

B e r i c h t  
über  
die Göttinger Tiefkühlanlage.

Der Bericht umfaßt 28 Seiten  
mit 12 Bildern

AERODYNAMISCHE VERSUCHSANSTALT GOETTINGEN E.V.

Institut für Kälteforschung

Außenstelle Prag

Der Institutsleiter

gez. Ritz

Der Außenstellenleiter

gez. Dr. Glaser

Prag, den 1.9.1942.

Der Flugbetrieb in den Tropen stellt bekanntlich an Menschen und Material Anforderungen, wie sie in den mittleren Breiten bei weitem nicht auftreten. Am Boden und in niedrigen Höhen sind diese durch höhere Werte von Temperatur, Feuchtigkeit und Strahlung bedingt, zu denen in weiten Gebieten die mechanischen Störungen infolge Sand treten. Aber auch der Flug in größerer Höhe begegnet besonderen Schwierigkeiten, da die auftretenden Temperaturen etwa  $20^{\circ} \text{C}$  tiefer liegen als in unseren Breiten.

In Anbetracht der schwerwiegenden Auswirkungen dieser tieferen Temperaturen und der zu erwartenden wachsenden Bedeutung des Höhenfluges in den Tropen stellte sich die Aerodynamische Versuchsanstalt vor mehreren Jahren die Aufgabe, eine Prüfkammer zu entwickeln, die die Durchführung von Versuchen unter tropischen Höhenbedingungen gestattet. In dieser Kammer mußte also einmal eine genügende Kälteleistung zur Verfügung stehen, zum anderen sollten Temperaturen bis möglichst  $+100^{\circ} \text{C}$  erreicht werden.

Für die zweckmäßige Wahl eines geeigneten Verfahrens für die Kälteerzeugung standen passende Vorbilder kaum zur Verfügung. Da die Kühlung mittels

- 2 -

fester Kohlensäure schon mit Rücksicht auf die gewünschte tiefe Temperatur nicht in Frage kam, lag die Wahl einer Verdampfungskältemaschine am nächsten. Die Verdampfungstemperatur hätte in diesem Fall unter  $-100^{\circ}\text{C}$  liegen müssen, so daß mindestens zwei Kältemittel, etwa Ammoniak und Äthan, in Kaskadenschaltung erforderlich gewesen wären. Äthan weist aber neben guten thermischen Eigenschaften den Nachteil auf, brennbar und explosiv zu sein [3]<sup>1)</sup>. Außerdem hätte die Anlage drei- bis vierstufig ausgeführt werden müssen. Bei einer Kälteleistung von mehreren tausend Kalorien je Stunde erreicht aber der Kühler einer derartigen Anlage bereits solche Abmessungen, daß seine Unterbringung Schwierigkeiten gemacht hätte, bzw. daß der Nutzinhalt der Kammer in keinem sinnvollen Verhältnis zu ihren Außenabmessungen gestanden hätte. Außerdem wird die Wärmekapazität des Kühlers infolge seiner Größe und seines Inhalts an Kältemittel so groß, daß die Abkühlzeiten der Kammer für viele Untersuchungen untragbar lang werden.

---

<sup>1)</sup> Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Schrifttumverzeichnis am Ende der Arbeit.

- 3 -

Für die Erzeugung tiefer Temperaturen unter ähnlichen Verhältnissen war noch ein weiterer Weg mit Erfolg beschritten worden: die dynamische Kälteerzeugung. In Bild 1 ist die Arbeitsweise dieses Verfahrens in vereinfachter Form dargestellt.

Bild 1: Arbeitsweise bei der dynamischen Kälteerzeugung.

- |                  |                     |
|------------------|---------------------|
| a) Verdichter    | e) Kondensator      |
| b) Wasserkühler  | f) Turbine          |
| c) Verdampfer    | g) Unterdruckkammer |
| d) Kältemaschine | h) Vakuumpumpe      |

Durch einen Verdichter a wird die Luft auf einen Druck von einigen Atmosphären gebracht und in einem Wasserkühler b nahezu auf Außentemperatur abgekühlt. Sie tritt nunmehr in den Verdampfer c einer mehr-

