Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 20

Artikel: Was bedeutet die Tieftemperatur-Physik für die Technik?
Autor: Grassmann, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-60552

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: 01.10.2025

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

71. Jahrgang
Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet
Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich
Nummer 20

Was bedeutet die Tieftemperatur-Physik für die Technik?

Von Prof. Dr. P. GRASSMANN, ETH, Zürich[1])

DK 621.592

Im vergangenen Jahr wurde aus Mitteln des Arbeitsbeschaffungskredites des Bundes für die ETH eine Heliumverflüssigungsanlage beschafft. Damit wird es auch hier in Zürich möglich, die wissenschaftliche und angewandte Forschung bis zu Temperaturen von etwa 1 ° Kelvin, also — 272 ° Celsius vorzutreiben. Es ist dafür gesorgt, dass nicht nur im Kältelaboratorium selbst (Physikstrasse 7), sondern auch in anderen Instituten der ETH und der Universität mit flüssigem Helium gearbeitet werden kann. So wurde zum Beispiel das Physikalische Institut der ETH mit einer Rückleitung für das verdampfte Helium mit dem Kältelaboratorium verbunden. Dies sei der Anlass, um einiges über die derzeitige und künftige technische Bedeutung der Forschung in diesem Temperaturgebiet so nahe dem absoluten Nullpunkt zu berichten.

1. Die Erschliessung des Gebietes der tiefen Temperaturen

Bild 1 zeigt den Weg, den Wissenschaft und Technik in den letzten 100 Jahren gegangen sind, um zu immer tieferen Temperaturen vorzudringen und die damit gegebenen Möglichkeiten praktisch zu nutzen. Schon 1845 erreichte M. Faraday durch Verdampfen von Trockeneis (CO_2) unter stark vermindertem Druck Temperaturen von etwa — 110 ° C. Cailletet und unabhängig von ihm Pictet konnten am selben Tag, am 24. 12. 1877, der Pariser Akademie verkünden, dass ihnen unabhängig voneinander und nach verschiedenen Methoden die Verflüssigung des Sauerstoffs (Siedepunkt — 183 ° C) gelungen sei. 1895 verflüssigte Olszewski den Wasserstoff (Siedepunkt —253 ° C = 20 ° K) in ganz kleinen Mengen. Die Herstellung grösserer Mengen und vor allem ihre Aufbewahrung über längere Zeit gelang 1898 Dewar. Als schliesslich 1908 Kamerlingh Onnes in Leiden auch das am schwersten zu verflüssigende Gas, das Helium (Siedepunkt 4,2 ° K), verflüssigte, war endgültig gezeigt, dass es keine «permanenten» Gase gebe. Damit war man aber auch an eine Schranke gelangt, die das Vordringen zu noch tieferen Temperaturen für ein volles Vierteljahrhundert hemmen sollte. Zwar war es möglich, durch Abpumpen des Heliumdampfes bis etwa 0,7° K vorzudringen, aber das mit abnehmender Temperatur etwa exponentiell ansteigende Volumen des abzusaugenden Dampfes machte Pumpenkapazitäten erforderlich, die finanziell nicht mehr erschwinglich waren. Anderseits war aber auch kein Gas mit noch tieferem Siedepunkt bekannt, denn das leichte Heliumisotop, Siedepunkt 3,2 ° K, war damals noch nicht entdeckt. Es ist ausserdem so selten, dass es als Kältemittel kaum in Frage kommt. Hier konnte also nur eine grundsätzlich neue Methode weiterhelfen. Sie wurde — unabhängig voneinander — von Debye und Giauque vorgeschlagen und 1933 von Giauque und 18 Tage später von de Haas verwirklicht: die adiabatische Entmagnetisierung. So interessant dieses Verfahren, das inzwischen zu einer Temperatur von 0,0014 ° K geführt hat [14], vom Standpunkt des Thermodynamikers aus auch sein mag[2]), so sei es hier doch nicht weiter besprochen, da es bisher nur der wissenschaftlichen Forschung gedient hat.

Der erste Vorstoss der Technik in das Temperaturgebiet unter —100 ° C erfolgte 1895 — also fast gleichzeitig mit der Entdeckung der Radioaktivität, der Röntgenstrahlen und der Psychoanalyse — durch C. v. Linde in München: er verflüssigte Luft mittels Drosselentspannung («Joule-Thomson-Effekt»). War flüssige Luft damals an sich schon eine Sensation, so wuchs das Interesse an dieser Methode noch besonders dadurch, dass durch Destillation — oder genauer gesagt Rektifikation — der flüssigen Luft ihre technisch so wichtigen Bestandteile Sauerstoff und Stickstoff, in neuerer Zeit aber auch die Edelgase Argon, Krypton und Xenon, rein dargestellt werden konnten. Damit war ein alter Traum erfüllt. Wird doch schon im 3. Teil von Gullivers Reisen (J. Swift 1726), in dem der Held auf eine fliegende Insel gelangt, die nur von Gelehrten bewohnt ist, ein Forscher beschrieben, der sich mit der Verflüssigung und Zerlegung der Luft befasst.

