

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 57 (1966)
Heft: 24

Rubrik: Diskussionsbeiträge : anlässlich der Diskussionstagung des SEV vom 17. und 18. Mai 1966 über Supraleiter

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation


L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

(Publ. 3047 des SEV) gewisse Ergänzungen angebracht. Es ist vor allem die Schutzart «regensicher» mit dem Symbol  (Fig. 1). Diese Schutzart soll für alle Leuchten Anwendung finden, die im Freien montiert sind. Sie können also in Zukunft wesentlich einfacher gebaut werden, als dies nach der bis jetzt geltenden Ordnung mit der Schutzart «spritzwassergeschützt» möglich war. Andererseits musste die bisherige Schutzart «spritzwassergeschützt» für Leuchten fallen gelassen werden, da der Schutz, den diese Schutzart gewährleistet, für Leuchten ungenügend ist. Anstelle der bisherigen Schutzart «spritzwassergeschützt» tritt die Schutzart «strahlwassersicher».

Neu ist die Einführung der beiden Schutzarten «staubgeschützt» und «staubdicht». Obwohl diese Begriffe im täglichen Verkehr zwischen dem Hersteller und dem Abnehmer von Leuchten benutzt wurden, bestand bis jetzt doch keinerlei Vereinbarung über die Wirksamkeit dieses Schutzes. Die Schutzart «staubgeschützt» soll vor allen Dingen dort Anwendung finden, wo ein Eindringen von Fremdkörpern in die Leuchte eine das Aussehen der Leuchte beeinträchtigende Wirkung oder eine Verminderung des optischen Leuchtenwirkungsgrades zur Folge hat. Die Leuchte der Schutzart

«staubdicht» wird hinsichtlich der Prüfung des Eindringens von Fremdkörpern einer schwereren Prüfung unterzogen (Fig. 2); an sie wird zusätzlich die Anforderung gestellt, dass die Oberflächentemperaturen der Leuchte nirgends 100 °C überschreitet. Hiedurch kann diese Leuchte zugelassen werden in Räumen, in denen sich brennbare Staube ansammeln können.

Weitere Anforderungen für Schutzarten, wie z. B. «korrosionsbeständig» oder «wärmebeständig», sind in Vorbereitung. Die für diese Schutzarten vorgesehenen Symbole dürfen natürlich nur Leuchten tragen, die eine dementsprechende Prüfung, die noch entwickelt werden muss, bei der Materialprüfanstalt des SEV mit Erfolg bestanden haben.

Da kapazitive Vorschaltgeräte nach der neuen gesetzlichen Ordnung auch von den Leuchtenherstellern zusammengestellt werden dürfen, wurden auch die Anforderungen hinsichtlich des Zusammenbaues dieser Einzelteile in diese Leuchtvorschriften aufgenommen.

Adresse des Autors:

W. Riemenschneider, Ingenieur, Technischer Leiter des Lichtzentrums Buchs der Novelectric AG, 8107 Buchs.

Diskussionsbeiträge

anlässlich der Diskussionstagung des SEV vom 17. und 18. Mai 1966 über Supraleiter

R. Gremmelmaier, Forschungslaboratorium der Siemens-Schuckertwerke AG, Erlangen: Die Konstruktionsmerkmale supraleitender Magnete sind je nach der Stärke, dem Volumen und der Homogenität des geforderten Magnetfeldes recht unterschiedlich. Von nicht geringem Einfluss sind selbstverständlich Art, Form und nicht zuletzt Preis des zur Verfügung stehenden supraleitenden Materials. Gemeinsam streben alle Konstruktionen an, ein Minimum an supraleitendem Material für den jeweils vorgegebenen Zweck zu verwenden — wegen des hohen Preises des Materials — und ausreichende Vorkehrungen für einen sicheren Betrieb der Magnete zu schaffen — in jedem möglichen Betriebszustand soll eine Schädigung oder gar Zerstörung der Magnete ausgeschlossen sein.