- 4 -

stufigen Verdampfungskältemaschine d ein. In diesem wird ihre Temperatur auf etwa  $-30^{\circ}\text{C}$  gesenkt, während ihr gleichzeitig fast der gesamte Wasserdampfgehalt entzogen wird. Bei der nachfolgenden Entspannung der Luft in der Expansionsturbine f sinken Druck und Temperatur weiter, wobei eine gewisse Arbeit geleistet wird, die zum Antrieb des Verdichters beiträgt. Die Luft strömt nun der Kammer g zu, aus der sie mittels des Turboverdichters h abgesaugt wird. Die Vorkühlung der Luft durch die Kältemaschine ist erforderlich, um der Luft soviel Feuchtigkeit zu entziehen, daß eine Vereisung der Turbine vermieden wird. Um einen Dauerbetrieb aufrecht erhalten zu können, muß deshalb der Verdampfer doppelt ausgeführt werden, damit die eine Verdampferhälfte abgetaut werden kann, während die andere in Betrieb ist. Statt die Luft durch Tiefkühlung zu trocknen, ist es auch möglich, ihren Feuchtigkeitsgehalt etwa durch Einschalten eines Silikageltrockners genügend tief zu senken. In diesem Fall müßte der Trockner ebenfalls doppelt ausgeführt werden, um eine Regenerierung des Gels während des Betriebes zu ermöglichen. Außerdem müßte der Druck vor der Turbine entsprechend erhöht werden, da die Eintrittstemperatur der Luft in die Turbine nun über der Umgebungstemperatur liegt. Zur Druck- und Temperaturregelung in der Kammer sind noch einige Regel-

- 5 -

ventile, Umgangsleitungen und meist eine elektrische Heizung erforderlich, die in Bild 1 nicht eingezeichnet sind. Schließlich sei erwähnt, daß man in vielen Fällen anstelle der beiden Luftverdichter a und h mit nur einem Verdichter auskommen wird.

Der größte Vorteil dieses dynamischen Kühlverfahrens ist der, daß die Kammer außerordentlich rasch abgekühlt werden kann. Temperatur und Druck in der Kammer lassen sich leicht beherrschen und einem zeitlich vorgegebenen Verlauf gut anpassen. Die Anwendung dieses Verfahrens ist dann besonders zweckmäßig, wenn die Abfuhr sehr großer Wärmemengen bei tieferen Temperaturen gefordert wird und die durchzuführenden Versuche eine ständige Erneuerung der Luft in dem Prüfraum bedingen.

Bei einem sehr großen Teil der anfallenden Versuche brauchen diese Forderungen jedoch nicht erhoben zu werden. In diesen Fällen bedeutet die Anwendung der dynamischen Kälteerzeugung einen unverhältnismäßig hohen Aufwand hinsichtlich Erstellung und Wartung.

Auf der Suche nach einem geeigneten Kühlverfahren wurde schließlich auch die Kälteerzeugung durch Drosselung, also durch Anwendung des Thomson-Joule-Effektes in Betracht gezogen. Bekanntlich hat O. v. L i n d e diese Art der Kälteerzeugung bereits im Jahre 1895

- 6 -

in die Kältetechnik eingeführt und damit die Grundlage für die Entwicklung der Tieftemperaturtechnik geschaffen. Obwohl diese Möglichkeit auf den ersten Blick mit Rücksicht auf den zu erwartenden hohen Kraftverbrauch wenig aussichtsreich erschien, so erwies sie sich doch bald als recht zweckmäßig.

Da sich die Luft bei der Drosselung nur verhältnismäßig wenig abkühlt, muß die Temperatur der gespannten Luft vor der Drosselstelle durch Anwendung eines Gegenstromwärmeaustauschers entsprechend weit herabgesetzt werden. Es ist also eine Anordnung erforderlich, wie sie Bild 2 zeigt.

Bild 2: Kälteerzeugung durch Drosselung.

- |                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| a) Verdichter   | d) Drosselventil  |
| b) Kühler       | e) Wärmeaufnehmer |
| c) Gegenströmer |                   |

- 7 -

Die Luft wird durch den Verdichter a verdichtet; im Tiefkühler b wird ihr die Kompressionswärme durch Kühlwasser entzogen und im Gegenströmer c ihre Temperatur weiter gesenkt. Bei der Drosselung nimmt die Temperatur nochmals um einen bestimmten Betrag ab und erreicht damit ihren niedrigsten Wert. Der entspannten Luft wird nunmehr im Wärmeaufnehmer e die nutzbare Kälteleistung entnommen und anschließend der Rest ihrer Kälte im Gegenströmer durch Wärmeaustausch an die verdichtete Luft übertragen, so daß sie diesen annähert mit der Temperatur der ankommenden Hochdruckluft verläßt.