Wenige Jahre später nahm dann G. Claude in Frankreich mit jugendlichem Idealismus die technische Vervollkommnung der Luftverflüssigung auf, einem Idealismus, der noch besonders dadurch aufgestachelt wurde, dass er zunächst glaubte, die Zerlegung der Luft erfordere, da in ihr N_2 und O_2 gemischt, nicht aber verbunden sind, theoretisch überhaupt keine Arbeit und müsste sich deshalb auch praktisch einfach und billig durchführen lassen. Sein Hauptverdienst war die Einführung der Expansionsmaschinen in das Verfahren der Luftverflüssigung und -zerlegung, in denen die Luft unter Leistung äusserer Arbeit, ähnlich wie der Dampf in einer Dampfmaschine, entspannt wird. Während aber bei der Dampfmaschine das Ziel des Verfahrens in der Arbeitsleistung liegt, ist diese Leistung bei den Expansionsmaschinen nur ein Nebenprodukt; dagegen stellt die Abnahme des Wärmeinhaltes der Luft um den der geleisteten Arbeit äquivalenten Betrag das eigentliche Ziel des Verfahrens dar. Bald zeigte es sich, dass aus verschiedenen Gründen die Luft in der Maschine selbst nicht verflüssigt werden kann. Die kalt aus der Maschine austretende Luft wird deshalb nur zur «Vorkühlung» eines noch auf hohem Druck befindlichen Teilstroms der Luft verwendet, wobei unter Vorkühlung allerdings eine Abkühlung bis —160 ° verstanden ist, eine Temperatur, die zur Verflüssigung dieses Teilstroms ausreicht.

Trotzdem die Entspannung unter «äusserer Arbeitsleistung», d. h. in einer Expansions*maschine* — bei sehr grossen Gasvolumina unter Umständen auch in einer Expansions*turbine* — thermodynamisch gegenüber der Drosselentspannung manche Vorteile aufweist, so griff man bei der Verflüssigung der noch wesentlich schwerer als Luft zu verflüssigenden Gasen Wasserstoff (Siedepunkt 20,5 ° K) und Helium (Siedepunkt 4,21 ° K) doch wieder auf das von Linde angegebene Verfahren der Entspannung in einem Ventil zurück; denn es gelang zunächst nicht, für die in Frage kommenden tiefen Temperaturen und kleinen Gasmengen genügend betriebssichere Expansionsmaschinen zu schaffen. Doch auch die für die Luftverflüssigung so einfache und erfolg-

[1]) Nach einem Vortrag, gehalten am 11. Dezember 1952 in der Physikalischen Gesellschaft Zürich.

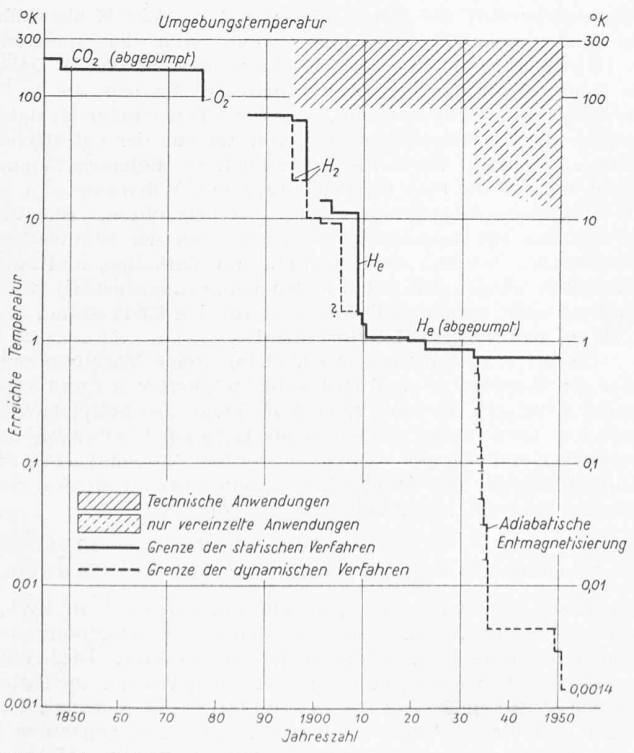

Bild 1. Die tiefsten, im Laboratorium erreichten (ausgezogene und gestrichelte Linien) und in der Technik verwendeten Temperaturen (schraffiertes Gebiet)

[2]) Eine allgemein verständliche Darstellung seiner Grundlagen findet sich in [7] und [16].

reiche Lindesche Methode liess sich für Wasserstoff und Helium nicht unmittelbar anwenden; ergibt doch die Entspannung von diesen Gasen in einem Ventil bei Raumtemperatur nicht wie bei Luft und allen Gasen mit noch höherem Siedepunkt eine Abkühlung, sondern im Gegenteil eine Erwärmung. Erst bei tiefen Temperaturen nimmt auch bei ihnen die Temperatur bei der Drosselentspannung ab. Will man also diese Gase nach dem Lindeschen Verfahren verflüssigen, so muss man Wasserstoff erst mit flüssigem Stickstoff, das Helium mit flüssiger Luft oder flüssigem Stickstoff und dann auch noch mit flüssigem Wasserstoff «vorkühlen». Gerade das Arbeiten mit flüssigem Wasserstoff bedarf aber wegen der damit verbundenen Explosionsgefahr grosser Vorsicht.

