Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 18

Artikel: Tieftemperaturanlagen : Aufwand für Kälteerzeugung, Isolationsprobleme

Autor: Trepp, Ch.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916629

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: 08.08.2025

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

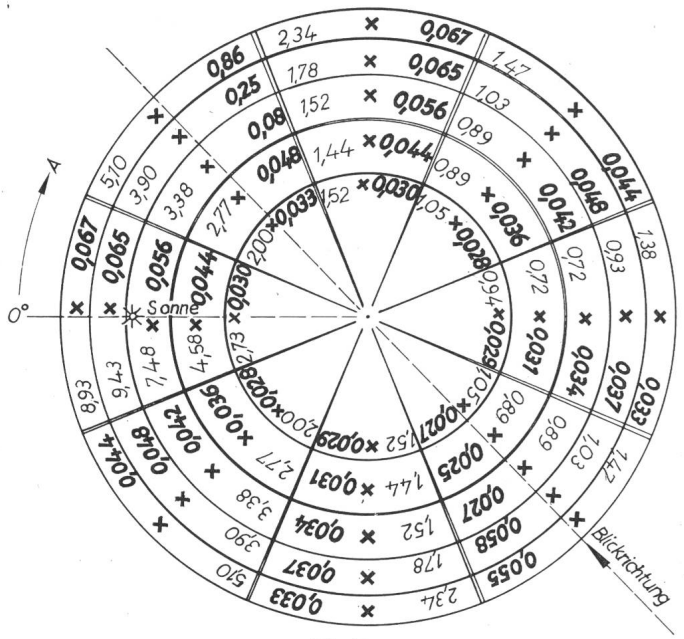

Fig. 7
Vorausbestimmung der Fahrbahnleuchtdichte mit Hilfe des Beleuchtungsstärken- und des Leuchtdichtefaktordiagrammes

einige Messergebnisse vor. Die Messungen wurden zur Mittagszeit bei einigermassen klarem Wetter durchgeführt. Für den vorhandenen Sonnenstand zeigen die erhaltenen Messresultate eine leidliche Übereinstimmung mit den auf Grund der beschriebenen Methode zu erwartenden Werten.

Unter Voraussetzung der Kenntnis der wirklichen Leuchtdichtefaktoren bewahrt die Anwendung der beschriebenen Bewertungsmethoden den Verfasser von Tunneleingangsbeleuchtungsprojekten bereits vor groben Fehlern und damit möglicherweise auch vor unnötigen Ausgaben. Bei solchen Vorausberechnungen wird es ja kaum je darum gehen, eine Genauigkeit von $\pm 5\,\%$ zu erreichen.

Literatur

[1] Leitsätze für Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. DIN-Normblatt No. 5034.

[2] *Commission internationale de l'éclairage:* Compte rendu de la quinzième session Vienne juin 1963. Volume B: Technique de l'éclairage. Comité E-3.2 Lumière du jour. S. 349...362.

[3] *D. A. Schreuder:* The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels. Philips Technical Library, Eindhoven 1964.

[4] *H. Kabayama:* Study on Adaptive Illumination for Sudden Change of Brightness. J. Illum. Engng. Inst. Japan 47(1963)10, S. 488...496.

[5] *F. Mäder* und *O. Fuchs:* Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln. Bull. SEV 57(1966)8, S. 359...366.

[6] *Nederlandse Stichting voor Verlichtsingskunde:* Aanbevelingen voor Tunnelverlichting. Moormans Periodieke pers. S'Gravenhage 1961.

[7] *Association Française de l'Eclairage et Comité National Français de l'Eclairage.* Recommandations relatives à l'éclairage extérieur. 2e édition, Paris 1965.

[8] *C. Bauer:* Ein technisches System der Leuchtdichte in der Strassenbeleuchtung. Lichttechnik 17(1965)7, S. 83 A...86 A.

[9] *B. H. Crawford:* The Effect of Field Size and Pattern on the Change of Visual Sensitivity with Time. Proc. Royal Soc. London, Series B 129(1940)6, S. 94...106.

[10] *H. Siedentopf* und *E. Reeger:* Die Beleuchtung durch die Sonne. Meteorologische Ztschr. 61(1944)–, S. 114...117.

[11] *F. Baur:* Franz Linkes meteorologisches Taschenbuch. Neue Ausgabe, Bd. 2, Leipzig 1953.

[12] *H. Wörner:* Die Vorhersage der Ortshelligkeit. Abhandlungen des meteorologischen und hydrologischen Dienstes des DDR 5(1954)33, S. 1...54.

[13] *F. Steinhauser, O. Eckel* und *F. Sauberer:* Klima und Bioklima von Wien. 1. Teil. 3. Sonderheft Wetter und Leben 1955.

[14] *R. Kittler:* Luminance Distribution on Cloudless Sky after Measurements and Theoretical Relations. Meteorologicke Zpravy 15(1962)2, S. 34.

[15] *R. Dogniaux:* Données météorologiques concernant l'ensoleillement et l'éclairage naturel. Contributions de l'Institut royal météorologique de Belgique No. 60, Uccle-Bruxelles 1960.

[16] *B. Kojic:* The Graphical Method for Determination of Interiors Daylighting and Clear Sky Conditions. Bull. acad. serbe sciences, Classes des sciences techniques –(1963)6, S. 29...33.

Adresse des Autors:

Dr. *F. Mäder,* Adjunkt, Eidg. Amt für Mass und Gewicht, 3084 Wabern.

Tieftemperaturanlagen

Aufwand für Kälteerzeugung, Isolationsprobleme

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 18. Mai 1966 in Zürich,

von *Ch. Trepp,* Winterthur

621.56

1. Einleitung

In nächster Zeit ist eine verbreitete Anwendung der Supraleitung zu erwarten. Soweit heute bekannt, tritt aber die Supraleitung nur bei sehr tiefen Temperaturen auf. Deshalb werden sich die Erbauer von Magneten auch mit den Problemen der Tieftemperaturtechnik, insbesondere der Erzeugung und Aufrechterhaltung tiefer Temperaturen, befassen müssen.