Sehr wesentlich wird der Aufbau der Magnete ausserdem durch die Stromdegradation beeinflusst, d. h. durch den Effekt, dass der zu einem Magneten verarbeitete Supraleiter im allgemeinen nicht mehr denselben kritischen Strom erreicht, den eine kurze Probe aus demselben Material in einem Fremdfeld tragen kann. Massnahmen zu seiner Verhütung sind:

1. Kombination des Supraleiters mit gut leitendem, normalleitendem Material (z. B. Kupfer oder Aluminium), in das der Strom bei lokalem Normalwerden des Supraleiters ausweichen kann;
2. Gute Kühlung der Wicklungen des Magneten.

Für den Magnetbau stehen zur Zeit folgende Supraleiter zur Verfügung:

Nb-25 % Zr	für Felder bis etwa	55 kOe
Nb-33 % Zr	für Felder bis etwa	65 kOe
Nb-Ti	für Felder bis etwa	90 kOe
Nb ₃ Sn	für Felder bis etwa	180 kOe

Nb-Zr und Nb-Ti wird vorwiegend in Drahtform verarbeitet. Nb₃Sn ist sehr spröde. In Draht- oder Bandform lässt es sich nur als dünne Schicht in Kontakt mit einem Trägermaterial verwenden, das die mechanische Stabilität gewährleistet. Verfahren zur Herstellung von Magneten aus Nb₃Sn, bei denen die Magnete nach dem Wickeln noch einmal einer Wärmebehandlung zur Bildung des Nb₃Sn unterzogen werden mussten, konnten sich bisher nicht durchsetzen. Es hat sich für den Magnetbau als zweckmässig erwiesen, fertige, leicht verarbeitbare Nb₃Sn-Bänder — d. h. mechanisch stabile Trägerbänder mit dünnen Nb₃Sn-Schichten — zu verwenden.

Vorteile — besonders mechanischer Art — bringen Bänder, bei denen die Nb₃Sn-Schicht nicht auf der Oberseite des Trägermaterials liegt, sondern zwischen dem Trägermaterial eingebettet ist. Fig. 1 und 2 zeigen Schliffe durch zwei von Maier in unserem Laboratorium neu entwickelte Nb₃Sn-Bänder dieses Typs. Bei der Herstellung wird Zinn zwischen zwei bzw. drei Niobbänder gebracht. Durch kurzzeitiges Glühen im Durchlaufofen bilden sich zwei bzw. vier Nb₃Sn-Schichten von 1...2 µm Dicke. Die Dicke der Niobbänder ist 10 µm, die Gesamtdicke des Dreifachbandes 40...45 µm, seine Breite 3 mm. Das Dreifachband kann

