 4-bzw.16-lagigen Kurzschlußspule längs der Z-Achse für ein Außenfeld B_0 .

Diese hier beobachtete Feldverteilung läßt sich auch rechnerisch bestätigen unter der Annahme, daß der Induktionsstrom durch die max. Felddifferenz zwischen innen und außen gegeben ist. Dann ergibt die Superposition des Sekundärspulenfeldes mit dem angelegten Feld genau die gemessene Feldverteilung.

Die gute Übereinstimmung von beobachteter und gerechneter Feldverteilung zeigt, daß die Felddifferenzen zwischen Spulenende und Spulenzentrum durch die endliche Geometrie der Sekundärspule gegeben ist, und der negative Feldanteil allein aus der geometrieabhängigen Lage der Feldnulldurchgänge folgt. Die Lage der Feldnullpunkte in der Spule ist durch das Verhalten eines widerstandslosen Stromkreises, d.h. einer Induktivität, in der die zeitliche Änderung des Flusses null sein muß, festgelegt:

$$U = - \sum_{v=1}^N \frac{d\phi_v}{dt} = 0$$

oder

$$\sum_{v=1}^N \phi_v = \text{const.}$$

Eine rechnerische Bestimmung der Nulldurchgänge ist eine komplizierte Aufgabe, da man die Kopplung der einzelnen Windungen mit dem Außenfeld, der Windungen untereinander und deren Serienschaltung berücksichtigen muß. Sie wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

2. Kritische Strom-Feld-Werte aus Flußsprüngen in einlagigen Kurzschlußspulen

Bei den eingangs beobachteten regelmäßigen "Flußsprüngen" an kurzgeschlossenen Sekundärspulen war schon vermutet worden, daß hier ein Zusammenhang mit der bekannten I_c, B - Charakteristik des Supraleiters besteht. Um eine quantitative Aussage machen zu können, muß man die Induktionsströme aus den Meßwerten des inneren und äußeren Magnetfeldes und aus der Spulengeometrie berechnen. Die einlagige Spule eignet sich für I_c, B - Untersuchungen am besten, da hier in radialer Richtung keine Probleme durch die Überlagerung der Felder benachbarter Leiter auftreten. In der Mittelebene einer hinreichend langen, einlagigen Spule, bei der im Bereich der Leiterdicke die radialen Feldkomponenten vernachlässigbar sind, muß dann gemäß der Beziehung

$$\text{rot } H = j_\phi = - \frac{dH_z}{dr}$$

für den Transportstrom gelten:

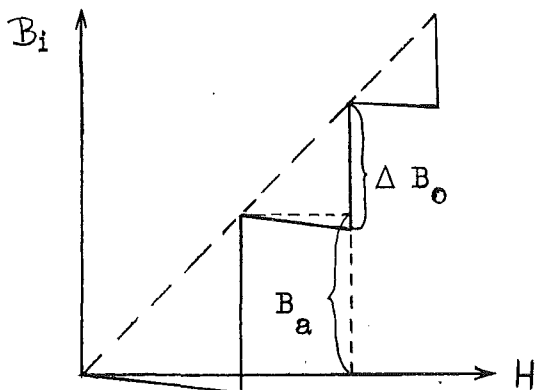
$$I_s = (j_\phi \Delta r) \cdot d = \Delta H_z \cdot d$$

wenn ΔH_z die Felddifferenz am Leiter und $d \cdot \Delta r$ die Leiterabmessungen sind. Da der Messung nur das zentrale Feld zugänglich ist, muß man den Strom aus der Beziehung für endliche Spulen [5] ermitteln:

$$I_s = \{2b \cdot (a_2 - a_1) / N a_1 F(\alpha, \beta)\} \cdot \Delta H_{(Oe)} [A] \quad (4)$$

mit b [cm] = halbe Spulenlänge
 a_1, a_2 [cm] = Innen - bzw. Außenradius der Spule
 N = Windungszahl
 $F(\alpha, \beta)$ = Geometriefaktor der Spule [5] mit $\alpha = \frac{a_2}{a_1}$, $\beta = \frac{b}{a_1}$
 ΔH [Oe] = $4\pi/10^3 \Delta H$ [A/m] = $10^4 \cdot \Delta B_0$ [Tesla]