In Bild 3 ist der besprochene Prozeß im  $i$ - $T$ -Schaubild dargestellt, da sich aus diesem die erzielbare Kälteleistung in einfacher Weise ablesen läßt. Der Einfachheit halber werden dabei isotherme Verdichtung und ein vollkommener Wärmeaustausch im Gegenströmer vorausgesetzt. Dann bedeuten Punkt 1 den Ansaugzustand der Luft, 1-2 die isotherme Verdichtung und 2-3 die Temperatursenkung der verdichteten Luft im Gegenströmer. Bei der Drosselung bleibt der Wärmeinhalt der Luft konstant, so daß 3-4 diesem Vorgang entspricht. Nach der Drosselung steigt die Temperatur der Luft im Wärmeaufnehmer entsprechend 4-5 und bei der Erwärmung im Gegenströmer gemäß 5-1, so daß der Ausgangszustand wieder erreicht ist.

- 8 -

Bild 3: Darstellung des Prozesses im  $i$ - $T$ -Schaubild.

Die Kälteleistung je kg Luft ergibt sich somit als der Unterschied des Wärmeinhalts der Luft vor und hinter dem Wärmeaufnehmer zu

$$Q = i_5 - i_4 \quad 1.)$$

Da außerdem die Wärmemenge, die die verdichtete Luft im Gegenströmer abgibt, gerade so groß sein muß wie diejenige, die die entspannte Luft aufnimmt, folgt:

$$i_2 - i_3 = i_1 - i_5 \quad 2.)$$

Ferner bleibt bei der Drosselung der Wärmeinhalt der Luft erhalten, so daß

$$i_3 = i_4 \quad 3.)$$

Damit folgt aber aus den Gleichungen 1.) bis 3.):

$$Q = i_1 - i_2 \quad 4.)$$

- 9 -

Die Kälteleistung je kg Luft ist also gerade so groß, wie der Unterschied der Wärmeinhalte der entspannten und der verdichteten Luft am warmen Ende des Gegenströmers. Sie ist somit unabhängig von der Temperatur der Luft vor der Drosselstelle und wird nur von der Temperatur des warmen Gegenströmerendes beeinflusst. Aus Bild 3 läßt sich aber noch eine weitere Beziehung für die Kälteleistung ablesen. Bedeutet nämlich  $\Delta t$  die Temperatursenkung, die bei einer Drosselung der Luft direkt vom Endzustand nach der Verdichtung, d.h. von Punkt 2 nach Punkt 6 eintritt, dann ist wegen der Bedingung  $i_1 - i_2 = i_1 - i_6$

$$Q = c_p \Delta t \quad 5.)$$

Dabei bedeutet  $c_p$  die spezifische Wärme der entspannten Luft. Für die folgenden Betrachtungen ist es zweckmäßig, die Untersuchung der Vorgänge auf sehr kleine Druckänderungen zu beschränken. Gleichung 5.) geht dann über in

$$dQ = c_p \cdot dt \quad 6.)$$

Bezeichnet  $\alpha_1$  den differentialen Thomson-Joule-Effekt, d.h. das Verhältnis der unendlich kleinen Temperaturänderung zu der unendlich kleinen Drucksenkung, durch die sie hervorgerufen wird, so ist

$$\alpha_1 = \left( \frac{\delta t}{\delta p} \right)_1 \quad 7.)$$

- 10 -

wobei der Index  $i$  andeuten soll, daß beim Drosselvorgang der Wärmeinhalt konstant bleibt [1]. Da

$$dt = \alpha_1 \cdot dp \quad 8.)$$

erhält man für die differentiale Kälteleistung mit Gleichung 6.) folgenden Ausdruck:

$$dQ = c_p \cdot \alpha_1 dp \quad 9.)$$

Für die Wirtschaftlichkeit des Kühlverfahrens ist die spezifische Kälteleistung  $K$  wichtig, d.h. die je kwh erzeugte Kältemenge. Es ist also

$$K = \frac{dQ}{dN} \quad 10.)$$

wobei  $dN$  die kleine isotherme Verdichtungsarbeit für die Verdichtung der Luft um den Betrag  $dp$  bedeutet. Diese beträgt:

$$dN = \frac{p \cdot v}{367 \cdot 000} \cdot \frac{dp}{p} \quad 11.)$$

Die spezifische Kälteleistung ergibt sich daher zu:

$$K = 367 \cdot 000 \cdot \frac{c_p \cdot \alpha_1}{p \cdot v} \cdot p \quad 12.)$$

Da das Produkt  $p \cdot v$  im Nenner von Gleichung 12.) sich fast nur mit der Temperatur, mit dem Druck dagegen kaum ändert, folgt aus Gleichung 12.) ein wesentlicher Einfluß des Druckes auf die Größe der spezifischen Kälteleistung. Dieser Einfluß wird allerdings bei hohen Drücken über  $c_p$  und  $\alpha_1$  teilweise wieder ausgeglichen.