2. Die neueren Verfahren der Heliumverflüssigung [3])

Es war deshalb ein grosser Fortschritt, als es 1934 P. Kapitza gelang, auch für die Heliumverflüssigung das Verfahren der Entspannung mit «äusserer Arbeitsleistung» zu verwirklichen, wobei das Helium in einer kleinen Expansionsmaschine mit hin- und hergehendem Kolben expandiert. Dabei wird soviel Kälte erzeugt, dass auf eine Vorkühlung mit flüssigem Wasserstoff verzichtet werden kann. Diese Methode wurde von Meissner weiter verbessert, und seit einigen Jahren werden von der Arthur D. Little Corp. nach den Angaben von Collins derartige Verflüssiger in Serienfertigung hergestellt. Der Apparat der ETH ist der fünfzigste von dieser Firma gelieferte Apparat. Da in vielen Ländern auch noch andere Verflüssigungseinrichtungen im Betrieb sind, wird man heute damit rechnen können, dass in wohl mehr als 100 Hochschul- und Industrielaboratorien mit flüssigem Helium gearbeitet wird. Das verwendete Helium muss auch aus den USA bezogen werden, da seine Gewinnung aus der Atmosphäre — in der es nur zu 0,00054 Vol. % enthalten ist — zu teuer käme. In den USA kann es jedoch verhältnismässig wohlfeil aus einigen Erdgasquellen gewonnen werden.

Zur Verflüssigung werden 43,5 Nm³/h, d. h. 7,76 kg/h Helium erst in einem vierstufigen Kompressor mit Zwischenkühlung auf 15 ata verdichtet. Es mag auffallen, dass für diesen nicht sehr hohen Druck bereits vier Verdichtungsstufen gewählt wurden, jedoch ist erstens beim einatomigen Helium das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck zu der bei konstantem Volumen verhältnismässig hoch, nämlich 1,66, und zweitens müssen hohe Temperaturen im Kompressor soweit wie möglich vermieden werden, bringen sie doch die Gefahr mit sich, dass Oeldämpfe mit dem Heliumgas fortgeführt werden, die dann leicht zu einer Verstopfung der engen Rohre der Wärmeaustauscher führen könnten. Das verdichtete Helium gelangt dann in den eigentlichen Verflüssiger, in dem es in Rippen-Rohren aus Kupfer, die aussen vom zurückkommenden, nicht verflüssigten Helium umströmt werden, auf etwa —150 ° C gekühlt wird. Hierauf werden 30 % des Heliums in einer Expansionsmaschine auf einen nur wenig über Atmosphärendruck liegenden Druck entspannt, wobei sich ihre Temperatur auf —193 ° C erniedrigt. Beim Zurückströmen dieses Anteils in den Wärmeaustauscher kühlt er das noch auf 15 ata befindliche Heliumgas ab. Bei — 251 ° wird der grösste Teil auch dieses Gasstroms in einer zweiten Expansionsmaschine auf etwa Atmosphärendruck entspannt, wobei seine Temperatur auf —261 ° C absinkt. Er dient dann auch wieder zur Kühlung des einströmenden Heliums. Nur ein Rest von 12 % der anfänglich verdichteten Gasmenge wird im Entspannungsventil entspannt und verflüssigt sich dabei zum Teil. Wird mit flüssiger Luft vorgekühlt, so können etwa 4 l, also 0,5 kg, flüssiges Helium pro Stunde gewonnen werden. Es ist jedoch auch möglich, ganz ohne Vorkühlung mit flüssiger Luft auszukommen, nur erniedrigt sich dann die verflüssigte Menge auf etwa die Hälfte. Bild 2 zeigt das Abhebern von flüssigem Helium aus dem Apparat der ETH.

In neuerer Zeit wurde von Collins auch noch ein wesentlich grösserer Verflüssiger mit einer Leistung von 25 bis 32 l/h flüssigem Helium beschrieben [6]. 290 Nm³/h Heliumgas werden hierbei auf einen Druck von 12,5 ata verdichtet und bei verschiedenen Temperaturen in drei parallel geschalteten Turbinen entspannt. Als zusätzliche Kältequelle dient eine Vorkühlung mit flüssigem Stickstoff. Einschliesslich des Energiebedarfs für die Erzeugung des flüssigen Stickstoffes werden 3,1 kWh/l flüssigem Helium verbraucht. (1 l flüssiges Helium = 125 g.) Liesse sich die Heliumverflüssigung in einem vollständig reversiblen Prozess durchführen, so wären pro Liter flüssigem Helium 0,24 kWh erforderlich. Auf den vollkommen verlustlosen Prozess bezogen beträgt also der Wirkungsgrad dieses Heliumverflüssigers 7,8 %. In Anbetracht der sehr niedrigen erreichten Temperatur muss dies als noch recht günstig bezeichnet werden, wenn man damit vergleicht, dass der Wirkungsgrad einer modernen Blockeisanlage in gleicher Weise berechnet rund 12 %, der einer Anlage für flüssigen Sauerstoff 20 bis 25 % beträgt.

