



KFA

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
Projektteilung

Tieftemperatur-Leistungs-Übertragung (TLÜ)

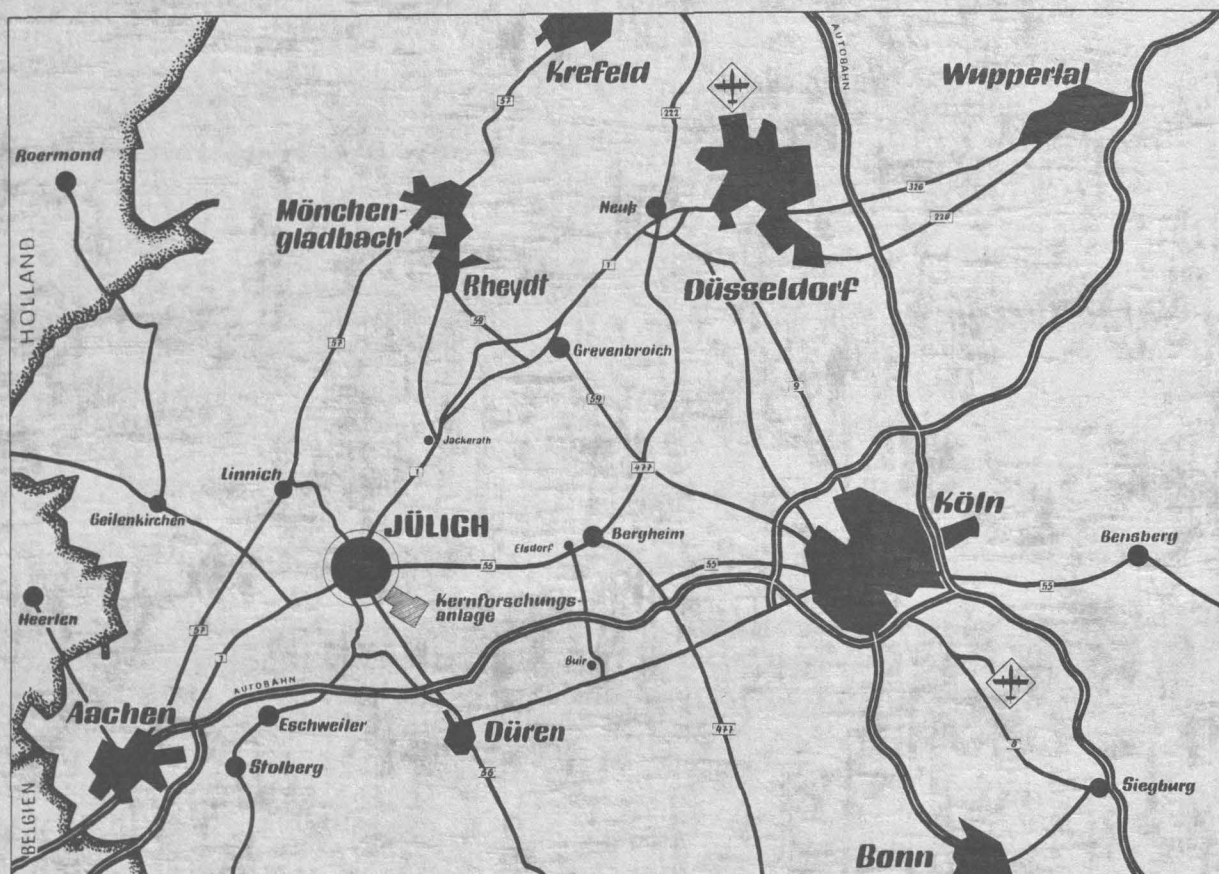
Die Möglichkeiten zur Übertragung hoher und höchster elektrischer Leistungen mit supraleitenden Kabeln.
Eine Auswertung der wichtigsten Veröffentlichungen.

von

Conrad Doose, Walter Schröck-Vietor, Dieter Tappenhöller

JüI - 631 - PA
Dezember 1969

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 631
 Projektabteilung Jül – 631 – PA

Dok.: Electric Power - Low Temperature Transmission
 Electric Power - Distribution
 Low Temperature Power Transmission
 Low Temperature Power Transmission - Bibliographies
 Low Temperature Power Transmission - Economics
 Cryogenic Cables - Auxiliary Equipment
 Superconducting Cables - Economics
 Superconducting Motors
 Superconducting Generators
 Superconducting Transformers
 Overhead Lines - Economics

DK: 621.3.05 : 542.46
 621.316 : 542.46
 621.316 : 542.46 : 01
 621.316 : 542.46 : 330.13
 621.59 : 621.315.2.002.52
 537.312.62 : 621.315.2 : 330.13
 537.312.62 : 621.313.12/.13
 537.312.62 : 621.314
 621.315.1 : 330.13

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Tieftemperatur-Leistungs-Übertragung (TLÜ)

Die Möglichkeiten zur Übertragung hoher und höchster elektrischer Leistungen mit supraleitenden Kabeln.
Eine Auswertung der wichtigsten Veröffentlichungen.

von

Conrad Doose, Walter Schröck-Vietor, Dieter Tappenhölter

Als Manuskript des internen Berichtes der KFA-Projektabteilung vom August 1968 gedruckt.
Die nach Bearbeitung des internen Berichtes veröffentlichten Arbeiten konnten hier nicht mehr berücksichtigt werden.

Inhaltsverzeichnis

	Seite

1. EINLEITUNG	1
1.1 Energieerzeugung und -Übertragung	2
2. GRUNDTATSACHEN UND THEORETISCHE VORSTELLUNGEN DER SUPRALEITUNG	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Elektrisches Verhalten der Supraleiter und der Reinstmetalle	9
2.3 Magnetisches Verhalten der Supraleiter	15
2.4 Supraleitung bei höheren Temperaturen	22
3. PHYSIKALISCHE UND TECHNOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN SUPRALEITENDER MATERIALIEN	24
4. TECHNIK DER TIEFTEMPERATURKABEL	31
4.1 Drehstromübertragung mit Einleiterkabeln	33
4.2 Drehstromübertragung mit koaxialen Leitern	37
4.3. Drehstromübertragung mit gebündelten Leitern	42
4.4 Gleichstromübertragung	45
4.5 Vergleich der Konstruktionsvorschläge	52
4.6 Betriebsprobleme	56
5. TECHNIK DER TRANSFORMATOREN UND GENERATOREN	59
5.1 Transformatoren	60
5.2 Generatoren	63
6. TECHNISCHE HILFSANLAGEN	67
6.1 Vakuumpumpen	67
6.2 Kalt- und Flüssiggasleitungen, Stromzuführungen	73
6.3 Tieftemperaturanlagen	79
7. KOSTEN VON ÜBERTRAGUNGSSYSTEMEN	87
7.1 Konventionelle Übertragungssysteme	87
7.2 Tieftemperatur-Übertragungssysteme	88
7.3 Vergleich beider Übertragungssysteme	91
7.4 Kostenvorteile von Systemen mit supraleitenden Transformatoren und Generatoren	94
8. ZUSAMMENFASSUNG	97
9. ALPHABETISCHES VERZEICHNIS DER ZITIERTEN AUTOREN	101

1. EINLEITUNG

Die Übertragung elektrischer Leistungen wird in absehbarer Zeit in Größenordnungen vorstoßen, bei denen neue Übertragungstechniken benötigt werden. In der Bundesrepublik Deutschland wird z.B. die installierte Engpaßleistung in der Zeit von 1970 bis 2000 voraussichtlich von etwa 60 000 auf 280 000 MW zunehmen (Krä 68).

Die konventionelle Hochspannungs-Drehstromübertragung findet derzeit ihre wirtschaftlichen Grenzen bei Leistungen von mehreren hundert Megawatt und dürfte nicht über einige tausend Megawatt hinaus gesteigert werden können (Wei 67). Schon jetzt werden häufig für die Übertragung hoher elektrischer Leistungen Bündelleitungen - mehrere durch Abstandhalter verbundene Leitungen für jede Phase - bzw. auch parallele Leitungssysteme verwendet. Dabei kann man praktisch wohl zwei oder drei, nicht aber zehn oder zwanzig Doppelleitungen nebeneinander auf derselben Trasse installieren. Auch die in den letzten Jahren entwickelte Hochspannungs-Gleichstromübertragung, die erst durch die Herstellung leistungsfähiger und verlustarmer Gleichrichter möglich wurde, stößt auf ähnliche Grenzen. Entscheidend für die Verwendungsmöglichkeit von Freileitungen jeglicher Größe kann die Frage nach dem verfügbaren Trassenraum werden.

Ein zur Zeit noch ganz unkonventioneller Weg zur Übertragung höchster Leistungen ist die Verwendung von Tieftemperaturkabeln, bei denen die erhebliche Widerstandsverringerung elektrischer Leiter bei tiefen Temperaturen - nahe dem absoluten Nullpunkt - ausgenutzt wird. Dabei lassen sich gegenüber herkömmlichen Leitungen die Joule'schen Verluste ganz erheblich vermindern und die Stromdichte in den Leitern um mehr als drei Zehnerpotenzen erhöhen, so daß sich insbesondere unter Ausnutzung der Supraleitfähigkeit mancher elektrischer Leitermaterialien die Möglichkeit der Übertragung praktisch unbegrenzter elektrischer Leistungen eröffnet.

Die Anwendung von Tieftemperaturkabeln erscheint zunächst besonders dort aussichtsreich, wo man ohnehin auf die Energieübertragung durch Kabel angewiesen ist, z.B. bei Unterwasserleitungen oder bei Leitungen durch sehr dicht bevölkerte Gebiete. Bei den konventionellen Starkstromkabeln ist nämlich die Übertragung hoher Leistungen durch die Möglichkeit zur Abfuhr der Joule'schen Wärme begrenzt und in modernen Hochleistungskabeln wird deshalb Zwangskühlung mit Wasser oder Öl benötigt, ohne daß die Übertragungsleistung sehr wesentlich erhöht werden könnte!

Für die fernere Zukunft zeichnet sich die Möglichkeit der wirtschaftlichen Übertragung sehr hoher Leistungen über große Entfernungen von großen Kraftwerkeinheiten mit optimalem Standort zu den Verbraucherschwerpunkten ab.

Als weitere avantgardistische Möglichkeit zur Übertragung höchster elektrischer Leistungen wird auch an die Verwendung von Mikrowellen in Hohlleitern gedacht (Wei 67), z.B. an eine Übertragung von 4.000 MW bei 10 GHz in einem Hohlleiter von 1,5 m Durchmesser. Dieses Verfahren soll hier jedoch nicht weiter behandelt werden.

1.1 ENERGIEERZEUGUNG UND -ÜBERTRAGUNG

Die Entwicklung von Kernkraftwerken führt deutlich zu immer größeren Leistungseinheiten. Kraftwerke von 300 und 600 (und bald auch 1.200) MW sind heute Standardgrößen, solche von einigen tausend Megawatt erscheinen technisch realisierbar und versprechen weitere Vorteile für die Stromgestehungskosten. Der Standort solch großer Kraftwerke ist im wesentlichen bestimmt durch die Verbrauchsschwerpunkte, die Kühlwasserversorgung und Umgebungsschutzüberlegungen. Diese drei Gesichtspunkte werden im allgemeinen miteinander konkurrieren, d.h. jeder reale Standort wird nur einen Kompromiß zwischen den drei vorgenannten Forderungen darstellen. Eine leistungsfähige, verlustarme und kostengünstige Energieübertragungsmöglichkeit würde den ersten der drei Gesichtspunkte weitgehend von den anderen beiden entkoppeln.

Man könnte in diesem Fall den Standort für ein großes Kraftwerk optimal nach Kühlwasserversorgung und Umgebungsschutz wählen und eine Übertragung der elektrischen Leistung mit einem Tieftemperaturkabel zum Verbrauchsschwerpunkt vorsehen. Anlage- und Betriebskosten dieser Leitung sollten dann dem Kernkraftwerk selbst zugerechnet werden, vor allem, wenn man in einer Wirtschaftlichkeitsstudie ein sehr großes Kernkraftwerk mit der Summe mehrerer kleiner, verbrauchsnahe angesiedelter Kraftwerke vergleicht.

Ein vollständiges Stromerzeugungs- und Verteilersystem, das zur Leistungsübertragung über große Entfernungen Tieftemperaturkabel verwendet, sollte konsequenterweise auch einen tiefgeköhlten Generator und tiefgeköhlte Transformatoren enthalten. Darüberhinaus könnte man in einem System aus einem tiefgeköhlten Gleichstromgenerator und einem anschließenden tiefgeköhlten Gleichstromkabel sogar die Bauelemente Transformator und den Gleichrichter einsparen. Bei diesem besonders wirtschaftlichen System würde erst in Verbrauchernähe die Umwandlung in Drehstrom und die Verwendung von Transformatoren erforderlich werden.

Besondere, der Tieftemperatur-Leistungs-Übertragung eigene Schwierigkeiten, denen jedoch durch geeignete Maßnahmen begegnet werden kann, sollen ebenfalls erwähnt werden: Hohe Kurzschlußströme können die Supraleitfähigkeit aufheben und den elektrischen Leiter in den normalleitenden Zustand zurückführen und die auftretende Joule'sche Wärme kann ein Schmelzen des supraleitenden Materials zur Folge haben. Weiterhin können Verluste des Kühlmittels eine Erwärmung des Kabels bewirken, wodurch ebenfalls der supraleitende Zustand verlassen wird, mit allen daraus resultierenden Gefährdungen des nunmehr durch Joule'sche Wärme hoch belasteten Kabels. Bei notwendigen Reparaturen werden u. U. für das erneute Evakuieren und Kaltfahren der Leitungen beträchtliche Zeitspannen benötigt - mehrere Tage bis Wochen - die in dieser Form bei konventionellen Leitungen nicht bekannt sind.

Eine hiermit vorgelegte Literaturstudie soll erste Angaben zu Physik, Technik und Wirtschaftlichkeitsfragen der TLÜ bringen. Dabei wird die Physik nur gestreift und das Schwergewicht auf die technische Realisierbarkeit und eine naturgemäße recht rohe Abschätzung der Kostensituation gelegt.

2. GRUNDTATSACHEN UND THEORETISCHE VORSTELLUNGEN DER SUPRALEITUNG

2.1 Allgemeines -----

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung wurden mit der KAMERLING ONNES 1908 erstmals gelungenen Verflüssigung von Helium eingeleitet, das den niedrigsten Siedepunkt aller bekannten Gase ($4,2^{\circ}\text{K}$ bei Atmosphärendruck) besitzt. Damit war es ihm möglich geworden, die von DEWAR durchgeführten Versuche zur Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Metallen im Bereich unterhalb der Temperatur des flüssigen Wasserstoffes, d.h. unterhalb von 20°K , fortzusetzen (Men 67). Es war damals bekannt, daß der spezifische elektrische Widerstand noch bis in den Bereich des flüssigen Stickstoffes (77°K) linear mit der Temperatur abnimmt, während er bereits im Temperaturbereich des flüssigen Wasserstoffes eine andere Temperaturabhängigkeit zeigt und mit weiter abnehmender Temperatur sich asymptotisch dem Werte Null zu nähern schien. Nach einer anderen Theorie sollte der Widerstand unterhalb 20°K ein Minimum erreichen, um am absoluten Nullpunkt unendlich groß zu werden, dh. die elektrische Leitfähigkeit sollte völlig verschwinden.

ONNES begann zunächst Versuche an Gold und Platin und stellte dabei fest, daß unterhalb 5°K konstante Restwiderstände erreicht werden, die nicht mehr von der Temperatur abhängig sind (Abb. 1). Dieser nicht für das Material charakteristische, sondern vom Reinheitsgrad des Versuchsmaterials abhängige Restwiderstand war nicht mehr durch weitere Abkühlung der Proben, sondern nur durch Verringerung der Verunreinigungen herabzusetzen (Sco 60). Er setzte daraufhin die Versuche mit Quecksilber fort, das durch mehrfache Destillation bei Zimmertemperatur extrem gereinigt werden konnte und deshalb am ehesten geeignet schien,

die Richtigkeit der Theorien nachzuweisen. Entgegen aller Erwartung fand er 1911 (Onn 11), daß

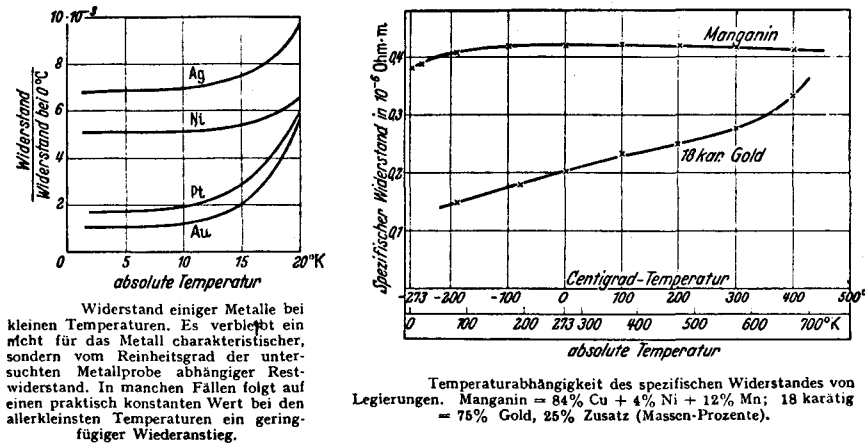


Abb. 1 : Widerstand von Metallen und Legierungen bei tiefen Temperaturen (Poh 57)

der Widerstand in dem bei der tiefen Versuchstemperatur festen Quecksilberdraht in einem sehr eng begrenzten Temperaturbereich um $4,2^{\circ}K$ um mehrere Zehnerpotenzen abfällt und mit seiner Versuchsanordnung nicht mehr nachweisbar war.

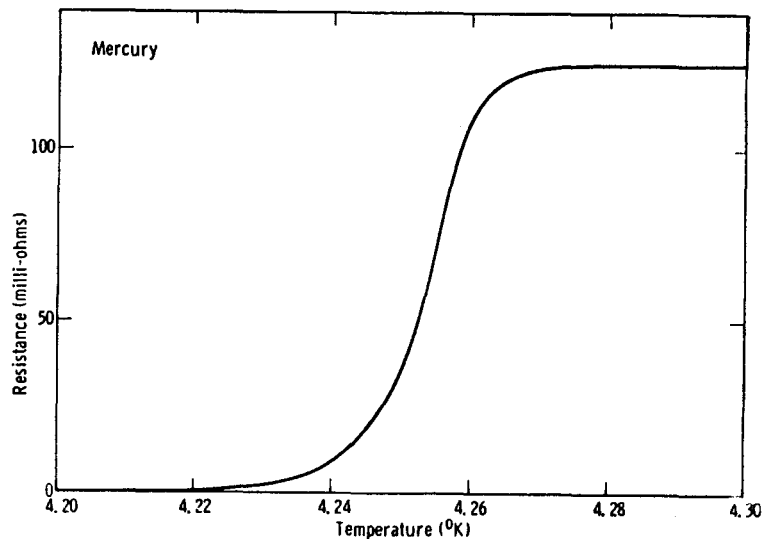


Abb. 2 : Widerstandsabfall von Quecksilber bei 4,25°K
(Van 63)

In einer 1913 veröffentlichten Arbeit verwendete er für das entdeckte Phänomen zum ersten Mal den Begriff "Supraleitfähigkeit" und erhielt im gleichen Jahr für seine Entdeckung den Nobelpreis. 1916 gelang ihm der Nachweis, daß die Abnahme des Widerstandes mindestens zwölf Zehnerpotenzen beträgt. Nach dem heutigen Stand der Forschung (Van 63) ist der elektrische Widerstand $\rho < 10^{-16} \Omega \text{ cm}$, was einem Faktor von etwa 10^8 gegenüber dem Widerstand gerade oberhalb der Sprungtemperatur, bei welcher der Widerstandsabfall beobachtet wird, und etwa dem Faktor 10^{10} gegenüber dem Widerstand bei Raumtemperatur entspricht. Es wird heute vermutet, daß die Grenze des spezifischen Widerstandes unterhalb $10^{-20} \Omega \text{ cm}$ zu suchen ist, die jedoch nur wissen-

schaftliche Bedeutung besitzt. Für alle technischen Anwendungsfälle der Supraleitung kann damit gerechnet werden, daß der ohm'sche Widerstand eines Supraleiters Null ist.

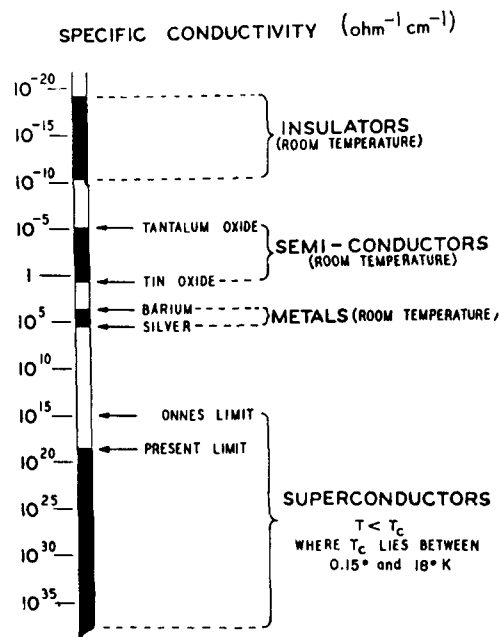


Abb. 3 : Spezifische Leitfähigkeit verschiedener Materialien (Van 63)

Abb. 3 zeigt den zur Zeit bekannten Bereich der spezifischen Leitfähigkeit (Kehrwert des spezifischen Widerstandes). In den folgenden Abschnitten sollen einige wichtige elektrische und magnetische Eigenschaften, deren Kenntnis Voraussetzung für die technische Anwendung der Supraleitung ist, kurz erläutert werden.

2.2 Elektrisches Verhalten der Supraleiter und der Reinstmetalle

Nach dem atomistischen Bild der elektrischen Leitung in Metallen bei Temperaturen oberhalb des Sprungpunktes kann man den Kristall eines Metalls als Gitter positiver Metallionen ansehen, in dessen Maschen sich ein Gas freibeweglicher Elektronen befindet (Poh 57). Ähnlich der Molekularbewegung eines Gases diffundieren die Elektronen innerhalb des Gitters, mit den Metallionen zusammenstoßend, in ungeordneter Bewegung. Erst durch eine an den Leiter angelegte äußere Spannung erhält die Diffusionsbewegung eine bevorzugte Richtung und der Schwarm Elektronen eine Driftbewegung, die den elektrischen Strom darstellt. Dabei stehen die Elektronen in ständiger Wechselwirkung mit den Ionen und stoßen mit diesen elastisch zusammen, wodurch ein Teil ihrer im elektrischen Feld erhaltenen Bewegungsenergie an das Kristallgitter abgegeben wird, das diese als verstärkte Gitterschwingung (Wärmeenergie) aufnimmt. Die "Reibung" der Elektronen macht sich als ohm'scher Widerstand R bemerkbar, einem Stoffwert, der nach dem ohm'schen Gesetz $R = U/J = \text{const}$ für Gleichstrom den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und fließendem Strom liefert. Für einen Wechselstromkreis mit in Reihe geschalteter Induktivität und Kapazität lautet das Gesetz $U_0 = I_0 \cdot \sqrt{R^2 + (WL - \frac{1}{WC})^2}$. Die als "Joule'sche Wärme" an das Kristallgitter abgegebene Bewegungsenergie beträgt nach dem Joule'schen Gesetz $Q = R \cdot I^2$ bei Gleichstrom, bei Wechselstrom $Q = \frac{1}{2} R \cdot I_0^2$, wobei I_0 der Maximalwert des Stromes ist.

Während im normalleitenden Zustand sich in bevorzugter Richtung bewegende Einzelelektronen den Strom ergeben, kommt es im supraleitenden Zustand nach der BCS-Theorie (Bar 57, Hei 68) zu einer losen Bindung zwischen jeweils zwei Elektronen, die anschaulich ähnlich der Bindung von zwei gleichen Atomen zu einem Molekül vorzustellen wäre.

Die Bildung dieser sogenannten Cooper-Paare beginnt, sobald im supraleitenden Zustand die Stromleitung - z.B. durch ein äußeres Magnetfeld oder eine außen angelegte Spannung - eingeleitet wird. Diese Elektronenpaare bewegen sich dann ebenfalls wie die freien Einzelelektronen im Normalleitungszustand mit geordneter Bewegung in Längsrichtung des Leiters und sind Träger der Supraleitung. Sie stehen nicht mehr in verlustbehafteter Wechselwirkung mit den positiven Ionen des Kristallgitters, obgleich eine Wechselwirkung vorhanden ist, die nach der Theorie erst Voraussetzung für die Paarbildung ist. Es können noch freie Einzelelektronen im Leiter vorhanden sein, während dieser sich im supraleitenden Zustand befindet; an der Supraleitung selbst sind diese jedoch nicht beteiligt. Auch besteht keine Wechselwirkung zwischen den gepaarten und ungepaarten Elektronen, obgleich paarweise Bindungen aufbrechen und Normalelektronen sich zu Paaren verbinden können.

Aufgrund der gleichen Ladungen müßten sich die paarweise korrelierten Elektronen gegenseitig abstoßen, und es kann nur zu einer Bindung aneinander kommen, wenn diese durch äußere Kräfte aufrechterhalten wird, wie es beispielsweise bei zwei positiven Wasserstoff-Ionen durch die gemeinsame Elektronenhülle der Fall ist. Man nimmt an, daß diese äußere Kraft bei der Cooper-Paarbildung aus einer komplizierten Wechselwirkung zwischen dem positiven Ionengitter und den zunächst vorhandenen Einzelelektronen entsteht, die sich bei der Einleitung der Supraleitung im elektrischen Feld in Bewegung setzen (Lit 67). Ein einzelnes Elektron passiert dabei zunächst die quer zu seiner Bewegungsrichtung zwischen benachbarten Ionen gebildete Gitterfläche und zieht die ihm am nächsten liegenden Ionen stärker, die weiter entfernt liegenden schwächer an (Abb. 4). Diese Einschwingbewegung erfolgt wegen der großen Masse jedoch mit einer gewissen Trägheit, so daß die größte örtliche Annäherung der Ionen erst mit Verzögerung und zu einem Zeitpunkt erfolgt, in dem das Elektron die Gitterfläche

bereits passiert hat. Dies führt zu einer örtlich erhöhten positiven Ladungsdichte, die ein weiteres Elektron anzieht, das dem ersten in kurzem Abstand

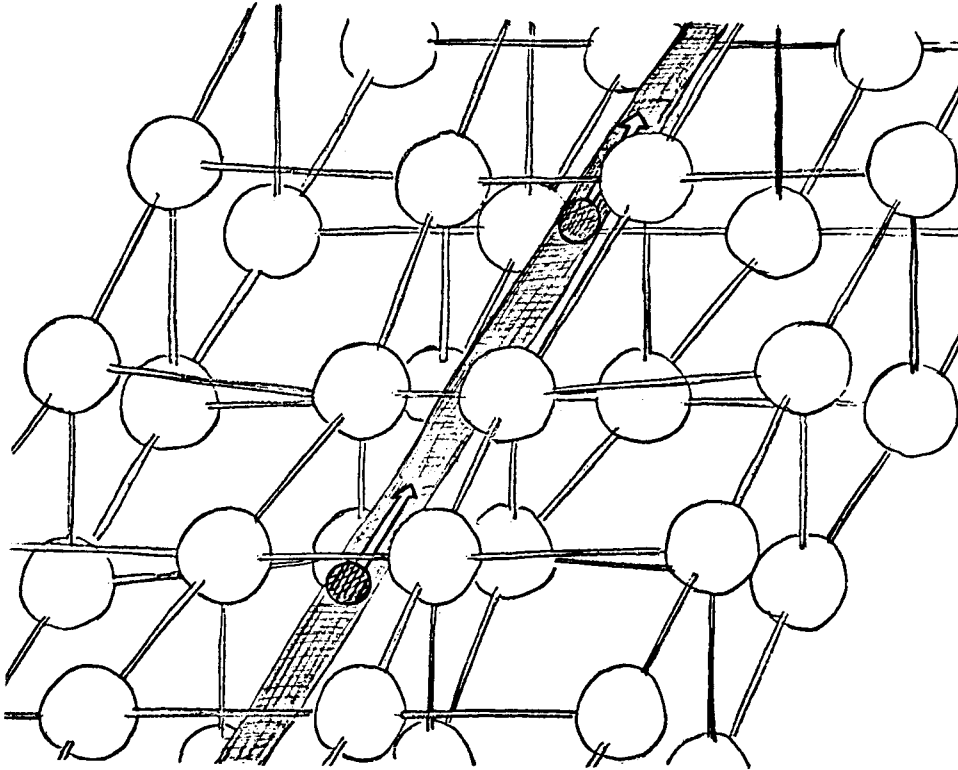


Abb. 4 : Wechselwirkung zwischen einem aus zwei Elektronen gebildeten Cooper-Paar und den positiven Ionen des Kristallgitters (Lit 67)

auf dem Weg durch das Ionen-Gitter folgt und mit diesem ein Cooper-Paar bildet. Der Schwingungsvorgang des Gitters und die Bewegung der Cooper-Paare nach diesem Bild, das nur der Veranschaulichung dient, jedoch die komplizierten

Vorgänge nicht erschöpfend deuten kann, bleibt auch nach der Abschaltung des äußeren Feldes erhalten. In Laborversuchen wurden derartige Supraleitungs-Ströme in Ringspulen länger als zwei Jahre aufrechterhalten, ohne daß durch Messung ihrer äußeren Magnetfelder eine Schwächung feststellbar war.

Die paarweise Bindung der Elektronen kann nicht nur durch Wärmeenergie, sondern auch durch andere Energieformen, z.B. elektromagnetische Energie, aufgehoben werden. Überschreitet der von außen angelegte oder induzierte Strom einen bestimmten Wert, dann geht der Leiter ebenfalls plötzlich in den Normalleitungszustand über. Infolge des dann zwar immer noch relativ geringen ohm'schen Widerstandes wird Wärme frei und der Strom ist nicht mehr verlustlos. Der kritische Strom I_c , bei dem der Übergang in die normalleitende Phase erfolgt, ist abhängig von der

Temperatur des Leiters und steigt von sehr geringen Werten wenig unterhalb des Sprungpunktes bis zu sehr großen Stromstärken bei noch tieferen Temperaturen an. Bei einem Zinndraht mit einem Durchmesser von 1 mm kann I_c max. etwa 75 A betragen (Abb.5).

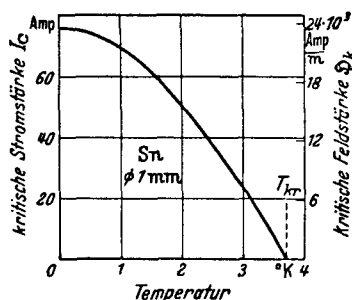


Abb. 5 : Der kritische Strom I_c an der Oberfläche eines 1 mm dicken Zinndrahtes (Poh 57)

Neben der Erscheinung der Supraleitung kann beim Bau von elektrischen Maschinen und tiefgekühlten Kabeln auch die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes ausgenutzt werden, die bereits in Abb. 1 angedeutet ist. Dabei ist der temperaturunabhängige Restwiderstand eines Metalls umso geringer, je reiner das Metall ist. Dies gilt insbe-

sondere auch für die Werkstoffe Aluminium, Kupfer und Beryllium, die bereits bei Raumtemperatur sehr gute elektrische Leiter sind und sich wegen ihres geringen Widerstandes im Temperaturbereich von 15 bis 25°K bzw. 80°K als tiefgeköhlte Normalleiter eignen (Tab. 1). Neben dem Einfluß der Verunreinigungen ist der Widerstand von anderen, zum Teil noch wenig untersuchten Parametern abhängig, von denen hier nur die vorangegangene Wärmebehandlung, Abschrecken nach dem Weichglühen des Leiters, Herstellungsverfahren und maschinelle Bearbeitung sowie Alterung des Werkstoffes genannt werden sollen.