- 11 -

Gleichung 12.) wurde mit Hilfe der Tafeln von H. H a u s e n [1] für Luft ausgewertet. In Bild 4 ist der Verlauf von  $K$  abhängig von  $p$  und der Temperatur  $T$  dargestellt. Wie man sieht, nimmt die spezifische Kälteleistung nicht nur mit dem Druck, sondern auch mit sinkender Temperatur bedeutend zu und erreicht bei etwa 160 ata einen Höchstwert.

Bild 4: Spezifische Kälteleistung bei der Drosselkühlung.

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit des Drosselkühlungsverfahrens mit der anderer Verfahren läßt sich am besten über den Carnotschen Wirkungsgrad anstellen. Dabei ist zu bedenken, daß die Kälte - eine genügende

- 12 -

Größe des Wärmeaustauschers vorausgesetzt - bei jeder beliebigen Temperatur erzeugt werden kann. Eine untere Grenze ist lediglich dadurch gesetzt, daß die Inversionstemperatur, d.h. die Temperatur, bei der der Thomson-Joule-Effekt gleich Null wird, nicht unterschritten werden kann.

Bild 5 zeigt den Carnotschen Wirkungsgrad, und zwar gelten die ausgezogenen bzw. gestrichelten

Bild 5: Der Carnotsche Wirkungsgrad bei der Drosselkühlung.

- 13 -

Kurven für die beiden Fälle, daß die Temperatur, bei der die Kälte erzeugt wird,  $-100^{\circ}\text{C}$  bzw.  $-130^{\circ}\text{C}$  beträgt. Wie man sieht, liegen die Werte im Bereich hoher Drücke und niedriger Temperaturen durchaus so hoch, daß die Anwendung der Drosselkühlung keineswegs mehr so widersinnig erscheint, wie es vielleicht auf den ersten Blick hin der Fall sein könnte. Denn es ist zu bedenken, daß auch bei Verdampfungskältemaschinen kleinerer Leistung der Carnotsche Wirkungsgrad in dem betrachteten Temperaturbereich kaum den Wert von 30 bis 40 % übersteigen wird. Die aus Bild 5 entnommenen Werte stellen allerdings Grenzwerte dar, die in Wirklichkeit nicht in voller Höhe erreicht werden können. Denn einmal treten im Gegenströmer Verluste auf, da für den Wärmeübergang ein endliches Temperaturgefälle erforderlich ist. Außerdem läßt sich die isotherme Verdichtung nicht verwirklichen, vielmehr muß die Luft gegebenenfalls mit einer Verdampfungskältemaschine auf die tiefe Temperatur, mit der sie in den Gegenströmer eintreten soll, vorgekühlt werden.

Aber auch bei Vernachlässigung dieser Verluste liegt der Carnotsche Wirkungsgrad bei der Kälteerzeugung durch Drosselung weit unter 100 %, wie aus Bild 5 ersichtlich ist. Die Ursache hierfür ist in den nicht umkehrbar verlaufenden Vorgängen zu suchen, die sich

- 14 -

bei der Drosselung und bei dem Wärmeaustausch im Gegenströmer abspielen. Nach dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gilt für den Arbeitsaufwand  $AL$  bei der Kälteerzeugung folgende Beziehung:

$$AL = (\Delta s_0 + \Sigma \Delta s_v) T - Q \quad (13.)$$

Dabei bedeuten  $\Delta s_0$  die theoretisch eindeutig bestimmte Entropieänderung, die der Kälteleistung  $Q$  entspricht,  $\Sigma \Delta s_v$  die Summe der Entropieänderungen, die durch nicht umkehrbare Vorgänge hervorgerufen sind, und  $T$  die Temperatur, bei der die Verdichtungsarbeit geleistet wird.  $\Delta s_0$  ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$\Delta s_0 = \int_0^Q \frac{dQ}{T_1} \quad (14.)$$

wobei  $T_1$  die Temperatur ist, bei der die Kältemenge  $dQ$  erzeugt wird. Die Entropiezunahme bei der Drosselung ergibt sich zu:

$$\Delta s_{vd} = \int_{p_2}^{p_1} \left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_i dp \quad (15.)$$

wenn  $p_2$  und  $p_1$  die Drücke vor und nach der Drosselung bedeuten und der Index  $i$  anzeigen soll, daß bei der Drosselung der Wärmeinhalt konstant bleibt. Da die spezifische Wärme hochgespannter Luft in der Regel