Die Felddifferenz ΔB_0 , zwischen dem außen angelegten Feld und dem Feld im Zentrum der Sekundärspule, ist nach der voranstehenden Beziehung bestimmend für die Größe des Abschirmstromes.



$$\begin{aligned} \Delta B_0 &= \text{Felddifferenz} \\ B_a &= \text{eingeschlossenes Feld} \\ I_c &= \text{const} \cdot \Delta B_0 \\ \underline{B_c^*} &= \underline{B_a + \Delta B_0} \end{aligned} \quad (5)$$

Abb. 10: Bedeutung der für die I_c , B-Auswertung benutzten Größen im Flußsprungdiagramm einer Kurzschlußspule

Am Punkt des Felddurchbruchs (vgl. Abb. 10) herrschen am Leiter in der Spule kritische Strom und Feldbedingungen, so daß eine sich ausbreitende Zone der Normalleitung entsteht. Der zugehörige kritische Strom I_c kann nach der obigen Formel bestimmt werden. Als kritisches Feld B_c^* nach dieser Kurzschlußmethode muß das am Leiter maximal anliegende Magnetfeld angesehen werden, was sich für einlagige Spulen als Summe aus eingeschlossenem Feld B_a und Felddifferenz ΔB_0 ergibt. Diese Aussage, die eine Maximalfeldangabe ist, ist nicht identisch mit der Angabe des kritischen Feldes bei der Standardmethode zur Messung von Kurzproben, bei der sich die Feldangabe auf das angelegte Außenfeld bezieht und somit unter Berücksichtigung des Eigenfel-

des des Leiters nur ein Mittelwert ist. Um zu vergleichbaren Aussagen für beide Meßverfahren zu kommen, muß man in B_c^* einen Korrekturterm einfügen, der von der Größe des Eigenfeldes des Leiters ist und die Maximalfeldaussage auf den üblichen Mittelwert reduziert.

$$B_c = B_a + \Delta B_o (1 - f)$$

Der Term f ist ein von der Leitergeometrie abhängiger Korrekturfaktor, dessen Wert zwischen 0 und 0.5 liegt. Er hat für einen Rundleiter den Wert $1/\pi$ und für einen Rechteckleiter mit dem Kantenverhältnis 1,8 : 1,3 den Wert 0,32.

Die Gl. 5 gilt exakt für ein unendlich langes Solenoid. Da wegen der endlichen Geometrie der Spule Feldüberhöhungen im Wicklungsbereich möglich sind, wurden mit Hilfe eines Rechenprogramms die Feldverhältnisse im Bereich einer einlagigen, kurzgeschlossenen Spule durch Superposition des Außenfeldes mit dem induzierten Spulenfeld ermittelt. Beim Stromwert für den ersten "Flußsprung" ist das Maximalfeld im Spulenpaket für die einlagige Spule etwa 2% größer als die meßbare Felddifferenz ΔB_o , die hier als das kritische Feld angenommen wurde. Der maximale Fehler beträgt somit 2%. Denn im hohen Feld nach mehreren "Flußsprüngen" nimmt die absolute Feldüberhöhung ab, da die Abschirmfelder nur noch einen Teil des angelegten Feldes ausmachen. Mit den oben gemachten, vereinfachenden Annahmen kann man also mit genügender Genauigkeit kritischen Strom und kritisches Feld für eine einlagige dünne Spule bestimmen.

In Abb. 11 sind die I_c, B - Werte für einen Kabelleiter und einen Einzelleiter dargestellt, die sowohl nach den oben beschriebenen Kurzschlußverfahren als auch nach der üblichen Strom-Spannungsmessung im Magnetfeld gefunden wurden. Die Ergebnisse beider Meßverfahren stimmen gut überein.⁺)

⁺) Bei Spulen mit wenigen Windungen, z.B. aus Kabelleitern, ist die Induktivität und demzufolge oft die Zeitkonstante klein, so daß schon vor dem Flußsprung teilweise Außenfeld eindringt. Die obigen Formeln gelten weiterhin; für das kritische Feld B_c^* muß man nur B_a am Sprungpunkt nehmen und 10% von ΔB_o als negativen Feldanteil noch addieren.