424 - 427

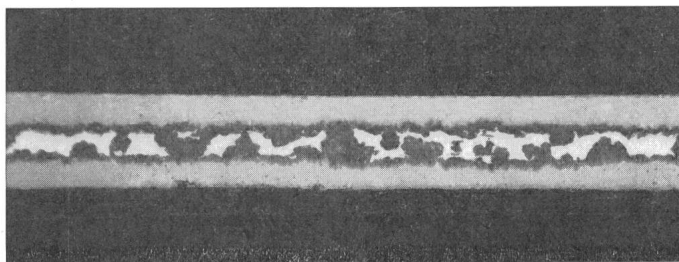


Fig. 1
Schliff durch ein Nb₃Sn-Diffusionsband
Doppelband; Dicke etwa 30 µm

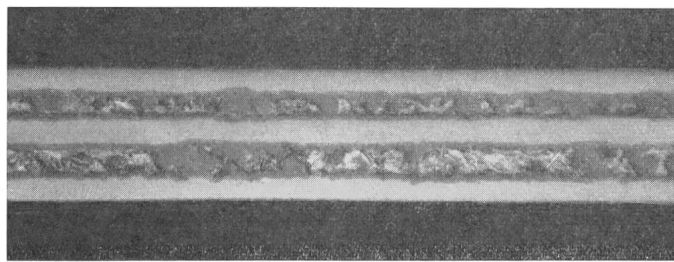


Fig. 2
Schliff durch ein Nb₃Sn-Diffusionsband
Dreifachband; Dicke 40...45 µm

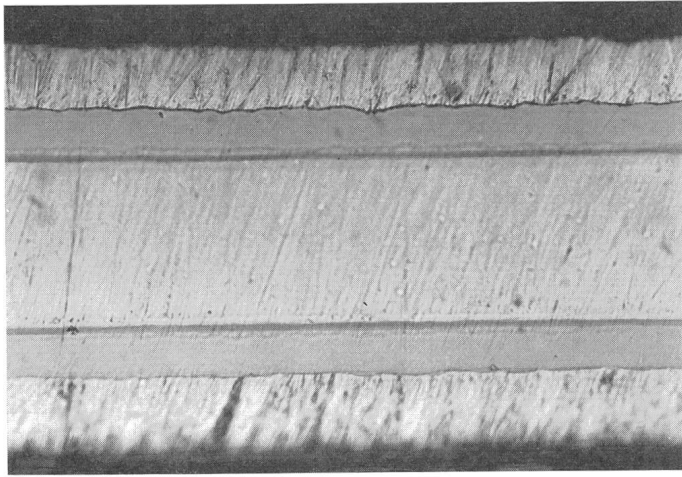


Fig. 3
Schliff durch ein Nb₃Sn-Band mit Stahlunterlage
Gesamtdicke einschliesslich Verkupferung etwa 100 μ m

bei 50 kOe einen Strom von 100 A tragen, die effektive kritische Stromdichte des Gesamtbandes liegt bei dieser Feldstärke bei 7×10^4 A/cm². Das Band kann ohne Schaden um einen Dorn vom Radius > 6 mm gebogen werden, seine Zugfestigkeit ist grösser als 30 kp/mm.

Zum Vergleich seien noch einige Daten eines von Ziegler in unserem Laboratorium entwickelten Nb₃Sn-Bandes angegeben, bei dem die Nb₃Sn-Schicht aus der Gasphase auf ein Stahlband abgeschieden wird (Fig. 3). Das Stahlband ist 50 μ m dick, die Nb₃Sn-Schichten auf beiden Seiten etwa 10 μ m; darauf befindet sich noch eine Kupferschicht von etwa 15 μ m. Die kritische Stromstärke liegt in einem Feld von 50 kOe über 170 A, die effektive Stromdichte bei dieser Feldstärke über 8×10^4 A/cm².

Kleinere Magnete für Felder bis zu 80 kOe (Zylinderspulen mit Bohrungen bis zu etwa 50 mm und mit einem Materialaufwand bis zu etwa 10 kg Supraleitungsmaterial) werden mit Vorteil aus Nb-Zr- bzw. Nb-Ti-Draht hergestellt. Zur Verminderung des Degradationseffektes und zum Schutze gegen lokale Überhitzungen beim Normalwerden wird kupferummantelter Draht verwendet. Um den Packungsfaktor nicht wesentlich zu verschlechtern, wird bei den kleinen Spulen der Anteil des normalleitenden Materials gering gehalten (meist 25 μ m Kupferauflage

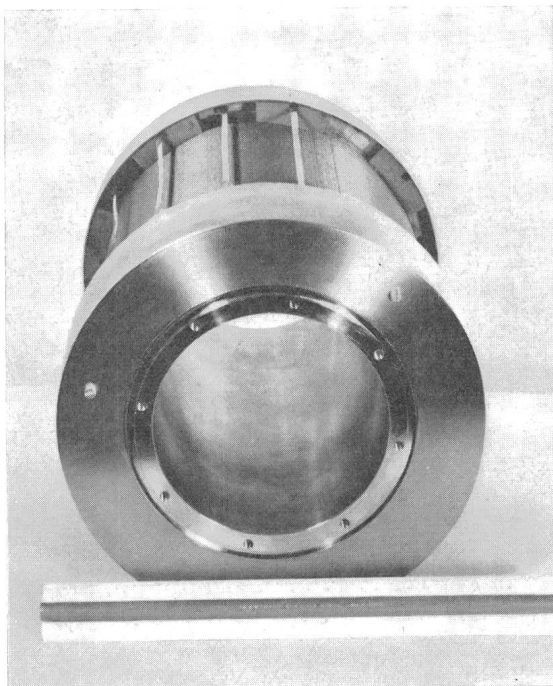


Fig. 4
Supraleitungsmagnet

Maximale Zentralfeldstärke: 44 kOe; Durchmesser der Bohrung 14 cm

auf einem 250 μ m dicken Supraleitungsdraht). Die Verwendung des relativ dünnen Drahtes in den kleinen Magneten hat den Vorteil, dass für die Stromspeisung ein relativ einfaches Stromversorgungsgerät und dünne Zuleitungen zum Kryostaten ausreichen.