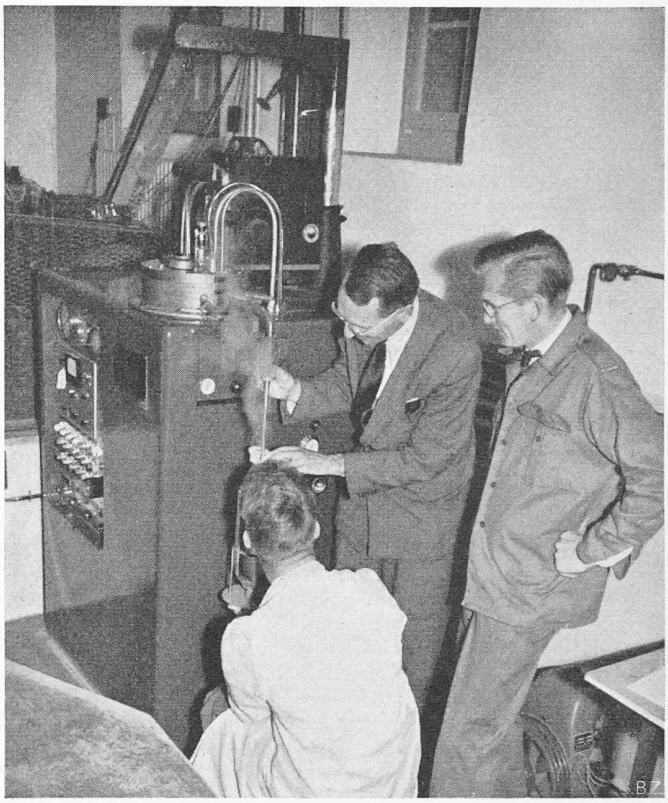

Bild 2. Abhebern des flüssigen Heliums im Kältelaboratorium der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich

Der theoretische Mindestenergiebedarf L in kW, der erforderlich ist, um Heliumgas vom normalen Druck und Raumtemperatur auf seinen Siedepunkt bei 4,2 ° K abzukühlen und dann zu verflüssigen, kann nach der Gleichung $L = G\,[T_u\,(s_u - s) - (i_u - i)]/860$ berechnet werden [4]). Dabei ist G die abzukühlende Materialmenge in kg bzw. kg/h, T_u die Umgebungstemperatur in ° K. Diese Temperatur ist dabei sowohl als Ausgangstemperatur, von der aus der betreffende Körper abgekühlt werden soll, wie auch als diejenige Temperatur, bei der die dem Körper entzogenen Wärmemengen an die Umgebung abgegeben werden, zu betrachten. Sie entspricht also bei technischen Prozessen etwa der Kühlwassertemperatur. s und i sind Entropie und Enthalpie, und zwar bezeichnet wieder der Index u den Umgebungszustand, während die nicht indizierte Grösse sich auf den Endzustand, also z. B. auf das flüssige Helium bezieht.

Da bei Ableitung dieser Gleichung keine Voraussetzung über die Temperatur- und Druckabhängigkeit von i und s gemacht wird, gilt sie ganz allgemein, kann also beispielsweise auch zur Berechnung des Energiebedarfs zur reversiblen Abkühlung fester Körper verwendet werden. So folgt z. B. für Aluminium, für das i und s bis zu sehr tiefen Temperaturen bekannt sind, für eine Abkühlung von 300 ° K

auf	30	20	10 ° K
ein Arbeitsbedarf von	38,9	39,7	39,9 kWh/t

Für Eisen wird man mit grössenordnungsmässig 20 kWh/t rechnen müssen. Es fällt auf, dass sich für die Abkühlung auf 30 und 10 ° K fast der selbe Arbeitsbedarf ergibt. Dies rührt von der starken Abnahme der spezifischen Wärme der festen Körper bei tiefen Temperaturen her [4], [5], die bewirkt, dass i und s in diesem Temperaturgebiet sehr klein gegenüber i_u und s_u werden. Die spezifische Wärme der in allen Metallen enthaltenen Leitungselektronen kann zwar bei tiefen Tempe-

3) Vgl. dazu [16].