Bisher sind keine Legierungen bekannt geworden, welche oberhalb von 20 °K supraleitend sind. Mit abnehmender Temperatur nimmt ganz allgemein das kritische Feld zu und es ist wünschenswert, Supraleiter möglichst in der Nähe des absoluten Nullpunktes zu betreiben. Von den Temperaturen, die nahe dem absoluten Nullpunkt liegen, d. h. möglichst nahe bei 0 °K = −273,15 °C, sind diejenigen um 4 °, d. h. −269 °C, technisch am leichtesten zu realisieren. 4,215 °K ist nämlich der Siedepunkt von Helium bei Atmosphärendruck. Man kann sich also für Tieftemperaturexperimente oder auch für industrielle Anwendungen flüssiges Helium kaufen und so eine Verdampfungswärme zur Deckung der Wärmeeinfälle benutzen, oder, was man für industrielle Anwendungen eher tun wird, man schafft sich eine Helium-Kälteanlage an, mit welcher diese tiefen Temperaturen erzeugt werden können. Aus betrieblichen Gründen wird man als tiefste Temperatur meist 4,3...4,5 °K erzeugen, entsprechend der Siedetemperatur von flüssigem Helium bei etwas erhöhtem Druck.

Bevor hier auf einige Besonderheiten der Helium-Kälteanlagen hingewiesen wird, seien — ausgehend von der Kältemaschine des Haushaltskühlschrankes — anhand einiger Beispiele ein paar Möglichkeiten für den Bau von Tieftemperaturanlagen erörtert.

2. Kälteerzeugung

Die heute üblichen Verfahren zur Erreichung tiefer Temperaturen machen ausnahmslos Gebrauch von den thermo-

dynamischen Eigenschaften von Gasen. Die thermoelektrische Kühlung z. B. versagt mit den bislang bekannten Materialien bei sehr tiefen Temperaturen völlig.

2.1 Kältemaschine

Das Schema einer einfachen Kältemaschine, wie in der Kälteindustrie allgemein verbreitet, zeigt Fig. 1.

Das vom Kompressor verdichtete Gas wird im Kondensator durch Wärmeentzug (meist mit Kühlwasser) verflüssigt. Die Flüssigkeit wird im Drosselventil auf den Ansaugdruck entspannt und dem Verdampfer zugeführt. Dort verdampft sie bei der dem tiefen Druck entsprechenden tiefen Temperatur. Dabei entzieht das Arbeitsmedium (NH_3, Freon) der Umgebung Wärme, d. h. leistet bei dieser Temperatur Kälte.

Diese Kühlmethode kann nicht über eine beliebig grosse Temperaturspanne verwendet werden. Die obere Grenze ist die kritische Temperatur, oberhalb welcher Flüssigkeit nicht existieren kann, die untere, die Temperatur des Tripelpunktes, unterhalb welcher der Stoff gefroren ist. Aus praktischen Gründen wird selbst dieser mögliche Bereich meist nicht ausgenützt.

Durch Serieschaltung mehrerer Kreisläufe mit verschiedenen Kältemitteln ist es aber möglich, grössere Temperaturbereiche zu überbrücken. Die in Fig. 2 dargestellte Kaskade mit 4 Kaltdampfmaschinen kann z. B. für die Erzeugung von Kälte bei etwa −200 °C benutzt werden.

307-320

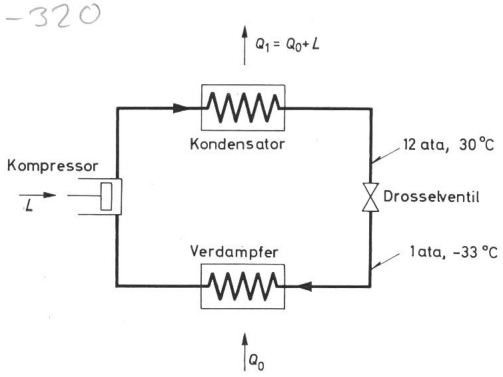

Fig. 1
Schema der NH_3-Kaltdampfmaschine
L Arbeit des Kompressors; Q_0 der Kühlstelle entzogene Wärme; Q_1 an die Umgebung abgegebene Wärme

Die erreichbaren Wirkungsgrade solcher Kältekaskaden sind sehr gross. Trotzdem in diesem Schaltschema noch nicht alle für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendigen Wärmeaustauscher und überhaupt keine Regelorgane eingezeichnet wurden, erkennt man, dass der apparative Aufwand gross ist. Davon abgesehen, gibt es noch ein natürliches Hindernis, welches es verunmöglicht, mit einer Kaskade von Kaltdampfmaschinen Temperaturen von 4 °K zu erreichen. Die Kältemittel der einzelnen Kreisläufe müssen so ausgewählt werden, dass die Tripelpunkttemperatur des Arbeitsmediums einer Stufe niedriger ist als die kritische Temperatur des Kältemittels des nächsten, bei tieferer Temperatur arbeitenden Kreislaufes. Jeder Verdampfer hat den nächst tiefer liegenden Kondensator zu kühlen. Dabei ist zu beachten, dass nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik Wärme von selbst nur von einem Körper höherer zu einem solchen tieferer Temperatur übergehen kann.

Bei sehr tiefen Temperaturen ist die Anzahl der verfügbaren Kältemittel sehr klein. Sie sind in Tabelle I aufgezählt. Bei Betrachtung der zusammengehörenden charakteristischen Temperaturen erkennt man, dass z. B. die kritische Temperatur von Helium tiefer ist als die Tripelpunkttemperatur von Wasserstoff — eine Wärmeübertragung in einer Kaskade ist in diesem Fall nicht möglich.

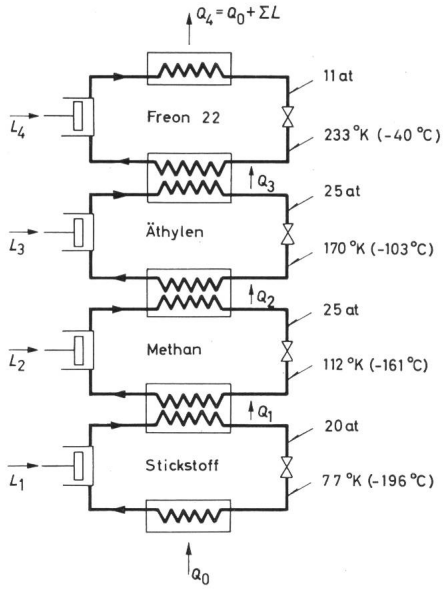

Fig. 2
Schema einer vierstufigen Kältekaskade mit den Kältemitteln Freon 22, Aethylen, Methan und Stickstoff
Verdampfungsdruck = 1 ata
Bezeichnungen siehe Fig. 1

2.2 Drossel- oder Joule/Thomson-Effekt

Ein für die Tieftemperaturtechnik sehr wichtiger kälteerzeugender Effekt ist der Drossel- oder Joule/Thomson-Effekt. Er tritt auf bei der Entspannung eines komprimierten Gases in einem Ventil.