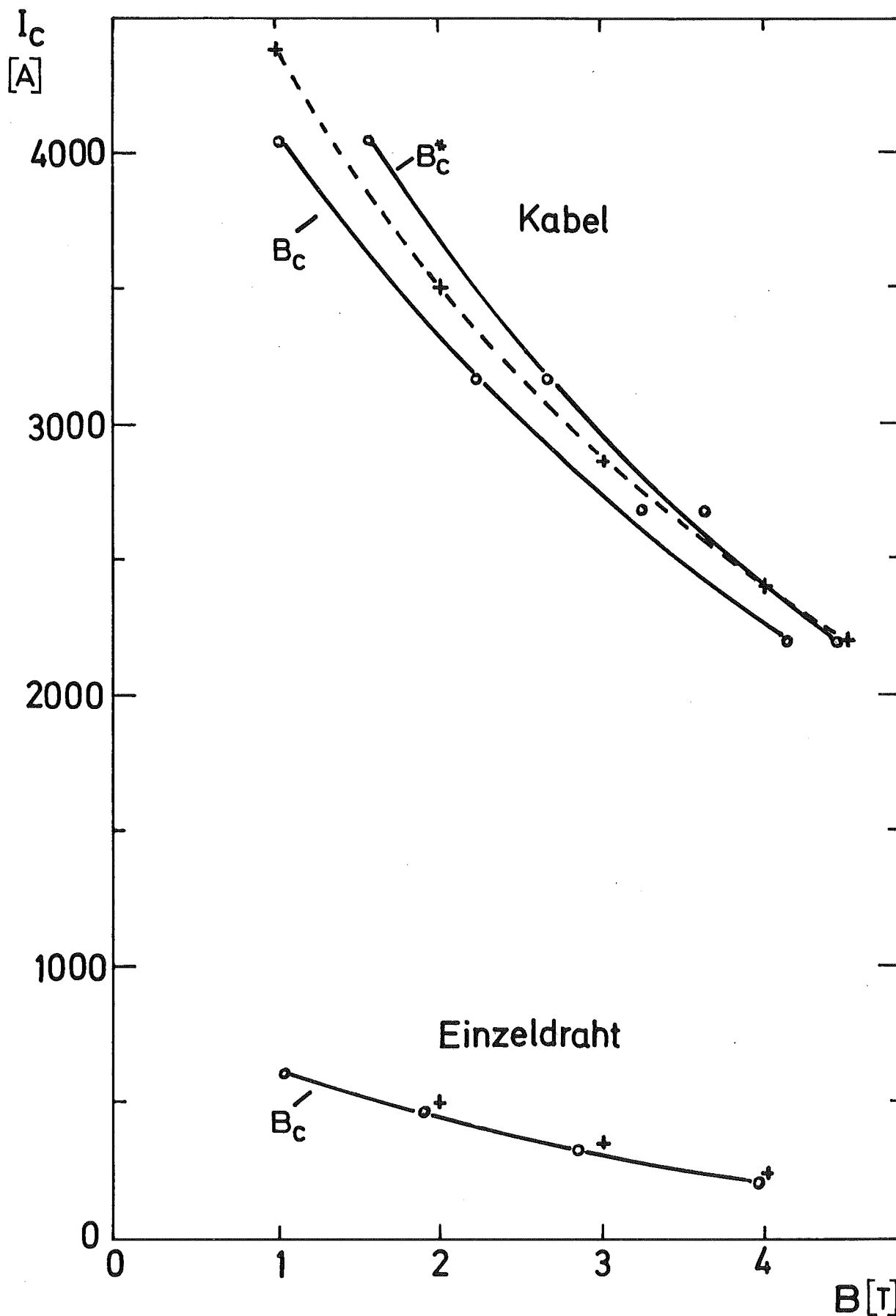


Abb. 11 I_c, B -Charakteristik eines supraleitenden Einzeldrahtes und eines 12 adrigen supraleitenden Kabels, die nach dem Kurzschlußverfahren \circ und nach den üblichen Verfahren durch Strom-Spannungsmessung $+$ bestimmt wurde.