Bogner und Mitarbeiter haben in unserem Laboratorium eine Reihe von Standard-Magneten dieses Typs für den Gebrauch in wissenschaftlichen Forschungsstätten und Laboratorien entwickelt; ausserdem, in Ergänzung dazu, homogene Magnete mit Feldabweichungen von weniger als $1:10^5$ in einem Kugelvolumen von 1 cm Durchmesser bei Feldern von 50...60 kOe. Diese Magnete besitzen zusätzlich kompensierende Wicklungen.

Bei grösseren Magneten müssen zur Reduktion der Stromdegradation zusätzliche Mittel angewendet werden. Die Stabilisierung mit normalleitendem Metall hoher Leitfähigkeit in innigem Kontakt mit dem Supraleiter bei gleichzeitig guter Kühlung der Wicklungen ermöglicht es, auch in einem grossen Magneten die hohen Stromdichten der kurzen Probestücke zu erreichen. Die Leiterkombination ist voll stabilisiert, wenn der kritische Strom des Supraleiters vollständig von dem Normalleiter übernommen werden kann und sich dabei die Temperatur der Leiterkombination nicht über die kritische Temperatur erhöht. Diese Stabilisierung geht allerdings auf Kosten des Packungsfaktors.

Magnete mittlerer Grösse (Durchmesser einige Dezimeter) kann man unter Verzicht auf vollständige Stabilisierung mit relativ gutem Packungsfaktor und noch erträglicher Stromdegradation bauen, wenn man supraleitende Litze verwendet, die aus einer Reihe von verseilten, kupferüberzogenen Supraleitungsdrähten besteht. Zum besseren Kontakt untereinander und zum Schutz gegen Korrosion werden die Litzen meist noch mit einem Indiumüberzug versehen. Fig. 4 zeigt einen Litzenmagneten, der von Bogner in unserem Laboratorium für Plasmaexperimente gebaut wurde. Der Magnet ist 15 cm lang und hat eine Bohrung von 14 cm Durchmesser. Die maximale Zentralfeldstärke beträgt 44 kOe, die maximale Windungsfeldstärke 51 kOe, die effektive Stromdichte liegt bei 160 A/mm².

Dr. K. Reichert, Institut für Elektrische Maschinen der Technischen Hochschule Stuttgart: Die Eigenschaften einer tiefgeköhlten, normalleitenden elektrischen Maschine werden wesentlich von den beiden folgenden Zusammenhängen bestimmt:

1. *Wirbelstrom- und Grösseneffekt:* Eine wechselstromdurchflossene, tiefgeköhlte und normalleitende Wicklung muss zur Vermeidung von Wirbelströmen aus sehr dünnen, u. U. verdrehten Teileleitern aufgebaut werden, da entsprechend der starken Abnahme des elektrischen Widerstandes von reinen Leitern bei tiefen Temperaturen die Eindringtiefe δ des Stromes sehr kleine Werte annimmt ($\delta = 0,34$ mm in AL 99,999 bei 20 °K und 50 Hz). Nach den üblichen Vorstellungen ist der Wirkwiderstand einer wechselstromdurchflossenen Wicklung gegebener Lagenzahl m

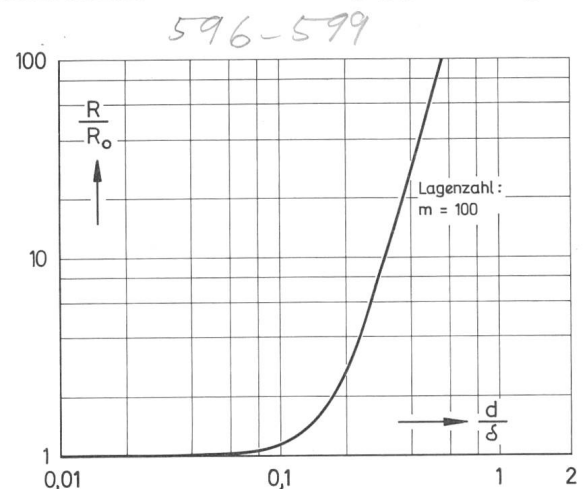


Fig. 1
Abhängigkeit des relativen Wirkwiderstandes R/R_0 einer mehrlagigen, verdrehten wechselstromdurchflossenen Wicklung (Nutenleiter) vom Verhältnis Teileleiterstärke d zu Eindringtiefe δ