- 15 -

größer ist als die von Luft geringeren Druckes, bestehen im Wärmeaustauscher Temperaturunterschiede, die beim idealen Gegenströmer vom Wert 0 an seinem warmen Ende langsam ansteigen. Damit ist jedoch ein weiterer Entropieverlust verbunden [2]:

$$\Delta s_{vg} = \int_0^{Q_g} \left( \frac{1}{T'} - \frac{1}{T''} \right) dQ_g \quad (16.)$$

In Gleichung 16.) bedeuten  $Q_g$  die im Gegenströmer zu übertragende Wärmemenge,  $T''$  und  $T'$  die Temperatur der gespannten und entspannten Luft an der Stelle, an der die Wärmemenge  $dQ$  übertragen wird.

Der Wert der Integrale in Gleichung 14.) bis 16.) kann bequem aus dem T-s-Schaubild entnommen werden, aus dem sich überdies der Anteil der Verlustarbeit am gesamten Arbeitsaufwand gut übersehen läßt. In Bild 6 ist der Luftkreislauf stark eingezeichnet, wobei die Punkte 1-5 den gleichen Punkten in Bild 5 entsprechen.  $\Delta s_0$  ist dann gleich dem waagerechten Abstand der Punkte 4 und 5.  $\Delta s_{vd}$  gleich dem zwischen 3 und 4. Wird nun durch Punkt 1 eine Parallele zu der Verbindungsgeraden durch 2 und 6 gezogen, so gibt der Abstand der Punkte 6 und 8 die gesamte Entropieänderung  $\Delta s$  und, wie leicht einzusehen ist, der Abstand der Punkte 7 und 8 den Entropieverlust  $\Delta s_{vg}$  an. Außerdem stellen die Flächen 4-5-16-13 die Kälte-

- 16 -

Bild 6: Arbeitsaufwand und Verlustarbeit im Wärme-  
diagramm.

leistung, 4-10-11-5 die theoretisch erforderliche  
Mindestarbeit  $AL_0 = T \cdot \Delta s_0 - Q$ , 9-10-13-14 und  
11-12-15-16 die durch den Drosselvorgang und den  
Austauschverlust im Gegenströmer verursachte Mehr-  
arbeit dar. Die in den Rohrleitungen auftretenden  
Reibungsverluste sind dabei vernachlässigt. Den An-  
teil dieser beiden Mehrarbeiten in Prozent der Ge-  
samtarbeit zeigt Bild 7 abhängig von der Mitteltem-  
peratur, bei der die Kälte erzeugt wird. Der Dar-  
stellung liegen folgende Verhältnisse zugrunde:  
 $p_2 = 200 \text{ ata}$ ,  $T = 243^\circ \text{ abs.}$ ,  $p_1 = 50 \text{ bzw. } 1 \text{ ata}$ .  
Wie man sieht, werden durch den Drosselvorgang die  
weitaus größten Verluste verursacht, deren Größe

- 17 -

Bild 7: Anteil der Arbeitsverluste durch Drosselung ( $L_{vd}/L$ ) und Wärmeaustausch ( $L_{vg}/L$ ) an der Gesamtarbeit.

—————  $p_2/p_1 = 200/50$

-----  $p_2/p_1 = 200/1$

jedoch nicht nur mit sinkender Temperatur wesentlich abnimmt, sondern vor allem, wenn der Gegendruck beispielsweise von 1 auf 50 ata heraufgesetzt wird. Im letzteren Fall nimmt dafür der Austauschverlust im Gegenströmer etwas zu, doch ist sein Anteil an der Gesamtarbeit in beiden Fällen gering.

Aus Bild 5 und 7 lassen sich nunmehr die beiden wesentlichsten Gesichtspunkte ablesen, die für die einigermaßen wirtschaftliche Anwendung der Drosselkühlung maßgebend sind: Erstens muß der Prozeß im

- 18 -

Gebiet hoher Drücke, also als geschlossener Kreispro-  
zeß geführt werden und zweitens ist es zweckmäßig, die  
Luft vor ihrem Eintritt in den Gegenströmer möglichst  
weit vorzukühlen <sup>1)</sup>.