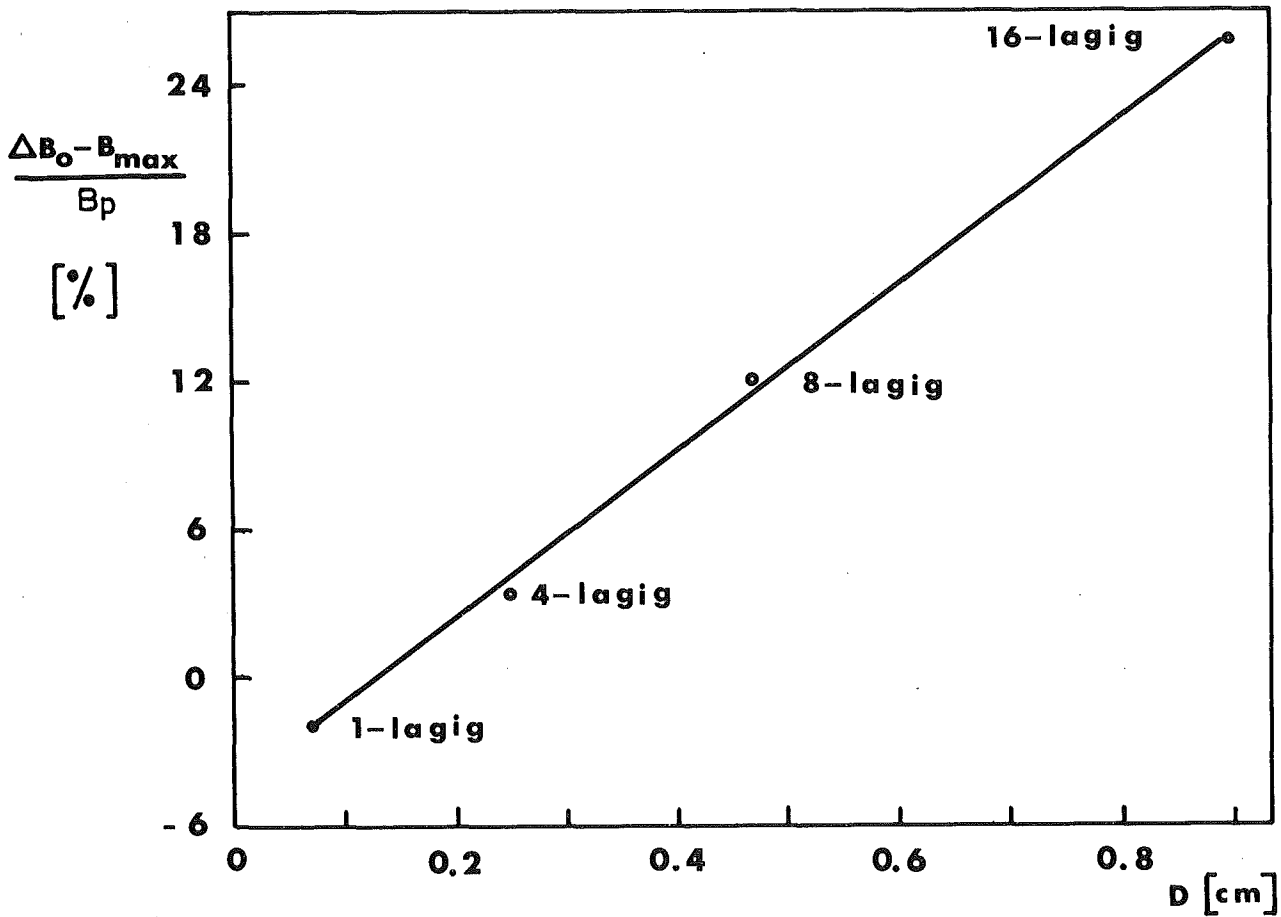


Abb. 12 Die auf das Außenfeld B_p bezogene Verschiebung zwischen Felddifferenz B_0 und dem Feldmaximum B_{max} im Spulenpaket in Abhängigkeit von der Dicke D des Wickelpaketes für den Feldbereich kontinuierlicher Stromanregung.