Tabelle 1 : Temperaturabhängigkeit des ohm'schen Widerstandes für Al, Cu und Be (Mea 66)

spezif. Widerstand in $\mu\Omega\text{cm}$			
Temperatur °K	Al	Cu	Be
273	2,50	1,550	2,710
250	2,24	1,400	2,156
200	1,65	1,060	1,151
150	1,06	0,705	0,436
100	0,47	0,350	0,0907
80	0,25	0,215	0,0389
50	0,05	0,050	0,0077
20	0,0006	0,0008	0,0004

Das Diagramm Abb. 6 zeigt z. B. den Einfluß der Glüh-temperatur auf das Verhältnis der Widerstände $R_{300}/R_{4,2}$ bei 300°K und 4,2°K für Reinst-Aluminium. Dabei nimmt das Widerstandsverhältnis von etwa 270 bei nicht geglühten Proben bis auf etwa 1860 bei Proben, die bei 500°C geglüht wurden, zu. Bei Proben, die vorher bei 400°C geglüht worden waren

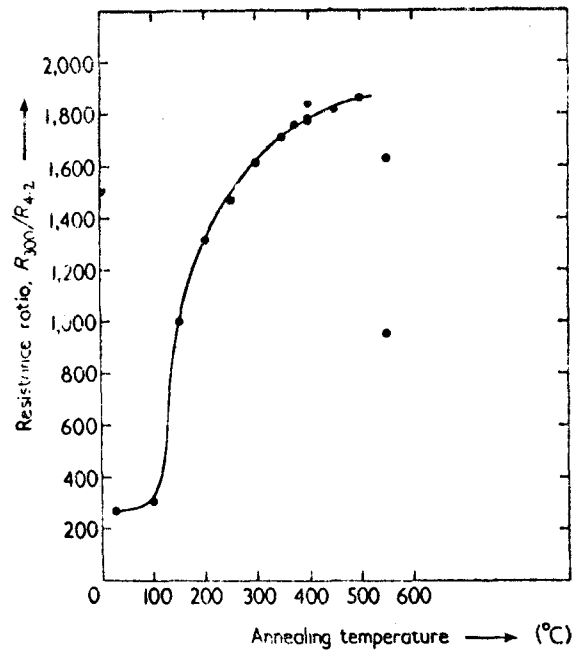


Abb. 6 : Widerstandsverhältnis als Funktion der Glühtemperatur (Mai 62)

und innerhalb von wenigen Minuten in Luft auf Raumtemperatur abgeschreckt wurden, zeigte sich gegenüber solchen, die langsam in einem Ofen abgekühlt wurden, eine Verminderung des Verhältnisses $R_{300}/R_{4,2}$ um etwa 5 Prozent (Abb. 7)

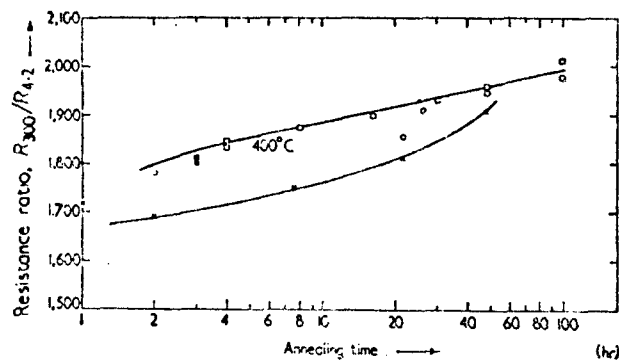


Abb. 7: Widerstandsverhältnis als Funktion der Glühzeit (Mai 62)

2.3 Magnetisches Verhalten der Supraleiter

Bei der Bewegung elektrischer Ladungen entstehen stets magnetische Felder, d.h., wird ein elektrisches Feld durch einen Leiter geschlossen, dann erzeugt der in dem Leiter fließende Strom ein geschlossenes magnetisches Feld, das den ganzen Stromweg umgibt (Abb. 8a). Desgleichen induziert ein zeitabhängiges Magnetfeld nach dem Induktionsgesetz eine Spannung in einem elektrischen Leiter, die an seinen Enden gemessen werden kann. Wird der Leiter geschlossen, dann fließt infolge der magnetischen Induktion ein Strom, der ebenfalls von einem sekundären Magnetfeld begleitet ist.

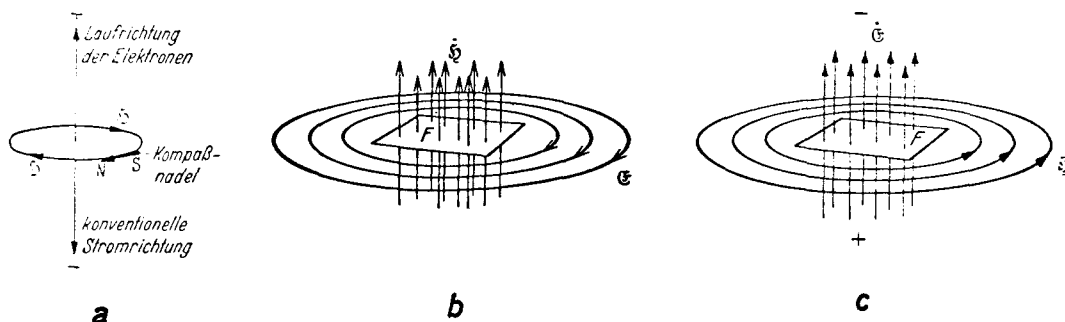


Abb. 8 : Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder
(Poh 57)

Die Verbindung zeitabhängiger elektrischer und magnetischer Felder besteht in dem Auftreten geschlossener elektrischer Feldlinien rings um ein sich änderndes Magnetfeld (Abb. 8b) und geschlossener magnetischer Feldlinien rings um ein sich änderndes elektrisches Feld herum (Abb. 8c). Sie findet ihren gesetzmäßigen Zusammenhang in den Maxwell'schen Gleichungen und ist von fundamentaler Bedeutung in der Elektrodynamik.

Diese Zusammenhänge wurden von KAMERLING ONNES bereits kurz nach der Entdeckung der Supraleitfähigkeit benutzt, um den mit seiner ersten Versuchsanordnung nicht mehr meßbaren, aber noch vermuteten Restwiderstand messen zu können. Ein geschlossener Quecksilberring wurde bei Raumtemperatur in ein äußeres magnetisches Feld gelegt und dann bis unterhalb der Sprungtemperatur T_c abgekühlt. Danach

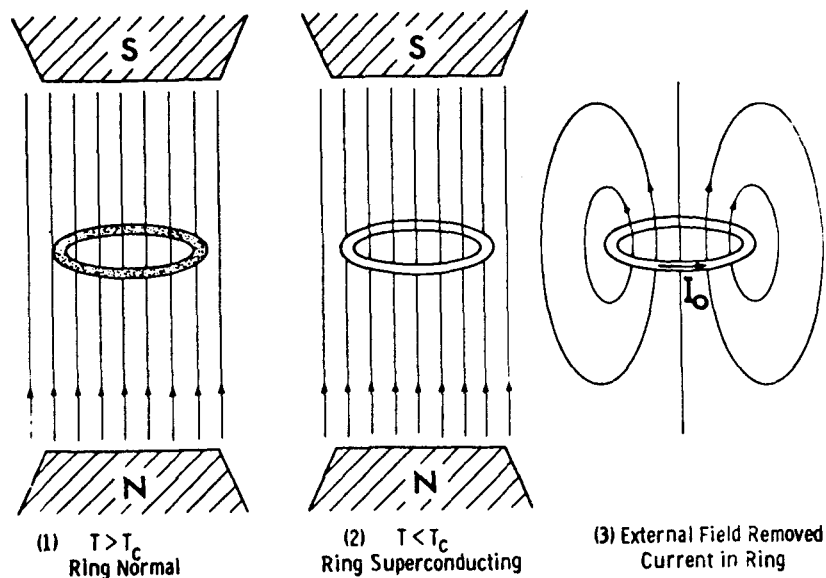


Abb. 9 : Verhalten eines supraleitenden Ringes im Magnetfeld (Van 63)

wurde das äußere Magnetfeld entfernt, wodurch ein Spannungstoß in den Ring induziert wurde. Dieser erzeugte einen in axialer Richtung des Ringes fließenden Strom, dessen sekundäres Magnetfeld gemessen werden konnte. Das Experiment zeigte, daß innerhalb von mehreren Tagen keine Änderungen des Stromes bzw. des zugeordneten Magnetfeldes feststellbar war. Der Strom konnte nur durch Erwärmung des Ringes bis über die Sprungtemperatur oder, wie sich später in Ver-

suchen zeigte, durch ein äußeres Magnetfeld, wenn es eine bestimmte kritische Feldstärke H_c überschritt, zum Erliegen gebracht werden. Der magnetische Übergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand erfolgt ebenfalls sprunghaft wie der thermische Übergang und ist bei vielen reinen Metallen zu beobachten (Abb. 10).

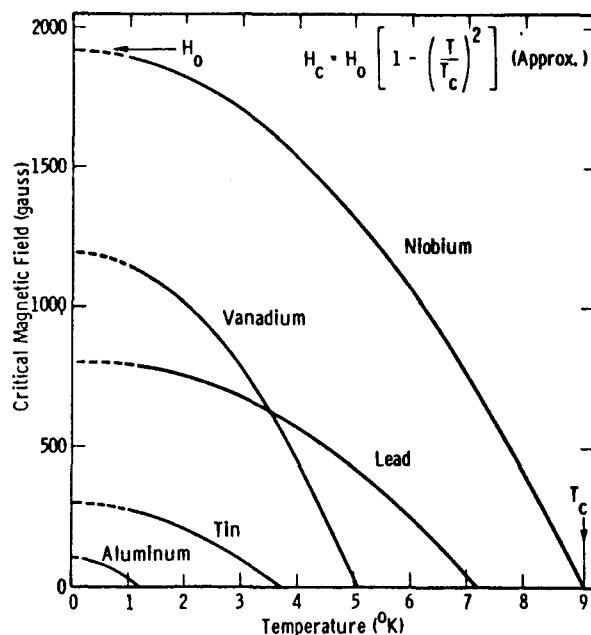


Abb. 10 : Kritisches Feld H_c als Funktion der Temperatur für verschiedene Elemente (Van 63)

Im Bereich der Sprungtemperatur ist das kritische magnetische Feld H_c null und nimmt mit weiterer Abkühlung am absoluten Nullpunkt den Wert H_0 an. Die Abbildung zeigt weiter, daß in grober Näherung Metalle mit hoher Sprungtemperatur auch hohe kritische Feldstärken besitzen und umgekehrt. Der Zusammenhang zwischen kritischer Feldstärke H_c und kritischem Strom I_c , der, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ebenfalls den Übergang in den normalleitenden Zustand herbeiführen kann, wird für einen zylindrischen Leiter durch die Gleichung $I_c = 5 \cdot r \cdot H_c$ gegeben, wobei r der Radius des Leiters ist. Im Bereich unterhalb der Kurven $H_c = f(T)$ und $I_c = f(T)$ ist das Metall stets supraleitend, darüber liegt der normalleitende Bereich.

Ein weiteres Kennzeichen ist die diamagnetische Eigenschaft der Supraleiter im supraleitenden Zustand, der die Unterscheidung in weiche und harte Supraleiter zugrunde liegt. Wird ein supraleitender Werkstoff, der zuerst einem ihn durchdringenden Feld ausgesetzt ist (Abb. 11a), bis unterhalb der Sprungtemperatur T_c abge-

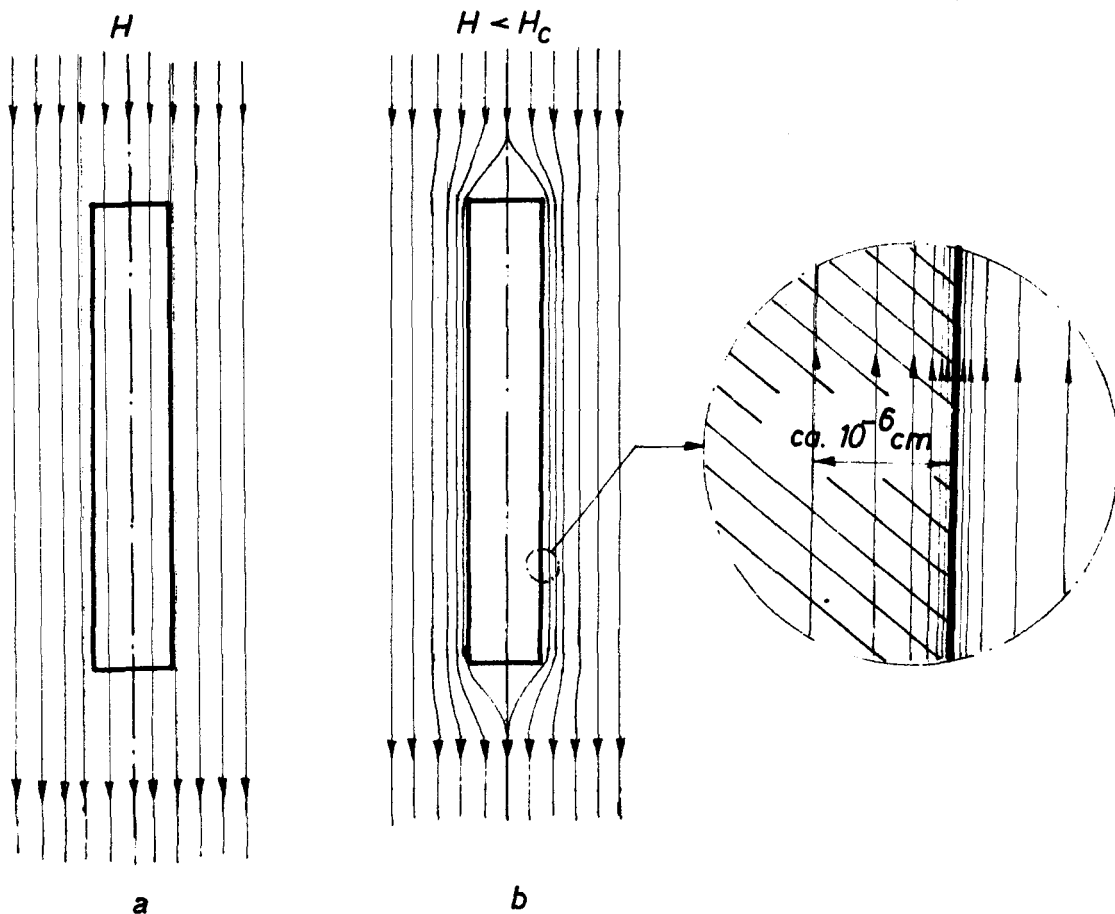


Abb. 11 : Verhalten eines idealen Supraleiters im Magnetfeld

kühlt, dann verdrängt er das innere Feld bei Erreichen der Sprungtemperatur bis auf eine Oberflächenschicht von ca. 10^{-6} cm Dicke (Meißner - Ochsenfeld-Effekt). Stoffe, die das Feld entsprechend Abb. 11b praktisch vollständig nach außerhalb ihrer Oberfläche verdrängen, werden weiche

Supraleiter oder Supraleiter Typ 1 genannt. Diese Erscheinung wird jedoch nur bei sehr reinen Metallen beobachtet, die vorher sorgfältig weichgeglüht wurden (Van 63). Verunreinigte Supraleiter und supraleitende Legierungen - harte oder Typ 2 - Supraleiter - zeigen bis zu einem unteren kritischen Feld H_{c1} (Abb. 16) das gleiche Verhalten wie Typ 1 - Supraleiter. Oberhalb dieses Wertes beginnt das äußere Feld in Form einzelner voneinander getrennter Filamente in den Körper einzudringen. Außerhalb dieser regelmäßig angeordneten Flußlinien bleibt der Körper in der supraleitenden Phase. Bei Vergrößerung des äußeren Feldes wird der Abstand der Flußlinien immer kleiner, bis schließlich bei einem oberen Magnetfeld H_{c2} der Übergang in den Normalzustand erfolgt (Müh 64).

Die meisten Metalle sind paramagnetisch mit einem sehr kleinen positiven magnetischen Moment der Atome (Abb. 12b), das zunächst infolge der Wärmebewegung keine bevorzugte Richtung aufweist und erst durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet wird. Supraleiter zeigen dieses Verhalten gewöhnlich oberhalb des kritischen Feldes H_c . Bei Erreichen

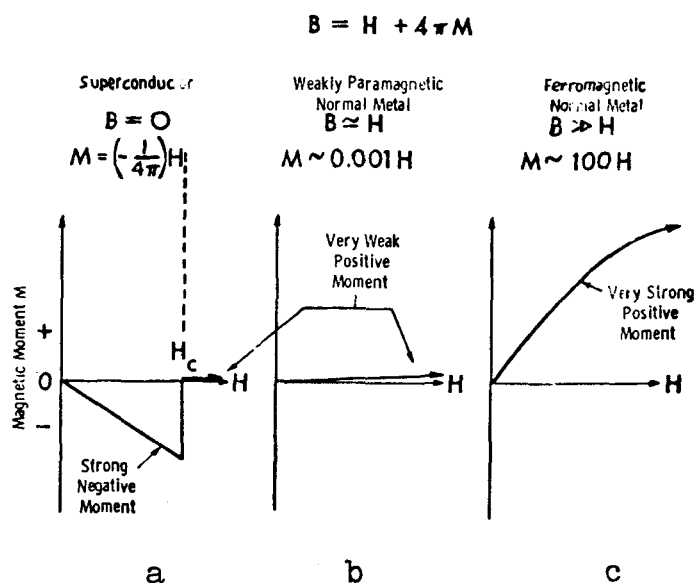


Abb. 12 : Magnetische Momente supraleitender, paramagnetischer und ferromagnetischer Stoffe (Van 63)

des kritischen Feldes erhalten sie ein starkes negatives Moment, wenn die Betriebstemperatur die Sprungtemperatur T_c unterschreitet (Abb. 12a). Ferromagnetische Werkstoffe wie Eisen, Kobalt, Nickel haben ein starkes positives Moment (Abb. 12c), das jedoch temperaturabhängig ist und am Curiepunkt verschwindet.

Infolge des starken negativen Moments der Atome eines Supraleiters wird das den Supraleitungsstrom begleitende Magnetfeld in eine oberflächenschicht verdrängt, die eine Dicke von etwa 10^{-5} bis 10^{-6} cm besitzt und in der auch die Stromleitung erfolgt (Van 63). Die Abb. 13 zeigt die Verbindungsstelle zwischen einem Normal- und einem Supraleiter. Im Normalleiter ist die über den Durchmesser des Leitungsdrahtes aufgetragene Stromdichte konstant, das tangential Magnetfeld hat in der Achse des Leiters den Wert Null und nimmt zur Oberfläche hin linear zu, erreicht dort das Maximum und nimmt dann umgekehrt proportional zu dem Abstand vom Leiter ab.

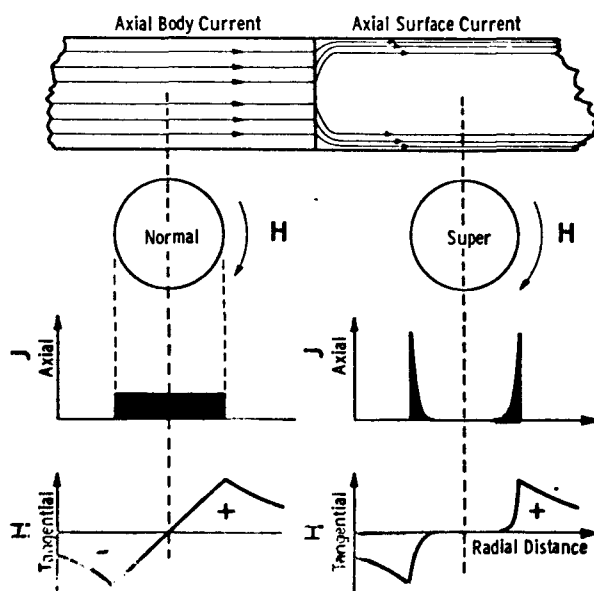


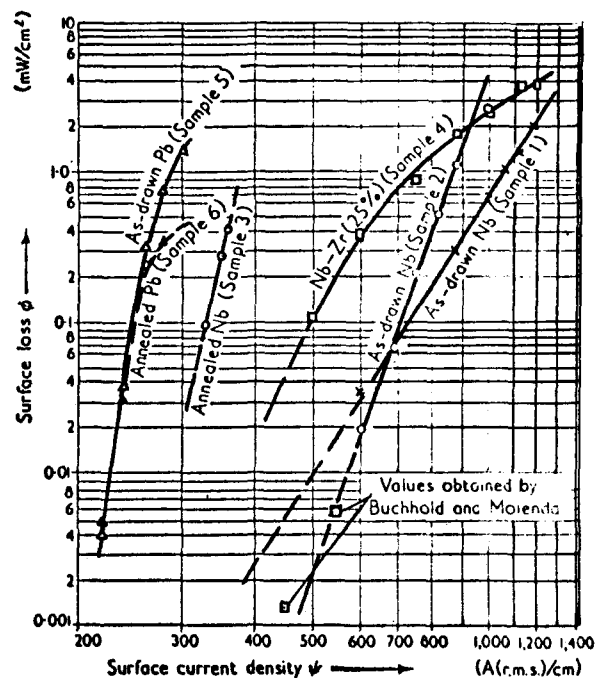
Abb. 13 : Stromdichte und Magnetfeld in einem Normal- und Supraleiter (Van 63)

In dem supraleitenden Teil des Leiters fließt in der Mitte kein Strom. Die Stromleitung beginnt erst an einer Grenzschicht, in der die Stromdichte nach außen hin sehr stark zunimmt und im Bereich der Oberfläche ihren maximalen Wert erreicht. Das tangential Magnetfeld beginnt ebenfalls erst an der Grenzschicht und steigt nach außen hin rasch an, erreicht an der Oberfläche den Maximalwert, um außerhalb des Leiters wie bei dem Normalleiter umgekehrt proportional zu dem Abstand vom Leiter abzunehmen.

Supraleitende Legierungen, die eine gewisse Eindringtiefe für das Magnetfeld zulassen, halten wesentlich höhere kritische Magnetfelder aus als weiche Supraleiter oder auch die supraleitenden Hauptkomponenten der Legierung. Hierauf wird im Abschnitt 3 noch eingegangen werden. Obgleich auch bei den harten Supraleitern keine ohm'sche Widerstände gemessen werden, treten bei der Wechselstromübertragung frequenzabhängige Hysterese-Verluste auf, deren Ursache noch nicht eindeutig geklärt ist (Che 64, Chi 64). Es besteht jedoch ein direkter Zusammenhang zwischen der Stromdichte in einem Supraleiter bzw. dem assoziierten Magnetfeld und den Wechselstromverlusten, der bei 50 Hz für Blei-, Niob- und Niob-Zinn-Supraleiter gemessen wurde (Abb. 14).

Abb. 14 :

50 Hz-Wechselstromverluste in Supraleitern. Oberflächenverluste als Funktion der Oberflächenstromdichte (Rho 64)



Nach Rhodes (Rho 64) treten die Wechselstromverluste bei allen untersuchten Proben unterhalb des kritischen Stromes auf und steigen bei Annäherung an I_c sehr stark an. Daraus wird geschlossen, daß ein fester Zusammenhang zwischen den Wechselstromverlustquellen und den Vorgängen beim Übergang von supraleitenden zum normalleitenden Zustand besteht. Wie das in Abb. 14 wiedergegebene Versuchsergebnis zeigt, ergeben aber auch unterschiedlich bearbeitete Proben unterschiedliche Verluste, so daß diese bei Wechselstromübertragung durch geeignete Herstellungsverfahren für die supraleitenden Drähte noch günstig beeinflußt werden können.

2.4 Supraleitung bei höheren Temperaturen

Die Sprungtemperatur ist bisher am häufigsten im Temperaturbereich von 2 bis 4°K aufgetreten (Wea 66) und die zur Zeit technisch bedeutsamen Supraleiter gehören der Gruppe mit hoher Sprungtemperatur an, wie in Abschnitt 3 gezeigt wird. Es ist einleuchtend, daß bereits eine relativ geringe Erhöhung der Sprungtemperatur um 5 bis 15 Grad unter gleichzeitiger Aufrechterhaltung oder Erhöhung der bisher bekannten hohen kritischen Magnetfelder von größter technischer Bedeutung wäre, da dann für die Kühlung der supraleitenden elektrischen Einrichtungen Wasserstoff-Kältekreisläufe verwendet werden könnten, die einen wesentlich geringeren Energieaufwand erfordern, also wirtschaftlicher sind. Bei Flüssighelium-Kühlung könnten wegen des höheren Sicherheitsabstandes zur Sprungtemperatur die vollen kritischen Ströme bzw. magnetischen Felder ausgenutzt werden. Die bestehenden Theorien lassen zwar eine Deutung der Supraleitung zu, ermöglichen jedoch keine Voraussage, welche Konfigurationen bzw. welche Verbindungen oder Elemente Sprungtemperaturen haben werden, die über 20°K, d.h. im Bereich der Flüssig-Wasserstoff-Temperatur oder gar im Bereich der Flüssig-Stickstoff-Temperatur um 80°K liegen. Nach neuesten Hypothesen amerikanischer For-

scher - die jedoch nicht unwidersprochen geblieben sind (Kup 66) - wird es für wahrscheinlich gehalten, daß es supraleitende Kunststoffe mit Sprungtemperaturen geben wird, die wesentlich höher, vielleicht sogar bei Raumtemperatur, also bei etwa 300°K, liegen (Lit 67, Lit 64).

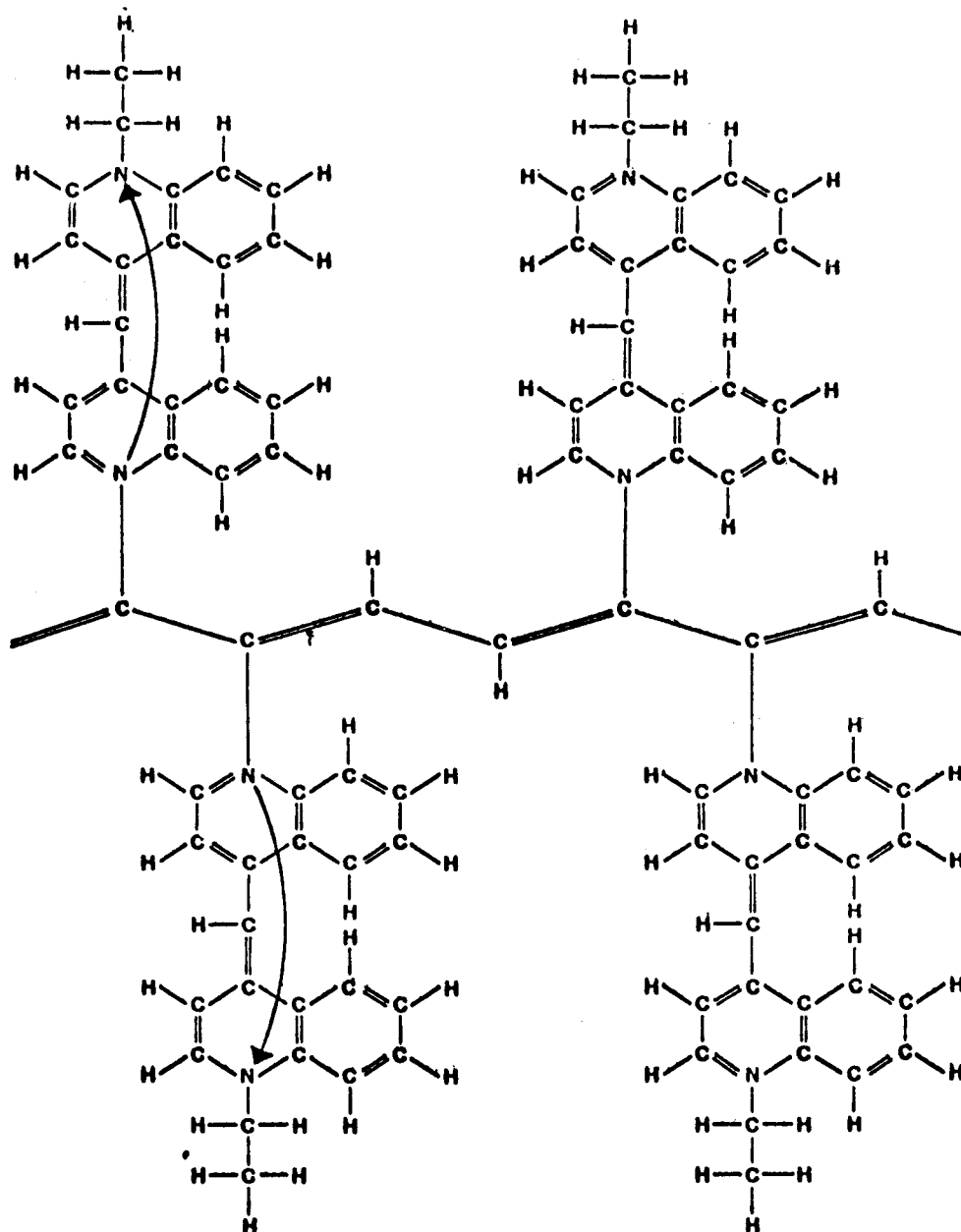


Abb. 15 : Struktur eines hypothetischen supraleitenden Materials (Lit 67)

3. PHYSIKALISCHE UND TECHNOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN SUPRALEITENDER MATERIALIEN

In dem vorausgegangenen Abschnitt 2 wurde das ideale und stets reversible Verhalten von Supraleitern beschrieben, das sich besonders bei weichen Metallen wie Zinn und Indium, die dabei Verunreinigungen von nur wenigen ppm aufweisen, zeigt. Es ist jedoch schwer, einen idealen Supraleiter überhaupt eindeutig zu definieren. Seine Hauptmerkmale sind aber immer der scharfe Widerstandsabfall am Sprungpunkt in einem Bereich von wenigen tausendstel Grad Kelvin und der Übergang in die normalleitende Phase bei einem bis auf wenige zehntel Gauß stets reproduzierbaren Magnetfeld (Van 63).

Die meisten Supraleiter, insbesondere Verbindungen und Legierungen, aber auch die Elemente Niob, Vanadium und Tantal, zeigen eine zum Teil erhebliche Abweichung ihres Verhaltens gegenüber einem idealen Supraleiter. Es ist vor allem schwierig, ein bestimmtes kritisches Magnetfeld H_c zu definieren, da die Magnetisierung einer supraleitenden Legierung einen anderen Verlauf zeigt als die supraleitende Haupt-Legierungskomponente im reinen Zustand (Abb. 16). Während bei

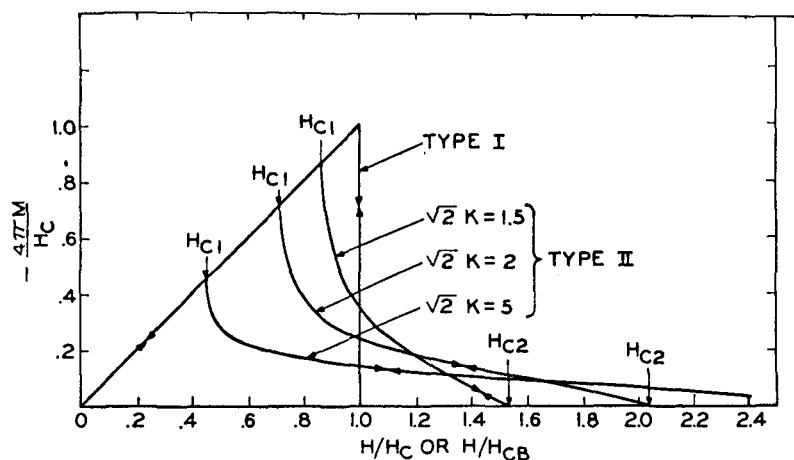


Abb. 16 : Magnetisierung weicher und harter Supraleiter
(Gau 64)

dieser das negative magnetische Moment der Atome bis zu einem bestimmten kritischen Wert H_c des Magnetfeldes zunimmt und dann der plötzliche Phasenübergang erfolgt, nimmt es in einer Verbindung oder Legierung nach Erreichen eines Maximalwertes bei einem äußeren Magnetfeld H_{c1} ab, bis es in stetigem Verlauf mit stärkerem äußeren Magnetfeld bei H_{c2} null wird und erst jetzt der Übergang in den normalleitenden Zustand erfolgt (Gau 64). H_{c1} wird das "Eindringfeld" genannt, bei dem das Magnetfeld in den Leiter einzudringen beginnt. Bis zu dem maximalen Magnetfeld H_{c2} , das höher liegt als H_c , liegt noch Supraleitung vor. Es ist jedoch abhängig von den Legierungsbestandteilen und kann sehr unterschiedliche Werte annehmen. Eindringfeld und maximales Magnetfeld einer Legierung sind ebenfalls wie das kritische Magnetfeld H_c von der Temperatur abhängig (Abb. 17).

