

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

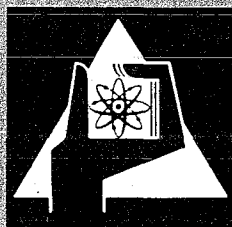
April 1972

KFK 1616

Institut für Experimentelle Kernphysik

Energieübertragung, Energiespeicherung und tiefe Temperaturen

W. Heinz



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Kernforschungszentrum Karlsruhe

April 1972

KFK 1616

Institut für Experimentelle Kernphysik

ENERGIEÜBERTRAGUNG, ENERGIESPEICHERUNG
UND TIEFE TEMPERATUREN *)

W. Heinz

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

*) Überarbeitete Fassung des Plenarvortrages, gehalten auf der Reaktortagung 1972 des Deutschen Atomforums und der Kerntechnischen Gesellschaft im Deutschen Atomforum (KTG) vom 11.4. - 14.4.1972 in Hamburg

Abstract

Der Energiekonsum der Welt ist in ständigem Wachstum begriffen und wird unvorstellbare Ausmaße annehmen. Eine besondere Rolle kommt dabei der elektrischen Energieversorgung und hier wiederum der mit Kernenergie zu. Standortfragen für Kraftwerke und Kühlprobleme gewinnen an ständiger Bedeutung. Die Deckung des Energiebedarfs kann nicht allein unter ökonomischen Gesichtspunkten erfolgen, mehr und mehr rücken ökologische und soziale Fragen in den Vordergrund.

Energieerzeugung in großen Einheiten (nuclear parks) in der Nähe der Kühlmittel-Ressourcen zusammen mit einem Energieversorgungsnetz, das weiträumige Transport-, Reserve- und Verteilungsfunktionen erfüllt, könnte die zukünftige Energieversorgung ohne unzulässige Umweltbelastung in den Ballungszentren sicherstellen. Supraleitende Energieübertragungssysteme erscheinen in diesem Zusammenhang wegen ihrer geringen Leistungsabhängigkeit besonders attraktiv.

Es werden die technischen Probleme und Grenzen der konventionellen und Supraleitungstechnologie diskutiert, der augenblickliche Stand der Forschung dargestellt und ein ökonomischer Vergleich der Energieübertragungssysteme gegeben.

The energy consumption of the world is steadily increasing and may reach some unpredictable degree. In this respect the electrical energy and hereby the nuclear energy are of great importance. Site and cooling problems of power stations are steadily gaining in importance. The supply of the wanted energy cannot be considered only under an economical point of view but ecological and social aspects are coming more in the forefront. Power production in large units (nuclear parks) near cooling resources, together with a power supply system which fulfills widespread transport, reserve and distribution functions, could guarantee the future energy supply without

intolerable environmental load of industrial complexes, large cities and living centers.

In this respect superconducting power transmission systems appear to be especially attractive, because of their modest dependance of power on cost.

Technical problems and limits of conventional and superconducting technology are discussed, the state of art and an economical comparison of power transmission systems is given.

1. Einleitung

Der Energiekonsum der Welt ist in ständigem Wachsen begriffen, weil sowohl die Bevölkerungszahl als auch der spezifische Verbrauch zunehmen. Selbst wenn der Bevölkerungszuwachs unseres Planeten sich verlangsamen oder zum Stillstand kommen sollte, wird der Energiebedarf weiterwachsen, weil sich bisher unterentwickelte Völker und Wirtschaften entwickeln.

Die Prognosen über den zukünftigen Energiebedarf stimmen darin überein, daß alle 20 Jahre eine Verdoppelung des Energiebedarfs erfolgen wird. Die Nachfrage nach Elektrizität wird dabei stärker als der Bedarf an Primärenergie wachsen. Energiefachleute rechnen auch weiterhin mit einer Verdoppelung des Bedarfs an elektrischer Energie in 10 Jahren.

Die Deckung des Energiebedarfs kann aber nicht allein unter ökonomischen Gesichtspunkten erfolgen. Mehr und mehr werden wir bereit sein müssen, umwelt-orientierte Technologien zu entwickeln und einzusetzen, ohne dabei auf den Pfennig zu schauen.

Der elektrischen Energieversorgung kommt dabei eine besondere Rolle zu. Wachsende Einheiten auf der Erzeuger- und Verbraucherseite rücken Standortfragen von Kraftwerken und Industrieanlagen und damit Fragen der Energieübertragung und -verteilung in den Vordergrund. Unsere Zivilisation wird je komplexer desto abhängiger von ihren Energiequellen. Zur Vermeidung fataler Energieausfälle müssen ausreichende Energiereserven zur Verfügung stehen. Die Energiesicherung erfordert sowohl großräumige Verbundsysteme als auch lokale Energiespeicher.

Das Problem der sauberen und der sicheren Energie wird für unsere zukünftige Energieversorgung überragende Bedeutung gewinnen.

2. Situation der Energiewirtschaft heute

2.1 Bedarf und Erzeugung elektrischer Energie

Die Bevölkerung unserer Erde nimmt jährlich um 2 % zu. Die Zuwachsrate in der BRD beträgt 0,7 %. Fig. 1 zeigt, daß im Jahre 2000 7 Mrd. Menschen die Erde bewohnen, wenn diese Zuwachsrate erhalten bleibt; in der BRD werden dann 75 Mio Menschen leben.

Fig. 2 zeigt den Primärenergieverbrauch der BRD in Mio t SKE, der bei konstantem Wachstum von 3 % im Jahre 2000 den 2,5-fachen Wert von heute hat. Stärker wächst der Anteil der elektrischen Energie. Bei konstanter Zuwachsrate von 7,3 % würde er im Jahre 2000 80 % des Gesamtenergiebedarfs ausmachen. Heute beträgt sein Anteil 25 %. Der gezeichneten Kurve liegt eine abnehmende Zuwachsrate für die elektrische Energie zugrunde, wie sie einer vorsichtigen Prognose entspricht.

Dabei erfolgt langfristig eine Umstrukturierung bei den Primärenergieträgern zu Gunsten der Kernenergie. Konventionelle Wärmekraftwerke werden 1985 noch den Hauptenergiebedarf decken, Kernkraftwerke werden aber schon einen Anteil von über 30 % haben und im Jahre 2000 den elektrischen Energiebedarf zu mehr als der Hälfte (bis zu 80 %) decken.

Aus ökonomischen Gründen wächst die Größe der Kraftwerkseinheiten. Blöcke von mehr als 1 GW sind in der BRD im Bau (Biblis). Kraftwerke von mehr als 5 GW werden in Fachkreisen diskutiert. Die optimale Größe einer Kraftwerkseinheit ist dabei nicht nur von wirtschaftlichen Überlegungen, sondern in zunehmendem Maße von der erforderlichen Leistungsdichte und der resultierenden Umweltbelastung bestimmt.

2.2 Standortfragen und Kühlsituation

Die Wahl des Standorts großer Kraftwerkseinheiten wird schon heute aus Gründen des Umweltschutzes heftig diskutiert und

sicherlich zu einer der entscheidenden Fragen beim weiteren Ausbau unserer Energieversorgung werden. Dabei beherrscht die Kühlsituation mehr und mehr die Diskussion. Gestatten Sie mir daher einen Seitenblick auf die Ergebnisse von Untersuchungen zu diesem Problem.

Über die Möglichkeiten der Frischwasserkühlung am Rhein gibt der von der Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins aufgestellte Wärmelastplan ¹⁾ eine richtungweisende Antwort. Das Ergebnis ist tabellarisch in Fig. 3 zusammengefaßt. 1975 wären bei reiner Frischwasserkühlung die vorhandenen Reserven aufgebraucht, 1985 erheblich überschritten. Daher werden schon heute keine Kraftwerke mit reiner Frischwasserkühlung genehmigt und gebaut.

Mit einer Kühlkapazität von 20 GW_{el} wären beim weiteren Zubau von 150 GW_{el} bis zum Jahre 1990 mindestens sieben weitere Flüsse mit der Wasserführung des Rheins bei ausschließlicher Frischwasserkühlung erforderlich. Frischwasserflußkühlung allein bietet keine langfristige Lösung des Kühlproblems.

Ebensowenig löst aber Wasserrückkühlung mit Naßkühltürmen langfristig das Kühlproblem. Das mögen die folgenden Zahlen zeigen. Ein Kernkraftwerkblock von $1,2 \text{ GW}_e$ (Leistung des Kernkraftwerkes Biblis) produziert eine Abwärme von 550 Mkal/s , entsprechend 650 kg/sec Verdunstungswasser. Das sind 10% der natürlichen Verdunstung des Bodensees. Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von $400 - 500 \text{ GW}_e$, wie sie für das Jahr 2000 zu erwarten ist, würden etwa 10% der natürlichen Wasserverdunstung in der BRD ausmachen. Der Einfluß auf den Grundwasserspiegel ist noch nicht untersucht. Jedoch ist schon heute das Trinkwasserproblem regional kritisch.

Bleibt die indirekte Luftkühlung mit Trockenkühltürmen. Die an die Luft gegebene Abwärme des genannten Kraftwerkes entspricht der mittleren natürlichen Einstrahlung auf eine Fläche von 10 km^2 . Kraftwerke mit einer Leistung von 500 GW erzeugen Abwärme, die

gleichmäßig auf die BRD verteilt, 1,6 % der natürlichen Einstrahlung ausmachen. Beträchtliche lokale Temperaturerhöhungen und Beeinflussungen des Mikroklimas in der Nähe von Energieknotenpunkten sind zu erwarten.

Die ökologischen Auswirkungen sind bisher nicht untersucht. Ein flexibles Zusammenspiel aller vorhandenen Kühlmöglichkeiten läßt das Kühlproblem für die nähere Zukunft beherrschbar erscheinen, wird aber kritisch, wenn der Energiekonsum sich verzehnfacht haben wird. Ein wirtschaftlicher Aspekt bleibt zu vermerken. Die Mehrkosten für die Stromerzeugung je kWh belaufen sich bei der Verwendung von Trockenkühltürmen auf 0,1 bis 0,2 Dpf/kWh²⁾. Dafür könnte die Energie über eine Entfernung von einigen hundert Kilometern transportiert werden, wenn etwa am Erzeugungsort (Meer) billiges Kühlwasser zur Verfügung steht. Damit rücken elektrische Energieübertragungs- und -verteilungssysteme in einen ganz anderen Blickwinkel.

2.3 Elektrische Energieübertragungs- und -verteilungssysteme

Ein Übertragungsnetz ist in seiner Auslegung durch die Lage der Kraftwerke zum Verbraucher und durch die zu übertragende Leistung bestimmt. In der BRD betrug die 1970 installierte Engpaßleistung 51,3 GW. Für das Jahr 2000 ist bei gleichbleibender Zuwachsrate eine Engpaßleistung von 425 GW zu erwarten.

Kraftwerke werden in der Bundesrepublik in der Nähe und in den Verbrauchszentren errichtet. Die Verbrauchsschwerpunkte bilden autarke Netzgruppen mit Leistungen bis zu 10 GW.

Die Verbindung der Netzgruppen untereinander dient im wesentlichen der Reservehaltung und der Erhöhung der Versorgungssicherheit beim Ausfall einzelner Einheiten. Die gegenseitigen Austauschleistungen sind gering.

Man wird auch in der näheren Zukunft versuchen verbrauchernah zu installieren, so daß in der BRD die mittleren Übertragungsentfernungen kaum über 100 km hinausgehen werden. Das Rückgrat

der Energieversorgung wird dann ein ausgebautes 380 kV Hochleistungs-Freileitungsnetz bilden, das nach Meinung der Experten noch mindestens bis 1985 ³⁾ in der Lage sein dürfte, den wachsenden Anforderungen zu genügen. Schwierigkeiten bereitet jedoch schon heute die Versorgung von Ballungszentren mit Lastdichten bis zu 100 MW/km^2 , weil der notwendige Trassenraum fehlt.

Eine 380 kV Trasse ist 82 m breit. Sie kann mit 4 Systemen belegt werden. Die Übertragungsleistung beträgt beim Betrieb mit der zweifachen natürlichen Leistung 5200 MW. Beim Übergang auf höhere Spannungsebenen, 765 kV bzw. 1100 kV, bleibt die Trassenbreite etwa erhalten, allerdings kann dabei die Trasse mit nur zwei bzw. einem System belegt werden. Die gesamte Übertragungsleistung einer Trasse ergibt sich damit zu 8000 MW bzw. 8800 MW ⁴⁾.

Für die Versorgung von Ballungszentren stehen heute Hochdruck-Ölkabel mit einer maximalen Übertragungsleistung bis 450 MW bei einer Betriebsspannung von 380 kV zur Verfügung. Durch Wasserumlaufkühlung kann die Übertragungsleistung auf 1500 MW vergrößert werden. Übergang zu einer höheren Spannungsebene (765 kV) ist bei Verwendung geeigneter Dielektrika möglich. Die Übertragungsleistung wird dabei aber kaum erhöht, da sie durch die zulässige Wärmeabgabe an die Umgebung bestimmt ist. Zur Verdeutlichung der notwendigen Übertragungsleistungen in Ballungszentren mögen zwei Zahlen dienen:

Bis zum Jahre 1990 werden für Hamburg eine installierte Leistung von 7000 MW und für New York von 20000 MW erwartet. Bei anhaltender Entwicklung verdoppeln sich diese Zahlen bis zum Jahr 2000.

3. Anwendung tiefer Temperaturen bei der Speicherung und Übertragung von elektrischer Energie

3.1 Supraleitung

Nachdem deutlich geworden ist, daß der Energieübertragung und -speicherung bei der Lösung der Probleme der langfristigen Energieversorgung eine besondere Bedeutung zukommen kann, stellt sich die Frage, ob im Bereich der Tieftemperatur- und Supraleitungstechnologie solche Lösungen zu suchen und finden sind. Man kennt heute über 1000 supraleitende Elemente und Verbindungen, davon sind allerdings nur wenige technisch brauchbar.