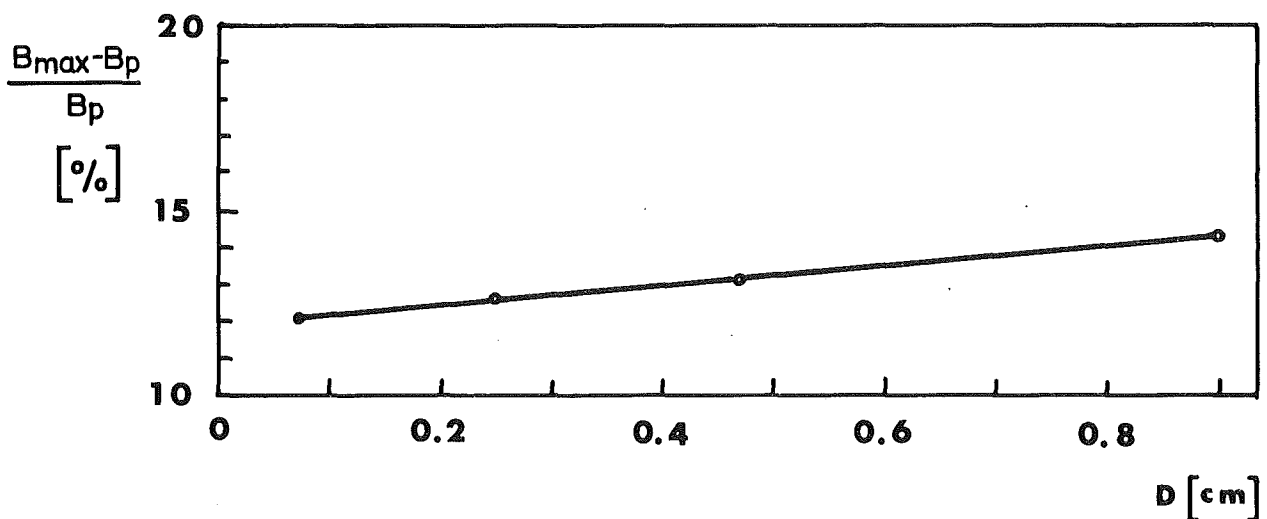


Abb. 13 Die relative Felddifferenz zwischen dem Maximalfeld B_{max} im Spulenpaket und dem angelegten Erregerfeld B_p in Abhängigkeit von der Dicke D des Wickelpaketes im Bereich kontinuierlicher Stromanregung. Konstante Spulenabmessungen: Länge $l = 6$ cm, Innendurchmesser $d = 2$ cm.