4) Vgl. dazu [1] und [8].

raturen nicht wie bei Raumtemperatur gegenüber der spezifischen Wärme des Ionengitters vernachlässigt werden (vgl. dazu z. B. [4]), jedoch bedingt sie im ganzen nur einen Arbeitsbedarf von grössenordnungsmässig 1 kWh/t Material. Da alle diese Angaben sich auf eine reversible Abkühlung beziehen, muss praktisch mit mindestens zehnmal höheren Werten gerechnet werden.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Herstellung von Temperaturen bis etwa 1 ° K heute auch technisch kein Problem mehr darstellt, dass der Leistungsaufwand und die Wirkungsgrade für die Kälteerzeugung bei diesen Temperaturen sich in vernünftigen Grenzen halten, und dass auch die Abkühlung grosser Metallmassen auf diese Temperatur keinen übermässigen Arbeitsaufwand erfordert. Von dieser Seite aus stellt sich also kein ernstliches Hindernis der technischen Ausnutzung der bei tiefen Temperaturen gegebenen Möglichkeiten mehr in den Weg. Damit stellt sich die Frage, was können diese Temperaturen dem Techniker nützen?

3. Technische Anwendungen der tiefsten Temperaturen

So lange man in der Thermodynamik nur die Umwandlung von Wärme in Arbeit behandelt oder sich damit begnügt, die für eine bestimmte Temperaturänderung erforderlichen Wärmemengen zu berechnen, genügt es, wenn man die thermodynamischen Funktionen, z. B. Enthalpie (= Wärmeinhalt) und Entropie des betreffenden Körpers bis auf eine additive Konstante kennt. Man kann also diese Funktionen für eine beliebige Temperatur, z. B. 0 ° C und 1 ata, willkürlich gleich Null setzen. Dies ist jedoch nicht mehr ausreichend, wenn man sich die Frage vorlegt, welche maximale Arbeit etwa durch eine chemische Reaktion geleistet werden kann. Um diese Frage eindeutig beantworten zu können, müssen die absoluten Werte dieser Funktionen bekannt sein, d. h. die Werte, die vom absoluten Nullpunkt, d. h. von 0 ° K aus gezählt sind (vgl. dazu z. B. [15]). Diese Werte können mit der nötigen Genauigkeit nur Messungen liefern, die sich bis zu möglichst tiefen Temperaturen erstrecken. So baut also der Ingenieur, der etwa den maximalen Wirkungsgrad eines Strahltriebwerkes berechnet und dabei Tabellen mit den absoluten Werten der thermodynamischen Funktion benutzt oder die Werte für die chemischen Gleichgewichtskonstanten nachsieht, ohne sich meist darüber klar zu sein, auf die Arbeit des Tieftemperaturphysikers auf.

Es sei ferner noch darauf hingewiesen, dass durch die Anwendung von flüssigem Helium sehr hohe Vakua erzeugt werden können, da der Dampfdruck aller anderer Gase ausser Helium bei diesen tiefen Temperaturen unmessbar klein geworden ist, und auch die an den Wänden absorbierten Gase, die sonst häufig ein hohes Vakuum verunmöglichen, sicher ausgefroren werden. Die wesentlichen technischen Anwendungen tiefer Temperaturen werden sich an die folgenden vier Erscheinungen knüpfen:

a) Die Supraleitung, das ist die Tatsache, dass der elektrische Widerstand mancher Metalle bei den mit Helium erreichbaren Temperaturen unmessbar klein wird. (Neuere Darstellungen der Supraleitung finden sich bei [12] und [17].)

b) Die Tatsache, dass die spez. Wärme aller Körper bei Annäherung an $T = 0$ sehr klein wird und zwar etwa proportional mit $AT^3 + BT$. Dabei rührt der mit der 3. Potenz der absoluten Temperatur proportionale Summand AT^3 vom Ionen-Gitter, der Summand BT von den Leitungselektronen her.

c) Die Tatsache, dass bei Annäherung an $T = 0$ die thermische Unruhe der Materie im weitesten Sinne, also z. B. die Brownsche Bewegung, das Wärmerauschen der Elektronen usw., mindestens proportional mit T gegen Null geht.

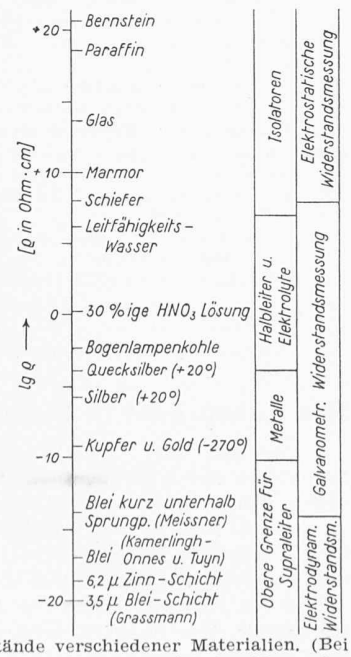

Bild 3. Die elektrischen Widerstände verschiedener Materialien. (Bei den auf Supraleiter sich beziehenden Messungen ist der Name des betreffenden Forschers hinzugefügt.)

d) Die besonderen Eigenschaften des flüssigen Heliums unterhalb 2,2 ° K, d. h. des «Helium II».