Lässt man aus einem unter Druck stehenden handelsüblichen Stahlzylinder, welcher beispielsweise mit Stickstoff von 150 at gefüllt ist, den Inhalt durch ein Ventil ins Freie ausströmen, so wird man feststellen, dass die Temperatur hinter dem Ventil −12 °C beträgt, falls diejenige des Druckgasvorrates +20 °C ist. Die bei der Drosselung eintretende Temperaturänderung nennt man Joule/Thomson-Effekt.

Carl von Linde hatte den genialen Gedanken, diesen Drosseleffekt mit Hilfe eines Gegenstrom-Wärmeaustauschers auszunutzen; es gelang ihm, mit einer einfachen Anordnung Luft zu verflüssigen. In Fig. 3a ist das Schema der Kälteanlage im TS-Diagramm dargestellt. Die Strecke $\overline{1-2}$ bedeutet eine

Natürliche Grenzen für Kaltdampf-Kaskaden (Kältemittel der Tieftemperaturtechnik)
Tabelle I

	Tripelpunkt (Temperatur °K)	Kritischer Punkt (Temperatur °K)
20% N_2 / 80% O_2	50	
Neon	25	44
Wasserstoff	14	33
Helium		5

Wärmeübertragung möglich
Wärmeübertragung unmöglich

isotherme Kompression bei Umgebungstemperatur. Das Druckgas im Zustand *2* wird in einem Wärmeaustauscher bis zum Zustand *6* abgekühlt und dann gedrosselt. Dabei wird Zustand *7* erreicht. Die Drosselung findet auf einer Linie konstanter Enthalpie statt und soll auf Atmosphärendruck führen. Nun kann man eine Wärmemenge Q aufnehmen, d. h. Kälteleistung abgeben und dabei einen Zustand *8* erreichen. Mit diesem wird dann das Gas zurückgeleitet in den Gegenstrom-Wärmeaustauscher und wieder auf Raumtemperatur aufgewärmt. Eine einfache Wärmebilanz zeigt, welche Kälteleistung für jedes Kilogramm komprimiertes Gas gewonnen werden kann. Man legt eine Bilanzgrenze um den Wärmeaustauscher und erhält nach dem ersten Hauptsatz folgende Gleichung, welche nichts anderes besagt, als dass die ein- und austretenden Energien gleich sein müssen:

$$i_2 = i_1 + Q$$

oder die Kälteleistung

$$Q = i_2 - i_1$$

Mit Hilfe einer einfachen Einrichtung nach Fig. 3b ist es möglich, Luft zu verflüssigen oder auch bei etwa −200 °C

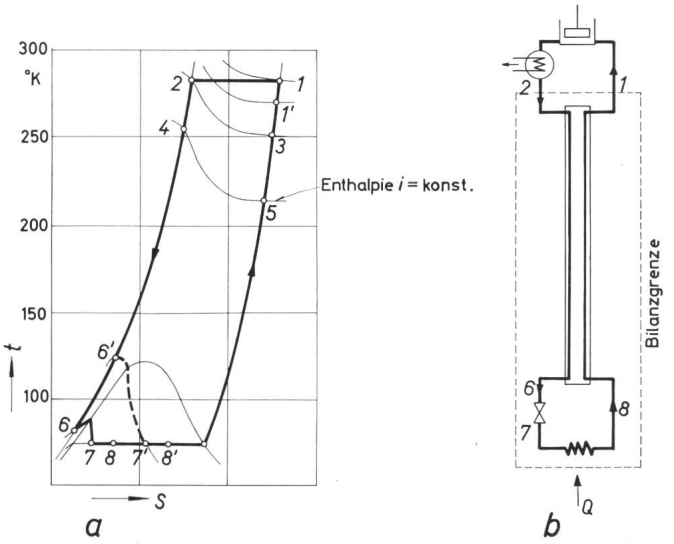

Fig. 3
Temperatur-Entropie-Diagramm (*a*) und Prinzipschema (*b*) einer Joule/Thomson-Kälteanlage
Arbeitsmittel: Stickstoff
t Temperatur; *S* Entropie
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Kälte zu erzeugen. Der Joule/Thomson-Gegenströmer hat dabei die Aufgabe, die Kälte auf ein tiefes Temperaturniveau zu bringen. Der Betrag der Kälteleistung ist gegeben durch die Enthalpiedifferenz der wärmeaustauschenden Ströme bei Raumtemperatur.

Der Drosseleffekt ist stark abhängig von der Gasart und Temperatur. So steigt beispielsweise bei Wasserstoff und Helium bei der Drosselung bei Raumtemperatur die Temperatur sogar etwas an. Erst unterhalb des etwa 6- bis 8fachen Betrages der kritischen Temperatur ist der Drosseleffekt positiv (sog. Inversionstemperatur).

Durch Neben- und Hintereinanderschaltung von mehreren Drosselkreisläufen ist es möglich, tiefste Temperaturen zu erreichen. Für die Auswahl der Kältemittel einer solchen Joule/Thomson-Kaskade gelten ähnliche Kriterien wie für diejenigen einer Kaltdampf-Kaskade. Die Inversionstemperatur einer

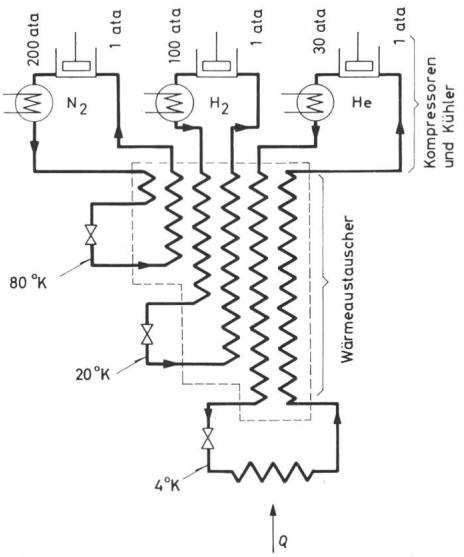

Fig. 4
Kaskadenschaltung von Drosselkreisläufen zur Erreichung tiefer Temperaturen
Kältemittel: Stickstoff, Wasserstoff und Helium

Stufe muss höher sein als die Tripelpunkttemperatur der nächst tiefer liegenden Stufe.