Die zweifellos auffälligste Eigenschaft eines Supraleiters ist die Supraleitung, das heißt die Abnahme des elektrischen Widerstandes um mindestens 15 Zehnerpotenzen.

Weiteres Charakteristikum eines Supraleiters ist seine Sprungtemperatur. Wird sie überschritten, tritt Normalleitung ein. Die tatsächlich gemessenen Übergangstemperaturen sind nun nicht sonderlich hoch. Die höchste bisher gemessene Sprungtemperatur zeigt eine Legierung aus Nb-Al-Ge mit 21 K. Technische Anwendungen haben bisher Supraleiter mit einer Sprungtemperatur bis zu 18,5 K gefunden (Nb_3Sn). Zum Vergleich sei gesagt, daß Wasserstoff bei 20 K und Helium bei 4,2 K flüssig werden.

Fig. 4 zeigt die Entwicklung von Supraleitern mit immer höherer Sprungtemperatur im Laufe der Zeit. Der Traum des Ingenieurs und Physikers ist ein Supraleiter bei Zimmertemperatur. Vorsichtige Supraleitungsexperten schätzen die obere erreichbare Grenze für supraleitende Materialien auf 30 K. Eine relativ geringe Temperaturerhöhung, aber mit enormen technischen Konsequenzen! Es wäre dann Wasserstoffkühlung mit gegenüber Heliumkühlung zehnfach verbesserter Kühlökonomie möglich.

Der Supraleiter hat als weiteres Charakteristikum ein besonderes Verhältnis zum Magnetfeld. Es existiert ein kritisches Magnetfeld, oberhalb dessen keine Supraleitung bestehen kann. Da sich ein elektrischer Strom ebenfalls mit einem Magnetfeld umgibt, existiert auch ein kritischer Strom, der nicht ohne Schaden für die Supraleitung überschritten werden kann. Das Existenzgebiet der Supraleitung ist von einer kritischen Fläche (Fig. 5) begrenzt. Durchstößt man durch Überschreiten irgend einer der drei Größen, Temperatur, Magnetfeld oder Strom, die kritische Fläche, so tritt Normalleitung ein. Die absoluten Größen der kritischen Parameter sind stark materialabhängig.

Im supraleitenden Zustand ist das Leiterinnere zunächst strom- und feldfrei. Die Supraströme fließen in einer sehr dünnen ($\sim 10^{-7}$ m) Oberflächenschicht und schirmen das Leiterinnere bis zum Überschreiten eines ersten kritischen Feldwertes H_{c1} vollständig ab. Es gibt zwei Typen von Supraleitern unterschieden nach ihrem Verhalten oberhalb dieses kritischen Feldes:

Bei "weichen" oder Typ I Supraleitern dringt das Feld nach Überschreiten des kritischen Wertes sprunghaft ein, und der Supraleiter geht sprunghaft in den normalleitenden Zustand über. Bei "harten" oder Typ II Supraleitern bildet sich dagegen ein Mischzustand aus, wo Feld in Form von Flußschläuchen ins Innere eindringt. Die Supraleitung bleibt nun bis zu einem zweiten kritischen Feldwert H_{c2} erhalten. Erst dann werden Typ II Supraleiter ebenfalls sprunghaft normalleitend.

Weiche und harte Supraleiter unterscheiden sich ganz wesentlich in ihrem Wechselfeldverhalten. Die ersten zeigen geringe Wechselfeldverluste, haben aber wegen der niedrigen kritischen Feldwerte auch geringe Strom- und Feldtragfähigkeit. Die zweiten sind Hochstrom- und Hochfeldsupraleiter, durchlaufen jedoch beim Auf- und Abmagnetisieren im Wechselfeld eine irreversible Hystereseurve, was hohe Wechselfeldverluste bedingt.

Zu den Typ I Supraleitern gehören viele reine Metalle mit ungestörter Gitterstruktur. Zu den "harten" Typ II Supraleitern

gehören zahlreiche Legierungen. Das "Härten" wird durch Kaltverformen, Legieren, ganz allgemein durch gezieltes Einbringen von Defektstrukturen erreicht. Hier werden die höchsten kritischen Felder, Stromtragfähigkeiten und kritischen Temperaturen beobachtet. Fig. 6 gibt einen Überblick über einige ausgewählte, technisch interessante Supraleiter. Den Verlauf der kritischen Stromdichte mit dem Magnetfeld für drei im Magnetbau verwendete Legierungen zeigt Fig. 7.

3.2 Supraleitende Energiespeicher

3.2.1 Vergleich von Energiespeichern

Supraleitende Magnete sind in der Lage, elektromagnetische Energie in besonderer Form zu speichern: Verlustfrei, mit hoher Energiedichte und in großen Volumina. Die in einem Magnetfeld gespeicherte Energie ist proportional zum Feldvolumen und dem Quadrat des Feldes

$$W = \frac{1}{2\mu_0\mu} \int B^2 dV$$

Für ein mit heutigen Supraleitern erreichbares Magnetfeld von 15 T ergibt das eine Energiedichte von etwa 100 MJ/M^3 bzw. 30 kWh/m^3 . Im Vergleich dazu sind in Fig. 8 die Energiedichten und spezifischen Investitionskosten anderer Energiespeicher angegeben. Hinsichtlich der Energiedichten sind supraleitende Energiespeicher chemischen Speichern vergleichbar, was die Verfügbarkeit der Energie betrifft, überlegen.

3.2.2 Supraleitende Magnete heute

Supraleitende Magnete haben heute in der Forschung weit verbreiteten Einsatz gefunden: Immer dort, wo hohe magnetische Gleichfelder ($> 2 \text{ T}$) oder große felderfüllte Volumina ($> 1 \text{ m}^3$) erforderlich sind. Große supraleitende Gleichstrommagnete werden u.a. für den Bau von Detektoren in der Hochenergiephysik ver-

wendet. Der größte dieser Magnete wird zurzeit in Genf am CERN für die große europäische Blaskammer BEBC in Betrieb genommen.

Der Magnet besteht aus zwei übereinander angeordneten supraleitenden Spulen, die ein homogenes Magnetfeld von 3,5 T erzeugen. Die Spulen haben einen Außendurchmesser von 6 m, eine Höhe von 1,6 m und eine Dicke von 0,65 m. Das Feldvolumen beträgt 90 m^3 . Es speichert eine Energie von 800 MJ oder 222 kWh (Fig. 9). Die Leiter für große Gleichstrommagnete sind voll stabilisiert, d.h. der Supraleiter ist in eine normalleitende Matrix von genügendem Querschnitt eingebettet, die im Fall der Zerstörung des supraleitenden Zustandes durch Überlastung den Gesamtstrom übernehmen kann, bis der Supraleiter wieder stromführend wird. Der so armierte Leiter kann gleichzeitig einen Teil der starken im Betrieb auftretenden Lorentzkräfte aufnehmen.

Die größte zurzeit in der Planung befindliche Tieftemperaturanlage ist ein gepulster supraleitender Magnetring für den großen europäischen Beschleuniger in Genf. Der Magnetring hätte einen Umfang von 7 km, davon sind etwa 5,3 km von supraleitenden Magneten ausgefüllt. Die gesamte im Ring gespeicherte Energie wird 150 - 300 kWh betragen. Sie schwingt innerhalb eines Zyklus von einigen Sekunden von einem Energiespeicher zum Magnetring und zurück.

Auch der Energiespeicher könnte supraleitend sein. Er besteht aus einem gekoppelten Mehrspulensystem, drei ineinander geschichteten konzentrischen Kugelmagneten, bei dem durch mechanische Veränderung des Kopplungsgrades der verlustlose Energiefluß vom Magnetring zum Speicher und zurück bewirkt wird ⁵⁾.

Es geht weder Energie verloren, noch wird das Netz beim Auf- und Abbau des Magnetfeldes mit Blindlast belastet. Eine ähnliche Anordnung ist für die Energiespeicherung bei quasistatischen, langsam gepulsten Fusionsreaktoren geeignet.

Die Leiter für gepulste supraleitende Magnete müssen verlustarm sein. Zur Verringerung der Wechselstromverluste werden zahlreiche, extrem dünne und in sich verdrillte Filamente in eine Kupfermatrix

eingebettet und zu einem Kabel verwoben. Die Kupfermatrix hat dabei nur Trägerfunktion und könnte durch ein dielektrisches Material ersetzt werden. Der Leiter ist eigenstabil, d.h. er bleibt innerhalb einer gegebenen Überlastmarge stabil. Wird sie überschritten, so geht die Stabilität der Leiter verloren, der Magnet "quencht". Die Sicherheit der Anlage muß durch äußere Schaltmaßnahmen gewährleistet werden.

Die Entwicklung gepulster supraleitender Magnete ist ein Vorläufer für den Bau von Wechselfeldmagneten zum Einsatz bei supraleitenden Generatoren, Transformatoren oder Wechselfeldmaschinen.

Soweit der Bericht über den Stand der Magnettechnik heute. Solche Schritte zur Realisierung immer größerer Anlagen sind wie die Teilstücke einer großen Brücke bis zum nächsten Pfeiler. Sie geben Sicherheit im doppelten Sinn: Sie sichern das Erreichte und sind zugleich fester Ausgangspunkt für den weiteren Brückenschlag.

3.2.3 Supraleitende Magnete für die Energietechnik

Wie kann eine zukünftige Energietechnik von solchen Untersuchungen und Entwicklungen profitieren? Die Erzeugung von elektrischer Energie mit Hilfe von Fusionsreaktoren oder MHD-Generatoren ist an supraleitende Magnete gebunden. Der Leistungsbedarf konventioneller Magnete bei etwa vergleichbaren Anlagekosten ist hundert bis tausendfach höher und würde zu einem wirtschaftlich untragbaren Strompreis führen.

Der wirtschaftliche Bereich für den Einsatz von supraleitenden Spulen beginnt bereits bei gespeicherten Energien oberhalb 10 kWh. Ein Fusionsreaktor wird nach heutigen Kenntnissen wirtschaftlich mit Blockgrößen oberhalb 1 GW. Die erforderlichen Feldvolumina dafür liegen um 1000 m^3 . Wegen des notwendigen kleinen Verhältnisses β von Plasmadruck zu Magnetfelddruck werden Magnetfelder von 10 T in Betracht gezogen. Der Energieinhalt beträgt dann mehr als 10 MWh.

Der toroidale Einschlußmagnet für einen Fusionsreaktor vom Tokamaktyp mit einer thermischen Leistung von 5 GW_{th} hätte Abmessungen wie sie Fig. 10 zeigt. Die gespeicherte Energie beträgt $12,5 \text{ MWh}$, die maximal auftretende Zugkraft 260 MN/m^2 . Aus Sicherheitsüberlegungen und aus konstruktiven Gründen ist die Toroidspule in elektrisch und thermisch entkoppelte Einzelsegmente aufgeteilt.

Der Leiter ist voll stabilisiert. Die mittleren Stromdichten des Spulenpaketes sind daher und wegen der notwendigen Bandagierung zum Abfangen der Kräfte klein und liegen um 1000 A/cm^2 .

Eines der Hauptprobleme großer Magnete stellt die Beherrschung der großen magnetischen Kräfte dar, die als Lorentzkräfte aus Stromdichte, Radius und Flußdichte anwachsen. Zum Auffangen dieser Kräfte ist die Spule mit hochfestem Strukturmaterial bandagiert. Auf die einzelnen Spulensegmente eines Torus wirken Radialkräfte, die sie als Ganzes zum Zentrum des Torus hinziehen, Axialkräfte, die die einzelnen Windungslagen komprimieren, und am Spulenumfang angreifende Kesselkräfte, die die Einzelspule radial auseinander zu sprengen suchen. Die Konstruktion eines solchen Magneten ist die Kunst einer detaillierten Balance aller dieser Kräfte.

Es dürfte die Frage interessieren, was im Falle des Versagens der Anlage mit der gespeicherten Energie geschieht. Die Energiedichte bezogen auf die supraleitende Spule beträgt $10 - 20 \text{ Ws/g}$, so daß bei adiabatischer Energiefreisetzung und gleichmäßiger Verteilung auf das Spulenvolumen nur eine geringe mittlere energetische Belastung auftritt. Eine kurzzeitige Überlastung des Supraleiters bleibt wegen der Vollstabilisierung ohne Einfluß. Ein Versagen der Kühlanlage läßt wegen der großen Wärmekapazität des Heliums genügend Zeit zur Auskopplung der magnetischen Energie in eine äußere Last. Gefährlich sind lokale Überhitzungen, etwa durch Abquetschen von Kühlkanälen oder mechanischen Zerstörungen des Leiters. Es springt dann der elektrische Widerstand und damit die Spannung momentan auf hohe Werte. Aufteilen der Gesamtanlage

in entkoppelte und beherrschbare Einzelsegmente zusammen mit schnellen Abschalteinheiten lassen das Sicherheitsproblem lösbar erscheinen.

Es liegt nun der Gedanke nahe, supraleitende Magnete als Großenergiespeicher einzusetzen. Eine GWh ist die Energie, die ein Kraftwerk mit einer Leistung von 1 GW in einer Stunde liefert. Ein supraleitender Energiespeicher solcher Kapazität würde im Verbundbetrieb mit einem Kraftwerk eine momentane und damit besonders wertvolle Energiereserve für Verbrauchsspitzen oder bei Energieausfällen gestatten, wenn kein anderer Energiespeicher zur Verfügung steht. Das ökonomischste Magnetsystem zur Energiespeicherung hat Kugel-Geometrie. Eine Energiekugel für 2,5 GWh hat einen Radius von 35 m bei einer Feldstärke von 10 T. (Fig. 11). Ihr Energieinhalt entspricht der 4-fachen Speicherkapazität des Pumpspeicherwerkes Geesthacht. Die benötigte Menge Supraleiter beträgt $1,7 \cdot 10^{11}$ Am, das sind 17 000 km eines 10 000 A-Kabels. Eine toroidale Geometrie des Energiespeichers ist möglicherweise die technisch optimalere Lösung. Den Vergleich einiger Parameter beider Systeme gestattet Fig. 12.