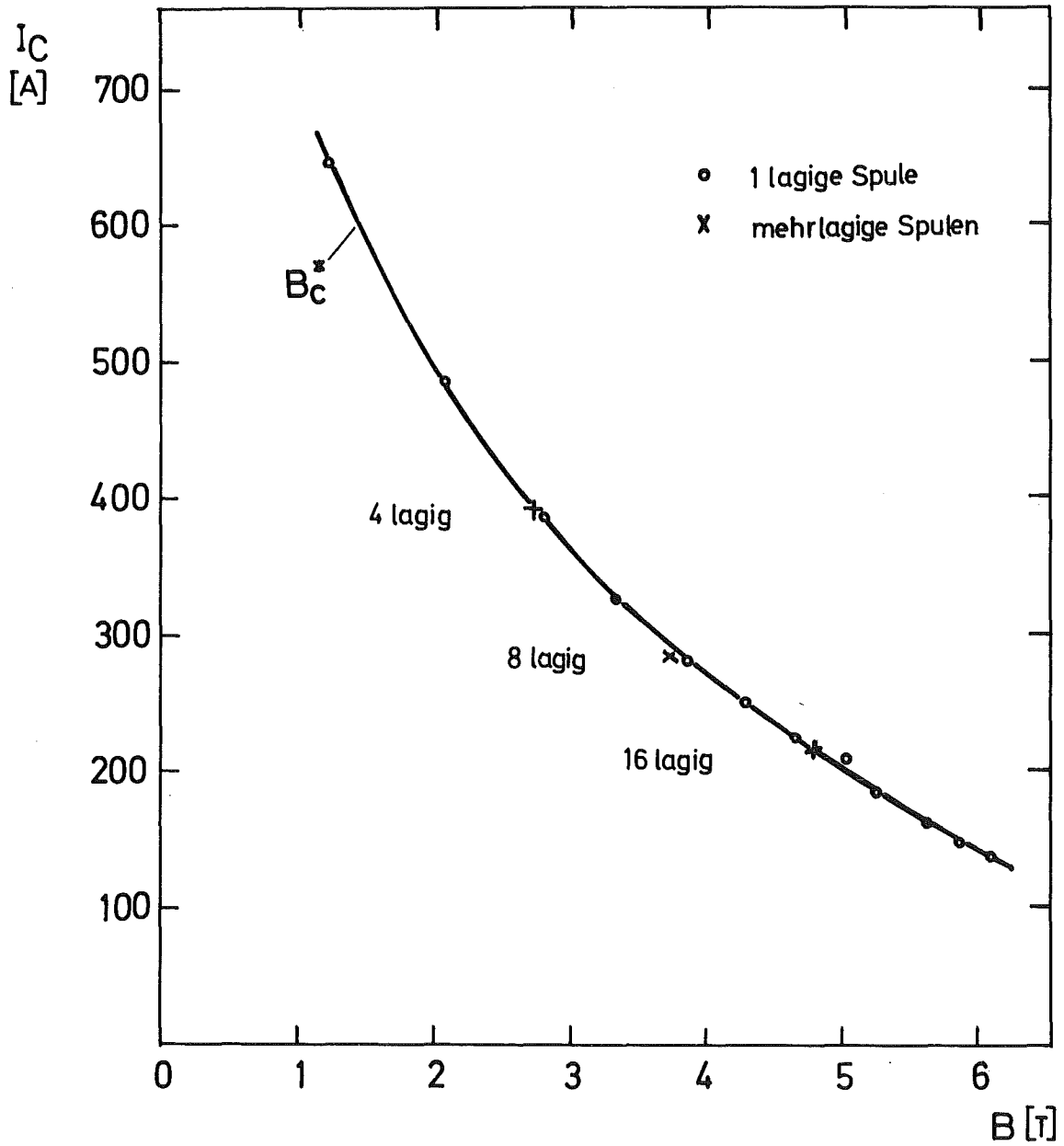


Abb. 14 I_c, B -Charakteristik eines Supraleiters mit den Meßwerten von Kurzschlußspulen verschiedener Lagenzahl.

Die Auswertung der Ergebnisse an mehrlagigen Kurzschlußspulen ist etwas aufwendiger als bei einlagigen. Denn nun läßt sich nicht mehr einfach die Felddifferenz ΔB_0 als kritisches Feld annehmen, da die Leiter in den einzelnen Lagen verschiedenen Feldern unterliegen. Man muß mit Hilfe eines Rechenprogrammes das maximale Feld in der Spule beim Normalübergang ermitteln, das dann dem kritischen Feld entspricht. Der Induktionsstrom errechnet sich nach wie vor aus Felddifferenz ΔB_0 und der Spulenformel (4). Die Abb. 12 zeigt die relative Verschiebung zwischen der Felddifferenz ΔB_0 und dem Maximalfeld B_{\max} bei Zunahme der radialen Dicke der Spule unter Konstanthaltung von Länge und Durchmesser. Bis zu einer Dicke von 0.2 cm, was allgemein mit einlagigen Spulen eingehalten werden kann, sind die Unterschiede zwischen ΔB_0 und B_{\max} vernachlässigbar. Zur Hilfestellung bei der Auswertung von dicken Spulen ist in Abb. 13 die relative Differenz zwischen B_{\max} und dem Außenfeld B_p gegen die Spulendicke aufgetragen. Man findet für die benutzte Spulengeometrie ein fast konstantes Verhältnis von 12 %. In Abb. 14 sind die Ergebnisse der Auswertung an ein- und mehrlagigen Spulen zum Vergleich eingezeichnet. Man findet eine sehr gute Übereinstimmung.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen über die Transformation von Gleichströmen in supraleitenden Kreisen haben gezeigt, daß die Anregung von Induktionsströmen im ansteigenden Magnetfeld nicht kontinuierlich abläuft, sondern stufenweise mit Normalübergängen im Supraleiter beim Erreichen kritischer Wertepaare von Strom und Magnetfeld. Damit ist die Erzeugung eines kontinuierlichen Gleichstroms auf den Bereich zwischen zwei Normalübergängen beschränkt. Die höchsten Transformationsströme, die im Bereich des ersten Normalübergangs möglich sind, lassen sich durch geeignete Anpassung der Induktivitäten erreichen. Bei ungünstigem Verhältnis der Induktivitäten ($L_n \gg L_s$) läßt sich der Transformationsstrom durch Strompumpen stufenweise erhöhen. Im Grenzfall erreicht man damit den max. Strom, der durch den Kurzschlußstrom im Bereich des ersten Normalübergangs gegeben ist.