In Fig. 4 ist eine Kaskade mit den drei Kältemitteln Stickstoff, Wasserstoff, Helium schematisch dargestellt. Der Stickstoffkreislauf kühlt Wasserstoff unter die Inversionstemperatur, der Wasserstoffkreislauf seinerseits kühlt das Helium so weit, dass es mit Hilfe des untersten JT-Wärmeaustauschers verflüssigt werden kann. Eine solche Anlage kann als Heliumverflüssiger oder als Kälteanlage bei 4 °K verwendet werden.

Diese Kälteanlagen sehen auf dem Schema sehr einfach aus. Der apparative Aufwand ist aber auch hier wie bei den vorher besprochenen Kaltdampfanlagen recht gross.

2.3 Arbeitsleistende Entspannung

Neben dem Drosseleffekt ist die arbeitsleistende Entspannung des Kreislaufgases ein anderes wichtiges Hilfsmittel zur Erreichung tiefer Temperaturen. Es sei hier nur die adiabate

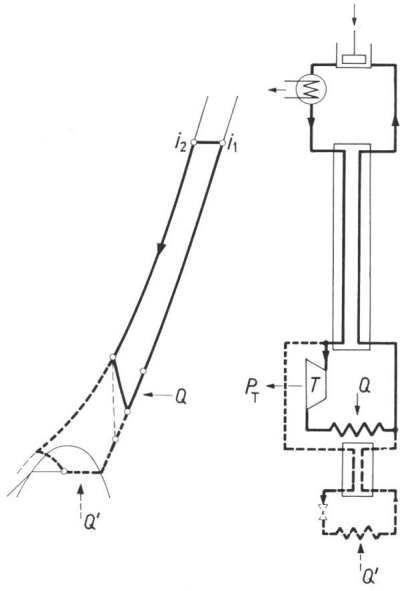

Fig. 5
Temperatur-Entropie-Diagramm und Prinzipschema einer Kälteanlage mit arbeitsleistender Entspannung des Kältemittels
i_1, i_2 Aus- bzw. Eintrittsenthalpie; Q, Q' Kälteleistung; P_T Turbinenleistung; T Turbine

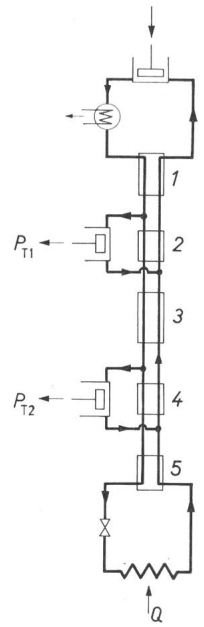

Fig. 6
Einfaches Schema einer Collins-Heliumkälteanlage
1...5 Gegenstromwärmeaustauscher; *6, 7* Kolbenentspannungsturbinen; P_{T1}, P_{T2} Leistung der Entspannungsturbinen; *Q* Kälteleistung

Entspannung, deren Anwendung für Kälteanlagen zuerst von *Georges Claude* vorgeschlagen wurde, betrachtet. Sie macht es möglich, auch Helium ohne Verwendung weiterer Kühlmittel zu verflüssigen. Die Kälte, welche für die Verflüssigung notwendig ist, wird in der von *Claude* vorgeschlagenen Arbeitsmaschine erzeugt. Fig. 5 zeigt ein einfaches Schema einer solchen Anlage. Der Kühlkreislauf ist ausgezogen, der überlagerte Drosselkreislauf gestrichelt.

Die Entspannungsmaschine *T* gibt die Leistung P_T nach aussen ab und kühlt damit das Gas des Drosselkreislaufes. Die Wärmebilanz für diese Anlage lautet:

$$Q = i_2 - i_1 + P_T$$

Daraus erkennt man, dass es für das Funktionieren einer solchen Anlage nicht mehr entscheidend ist, dass $i_2 > i_1$ ist. *Q* muss auf jeden Fall positiv werden, wenn nur P_T genügend gross ist.

Die heutigen Kälteanlagen sind oft kombinierte Systeme mit verschiedenen Verfahren, nämlich Vorkühlung, Verwendung von Expansionsmaschinen und Ausnützung des Drosseleffektes.

Ein Beispiel einer solchen Anlage ist der von *Collins* entworfene Helium-Verflüssiger (Fig. 6). In dieser von *A. D. Little* gebauten Anlage wird ein Teil des Heliumgases in zwei parallel geschalteten Kolbenentspannungsmaschinen arbeitsleistend entspannt, der Rest in einem Joule/Thomson-Ventil gedrosselt. Die Anlage kann mit oder ohne Stickstoff-Vorkühlung betrieben werden. Die Apparatur wurde als Verflüssiger entworfen, hat in vielen Laboratorien der Welt Aufstellung gefunden und wesentlich zur Verbreiterung der Tieftemperaturtechnik beigetragen.

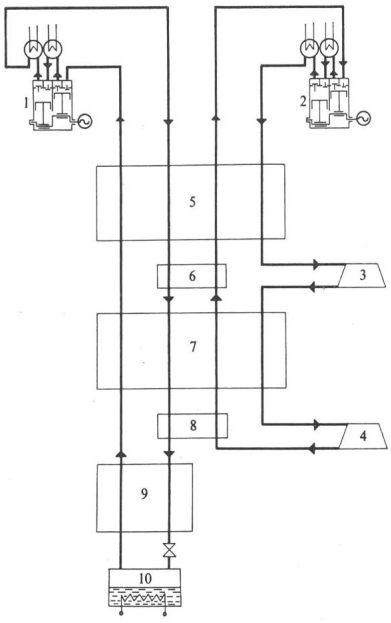

Fig. 7
Schema einer Helium-Kälteanlage mit Entspannungsturbinen
1 Kompressor für Verflüssigungskreislauf; *2* Kompressor für Turbinenkreislauf; *3, 4* Kaltgasturbinen; *5...9* Wärmeaustauscher; *10* Flüssighelium-Behälter

2.3.1 Beispiel einer industriellen Helium-Kälteanlage

Anhand einiger Figuren sei eine Helium-Kälteanlage, wie sie von der Sulzer AG in industriellem Maßstab gebaut wird, erläutert.