Falls in der Zukunft auch die Weltraumschiffahrt entwickelt wird, so würde neben die Stratosphärenprüfkammer mit etwa — 60 ° auch die «Weltraumprüfkammer» treten, in der entsprechend der Temperatur, die ein nicht von der Sonne beschienenes Objekt im Weltenraum einnimmt, Teile von Raketen und dergleichen bei rund 3 ° K geprüft werden.

4. Lässt sich die Supraleitung technisch anwenden?

Im Bild 3 sind die elektrischen (= ohmschen) Widerstände verschiedener Materialien im logarithmischen Massstab aufgetragen. Da an den Supraleitungen noch nie auch nur die Spur eines Widerstandes gefunden wurde, entsprechen die hier angegebenen Werte nur dem Höchstwert des Widerstandes, der nach der betreffenden Methode noch gerade hätte nachgewiesen werden können. Die Versuchsgenauigkeit konnte dabei soweit gesteigert werden [9], dass man sagen kann, ein supraleitender Draht mit nur $^1/_{1000}$ mm Durchmesser, der so lang ist, dass er 200mal um die Erde gewickelt werden kann, könnte höchstens einen Widerstand von 1 Ohm haben. Die elektrische Leitfähigkeit der Supraleiter verhält sich also zur Leitfähigkeit des normalleitenden Kupfers oder Silbers mindestens wie deren Leitfähigkeit zu der von mittleren Isolatoren. Tatsächlich wurde auch schon bei einigen Versuchen über Supraleitung [9] Kupfer als «isolierende» Unterlage für die dünnen supraleitenden Schichten verwendet.

Natürlich wurde schon bald nach Entdeckung der Supraleitung durch H. Kamerlingh-Onnes im Jahre 1911 die Frage aufgeworfen, ob diese Erscheinung nicht eine Umwälzung für die Elektrotechnik bedeute. Wenn auch heute die experimentellen Schwierigkeiten, die sich der Erreichung tiefer Temperaturen in den Weg stellten, weitgehend überwunden sind, so können doch folgende Einwände erhoben werden:

a) Die Verluste durch die Joulesche Wärme — die sogenannten Kupferverluste — betragen bei grossen elektrischen Maschinen nur noch 1 bis 2 %. Ihre Vermeidung durch Ersatz des Kupfers durch einen Supraleiter dürfte wohl kaum den grossen apparativen Aufwand rechtfertigen, der auch heute noch zur Aufrechterhaltung der benötigten tiefen Temperaturen nötig ist.

b) Durch starke Magnetfelder wird die Supraleitung vernichtet.

Sicher ist eine Steigerung des Wirkungsgrades um 1 bis 2 % zwar in vielen Fällen belanglos, jedoch lassen sich bei Verwendung von Supraleitern gleichzeitig auch weitere Vorteile erreichen.

Wenn ferner auch bestimmte Schwellenwerte des Feldes nicht überschritten werden dürfen, so können bei passender Konstruktion, z. B. durch Verwendung möglichst dünner Drähte, die Abmessungen einer supraleitenden Maschine doch im allgemeinen wesentlich kleiner gehalten werden als die einer normalleitenden. Man bedenke nur etwa, dass beim Uebergang von Kupfer zu Aluminium mit einem um etwa 30 % grösseren Wicklungsquerschnitt gerechnet werden muss, obwohl die Leitfähigkeit von Aluminium noch immer 35 gegenüber 56 m/Ω mm² bei Kupfer beträgt. In vielen Fällen ist aber eine Verkleinerung der Abmessungen oder des Gewichts für die technische Brauchbarkeit entscheidend.

Bei der Verwendung von Supraleitern kann auf die Anwendung eines Eisenkerns verzichtet werden, da — grob gesprochen — die in diesem Kern kreisenden Ampèreschen Molekularströme besser durch supraleitende Stromkreise ersetzt werden. Damit gelangt man aber z. B. zu vollkommenen verlust- und verzerrungsfrei arbeitenden Transformatoren, was für viele Fälle von Vorteil sein dürfte.

Wenn hier auch nur Möglichkeiten für die Zukunft liegen, so ist die Anwendung der Supraleitung zu messtechnischen Zwecken schon im Gange. Neben der Entwicklung supraleitender Galvanometer [9] und [13] wurde für die Konstruktion von Messinstrumenten vor allem folgende Tatsache ausgenutzt:

a) Der Uebergang zur Supraleitung erfolgt besonders bei reinen Metallen in einem sehr kleinen Temperaturbereich. Eine kleine Temperaturänderung bedingt also sehr merkbare Widerstandsänderungen. So wurden schon zu Ende des letzten Weltkrieges Bolometer konstruiert, die als Strahlungsemp-

fänger eine dünne Folie aus der supraleitenden Legierung NbN (Niobiumnitrid) enthielten und zum Nachweis der von Menschen, Flugzeugen oder Schiffen ausgehenden Infrarotlung dienten [10].

b) Ein allseitig von einem supraleitenden Schirm umgebenes Messystem wird durch äussere elektrische oder magnetische Felder überhaupt nicht mehr gestört. Jede Aenderung des äusseren Magnetfeldes induziert nämlich in diesem Schirm Dauerströme, die so stark sind, dass sie die Feldänderung gerade kompensieren.