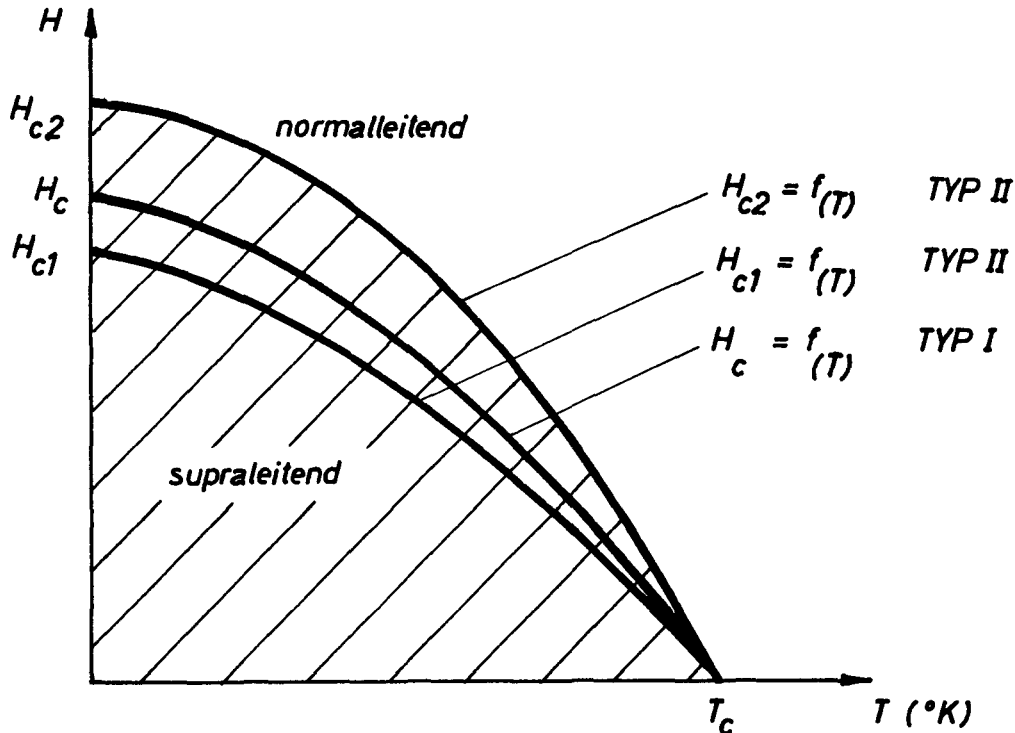


Abb. 17 : Temperaturabhängigkeit der Magnetfelder H_{c1} und H_{c2} bei einem Typ2-Supraleiter

Bisher wurden 26 supraleitende Elemente gefunden, deren Sprungtemperaturen zwischen $0,01^{\circ}\text{K}$ bei Wolfram und $9,5^{\circ}\text{K}$ bei Niob liegen. Die kritischen Magnetfelder liegen zwischen 10 Oerstedt und 2.000 Oerstedt^* . Einige weitere Elemente sind unter hohem Druck bzw. in dünnen Filmen supraleitend, die bei einer Temperatur unter 10°K hergestellt werden (Wea 66, Nul 68). Darüberhinaus kennt man bis heute über tausend Verbindungen und Legierungen, bei denen zum Teil Sprungtemperaturen von 17 bis 18°K , in wenigen Fällen sogar 0,2 oder 0,3 Grad über 18°K , beobachtet wurden. Vor kurzem wurde eine supraleitende intermetallische Verbindung $\text{Nb}_3\text{Al}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ bekannt, die eine Sprungtemperatur von $20,7^{\circ}\text{K}$ besitzt (Fon 68). Es ist der erste bekannte Werkstoff mit einer über 20°K liegenden Sprungtemperatur.

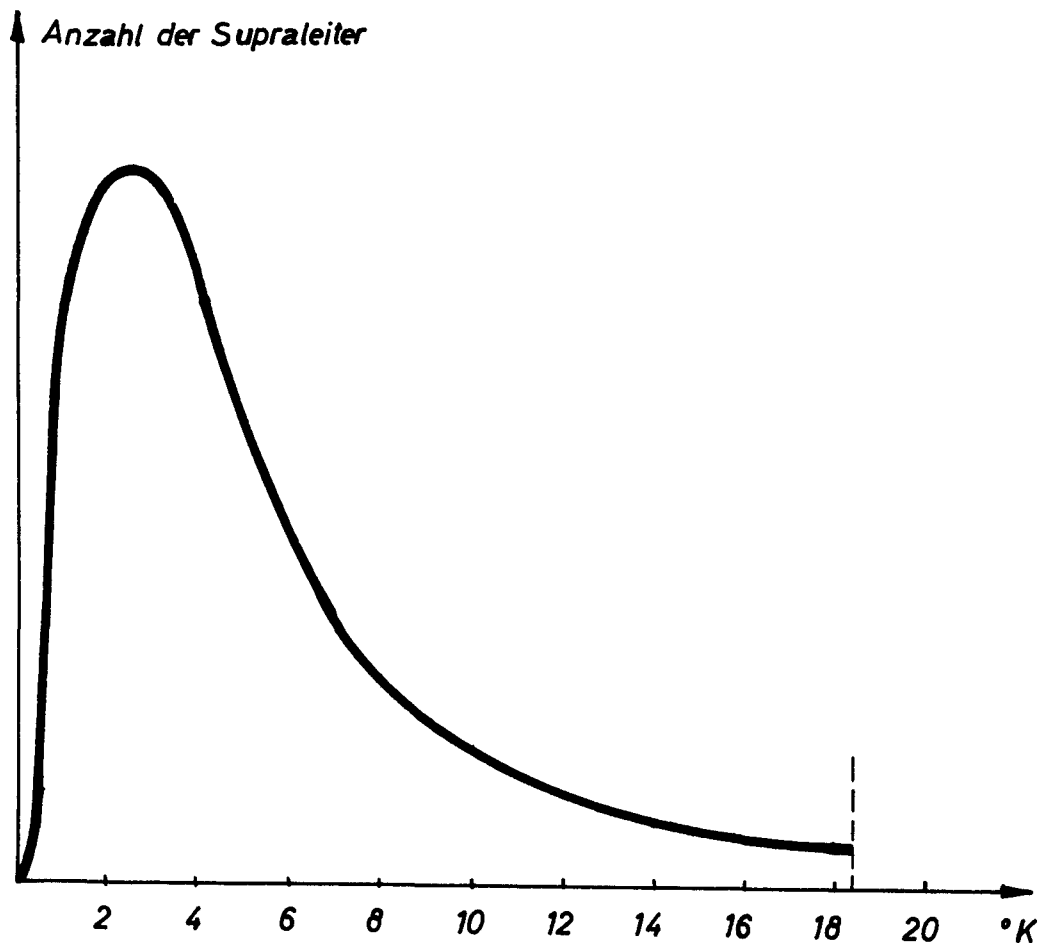


Abb. 18: Verteilung der Sprungtemperaturen der heute bekannten Supraleiter (Wea 66)

$$* 10^{-4} \frac{\text{Volt} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2} \hat{=} \text{Gau\ss} = \frac{\text{dyn}^{1/2}}{\text{cm}} = \text{Oerstedt} \hat{=} \frac{10^3}{4\pi} \frac{\text{Ampere}}{\text{m}}$$

Im Diagramm Abb. 18 ist die Anzahl der supraleitenden Materialien in den einzelnen Temperaturbereichen bis 20°K dargestellt. Tabelle 2 zeigt die Lage der supraleitenden Elemente in den Perioden und Gruppen des periodischen Systems der Elemente (Sco 60, Wea 66). Auffallend ist, daß die Supraleitfähigkeit der Elemente in den Perioden 5 und 6 besonders häufig ist.

Tabelle 2: Supraleiter im Periodischen System (Sco 60, Wea 66)

		Gruppe															
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Periode	1																
	2																
	3					Al											
	4	a						Ti		V							
		b		Zn		Ga											
	5	a						Zr		Nb		Mo		Tc		Ru	Rh
		b		Cd		In		Sn									
6	a				La		Hf		Ta				Re		Os	Ir	
	b		Hg		Tl		Pb		Bi								
7																	

Bei Legierungen ist, wie bereits erwähnt, die Supraleitung abhängig vom Phasendiagramm, d.h. die Sprungtemperatur ist u.a. eine Funktion der Zusammensetzung des Materials aus den einzelnen Legierungskomponenten. Bestimmte Kristallstrukturen, die durch sehr schmale Energiebänder gekennzeichnet sind, scheinen besonders günstige Supraleitungsbedingungen aufzuweisen. Eine dieser Gitterstrukturen ist die sogenannte

A-15 oder β -Wolfram-Struktur, die besonders häufig bei supraleitenden Materialien vorliegt (Wea 66, Mul 68).

Vorschläge für die technische Anwendung reiner supraleitender Elemente in elektrischen Einrichtungen sind sehr zahlreich gemacht worden. Chick nimmt jedoch an, daß die weichen Supraleiter wegen ihrer niedrigen Sprungtemperatur und des geringen kritischen Feldes für den Elektromaschinenbau bedeutungslos sind, vielleicht aber einmal für den Bau von Tieftemperaturkabeln Anwendung finden könnten, weil sie vermutlich keine Wechselstromverluste aufweisen (Chi 64).

Die Anzahl der für diesen Zweck verwendbaren Metalle wird vor allem eingeschränkt durch die Kühlmöglichkeit, die einen ständigen Sicherheitsabstand zur Übergangstemperatur gewährleisten muß, Werkstoffeigenschaften, die die Verarbeitbarkeit beeinflussen sowie den Materialpreis. In Tabelle 3 wurden unter diesen Gesichtspunkten einige

Tabelle 3: Sprungtemperatur T_c , kritisches Magnetfeld H_c und Preise (Ausgangsmaterial) einiger Supraleiter (Wes 66, Sch 57)

Element	T_c ($^{\circ}\text{K}$)	H_c (Oe)	ca. Preis (1955) DM je kg
Nb	9,13	1980	560,--
Pb	7,193	803	1,20
V	5,30	1020	250,--
Ta	4,483	830	286,--
Hg	4,153	412	27,--
Sn	3,722	309	7,60
In	3,404	293	500,--

Metalle zusammengestellt, die eine gewisse Chance für die Verwendung in supraleitenden Kabeln - vor allem für Experimentierzwecke - haben könnten. Der Preis ist nur vergleichs-

weise für technisch reine Qualitäten angegeben und kann je nach erforderlicher Reinheit für supraleitendes Material erheblich höher liegen.

Manche intermetallische Verbindungen und Metall-Legierungen halten wesentlich höhere Magnetfelder bei höheren Sprungtemperaturen aus als die weichen oder normalen harten Supraleiter. Sie sind ebenfalls Typ2-Supraleiter und werden wegen der hohen kritischen Feldstärken als "Hochfeld-Supraleiter" bezeichnet. Ihr Übergangspunkt H_{c2} liegt wesentlich höher als derjenige der supraleitenden Verbindungskomponente bzw. des supraleitenden Haupt-Legierungsbestandteiles, der mit dia- oder paramagnetischen Metallen legiert ist (Van 63). Unter den mehr als tausend bekannten supraleitenden Legierungen scheinen nur wenige bisher technische Bedeutung erlangt zu haben. Hierzu gehören vor allem Niob-Titan- und Niob-Zirkon-Legierungen sowie die Niob-Zinn-Verbindung Nb_3Sn . Tabelle 4 enthält diese zur Zeit für den Bau von Kryomagneten verwendeten supraleitenden Materialien und gibt die bisher erreichten Sprungtemperaturen und kritischen Magnetfelder wieder. Gauster erwähnt, daß in Laborversuchen mit Nb_3Sn Stromdichten von etwa 100 kA/cm^2 erreicht wurden und das Material noch supraleitend blieb, wenn es gleichzeitig einem äußeren Magnetfeld von etwa 100 kGs ausgesetzt wurde (Gau 64).

Tabelle 4: T_c und H_{c2} technisch verwendeter Hochfeld-Supraleiter (Bog 68)

Werkstoff	T_c (°K)	H_{c2} (kOe)
Nb-50 Ti	$\approx 9,5$	130
Nb-33 Zr	≈ 11	80
Nb_3Sn	18,4	> 230

Hauptprobleme der technischen Anwendung der supraleitenden Legierungen sind neben den gegenwärtig noch unzureichenden physikalischen Eigenschaften aber immer noch Herstellungsschwierigkeiten und Weiterverarbeitungsprobleme. NbZr soll beispielsweise sehr schwer zu verarbeiten sein, weshalb die technische Bedeutung dieser Legierung gegenüber Nb₃Sn, das beim Bau von supraleitenden Magneten, Motoren usw. bereits in großtechnischem Maßstab Anwendung findet, geringer wird. Nb-Zr-Ti-Legierungen und die Verbindung V₃Ga werden neuerdings in Japan verwendet (Bog 68).

Supraleitende Werkstoffe können außerdem in Form von dünnen Filmen zur Anwendung kommen, die beispielsweise aufgedampft eine Dicke in der Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-6} cm oder weniger aufweisen. Das Verhalten derartiger Schichten und die Abhängigkeit der supraleitenden Eigenschaften von den einzelnen Parametern wie Dichteunterschiede, Gleichmäßigkeit, Kristallstruktur usw. sind noch wenig erforscht (Van 63).

4. TECHNIK DER TIEFTEMPERATURKABEL

Mit den tiefgeköhlten Reinmetallen und den supraleitenden Metallen und Legierungen stehen elektrische Leiter zur Verfügung, die in der Lage sind, elektrische Leistung mit sehr geringen ohm'schen Verlusten bzw. praktisch verlustlos zu übertragen. Diese Vorteile müssen allerdings mit der Leistung erkaufte werden, die zur Aufrechterhaltung der tiefen Temperaturen von 4°K bis 20°K notwendig ist.

In Abb. 19 sind die Verluste einiger normalleitender Reinstmetalle als Funktion der Temperatur dargestellt. Der mit fallender Temperatur immer schlechter werdende Wirkungsgrad der Kälteanlagen wurde in der Darstellung bereits berücksichtigt. Die Kurven für Aluminium und Kupfer zeigen ein Minimum bei Wasserstoff-Siedetemperatur (20°K), die Kurve für Beryllium ein solches bei Stickstoff-Siedetemperatur (77°K). Da Verflüssigungsanlagen für Stickstoff wesentlich billiger sind als solche für Wasserstoff, wäre Beryllium im Hinblick auf die Kosten der Kälteanlagen am besten für normalleitende Tieftemperaturkabel geeignet. Leider schließt aber der hohe Preis von ca. 4.500,-- DM/kg für reines Beryllium (gegenüber ca. 33,-- DM/kg für Al) seine Verwendung als Leiterwerkstoff vollkommen aus (Den 68).

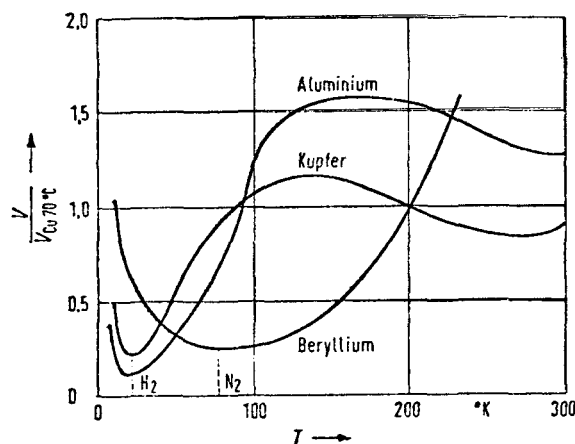


Abb. 19: Verluste tiefgeköhlter Leiter (Den 68)

Folgende Wärmequellen wirken bei Wechselstrom auf den Supraleiter ein und versuchen, seine Temperatur zu erhöhen:

1. Wärmeeinfall aus der Umgebung des Kabels
2. Dielektrische Verluste im Isoliermaterial
3. Wechselstromverluste im Leiter
4. Verluste aufgrund von mechanischen Wechselkräften.

Bei Gleichstrom wirkt praktisch nur die erste Wärmequelle, während die anderen bei genügend kleiner Welligkeit des Stromes vernachlässigbar sind. Diese Verluste müssen durch ein Kühlmedium abgeführt werden. Dabei entstehen in dem strömenden Kühlmedium Reibungsverluste, die zusätzlich abgeführt werden müssen. Bislang wurde noch kein bereits erprobtes Versuchskabel beschrieben, sondern nur Konstruktionsvorschläge gemacht, und selbst diesen haften - wie einige Autoren erwähnen - noch viele spekulative Züge an, da die grundlegenden Daten über das elektromagnetische Verhalten der Werkstoffe in dem in Frage kommenden Temperaturbereich nur lückenhaft sind. Auf den folgenden Seiten kann also nicht eine "Technik" im eigentlichen Sinne beschrieben werden. Es werden vielmehr die bis heute in der Literatur aufgetauchten Vorschläge in groben Zügen beschrieben und die wichtigsten Daten in einer Tabelle verglichen. In einem abschließenden Kapitel werden noch einige Betriebsprobleme aufgezeigt.

Der entscheidende Einfluß der elektrischen Verluste auf die Wirtschaftlichkeit eines Kabels liegt darin, daß sie bei etwa 4°K entstehen und bei Raumtemperatur abgeführt werden müssen. Die erforderlichen Helium-Rückkühlanlagen haben einen großen Leistungsbedarf (s. Abschnitt 6) und stellen einen relativ großen Anteil der Investitionskosten dar (s. Abschnitt 7). Wärmeeinfall und Reibungsverluste müssen sowohl bei Gleichstrom- wie auch bei Drehstromübertragung durch gute Wärmeisolierung und zweckmäßige Ausbildung

der Kühlmittelkanäle klein gehalten werden. Darüberhinaus muß man bei der Drehstromübertragung durch Verwendung geeigneter Isolierstoffe und durch günstige Leiteranordnung und Leiterquerschnitte die elektrischen und mechanischen Verluste zu verringern suchen.

4.1 Drehstromübertragung mit Einleiterkabeln

Wilkinson (Wil 66) untersucht in einer ausführlichen Studie die wirtschaftlichen Aussichten einer Drehstromübertragung mit einzeln verlegten tiefgekühlten und supraleitenden Kabeln. Das betrachtete System besteht aus zwei Drehstromleitungen zu je drei Einleiterkabeln, die derselben Trasse folgen und von gemeinsamen Tieftemperaturanlagen gekühlt werden. Das Fließschema für ein Kühlmittel ist in Abb. 20 dargestellt. Jede der beiden Leitungen überträgt bei einer Spannung von 275 KV eine Leistung von 760 MVA. Alle Angaben über Verluste und Kosten

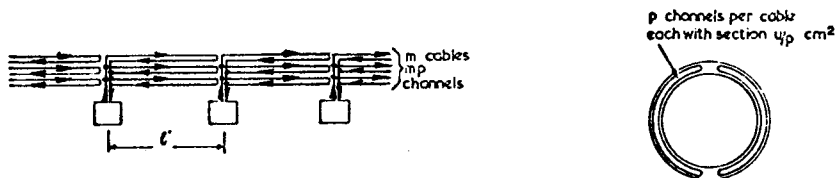


Abb. 20: Fließschema eines Kühlmittels (Wil 66)

sind in der Originalarbeit auf 1 km Leitungslänge und ein einzelnes Kabel bezogen. Aus Gründen des besseren Vergleichs mit anderen Vorschlägen werden diese Werte auf sechs Kabel, d.h. eine übertragene Leistung von 1520 MVA umgerechnet.

Wilkinson vergleicht folgende Kabelausführungen miteinander:

1. supraleitendes (Nb, 4°K) Kabel, Kühlung durch
He, H_2 , N_2
2. supraleitendes (Nb, 4°K) Kabel, Kühlung durch
He, N_2
3. tiefgeköhltes (Al, 20°K) Kabel, Kühlung durch
 H_2 , N_2
4. tiefgeköhltes (Be, 77°K) Kabel, Kühlung durch
 N_2

Die folgenden Bilder zeigen die Querschnitte der Kabel.

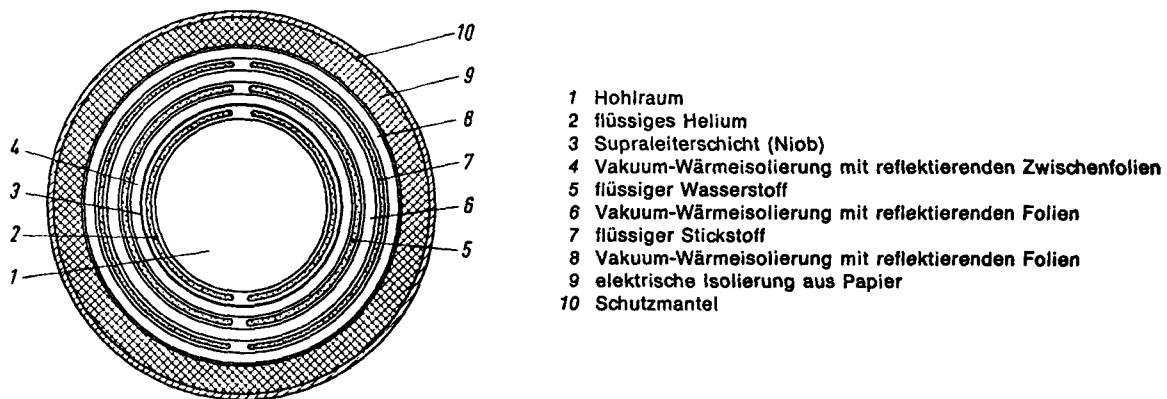


Abb. 21 : Supraleitendes Kabel nach Wilkinson, Niob,
mit He, H_2 , N_2 -Kühlung (Kaf 68)

Der Aufbau des Kabels 2 unterscheidet sich von dem im Bild 21 gezeigten lediglich durch den fehlenden H_2 -Kühlschild.

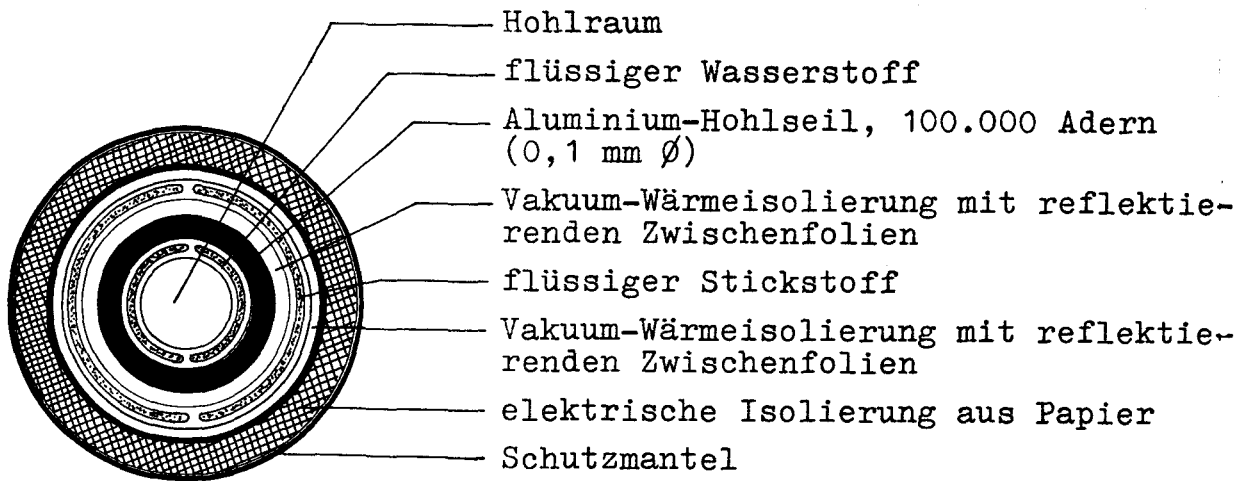


Abb. 22 : Tiefgekühltes Aluminiumkabel nach Wilkinson

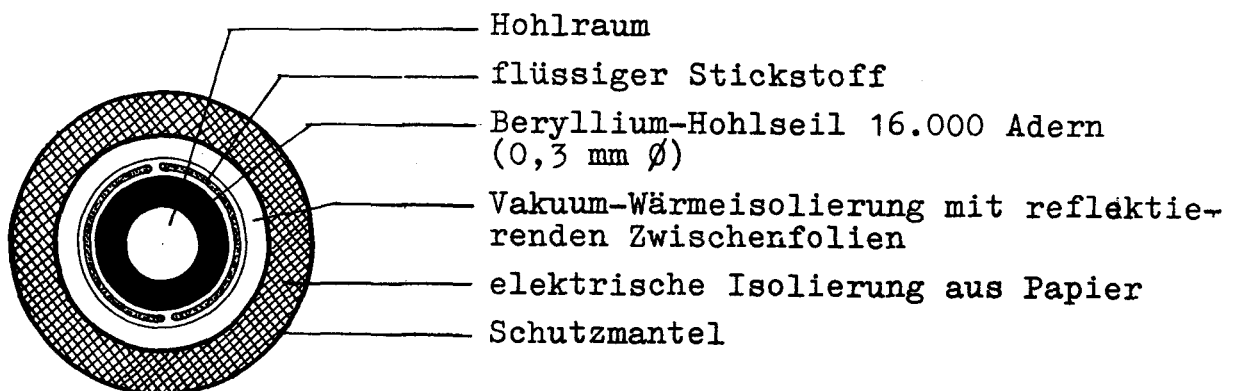


Abb. 23 : Tiefgekühltes Berylliumkabel nach Wilkinson

Die supraleitenden Kabel sind so bemessen, daß sie einen länger andauernden Fehlerstrom von 40 kA (etwa 13-facher Nennstrom) aushalten, ohne in den Normalzustand überzugehen. Die Leiterquerschnitte der beiden tiefgekühlten Kabel berechnet Wilkinson nach einer Optimierungsformel aufgrund der Abhängigkeit der ohm'schen und Wirbelstrom-

verluste vom Durchmesser. Ebenso wird eine Optimierungsformel für den Abstand der Rückkühlstationen angegeben, die wiederum zu minimalen Anlagekosten führt. Beim supraleitenden Kabel werden nur Wärme- und Reibungsverluste erfaßt. Die dielektrischen Verluste entfallen bei der Wärmebilanz, da die elektrische Isolierung außerhalb der Wärmeisolierung liegt (Kaf 68). Die Wechselstromverluste sind vernachlässigbar klein ($< 1 \text{ mW/km}$).

In Tabelle 5 sind die wichtigsten thermischen und elektrischen Werte der vier Kabelausführungen zusammengefaßt.

Tabelle 5 : Thermische und elektrische Daten der Kabel nach Wilkinson

Leitermaterial	Kühlmittel	Abstand der Kühlstationen	Ohm'sche Verluste	Wechselstromverluste	Reibungsverluste	Wärmeeinfall	Gesamtverluste (lastunabhängig)	Gesamtverluste (lastabhängig)	Leistungsbedarf der Rückkühlanlagen (lastunabhängig)	Leistungsbedarf der Rückkühlanlagen (lastabhängig)	(außen) Leiterdurchmesser
		km	W/km	W/km	W/km	W/km	W/km	W/km	kW/km	kW/km	cm
Nb	He	69,7	-	$\sim 10^{-2}$	0,04	0,14	0,18	$\sim 10^{-2}$	0,05	$\sim 10^{-3}$	10,4
	H ₂	4,0	-	-	8,76	35,2	44	-	1,72	-	
	N ₂	0,54	-	-	840,0	8940	9780	-	72,0	-	
Nb	He	2,34	-	$\sim 10^{-2}$	7,86	31,4	39,3	$\sim 10^{-2}$	11,8	$\sim 10^{-3}$	10,4
	N ₂	0,52	-	-	690,0	8140	8830	-	65,4	-	
Al	H ₂	0,40	282	726	252,0	18,2	270	1008	10,8	39,2	6,0
	N ₂	0,59	-	-	462,0	5040	5500	-	40,7	-	
Be	N ₂	0,66	2760	960	822,0	4760	5580	3720	41,2	27,6	6,0

4.2 Drehstromübertragung mit coaxialen Leitern

1961 schlug Mac Fee ein supraleitendes Kabel vor, das in einer gemeinsamen Wärmeisolierung mehrere koaxiale Zylinder aus supraleitendem Blei enthielt, die durch Zwischenisolierungen aus Papier voneinander getrennt waren (Fee 61). Der Aufbau dieses Kabels geht aus Abb. 24 hervor.

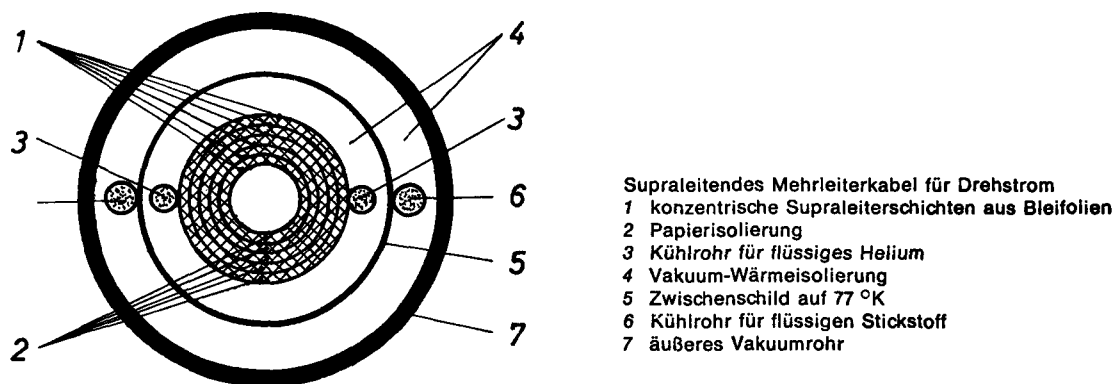


Abb. 24. : Supraleitendes Drehstromkabel nach Mac Fee (Kaf 68)

Diese Konstruktion hat sehr große dielektrische Verluste, die ohne allzu großes Wärmegefälle kaum abzuführen sind (Kaf 68).

1967 wurden zwei Entwürfe (Swi 67, Rog. 67) veröffentlicht, die im Auftrag des CEGB von der British Insulated Callenders Cables Ltd angefertigt worden sind. Den Querschnitt der beiden Kabel zeigen die Bilder 25 und 26. Beide Kabel sind für eine Leistung von 750 MVA (33 kV, 13 kA) ausgelegt und nach dem gleichen Konzept aufgebaut. Die Leiter des Drehstromsystems bestehen aus Niobfolien mit Aluminiumverstärkung an den Außenflächen dreier konzentrischer heliumgekühlter Ringrohre, die sich in einer gemeinsamen Wärmeisolierung befinden. Unterschiedlich in beiden Ausführungen ist im wesentlichen nur die Ausbildung des Stickstoff-Kühlschildes.