Fig. 7 zeigt das Schema einer Anlage mit zwei vollständig geschlossenen He-Kreisläufen. *1* und *2* sind die Kompressoren des Drossel- bzw. kälteerzeugenden Turbinenkreislaufes. *5...9* stellen Gegenstrom-Wärmeaustauscher dar. *3* und *4* sind hochtourige Entspannungsturbinen, mit welchen die Nutzkälte produziert wird. Es werden einstufige Zentripetalturbinen mit Raddurchmessern von 40 mm und Drehzahlen von etwa 100000 min^{-1} verwendet.

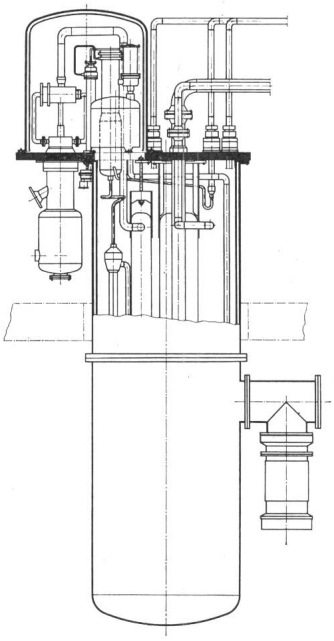

Fig. 8
Schnittzeichnung des Tieftemperaturteils einer Heliumkälteanlage

Fig. 8 zeigt die Kälteanlage im Schnitt. An einer stabilen horizontalen Platte hängen die Wärmeaustauscher; auf derselben Platte aufgebaut sind die beiden vertikalen Kaltgasturbinen. Über all diese Teile sind zwei Kessel gestülpt, deren Inneres zwecks Wärmeisolierung evakuiert ist. Fig. 9 gibt einen Begriff vom Platzbedarf einer solchen Anlage.

Diese Art von Anlagen ist für den industriellen Einsatz gedacht und die Anlageelemente sind für kontinuierlichen Dauerbetrieb entwickelt worden. Sehr kleine Kälteleistungen lassen sich bei Verwendung von Turbinen nicht mehr wirtschaftlich erreichen. Die wirtschaftlich untere Grenze für Turbinenanlagen liegt heute bei einer Kälteleistung von ca. 100 W bei 4,5 °K oder einer Verflüssigungsleistung von etwa 15 Lit. He/h.

Für so kleine Anlagen müssen kleinste Turbinen gebaut werden (Durchmesser ca. 20 mm, Drehzahl bis zu 300 000 U./min).

2.4 Aufwand für die Kälteerzeugung

2.4.1 Leistungsbedarf

Die minimal aufzuwendende Leistung *P* für die Erzeugung einer Kälteleistung *Q* hängt von der Temperatur ab und kann mit Hilfe des in Fig. 10 rechts oben schematisch dargestellten Carnot-Prozesses berechnet werden. Sie beträgt:

$$\frac{\text{aufgewendete Leistung}}{\text{Kälteleistung}} = \frac{P}{Q} = \frac{T_0 - T_1}{T_1}$$

Fig. 10 zeigt auch die Abhängigkeit der aufzuwendenden Leistung von Temperatur und Wirkungsgrad. Die Anlage-Wirkungsgrade selbst wiederum sind abhängig von Temperatur und Anlagegrösse und es kann hierfür keine allgemeine

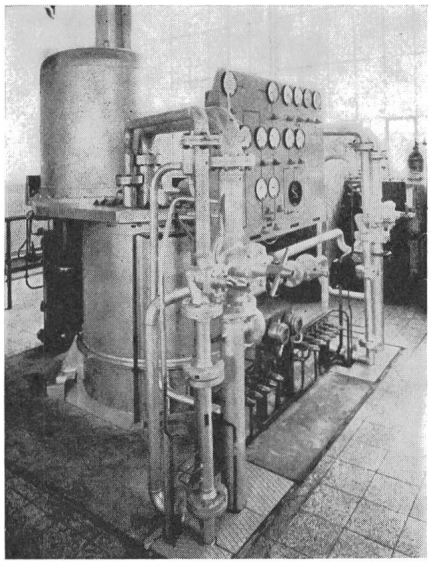

Fig. 9
Gesamtansicht der Helium-Kälteanlage

Regel angegeben werden, da durch Steigerung des Aufwandes oft eine Wirkungsgrad-Verbesserung möglich ist.

Ein breites schraffiertes Band in Fig. 10 gibt etwa die Anlagewirkungsgrade wieder, welche je nach Grösse der Anlage und je nach Aufwand erreicht werden.

2.4.2 Kosten

Auch wenn gewisse Materialien schon bei 18 °K supraleitend werden, so wird man doch ganz allgemein in nächster Zeit die Supraleiter mit Temperaturen um 4 °K betreiben. Die folgenden Betrachtungen zum Kapitalaufwand beschränken sich nur auf Temperaturen von 4...5 °K.