5. Anwendung tiefer Temperaturen in der Messtechnik [5])

Die steigende Bedeutung der Mess- und Regeltechnik steht ausser Zweifel, sucht doch der Mensch seine technischen Geschöpfe immer selbständiger zu machen und fügt zum Muskel des Motors das Nervensystem der Regelorgane. Verwöhnt durch die oft nahezu bis an die Grenze des theoretisch Möglichen gesteigerte Empfindlichkeit seiner eigenen Sinnesorgane verlangt er auch von diesen Mess- und Regelorganen höchste Leistungen. Die Empfindlichkeit jedes Messinstrumentes ist aber prinzipiell begrenzt durch die thermische Unruhe der Materie: Versuchen wir etwa ein drehbares Messsystem immer empfindlicher zu gestalten, so wird es schliesslich durch Stösse der einzelnen Moleküle in dauernde Unruhe versetzt (Brownsche Bewegung). Auch wenn wir den Raum, in dem es sich befindet, evakuieren, so stört noch immer das thermische Rumoren der Moleküle des Aufhängefadens. Arbeitet man mit rein elektrischen Messanordnungen ohne bewegte Teile, so stört die thermische Bewegung der Ladungsträger, das «Wärmerauschen der Elektronen». Oder sensibilisieren wir eine Photozelle immer weiter für ultrarote Strahlen, so wird sie nicht nur auf die von aussen kommende Strahlung ansprechen, sondern schliesslich schon durch die Strahlung erregt werden, die ihrer eigenen Temperatur entspricht. All diese Störeffekte verschwinden bei Abkühlung mindestens proportional mit T, manche, so z. B. die Eigenemission von Photokathoden, entsprechend der Richardson-Gleichung schon wesentlich rascher. Hier genügt also häufig schon die Abkühlung bis zum Sublimationspunkt des Trokkeneises (= CO_2) oder zur Temperatur der flüssigen Luft, in anderen Fällen aber ist man gezwungen, noch tiefer zu kühlen.

Wenn also einerseits die prinzipielle Grenze der noch nachweisbaren Energiemengen mit Annäherung an $T = 0$ immer weiter nach unten verschoben wird, so werden in vielen Fällen die Möglichkeiten der praktischen Messtechnik immer günstiger, vor allem, da die spezifische Wärme aller Körper mit abnehmender Temperatur sehr klein wird, z. B. bei Zinn bei 3,7° K auf rund 1 Tausendstel ihres Wertes bei Raumtemperatur sinkt.

Eine kleine Energiezufuhr bedingt also schon eine recht merkliche Temperatursteigerung. Zudem lassen sich sehr kleine Temperaturdifferenzen gut nachweisen, einerseits, wie schon weiter oben erwähnt, durch die Verwendung von Supraleitern, anderseits durch Kohlewiderstandsthermometer, die bei 2° K noch Temperaturunterschiede von 10^{-4} °K zu messen gestatten [3].

Vom rein thermodynamischen Standpunkt aus liegen bei tiefen Temperaturen auch für das Thermoelement wesentlich günstigere Bedingungen vor, muss es doch — so seltsam dies auch zunächst klingen möge — als Wärmekraftmaschine betrachtet werden, denn hier wie dort dient eine Temperaturdifferenz dazu, um mechanische Energie zu liefern; bei der Wärmekraftmaschine zur Drehung der Welle, beim Thermoelement zur Drehung des Messystems des Anzeigeinstrumentes. Hier wie dort ist also der maximal als mechanische Arbeit gewinnbare Anteil durch den Carnotfaktor, also durch $\Delta T/T$ gegeben. Da eine vorgegebene Energiemenge bei tiefer Temperatur wegen der um Grössenordnungen kleineren spezifischen Wärme ein wesentlich grösseres ΔT erzeugt, T dagegen etwa um den Faktor 100 kleiner ist, könnte also erwartet werden, dass der Wirkungsgrad von Thermoelementen bei tiefen Temperaturen wesentlich höher liegt als bei Raumtemperatur. Leider wurden aber bisher noch keine Elemente gefunden, bei denen dies auch tatsächlich der Fall ist.

Zusammenfassend kann also gesagt werden: Je feiner die Veränderungen der Materie sind, die der Messung zugänglich gemacht werden sollen, desto notwendiger wird es, bei tiefen Temperaturen zu arbeiten, damit nicht durch das thermische Rumoren der Materie der zu messende Effekt übertönt wird.