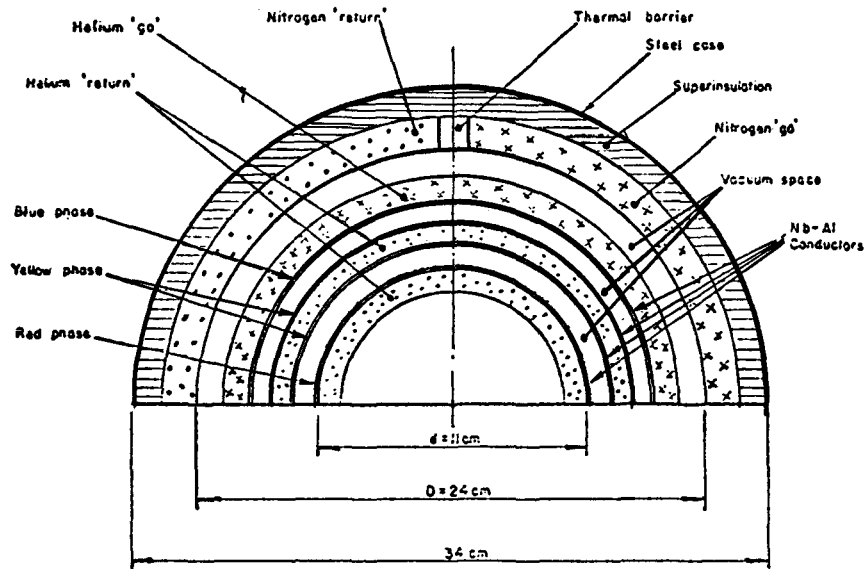


Abb. 25 : Drehstromkabel nach Swift (Swi 67)

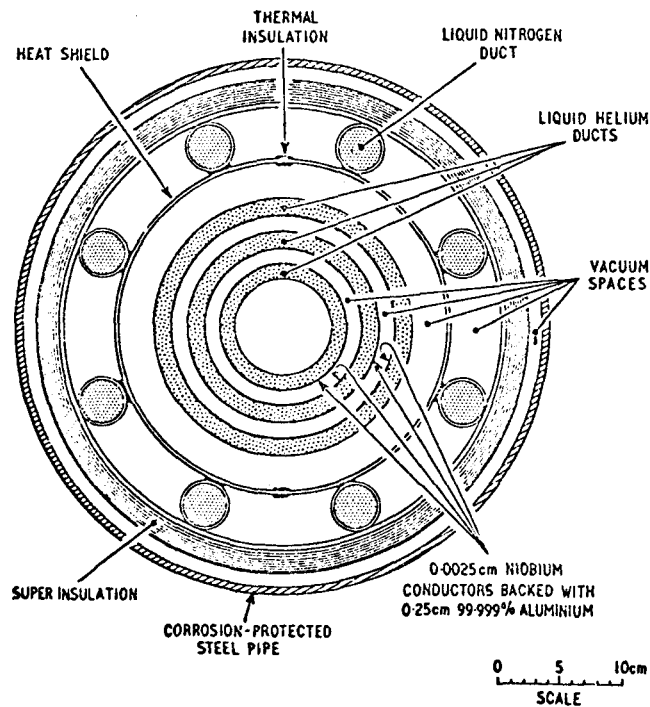


Abb. 26 : Drehstromkabel nach Rogers und Edwards (Rog 67)

Die dielektrischen Verluste sind gering, da Vakuum als elektrische Isolation benutzt wird. Die Vakuumpaltweiten ergeben sich aus der geforderten Stoßspannungsfestigkeit von 190 kV. Die drei Phasen B, Y, R (Blue, Yellow, Red) sind auf vier Leiter gemäß Abb. 27 aufgeteilt. Die Leiter R/Y_2 und Y_1/B bilden je ein koaxiales Leiterpaar, d.h. elektrische und magnetische Felder treten nur im Raum

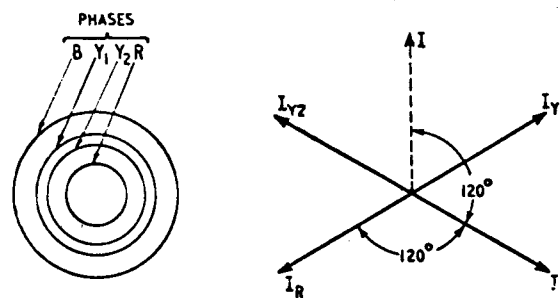


Abb. 27 : Phasenaufteilung (Rog 67)

zwischen Innen- und Außenleiter auf. Diese Anordnung sichert eine gleichmäßige Stromverteilung über den Umfang und verhindert das Auftreten von mechanischen Kräften zwischen den Leitern. Swift gibt für sein Kabel die in Tabelle 6 wieder-

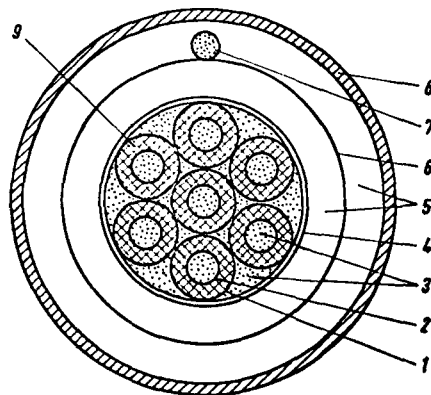
Tabelle 6 : Verluste des Kabels nach Swift

Coolant	Source	Quantity
Nitrogen	Thermal inleak	2,500 watts/km
	Pipe friction + pressurization	500 watts/km
Helium	Thermal inleak	60 watts/km
	a, c, loss	35 watts/km
	Dielectric loss	5 watts/km
	Pipe friction + pressurization	20 watts/km
	Heat pulse — 3 ϕ symmetrical fault 7 X FLC for 1 second	2×10^6 joules

gegebenen Verluste an. Rogers und Edwards geben den Wärmeeinfall der Heliumleitung mit $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \hat{=} \text{ca. } 65 \text{ W/km}$ und die bei He-Temperatur abzuführende Wärme mit $\text{ca. } 100 \text{ W/km}$ an. Angaben über den Leistungsbedarf der Rückkühlanlagen werden nicht gemacht. Einige Verbesserungsmöglichkeiten, die z. Zt. untersucht werden, erwähnen Rogers und Edwards:

1. Vereinfachung des Kabelaufbaues durch Verwendung von flüssigem Helium als Kühlmittel und als Dielektrikum
2. Kühlung durch verdichtetes überkritisches Heliumgas im Temperaturbereich von 5 bis 7°K
3. Zwischenschildkühlung mit gasförmigem Helium von $\text{ca. } 40^\circ\text{K}$. Nach vorläufigen Untersuchungen ist dies die optimale Schildtemperatur
4. Optimierung des Abstandes der Rückkühlanlagen (s. auch Wil 66)

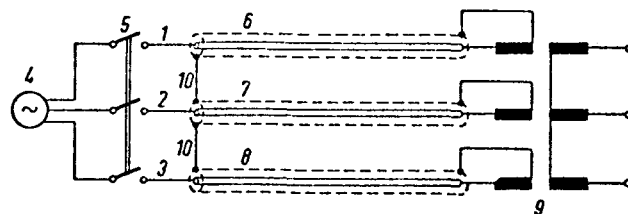
Die Vorteile, die sich durch die Aufteilung der Phasen auf koaxiale Leiter ergeben, werden ebenfalls in einem Entwurf von Kafka (Kaf 68) ausgenutzt, Kabelquerschnitt siehe Abb. 28.



- 1 Außenleiter
- 2 Innenleiter
- 3 flüssiges Helium
- 4 Heliumrohr
- 5 Vakuum-Wärmeisolierung mit reflektierenden Zwischenfolien
- 6 Zwischenschild auf 77°K
- 7 Kühlrohr für flüssigen Stickstoff
- 8 äußeres Vakuumrohr
- 9 elektrische Isolierung

Abb. 28 : Drehstromkabel nach Kafka (Kaf 68)

Die Phasenleiter bestehen hier aus drei oder $n \cdot 3$ parallelen koaxialen Leiterpaaren. Die Innenleiter dienen als Zuleitung, die Außenleiter als Rückleitung für den Strom. Die Verkettung der Phasen erfolgt am Leitungsanfang. Die Schaltung ist in Abb. 29 wiedergegeben. Durch die Stromrückführung werden die Leitungslänge, und damit auch die Verluste verdoppelt. Die Leitungsverluste hält Kafka zwar für ver-



- Drehstromleitung aus koaxialen Leiterpaaren
1, 2, 3 Innenleiter der 3 Phasen
4 Drehstromgenerator
5 Drehtstromschalter
6, 7, 8 Außenleiter der 3 Phasen
9 Transformator auf der Lastseite
10 Verkettung der 3 Phasen

Abb. 29 : Phasenverkettung

nachlässigbar klein, was aber nur der Fall bei sehr kleinen Stromdichten und relativ dicken supraleitenden Schichten ist. Durch die doppelte Leitungslänge und die erforderlichen Querschnitte dürften die Kosten für das supraleitende Material sehr hoch werden. Ein anderer Nachteil dieser Ausführung sind die hohen dielektrischen Verluste, die in der Isolierung zwischen den Innen- und Außenleitern entstehen. Leider macht der Autor über die Größe der Verluste keine Angaben.

4.3 Drehstromübertragung mit gebündelten Leitern

Im Rahmen des in Abschnitt 4.2 erwähnten Forschungsprogramms des CEGB wurde als Alternative zu dem Kabel mit koaxialen Leitern (s. Abb. 25) auch ein solches mit gebündelten Leitern untersucht (Nor 67). Abb. 30 zeigt die Anordnung der Leiter im Kabel. Die außerhalb der Helium-

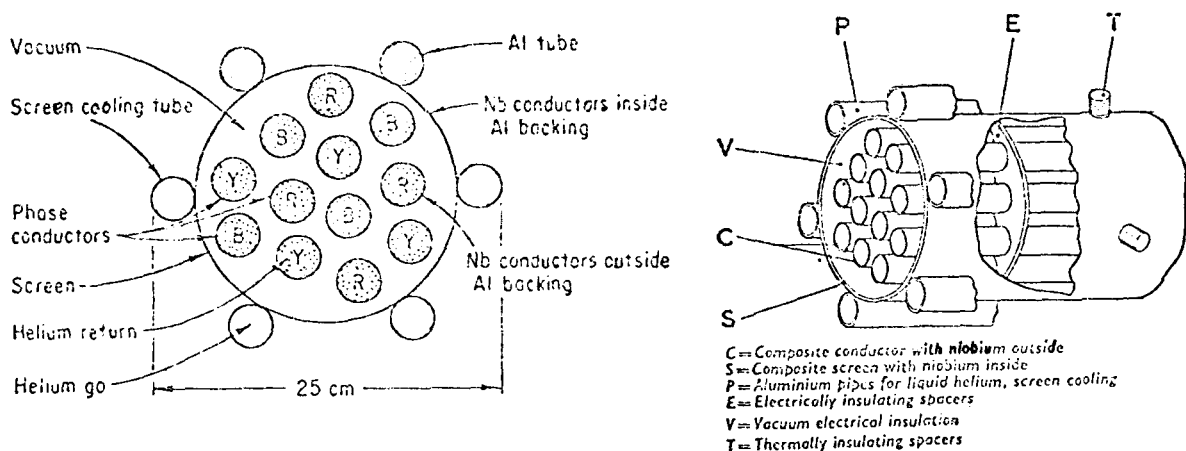


Abb. 30 : Leiteranordnung im Kabel nach Noris und Swift (Nor 67)

zuflußrohre liegende Wärmeisolierung, die aus Superisolierung und Vakuum evtl. in Verbindung mit einem N_2 -Zwischenkühlschild besteht, ist nicht gezeigt. Die Leiterrohre bestehen aus Aluminium oder Kupfer. Diese Rohre müssen so bemessen sein, daß sie die im Kurzschlußfall auftretenden mechanischen Kräfte aushalten können. Auf den Rohren befindet sich eine ca. 1 mm dicke Schicht aus Reinstaluminium oder -kupfer, die die Stromleitung übernimmt, wenn der Supraleiter in den Normalzustand übergeht. Schließlich liegt auf dieser Stabilisierungsschicht eine dünne Niobschicht als Supraleiter. Als elektrische Isolierung zwischen den Phasenleitern wird Vakuum verwendet. Der gegenseitige Abstand der Leiter wird durch Distanzscheiben aus Glas oder keramischem Material sichergestellt. Angaben über Verluste werden von den Autoren für dieses Kabel nicht gemacht.

Alle bisher beschriebenen Konstruktionsvorschläge sehen Niob als supraleitendes Material vor. In einer 1965 veröffentlichten Arbeit untersucht P.A. Klaudy ausführlich die Verwendung von supraleitenden Legierungen für Drehstromkabel (Kla 65).

Im Gegensatz zu weichen Supraleitern, deren Wechselstromverluste theoretisch Null sind - die praktisch auftretenden Verluste sind darauf zurückzuführen, daß die dünne stromführende Oberflächenschicht fast immer durch Rauigkeiten, mechanische Beanspruchung, Veruneinrigungen und ähnliche Faktoren gestört ist - sind harte Supraleiter wegen des eindringenden Magnetfeldes von Natur aus mit hystereseeähnlichen Wechselstromverlusten behaftet (Car 64). Diese Verluste sind in etwa proportional der dritten Potenz der Feldstärke H . Die größte Feldstärke tritt an der Leiteroberfläche auf und hat bei einem Leiter mit rundem Querschnitt den Wert $0,5 \cdot j \cdot R$ (j =Stromdichte, A/cm^2 ; R =Radius, cm). Die Verwendung hoher Stromdichten bedingt also kleine Leiterdurchmesser, wenn die Wechselstromverluste eine bestimmte Höhe nicht überschreiten sollen. Klaudy kommt zu der in Abb. 31 dargestellten Konstruktion, bei der die

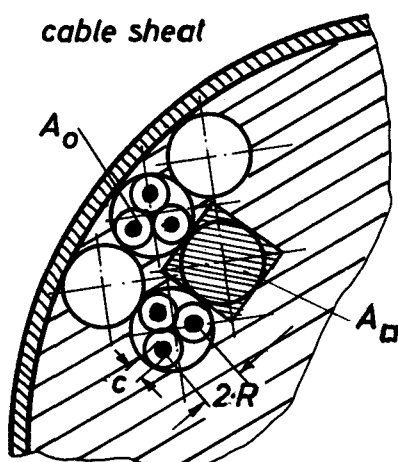


Abb.31:

Leiteranordnung in einem Drehstromkabel nach Klaudy (Kla 65)

- c = Durchmesser des Drahtes
- $2R$ = Abstand der Drähte
- A_0 = Querschnitt eines Drahtes
- $A_{\square}$ = für ein Dreiphasensystem erforderliche Fläche

Leitung in eine Vielzahl von Dreileitersystemen aus isolierten dünnen Drähten aufgelöst ist, die in ein von Helium durchströmtes Mantelrohr eingezogen sind. Im Gegensatz zu coaxialen Leiteranordnungen lassen sich die elektrischen und magnetischen Felder nicht vollkommen kompensieren. Klaudy hält die erreichbare Kompensation zwar für ausreichend, macht

aber keine Angaben über die entstehenden dielektrischen Verluste. Ein Längs- und Querschnitt eines Drehstromkabels mit mehreren Dreileitersystemen ist in Abb. 32 wiedergegeben. Die Hauptvorteile dieser Konstruktion liegen vor allem darin, daß das ganze Kabel

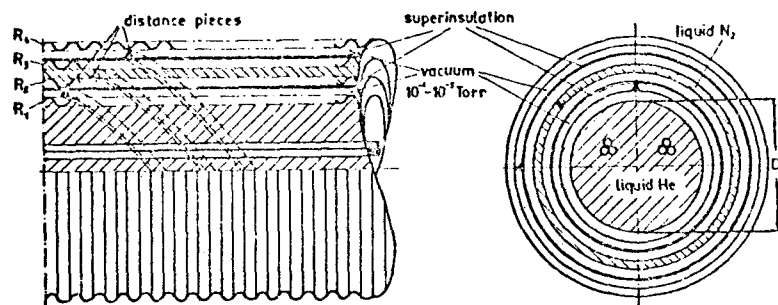


Abb. 32 : Drehstromkabel nach Klaudy (Kla 65/1)

wegen des geringen Durchmessers der Einzelleiter flexibel gemacht werden kann. Die Flexibilität wird durch Verwendung gewellter Rohre erreicht, wodurch sich folgende Vorteile ergeben:

1. Die Abstandhalter können aus langen schraubenartig gewundenen Bändern bestehen. Trotzdem berühren sie die Rohre nur an einzelnen Punkten.
2. Die Kabel können in großen Längen (~ 1500 m) hergestellt, transportiert und verlegt werden. Dadurch wird die Anzahl der Verbindungsstellen um einen Faktor 70 bis 80 verringert.
3. Die Wellrohre können der Längenänderung beim Abkühlen der Leitung ohne weiteres folgen. Dadurch ist eines der schwierigsten technischen Probleme gelöst.

In einer 1968 veröffentlichten Arbeit vertritt Klaudy die Ansicht, daß die Verwendung harter Supraleiter für Wechselstromkabel unzuweckmäßig ist (Kla 68). In dieser Veröffentlichung werden auch genauere Angaben zu den Verlusten und Kosten eines Kabels für 370 MVA gemacht. Die Konstruktion des Kabels ist die gleiche wie die in Abb. 32 dargestellte. Die technischen Daten dieses Kabels sind in Tab. 7 unter "Kla 2" aufgeführt, die Kosten in Tab. 15 unter "Kla".

Bei General Electric wird im Rahmen eines größeren Forschungsvorhabens, das auch andere, nicht-konventionelle Übertragungsmöglichkeiten untersucht, ein Kabel mit tiefgekühlten Aluminiumleitern für eine Übertragungsleistung von 3.000 MVA bei 500 KV und 3,5 KA entwickelt (Nea 68). Der Autor weist ausdrücklich darauf hin, daß das Ziel dieser Entwicklung nicht ein "theoretisch mögliches" Kabel ist, sondern ein Kabel, das sich mit heutigen technischen Mitteln möglichst einfach bauen, verlegen und betreiben läßt.

Abb. 33 zeigt einen Querschnitt durch dieses Kabel

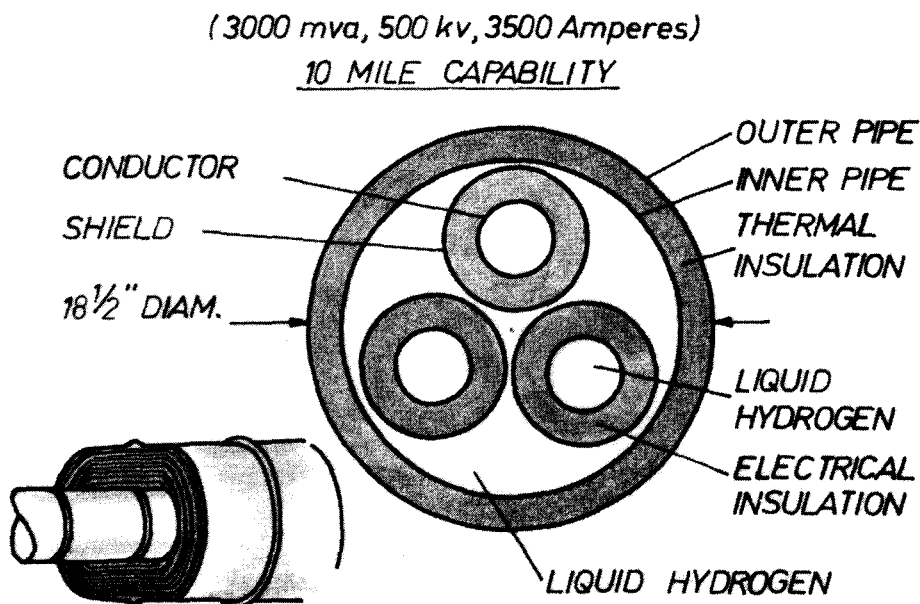


Abb. 33 : Drehstromkabel nach Neal (Nea 68)

Die Kühlung erfolgt ausschließlich durch Wasserstoff. Man glaubt, daß diese Kabelauslegung z. Zt. das beste Verhältnis zwischen Aufwand und Gewinn verspricht. Allerdings beschränkt sich die Anwendung dieses Kabels, das wegen seines einfachen Aufbaus sehr hohe Wärmeverluste hat, auf kurze Verbindungsstücke (10 bis 20 km) in einem Netz von Freileitungen.

4.4 Gleichstromübertragung

Die erheblichen Vorteile der Gleichstromübertragung gegenüber der Drehstromübertragung beruhen auf dem Wegfall aller

frequenzbedingten Verluste. Die einzigen Verlustquellen - genügend kleine Welligkeit des Stromes vorausgesetzt - sind der Wärmeeinfall aus der Umgebung und die Strömungsverluste des Kühlmittels. Diese wiederum lassen sich gegenüber dem Drehstromkabel reduzieren, da man erheblich höhere Stromdichten ($> 1000 \text{ A/mm}^2$ bei harten Supraleitern) und damit kleinere Leiterquerschnitte zulassen kann.

Nachteilig bei der Gleichstromübertragung - auch bei der konventionellen - ist, daß sie in ein Verteilsystem eingebaut werden muß, in welchem die Erzeugung und der Verbrauch der elektrischen Energie im wesentlichen mit Drehstrommaschinen erfolgt. Dadurch werden sowohl am Kabelanfang und -ende als auch an jeder Anzapfung Stromrichter erforderlich (auf die durch Verwendung supraleitender Gleichstromgeneratoren möglichen Einsparungen wird in Abschnitt 7 eingegangen). Die Gleichstromübertragung ist deshalb, wie in Abschnitt 7 gezeigt wird, nur für große Leistungen und Entfernungen interessant.

Die Leiteranordnung eines supraleitenden Gleichstromkabels für eine Leistung von 750 MW bei einer Spannung von $\pm 50 \text{ kV}$ zeigt Abb. 34. Dieser Konstruktionsvorschlag wurde ebenfalls im Rahmen des Forschungsprogramms des CEGB erarbeitet (Nor 67). Als Supraleiter wird reines Niob verwendet. Die beiden supraleitenden Schichten sind durch Reinstaluminium verstärkt. Der Durchmesser des Kabels wird nicht von der kritischen Stromdichte j_c (angegeben mit 375 A/cm Umfang) bestimmt, sondern von den erforderlichen Querschnitten der Heliumleitungen. Diese wiederum werden so bemessen, daß die Summe der Verluste aufgrund des Wärmeeinfalls und der Flüssigkeitsreibung des strömenden Heliums ein Minimum wird. Die Verwendung eines Typ I-Supraleiters, die allerdings nur bei dieser geringen Leistung möglich ist, hat den Vorteil, daß auch bei schlecht geglättetem Gleichstrom nur sehr geringe Wechselstromverluste entstehen. Andererseits könnte man mit einem Kabel gleicher Abmessungen (Innenleiter $3 \text{ cm } \varnothing$, Außenleiter $7 \text{ cm } \varnothing$)

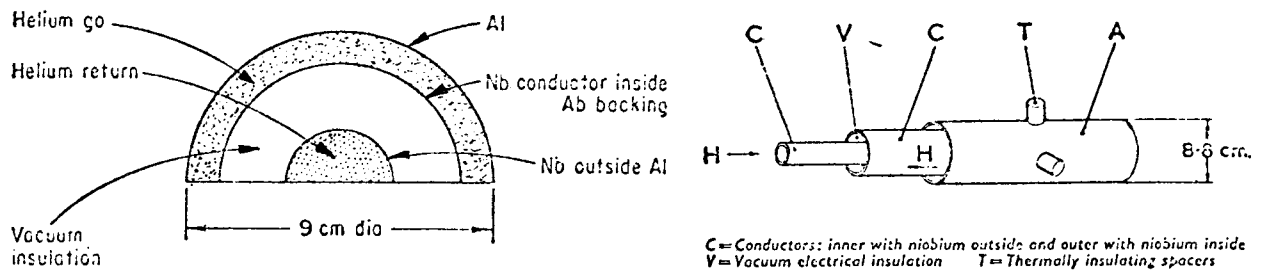


Abb. 34 : Supraleitendes Gleichstromkabel nach Noris und Swift (Nor 67)

bei Verwendung eines Typ II-Supraleiters (z.B. hartes Niob oder Nb_3Sn) und einer zulässigen Randfeldstärke von 4 kGauß (Gau 64) eine Stromstärke von $I = 5 \times 1,5 \times 4 \times 10^3 = 30.000 \text{ A}$ zulassen. Bei gleicher Spannung könnte eine Leistung von 3.000 MW übertragen, oder bei gleicher Leistung die Übertragungsspannung auf $\pm 12,5 \text{ kV}$ gesenkt werden.

Neben dem auf Seite 45 erwähnten Drehstromkabel wurde bei General Electric ein Gleichstromkabel für 3.000 MW bei $\pm 500 \text{ kV}$ und 3,0 kA untersucht (Nea 68). Die Konzeption des Kabels geht von den gleichen Überlegungen aus, wie sie schon für das Drehstromkabel angedeutet wurden. Wegen der geringen Verluste läßt sich das Kabel nach Auffassung des Autors bis zu Längen von ca. 50 km wirtschaftlich einsetzen. Abb.35 zeigt einen Querschnitt durch das Kabel.

(3000 mva, $\pm$ 500 kv, 3000 Amperes)
30 MILE CAPABILITY

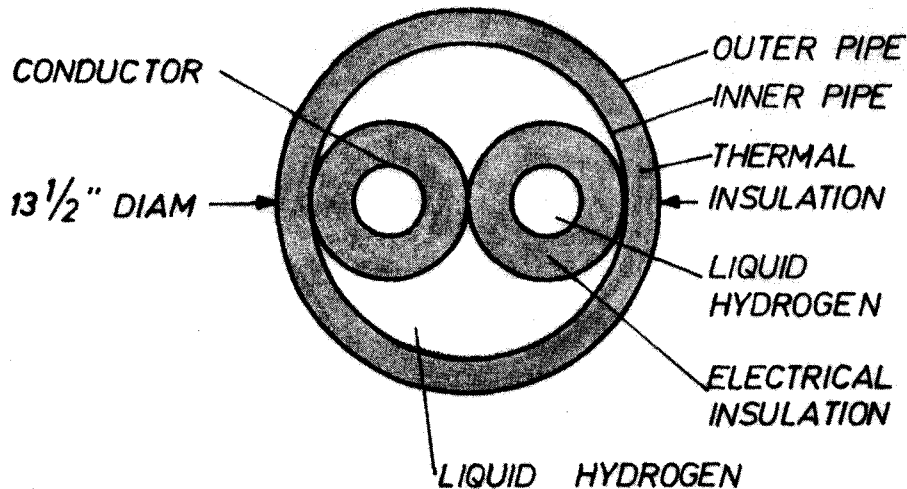


Abb. 35 : Gleichstromkabel nach Neal (Nea 68)

Gauster, Freemann und Long veröffentlichten 1964 einen Vorschlag für ein supraleitendes Gleichstromkabel mit einer Leistung von 10.000 MW bei einer Spannung von $\pm$ 75 kV, einem Strom von 67 kA und einer Übertragungslänge von 1.600 km (Gau 64). Die Leistung besteht aus zwei Einzelleitern in jeweils einer eigenen Wärmeisolierung. Abb. 36 zeigt einen Querschnitt durch einen der beiden Leiter. Diese Anordnung ermöglicht es, im Notfall mit

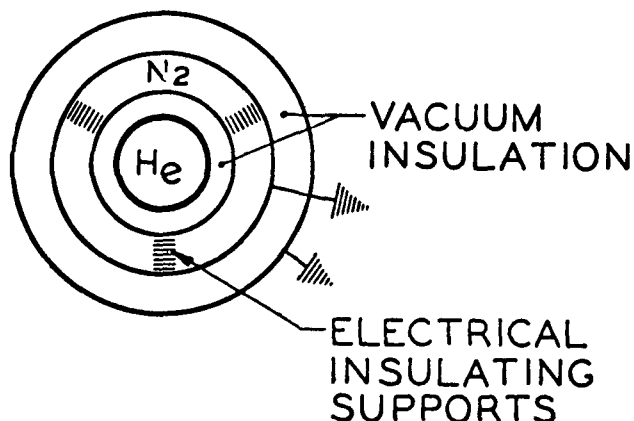


Abb. 36 : Gleichstromkabel nach Gauster, Freemann und Long (Gau 64)

einem Leiter bei 75 kV gegen die geerdeten Außenrohre noch 5.000 MW zu übertragen.

Die dabei in den Außenrohren entstehenden ohm'schen Verluste müssen bei 77°K abgeführt werden. Die elektrische Isolierung übernimmt der im Kühlschild fließende Stickstoff. Um Blasenbildung zu vermeiden, steht er unter einem Druck von 15 ata. Als Leitermaterial wird Niob verwendet. Bei Annahme einer Stromdichte von 1.000 A/mm^2 und einer zulässigen Randfeldstärke von 4 kGauß (H_{krit} bei 1.000 A/mm^2 für Niob ist 10 kGauß) ergibt sich ein Leiterdurchmesser von 67 mm und eine Leiterdicke von 0,318 mm.

Der Kreislauf des Kühlmittels geht aus Abb. 35 hervor. Gesättigtes, flüssiges Helium aus einem Reservoir wird von 1 ata auf 7,0 ata verdichtet, in einem Wärmetauscher wieder auf $4,2^{\circ}\text{K}$ gekühlt und über 153 km durch das Innenrohr eines Leiters gedrückt. Vor dem Drosselventil ist der Druck 2 ata und die Temperatur 5°K . Im Ventil

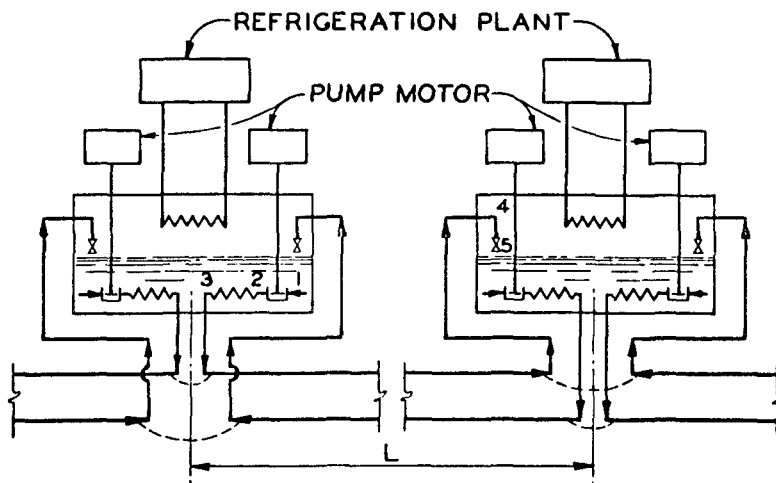


Abb. 37 : Helimkreislauf (Gau 64)

expandiert das Helium wieder bis auf den Sättigungszustand. Durch den zweiten Leiter strömt das Helium ebenso in Gegenrichtung.

Ein von Garwin und Matisoo (Gar 67) vorgeschlagenes supraleitendes Gleichstromkabel soll eine Leistung von 100.000 MW bei ± 100 kV und 500 kA über eine Entfernung von 1.000 km übertragen.

Bild 38 zeigt den Querschnitt des Kabels. Als Supraleiter wird Nb_3Sn verwendet. Bei einer Stromdichte von 1.000 A/mm^2 beträgt der Leiterquerschnitt 5 cm^2 . Die Kabel selbst können aus einem einzigen Draht von ca. $2,5 \text{ cm } \varnothing$ oder aus mehreren verseilten Einzeldrähten bestehen.