Grundsätzlich existieren zwei Methoden, mit denen ein einmal abgekühlter supraleitender Magnet auf dieser Temperatur

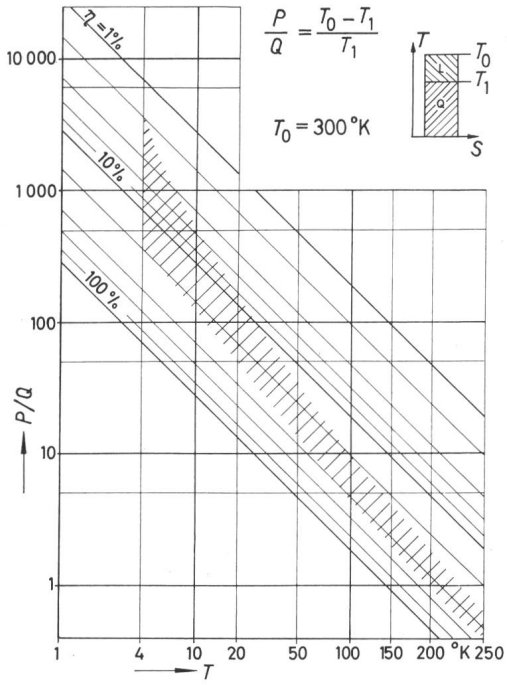

Fig. 10
Arbeitsaufwand P zur Kälteerzeugung Q in Abhängigkeit von der Kühltemperatur T_1 und des Anlagewirkungsgrades η
Umgebungstemperatur T_0 = 300 °K
S Entropie; T Temperatur

gehalten werden kann: entweder man kauft das Kältemittel (flüssiges Helium) oder man beschafft sich eine Kälteanlage.

2.4.2.1 Kauf von flüssigem Helium. 1 Liter flüssiges Helium kostet heute, wenn man es in kleinen Quantitäten bezieht, ca. sFr. 40.— bis 60.—. Beim Bezug von grösseren Quantitäten kann dieser Preis bis auf sFr. 10.— bis 30.— pro Liter sinken. Die Verdampfungswärme von 1 Liter flüssigem Helium (man kann zur Kühlung nur die Verdampfungswärme auszunützen) beträgt 2,61 kJ/Lit. Zur Aufbringung von 1 kW Leistung sind demnach alle 2,6 s 1 Lit. Helium oder stündlich 1380 Lit. Helium notwendig. Bei grösseren Kälteleistungen ist die Kühlung durch Ausnützung nur der Verdampfungswärme sehr unwirtschaftlich, weil dadurch pro kW Leistung Kosten von über sFr. 10000.— pro Stunde entstehen. Auch bei verhältnismässig kleinen Leistungen sollte man, wenn es um einen Dauerbetrieb geht, eine Kälteanlage anschaffen.

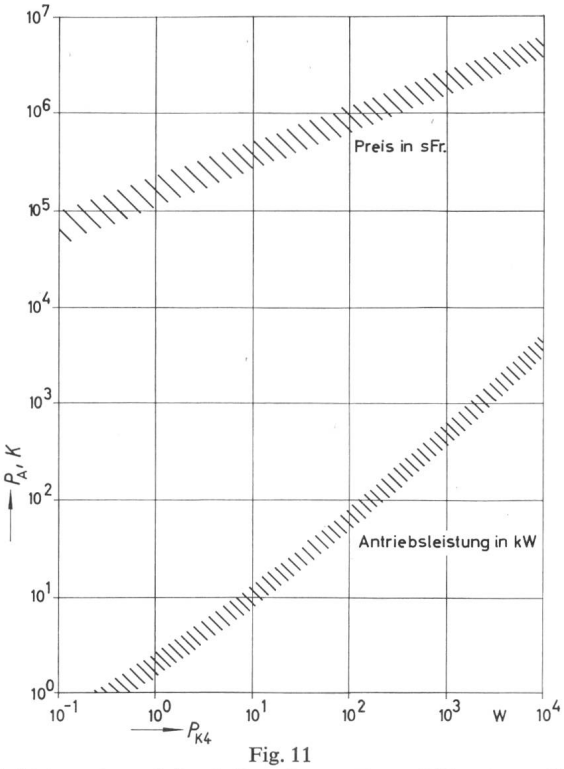

Fig. 11
Antriebsleistung P_A und Anschaffungskosten K von Kälteanlagen für 4 °K in Abhängigkeit von der Kälteleistung P_K

2.4.2.2 Kälteanlagen. Der Preis von Kälteanlagen, welche zur Kühlung bei 4 °K geeignet sind, ist sehr stark von der Kälteleistung abhängig. Die kleinsten Anlagen haben eine Leistung von etwa 3 W und kosten heute ca. sFr. 100000.— (Fig. 11).

Die grosse Streuung, die eingezeichnet wurde, rührt daher, dass es sich um Angaben verschiedener Hersteller handelt, und dass deren Anlagen nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar sind, weil es sich z. T. um solche mit, z. T. ohne Vorkühlung mit flüssigem Stickstoff handelt.

In der gleichen Figur ist die aufgenommene Kompressorleistung P_A in Funktion der bei 4 °K abgegebenen Kälteleistung P_{K4} dargestellt. Setzt man für die Energiekosten 5 Rp./kWh ein und schreibt die Anlage in 5 Jahren ab, dann zeigt die Betriebskosten K_s als Funktion der Kälteleistung P_{K4} nach Fig. 12. Die Betriebskosten enthalten keine Unkosten für Gebäude, Kühlwasser und Unterhalt, und es sind auch keine Löhne berücksichtigt.

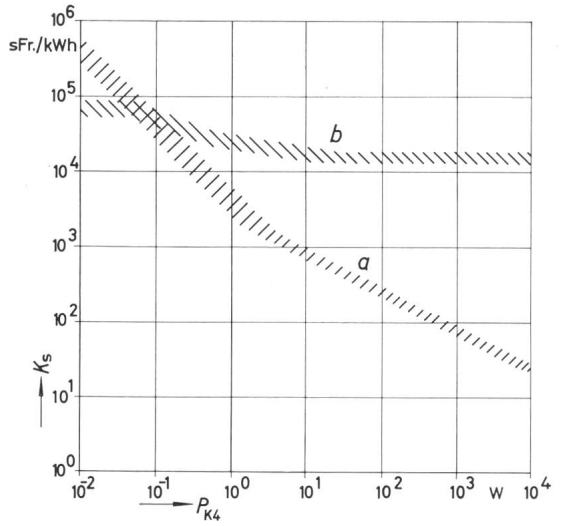

Fig. 12
Kosten für Kühlung bei 4 °K in kontinuierlichem Betrieb (8000 h/Jahr)
a bei eigener Kälteanlage; *b* beim Ankauf von flüssigem Helium

Zum Vergleich sind in Fig. 12 die Kosten eingetragen, die durch den Kältebedarf bei Ankauf von flüssigem Helium entstehen. Bei grossen Leistungen ist der Preis, bezogen auf die kWh, konstant und sehr viel grösser als die Kosten für Abschreibung und Betrieb von Kälteanlagen. Die Dauerleistung, bei welcher der Ankauf von flüssigem Helium günstiger ist als die Kälteanlage, liegt bei etwa 100 mW.