6. Das flüssige Helium

Fast 20 Jahre lang wurde das flüssige Helium von den Tieftemperaturphysikern nur als Mittel zum Zweck, nur als «Kältemittel» angesehen. Heute ist es der Zahl der jährlich darüber erscheinenden experimentellen und theoretischen Arbeiten nach zum anziehendsten Studienobjekt geworden. Sind seine Eigenschaften doch unterhalb des sogenannten λ-Punktes, d. h. unterhalb von 2,2° K so eigenartig, dass man schon von einem vierten Aggregatzustand der Materie gesprochen hat. [2]. Seine Wärmeleitfähigkeit ist mehrere hundertmal grösser als die metallischen Kupfers und gehorcht ganz anderen Gesetzen als bei den sonstigen uns bekannten Körpern. Die Zähigkeit ist fast unmessbar klein geworden. So wurde es schon verwendet, um kleinste Oeffnungen in irgendwelchen Körpern sicher nachzuweisen. Lässt sich erst sein sonderbares Verhalten deuten, so sind wir damit sicher einen wesentlichen Schritt weiter in unserer Kenntnis der Quantengesetze gelangt, scheint diese merkwürdige Flüssigkeit doch ganz von deren Gesetzen beherrscht zu sein. Diese Kenntnis wird aber auch der Technik zu Gute kommen.

7. Gibt es bei $T \longrightarrow 0$ noch irreversible Prozesse?

Das verlustlose Fliessen elektrischer Ströme in Supraleitern, die fast reibungsfreien Bewegungen des flüssigen Heliums, die Abnahme des Wärmeleitvermögens der meisten Stoffe bei Annäherung für $T \longrightarrow 0$ legte schon früh die Vermutung nahe [6]), dass es «am absoluten Nullpunkt» überhaupt keine irreversiblen Prozesse gibt. Dazu muss allerdings gesagt werden, dass in dem bis heute erschlossenen Temperaturbereich noch typisch irreversible Prozesse, z. B. die Joulesche Wärme in normalleitenden Metallen, beobachtet werden. Gesetzt aber, es gäbe bei $T = 0$ keinen irreversiblen Prozess mehr, so bedeutet das zwar die Erfüllung eines Wunschtraumes der technischen Thermodynamiker, die Irreversibilitäten bekämpfen, wo sie sie treffen, aber es würde zu sehr eigenartigen Konsequenzen führen [11].

[5]) Vgl. dazu auch [10].

[6]) Nähere Angaben in [10].

Literaturverzeichnis:

[1] *Fr. Bosnjakovic:* Technische Thermodynamik, Dresden und Leipzig (1935), Bd. 1, S. 138.
[2] *W. Braunbek:* «Umschau» 50 (1950), S. 43/45.
[3] *J. R. Clement* und *E. H. Quinnell:* Rev. Scient. Inst. 23 (1952), S. 213/16.
[4] *K. Clusius* und *L. Schachinger:* Zs. «Naturforschung» 2a (1947), S. 90/97.
[5] *K. Clusius:* «Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich» XCVII (1952), S. 39/41.
[6] *S. C. Collins:* «Science» 116 (1952), S. 289/294.
[7] *P. Grassmann:* «Kältetechnik» 3 (1951), S. 16/18.
[8] *P. Grassmann:* «Allgemeine Wärmetechnik» 2 (1951), S. 161/66.
[9] *P. Grassmann:* «Phys. Zs.» 37 (1936, S. 569/78, und 38 (1937), S. 429/39.
[10] *P. Grassmann:* «Kältetechnik» 3 (1951), S. 308/12, und 2 (1950), S. 183/87, und «Phys. Blätter» 7, Nr. 6 (1951), S. 245/51.
[11] *P. Grassmann:* «Kältetechnik» 5 (1953), S. 2/4.
[12] *E. Justi:* Elektrische Leitfähigkeit und Leitungsmechanismus fester Körper, Göttingen 1948.
[13] *A. B. Pippard* und *G. T. Pulham:* «Proc. Cambr. Phil. Soc.» 48 (1952), S. 188/96.
[14] *D. de Klerk, M. J. Steenland* und *C. J. Gorter:* «Physica» XVI, Nr. 6 (1950), S. 571/76.
[15] *E. Schmidt:* «Z. VDI» 92 (1950), S. 24/28.
[16] *J. A. van Lammeren:* Technik der tiefen Temperaturen, Berlin 1941.
[17] *D. Shoenberg:* Superconductivity, Cambridge 1952.

Der Autotunnel in Lyon

DK 625.712.35 (44)

Der aus einer etwa 40 m breiten, halbkreisförmigen Röhre mit vier Fahrspuren und zwei seitlichen Bedienungswegen von je 1,20 m Breite (für die Tunnelpolizei) bestehende Autotunnel liegt in der direkten Fernverkehrsstrasse Paris—Lyon—Marseille und durchfährt in Lyon auf 1752 m Länge den Hügel La Croix-Rousse; er wurde 1952 eröffnet und ist der modernste künstlich belüftete Autotunnel des europäischen Kontinents. Der Fahrbahnbelag besteht aus Kleinpflaster, in welchem die beiden, für jede Verkehrsrichtung vorhandenen Fahrspuren durch einen hellen Streifen rechteckiger Pflaster-