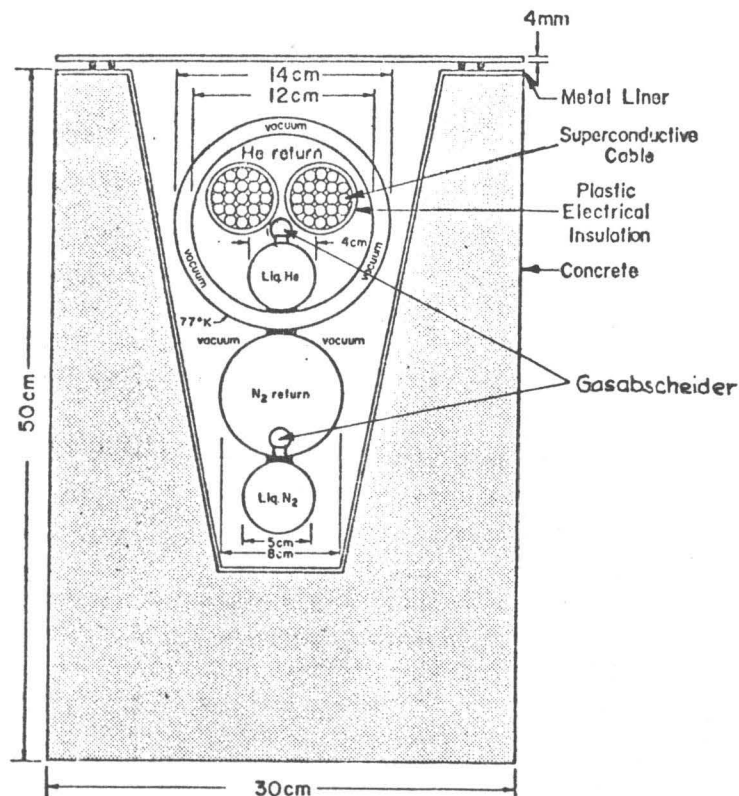


Abb. 38 : Gleichstromkabel nach Garwin und Matisoo (Gar 67)

Eine Aufteilung des Leiters auf mehrere Drähte wirkt sich günstig auf die elektrischen Verluste infolge der Rest-

welligkeit des Stromes und beim Einschalten aus. Wenn die beim Einschalten entstehende Wärme gleich der von außen eindringenden sein soll, so ist die Einschaltdauer bei einem Leiter mit ca. 2,5 cm $\varnothing$ etwa zwei Tage, bei 200 Einzeldrähten mit 0,15 mm $\varnothing$ etwa eine Stunde. Um die Abkühlzeit von Raumtemperatur auf 4°K auf ungefähr fünf Tage zu verkürzen, wird die für den stationären Betrieb erforderliche Leistungsaufnahme der Kühlanlagen von 60 MW auf etwa 200 MW erhöht.

Im Gegensatz zu allen anderen Vorschlägen erfolgt die Kühlung durch flüssige und gasförmige Kühlmittel unter Ausnutzung der Verdampfungswärme. Die Schwierigkeiten, die sich durch den Transport eines Zwei-Phasen-Gemisches über große Entfernungen ergeben, werden dadurch gelöst, daß das in der Hinleitung verdampfende Kühlmittel durch Gasabscheider, die in Abständen von 50 m angeordnet sind, in die jeweilige Rückleitung übertreten kann. In Abständen von 500 m sind Hilfspumpen in der Heliumhinleitung vorgesehen, um den zur Überwindung der Flüssigkeitsreibung erforderlichen Druckabfall klein (ca. 0,1 ata) zu halten. Abb. 39 zeigt schematisch den Aufbau der Leitung zwischen zwei Rückkühlstationen.

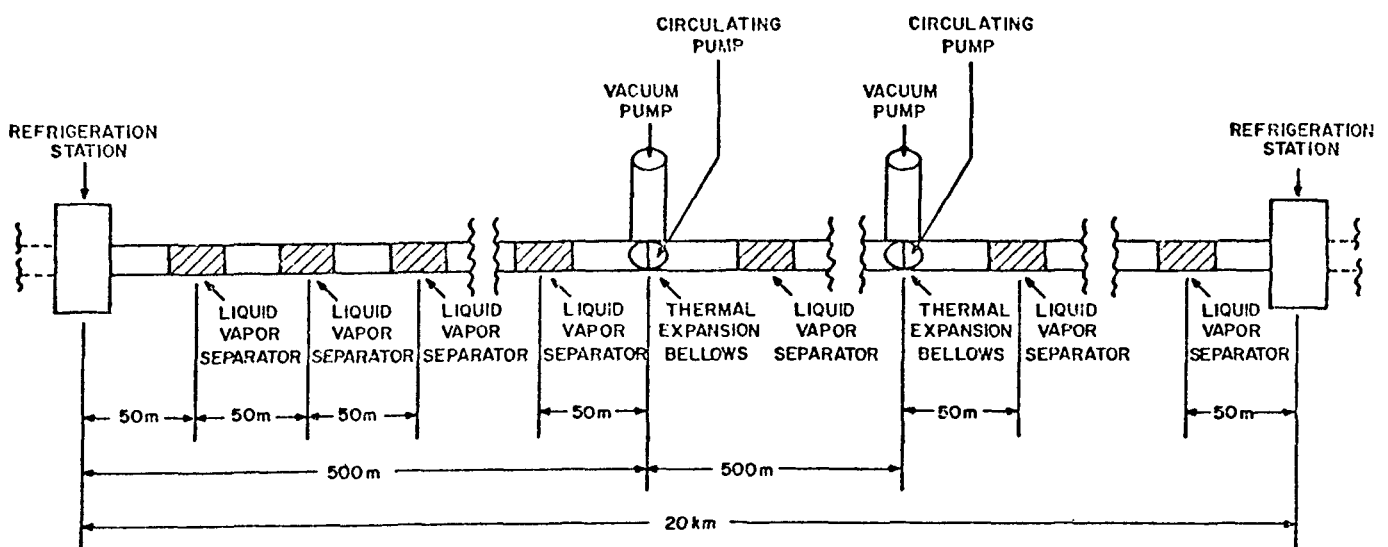


Abb. 39 : 20 km-Abschnitt des Gleichstromkabels nach Garwin und Matisoo (Gar 67)

4.5 Vergleich der Konstruktionsvorschläge

In Tabelle 7 sind die wichtigsten elektrischen und thermischen Daten der verschiedenen Konstruktionsvorschläge - soweit sie aus den Veröffentlichungen hervorgehen - zusammengefaßt. Das Kabel **Nor 1** hat keine eigene Abbildung in Abschnitt 4.3 da es konstruktiv mit dem Kabel von Swift (Abb. 25) übereinstimmt. Noris kommt in seiner Veröffentlichung (Nor 67) aber zu etwas anderen Angaben über Verlustleistungen und Kosten.

Vergleich der Konstruktionsvorschläge (Seite 54 u. 55)

Erklärungen zu Tabelle 7

N	=	Übertragene Leistung (bei Drehstrom in GVA)
U	=	Spannung
I	=	Stromstärke
L	=	Leitungslänge
l	=	Abstand der Rückkühlstationen
D	=	Außendurchmesser des Kabels
n_k	=	Anzahl der getrennt verlegten Kabel
n_L	=	Anzahl der Leiter in einem Kabel
J	=	Größte Stromdichte
p_o	=	Ohm'sche Verluste
p_s	=	Wechselstromverluste
p_d	=	Dielektrische Verluste
p_a	=	Leistungsabhängige Verluste ($p_o + p_s + p_d$)
p_{He}	=	Leistungsunabhängige Verluste (Wärmeeinfall und Reibung)
p_{H2}	=	
p_{N2}	=	
f_{He}	=	Leistungsfaktor der Kälteanlagen
f_{H2}	=	
f_{N2}	=	
P_{He}	=	Leistungsbedarf der Kälteanlagen
P_{H2}	=	
P_{N2}	=	
P_{500}	=	Gesamtverlustleistung bei 500 km Kabellänge
P_{100}	=	Gesamtverlustleistung bei 100 km Kabellänge
η_{500}	=	Wirkungsgrad bei 500 km Kabellänge
η_{100}	=	Wirkungsgrad bei 100 km Kabellänge

Vor- schlag		Abb.Nr.	N	U	I	L	l	D	Leiter- werk- stoff	n _L	j	P ₀	P _s	P _d	P _a
			GW	KV	KA	km	km	cm			A/mm ²	W/km	W/km	W/km	W/km
DREHSTROM	KLA 1	32	0,25	6	24	500	?	24	NbZr 1	8500	100	0	?	?	20
	KLA 2	32	0,37	20	10,7	200	5	25	Pb 1	243	3	0	30	?	30
	SWI	25	0,75	33	13	?	8	34	Nb 1	4	37,5	0	35	5	40
	NOR 1	-	0,75	33	13	?	3-25	30	Nb 1	4	37,5	0	35	-	?
	ROG	26	0,75	33	13	?	10	42	Nb 1	4	37,5	0	?	?	?
	NOR 2	30	0,75	33	13	?	3-25	~ 33	Nb 1	n · 3	37,5	0	?	?	?
	WIL 1	21	1,52	275	1,6	?	69,7	~ 17	Nb 6	1	4,9	0	< 0,01	0	< 0,01
	WIL 2	-	1,52	275	1,6	?	2,3	~ 16	Nb 6	1	4,9	0	< 0,01	0	< 0,01
	WIL 3	22	1,52	275	1,6	?	0,4	~ 11	Al 6	10 ⁵	2	282	726	0	1008
	WIL 4	23	1,52	275	1,6	?	0,7	~ 10	Be 6	16000	1,4	2760	960	0	3720
NEA 1	33	3	500	3,5	16	?	47	A/Cu 1	3 · 2	11,5	— 22400 —		2500	24900	
GLEICH- STROM	NOR 3	34	0,75	± 50	7,5	?	3-25	~ 20	Nb 1	2	330	0	0	0	0
	NEA 2	35	3	± 500	3,0	48	?	34	Al/Cu 1	2	?	?	0	0	?
	GAU	36	10	± 75	67	1600	153	~ 15	Nb 2	1	1000	0	0	0	0
	GAR	38	100	± 100	5000	1000	20	14	Nb ₃ Sn1	2-800	1000	0	0	0	0

Tab. 7

	Vor- schlag	P _{He}	P _{H2}	P _{N2}	f _{He}	f _{H2}	f _{N2}	P _{He}	P _{H2}	P _{N2}	P ₅₀₀	P ₁₀₀	η ₅₀₀	η ₁₀₀
		W/km	W/km	W/km	W/W	W/W	W/W	KW/km	KW/km	KW/km	MW	MW	%	%
DREHSTROM	KLA 1	?	-	?	500	-	-	?	-	-	15	3,0	94	98,8
	KLA 2	200	-	3030	500	-	?	120	-	28	74	14,8	80	96
	SWI	80	-	2000	300	-	7	36	-	22,2	29	5,8	96,1	99,2
	NOR 1	160	-	4460	300	-	7	48	-	31,3	39	7,9	94,8	98,9
	ROG	100	-	?	?	-	?	?	-	?	?	?	?	?
	NOR 2	280	-	4460	300	-	7	84	-	31,3	57	11,5	92,4	98,5
	WIL 1	0,2	44	9780	300	39	7,4	0,06	1,7	72,0	37	7,4	97,6	99,5
	WIL 2	34,3	-	8830	300	-	7,4	11,8	-	65,4	39	7,7	97,4	99,5
	WIL 3	-	270	5520	-	39	7,4	-	50,2	40,7	45	9,1	97	99,4
	WIL 4	-	-	5520	-	-	7,4	-	-	68,4	34	6,8	97,8	99,6
	NEA 1	-	2500	-	-	50	-	-	1370	-	685	137	78,2	95,4
GLEICH- STROM	NOR 3	128	-	2460	300	-	7	38,4	-	17,2	28	5,6	96,3	99,3
	NEA 2	-	4550	-	-	50	-	-	228	-	114	22,8	96,2	99,2
	GAU	63,4	-	?	1000	-	?	63,4	-	2,6	33	6,6	99,7	99,9
	GAR	?	-	?	?	-	?	15	-	60	37,5	7,5	> 99,9	> 99,9

Tab. 7 (Fortsetzung)

4.6 Betriebsprobleme

Konventionelle Freileitungen und Kabel sind praktisch wartungsfrei. Selbst bei Öldruckkabeln und bei den eventuell in Zukunft verwendeten Kabeln mit Gas- oder Wasserkühlung ist der maschinelle Aufwand zur Sicherung des Öl- bzw. Kühlmitteldurchflusses verhältnismäßig gering. Supraleitende oder tiefgekühlte Kabel dagegen erfordern in Abständen von einigen km umfangreiche Rückkühlanlagen für Helium, Stickstoff und ggf. weitere Kühlmedien. Die Wahrscheinlichkeit einer Betriebsstörung steigt natürlich mit zunehmender Zahl der Aggregate. Verschiedene Autoren sehen deshalb von vornherein eine teilweise erhebliche Reserve bei den Kühlanlagen vor, Rogers und Edwards z.B. verdoppeln die für den Normalbetrieb erforderliche Leistung der Helium- und Stickstoffkühlanlagen (Rog 67).

Schwierige technologische Probleme ergeben sich aus der thermischen Kontraktion des Kabelmaterials beim Abkühlen von Raumtemperatur auf ca. 4°K bzw. 77°K . Für Metalle liegen die Längenänderungen bei etwa 0,3 %, für Kunststoffe bei etwa 2 % (Gar 67). Je nach Konstruktion des Kabels sind verschiedene Lösungsmöglichkeiten denkbar:

- . Verwendung gewellter Rohre (z. B. Klaudy)
- . Einbau von Dehnungsbälgen
- . Einbau teleskopartiger Elemente
- . Verstärkung der supraleitenden Schicht durch Legierungen mit niedrigen Ausdehnungskoeffizienten

Alle Kabel, außer dem von Klaudy vorgeschlagenen sind nicht flexibel, können also nur in Längen von 10 m bis 30 m hergestellt, transportiert und verlegt werden. Die Anzahl der Verbindungsstellen wird also sehr hoch, z.B. sind bei 500 km Leitungslänge etwa 15.000 bis 20.000 Verbindungen erforderlich. Dabei müssen einerseits mehrere konzentrische Rohre vakuumdicht verschweißt werden, andererseits müssen die supraleitenden Schichten oder Drähte elektrisch leitend verbunden

werden. Sowohl die Herstellung normalleitender wie auch supraleitender Verbindungen auf der Baustelle bietet erhebliche Schwierigkeiten (Swi 67).

Kabel mit tiefgeköhlten Normalleitern besitzen ebenso wie konventionelle Freileitungen und Kabel eine thermische Kurzschlußfestigkeit, d.h. sie können für eine bestimmte Zeitdauer hohe Kurzschlußströme ertragen, ohne ihre elektrischen Eigenschaften wesentlich zu ändern und kehren nach Aufhören des Kurzschlußstromes in den Ausgangszustand zurück. Supraleiter dagegen werden auch bei kurzzeitiger Überschreitung des kritischen Stromes normalleitend. Da sie in diesem Zustand schlechtere Leiter sind, entstehen höhere Stromwärmeverluste, die auch nach Aufhören des Kurzschlußstromes eine Rückkehr in den supraleitenden Zustand verhindern und zur endgültigen Zerstörung des Leiters führen, wenn keine ausreichenden Kühlmittelreserven vorhanden sind, durch die über die Verdampfungswärme eine kurzzeitige Notkühlung möglich ist. Eine Möglichkeit zur Stabilisierung besteht darin, die Supraleiter für den Kurzschlußstrom zu dimensionieren (Wil 66). Das führt aber zu unwirtschaftlichen Kabelabmessungen. Bei anderen Konstruktionen (Rog, Swi) wird der Supraleiter mit tiefgeköhltem Reinstaluminium kombiniert. Geht der Supraleiter aufgrund eines Kurzschlusses oder anderer Ursachen (z. B. Wanderwellen oder Erwärmung) in den Normalzustand über, fließt der Strom durch den Aluminiumleiter. Die Rückkühlanlagen müssen in der Lage sein, die im Aluminium entstehenden Stromwärmeverluste abzuführen und die Temperatur des Supraleiters etwa auf 4 bis 5°K zu halten oder wieder auf diesen Wert zu bringen. Beim Bau von Kryomagneten verwendet man aus Stabilitätsgründen bereits mit Erfolg sogenannte Multicore-Leiter, bei denen dünne supraleitende Adern in einen Kupferdraht eingebettet sind, der bei Überschreiten der Sprungtemperatur die Stromleitung im Normalleitungszustand übernimmt. Allerdings bleibt auch hier im Normalbetrieb der Nennstrom aus Sicherheitsgründen wesentlich niedriger als der kritische Strom des Supraleiters.

Schließlich kann man auf eine Stabilisierung überhaupt verzichten, wenn es gelingt, durch elektronische Schaltmaßnahmen das Entstehen von Überströmen mit Sicherheit zu verhindern (Kla 68).

5. TECHNIK DER TRANSFORMATOREN UND GENERATOREN

Die Entwicklungsarbeiten auf diesem Anwendungsgebiet der Supraleitfähigkeit sind heute schon recht weit fortgeschritten. Zahlreiche Experimentiergeräte wurden gebaut und getestet. P. Burnier (Bur 66) beschreibt einen 1966 gebauten Kryotransformator mit Wasserstoffkühlung und Aluminiumwicklungen, der bei einer Primärspannung von 1760 V und einer Sekundärspannung von 680 V eine Nennleistung von 235 kVA hat. Bei der Dynatech Corp., USA, wurde 1967 ein supraleitender Drehstromgenerator mit einer Leistung von 50 kVA gebaut (Obe 67).

Anstoß für die Entwicklung supraleitender Transformatoren und Generatoren war in erster Linie die durch Supraleiter mögliche Gewichts- und Volumenreduzierung. Beim Bau supraleitender Magnetspulen hatte man eine Verkleinerung des Volumens um den Faktor 100 erreicht (Chi 64). Besonders bei Transformatoren ist eine Gewichts- und Volumenverkleinerung von entscheidender Wichtigkeit, denn die Leistungsgrenze eines Transformators ist von seiner Wanderfähigkeit abhängig. Diese durch das Bahnprofil gegebene Grenze zwingt bereits heute dazu, Einphasentransformatoren zu Drehstrombänken zusammenzuschalten. Solche Drehstrombänke sind in der Anschaffung etwa 25 % bis 30 % teurer als dreiphasige Transformatoren gleicher Nennleistung (Bel 67). Bei 700 kV Freileitungen wird man mehrere Drehstrombänke zu einem Transformatorsatz zusammenschalten müssen, wenn man die Leitung mit ihrer natürlichen Leistung von etwa 2 GW belasten will und der einzelne Einphasentransformator wanderfähig bleiben soll (Kah 66).

Bei den Generatoren steht zur Zeit noch die Anwendung als Energiequelle für supraleitende Magnete im Vordergrund (Vol 66). Verschiedene Autoren weisen auf die Anwendungsmöglichkeit supraleitender Gleichstromgeneratoren als ideale Energiequelle für supraleitende Leistungsübertragungs-

systeme hin (Ath 64, Vol 66). Supraleitende Gleichstrommotoren könnten in Verbindung mit konventionellen Drehstromgeneratoren als rotierende Umformer am Ende eines solchen Kabels dienen.

In den folgenden Abschnitten soll kurz das Prinzip der supraleitenden und tiefgekühlten Transformatoren und Generatoren skizziert werden.

5.1 Transformatoren

Da sich die in einem supraleitenden Stromkreis fließenden Ströme nicht abschwächen, besteht die Möglichkeit, supraleitende Gleichstromtransformatoren zu bauen. Die sekundärseitige Belastung muß ein supraleitender Stromkreis, etwa eine Spule sein. Ströme, die in der Sekundärwicklung durch Ansteigen des Primärstromes induziert werden, behalten solange wie der Primärstrom konstant bleibt, ihren Anfangswert. Je nach Windungszahlen der Primär- und Sekundärspulen lassen sich mit kleinen Primärströmen sehr hohe Sekundärströme erzeugen.

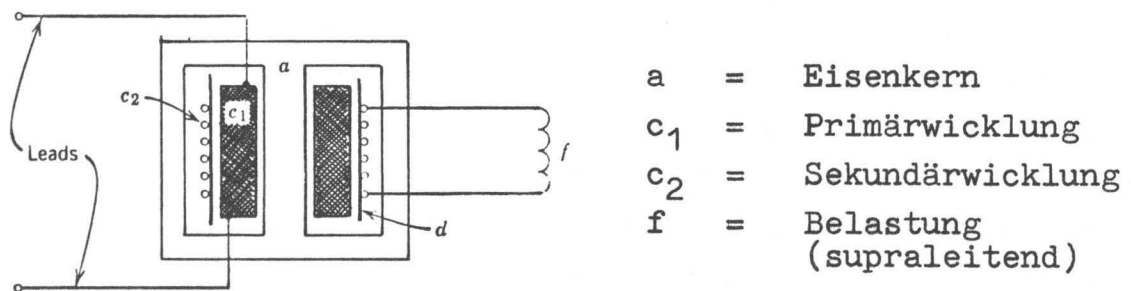
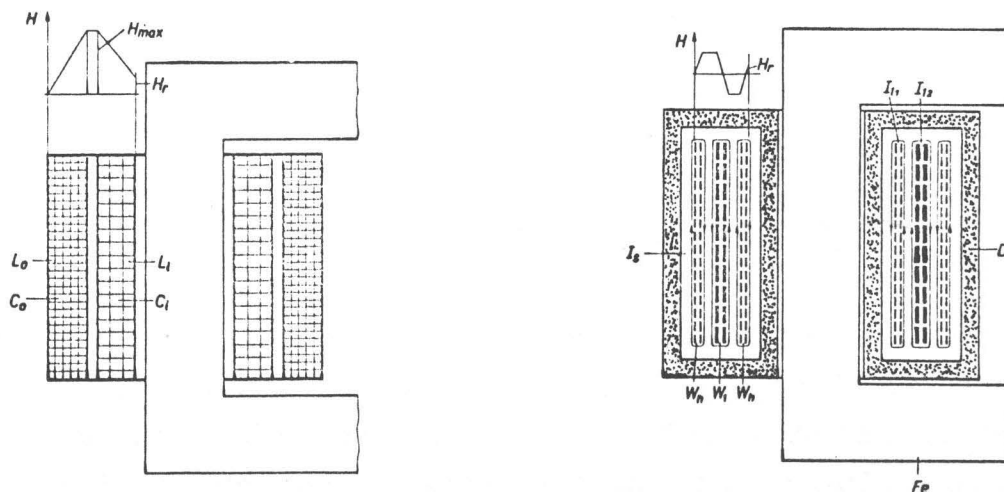


Abb. 40: Gleichstromtransformator (Van 63)

Bei Drehstromtransformatoren sind Konstruktionen mit und ohne Eisenkern möglich. Eine Kühlung des Eisenkerns kommt aus thermischen Gründen nicht in Frage. Chick berechnet für einen Transformator großer Leistung mit Kühlung des Eisenkerns einen Abfall des Wirkungsgrades von 99 % auf etwa 47 % (Chi 64). Alle in der Literatur beschriebenen oder vorgeschlagenen Konstruktionen verwenden deshalb nur tiefgekühlte oder supraleitende Primär- und Sekundärwicklungen.

Auf Mac Fee geht der Gedanke zurück, Primär- und Sekundärwicklungen mit Papierzwischenlagen abwechselnd übereinander zu wickeln. Dadurch wird vermieden, daß das Magnetfeld im Spalt zwischen Primär- und Sekundärspule den Wert des kritischen Feldes erreicht. In Abb. 41 a und b sind ein



a

C_o = äußere Spule

C_i = innere Spule

L_o = äußere Wicklungslage

L_i = innere Wicklungslage

b

W_n = 2 Lagen Sek. Wicklung

W_1 = 2 Lagen Prim. Wicklung

I_s, I_{11}, I_{12} = Isoliermittel

D = Kühlgefäß

Abb. 41 Konventioneller (a) und supraleitender (b) Transformator (Kla 64)

konventioneller und ein supraleitender Transformator und der Verlauf der Magnetfeldstärke über den Spulenradius dargestellt. Ein 15 kW-Experimentiertransformator nach Abb. 41 b wurde bei der A.D. Little Corp. gebaut und getestet (Fee 62).

An der Technischen Hochschule Graz führte Klaudy Untersuchungen an eisenfreien Transformatoren durch. Diese Transformatoren besitzen keine Eisenverluste und sind relativ leicht. Ihr Nachteil aber ist, daß das Bauvolumen sehr groß wird. Ein Transformator nach Abb. 42 hat bei

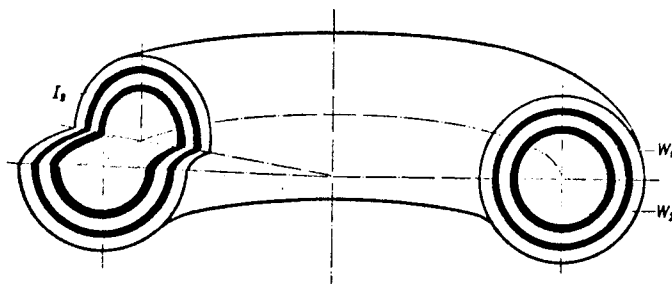


Abb. 42 : Ringtransformator (Kla 64)

33 MW und 21,0/63,3 kV einen Außendurchmesser von 4 m und eine Höhe von 3 m. Ein anderer, ebenfalls von Klaudy getesteter Transformator beruht auf der Tatsache, daß der magnetische Fluß durch supraleitende Bleche abgeschirmt und geführt werden kann. Entsprechend geformte supraleitende Bleche können also anstelle von Eisenkernen zur magnetischen Kopplung von Primär- und Sekundärspulen verwendet werden (Kla 64, Rog 64).

Anschließend seien noch einige Bemerkungen zur Wirtschaftlichkeit supraleitender Transformatoren gemacht. Die Einsatzmöglichkeiten großer supraleitender Transformatoren in der elektrischen Leistungsübertragung werden in der Literatur

sehr unterschiedlich beurteilt. Wilkinson sowie Chick zum Beispiel (Wil 64, Chi 64) glauben, daß weder supraleitende noch tiefgekühlte Transformatoren mit konventionellen konkurrieren können. Burnier dagegen schreibt: "Die Ergebnisse der bis heute (1966) durchgeführten Arbeiten sind sehr vielversprechend. Die versuchsweise Berechnung der Investitionskosten und Betriebskosten läßt uns schon heute glauben, daß diese Technik (tiefgekühlte Aluminiumleiter) bei Leistungen über 100 MVA wirtschaftlicher ist als die konventionelle" (Bur 66). Für einen 600 MVA Kryotransformator berechnet Burnier die in Abb.43 wiedergegebenen Verluste und Gewichte.

Comparison between a 600 MW cryotransformer and a 600 MW conventional transformer (preliminary design). Main characteristics:

	Conventional transformer	Cryotransformer
Core weight	167 tons	81 tons
Core losses	300 kW	147 kW
Winding losses	1700 kW	14 kW
Refrigeration losses	—	570 kW
Total losses	2000 kW	731 kW

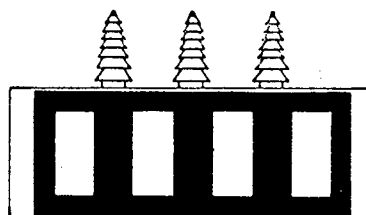


Abb. 43 : Vergleich eines konventionellen mit einem Kryotransformator (Bur 66)

5.2 Generatoren

Für supraleitende bzw. tiefgekühlte Generatoren haben sich zwei Konzepte entwickelt. Auf der einen Seite nutzt man die Möglichkeit aus, mit Hilfe supraleitender oder tiefgekühlter Magnetspulen sehr hohe Feldstärken erzeugen zu können, auf der anderen Seite macht man Gebrauch von der Tatsache, daß Magnetfelder nicht in alle supraleitenden Werkstoffe eindringen können.

Die Wirkungsweise eines Generators mit supraleitender Feldwicklung geht aus Abb. 44 hervor. Der Unterschied

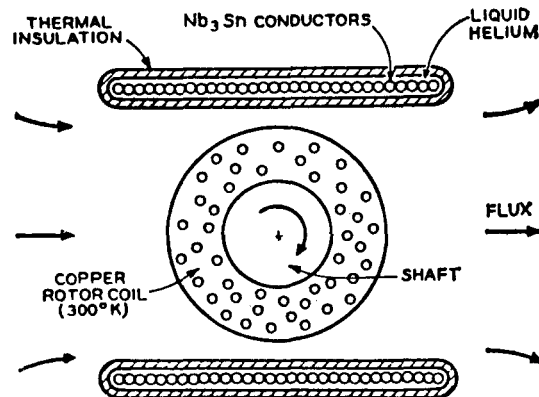


Abb. 44 : Querschnitt eines Generators mit supraleitender Feldwicklung (Fee 62)

zu einem konventionellen Generator besteht lediglich darin, daß die Feldwicklung aus supraleitenden oder tiefgekühlten Leitern besteht. Die Feldwicklung benötigt keine Energiezufuhr und kein Eisen. Dadurch wird ein hoher Wirkungsgrad und eine Reduzierung des Volumens und Gewichts erreicht. Den elektrischen Wirkungsgrad eines solchen 600 MW-Generators von 2 m Rotorlänge und 1 m Rotordurchmesser nimmt Mac Fee mit 99,9 % an (Fee 62). Burnier erwähnt Experimente mit Generatoren ähnlicher Bauart (Bur 66).

Das Prinzip eines Generators nach dem zweiten Konzept ist in Abb. 45 dargestellt. Der supraleitende Stromkreis be-

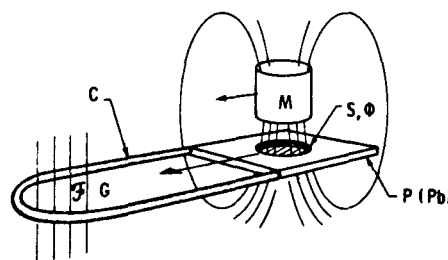


Abb. 45 : Prinzip des supraleitenden Generators (Wip 63)

steht aus einem Draht C (harter Supraleiter, z.B. Nb₃Sn) und einer Platte P (weicher Supraleiter, z.B. Pb). Über diese Anordnung hin bewegt sich ein Dauermagnet M in Pfeilrichtung.

Sein Magnetfeld ist größer als das kritische Feld der Platte, aber kleiner als das des Drahtes. Beim Überqueren der Platte bildet sich unter dem Magneten eine normalleitende Zone S aus, die den Fluß Φ enthält. Die Zone folgt der Bewegung des Magneten. Sobald sich der Magnet über die innere Kante der Platte bewegt, erhöht sich der ursprünglich in der Zone G enthaltene Fluß F um den Wert Φ . In dem supraleitenden Stromkreis bewirkt diese Flußänderung eine Erhöhung des Stromes um den Betrag $\Delta I = \mu_0 \cdot \Phi / L$ (L = Induktivität des Stromkreises).

Generatoren nach dem oben erläuterten Prinzip werden u.a. von Wipf (Wip 63), Volger (Vol 66) und Atherton (Ath 64) beschrieben. Die Bilder 46 a, b und c zeigen die Wirkungsweise einiger Generatoren, die zu Experimentierzwecken gebaut wurden.