Für die Gesamtanlage ist heute etwa das Zehnfache der Anlagekosten eines Speicherkraftwerkes zu zahlen. Das heißt aber nicht, daß solche Anlagen auch in Zukunft wirtschaftlich uninteressant bleiben. Auch Ölkabel kosten heute zehnmal mehr als eine Freileitung. Vorerst aber werden große supraleitende Magnete nur als oszillierende Energiespeicher für spezielle Anwendungen eine technische und ökonomische Chance haben.

Elektrische Energie läßt sich offenbar nur unökonomisch auf Vorrat legen. Reservehaltung und Ausgleich der Belastungskurven ist aber ein ökonomisches Anliegen. Eine Glättung der Belastungskurven wird heute durch Spitzenlastkraftwerke, durch Pumpspeicherkraftwerke oder durch Steuerung der Einschaltzeiten tageszeitunabhängiger Verbraucher, etwa von Speicherheizungen, praktiziert.

In Zukunft könnte dabei dem Elektroauto eine besondere Bedeutung zukommen. Die Elektrifizierung des Individualverkehrs zusammen mit der gesteuerten Versorgung der Ladestationen hätte heute einen völligen Ausgleich der Belastungskurven ohne wesentliche Steigerung der Engpaßleistung zur Folge ⁶⁾. Eine großräumige Reservehaltung und Energiespeicherung wäre Aufgabe eines leistungsfähigen Verbundsystems. Lokale Energiespeicher wären dann Notaggregate. Ein leistungsfähiges Verbundsystem ist offenbar einer der Schlüssel zur kurzzeitigen Energiesicherung.

3.3 Energieübertragung bei tiefen Temperaturen

3.3.1 Prinzipielle Überlegungen

Schon bald nach Entdeckung der Supraleitung wurde ihre Bedeutung für die Elektrotechnik erkannt. Es dauerte jedoch beinahe 50 Jahre bis zu den ersten Anwendungen der Supraleitung, der Erzeugung hoher Magnetfelder. Dabei lag ein anderes Anwendungsgebiet von Anfang an viel näher, das zur verlustfreien Fortleitung des elektrischen Stroms. Erste Schritte zur Verwirklichung eines supraleitenden Kabels wurden jedoch erst in der Mitte des vorigen Jahrzehnts getan. Eine so lange Zeit zwischen prinzipieller Einsicht und technischer Realisierung ist ein der Tieftemperaturtechnik inherentes, aber leicht verständliches Merkmal. Die Herstellung der für den supraleitenden Betriebszustand notwendigen kryogenen Umgebung erfordert einen so hohen Sockelbetrag an Vorab-Investitionen, daß die resultierende Mindestanlagengröße für den ökonomischen Betrieb häufig den derzeitigen Entwicklungsstand der Technik oder die augenblicklichen wirtschaftlichen Bedürfnisse übertrifft, ein ökonomisches Problem, wie es dem Reaktorbauer in gleicher Weise begegnet. Heute rücken Tieftemperaturkabel in den Bereich des technischen und wirtschaftlichen Interesses. Ich möchte mich dabei wegen der hier in Frage stehenden hohen Übertragungsleistungen auf supraleitende Kabel beschränken.

3.3.2 Der Leiter

Die Wahl des Supraleiters hängt von der Betriebsart des Kabels ab. Für Gleichstromkabel wird bisher Nb_3Sn mit seiner hohen Stromtragfähigkeit als das geeignete Leitermaterial angesehen. Es kann als Kabel- oder als Bandmaterial verwendet werden. Der Strom fließt im gesamten Supraleiterquerschnitt. Die erlaubte Stromdichte ist so hoch, daß für ein 500 000-A-Kabel mit einer Übertragungsleistung von 100 GW ein Leiterquerschnitt von 5 cm^2 ausreichend wäre ⁷⁾. Elektrische Verluste treten nur bei Lastschwankungen auf.

Für Wechselstromkabel werden wegen ihrer geringen Wechselverluste Blei oder Niob verwendet, wobei Niob die größere Stabilität garantiert. Neuerdings werden auch harte Supraleiter, wie NbTi oder Nb_3Sn unterhalb H_{c1} untersucht. Die Wechselfeldverluste eines Typ II Supraleiters sind klein, solange man unterhalb dieses unteren kritischen Feldes bleibt. Die Eindringtiefe des elektrischen Wechselfeldes beträgt in allen Fällen nur etwa 10^{-7} m , so daß sehr dünne supraleitende Schichten verwendet werden können.

In die elektrische Verlustbilanz gehen außerdem die dielektrischen Verluste ein. Ein kleiner Verlustfaktor ($\tan \delta < 10^{-5}$) ist bei tiefen Temperaturen besonders wichtig.

Große Aufmerksamkeit verdient auch hier die Betriebssicherheit. Das Überlastverhalten eines Supraleiters ist völlig von dem eines Normalleiters verschieden. Überlastung bedeutet höhere Verluste und damit Erwärmung. Erwärmung läßt die Stromtragfähigkeit absinken und vergrößert dadurch die Überlastung. Eine Rückkehr in den stabilen Betriebszustand ist ausgeschlossen, wenn keine Maßnahmen zur Stabilisierung ergriffen werden.

Dafür eignen sich zusätzliche Schichten aus hochreinem Aluminium oder Supraleitern mit größerer Stromtragfähigkeit, die einen Teil oder den gesamten Überlaststrom tragen können, zwar bei höheren

Verlusten, aber ohne daß unzulässige Aufwärmung des Supraleiters eintritt.

3.3.3 Verschiedene Kabelkonzepte

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Realisation eines Tieftemperaturkabels ist die Längenkontraktion der abgekühlten Kabelkomponenten gegenüber dem auf Umgebungstemperatur bleibenden Außenmantel. Die Längendifferenz beträgt bei 1 km Kabellänge einige Meter. Sie wird auf verschiedene Weise kompensiert:

Das Rohrtypkabel ist aus starren Röhren mit inneren Kompensationsstücken aufgebaut; das Wellrohrkabel aus flexiblen ineinander geschobenen Wellrohren ⁸⁾. Das Rohrtypkabel erfordert eine Verlegung in Stücken zu 10 bis 20 m. Zur Verlegung sind spezielle Krümmer und Winkelstücke erforderlich.

Wellrohre mit Durchmessern bis zu 300 mm können in Längen von 200 m von der Trommel ohne zusätzliche Krümmer und Winkelstücke verlegt werden.

In jedem Fall erfordern zahlreiche vakuumdichte Stoßstellen hohen Montageaufwand im freien Gelände. Sie verschlechtern die Wärmebilanz ebenso wie die inneren Abstützungen der Kabelkomponenten.

Elektrisch sind supraleitende Kabel symmetrisch ⁹⁾ oder konzentrisch ¹⁰⁾ aufgebaut. Konzentrische Leiteranordnungen haben höhere Leistungsdichten, symmetrische Leiteranordnungen gleiche Phasenimpedanzen und die geringeren Wechselstromverluste, weil das elektrische Feld bei ihnen auf das Dielektrikum zwischen den beiden Leitern begrenzt ist, so daß keine Wirbelstromverluste in den umgebenden Metallmänteln auftreten. Einige gebräuchliche Kabelkonzepte zeigt Fig. 13. Wesentliche Beiträge zur Realisierung supraleitender Kabel stammen von P. Klaudy ¹¹⁾. Zwei von deutschen Firmen ausgeführte Kabelmodelle zeigen Fig. 14 und 15. Versuchsergebnisse zum Drehstromkabel der Fa. Siemens sind von G. Bogner und F. Schmidt berichtet ¹²⁾. Ein Überblick über den Entwicklungsstand in verschiedenen Ländern wird von R.W. Meyerhoff ¹³⁾ gegeben.

3.3.4 Kühlkreislauf und Kühlstationen

Die Wärmebilanz eines supraleitenden Kabels setzt sich zusammen aus den elektrischen Verlusten des Leiters, den Strömungsverlusten des Kühlmittels und den Verlusten durch Wärmeeinströmung, die sich aus Strahlungsverlusten und Wärmeleitungsverlusten über die Superisolation, die Stütz- und Strukturmaterialien zusammensetzen. Diese Verluste fallen bei tiefen Temperaturen an und sind mit dem geringen Wirkungsgrad der Helium-Kältemaschine (Fig. 16) abzuführen. Es ist daher im allgemeinen ökonomisch ein Temperaturzwischenniveau durch Stickstoffkühlung einzuführen.

In dieser Wärmebilanz überwiegen in der Regel die leistungsunabhängigen Glieder. Damit sinken bei genügend hohen Übertragungsleistungen die spezifischen Anlage- und Betriebskosten unter die aller bekannter Übertragungssysteme.

Die Wärmeeinströmung beträgt bei der heutigen Isoliertechnik etwa 1 W/m^2 bei Stickstofftemperatur und $< 0,1 \text{ W/m}^2$ bei Heliumtemperatur. Die erforderliche Kühlleistung für ein supraleitendes Kabel mit einer Übertragungsleistung von GW beträgt damit etwa 100 W/km bei Heliumtemperatur und einigen kW/km bei Stickstofftemperatur. Die Kühlstationen können also von ihrer Kapazität her viele Kilometer auseinanderliegen. Ihr tatsächlicher Abstand ergibt sich aus der zulässigen Temperaturerhöhung des Kühlmittels, dem Druckabfall in der Kühlleitung, Zuverlässigkeits- und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen. Er beträgt für flüssiges, gasförmiges bzw. superkritisches Helium etwa 20, 60 bzw. 80 km. Aus Gründen der Zuverlässigkeit und notwendigen Redundanz ist es vorteilhafter, die Kühlstationen in halber Entfernung aufzustellen und mit der vollen Leistung auszustatten. Dampf-Flüssigkeitsseparatoren, Kühlmittelumwälzpumpen und Vakuumpumpen befinden sich in geringeren Abständen. Das Kühlschema einer Übertragungsleitung zeigt Fig. 17.

3.4 Vergleich von Hochleistungsübertragungssystemen

Wie vergleichen sich supraleitende Kabel mit anderen Kabeln für ein Hochleistungsübertragungssystem? Energieverbrauch, lokale Leistungsdichte und Größe der Kraftwerksstationen sind in ständigem Wachstum begriffen. Die konventionelle Technik wird dabei in den nächsten Jahrzehnten an ihre Grenzen stoßen. Die heute sichtbaren, aber technisch noch nicht ausgenutzten Grenzen für Drehstromübertragung zeigt die Fig. 18.

Die Grenzen zeigen sich besonders bei der Versorgung der großen Ballungszentren. Zukünftige Ballungszentren sind Leistungseinheiten von 10 - 30 GW, die von einem Hochleistungsring umgeben und von Energieachsen durchzogen sind. Die erforderlichen Übertragungsleistungen überschreiten die GW-Grenze. Es treten dann in Konkurrenz zu den bisher leistungsfähigsten Ölkabeln mit Wasserzwangskühlung neue Kabelkonzepte: Etwa Tieftemperaturkabel oder Kabelrohre mit Druckgasisolierung, sogenannte SF₆-Rohrleiter. Aber auch andere Konzepte zur Energieübertragung könnten in Abhängigkeit von den Bedürfnissen aktuelle Bedeutung erlangen: Etwa die Energieübertragung mit Mikrowellen, die heute wegen der fehlenden wirtschaftlichen Mikrowellengeneratoren und -maschinen als aussichtslos gilt, oder die Produktion von Wasserstoff am Kraftwerksstandort und sein Transport zum Verbraucher zur Verwendung in Brennstoffzellen. Ich möchte darauf nicht eingehen, sondern mich den beiden erstgenannten greifbaren Konzepten zur Energieübertragung zuwenden.

SF₆-Rohrleiter stützen sich auf eine in Schaltstationen erprobte Isoliertechnik. Ihr Aufbau ist aus starren Rohren oder aus Wellrohrleitern möglich. Allerdings führt die vergleichsweise geringe elektrische Festigkeit des Isoliergases zu großen Rohrdurchmessern: ca. 60 cm für ein Einphasenrohr bei 380 kV. Die Vorteile liegen bei den vernachlässigbar kleinen dielektrischen Verlusten, der hohen maximalen Belastbarkeit und der um ein Drittel geringeren Ladeleistung und damit der Vergrößerung der kritischen Übertragungslänge gegenüber Ölkabeln. Es sind vermutlich mit zwangsgekühlten 500 kV Kabeln Übertragungsleistungen bis

zu 10 GW ¹⁴⁾ erreichbar. Ihr Einsatz ist technisch in naher Zukunft möglich und zumindest für spezielle Verbindungen zu erwarten.

Von den Tieftemperaturkabeln ist allein das supraleitende Kabel in dem genannten Leistungsbereich zu nennen. Supraleitende Wechselstromkabel zeichnen sich durch hohe Übertragungsleistungen und eine noch geringere Ladeleistung als das Gasrohrkabel aus. Die spezifischen auf die Übertragungsleistung bezogenen Verluste, einschließlich der Verluste durch Wärmeeinströmung, sind mindestens um einen Faktor 2 kleiner als bei SF₆-Rohrleitern und 5 mal kleiner als beim Ölkabel.

Die Übertragungsleistung beträgt bei einem 380 kV-Wechselstromkabel mehr als 10 GW. Nach Abschätzungen aufgrund der heutigen Technik sind supraleitende Drehstromkabel sowohl von den spezifischen Errichtungskosten als auch den Jahreskosten einschließlich der Verluste im Leistungsbereich oberhalb 1 bis 2 GW billiger als alle vergleichbaren Kabel. Vorausgesetzt ist dabei ein Ausnutzungsfaktor von 100 %. Einen leistungsabhängigen Kostenvergleich gestattet Fig. 19. Der oberen Kurve bei supraleitenden Kabeln liegen derzeitige Kabelkonzepte zugrunde.