Damit ergibt sich zwanglos ein Arbeitsschema,  
wie es Bild 8 zeigt. Die durch einen einstufigen Hoch-  
druckverdichter verdichtete Luft durchströmt im Kreis-

Bild 8: Arbeitsweise der Göttinger AVA-Tiefkühlanlage.

- |                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| a) Auffüllverdichter | h) Kältekammer    |
| b) Wasserkühler      | i) Luftverdichter |
| c) Trockenflasche    | k) Wasserkühler   |
| d) Verdampfer        | l) Kältemaschine  |
| e) Gegenströmer      | m) Drosselventil  |
| f) Drosselventil     | n) Kondensator    |
| g) Luftkühler        |                   |

<sup>1)</sup> Der Vorschlag, die Drosselkühlung als einstufigen  
Hochdruckkreislauf mit Vorkühlung für die Kühlung  
von Kältekammern anzuwenden, stammt von H. Glaser.

- 19 -

lauf der Reihe nach den Verdampfer einer Kältemaschine, den Gegenströmer, das Drosselventil sowie den Wärmeaufnahme und kehrt dann durch den Gegenströmer wieder zur Ansaugseite des Verdichters zurück. Zum Füllen der Anlage und zur Deckung ihrer Leckverluste dient ein kleiner Auffüllverdichter.

Der Aufbau einer solchen Anlage ist also bestehend einfach und übersichtlich. Wegen der hohen Drücke bleiben die Abmessungen des Verdichters und mit Rücksicht auf die hohen erzielbaren Wärmeübergangszahlen auch die des Gegenströmers klein. Außerdem läßt sich der in der Kältekammer unterzubringende Kühler bei kleinstem Gewicht sehr günstig gestalten, so daß seine Wärmekapazität gering ist. Weiterhin sind die Anlagekosten einer derartigen Anlage weit aus niedriger, als bei jedem anderen Kühlverfahren. Schließlich ist nicht zu übersehen, daß Luft als Kältemittel in jeder Hinsicht ideal ist.

Alle diese Vorteile zusammen gaben den Ausschlag, daß die Wahl auf dieses Verfahren fiel. Die etwas höheren Betriebskosten konnten dabei unbedenklich in Kauf genommen werden, da bei derartigen Prüfständen erfahrungsgemäß die Wartezeiten ein Vielfaches der Betriebsstundenzahl betragen und daher den Anschaffungskosten die weitaus größere Bedeutung zukommt. Auch die gegenüber der dynamischen Kühlung etwas

- 20 -

größere Trägheit der Anlage konnte mit Rücksicht auf die geplanten Versuche nicht als Nachteil empfunden werden.

Nachdem der Bau einer derartigen Anlage beschlossen war, galt es, den Ansaugdruck und den Verdichtungsdruck möglichst günstig festzulegen. Neben den früher erwähnten Erkenntnissen führten im wesentlichen praktische Erwägungen zu der Wahl des Wertepaares von 50 und 200 ata. Dabei waren für die Begrenzung des oberen Betriebsdruckes auf 200 ata vor allem Festigkeitsgründe maßgebend. Der untere Druck erscheint mit 50 ata auf Grund der in Bild 5 und 6 gezeigten Kurven reichlich niedrig. Seine Erhöhung hätte aber eine Zunahme des umlaufenden Luftgewichtes bedingt, weil die je kg Luft verfügbare Kälteleistung mit abnehmendem Druckgefälle ebenfalls zurückgeht. Außerdem würde das im Gegenströmer für den Wärmeaustausch zur Verfügung stehende Temperaturgefälle auch kleiner werden, während die zu übertragende Wärmemenge wegen des größeren Luftdurchsatzes steigen würde. Beides hätte aber eine bedeutende Vergrößerung des Gegenströmers zur Folge, was mit Rücksicht auf seine Wärmekapazität die Abkühlzeit der Anlage unerwünscht erhöhen würde. Da die Mitteldruckluft den Außenraum des Wärmeaustauschers durchströmt, müßte ferner die Wandstärke seines Mantels entsprechend erhöht werden.

- 21 -

Die Wahl der Vorkühltemperatur war im vorliegenden Fall sehr einfach. In der Nähe des Aufstellungs-ortes der Kammer stand bereits für andere Zwecke eine Ammoniak-Kältemaschine, die mit Chlor-Kalzium-Sole als Kälteträger arbeitet. Da die für die Vorkühlung der Hochdruckluft benötigte Kälteleistung klein ist, konnte sie dem Solekühler der Ammoniakanlage ohne Bedenken, daß dadurch der eigentliche Zweck der Anlage gefährdet wurde, entnommen werden.