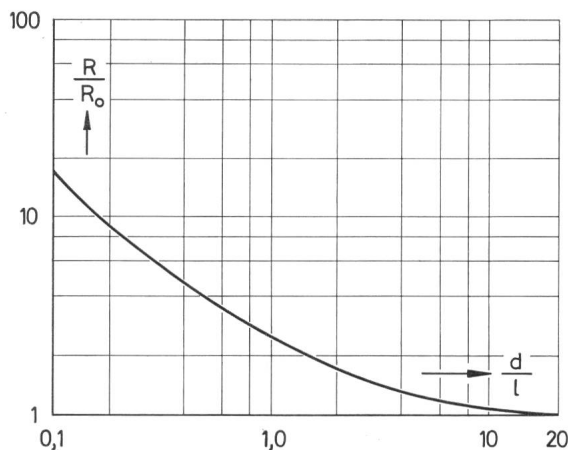


Fig. 2
Abhängigkeit des relativen Grösseneffektwiderstandes R/R_0 von Filmen nach Cotti vom Verhältnis Leiterstärke d zur mittleren freien Weglänge l der Elektronen

umso kleiner, je kleiner das Verhältnis Teilleiterstärke d zu Eindringtiefe δ ist (Fig. 1). Unterschreitet jedoch die Teilleiterstärke d die mittlere freie Weglänge l der Elektronen, so wird der Grösseneffekt wirksam: Durch die Streuung der Elektronen an der Leiteroberfläche wird die Anzahl der am Ladungstransport beteiligten Elektronen vermindert und damit der elektrische Widerstand erhöht. Dieser wird daher umso grösser, je kleiner das Verhältnis d zu l ist (Fig. 2).

Bei normalen Temperaturen ist in den üblichen Leitern l sehr viel kleiner als d oder δ . In reinen Leitern, wie sie in tiefgekühlten Wicklungen verwendet werden müssen, kann jedoch bei tiefen Temperaturen wegen der Abhängigkeiten $1 \approx \rho_0^{-1}$ und $\delta \approx \rho^{1/2}$ die mittlere freie Weglänge l in die Grössenordnung der Teilleiterstärke d kommen. Zusätzlich zum Wirbelstromeffekt bestimmt dann für $d < 10l$ der Grösseneffekt den Wirkwiderstand. Ist l nicht wesentlich kleiner als d und δ , so überschneiden sich beide Effekte (Fig. 3). Der Wirkwiderstand R hat dann bei einer bestimmten Teilleiterstärke d einen Minimalwert R_{\min} , der wesent-

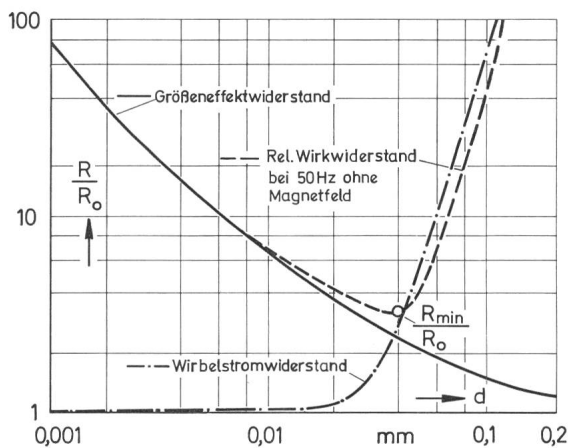


Fig. 3
Abhängigkeit des relativen Wirkwiderstandes R/R_0 einer mehrlagigen, verdrehten, wechselstromdurchflossenen Wicklung (Nutenleiter) in Abhängigkeit von der Teilleiterstärke d für $\delta = 0,2$ mm und $l = 0,04$ mm

lich grösser als der Gleichstromwiderstand R_0 werden kann. Dieser Effekt kann die Eigenschaften einer tiefgekühlten Wicklung ausserordentlich ungünstig beeinflussen: Dem spezifischen Gleichstromwiderstand ρ_0 bzw. der mittleren freien Weglänge l entsprechend werden jeder Leiterhöhe $m d$ eine optimale Teilleiterhöhe d und ein minimaler Wirkwiderstand R_{\min} zugeordnet. Dadurch wird aber, wenn R_{\min} oder d vorgegeben sind, die Leiterhöhe $m d$ begrenzt, d. h., Wicklungen in Transformatoren z. B. müssen u. U. verschachtelt ausgeführt werden.