In Fig. 13 wurde für einen diskontinuierlichen Betrieb die analoge Zusammenstellung gemacht. Dabei wurde angenommen, dass ein Magnet nur jede Woche während 3 Tagen für je 7 h im Betrieb steht. Dieser kann für den Betrieb in einem Laboratorium in Frage kommen und gibt jährliche Betriebszeiten von ca. 1000 h.

Hier ist der Ankauf von flüssigem Helium unterhalb von Kälteleistungen von etwa 1 W preislich günstiger als der Betrieb einer eigenen Kälteanlage.

3. Isolation

Es wurde gezeigt, dass Anschaffung und Betrieb von Tieftemperaturanlagen recht aufwendig sein können. Man wird also bestrebt sein, supraleitende Geräte so zu bauen, dass sie

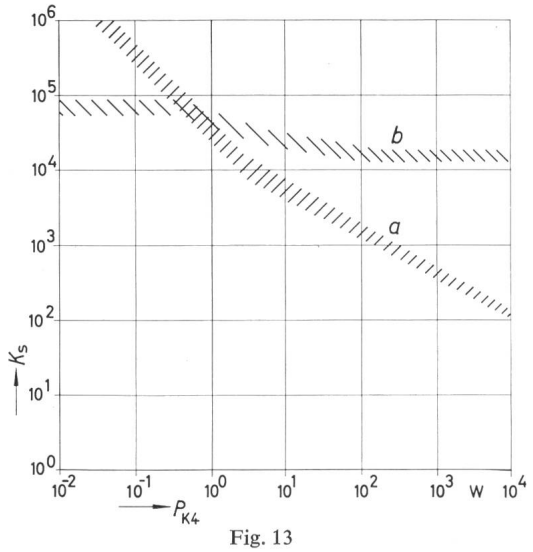

Fig. 13
Kosten für Kühlung bei 4 °K in diskontinuierlichem Betrieb (1000 h/Jahr)
a bei eigener Kälteanlage; *b* beim Ankauf von flüssigem Helium

möglichst wenig Kälte brauchen. Eine wesentliche Wärmequelle ist die Umgebung, zu der ja ein Temperaturunterschied von etwa 300 °C besteht.

Magnetspulen können je nach Grösse ein beachtenswertes Gewicht aufweisen. Im allgemeinen werden die Spulen auf eine Temperatur von 4 °K gebracht; die Widerlager der Abstützung weisen eine Temperatur von 300 °K auf. Zur Verringerung der Kälteverluste können die Abstützungen auch teilweise auf eine Zwischentemperatur gekühlt werden. Für solche Abstützungen werden Materialien verwendet, bei denen das Verhältnis von Zugfestigkeit σ zu Wärmeleitfähigkeit λ möglichst gross ist.

In Tabelle II sind einige Beispiele für verschiedene Materialien angegeben. Der Wert für Aluminium der Serie 20 wurde willkürlich gleich 1 gesetzt.

Verhältnis der Zugfestigkeit σ zur Wärmeleitfähigkeit λ verschiedener Materialien

Tabelle II

Material	σ/λ
Aluminium S 20	1
Rostfreier Stahl 18/8	10
Titanlegierung	35
Nylon	90
Dacron	190

Um den Wärmeeinfall durch die oft recht grossen Oberflächen von Magneten möglichst klein zu halten, ist eine wirksame Isolation nötig.

Ohne alle Möglichkeiten und bisherigen Entwicklungen auf dem Gebiet der Wärmeisolierung erschöpfend zu diskutieren, sei nur kurz angegeben, welche Methoden heute meistens für diese Tieftemperaturisolationen angewendet werden.

Praktisch in allen Fällen, wo es gilt, Räume zu isolieren, die mit flüssigem Helium gefüllt sind, also eine Temperatur von etwa −270 °C haben, macht man sich für eine wirksame Isolation die Gedanken von *James Dewar* zunutze. Ihm gelang es 1898 zum ersten Mal, Wasserstoff zu verflüssigen; für seine Tieftemperaturexperimente hatte er schon einige Zeit vorher die Thermosflasche entwickelt oder, wie man in der Tieftemperaturtechnik sagt: Vakuumisolation oder das Dewargefäss. Im wesentlichen wurde in den letzten Jahren der von *Dewar* vorgezeigte Weg weiter verfolgt.

Zur Verringerung der Wärmeleitung wird der Isolationsraum möglichst gut leergepumpt und auf Hochvakuum gehalten (im allgemeinen soll der Restdruck niedriger sein als 10^{-5} mm Hg). Zur Verminderung der Wärmestrahlung werden verschiedenste Metalle mit möglichst kleiner Emissivität in den Vakuumraum gebracht.

Fig. 14 zeigt den Bereich der Wärmeleitzahlen von Isolationsmitteln, die heute verwendet werden. Auf der unteren horizontalen Skala ist die Wärmeleitzahl in W/m °C aufgetragen, auf der oberen horizontalen Skala die Wärmemenge, die bei einer Isolationsdicke von 1 cm durch jeden Quadratmeter Oberfläche bei einer Temperaturdifferenz von 300 °C eindringt. Von rechts nach links sind folgende Füllstoffe angegeben:

a) Gase (ruhend);
b) Baumwolle, Perlit (geblähte Mineralstoffe);
c) Schaumstoffe (z. B. wie Styropor, Styrofoam).