Für ein fortgeschrittenes Kabelkonzept sind bei konsequenter Anwendung der heutigen technischen Möglichkeiten weitere Einsparungen möglich, z.B. durch Anwendung und Verbesserung des Wellrohrkonzeptes, durch Ersetzen des Kupferträgers durch das in der Kabeltechnik eingeführte Aluminium und eine Reduktion der Wärmeeinströmung durch verbesserte Isoliertechniken.

Drastischere Reduktionen könnten von der Entwicklung eines Supraleiters, der bei Wasserstofftemperatur betrieben werden kann, erwartet werden.

Die Aufteilung der Einzelkosten eines Drehstromkabels in Abhängigkeit von der Leistung gibt Fig. 20.

Supraleitende Gleichstromkabel haben keine stromabhängigen Verluste. Verluste treten nur bei Lastschwankungen auf. Bei steigender Leistung erfolgt daher eine ständige Degression der spezifischen Kosten und damit eine immer größere Überlegenheit gegenüber anderen Kabeltechniken. Hinzu kommt ein möglicher stufenweiser Ausbau der Leistungsfähigkeit ohne wesentliche Vorinvestitionen um das 1,5 bzw. 2-fache, wenn zunächst beide Leiter bei der halben zulässigen Betriebsspannung, dann einer und schließlich beide bei voller Spannung gefahren werden. Supraleitende Kabel wurden bis zu größten Übertragungsleistungen entworfen. Einen Vergleich des supraleitenden Gleichstromkabels mit anderen Gleichstromübertragern zeigt Fig. 21. Bei Übertragungsleistungen oberhalb 10 GW und voller Ausnutzung dieser Leistung werden sogar die Kosten einer HGÜ-Freileitung unterboten.

Supraleitende Gleichstromkabel sind aber auch bei kleineren Übertragungsleistungen von einigen GW trotz der notwendigen Stromrichterstationen mit supraleitenden oder konventionellen Drehstromkabeln vorteilhaft vergleichbar. In Drehstromnetzen ist beim Überschreiten einer bestimmten Leistungsgrenze mit Kurzschlußströmen zu rechnen, die nur mit großem Aufwand zu beherrschen und zu begrenzen sind ¹⁵⁾. Diese Leistungsgrenze liegt bei 10 GW. Bei zunehmender Leistungsdichte und Netzlast kann die Zunahme der Kurzschlußleistung vermieden werden, wenn die zusätzlich einspeisenden Kraftwerke über Hochspannungsgleichstromverbindungen an das Wechselstromnetz angeschlossen werden. Außerdem kann über die Stromrichterstationen der Leistungsfluß sowohl im Normalbetrieb als auch im Störfall geregelt werden. Die Kosten der Stromrichterstationen können bei großen Leistungsflüssen auch bei kleinen Übertragungsentfernungen (< 100 km) von den gegenüber Wechselstromanschluß zur Begrenzung der Kurzschlußleistung erforderlichen Maßnahmen überkompensiert werden.

4. Schlußbemerkung

Damit bin ich am Ende meines Berichtes über den heutigen Stand und den überschaubaren Teil der Entwicklung angelangt. Gestatten Sie mir zum Schluß einen Ausblick auf eine mögliche Entwicklung darüber hinaus.

Der eine oder andere mag auf die Unsicherheit der Prognosen hinweisen, auf denen die Schlüsse beruhen. Aber selbst wenn die absoluten Zahlen falsch sind, sind sie geeignet, Größenordnungen und Tendenzen aufzuzeigen. Es verschiebt sich dann der Zeitpunkt, zu dem eine bestimmte Entwicklung erreicht ist, aber nicht die Konsequenz. Die Konsequenzen sind aber derart, daß sie uns plötzlich überfallen und dann keine Zeit für langfristige Entwicklungen lassen. Es ist die Aufgabe der gesellschaftlichen Infrastruktur rechtzeitig Entwicklungen anzupacken, die die Technik der nächsten Generation tragen werden. Dabei kann der endgültige Nutzen einer Entwicklungslinie, auch der Supraleitung, nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden, sondern wird erst nach der Herstellung von Prototypen meßbar gemacht.

Zu unseren Zukunftsaufgaben gehört es zweifellos, das anhaltende Wachstum unter dem Druck der Bevölkerungszunahme und dem individuellen Streben nach Verbesserung der Lebensbedingungen in Einklang zu bringen mit der Erhaltung der universellen Bedingungen der menschlichen Existenz für alle Bewohner dieser Erde.

Unbeschränktes Wachstum ist mit dem beschränkten Raum und den beschränkten Ressourcen unserer Erde unverträglich. Daraus folgt, daß langfristig gesehen nur ein Zustand lebensfähig ist, bei dem Verbrauch und Umsatz von Materie und Energie einen selbstregenerierenden Gleichgewichtszustand erreichen^{16,17)}. Ob dieser Gleichgewichtszustand erreicht werden kann, ist zumindest ungewiß. Nichtsdestoweniger würde es ein dynamischer Zustand sein, ein Zustand der ständigem Druck und Gegendruck ausgesetzt sein wird, einem Druck zur Erhöhung des Konsums und dem Gegendruck der immer stärker belasteten Umwelt.

Es ist eine vorsichtige Hypothese, für den Energiekonsum in der Bundesrepublik für das Jahr 2000 die heutige Höhe des Energieverbrauchs in den USA einzusetzen und darüber hinaus eine Verdopplung oder Verdreifachung ins Auge zu fassen, d.h. eine Zahl von 20 - 30 kW_{th} pro Einwohner gegenüber einem Energiekonsum von 4 kW_{th} heute.

Der Anteil an elektrischer Energie wird dabei vermutlich bis zum maximal möglichen Elektrifizierungsgrad zunehmen. Elektrische Energie ist die bequemste und sauberste Energieform und übt daher einen hohen Substitutionsdruck auf andere Energieformen aus.

Die heute noch unbekannte thermische Toleranzgrenze wird zumindest in den Ballungszentren und Großstädten tangiert oder überschritten. Dann ist aber der Zubau auch nur eines weiteren Kraftwerkes, einer weiteren Industrieanlage ausgeschlossen, es sei denn, man wüßte wohin mit der Abwärme.

Wir könnten jedoch den Energiekonsum in den Ballungszentren in einer vollkommen elektrifizierten Wirtschaft mehr als verdoppeln, wenn wir darauf verzichten, elektrische Energie verbrauchernah zu produzieren. Vermutlich werden wir dazu vor Erreichen der thermischen Toleranzgrenze ohnehin aus anderen Gründen gezwungen sein.

Eine nahezu unerschöpfliche Wärmesenke stellt das Meer dar. Dort könnten Energie-Inseln am oder im Meer in großen standardisierten Einheiten mit Leistungen zwischen 20 und 50 GW_{el} zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs entstehen, wenn wir bereit sind, mit höheren Energieübertragungs- und möglicherweise auch Erzeugungskosten zu bezahlen.

Ob dieses Weinbergsche Konzept ¹⁸⁾ unseren Verhältnissen in der BRD adäquat ist, mag einer kritischen und sorgfältigen Prüfung überlassen bleiben. Es zeigt aber in die Richtung, in die nach Meinung aller Experten unsere Entwicklung gehen wird:

Konzentration der Energieerzeugung in großen Einheiten, deren Lage mehr und mehr von ökologischen als ökonomischen Überlegungen bestimmt sind.

Das Auslagern der Kraftwerke ist ein Mittel zur Verringerung lokaler Umweltbelastung. Es muß einhergehen mit einer überregionalen Raumordnung. So könnte eine weiträumig verflochtene Energieversorgung ihren bescheidenen Beitrag zur Einsicht in politische und gesellschaftliche Notwendigkeiten unserer Zukunft liefern. Damit stellt sich aber die Frage des Energietransports und der Energieverteilung vor einem ganz anderen Hintergrund.

Ein dem heutigen Energieversorgungsnetz übergeworfenes Super-Netz hätte den Anschluß dieser Energie-Erzeugungsinselfn an die Verbraucher-Netzgruppen der Ballungszentren und Großstädte zu übernehmen und alle Einheiten untereinander zu verbinden. Das Supernetz hätte dabei nahezu die gesamte Energie zu transportieren. Es hätte weiträumige Transport-, Verbund- und Reservefunktionen zu erfüllen. Die zu übertragenden Leistungen liegen dann bei einfacher oder doppelter Redundanz weit im GVA Bereich (> 5 GVA/Trasse).

Halten wir heute Ausschau nach einer technischen Realisierungsmöglichkeit für ein solches System, so können wir an der Möglichkeit des Einsatzes von Tieftemperaturkabeln und der gesamten Tieftemperaturtechnik nicht vorübergehen. Für größte Übertragungsleistungen schlägt der Vorteil der geringen Leistungsabhängigkeit voll zu Buche. Der technische Stand läßt einen Einsatz in 15 - 20 Jahren erwarten. Der Wirtschaftlichkeitsschnittpunkt liegt heute noch oberhalb des allgemeinen industriellen Bedürfnisses, wird aber noch in diesem Jahrhundert von der zunehmenden Leistungskurve erreicht, zumindest bei speziellen Trassen, wie Hochleistungsverbindungen oder Trassen in Ballungszentren. Das gilt ganz besonders, wenn es gelingt, auf hoher Leistungsebene ein integriertes Tieftemperaturübertragungssystem zu schaffen mit supraleitenden Kabeln, supraleitenden Generatoren, Transformatoren und Maschinen, supraleitenden Schaltanlagen und Energiespeichern.

Zweifellos hat die Supraleitung dieses Potential. Ob es realisiert werden kann, hängt an der Lösung zahlreicher technologischer und technischer Probleme bis zu einem Grad, wie sie die konventionelle Technik heute besitzt, an der Verfügbarkeit dieser Technik in der Industrie und dem Erfolg anderer konkurrierender Entwicklungslinien.

Vor die Lösung dieser Probleme ist Arbeit und Fleiß und nicht zuletzt ein hoher Preis gesetzt. Der hohe Entwicklungsaufwand verpflichtet in besonderem Maße zur kritischen Skepsis und sorgfältigen Prüfung aller gegebenen Möglichkeiten, aber auch zum mutigen Beschreiten eines als gangbar erkannten Weges.

Anerkennung

Ich möchte mich für wertvolle und klärende Diskussionen bei den beteiligten Herren der Firmen AEG, Frankfurt und Siemens, Erlangen bedanken. Ebensolcher Dank gebührt Herrn Prof. Klaudy, der mir die Ergebnisse seiner Untersuchungen zugänglich gemacht hat, und den Herren Arendt und Winter, die mir wertvolle Hilfe bei der Aufarbeitung des Materials gegeben haben.

Literatur

- 1) Wärmelastplan Rhein 1971, Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins
- 2) H. Wolf, Stand und Technik der Verfahren zur "Trockenen Rückkühlung" sowie deren wirtschaftliche Aussichten, Bericht des Batelle-Institutes e.V. (1971)
- 3) H.P. Heidinger, H.J. Holstein, F. Lappe und H.G. Busch Die Bedeutung der 380 kV-Spannungsebene für die Netze in der BRD
Energiewirtsch. Tagesfragen 21. Jg. (1971), S. 582 - 589
- 4) M. Erche, Stromversorgung von Ballungszentren
Energietechnik, Techniken der Zukunft
- 5) P. Smith, Multi-Stage Energy Transfer Schemes,
Proc. 8th Int. Conf. High-Energy Accelerators,
CERN 1971 p. 213 - 217
- 6) P. Jansen, private Mitteilungen
- 7) R.L. Garwin and J. Matisoo, Superconducting Lines for Transmission of Large Amounts of Electrical Power over Great Distances,
Proc. IEEE, Vol. 55 (1967), p. 538 - 548
- 8) E. Scheffler, Der geschweißte Wellmantel als Bauelement für neuartige Hochleistungskabel
Int. Symp. Hochspannungstechnik, München 1972
- 9) W. Kafka, Tiefgekühlte Kabel zum Übertragen elektrischer Energie,
ETZ B. Bd. 20 (1968), S. 273 - 277
- 10) E.C. Rogers and D.R. Edwards, Design for a 750 MVA superconducting power cable
Electr. Rev. Bd. 181 (1967), S. 348 - 351
- 11) P. Klaudy, Patentschrift Nr. 256956, Österreichisches Patentamt (1965)
P. Klaudy, Adv. Cryogenic Eng. 11 (1966), S. 684 - 693
Some Remarks on Cryogenic Cables
P. Klaudy, Supraleitende Kabel, ETZ-A Bd. 89 (1968), S. 325 - 330
P. Klaudy, Energieübertragung durch tiefstgekühlte, besonders supraleitende Kabel, Bull. Schw. Elektrotechn. Verein Bd. 61 (1970), S. 1179 - 1190

- 12) G. Bogner und F. Schmidt, Energietransport durch tiefgekühlte Kabel
Naturwissenschaften Bd. 57 (1970), S. 414 - 422
G. Bogner und F. Schmidt, Supraleitende Kabel für Drehstromübertragungen
ETZ-A, Bd. 92 (1971), S. 740 - 745
- 13) R.W. Meyerhoff, Superconducting power transmission,
Cryogenics, April 1971, p. 91 - 101
- 14) E.F. Peschke, Hochleistungsübertragung mit Kabeln
Int. Symp. Hochspannungstechnik, München 1972
- 15) H. Engelhardt, Supraleitende Kabel bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
Vortrag beim 6. HGÜ-Kolloquium in Heidelberg (1971)
- 16) J.W. Forrester, Counterintuitive Behaviour of Social Systems
Techn. Forecasting and Social Change 3, (1971), p. 1-22
- 17) D.L. Meadows, Dynamics of Commodity Production Cycles
Cambridge, Mass., Wright-Allen Press, 1970
- 18) A.M. Weinberg, Global Effects of increased use of energy,
Fourth United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy (1971)