Die Überschneidung von Wirbelstrom- und Grösseneffekt ist umso ausgeprägter und damit der Minimalwert des Widerstandes R_{\min} umso grösser, je kleiner der spezifische Gleichstromwiderstand ρ_0 des Leiters ist. Es sollte daher ρ_0 mindestens so gross sein, dass l kleiner als d ist. Allzu grosse Forderungen an die Reinheit der Leiter für tiefgekühlte Wechselstromwicklungen zu stellen ist daher nicht sinnvoll.

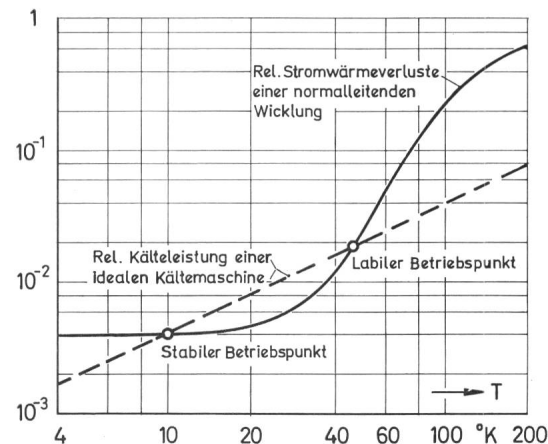


Fig. 4
Abhängigkeit der relativen Kälteleistung einer Kältemaschine und der relativen Stromwärmeverluste einer Wicklung von der Temperatur T

2. **Kühlung:** Wegen der geringen spezifischen Wärme der Leiter bei tiefen Temperaturen muss die in der Wicklung einer tiefgekühlten Maschine entstehende Verlustwärme an das Kühlmittel bzw. an die Kältemaschine unmittelbar abgeführt werden. Verwendet man eine Kältemaschine mit konstantem Kühlmitteldurchsatz, so ist deren Kälteleistung im Idealfall der absoluten Temperatur proportional (Fig. 4). Die Bilanz des Kühlvorgangs: Kälteleistung gleich Verluste wird daher in diesem Fall wegen der mehr als proportionalen Zunahme der Verluste bei tiefen Temperaturen bei zwei verschiedenen Temperaturen erfüllt, von denen jedoch nur der tieferliegende Betriebspunkt stabil ist. Die Überlastbarkeit einer tiefgekühlten Wicklung ist also gering, wenn nicht die Kennlinie der Kältemaschine der Temperaturabhängigkeit der Verluste angepasst und die Kältemaschine oder das Kühlmittelvolumen entsprechend den auftretenden Überlastungen überdimensioniert wird. Da die Wirtschaftlichkeit einer tiefgekühlten elektrischen Maschine sehr stark von den Kosten der Kältemaschine beeinflusst wird, sind einer Überdimensionierung Grenzen gesetzt. Die Kältemaschine und das Kühlmittelvolumen einer tiefgekühlten elektrischen Maschine muss daher sehr sorgfältig aufeinander abgestimmt und entsprechend den Anforderungen vor allem an die Überlastbarkeit ausgelegt werden.

Comité Européen de Coordination des Normes Electrotechniques (CENEL)

Expertengruppe CENEL/2B, Dimensions of electrical machines

In Paris versammelte sich am 13. September 1966 die Expertengruppe CENEL/2B unter dem Vorsitz von Prof. Hedström, Schweden.

Nach Genehmigung des Protokolls der letzten Sitzung vom 2. Februar 1966 in Frankfurt wurde die Frage der Abmessungen

von Käfigankermotoren mit Achshöhen von 450...1000 mm besprochen. Unbestritten waren dabei lediglich die Masse der Achshöhen. Für die übrigen Anschlussmasse soll vorerst eine Rundfrage die heute üblichen Werte ermitteln, wobei daraus dann später bevorzugte Werte der Massereihen R20 und R40 herausgezogen werden.