Die kurzgeschlossenen Spulen schirmen das außen angelegte Magnetfeld nicht nur ab, sondern erzeugen im Zentrum sogar ein negatives Feld. Diese zunächst überraschende Tatsache ergibt sich aus der Geometrie der Spule und dem Prinzip der Flußerhaltung in supraleitenden Kreisen. Mit der Lagenzahl nimmt die Abschirmwirkung der Spulen zu, gleichzeitig erhöht sich aber auch der negative Feldanteil. Obwohl in der Feldabschirmung des Inneren eines supraleitenden Filamentes und des Innenraumes einer kurzgeschlossenen supraleitenden Spule kein prinzipieller Unterschied besteht, da beides durch die Anregung von Kreis- bzw. Wirbelströmen geschieht, bestehen doch wesentliche Unterschiede in der Art des Magnetfeld-eindringens. Während der Fluß offenbar in das Filament kontinuierlich eindringt, kann er in eine supraleitende Spule nur diskontinuierlich eindringen. Im Filament stellen sich die Abschirmströme an jedem Ort individuell den äußeren Feldbedingungen entsprechend ein. In der Kurzschlußspule ist eine kontinuierliche Anpassung der Stromdichte bei Felderhöhung nur möglich bis der supraleitende Querschnitt mit Transportstrom ausgefüllt ist. Dann wird bei weiterem Feldanstieg das gesamte umrandete Volumen in die Flußänderung mit einbezogen und die in Wärmeenergie umgewandelten Feldenergien wachsen dadurch so enorm an, daß sie den Supraleiter an kritischen Stellen zur Normalleitung bringen und der Abschirmstrom zusammenbricht. Die Magnetisierung der supraleitenden Kurzschlußspule zeigt große Ähnlichkeit mit dem Magnetisierungsverlauf von flußsprungbehafteten Supraleitern [6].

Die Tatsache, daß die "Flußsprünge" in Kurzschlußspulen durch die I_c, B -Charakteristik des Supraleiters vorgegeben sind, ist zur Bestimmung von Kurzprobenwerten ausgenutzt worden. Für alle Arten von Supraleiterdrähten (Einkernleiter, ungetwistete und getwistete Multicore-Leiter) stimmen die Meßergebnisse mit den nach üblichen Methoden erhaltenen Werten überein. Die Abweichungen liegen innerhalb der Fehlergrenze. Das hier angewandte Induktionsverfahren würde bei supraleitenden Kabeln, wo Stromstärken von einigen Tausend Ampere auftreten können, aufwendige Netzgeräte und Stromzuführungen einsparen.

- [1] Bean, C.P., Rev. Mod. Phys. 36, 31 (1964)
- [2] Kim, I.B., Hempstead, C.F., Strnád, A.R., Phys. Rev. 129, 528 (1963)
- [3] Voelker, F., Acker, R.C., Particle Accel. 1, 209 (1970)
- [4] Laquer, H.L., Cryogenics 3, 27 (1963)
- [5] Montgomery, D.B., Solenoid Magnet Design, Wiley-Interscience
- [6] Kwasnitza, K., Cryogenics 13, 169 (1973)