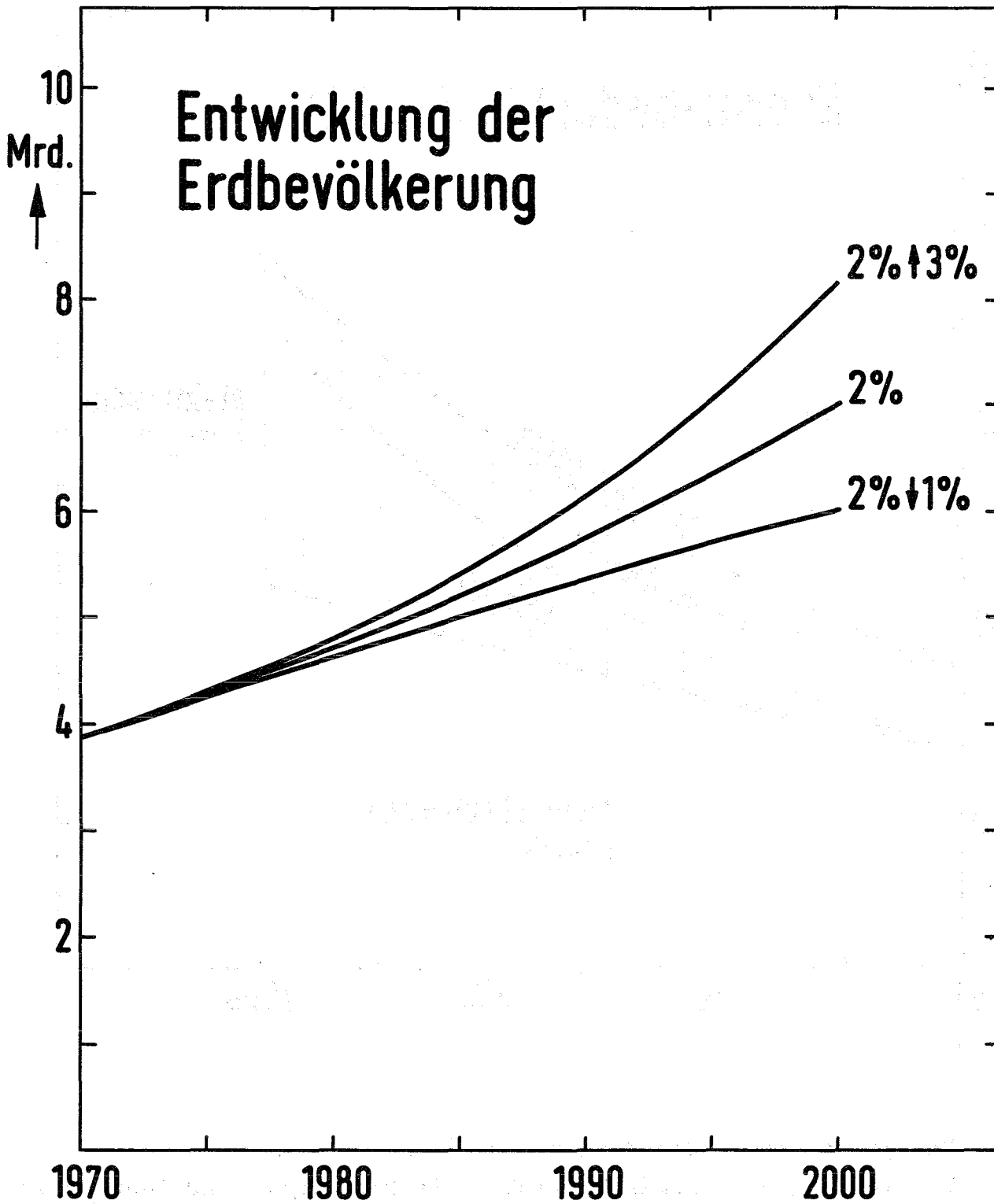


Fig. 1: Entwicklung der Erdbevölkerung bei zeitlich konstanter Zuwachsrate von 2 %, von 2 auf 3 % ansteigender und von 2 auf 1 % abnehmender Zuwachsrates.

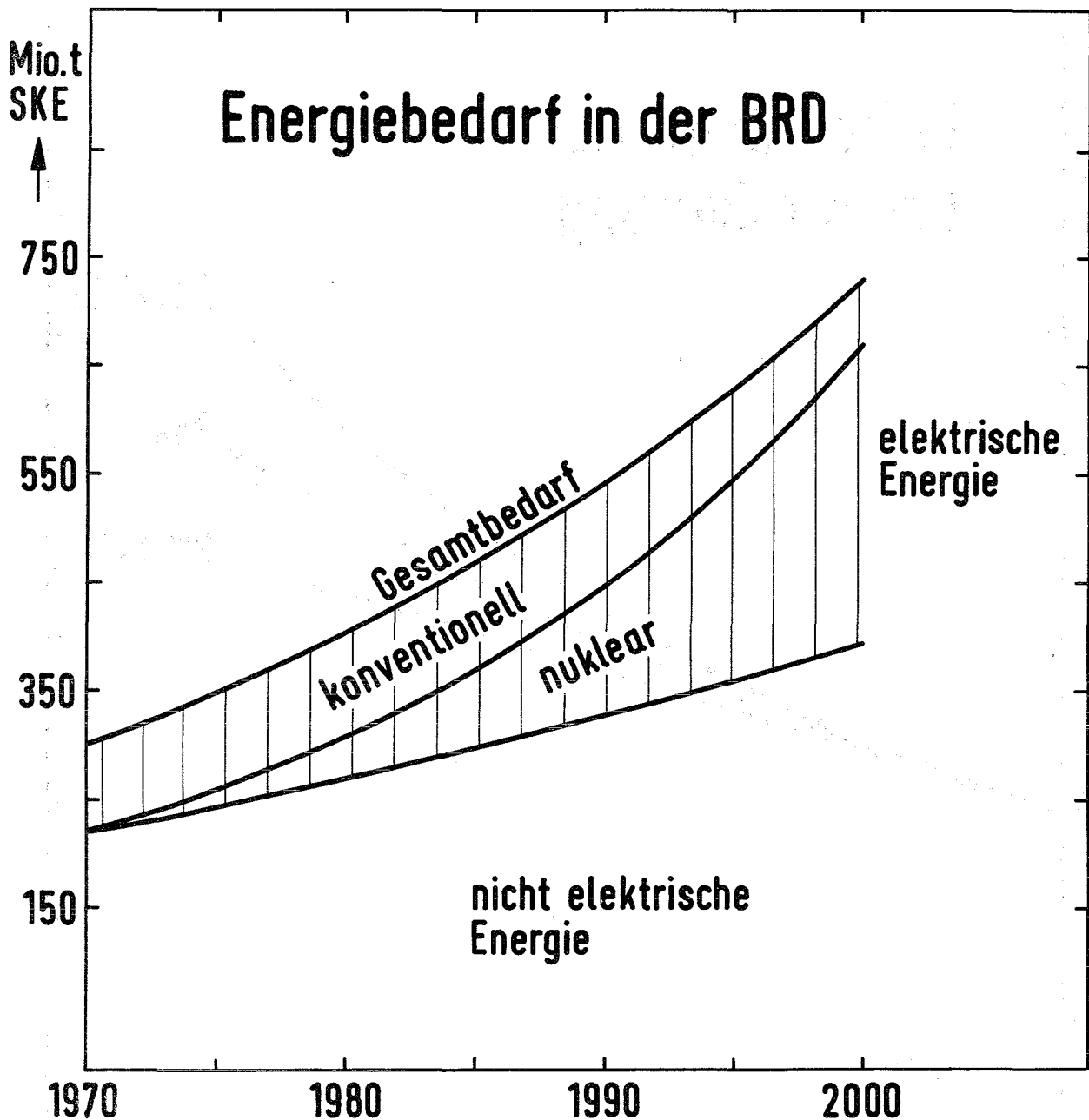


Fig. 2: Energiebedarf in der BRD in Mio. t SKE

Entwicklung des Primärenergiebedarfs bei konstanter jährlicher Zuwachsrate von 3 % und Entwicklung des elektrischen Energiebedarfs bei linear von 7,3 auf 5,3 % abnehmender Zuwachsrate (schraffierter Bereich) aufgeteilt nach konventionellen und nuklearen Kraftwerken.

Zulässige Temperaturerhöhung des Rheins

	T_{\max}	ΔT_{\max}
Oberhalb Basel	25°C	3°C
Unterhalb Lauterburg	28°C	5°C

Obere Tabelle: Zulässige Grenzwerte für die Maximaltemperatur T_{\max} und die maximal zulässige Temperaturerhöhung ΔT_{\max} . Zwischen Basel und Lauterburg lineare Interpolation.

Wärmebelastung des Rheins

	Abgegebene Wärme	Install. Leistung	Reserve
1970	2000 Mkcal/s	6000 MWe	+
1975	6000 "	16000 "	o
1985	11000 "	33000 "	- !

Untere Tabelle: Reserven bei den angegebenen installierten Leistungen bei reiner Frischwasserkühlung. Schon 1975 ist zeitweise Drosselung der Wärmeleitung erforderlich.

Fig. 3:

Übersicht über Ergebnisse des Wärmelastplanes Rhein.

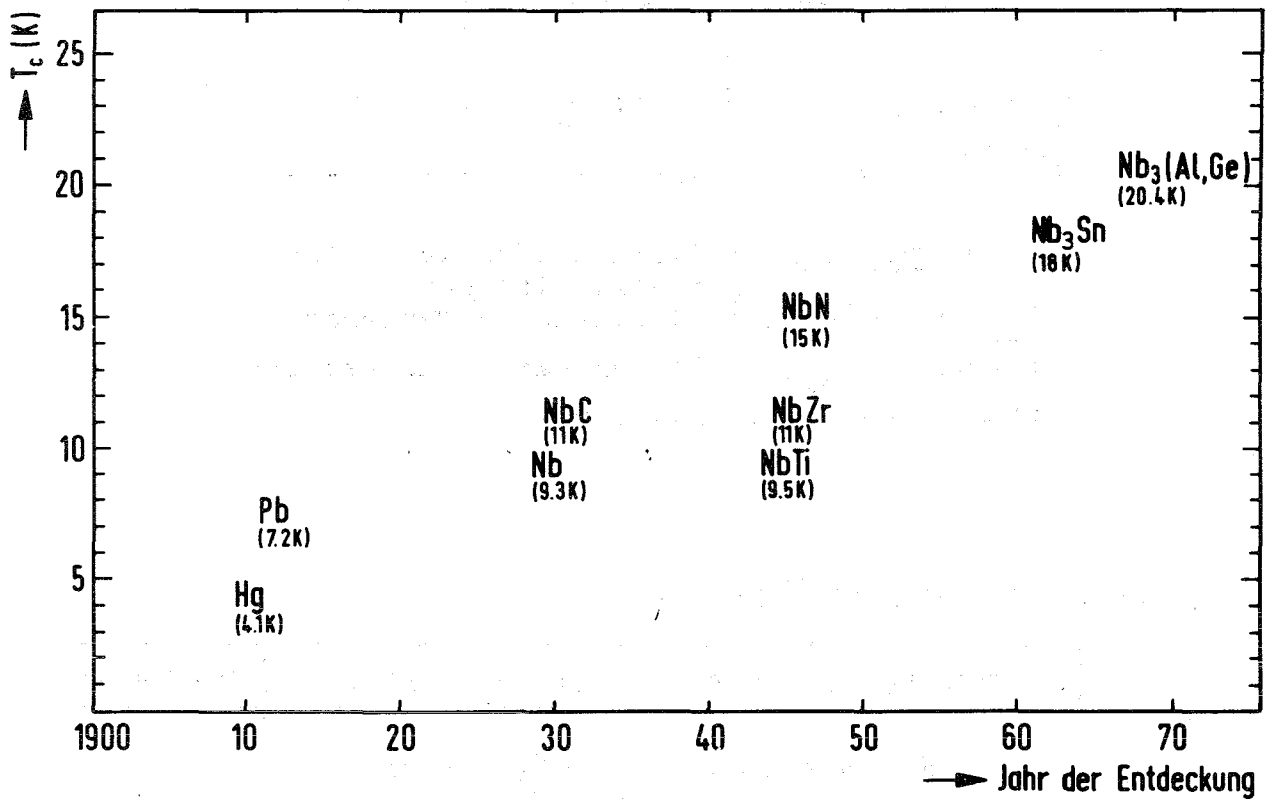
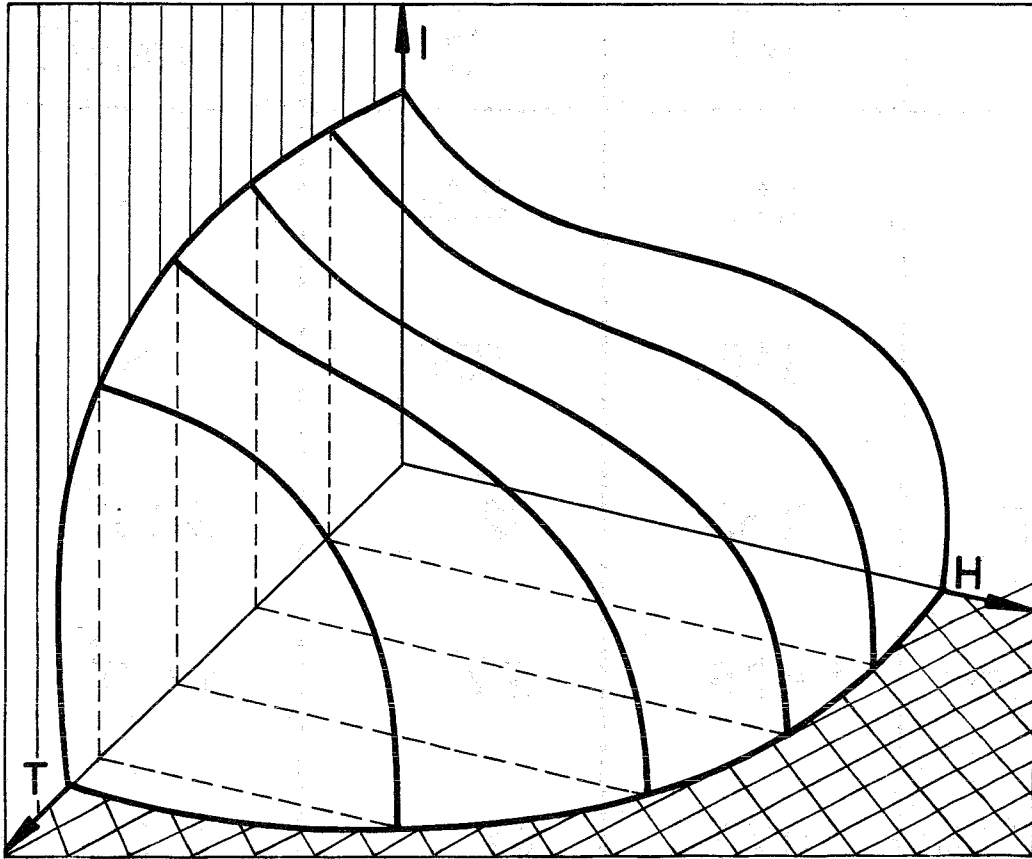


Fig. 4: Sprungtemperatur einiger Supraleiter in Abhängigkeit vom Jahr ihrer Entdeckung oder Entwicklung



KRITISCHE I-H-T-FLÄCHE

Fig. 5:

Kritische Fläche in Abhängigkeit von der Sprungtemperatur T , dem kritischen Magnetfeld H und der kritischen Stromdichte I .