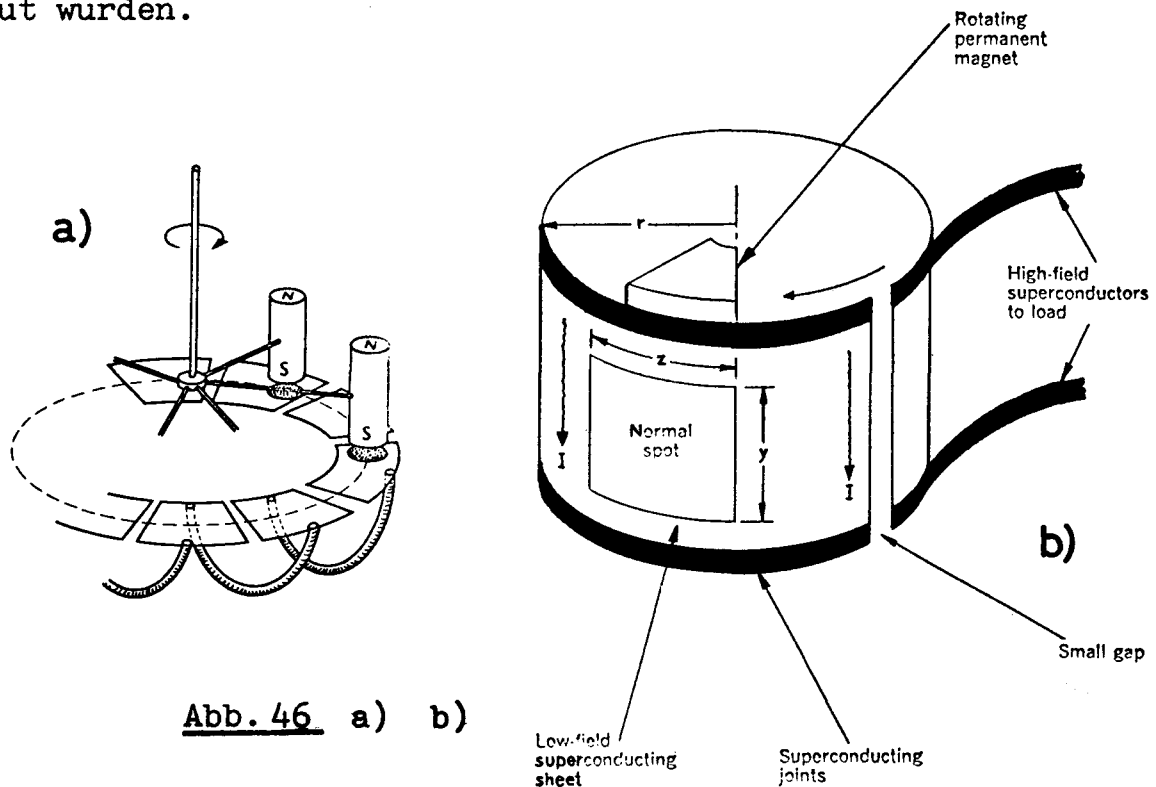


Abb. 46 a) b)

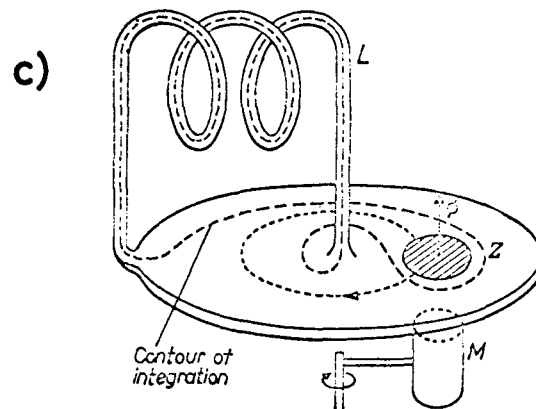


Abb. 46 c: Prinzip dreier supraleitender Experimentier-
generatoren
a) nach Wipf, b) nach Atherton, c) nach Volger

6. TECHNISCHE HILFSANLAGEN

Für den Betrieb supraleitender oder tiefgekühlter Kabel sind Hilfsanlagen erforderlich, um die tiefen Betriebstemperaturen im Bereich von etwa 4°K bis 20°K bzw. etwa 77°K aufrechterhalten und die unvermeidlichen Kälteverluste durch Wärmeleitung und -strahlung, Stromwärme, Reibungswärme usw. abführen zu können. Die Tieftemperaturanlagen müssen über Flüssiggas- oder Kaltgasleitungen mit den Kabeln verbunden werden, falls diese nicht im Bereich der Kühlstationen konstruktiv in die Anlagen einbezogen werden. Das wirksamste Mittel zur Wärmeisolation der kalten Bauteile und Rohrleitungen ist die Vakuumisolation, zu deren Aufrechterhaltung Vakuumpumpen notwendig sind, die ebenfalls in bestimmten Abständen am Kabel angebracht werden müssen. Zur Verminderung der Wärmestrahlung ist schließlich noch die Anbringung gekühlter oder ungekühlter Strahlungsschilde im Vakuumraum erforderlich, wobei letztere aus gut reflektierenden, beidseitig mit Aluminium bedampften Kunststofffolien bestehen und in mehreren Lagen um die tiefkalten Bauteile herumgewickelt werden. Für den Betrieb der Hilfsanlagen sind Versorgungs-, Meß- und Überwachungseinrichtungen notwendig, die jedoch bereits als konventionell angesehen werden können.

In den nachfolgenden Abschnitten soll ein kurzer Überblick über den derzeitigen Stand der Technik auf dem Gebiet der Vakuumpumpen, Kaltgasleitungen und Tieftemperaturanlagen gegeben werden.

6.1 Vakuumpumpen

Gase übertragen durch molekulare Bewegung Wärmeenergie von wärmeren zu kälteren Oberflächen, zwischen denen sie eingeschlossen sind. In Druckbereichen bis Atmosphärendruck und darunter entsteht dabei infolge unterschiedlicher Dichte

bei den verschiedenen Temperaturen eine wirbelhafte Bewegung zusammenhängender Gasmassen, die Konvektion. Bei weiterer Druckabsenkung und in engen Räumen kann sich die Konvektion nicht mehr ausbilden und die Wärmeübertragung erfolgt - abgesehen von metallischer Wärmeleitung an Kuppungsstellen und Abstützungen - nur noch durch Wärmeleitung über die einzelnen Gasmoleküle und Wärmestrahlung zwischen den Oberflächen unterschiedlicher Temperatur. Die Wärmeleitung der Gase ist außer von der Temperatur in gewissen Bereichen auch vom Druck abhängig. Bis herab zu Drücken von etwa 100 Torr ist sie druckunabhängig, unterhalb 10 Torr nimmt sie mit dem Druck ab und ist unterhalb etwa 10^{-3} Torr, d.h. im Gebiet der Molekularströmung, praktisch vernachlässigbar. Molekularströmung liegt dann vor, wenn die mittlere freie Weglänge eines Gases größer wird als der Abstand der Behälterwandungen (Abb. 47), zwischen denen das Gas eingeschlossen ist. Für Tieftemperatureinrichtungen ist daher

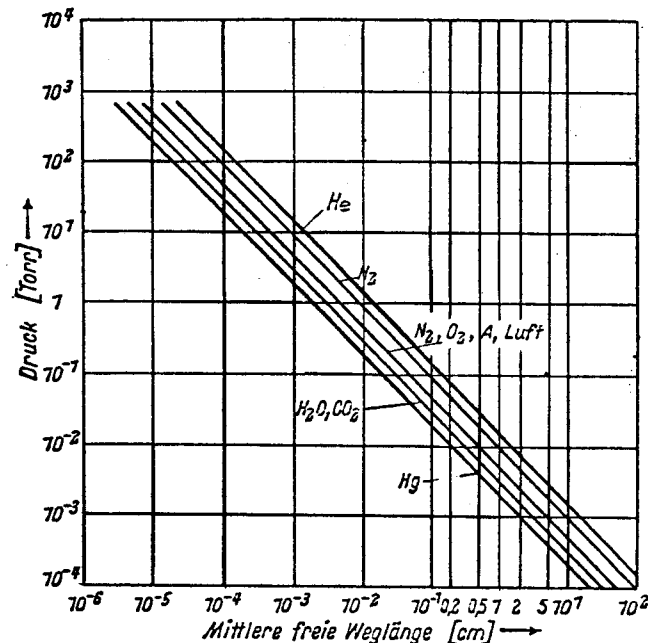


Abb. 47: Mittlere freie Weglänge einiger Gase und Dämpfe

zur Vermeidung der Kälteverluste durch Wärmeleitung in den umgebenden Gasen ein Druck von etwa 10^{-4} bis 10^{-6} Torr erforderlich.

Erzeugung und Aufrechterhaltung derartig niedriger Drücke ist heute technisch kein Problem mehr (Die 62, Wut 65), die technologischen Voraussetzungen sind bekannt (Esp 61) und es steht eine Vielzahl von Vakuumpumpen zur Verfügung, die betriebssicher mit einer langen Lebensdauer arbeiten. In der nachfolgenden Abb. 48 ist die Zuordnung der heute technisch ausgereiften Vakuumpumpen zu den einzelnen Druckbereichen dargestellt, aus der ersichtlich ist, daß für den Betrieb von Tieftemperatureinrichtungen im Hochvakuumgebiet hauptsächlich Molekularpumpen, Diffusionspumpen und

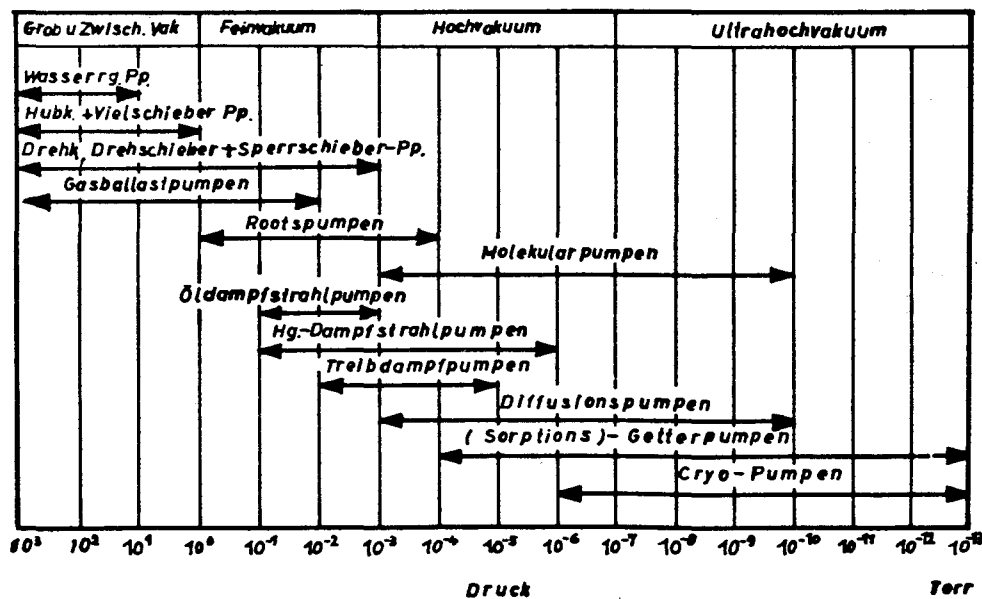


Abb. 48 : Zuordnung von Pumpen zu den einzelnen Druckbereichen

Getterpumpen infrage kommen. Die zu den mechanischen Vakuumpumpen gehörende Turbo-Molekularpumpe (Bec 58, Bec 61) hat den Vorteil der Erzeugung eines völlig ölfreien Vakuums, so daß keine Pumpenöle auf den tiefkalten Teilen im Vakuumsystem kondensieren können und Verschmutzungen mit Öl vermieden werden.

Die Turbo-Molekularpumpe (Abb. 49) wird für Sauggeschwindigkeiten von 250 bis 15.000 m³/h gebaut und arbeitet betriebs-sicher. Nachteile sind der komplizierte mechanische Aufbau und der dadurch bedingte hohe Preis sowie die nach einigen tausend Betriebsstunden erforderlichen Wartungsarbeiten an den Lagern.

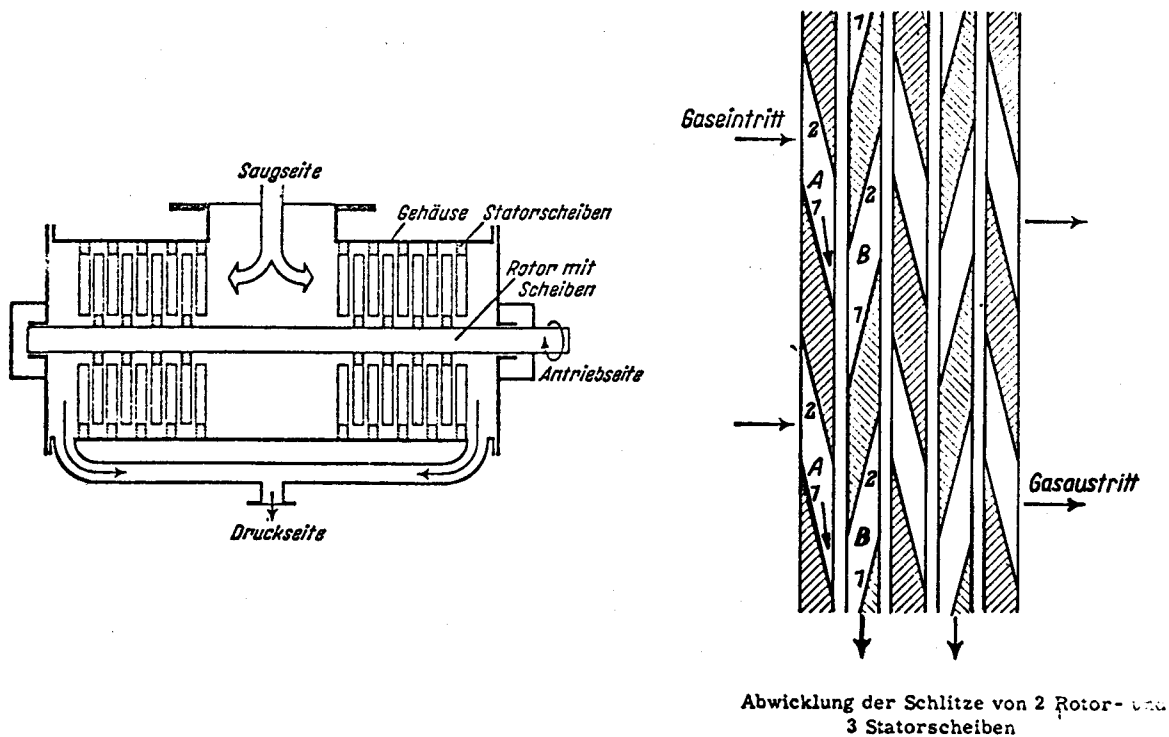


Abb. 49 : Turbo-Molekularpumpe nach Becker

Öl-Diffusionspumpen (Abb. 50) werden meist mehrstufig gebaut und haben eine hohe Sauggeschwindigkeit über einen weiten Druckbereich.

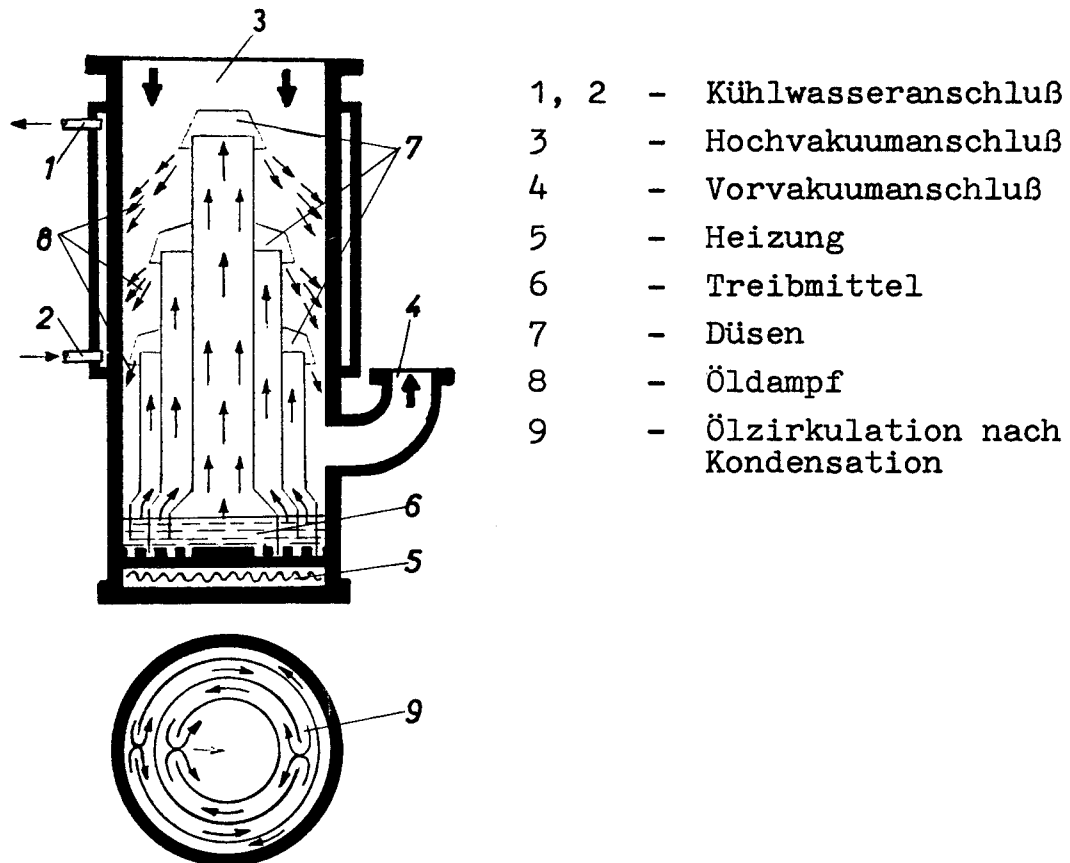


Abb. 50 : Öl-Diffusionspumpe (Schematisch)

Auch bei diesen Pumpen sind je nach Betriebsverhältnissen und einer gewissen Betriebsdauer Wartungsarbeiten (Reinigung und Ölwechsel) erforderlich, wofür die Pumpen abgeschaltet werden müssen. Beim Betrieb können Treibmitteldämpfe in den Vakuumraum gelangen und dort kondensieren, falls nicht auf der Saugseite der Diffusionspumpe gekühlte Ölfänger (Baffles) installiert sind.

Bei den Getterpumpen wird die Fähigkeit von Feststoffen ausgenutzt, Gase aufzunehmen und zu binden. Zeolithe haben

Poren mit einem Durchmesser von etwa 4×10^{-7} bis 12×10^{-7} mm, in die die Gasmoleküle eindringen können. Die Moleküle werden bei genügend tiefer Temperatur der "Zeolithfallen" adsorbiert. Diese sind nach Erschöpfung der Getterkapazität durch Erwärmung regenerierbar und können erneut eingesetzt werden. Neben der elektrischen Gasaufzehrung in Ionenpumpen werden in Ionen-Getterpumpen Gettersubstanzen verdampft, die an den Innenflächen der Pumpen kondensieren und dort großflächige Getterschichten bilden, die chemisch aktive Gase aufnehmen. Permanentgase wie Helium werden an der Ionisierungseinrichtung der Pumpe ionisiert, erfahren im elektrischen Feld eine Beschleunigung und werden in die Getterschicht hineingeschossen, in der sie haften bleiben.

Die Sorptionseigenschaften von Feststoffen und Flüssigkeiten sind noch weitgehend unerforscht, genaue Kenntnisse liegen nur für wenige Stoffe vor. Sorptionspumpen haben gegenüber mechanischen und Treibmittelpumpen den Vorteil, daß sie beliebig und unabhängig von der Lage eingebaut werden können, kohlenwasserstofffreie Vakua erzeugen und praktisch wartungsfrei über lange Betriebszeiten arbeiten (Kie 62). Diese Vorteile können gerade in Tieftemperaturkabeln große Bedeutung erlangen, wenn die Restgaszusammensetzung und der Enddruck im Vakuumraum entsprechend gewählt werden.

Neben den beschriebenen Vakuumpumpen können auch die als Kryopumpen wirkenden Kalten Oberflächen der Verbesserung des Vakuums dienen, an denen die kondensierbaren Restgase kondensiert werden.

Wie Abb. 48 zeigt, haben die zur Hochvakuum-Erzeugung verwendbaren mechanischen Pumpen, Treibmittel- und Getterpumpen gemeinsam den Nachteil, daß zu ihrer Arbeitsfähigkeit erst ein Vorvakuum erforderlich ist. Sie können also nicht allein, sondern nur in Kombination mit einer Vorpumpe verwendet werden, die im allgemeinen eine Drehkolben- oder Drehschieberpumpe sein wird. Bei einer Kombination aus Vor-

pumpe, Molekularpumpe bzw. Diffusionspumpe könnten Vor- und Molekularpumpen bzw. Diffusionspumpen zum Evakuieren der Tieftemperatureinrichtungen, Sorptionspumpen zur Aufrechterhaltung des Vakuums während des Betriebes benutzt werden. Für die mechanischen und Treibmittelpumpen würden damit die Betriebszeiten erheblich verkürzt und sie brauchten nur während der Regeneration der Sorptionspumpen erneut eingeschaltet zu werden, mit denen heute bereits Drücke von weniger als 10^{-4} Torr über viele Monate aufrecht zu erhalten werden können, ohne daß von außen evakuiert werden muß.

6.2 Kalt- und Flüssiggasleitungen, Stromzuführungen

Zur Verbindung der Tieftemperaturanlagen mit den tiefgeköhlten oder supraleitenden Kabeln sind Leitungen für die Kältemittel erforderlich, wenn nicht, wie oben vorgeschlagen, die Kabel im Bereich der Kühlstationen in diese einbezogen werden können. Außerdem müssen Kabel jedoch zumindest in Bezug auf die baulichen Einrichtungen zum Transport und zur Verteilung der Kältemittel, die Vakuumsysteme und Isolationsmaßnahmen nach ähnlichen Gesichtspunkten gebaut werden, wie sie für Kalt- und Flüssiggasleitungen, insbesondere für Flüssig-Helium-Transferleitungen, gelten. Beim Bau von tiefgeköhlten Kabeln kann man deshalb in Bezug auf Technologie und Konstruktion auf bereits vorhandene Erfahrungen und erprobte Ausführungsbeispiele zurückgreifen (Pau 64).

Vakuumisolierte Transferleitungen wurden zuerst für Laborzwecke zum Transport von flüssigem Stickstoff, Wasserstoff und Helium aus Transport- und Vorratsgefäßen über kurze Entfernungen (wenige Meter) zu Meßkryostaten gebaut und benutzt. Derartige Heberleitungen sind wiederholt beschrieben und in allen wesentlichen Einzelheiten wie Kupplungen, Isolationen, Ventile, Abstützungen usw. bekannt (Sco 60, dort auch weitere Literaturangaben). Mit dem schnell wachsenden Bedarf an flüssigem Stickstoff für die verschiedensten experimentellen und industriellen Anwendungszwecke, flüssigem

Sauerstoff, Wasserstoff und anderen Antriebsmitteln von Raketen für die Kriegstechnik und Weltraumforschung wurden Flüssiggas-Pipelines zum Teil mit Längen bis zu einigen hundert Metern erforderlich und gebaut. Dabei wurde im allgemeinen jedoch zunächst wenig Wert auf extrem geringe Kälteverluste gelegt, weil die transportierten Flüssiggase entweder billig waren, eine hohe Verdampfungswärme besaßen, d.h. die Verluste bei relativ großen Wärmeeinfällen gering waren, oder die Leitungen nur kurzzeitig zum Betanken von Raketen in Betrieb waren. Erst mit der steigenden Nachfrage nach flüssigem Helium für Forschungszwecke und industrielle Anwendungen, insbesondere zum kontinuierlichen Betrieb von Bestrahlungskryostaten, kalten Neutronenquellen, Blasenkammern usw. in großtechnischem Maßstab, mußten die Kälteverluste besondere Beachtung finden, da die Verdampfungswärme von Helium wesentlich geringer ist als bei anderen Gasen und die Kälteverluste in den Pipelines die Größe der Kälteanlagen wesentlich mitbestimmen. Tab. 8 gibt einen Überblick über die Beschaffungskosten und die Kühlkosten für die vier gebräuchlichsten Flüssiggase.

Tab. 8 : Kosten für Flüssiggase (Wal 68)

Flüssigkeit	Siedepunkt °C °K		Verdampfungswärme beim Siedepunkt Kcal/l	Gewicht pro l kg	Mindestkosten pro l ^{*)}	Verlust durch i W Wärmeeinfall l/h	Kosten pro Wh ^{*)}
Sauerstoff	-183	90	58,16	1,140	4 d.	0,015	0,06 d.
Stickstoff	-196	77	38,46	0,808	6 d.	0,022	0,13 d.
Wasserstoff	-253	20	7,704	0,071	£ 2,5	0,112	£ 0,28
Helium	-269	4	0,6139	0,125	£ 4	1,40	£ 5,6

^{*)} Wirtschaftlichkeitsberechnungen für englische Verhältnisse entsprechen etwa den Verhältnissen in Deutschland, 1 £ = ca. DM 10,—

Der große Energieaufwand für die Verflüssigung von Helium, die geringe Verdampfungswärme und die erforderlichen niedrigen Temperaturen in supraleitenden Kabeln erzwingen besondere Maßnahmen zur Erzielung minimaler Kälteverluste. Diese lassen sich in einer Heliumleitung von 10 bis 20 cm $\varnothing$ je nach konstruktivem Aufwand auf etwa 0,05 W/m reduzieren, wenn ein mit flüssigem Stickstoff gekühlter Strahlungsschild verwendet wird (Tab. 7). Die Verluste in der Heliumleitung werden noch geringer, wenn man den Strahlungsschild mit flüssigem Wasserstoff kühlt. Sie sind vernachlässigbar klein, wenn der die Helium-Zuleitung umgebende Strahlungsschild ebenfalls mit Flüssig-Helium gekühlt wird. Leitungen mit flüssiggasgeköhlten Strahlungsschilden sind jedoch konstruktiv sehr aufwendig und erfordern mehrere konzentrische Rohrleitungen sowie zusätzliche Kühlkreisläufe.

Es gibt seit einigen Jahren Isolationsmittel, die aus dünnen, ein- oder beidseitig mit Aluminium bedampften Kunststofffolien oder Aluminiumfolien mit Zwischenlagen aus Glasfaserstoffen bestehen und in mehreren Lagen um die kalten Teile herumgewickelt werden (Sel 68, dort umfangreiche Angaben über Isolationsmittel). Tab. 9 zeigt einen Vergleich zwischen zwei typischen Superisolationen und deren vakuum- und verarbeitungstechnischen Eigenschaften für eine Leitung

Tab. 9 : Vergleich von Superisolationen (Wal 68)

Eigenschaft	NRC-2	Dimplar
Verlust pro Meter Leitung	0,10 W	0,27 W
Gesamtoberfläche der Isolierfolie (Mylar) pro Meter Leitung	66 m ²	7,5 m ²
Entgasung	schwierig	leicht
Evakuierung	schwierig	sehr leicht
Anbringen	schwierig	einfach

mit einer Nennweite von 1,5 Zoll. In Tab. 10 sind mit unterschiedlichen Isolationsmitteln versehene Leitungen der Nennweite 1" verglichen, bei denen noch Johnson-Kupplungen (Sco 60) verwendet werden. Diese Kupplungen besitzen metallische Verbindungen zwischen den kalten und warmen Leitungsenden, die ineinander gesteckt und am warmen äußeren Leitungsende abgedichtet werden.

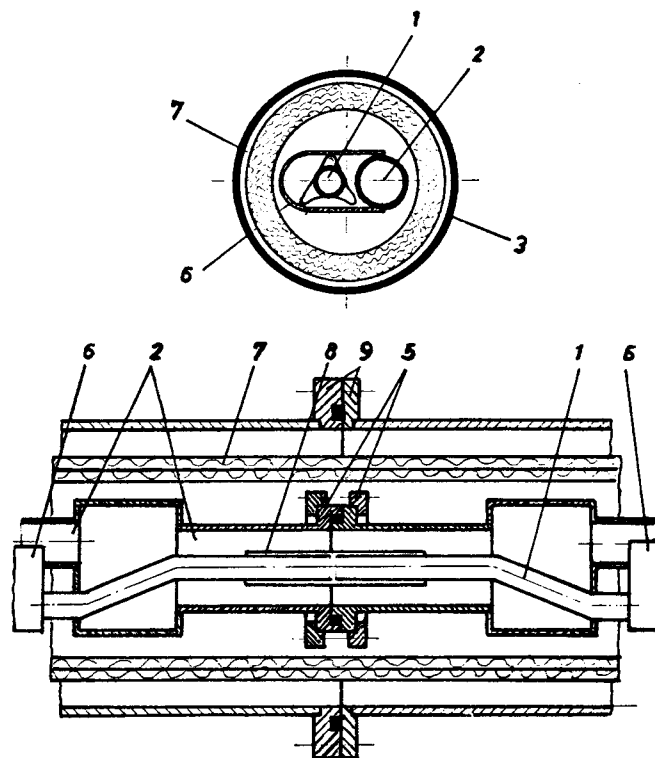
Tab. 10 : Vergleich einiger Leitungssysteme (Wal 68)

Leitungsart (Isolation)	Verlust je m (W)	Verlust je Johnson- Kupplung (W)	Relative Anschaffungs- kosten
Schaumstoff	20	—	1,0
Pulver/Vakuum	1,8	1,2	3,0
Hochvakuum	1,1	1,2	3,5
Superisolation	0,3	1,2	4,0—5,0

Die relativen Anschaffungskosten für ein Leitungssystem mit flüssiggasgekühltem Strahlungsschild dürften erheblich über denen mit Superisolation liegen, wenn die in Tab. 7 genannten und den Konstruktionsvorschlägen für tiefgekühlte Kabel zugrunde gelegten Kälteverluste von etwa 0,05 W/m erreicht werden sollen.

Bei einem neuartigen Flüssig-Helium-Leitungssystem (Doo 68) werden anstelle der Johnson-Kupplungen, in denen Kälteverluste unvermeidlich sind, kalte Kupplungen an den inneren Flüssiggasleitungen und getrennt davon warme Kupplungen an den äußeren Mantelrohren verwendet, so daß die Kupplungen als Wärmeverlustquellen ausscheiden. Abb. 51 zeigt einen Längs- und Querschnitt durch Leitung und Kupplung, die bei diesem System außerdem um die Mittelachse der Leitung drehbar ist. Durch die Verwendung von kalten Kupplungen, speziellen Abstandhaltern, Superisolation (Dimplar) sowie eines von der Helium-Rückleitung gekühlten Strahlungsschildes, in dem die Helium-Zuleitung verläuft, werden extrem niedrige Kälteverluste

erreicht. Sie sind für die Hinleitung vernachlässigbar klein und betragen einschließlich aller Verluste in Ventilen und Abstützungen weniger als 0,5 W/m bezogen auf den gesamten Strömungsweg von ca. 32 m. Damit sind die Verluste so gering wie in mit normalem Aufwand gebauten L-N₂-gekühlten Flüssigheliumleitungen. Die theoretischen Verluste



- 1 - Helium-Zuleitung
- 2 - Helium-Rückleitung
- 3 - Mantelrohr
- 5 - Kalte Kupplung mit Gold-O-Ring
- 6 - Strahlungsschild
- 7 - Superisolation
- 8 - Kupplung der He-Zuleitung
- 9 - Warme Kupplung

Abb. 51 : Flüssig-Helium-Leitung mit extrem niedrigen Kälteverlusten (Doo 68)

in den einzelnen Bauteilen dieses Leitungssystems sind in Tab. 11 zusammengestellt.

Tab. 11 : Theoretische Kälteverluste der Flüssig-Helium-Leitung nach Abb. 51 (Wal 68) Leitungslänge 16 m

Verlust durch Dimplar	5,0 W
Verlust durch 25 Distanzstücke	1,0 W
Verlust durch Einlaßventil	0,1 W*
Verlust durch Rückführungsventil	0,2 W*
Zusammen:	6,3 W

* Ventilhandrad abgenommen

Infolge unvermeidlicher Unterbrechungen der Isolation und weil die Superisolation während der Montage nicht über die gesamte Leitungslänge ideal eingebaut werden kann, sind die realen Verluste etwa um das zweifache höher als die theoretischen.

Besondere Beachtung müssen die Stromzuführungen an den Kabelenden finden, wenn die Leistungserzeugung und -abnahme bei Raumtemperatur erfolgt. In den Zuleitungen entstehen neben Wärmeleitungsverlusten erhebliche Stromwärmeverluste, die eine Optimierung der Leiter und deren kontinuierliche Kühlung erforderlich machen. Diese auch bei supraleitenden Magneten auftretenden Probleme wurden in jüngster Zeit eingehend untersucht (Sel 68, dort weitere Literaturangaben). Einige wichtige Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tab. 12 enthalten. Sie zeigt einen Vergleich der auf die Strombelastung bezogenen, in Wärme umgesetzten Leistung von Leitungsanschlüssen bei 300°K gegen 20°K für verschiedene Metalle.

Tab. 12 : Auf den Belastungsstrom bezogene, in Wärme umgesetzte Leistung von Leitungsanschlüssen bei $300^{\circ}\text{K} \rightarrow 20^{\circ}\text{K}$ (Sel 68)

Metall	q (mW/A)
Ni	36,6
Cu	44,5
Pb	46,7

6.3 Tieftemperaturanlagen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, müssen supraleitende Kabel nach den gegenwärtigen Kenntnissen im Temperaturbereich unter 20°K , vornehmlich bei etwa 4°K betrieben werden. Für tiefgekühlte Aluminiumkabel ist eine Betriebstemperatur von etwa 20°K erforderlich, Kupferkabel können bereits unterhalb 30°K , tiefgekühlte Berylliumkabel unterhalb 80°K betrieben werden, da die geringen Restwiderstände in diesen Temperaturbereichen zu hinreichend kleinen Verlusten führen.