Die Bilder 9 bis 12 zeigen Einzelheiten der fertigen Anlage. Die Luft wird mit einem zweizylindrigen Kompressor stehender Bauart verdichtet (Bild 9).

Bild 9: Luftverdichter.

- 22 -

Seine Ausführung stammt von der Maschinenfabrik Sürth der Ges. f. Linde's Eismaschinen. Er wird durch einen Drehstrom-Kurzschlußläufer über Keilriemen angetrieben. Ein Ölabscheider in der Hochdruckleitung hinter dem Verdichter sorgt dafür, daß das mitgerissene Öl zurückgehalten wird. Auf den Einbau einer Trockenflasche zum Abscheiden des Wasserdampfes konnte verzichtet werden, da die Kreislauf Luft keine Gelegenheit zur Feuchtigkeitsaufnahme hat und daher keine Vereisung des Wärmeaustauschers zu befürchten ist. Lediglich die dem Hochdruckkreislauf zugeführte Zusatzluft wird in einer dem Auffüllverdichter nachgeschalteten Chlorcalciumflasche getrocknet. An die Hochdruckleitung ist ferner abschaltbar eine Batterie von Preßluftflaschen angeschlossen, deren Inhalt bei der Inbetriebnahme in den Kreislauf eingelassen wird, so daß dadurch die Betriebsbereitschaft wesentlich erhöht wird. Sicherheitsventile an mehreren Stellen sorgen dafür, daß der Druck an keiner Stelle des Kreislaufs das zulässige Maß überschreiten kann.

Bild 10 gibt eine Gesamtansicht der Kammer, der Regelstelle und des Gegenströmers. Der obere Teil des Wärmeaustauschers und die von hier abgehenden Rohrleitungen zum Vorkühler und zum Verdichter sind mit Kork gegen Wärmeverluste geschützt. Die Ansaugtempe-

- 23 -

ratur des Verdichters liegt daher verhältnismäßig tief, so daß dadurch der Leistungsaufwand herabgesetzt wird. Der untere Teil des Gegenströmers und die

Bild 10: Gesamtansicht des Prüfstandes.

- a) Kältekammer
- b) Regelstelle
- c) Gegenströmer

unter dem Schaltpult liegenden kalten Leitungen wurden mit Schlaekenwolle isoliert, da auf diese Weise eine gute Zugänglichkeit dieser Teile erreicht wurde. Dies war mit Rücksicht auf möglicherweise zu erwartenden Undichtigkeiten erwünscht. An der Rückseite des Schaltpultes sind die Meßgeräte für Druck und Temperatur angeordnet, mit deren Hilfe der Be-

- 24 -

triebszustand der Anlage überwacht werden kann.

Bild 11 zeigt einen Schnitt durch die Kältekammer. Sie ist liegend aufgestellt und gut zugänglich, da beide Deckel abnehmbar sind. Der Luftkühler wurde in einem außen liegenden Ringraum untergebracht.

Bild 11: Kältekammer im Schnitt.

- a) Luftkühler
- b) Axialgebläse
- c) Isolierung

Die im Versuchsraum verlangte gleichmäßige Temperatur wird durch eine zwangsläufige Luftumwälzung innerhalb der Kammer erreicht. Ein an der einen Stirnseite angeordnetes Axialgebläse mit hohem Wirkungsgrad saugt die Luft aus dem eigentlichen Prüfraum der Kammer und drückt sie durch den Kühler. Dabei werden seine

- 25 -

Rohre im Kreuzstrom beaufschlagt, so daß auch bei großen Unterdrücken, d.h. also bei einer geringen Dichte der Kammerluft, noch ein guter Wärmeübergang gewährleistet ist.

Der Gebläsemotor ist ebenfalls in der Kammer selbst untergebracht und daher der Kälte und vor allem dem Unterdruck voll ausgesetzt. Auf diese Weise müssen zwar außer der unvermeidlichen Gebläsearbeit auch noch die elektrischen Verluste des Motors weggekühlt werden. Dafür werden aber alle Dichtungs- und sonstigen Schwierigkeiten vermieden, die sich bei einer Aufstellung des Motors außerhalb der Kammer aus der Durchführung der Motorwelle durch die Kammerwand ergeben hätten. Außerdem wären auch in diesem Falle Wärmeverluste durch Wärmeleitung längs der Motorwelle und Leckverluste unvermeidlich gewesen.