	T_c [K]	$H_c(0)$ [T]	$I_c(4,2K,5T)$ [A/cm ²]
Pb	7,13	0,08	-
Nb	9,46	0,19	-
NbTi	9,50	12	$3 \cdot 10^5$
Nb ₃ Sn	18,25	22	$10 \cdot 10^5$
Nb ₃ (Al,Ge)	20,70	41	~ 0

Fig. 6: Kritische Parameter einiger Supraleiter

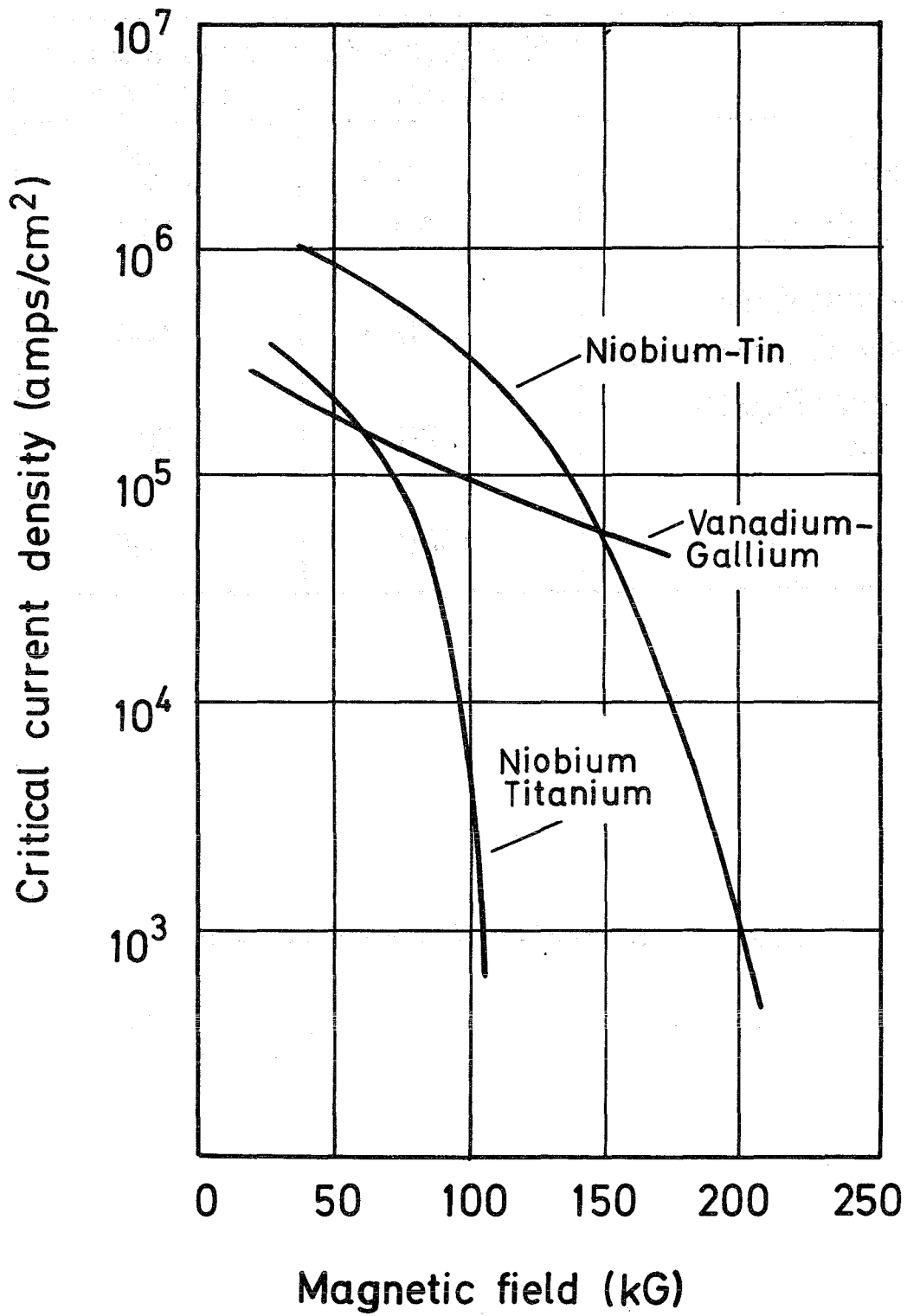


Fig. 7: Kritische Stromdichte in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld für NbTi, Nb₃Sn und V₃Ga

	Energiedichte kWh/m ³	Spez. Kosten DM/kWh
Kapazität	0,3	3·10 ⁶
Induktivität (15T)	20	2000
Wasserreservoir (100m Niveaudifferenz)	0,3	100
Chemischer Speicher (Batterie)	20	200
TNT	1000	~10

Fig. 8: Vergleich von Energiespeichern

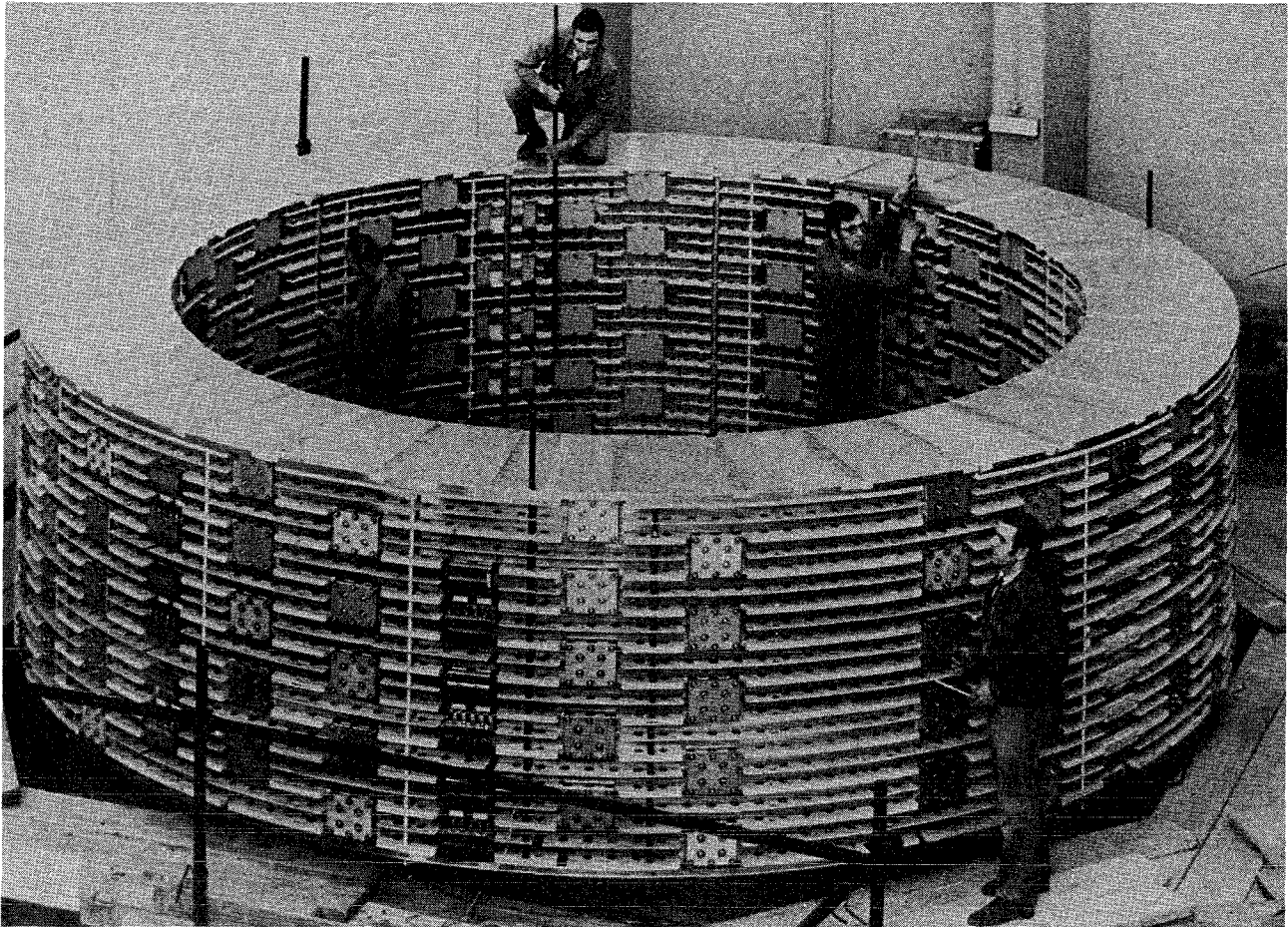


Fig. 9: Bild einer der zwei supraleitenden Spulen der großen europäischen Blasen-kammer BEBC *)

*) Für die Überlassung des Bildes danke ich Herrn Professor Schmeißner, CERN.

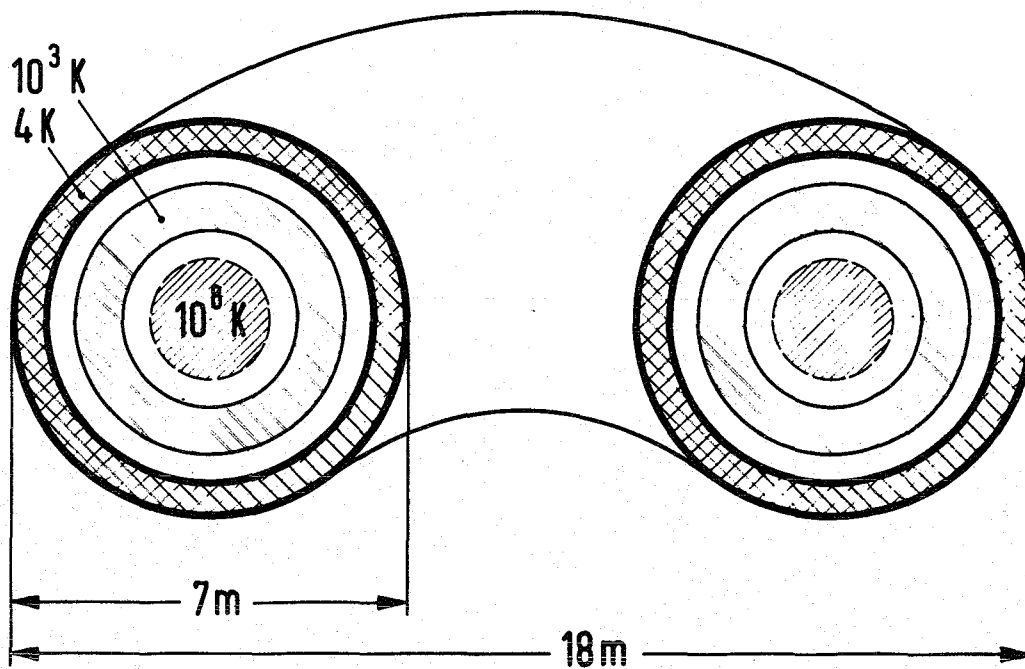


Fig. 10: Schematischer Schnitt durch einen Fusionsreaktor
 Plasmabereich (10^8 K) Blankett (10^3 K) supraleitende Spule (4 K)