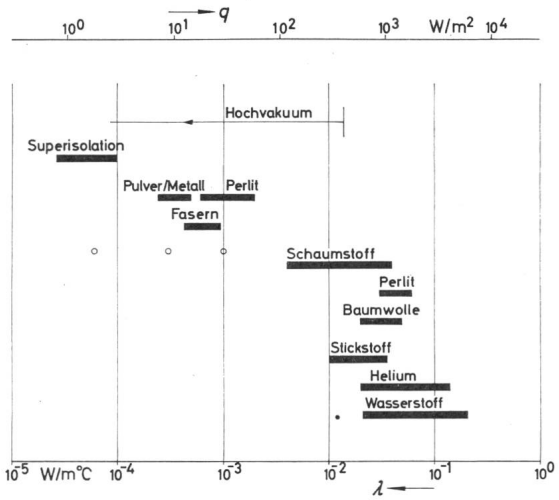

Fig. 14
Vergleich der Wärmeleitzahlen verschiedener Isolationsstoffe
q Wärmeeinfall bei 1 cm Isolierdicke und $\Delta T = 300$ °K;
λ Wärmeleitzahl

Dann im Bereich der evakuierten Isolationen:

d) Perlit;
e) Glasfasern;
f) Feinste Pulver (Cab o Sil, ein sehr feines Pulver aus Siliziumverbindungen) mit Aluminium oder anderen Metallflocken vermischt und damit undurchsichtig gemacht;
g) Superisolation.

Die Super- oder Mehrschichtenisolation besteht aus einem Stapel sehr vieler Lagen dünner Aluminiumfolien, abwechselnd mit ungeleimtem Glasfaserpapier. Es ist günstig, etwa 20 solcher Al-Strahlungsschilder pro cm Isolationsdicke zu verwenden. Dabei ist es dann (immer in Verbindung mit einem Hochvakuum von besser als 10^{-5} mm Hg) möglich, den Wärmeeinfall in ein Flüssig-He-Gefäss schon bei 1 cm Isolationsdicke auf unter 1 W/m² zu bringen.

Für die 3 wichtigsten Gruppen von Füllmaterialien in HV-Isolationsräumen sind in Tabelle III einige approximative Kosten angegeben. Wegen den verschiedenen Wärmeleitzahlen wird zur Erreichung der gleichen Isolationswirkung eine andere Materialdicke notwendig.

Approximative Isolationskosten für Isolationen bis 1 W/m² (Temperaturdifferenz 300 °C)

Tabelle III

		Perlit	Cab o Sil + 40% Al	Super-isolation
Wärmeleitzahl	W/m °K	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$
Dichte	kg/m³	190	88	90
Isolationsdicke	cm	22	7,4	1,35
Materialkosten	Fr./m³	100	780	1900
Installationskosten	Fr./m³	38	91	4500
Isolationskosten	Fr./m²	30	64,5	82

4. Schlussbemerkungen

In diesen Ausführungen sind einige Probleme der Tieftemperaturtechnik nicht erwähnt worden. Z. B. werden die Fragen der Materialeigenschaften vollständig übergangen. Immerhin sollte hier ja nur aufgezeigt werden, wie supraleitende Magnete thermisch isoliert werden können, welcher Kältebedarf ungefähr entsteht und wie gross dazu der Aufwand etwa wird. Daneben wurde angedeutet mit welchen Methoden solche tiefen Temperaturen erzeugt werden können.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *Ch. Trepp*, Gebrüder Sulzer AG, 8400 Winterthur.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des SC 2B und SC 2H vom 20. bis 24. Juni 1966 in London

SC 2B. Dimensions des machines électriques tournantes

Das Sous-Comité 2B trat vom 20. bis 22. Juni 1966 in London unter dem Vorsitz seines Präsidenten, Professor F. Dahlgren, Schweden, zu einer zweieinhalbtägigen Sitzung zusammen. Das Komitee kann auf recht fruchtbare Bemühungen zur weltweiten Normung der Anbaumasse, der Leistungen und wichtigen Toleranzen vor allem für die weitest verbreiteten Asynchronmotoren zurückblicken. So war es eingangs der Sitzungen möglich, von der abgeschlossenen Bereinigung der vierten Auflage der Publikationen 72–1 und 72–2 Kenntnis zu nehmen, wobei die meisten Länder die Ergänzungen in diesen revidierten Auflagen bereits in der Praxis übernommen haben. Alle weiteren in der Sitzung behandelten Fragen waren denn auch als Vorarbeiten für eine erst in einigen Jahren zu erwartende Erweiterung dieser Dokumente gedacht.

Nach eingehender Diskussion war es möglich, die Toleranzen für die Rechtwinkligkeit und die Zentrizität der Flansche zu Flaschmotoren in theoretisch sauberer und praxisnaher Art festzulegen. Die Toleranzen für normale Ausführung der Normmotoren sind damit etwas enger vorgesehen, als in der eingangs erwähnten vierten Auflage der Publikation 72-2 angegeben.

Da vor allem England an einer richtungweisenden Empfehlung für die Anbaumasse grösserer Motoren interessiert ist, anderseits manche europäischen Länder die Nützlichkeit dieser Normung für die recht breite Streuung der Bedürfnisse stark bezweifeln, wurde mit berechneter Zurückhaltung an die Festlegung der Anbaumasse der Grossmotoren geschritten. Für Neukonstruktionen sollen als Richtlinie die Achshöhen: 335, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900 und 1000 mm gelten. Nur für die beiden Achshöhen 335 und 400 mm sind weitergehende Anbaumasse gewählt worden:

H	*A*	*B* [1])	*B* [2])	*B* [3])	*C*	*K*
355	610	500	560	630	254	28
400	686	560	630	710	280	35

[1]) kurz, d. h. S-Typ; [2]) mittel, d. h. M-Typ; [3]) lang, d. h. L-Typ

Schon bei diesen Massen war man sich aber einig, dass bei der Normung von grösseren Motoren vor allem den Motorenfabrikanten eine Richtlinie für Neukonstruktionen gegeben werden soll, worin die Masse an die bisher bekannten möglichst logisch anschliessen. Dies im Gegensatz zur Normung von kleineren Motoren, bei denen in erster Linie die vielfältigen Wünsche der Motorenkäufer berücksichtigt wurden. Ob und wie auch für Achshöhen über 400 mm noch Regeln für die Wahl von Anbaumassen gegeben werden sollen, ist zum Studium einer Arbeitsgruppe übertragen worden, zu der auch die Schweiz zählt, und die in einigen Monaten erstmals zusammentreten wird.

Zwei Vorschläge des Sekretariates bezüglich Aufnahme von zusätzlichen zulässigen Drehmomentwerten zu den Wellenenden und Aufnahme einer zusätzlichen Reihe von kurzen Wellenenden, bezogen aus dem Normenwerk der ISO, sind mehrheitlich abge-