Die Abkühlungsgeschwindigkeit der Kammer hängt wesentlich von der Größe ihrer Wärmekapazität ab. Letztere läßt sich nun bedeutend herabsetzen, wenn die Wärmeisolierung auf den Innenwänden der Kammer angebracht wird. Dadurch wird vermieden, daß die große Masse der Kammerwandungen auf die tiefe Temperatur abgekühlt werden muß. Aus den gleichen Gründen empfahl sich die Wahl eines möglichst masselösen Dämmstoffes; diese Bedingung erfüllte am besten die Alfolisolierung. Sie wurde im zylindrischen Teil der

- 26 -

Kammer als Planisolierung aufgebracht, während bei den Deckeln wegen der zahlreichen Durchführungen die Form der Knitterisolierung angewandt wurde.

Der eine Kammerdeckel enthält die meisten druckdichten Durchführungen, insbesondere die Stützen für die zum Kühler führenden Mitteldruckleitungen. Der andere Deckel weist eine größere Einbauffnung auf, in die bei Bedarf ein Fenster eingesetzt werden kann, durch das sich der Versuchsraum beobachten läßt. Bild 12 zeigt einen Blick durch diese Öffnung in das Kammerinnere. Durch eine Hochvakuumpumpe kann der

Bild 12: Blick in den Versuchsraum der Kammer.

- 27 -

Druck der Kammer beliebig bis auf einen Wert gesenkt werden, der einer Flughöhe von 20 km entspricht. Ferner besteht die Möglichkeit, Strahler in die Kammerdecke einzubauen, durch die der Einfluß der Sonnenstrahlung untersucht werden kann.

Die Bedienung der Kälteanlage ist außerordentlich einfach. Sie beschränkt sich während der Versuchsdauer ausschließlich auf die Überwachung des störungsfreien Laufes der Maschine. Gerade so leicht kann auch die gewünschte Kälteleistung bzw. die geforderte Temperatur eingeregelt werden. Durch Ändern der Einstellung des Drosselventiles läßt sich das Druckverhältnis und damit die Druckdifferenz, über die die Luft gedrosselt wird, beliebig regeln. Da aber die Kälteleistung der Druckdifferenz in erster Näherung verhältnismäßig ist, ist eine stufenlose und vollkommen trägheitslose Leistungsregelung zwischen 0 und 100 % möglich. Auch darin liegt ein großer Vorteil des Drosselverfahrens begründet. Außerdem geht der Leistungsbedarf des Verdichters entsprechend der Abnahme des Druckverhältnisses zurück.

Die Kammer ist bereits seit dem Jahre 1937 in Betrieb. Von einigen anfänglichen Undichtigkeiten abgesehen, haben sich weder bei der Inbetriebnahme noch seither irgendwelche nennenswerten Schwierigkeiten ergeben. Insbesondere wurde die geforderte

- 28 -

tiefe Temperatur mühelos erreicht und sogar erheblich unterschritten, da mehrfach Temperaturen bis zu  $-115^{\circ}\text{C}$  in der Kammer gemessen wurden.

Abschließend kann gesagt werden, daß sich das gewählte Kühlverfahren in jeder Hinsicht bewährt hat. Seine Anwendung bietet besonders bei Prüfständen kleiner und mittlerer Größe, in denen sehr tiefe Temperaturen gefordert werden, zahlreiche Vorteile, von denen noch einmal folgende genannt seien: Geringe Anlagekosten, Gebrauch von Luft als Kältemittel, einfache Bedienung der Anlage, einstufige Arbeitsweise sowie stufenlose und trägheitslose Leistungsregelung.

#### S c h r i f t t u m .

- [1] H. H a u s e n, Der Thomson-Joule-Effekt und die Zustandsgrößen der Luft.  
VDI-Forschungsheft 274. VDI-Verlag. Berlin 1926.
- [2] H. H a u s e n, Austauschvorgänge bei der Zerlegung von Gasgemischen.  
Berichtsheft 74. Hauptversammlung des VDI Darmstadt. VDI-Verlag. Berlin 1936.
- [3] R. P l a n k und J. K a m b e i t z, Die thermischen Eigenschaften von Äthan als Kältemittel zur Erreichung sehr tiefer Temperaturen.  
Z.ges.Kälteind.43 (1936) 209/214 u. 233/238.