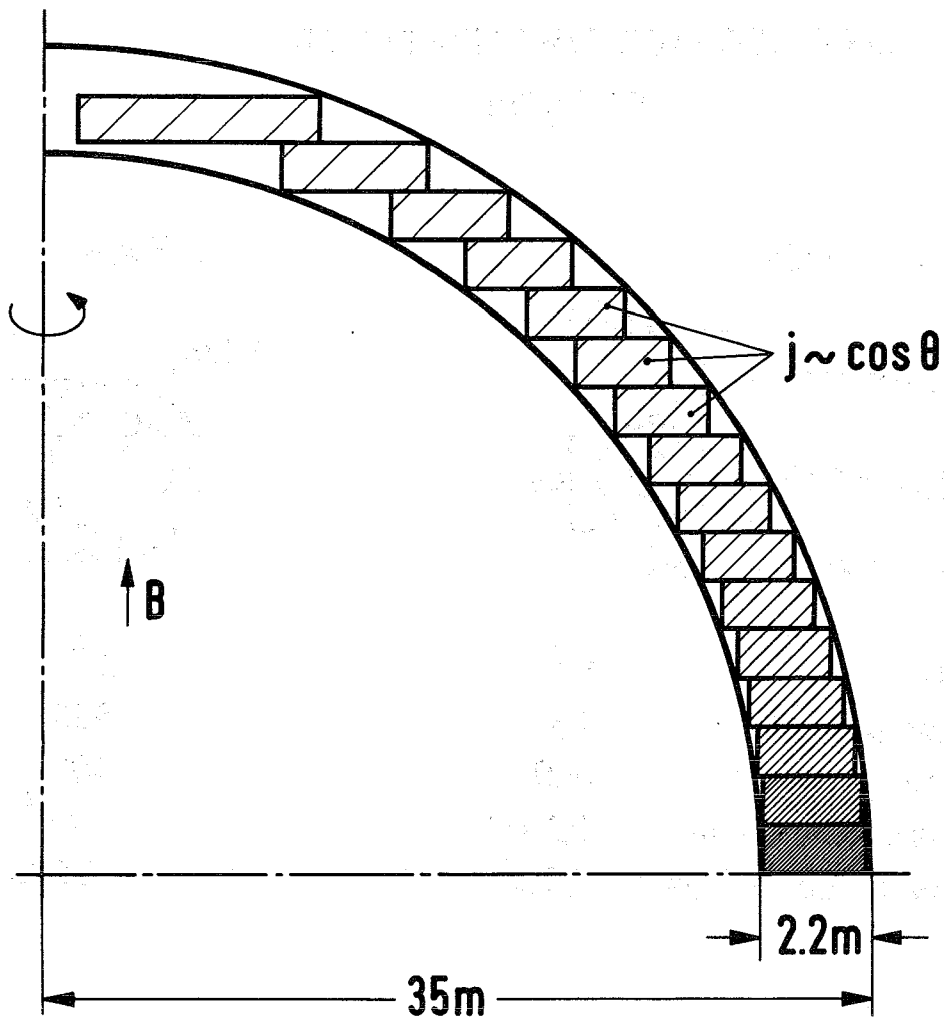


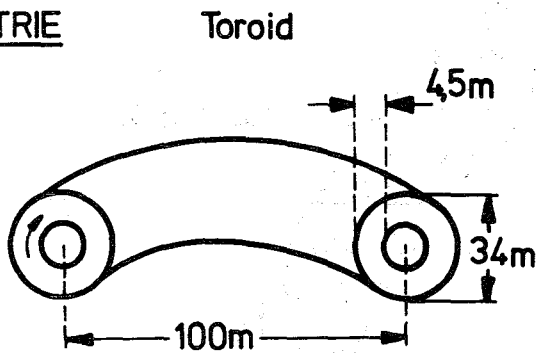
Fig. 11: Teilansicht eines kugelförmigen Energiespeichers

Die Stromdichte in der Magnethülle hat eine kosinusförmige Verteilung. Das zentrale Magnetfeld beträgt 10 T, die maximal auftretenden Zugkräfte 300 MN/m².

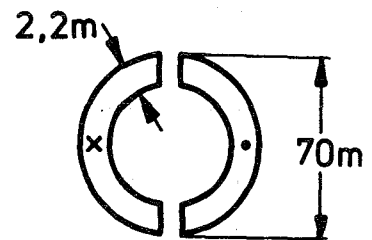
SUPRALEITENDE ENERGIESPEICHER

10T, 2,5GWh

GEOMETRIE



Kugel

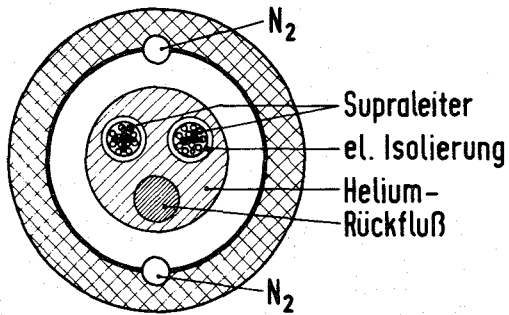


PARAMETER

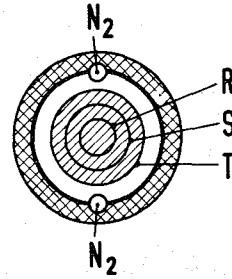
Strom (A)	10^4	10^4
Stromdichte (A/cm ²)	200	550
Maximaler Zug (MN/m ²)	300	300
Supraleitungsmaterial (Am)	$2,7 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{11}$
Gesamtgewicht der Anlage (t)	$1,2 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^5$

Fig. 12: Vergleich von Energiespeichern

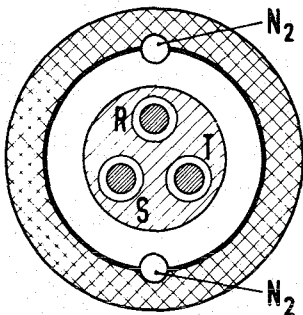
mit sphärischer und toroidaler Geometrie



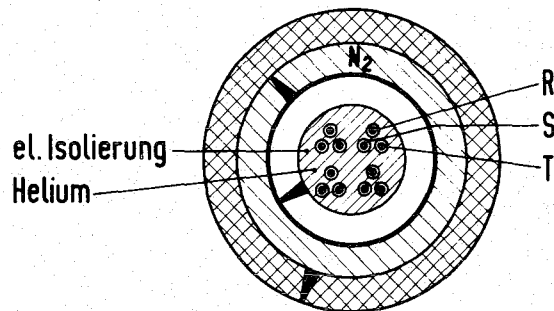
Gleichstromkabel



**Drehstromkabel
(konzentrisch)**



**Rohr-Typ-Drehstromkabel
(symmetrisch)**



**Wellrohdrehstromkabel
(aufgeteilt symmetrisch)**

Fig. 13: Gebräuchliche Kabelkonzepte

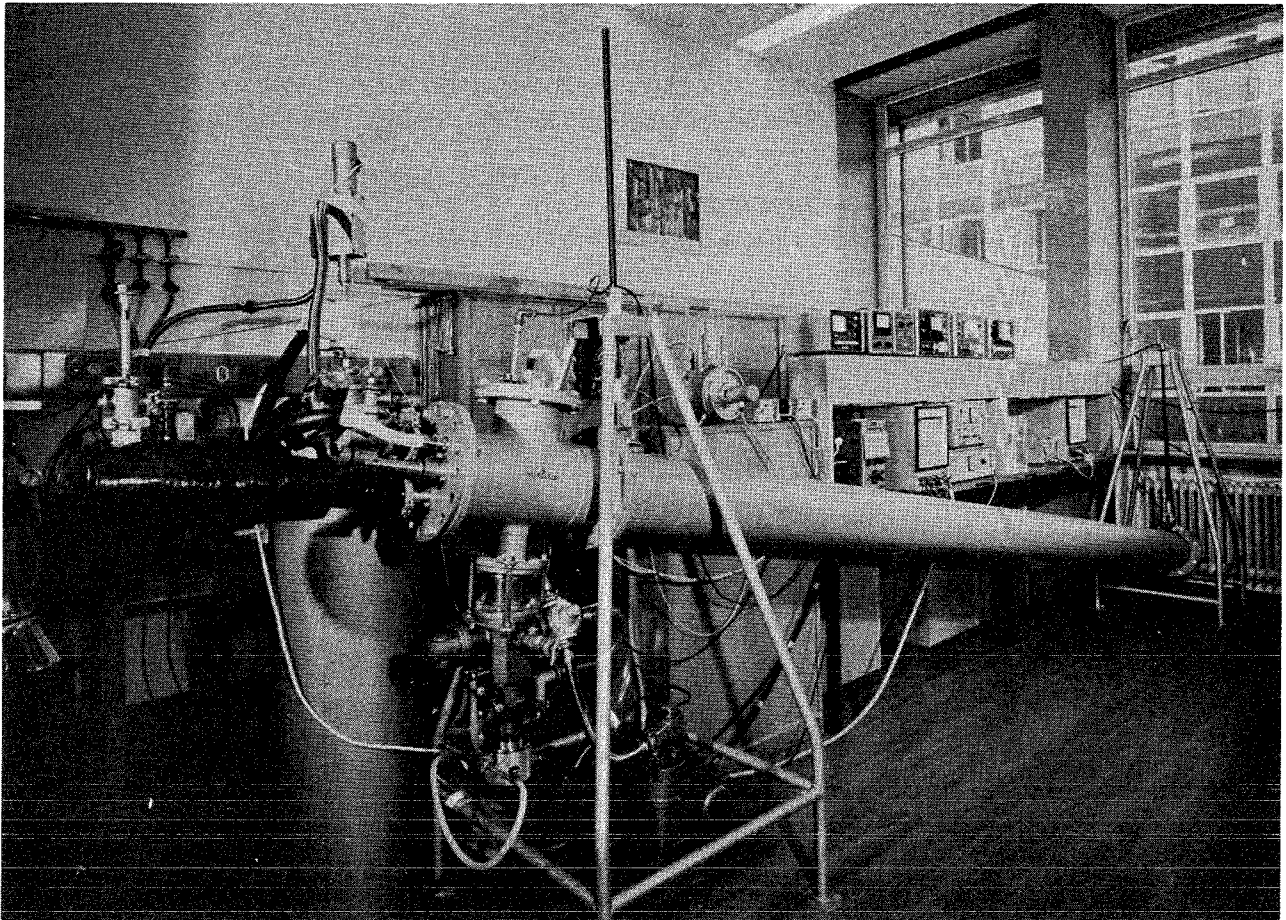


Fig. 14: Versuchskabel der Firma Siemens, Erlangen 12)
Symmetrisches 3-Phasen-Wechselstromkabel
auf Niobbasis, Rohrtyp; 5 m Länge, Außen- *)
durchmesser 48 cm; Leistung 2,5 GVA

*) Für die Überlassung des Bildes danke ich Herrn Bogner von
der Fa. Siemens.

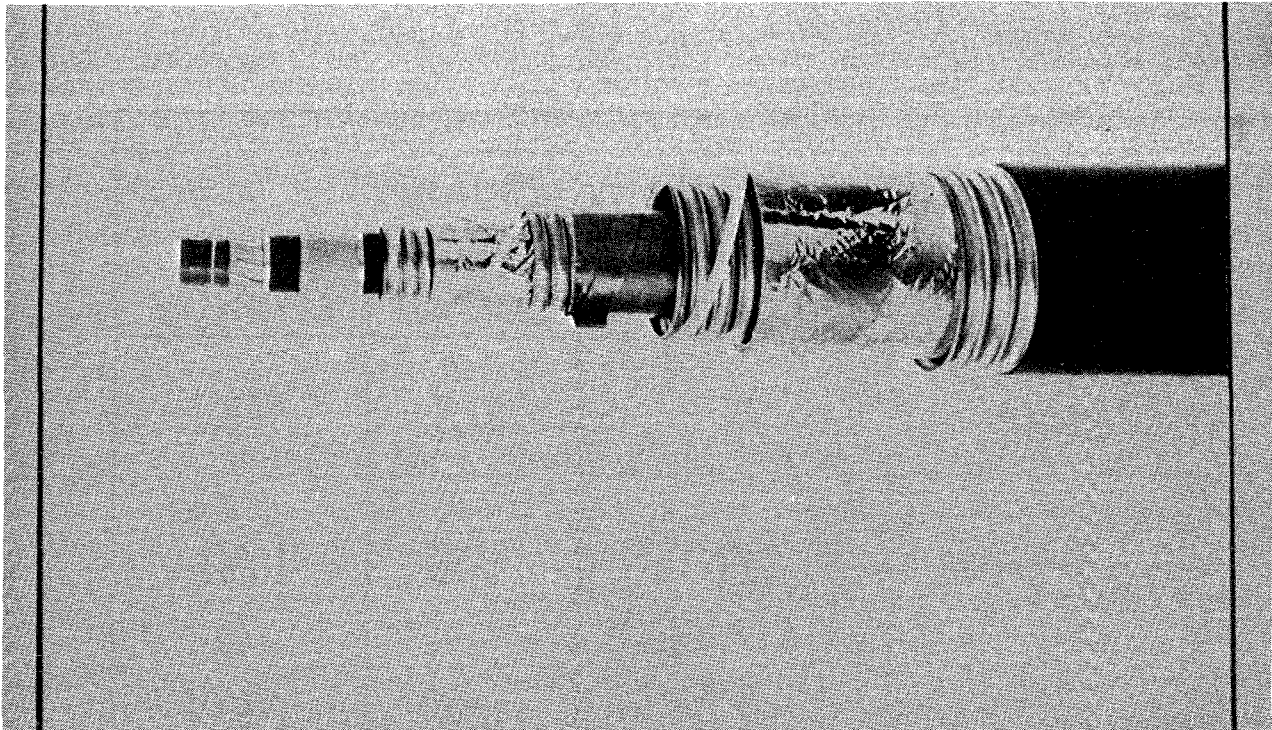


Fig. 15: Gleichstrom-Einleiter-Wellrohrkabel der Firmengruppe AEG - Kabelmetall - Linde - VDK.

Der Leiter ist ein Hohlrohr Nb_3Sn Bandleiter.
Außendurchmesser 25 cm, Leistung 2,5 GVA
(Hin- und Rückleiter zusammen 5 GVA).
Aufbau (von innen nach außen): flüssig Heliumrohr,
Supraleiter, Isolation, inneres Wellrohr. Vakuum
und Superisolation, zweites Wellrohr, flüssig
Stickstoff, drittes Wellrohr, Vakuum und Super-
isolation, äußeres Wellrohr, äußere Schutzschicht. *)

*) Für die Überlassung des Bildes danke ich Herrn Scheffler von der Fa. Kabelmetall.