Wenn man von thermoelektrischen und magnetischen Systemen absieht, mit denen gegenwärtig nur geringe Kälteleistungen unter relativ hohen Kosten erzeugt werden können, stehen für die Kälteerzeugung offene oder geschlossene Gaskälteprozesse mit Kältemitteln zur Verfügung, die in den betreffenden Temperaturbereichen noch in der gasförmigen oder flüssigen Phase vorliegen. In Tab. 13 sind die gegenwärtig unterhalb 100°K gebräuchlichen Kältemittel mit den zugehörigen Schmelz- und Siedetemperaturen zusammengestellt. Sie gibt außerdem den ungefähren Temperaturbereich an, in dem diese Gase gegenwärtig in Kreisprozessen für die Erzeugung von Kälteleistung benutzt werden.

Tab. 13 Kältemittel für Temperaturen $< 100^{\circ}\text{K}$ (Bal 68)

Kältemittel	Schmelz- temperatur*	Siede- temperatur*	Ungefährer Anwen- dungsbereich
	$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{K}$
N_2	64,3	77,4	65 $\longleftrightarrow$ (200)
Ne	24,5	27,1	27,5 $\longleftrightarrow$ 30
H_2	14,0	20,4	20,5 $\longleftrightarrow$ 28
He	-	4,2	1,7 $\longleftrightarrow$ 80

*p = 760 Torr

Die Erzeugung von Kälteleistung ist in zahlreichen, voneinander verschiedenen Kreisprozessen möglich, die nach dem jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt werden müssen und um so wirtschaftlicher arbeiten, je näher die **Prozeßführung** des einzelnen Kreislaufes dem entsprechenden reversiblen Kreisprozeß kommt. Die bekanntesten reversiblen Kreisprozesse sind der Carnot-, der Stirling- und der Claude-Prozeß (Van 63). Beim Carnot- und beim Stirling-Prozeß wird die Kälteleistung bei konstanter Temperatur, beim Claude-Prozeß in einem bestimmten Temperaturbereich erbracht. Mit den realen Kreisprozessen können die idealen nur annähernd erreicht werden, da eine thermodynamisch verlustlose **Prozeßführung** nicht möglich ist. Die verschiedenen Aggregate einer Kälteanlage stellen Verlustquellen dar und eine vollkommene Isolation der Kreisläufe gegen Wärmeeinfall aus der Umgebung ist ebenfalls ausgeschlossen.

In allen Kreisläufen wird das komprimierte Kältemittel in arbeitsleistenden Expansionsmaschinen (Kolbemaschine, Turbine) oder unter Ausnutzung des Joule-Thompson-Effektes in einem

Expansionsventil entspannt, wobei sich das Gas abkühlt. Jeder Kreislauf kann getrennt für sich betrieben werden, wobei aber insbesondere für den Drosselkreislauf eine Vorkühlung erforderlich ist, da erst unterhalb der Inversionstemperatur des jeweiligen Kältemittels der Joule-Thompson-Koeffizient positiv ist, d.h. eine Abkühlung bei Expansion durch Drosselung erfolgt.

In mehrstufigen Kältekreisläufen können mehrere Expansionsmaschinen oder Drosselstufen hintereinander geschaltet sein, ebenso ist es möglich, eine Drosselstufe beispielsweise einem Turbinenkreislauf nachzuschalten, wobei der zusätzliche Drosselkreislauf die Aufgabe hat, die Kälteleistung des Turbinenkreislaufes auf ein tieferes Temperaturniveau zu transportieren. Für die Kühlung von bei tiefer Temperatur betriebenen elektrischen Einrichtungen kommen, wie Tab. 13 zeigt, in einem weiten Temperaturbereich im wesentlichen Helium-Kältekreisläufe, für die Kühlung von Supraleitern zur Zeit nur diese in Frage. Dabei ist der Claude-Prozeß der gegenwärtig am häufigsten angewendete Kälteprozeß zur Erzeugung von tiefsten Temperaturen (Ede 68), der gegenüber anderen Kälteprozessen die wesentlichen Vorteile hat, daß er sehr gut an verschiedene Betriebsverhältnisse angepaßt werden kann und sich die erzeugte Kälteleistung ohne zusätzlichen technischen Aufwand über größere Entfernungen transportieren läßt (Tre 68). Abb. 52 zeigt das Fließschema einer Anlage, bei welcher der Turbinenkreislauf teils zur Verkühlung des mittels Wärmetauschern angeschlossenen Joule-Thompson-Kreislaufes sowie zur Kälteerzeugung von 1 - 2 kW bei 14°K dient. Im Drosselkreislauf werden zusätzlich 200 bis 400 W bei einer Temperatur von 4,5°K und sehr geringem Dampfanteil des flüssigen Helium erzeugt (Tre 68).

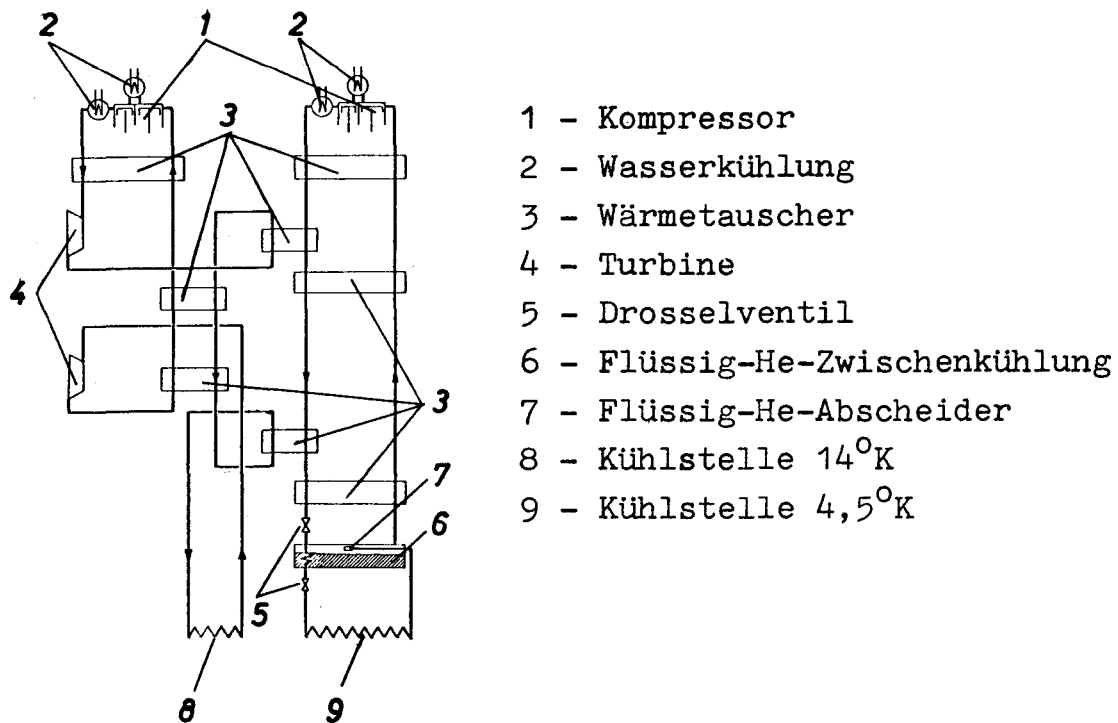


Abb. 52 : Tieftemperaturanlage mit Turbinenkreislauf und angeschlossenem Drosselkreislauf (Tre 68)

Der zur Erzeugung von Kälteleistung bei einer tiefen Temperatur benötigte Energiebedarf bei Raumtemperatur steigt mit sinkendem Temperaturniveau an. In Abb. 53 ist der Energiebedarf in dem Temperaturbereich von 20°K bis etwa 250°K dargestellt.

Angaben für Helium-Kältekreisläufe im Temperaturbereich über 5°K bis etwa 80°K waren bisher nicht erhältlich. Eder (Ede 68) gibt den Leistungsaufwand für verschiedene Helium-Kälteprozesse als Funktion der erzeugten Kälteleistung entsprechend Abb. 54 an, der die Tendenz zu entnehmen ist, daß bei großen Kälteleistungen der spezifische Leistungsaufwand 500 W/W erzeugter Kälteleistung bei 4,2°K annehmen wird.

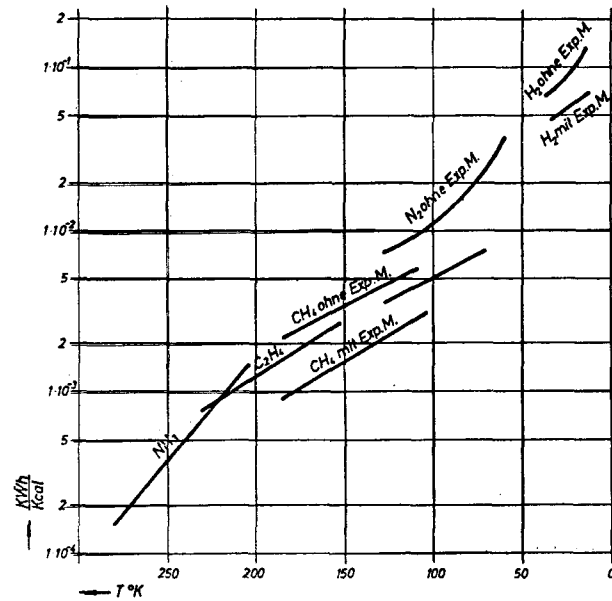


Abb. 53 : Energiebedarf für die Erzeugung von Kälte in Abhängigkeit vom Temperatur-Niveau (Lin 68)

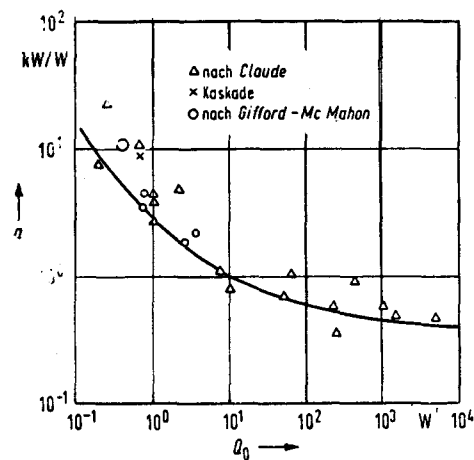


Abb. 54 : Leistungsaufwand verschiedener Helium-Kälteprozesse für die Erzeugung von Kälteleistung bei 4,2°K (Ede 68)

Die in Tab. 14 enthaltenen Werte gelten ebenfalls für Flüssiggaskühlung, also für feste Temperaturniveaus, und Tieftemperaturanlagen mit einer Leistung über 200 kW. Sie dürften jedoch auch in etwa für kleinere Anlagen zutreffen (Wil 66). Der gegenwärtig erforderliche Energiebedarf nach Tab. 14 stimmt gut mit den entsprechenden Werten nach Abb. 53 und 54 überein. Die erwartete Verminderung des Leistungsaufwandes bei großen Kälteanlagen ist beachtlich und soll gegenwärtig bereits annähernd erreicht sein (Sel. 68).

Tab. 14 : Leistungsbedarf von Kälteanlagen (Wil 66, Sel. 68)

		relative elektr. Antriebsleistung in W pro W Kälteleistung				
Kühl- flüssig- keit	Temp. °K	Carnot Prozeß	nach Wilkinson		nach Sellmaier	
			zukünftig (geschätzt)	gegenwärtig (große Anlag.)	große Kälteanlagen	kleine Kälteanlagen
Helium	4	65	300	620	400 bis	800
Wasserst.	20	11,5	39	78	40 bis	80
Stickst.	77	2,5	7,4	14	7 bis	10

Es ist damit zu rechnen, daß insbesondere bei kontinuierlich arbeitenden Helium-Kälteanlagen der Gesamtwirkungsgrad verbessert und der Energiebedarf erheblich verringert wird. Große Anlagen dieses Typs wurden erst etwa seit Anfang 1960 gebaut und in Betrieb genommen und mit den gesammelten Erfahrungen können einige schwer zu erfassende Einflüsse der technischen Auslegung und Prozeßführung besser übersehen werden. Wilkinson (Wil 66) rechnet mit einer Verminderung des Energiebedarfs um etwa 50 % (Tab. 14).

In Tab. 15 sind die garantierten und gemessenen Kälteleistungen bei einigen in Betrieb befindlichen Tieftemperaturanlagen miteinander verglichen. Die tatsächlich erreichten Kälteleistungen liegen zum Teil um mehr als 100 % über den garantierten Werten, die etwa 10 % unter den Auslegungsdaten liegen dürften. Es ist anzunehmen, daß in Zukunft u.a. auch weniger pessimistische Annahmen bei der Berechnung der Kreisprozesse zu einer Verbilligung der geschätzten

Tab. 15 : Vergleich der Garantierten und gemessenen Kälteleistungen bei in Betrieb befindlichen großen Tieftemperaturanlagen (Doo 68, Tre 63)

Kälte- kreislauf	Betriebs- temperatur $^{\circ}\text{K}$	Kälteleist. W garant	gemessen	Verwendungs- zweck	Be- trei- ber
Flüssig- wasser- stoff	23	4000	7400	2-m-Blasen- kammer	CERN
Gasf. Helium	14,5	1000	2400*	Kalte Neutro- nenquelle	KFA
Flüssig- Helium	4,5	200	410*	Fl-He-Loop	KFA
"	4,5	160	240*	TT-Bestr.	KFA

* unveröffentlichte Werte

Anlagekosten führen werden. Seit einigen Jahren sind große Heliumverflüssiger mit einer Verflüssigungsleistung von bis zu 800 l/h (Tre 68) und neben den in Tab. 15 aufgeführten Kälteanlagen andere mit Leistungen von 400 W bis 2.600 W bei 20°K , 1.700 W bei 18°K , 240 W bei $4,5^{\circ}\text{K}$ (Rob 68) und 30 W bei $1,8^{\circ}\text{K}$ in Betrieb. Bei $1,8^{\circ}\text{K}$ befindet sich Helium bereits in der supraflüssigen Phase und 30 W soll die bisher größte, mit supraflüssigem Helium in einer Kälteanlage erzeugte Kälteleistung sein (Bal 68).

Aufgrund der Anzahl der bereits in Betrieb befindlichen Helium-Tieftemperaturanlagen im Temperaturbereich unter 20°K und deren große Kälteleistungen kann festgestellt werden, daß der Stand der Kühltechnik bereits den Anforderungen entspricht, die beim Bau von supraleitenden elektrischen Maschinen und Kabeln gestellt werden müssen. Wasserstoff- und Stickstoff-Kälteanlagen für den Temperaturbereich von 20°K bis 100°K können bereits als konventionell angesehen werden.

7. KOSTEN VON ÜBERTRAGUNGSSYSTEMEN

In den folgenden Abschnitten werden in mehreren Tabellen kapitalisierte Übertragungskosten von konventionellen und Tieftemperatur-Übertragungs-Systemen zusammengestellt. Die kapitalisierten Übertragungskosten setzen sich zusammen aus den Investitionskosten und den kapitalisierten Betriebskosten. Bei konventionellen Systemen sind die Kosten für die ohm'schen Verluste der Hauptbestandteil der Betriebskosten. Diese werden mit einem Satz von 1.000,-- DM/kW (entsprechend 100 £/KW bei Wilkinson und Swift) kapitalisiert. Bei den TLÜ-Kabeln sind die Kosten für den Betrieb der Kälteanlagen Hauptbestandteil der Betriebskosten des Kabels. Soweit in den Originalarbeiten jährliche Betriebs- oder Übertragungskosten angegeben sind, wurden diese auf den Errichtungszeitpunkt mit 11 Jahresbeträgen (entsprechend 20 Jahren Lebensdauer mit 6 % Verzinsung kapitalisiert. Diejenigen Autoren, die selbst kapitalisierte Betriebskosten angeben, machen keine Angaben über Lebensdauer oder Zinssatz. Kosten in £ und \$ wurden 1 : 10 bzw. 1 : 4 in DM umgerechnet.

7.1 Konventionelle Übertragungssysteme

Die in Tabelle 16 zusammengestellten Kosten entstammen verschiedenen Quellen. Den Investitionskosten, die in Mas 68 angegeben sind, wurden etwa 15 % als kapitalisierte Übertragungskosten hinzugerechnet, da sich aus dem Zahlenmaterial in FGM 66 ersehen läßt, daß die kapitalisierten Betriebskosten bei Gleichstromkabel ca. 15 % der Investitionskosten betragen.

Tab. 16 : Kapitalisierte Übertragungskosten konventioneller Systeme (in Mio DM/km) und Stromrichterkosten (in Mio DM).

	Drehstrom					Gleichstrom					Kosten für zwei Gleichstrom- endstationen	
N	FREILEITUNG		KABEL			FREILEITUNG		KABEL				
(GW)	FGM66	SWI67	FGM66	SWI67	Nea68	FGM66	Gar67	FGM66	MAS68	Nea68	FGM66	GAR
0,75				1,47								
0,80	0,31		1,35			0,16		0,35			47,4	
1,0		0,42		1,92	4,50				0,17			
1,5		0,58		2,76	6,75				0,26	3,75		
1,6	0,46		2,53			0,20		0,60			94,8	
2,0		0,73		3,52	9,0				0,34	5,0		
3,0		0,90		4,80	13,5				0,52	7,5		
3,2	0,75		5,05			0,37		1,35			189,6	
4		1,00		5,75	18,0				0,68	10,0		
5				6,40	22,5				0,86	12,5		
6									1,04			
10						1,30		4,20			341	
100							13,1					800

Nicht erklärbar sind die großen Unterschiede in den Kostenangaben zwischen Massar und Neal von mehr als einer Zehnerpotenz. Die Autoren machen keine genauen Angaben darüber, aus welchen Einzelposten sich die Kosten zusammensetzen.

7.2 Tieftemperatur-Übertragungssysteme

Zahlreiche Autoren fügen ihren Konstruktionsvorschlägen Abschätzungen über die Investitions- und Betriebskosten bei. Die Originalangaben der Autoren und die in DM umgerechneten Kosten sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Die Bezeichnungen der Kabel, deren Aufbau in Abschnitt 4 beschrieben ist, stimmt mit denen in Tabelle 7 überein. Bei dem Kabel NEA 1a handelt es sich um eine modifizierte Version des Kabels NEA 1, bei dem der Aluminiumleiter nicht mehr massiv ist, sondern aus einer Vielzahl von dünnen Aluminiumleitern besteht. Dadurch werden die Wirbelstromverluste auf etwa 25 % des Kabels NEA 1 reduziert, was sich sowohl auf die Betriebskosten, als auch auf die Kosten der Kälteanlagen günstig auswirkt.

Bei den Gleichstromkabeln müssen neben den längenabhängigen Kosten noch die Kosten für die Gleichstromstationen an den Kabelende berücksichtigt werden. Der auf 1 km Länge entfallende Anteil dieser Kosten hängt daher von der Gesamtlänge der Leitung ab.

Tabelle 17: Kapitalisierte Übertragungskosten von TLÜ-Systemen und Stromrichterkosten.

	Bezeichnung der Kabel	Übertragene Leistung	Angaben im Original		Kosten in DM umgerechnet			Kosten für zwei Gleichstromstationen
			Investitionskosten	Betriebskosten	Investitionskosten	Betriebskosten	Kapitalisierte Übertragungskosten	
		GW	/km	/km	TDM/km	TDM/km	TDM/km	MIO DM
Drehstrom	KLA 2	0,37	1 470 000 DM	-	1 470	-	ca. 1 600	
	SWI	0,75	178 000 £	12 000 £	1 785	115	1 900	
	ROG	0,75	165 700 £	1 830 £/a	1 657	202	1 859	
	NOR 1	0,75	495 000 \$	32 500 \$	1 980	130	2 110	
	NOR 2	0,75	526 250 \$	32 500 \$	2 105	130	2 234	
	WIL 1	1,52	60 000 £*)	16 200 £	600*)	162	762*)	
	WIL 2	1,52	73 000 £*)	17 000 £	730*)	170	900*)	
	WIL 3	1,52	130 000 £*)	15 300 £	1 300*)	153	1 453*)	
	WIL 4	1,52	4 800 000 £*)	11 700 £	48 000*)	117	48 117*)	
	NEA 1	3,0	1 806 000 \$	336 000 \$	7 220	1 350	8 570	
	NEA 1 a	3,0	ca. 531 \$/MVA		-	-	6 372	
Gleichstrom	NOR 3	0,75	278 125 \$	8 125 \$	1 112	32	1 144	?
	NEA 2	3,0	ca. 450 \$/MVA		-	-	5 400	?
	GAU	10	526 000 \$	2 500 \$/a	2 104	110	2 214	1 600
	GAR	100	606 000 \$	5 000 \$/a	2 424	220	2 644	800

*) ohne Kosten für Herstellung und Verlegung des Kabels

Die Investitionskosten aus Tabelle 17 sind in Tabelle 18 nochmals dargestellt und zwar aufgeteilt nach verschiedenen Kostenkategorien, soweit dies aus den Originalangaben hervorging.

Tab. 18 : Aufteilung der Investitionskosten von TLÜ-Systemen nach verschiedenen Kostenkategorien (TDM/km)

Übertragungsart	DREHSTROM									GLEICHSTROM			
Bezeichnung	KLA 2	SWI	NOR 1	ROG	NOR 2	WIL 1	WIL 2	WIL 3	NEA 1	NOR 3	NEA 2	GAU	GAR
Leistung	0,37	0,75	0,75	0,75	0,75	1,52	1,52	1,52	3,0	0,75	3,0	10	100
Kälteanlagen	476	365	395	356	330	259	380	1 124	2 350	252	-	104	124
Kühlmittel	190	235	290	237	230	-	-	-	-	65	-	-	-
Leitermaterial	-	290	338	298	305	-	-	-	2 220	180	-	2 000	2 200
Kabelherstellung	804	690	852	551	1 000	-	-	-	-	402	-	-	100
Kabelverlegung	-	210	225	215	240	-	-	-	2 500	211	-	-	-
Investitionskosten	1 470	1 790	1 657	1 980	2 105	-	-	-	7 220	1 112	-	2 104	2 424 ^{**)}
Betrieb (He)	-	70	85	164	85	1	26	-	-	10	-	106	178
Betrieb (H ₂)	-	-	-	-	-	4	-	63	1 350	-	-	-	-
Betrieb (N ₂)	-	40	45	38	45	158	144	90	-	22	-	4	43
Betriebskosten	147 ^{*)}	110	130	202	130	162	170	153	1 350	32	-	110	221
kapitalisierte Übertrag. kosten	1 617	1 900	2 210	1 859	2 235	-	-	-	8 570	1 144	5 400	2 114	2 645 ^{**)}
Gleichrichterkosten in Mio DM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 600	800

^{*)} analog zu anderen Autoren mit ca. 10% angenommen

^{**)} ohne Kosten für Kühlmittel und Kabelverlegung

Aus den Tabellen 17 und 18 geht deutlich hervor, daß das Kabel NEA 1 vor allem deswegen im Vergleich zu den anderen teuer ist, weil es große thermische Verluste und damit hohe Betriebskosten und hohe Investitionskosten für die Kälteanlagen hat. Die etwa zehnmal höheren Kosten für die Verlegung lassen sich allerdings aus den Angaben der Originalarbeit nicht erklären.

Vom Aufbau des Kabels her sollte man sogar annehmen, daß diese Kosten niedriger als bei den anderen Drehstromkabeln sein müßten.

Ähnlich wie in Tab. 16 für konventionelle Übertragungssysteme sind in Tab. 19 die kapitalisierten Übertragungskosten für TLÜ-Systeme als Funktion der übertragenen Leistung zusammengestellt. Hinsichtlich der Unterschiede bei der Kostenangabe von Massar und Neal gilt das bereits in Abschnitt 7.1 gesagte.

Die unter SWI 1 gemachten Angaben basieren auf dem Kabel nach Abb. 25, das für eine Stoßspannung gleich der sechsfachen Nennspannung und für einen Kurzschlußstrom gleich dem siebenfachen Nennstrom für 1 sec ausgelegt ist.

Bei den Kosten unter SW I 2 handelt es sich um ein ähnliches Kabel, das aber nur für den Nennstrom und die doppelte Nennspannung als Stoßspannung ausgelegt ist.

Tab. 19 : Kapitalisierte Übertragungskosten von TLÜ-Systemen als Funktion der übertragenen Leistung in Mio DM/km

Leistung. (GW)	D r e h s t r o m			G l e i c h s t r o m	
	SWI 1	SWI 2	NEA 1	MAS ^{*)}	NEA 2
0,75	1,85	1,20			
1,0	2,00	1,30		0,27	
1,5	2,30	1,43	6,75	0,28	5,25
2	2,45	1,52	7,40	0,29	5,00
3	2,80	1,68	8,94	0,32	5,40
4	3,05	1,77	10,80	0,34	5,60
5	3,25	1,83	12,50	0,37	6,00
6				0,40	

^{*)} ohne Betriebskosten

7.3 Vergleich beider Übertragungssysteme

In Abb. 55 sind die kapitalisierten Übertragungskosten für konventionelle und supraleitende Drehstrom-Übertragungssysteme als Funktion der Übertragungsleistung aufgetragen. Die Abbildung stellt die Kostenangabe für Drehstromsysteme aus den Tabellen 16, 17 und 19 einander graphisch gegenüber.

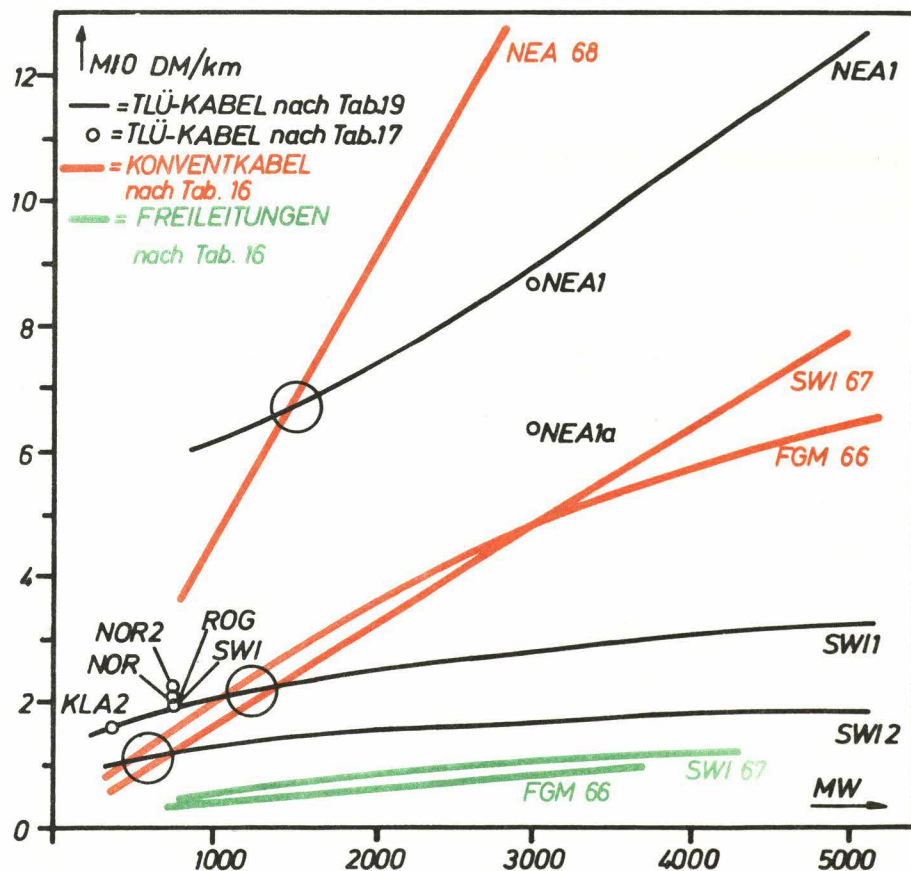


Abb. 55 Kapitalisierte Übertragungskosten von Drehstromsystemen

Die vier Kabel von Wilkinson wurden nicht mit aufgenommen, da für sie keine Kosten für Herstellung und Verlegung gemacht wurden, die gerade bei diesem Kabeltyp, der aus 6 getrennt verlegten Einzelkabeln besteht, sehr hoch sein dürften. Obwohl die Kosten nach Neal sowohl für konventionelle als auch für TLÜ-Kabel erheblich über denen der anderen Autoren liegen, wird auch hier ungefähr im gleichen Leistungsbe-

reich Kostengleichheit zwischen konventionellen und TLÜ-Kabeln erreicht.

Abb. 56 zeigt die kapitalisierten Kosten für Gleichstromübertragungssysteme ohne Gleichrichterkosten, da diese für konventionelle und supraleitende Systeme gleich sind.

Sowohl die Kosten für supraleitende als auch für konventionelle Übertragungssysteme dürfen ebenso wie bei den Drehstromsystemen in Abb. 55 nur als grobe Näherung aufgefaßt werden.

In dieser Abbildung sind die Kostenangaben für Gleichstromsysteme aus den Tabellen 16, 17 und 19 einander in graphischer Form gegenübergestellt. Wegen der logarithmischen Teilung der Abszisse wirken die Kurven gegenüber Abb. 55 verzerrt.

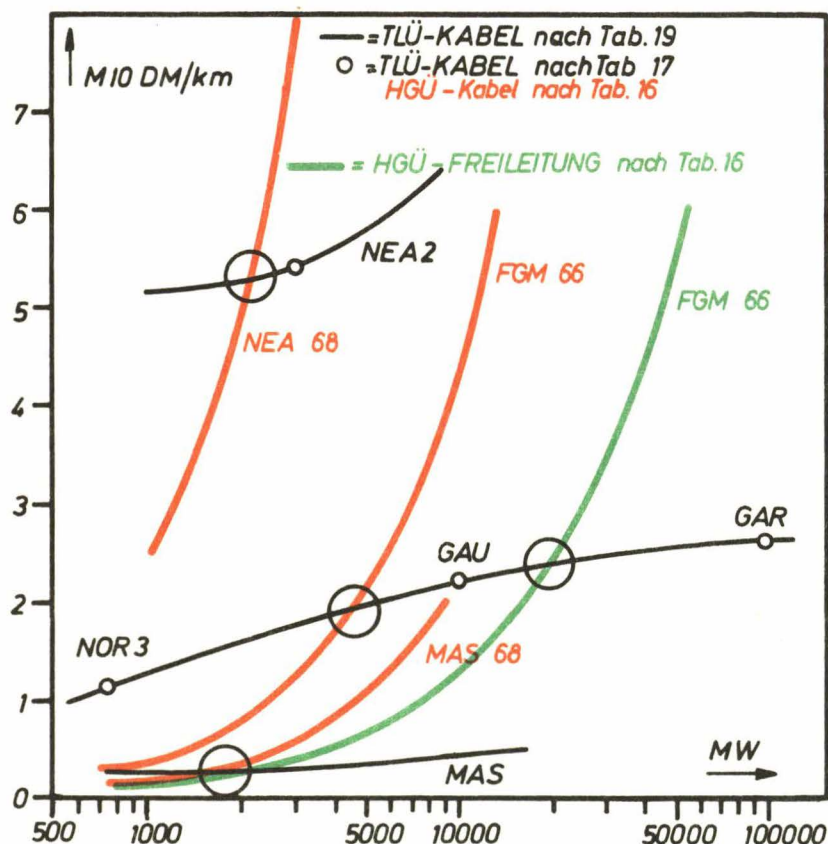


Abb. 56 Kapitalisierte Übertragungskosten von Gleichstromsystemen (ohne Gleichrichterkosten)

Ebenso wie bei Abb. 55 ist auch hier festzustellen, daß trotz der erheblichen Unterschiede in der absoluten Höhe der von Neal und Massar angegebenen Kosten beide Autoren bei etwa der gleichen Leistung zu einer Kostengleichheit zwischen konventionellen und TLÜ-Systemen kommen.