Wirkungsgrad von Kältemaschinen			
	Temperatur	Carnot	effektiv
Stickstoff	77	1/3	1/8
Wasserstoff	20	1/15	1/50
Helium	4,2	1/70	1/500

Fig. 16: Wirkungsgrad von Kältemaschinen (mittlere Werte)

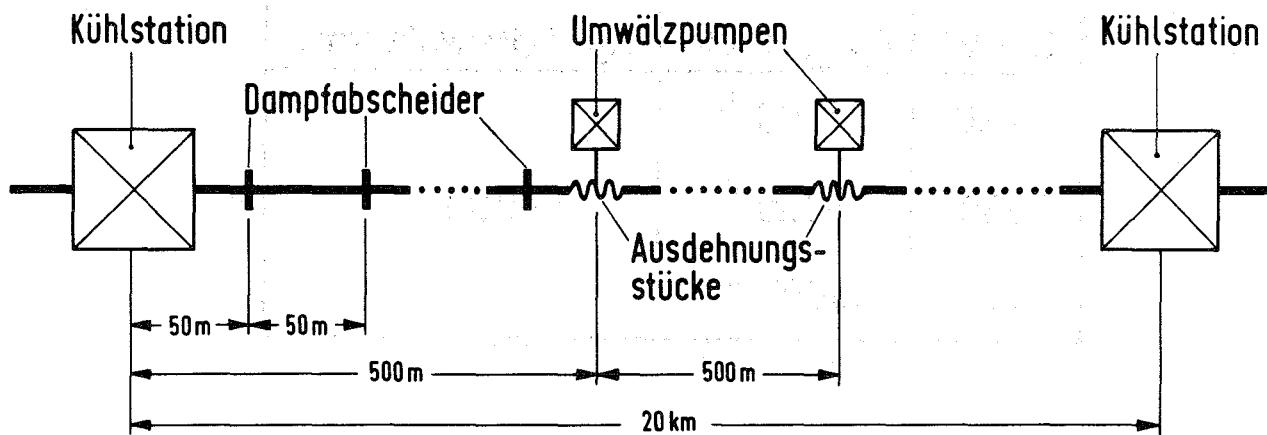


Fig. 17: Kühlt-schema einer Übertragungsleitung

Freileitungen

U (kV)	P_{\max} (MVA)	K_S (DM/MVA·km)
220	2500 ¹⁾	~ 300
380	5000 ¹⁾	
1100	10000 ¹⁾	

Ölkabel

220	300/600 ²⁾	1500 - 3000
380	450/1500 ²⁾	

1) $P_{\max} = 2 P_{\text{nat}}$

2) H_2O zwangsgekühlt

Fig. 18: Grenzen für Drehstromübertragung

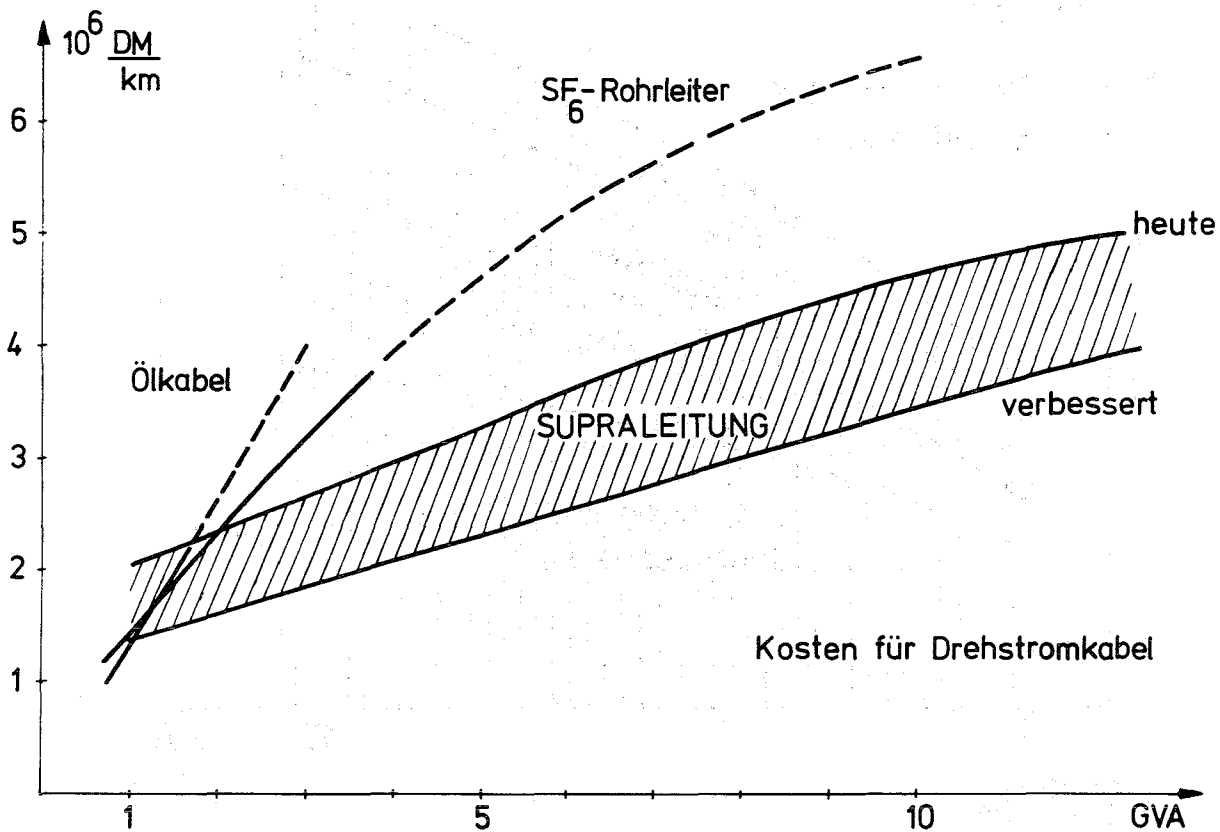


Fig. 19: Kosten für Drehstromkabel einschließlich Betriebskosten, Ölkabel, SF₆-Rohrleiter.

Supraleitende Kabel nach heutiger und verbesserter Konzeption. Die Kosten für Drehstromfreileitungen (nicht gezeichnet) liegen unterhalb aller gezeichneten Kurven.

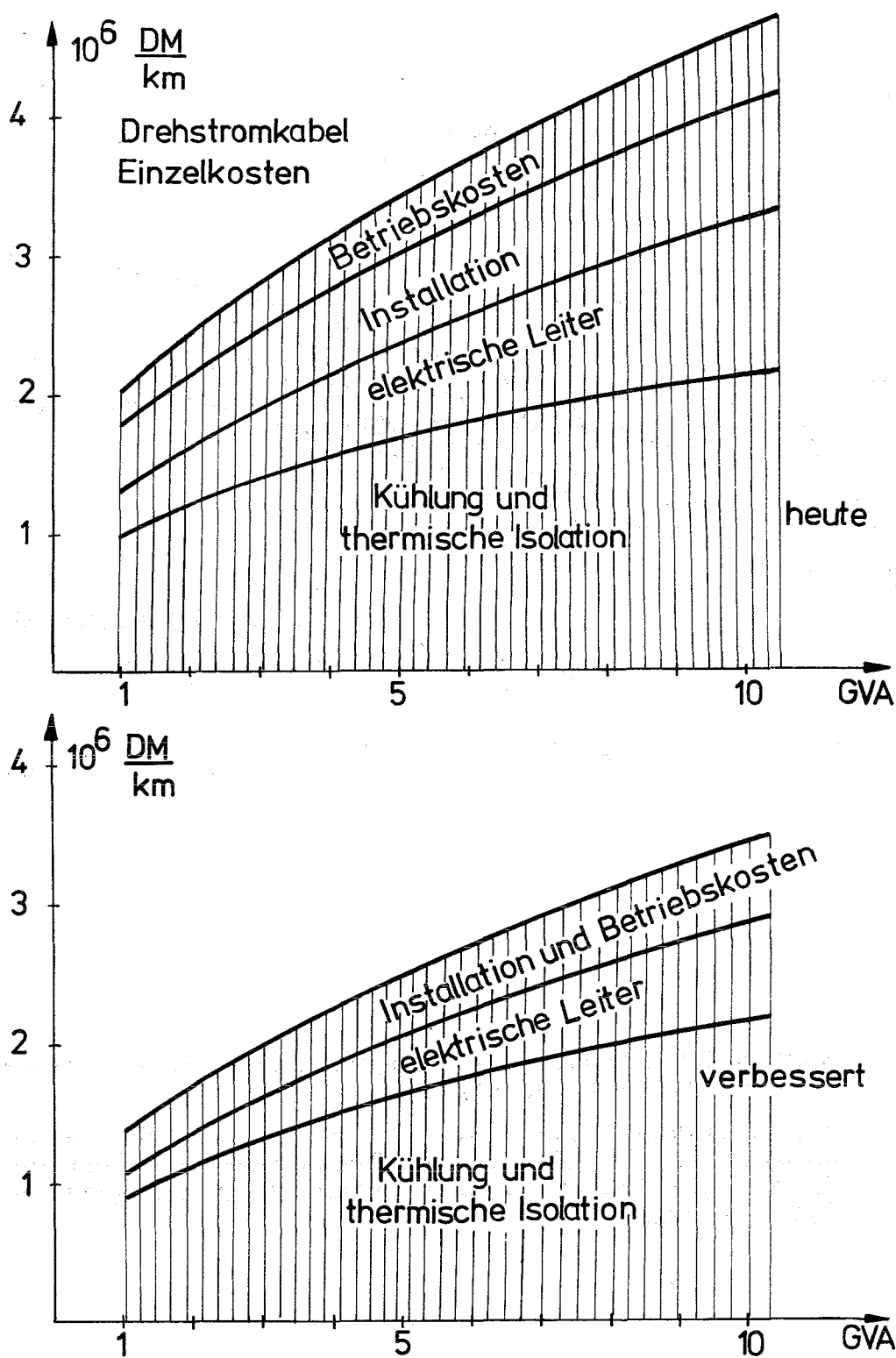


Fig. 20: Aufteilung der Einzelkosten in Abhängigkeit von der Leistung für Drehstromkabel.

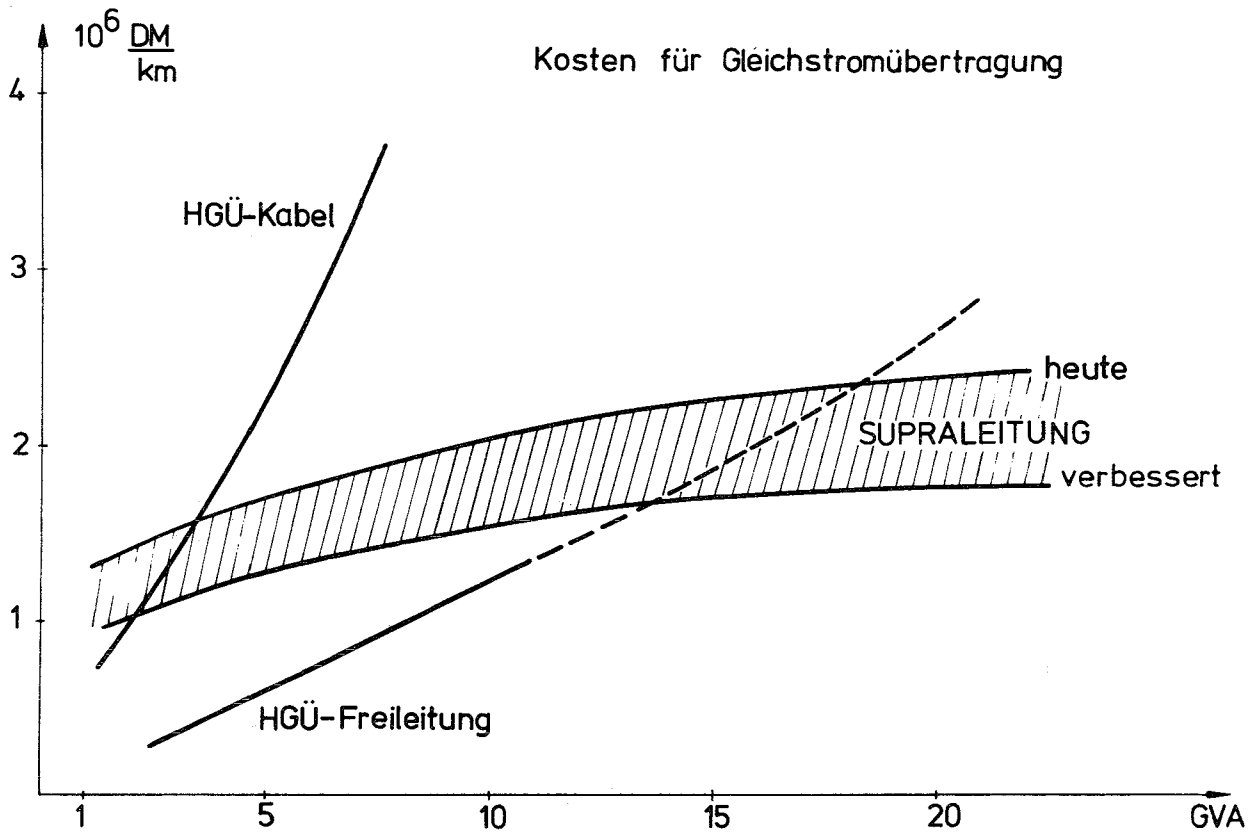


Fig. 21: Kosten für Gleichstromübertragung einschließlich Betriebskosten für Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Kabel und Freileitungen und supraleitende Gleichstromkabel nach heutigem und verbessertem Konzept (ohne Stromrichterstationskosten).