In Abb. 57 sind die wichtigsten Daten aus den Abb. 55 und 56 zusammengefaßt, nunmehr bezogen auf eine Leitung von 500 km Länge. Dabei wurden die Kabel nach Neal nicht mehr berücksichtigt, da sie von ihrer Konzeption her für eine derartige Leitungslänge unbrauchbar sind.

In den Diagrammen für Gleichstromsystemen sind die Gleichrichtererkosten enthalten. Die für die Gleichrichtererkosten eingezeichnete Gerade ist mehr oder weniger willkürlich, da nur zwei Angaben - bei 800 MW (FGM 64) und 100.000 MW (GAR 67) - zur Verfügung standen. Außerdem basieren die in beiden Quellen angegebenen Kosten auf sehr unterschiedlichen Annahmen (30 DM/kW inst. bei FGM 64 und 4 DM/kW inst. bei Gar 67).

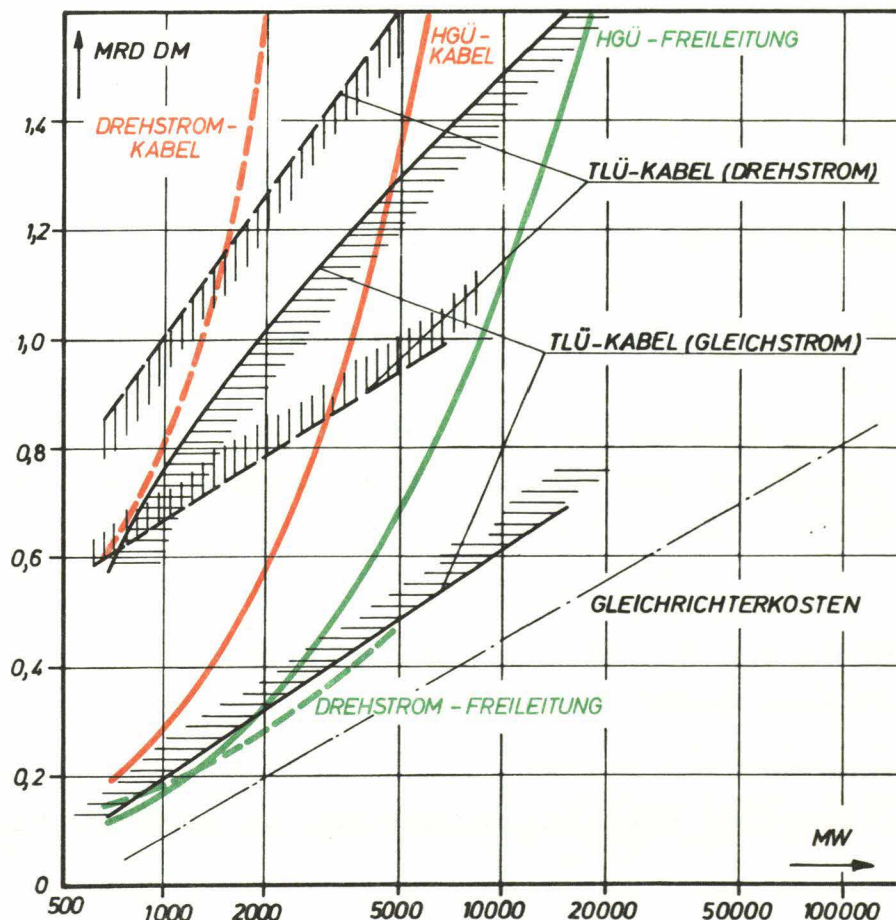


Abb. 57 Kapitalisierte Übertragungskosten von TLÜ- und konventionellen Übertragungssystemen (Leitungslänge 500 km)

Diese Unstimmigkeiten spielen aber nur beim Vergleich von Gleichstrom- und Drehstromsystemen eine Rolle, nicht aber bei einem Vergleich der Wirtschaftlichkeit von TLÜ- und konventionellen Systemen.

Die Kosten für TLÜ-Kabel liegen innerhalb der beiden Bereiche, die durch die senkrecht bzw. waagerecht schraffierten Kurven begrenzt werden. Die obere Grenzkurve zeigt die bereits heute erreichbaren, die untere Grenzkurve die nach Ansicht einiger Autoren in Zukunft zu erwartenden Kosten für Bau und Betrieb von TLÜ-Kabeln. Die Kurven für konventionelle Systeme dürfen ebenfalls nur als Mittellinien von Bereichen angesehen werden, da die Errichtungskosten je nach Gelände, Bebauung, Trassenbreite usw. recht erheblich schwanken.

Trotz der erwähnten Ungenauigkeiten geht aus Abb. 57 doch hervor, daß im Falle der Drehstromübertragung die TLÜ-Kabel bei Leistungen ab etwa 0,6 GW im günstigsten bzw. 1,6 GW im ungünstigsten Fall den entsprechenden konventionellen Kabeln überlegen sind. Bei Gleichstromübertragung sind TLÜ-Kabel den konventionellen HGÜ-Kabeln im günstigsten Fall ab etwa 2 GW, im ungünstigsten Fall ab etwa 5 GW überlegen. Während die Preisgünstigkeit der Drehstromfreileitung von TLÜ-Drehstromkabeln auch in Zukunft wohl nur schwer erreicht werden kann, dürfte das TLÜ-Gleichstromkabel bei Leistungen oberhalb 2 GW der HGÜ-Freileitung überlegen sein. In Abb. 57 erscheint die Drehstromfreileitung als günstigste Übertragungsmöglichkeit. Dabei muß aber beachtet werden, daß die Abb. 57 zugrundegelegten Kosten nur für eine Leitungslänge von 500 km gelten. Bei größeren Leitungslängen wird sich das Verhältnis der Kosten von Drehstrom- und Gleichstromsystemen zu Gunsten der letzteren verschieben

7.4 Kostenvorteile von Systemen mit supraleitenden Transformatoren und Generatoren

Bisher wurden nur die reinen Leitungskosten supraleitender und konventioneller Übertragungssysteme miteinander verglichen.

Wie aus Tabelle 7 zu ersehen ist, arbeiten supraleitende Kabel - abgesehen von den Kabeln nach Wilkinson und Neal - mit sehr viel niedrigeren Übertragungsspannungen als Freileitungen und konventionelle Kabel. Die Stärke der Isolation in den Transformatoren und Schaltanlagen kann also geringer sein.

Die Verminderung des Volumens und Gewichtes wird sich günstig auf die Kosten dieser Anlageteile auswirken.

Klaudy wählt die Übertragungsspannung gleich der Generatorspannung (6 bis 15 kV). Der kraftwerkseitige Transformator entfällt also in diesem Falle. Abb. 58 zeigt schematisch ein solches Übertragungssystem im Vergleich zu einem konventionellen.

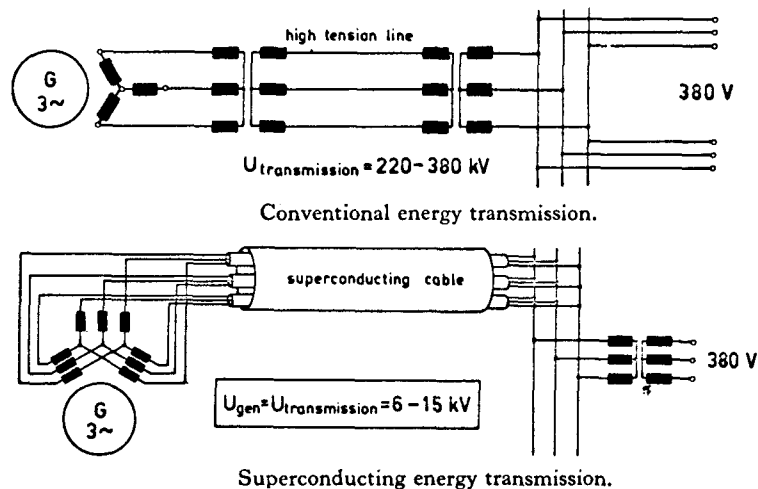


Abb. 58 : Supraleitendes Energieübertragungssystem im Vergleich zu einem konventionellen (Kla 65/1)

Die Enden eines supraleitenden Kabels bedürfen einer verstärkten Kühlung, da die Wärme über die metallischen Stromzuführungen in das Kabel einzudringen versucht. Bei supraleitenden oder tiefgekühlten Transformatoren führt der Wärmeeinfall über die Zuführungsleitungen zu einer merklichen Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades (Kla 65/1). Diese Verluste können vermieden werden, wenn man die Sekundär- bzw. Primärwicklung der Transformatoren aus supraleitendem Material oder Reinstmetall hergestellt und gemäß Abb. 59 in das Kühlsystem des Kabels mit einbezieht. Allerdings bietet die Herstellung von Transformatoren mit nur einer supraleitenden Wicklung sehr große Schwierigkeiten.

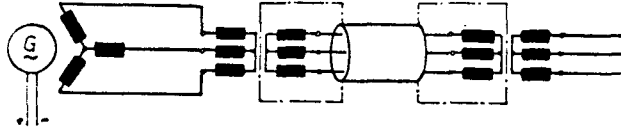


Abb. 59: Supraleitendes Energieübertragungssystem ohne Ein- und Ausführungsverluste (Kla 65/1)

Wenn die Übertragungsspannung gleich der Generatorspannung ist, läßt sich gegenüber Abb. 58 eine Verbesserung dadurch erzielen, daß man die Ankerwicklungen aus supraleitendem Material oder Reinstmetall herstellt und durch die Kühlanlagen des Kabels auf der erforderlichen Temperatur hält, wie Abb. 60 zeigt.

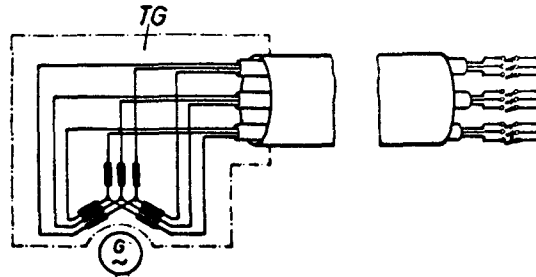


Abb. 60 : Supraleitender Generator in Verbindung mit TLÜ-Kabel.

Bei der Gleichstromübertragung ergeben sich gegenüber konventionellen Systemen noch größere wirtschaftliche Vorteile, wenn man die Übertragungsspannung gleich der Generatorspannung macht und Gleichstromgeneratoren (konventionelle oder supraleitende) verwendet. In diesem Falle sind weder Transformatoren noch Gleichrichter am Kabelanfang erforderlich.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Bei vielen Metallen, Metallegierungen und intermetallischen Verbindungen nimmt der ohm'sche Widerstand, der bei der elektrischen Leistungsübertragung die Hauptverlustquelle darstellt, mit sinkender Temperatur des Leiters ab. Bei normalleitenden Metallen beträgt der Widerstandsabfall von Raumtemperatur bis 20°K etwa vier Zehnerpotenzen, bei supraleitenden Metallen unterhalb der Sprungtemperatur mehr als zehn Zehnerpotenzen. Insbesondere bei der Leistungsübertragung mit Supraleitern kann deshalb die Stromdichte in den Leitern erheblich, und zwar von einigen A/mm^2 auf mehr als 1.000 A/mm^2 heraufgesetzt werden, ohne daß Stromwärmeverluste entstehen. Die Höhe der ausnutzbaren Stromdichte ist vielmehr nur abhängig von dem Abstand der Betriebstemperatur von der Sprungtemperatur (bei der ein Normalleiter supraleitend wird), von der Stärke des begleitenden Magnetfeldes sowie von anderen, zum Teil noch wenig bekannten Faktoren wie metallurgische Behandlung, Herstellungsverfahren, Abmessungen des Leiters usw.

Sprungtemperaturen bisher bekannter Supraleiter liegen - mit einer Ausnahme - unter 20°K . Es gibt zur Zeit keine Theorie, die die Vorausbestimmung bestimmter Eigenschaften von Metallen, Legierungen und intermetallischen Verbindungen im supraleitenden Zustand sicher ermöglicht. Viele Forscher sind der Ansicht, daß es Supraleiter mit Sprungtemperaturen wesentlich über 20°K geben muß, manche halten es sogar für denkbar, daß bei Raumtemperatur supraleitende Kunststoffe möglich sind. Insgesamt ist die Kenntnis der technologischen Eigenschaften supraleitender Materialien zur Zeit sehr lückenhaft, auf dem Gebiet der Metallforschung wird intensiv gearbeitet.

Normalleitende Werkstoffe mit sehr geringem ohm'schen Widerstand bei tiefer Temperatur und bekannter Technologie sind Aluminium, Kupfer und Beryllium. Von diesen ist Beryllium bereits unterhalb 80°K verwendbar, während Aluminium und Kupfer eine Betriebstemperatur von 20°K benötigen. Die Verarbeitung von

Beryllium ist jedoch außerordentlich kompliziert. Deshalb und wegen des zur Zeit hohen Preises scheidet Beryllium als Leitermaterial aus.

Kabel mit tiefgeköhlten Kupfer- oder Aluminiumleitern etwa bei 20°K Betriebstemperatur sind relativ unwirtschaftlich, da die verbleibenden ohm'schen Verluste einen zu hohen Kühlaufwand erfordern, der auch nicht durch den bei Supraleitern erforderlichen Mehraufwand für eine Kühlung auf 4°K ausgeglichen wird.

Die technische Herstellung von Tieftemperaturkabeln steckt noch in den ersten Anfängen. Bislang wurden keine erprobten Versuchskabel beschrieben, sondern nur Konstruktionsvorschläge gemacht. Diesen haften, wie einige Autoren erwähnen, noch viele spekulative Züge an, da die grundlegenden Daten über das elektromagnetische Verhalten der Werkstoffe in dem in Frage kommenden Temperaturbereich nur lückenhaft sind. Die Ausführungsform der Kabel wird bei den einzelnen Konstrukteuren durch die verschiedenen Überlegungen zu den elektrischen und kälte-technischen Eigenschaften bestimmt. So findet man eine Vielzahl an Kabelformen, wie konzentrische Leiter, Bündelleiter mit Innen- und Außenkühlung, Kabel für Gleichstrom- und Drehstromübertragung. Es werden außer supraleitenden Kabeln auch tiefgeköhlte Reinstmetallkabel untersucht.

Der Abstand der Kühlstationen wird nach kühltechnischen Anforderungen der Leiterkühlung sowie unter dem Aspekt der möglichst optimalen Auslegung des thermodynamischen Kreisprozesses bemessen und liegt bei max. 153 km, im Mittel zwischen 10 und 20 km. Alle Konstrukteure bemühen sich, den Wärmeeinfall von außen und die elektrischen Verluste, die bei Drehstromübertragung noch in Form von Hysterese-Verlusten auftreten können, gering zu halten, um die Kälteanlagen möglichst klein dimensionieren zu können. Bei den meisten Konstruktionsvorschlägen ist vorgesehen, zur Verlegung der Kabel kurze, weniger als fünfzig Meter lange, im Werk vorgefertigte starre Kabelabschnitte auf der Baustelle zu verschweißen, die bereits den elektrischen Leiter und die vollständige thermische Isolation enthalten;

ein anderer Entwurf sieht für alle Rohrleitungen des Kabels konzentrisch angeordnete flexible Wellrohre vor, welche die Herstellung und Verlegung von bis zu 1.500 m langen Kabelstücken ermöglichen sollen. Es werden Drehstromkabel für 150 MW bis 3.000 MW übertragene Leistung mit Leitungslängen zwischen 16 km und 500 km vorgeschlagen. Gleichstromkabel wurden für 750 MW bis 100.000 MW und Längen bis zu 1.600 km untersucht. Die Technik der supraleitenden Transformatoren und Generatoren ist deutlich weiter fortgeschritten als die der Tieftemperaturkabel. Ob bei höheren Leistungen (über etwa 100 MW) Transformatoren mit Supraleitern wirtschaftlicher arbeiten als normalleitende Transformatoren, ist noch ungeklärt. Ihre elektrischen Verluste sind zwar geringer, jedoch können diese Ersparnisse durch höhere Baukosten und durch die Betriebskosten der Kühlanlagen durchaus wieder aufgezehrt werden. Der Bau von supraleitenden Genratoren höchster Leistung erscheint durchaus möglich, so wird zum Beispiel ein 600 MW Genrator mit einem Wirkungsgrad von 99,9 % vorgeschlagen. Kleine Genratoren sind bereits als Experimentiergeräte gebaut worden. Eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von supraleitenden Übertragungssystemen, in denen auch die Generatoren supraleitend sind, wurde noch nicht beschrieben.

Zum Betrieb eines Tieftemperaturkabels nötige Hilfsanlagen wie Vakuumpumpen, Kälteanlagen und Flüssiggasleitungen erscheinen fast allen Autoren unproblematisch. Kälteanlagen mit Kälteleistungen von einigen hundert Watt bei 4°K und mehreren tausend Watt bei 20°K und höheren Temperaturen - diese Kälteleistungen entsprechen dem Leistungsbedarf von mehreren Kilometern supraleitendem Kabel - sind bereits in Betrieb. Deshalb kann festgestellt werden, daß der Stand der Kühltechnik bereits heute den Anforderungen entspricht, die beim Bau von supraleitenden elektrischen Maschinen und Kabeln gestellt werden müssen. Wasserstoff- und Stickstoffkälteanlagen für den Temperaturbereich von 20°K bis 100°K können bereits als konventionell angesehen werden. Die Weiterentwicklung der für die TLÜ erforderlichen kälte-technischen Hilfsanlagen birgt keine grundsätzlichen Probleme mehr, sondern dient vielmehr der Erreichung einer längeren Lebensdauer stark beanspruchter Teile und einer Annäherung

des Wirkungsgrades an den des idealen Kreisprozesses.

Die Kostenstruktur von TLÜ-Leitungen ergibt im Vergleich zu konventionellen Systemen folgendes Bild: Während die Übertragungskosten konventioneller Drehstrom- und Gleichstromkabel (bei sehr großen Leistungen auch diejenigen der Freileitungen) proportional der übertragenen Leistung steigen, nehmen die Kosten der supraleitenden Kabel mit wachsender Auslegungsleistung wesentlich langsamer zu. Die Betriebskosten sind bei konventionellen Systemen stark lastabhängig, da sie im wesentlichen die Kosten der elektrischen Verlustleistung darstellen. Bei der TLÜ dagegen sind die Betriebskosten praktisch lastunabhängig, da die elektrischen Verluste klein gegen den Wärmeeinfall sind. Dieses unterschiedliche Kostenverhalten beider Systeme erfordert, im Verbundnetz TLÜ-Kabel vorzugsweise für Verbindungen mit hohem Lastfaktor (Leitungen zu den Verbraucherschwerpunkten) und nicht als Verbundleitungen zu bauen.

Obwohl die Kostenabschätzungen für die Errichtung und den Betrieb supraleitender Leistungsübertragungssysteme mit relativ großen Unsicherheiten behaftet sind, kann festgestellt werden, daß die heute ausführbaren TLÜ-Kabel oberhalb einer bestimmten Leistung gegenüber konventionellen Kabeln konkurrenzfähig sind. Setzt man die zukünftige Entwicklung in Rechnung, können TLÜ-Gleichstromkabel die Errichtungskosten von HGÜ-Freileitungen erreichen. Ein weiterer erheblicher Vorteil der TLÜ-Gleichstromsysteme gegenüber konventionellen HGÜ-Systemen ergibt sich dann, wenn konventionelle oder supraleitende Gleichstromgeneratoren zur Stromerzeugung verwendet werden und dadurch die kraftwerkseitige Gleichrichteranlage entfallen kann.

Bei jedem Vergleich von konventionellen und supraleitenden Übertragungssystemen ist zu beachten, daß die konventionelle Technik auf einem guten theoretischen Fundament und einer etwa fünfzigjährigen Praxis beruht, die Supraleitungstechnik sich dagegen noch im ersten Entwicklungsstadium befindet.

9. ALPHABETISCHES VERZEICHNIS DER ZITIERTEN AUTOREN

- Ath 64 : Atherton D. L.
Superconducting DC-Generators and Motors
IEEE-Spectrum, Vol 1, Dez. 1964, S. 67-71
- Bal 68 : Baldus W.
Spezielle Anlagen der Tief- und Tiefst-
temperaturtechnik Dech.-Monogr.Bd. 58,
1968, S. 113-122
- Bar 57 : Bardeen J., Cooper L.W., Schrieffer I. R.
Theorie of Superconductivity
Phys. Rev. Vol 108, Dez. 1957, S.1175-1204
- Bec 58 : Becker W.
Eine neue Vakuumpumpe
Vak.-Techn. Bd. 7, H. 7, 1958
- Bec 61 : Becker W.
Zur Theorie der Turbo-Molekularpumpe
Vak.-Techn. Bd. 10, H. 7, 1961
- Bel 67 : Bellaschi P. L.
Der Einfluß der Transportprobleme auf Aus-
legung und Einsatz von Leistungstransforma-
toren (Auszug) ETZ-A, Bd. 88, H. 24, 1967,
S. 613
- Bog. 68 : Bogner G.
Stand der Entwicklung beim Bau großer Supra-
leitungsmagnete ETZ-A 89/1968, H. 14
- Bur 66 : Burnier P.
Cryogenics and Aluminium in Electrical
Manufacturing Adv. Cryog. Eng. Vol. 11,
1966, S. 668-674
- Car 64 : Carruthers R.
Engineering with Superconductors Discovery
Vol. 25, No 5, Mai 1964, S. 32-36
- Che 64 : Chester P. F.
High-Field Superconductors in Alternating
Fields Proc. IEE. Vol. 111, No 2, Febr. 1964,
S. 411-413

- Chi 64 : Chick D.R.
Large Scale Applications of Superconductivity
Proc. IEE, Vol. 111, No. 2, Febr. 1964,
S. 407-411
- Den 68 : Denzel P.
Zukünftige Möglichkeiten der Übertragung
elektrischer Energie
El. Wirtsch. Bd. 67, 4.1, 1968, S.1-5
- Die 62 : Diels K., Jaeckel R.
Leybolds Vakuumtaschenbuch
Springer-Verlag, Berlin, 1962
- Doo 68 : Doose C.
Tieftemperaturanlagen der Kernforschungs-
anlage Jülich
Dech.-Monogr. Bd. 58, 1968, S. 131-148
- Ede 68 : Eder F.
Methoden zur Erzeugung tiefster Temperaturen
ETZ-A 89/1968, H. 13
- Esp 68 : Espe W.
Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik
Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 1961
- Hei 68 : Heim M.
Die theoretischen Vorstellungen der Supra-
leitung ETZ-A 89/1968, H. 13
- Fee 62 : Mac Fee R.
Applications of Superconductivity to the
Generation and Distribution of Electric Power
Elec. Eng. Vol. 81, Febr. 1962, S. 122-129
- FGM 66 : 400 kV-Forschungsgemeinschaft, Heidelberg
Energieübertragung mit hochgespanntem Gleich-
strom (HGÜ) Bericht Nr. 20a, April 1966
- Fon 68 : Foner, S.E.J. McNiff, B.I. Matthias, E. Gorenzweit
Properties of High Superconducting Transition
Temperature Nb₃Al_{1-x}Ge Alloys.
LT11 Conference, Scotland, Aug. 1968
11. Int. Conf. Low Temp. Phys.
- Gar 67 : Garwin R. H., J. Matisoo
Superconducting Lines for the Transmission
of Large Amount of Electrical Power over
Great Distances
Proc. of the IEEE, Vol. 55, No.4, April 1967
- Gau 64 : Gauster W.F., Freemann D.C., Long H.M.
Applications of Superconductivity to the
Improvement of Electrical Energie Economics
Paper 56 II E (USA) World Power Conference,
Sept. 1964

- Kaf 68 : Kafka W.
Tiefgekühlte Kabel zum Übertragen elektrischer
Energie ETZ-B Bd. 20, H. 10, 1968, S. 273-277
- Kah 66 : Kahnt R.
Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte
für die Energieübertragung mit Höchstspannung
Siem.-Z. Bd. 40, H. 9. Sept. 1966, S.651-659
- Kie 62 : Kienel G.
Getter-Ionenpumpen, Wirkungsweise, Aufbau und
Verwendungsmöglichkeiten in Wissenschaft und
Technik
Chem. Ing. Techn. Bd. 34, 1962, S. 95-105
- Kla 64 : Klaudy P.A.
Some Experiments Relating to the Layout of
Superconducting Transformers
Adv. Cryog. Eng. Vol. 9, 1964, S. 349-359
- Kla 65 : Klaudy P.A.
Some Remarks on Cryogenic Cables
Adv. Cryog. Eng. Vol. 11, 1965, S. 684-693
- Kla 65/1 : Klaudy P.A.
Elektrische Energieerzeugungs- und Übertra-
gungseinrichtungen
E. u. M. Bd. 82, H. 6, 1965, S. 275-281
- Kla 68 : Klaudy P.A.
Supraleitende Kabel
ETZ-A 89/1968, H. 14
- Krä 68 : Krämer H., Schulten R., Wagemann K.
Die langfristige wirtschaftliche Bedeutung
des gasgekühlten Hochtemperaturreaktors
Nukleonik, Bd. 11, H. 1, 1968, S. 44-53
- Kup 66 : Kuper C.G.
Little's Proposal für a Superconducting
Organic Polymer
Phys. Rev. Vol. 150, No. 1, Okt. 1966, S.189-192
- Kur 67 : Kurti N.
Electric Power at Low Temperatures
New Scientist, Bd. 7, Dez. 1967
- Lin 68 : Linde H.
Die Bedeutung der Tieftemperaturtechnik
in der modernen Wirtschaft
Dech.-Monogr. Bd. 58, 1968, S. 87-100

- Lit 64 : Little W.A.
Possibility of Synthesizing an Organic
Superconductor
Phys.Rev., Vol. 134, No. 6 A, Jun. 1964,
S. 1416-1424
- Lit 67 : Little W.A.
Die Zukunft der Supraleitung
Bild d. Wiss. Bd. 6, Jun 1967, S. 473-479
- Mai 62 : Maimoni A.
Electrical Resistance of Aluminium at
Low Temperatures. Cryogenics, Jun. 1962,
S. 217-222
- Mas 68 : Massar E.
Aspekte der Anwendung tiefer Temperaturen
in der Elektrotechnik
ETZ 89/1968, H. 14
- Mea 66 : Meaden G.T.
Electrical Resistance of Metals
Heywood Books, London, 1966
- Men 67 : Mendelsohn
Die Geschichte der Supraleitung
Bild d. Wiss. Bd. 3, Mar. 1967, S. 219-228
- Müh 64 : Mühlschlegel B.
Theorie der Supraleiter zweiter Art
Plenarvorträge der Physikertagung, Düsseldorf 19
S. 153-176
- Mul 68 : Muller J.
Supraleitende Materialien
ETZ-A 89/1968, H. 13
- Nor 67 : Norris C.J., Swift D.A.
Development and Design of Superconducting
Cables Electrical World, Jul. 1967, S.50-53
- Nea 68 : Neal S.
Cryogenic Transmission of large blocks of
power. ZS. Cryog. Eng. News (8) 1968
- Obe 67 : Oberhauser C.J., Kinner H.R.
Some Considerations in the Design of a
Superconducting Alternator
13. Cryog. Eng.Conf., Stanford Univ.Kalif.
Aug. 1967, Paper E-G.
- Onn 11 : Onnes H.K.
Communication Nr. 1240
Phys. Lab. Universität Leiden, 1911

- Pau 64 : Paul, Freyschmitt, Wittenberg
Tieftemperaturtechnik, Anlagen und Bauelemente für Leitung, Transport und Lagerung, speziell von flüssigem Wasserstoff, sowie Tieftemperatureigenschaften von Metallen, Legierungen und nichtmetallischen Werkstoffen. Eine Literaturzusammenstellung.
Sept. 64, Jül-Bibl-4
- Poh 57 : Pohl R.W.
Einführung in die Physik Bd. II, Elektrizitätslehre Springer-Verlag, Berlin, 1957
- Rho 64 : Rhodes R.G. et al.
Measurements of 50 c/s-Losses in Superconductors Cryogenics, Aug. 1964, S. 206-208
- Rob 68 : Robinson G.Y., Pastuhov, A.V.
Large-Scale Low-Temperatur Refrigerators (to 2°K) for Nuclear Studies
Dech.-Monogr. Bd. 58, 1968, S. 123-129
- Rog 67 : Rogers E.C., Edwards D.R.
Design for a 750 MVA Superconducting Power Cable
Electrical Review, No. 8, Sept. 1967, S. 348-351
- Sch 57 : Schimpke P.
Technologie der Maschinenbaustoffe
S. Hirzel-Verlag, Stuttgart 1957, S. 78
- Sco 60 : Scott R.B.
Cryogenic Engineering
Verlag Van Nostrand, New York, 1969
- Sel 68 : Sellmaier A.
Kühlung und Isolierung von Bauteilen der Starkstromtechnik bei sehr tiefen Temperaturen
ETZ-A 89/1968, H. 13
- Swi 67 : Swift D.A.
Prospects for the Superconducting A.C.-Power Cable
12. Internat. Congress of Refrigerations, Madrid, 30. Aug. - 6. Sept. 1967, Paper 1.46
- Tre 63 : Trepp C.
Die Flüssigwasserstoff-Kälteanlage der 2-Meter-Blasen-Kammer des CERN
Techn. Rundschau Sulzer, Bd. 45, H. 3, 1963
- Tre 68 : Trepp C., Liem T.H.
Helium-Kälteanlagen und -Verflüssiger für kontinuierlichen Betrieb
Dech.-Monogr., Bd. 58, 1968, S. 17-30

- Van 63 : Vance W.
Cryogenic Technology
Verlag John Wiley & Sons, New York, 1963
- Vol 66 : Volger J.
The Generation of Heavy Currents in Superconducting Circuits
Adv. Cryog. Eng. Vol. 11, 1966, S.98-104
- Wal 68 : Walker A.J., Lessels, I.
Maßnahmen zur Erzielung kleinster Wärmeverluste in Flüssiggasleitungen für Forschungszwecke
Dech.-Monogr. Bd. 58, 1968, S. 149-164
- Wea 66 : Weast C.R.
Handbook of Chemistry and Physics
Cleveland, 46, Aufl., 1966
- Wei 67 : v. Weiss A.
Energieversorgung durch Mikrowellen-Energieübertragung ETZ-A, Bd. 88, H. 21, 1967, S. 521-527
- Wil 66 : Wilkinson K.J.R.
Prospect of Employing Conductors at low Temperatures in Power Cables and Power Transformers
Proc. IEE, Vol. 113, No. 9, Sept. 1966, S. 1509 - 1521
- Wip 63 : Wipf S.L.
A Superconducting D.C. - Generator
Adv. Cryog. Eng. Vol. 9, 1964, S. 342-348
- Wut 65 : Wutz M.
Theorie und Praxis der Vakuumtechnik
Verlag Vieweg, Braunschweig, 1965

Ein Verzeichnis weiterer - in dieser Arbeit nicht zitierter - Veröffentlichungen ist in Vorbereitung.

Vom Cryogenic Data Center, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, wurden im Mai 1968 zwei Literaturrecherchen zu den Stichworten "Superconducting Transmission Lines" und "Superconducting Motors, Generators and Transformers" durchgeführt:

Bibliography of References, Superconducting Motors, Generators and Transformers, NBS-CDC, 15. Mai 1968;

Bibliography of References, Superconducting Transmission Lines NBS-CDC, 22. Mai 1968

Abkürzungen

Dech.-Monogr.	Dechema-Monographien
Phys. Rev.	Physical Review
Vak. Techn.	Vakuum Technik
ETZ-A	Elektrotechnische Zeitschrift - Ausgabe A
ETZ-B	Elektrotechnische Zeitschrift - Ausgabe B
Proc. of the IEE	Proceedings of the Institute of Electronic and Electric Engineries
Adv. Cryog. Eng.	Advances in Cryogenic Engineering
Proc. IEE	Proceedings of the Institute of Electric Engineers
El. Wirtsch.	Elektrizitätswirtschaft
Pow. Eng.	Power Engineering
Elec. Eng.	Electrical Engineering
Siem.Zt.	Siemens-Zeitschrift
Chem. Ing. Tech.	Chemie-Ingenieur-Technik
E. u. M.	Elektrotechnik und Maschinenbau
Bild d. Wiss.	Bild der Wissenschaft