

burg für den Zeitraum vom 27. Februar bis 4. März angegeben. Auffallend ist das Aufhören des langsamen Abfalles der Intensität etwa zur Zeit des U.-V.-Ausbruches auf der Sonne und das Auftreten starker Schwankungen schon etwa 2 Stdn. vor Ausbruch des magnetischen Sturmes. Der weitere Gang der Strahlungsintensität entspricht etwa den schon

früher beschriebenen Verläufen (vergl. Steinke u. Sittkus<sup>12</sup>). Im Vergleich mit Kolhörsters Kurven der gefilterten Strahlung ergeben sich mit Ausnahme des 1. März rund 45% der Stundenwerte als gleichlaufend. Am Sturmtage selbst ist der Gleichlauf der Apparaturen mit 73% der Stundenwerte wesentlich höher.

## Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozeß

Von RUDOLF HILSCH

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Erlangen

(Z. Naturforschg. 1, 208—214 [1946]; eingegangen am 22. Februar 1946)

Es wird gezeigt, daß durch wirbelnde Entspannung von Gasen beachtliche Abkühlung erreicht werden kann. Die Konstruktion eines Wirbelrohres mit guter Kälteausbeute wird angegeben, quantitative Messungen in Abhängigkeit von den in Frage kommenden Variablen werden mitgeteilt. Die theoretische Ausbeute wird mit der praktischen verglichen. Anwendungen des Wirbelrohres werden erwähnt.

### § 1. Einleitung

Die adiabatische Expansion eines Gases mit äußerer Arbeitsleistung ist der wirksamste Kälteprozeß zur Erzielung einer Temperaturerniedrigung. Die Expansion kann in einer Kolbenmaschine oder in einer Turbine stattfinden. Dies bedingt einen erheblichen technischen Aufwand. Besonders im Gebiet sehr tiefer Temperaturen sind viele technische Schwierigkeiten zu überwinden. Deshalb wird in der Technik der Gasverflüssigung vielfach auf die Anwendung der Expansion mit Arbeitsleistung verzichtet und der überaus einfache Drossелеffekt benutzt, der keinerlei mechanisch bewegte Teile erfordert. Dieser ungünstigere Kälteprozeß ist bekanntlich nur wegen der Abweichung vom idealen Verhalten der Gase möglich.

Bei dieser Sachlage erscheint die Untersuchung einer Anordnung wichtig, die Georges Ranche<sup>1</sup> 1933 beschrieben hat. Druckluft tritt durch eine tangentielle Düse in einen Wälzbehälter ein, der aus einem beiderseitig offenen Rohr von 12 mm  $\varnothing$  besteht. Aus den offenen Rohrenden entweicht dann eine schraubenförmige Strömung. Im Rohrinnen wird durch die Drehströmung an der Wand ein Gebiet des Überdrucks, in Achsennähe Unterdruck erzeugt. Wird an einem Rohrende nun der Luftaus-

tritt nur aus der zentralen Öffnung einer angebrachten Ringblende erlaubt und am anderen Rohrende der Luftaustritt geeignet gedrosselt, so strömt die eintretende Luft aus der Blende mit verringerter; aus dem anderen Rohrende mit erhöhter Temperatur aus. Mit Druckluft von 6 atü und 20° C wird eine maximale Temperaturdifferenz von 70° zwischen beiden Strömen erzielt. Als tiefste Temperatur wird bei geeignetem Anteil des Kaltluftstroms — 12° C beobachtet.

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit soll sein, Bedingungen für eine wirksamere Anordnung dieser Art so zu finden, daß ein Kälteprozeß mit möglichst großem Nutzeffekt entsteht. Dieser Nutzeffekt soll bestimmt werden.

### § 2. Bau und Wirkungsweise eines „Wirbelrohres“

Das Ergebnis vieler Vorversuche sei zunächst vorweggenommen. Zur Erzielung eines günstigen Kälteeffektes muß die Blende so nah wie möglich an die Düsenöffnung gelegt werden. In der Nähe der Düse und der Blende muß die Drehströmung möglichst rotations-symmetrisch zur Rohrachse sein. Dies wird durch eine besondere einschleichende Lufteinführung ermöglicht, die aus Abb. 1 b und 1 c ersichtlich ist. Mit Ringmuttern und Flan-

<sup>1</sup> J. Physique Radium (7) 4, 112 S, [1933].



sehen können zwei Rohrstücke mit  $\varnothing_i = R$  angeschraubt werden. Der eine Flansch bildet zugleich die Blende  $B$  in unmittelbarer Nähe der Düse.

Zur Erläuterung der Wirkungsweise des Wirbelrohres diene Abb. 1a. Der bei  $D$  tangential in das Rohr eintretende Luftstrahl kann bei offenem linken und rechten Rohrende nur mit einer Schraubenströmung längs der linken Rohrwand entweichen. Durch die Zentrifugalkraft und innere Reibung der Drehströmung wird in der Rohrachse sogar Unterdruck erzeugt und Luft durch die Blen-

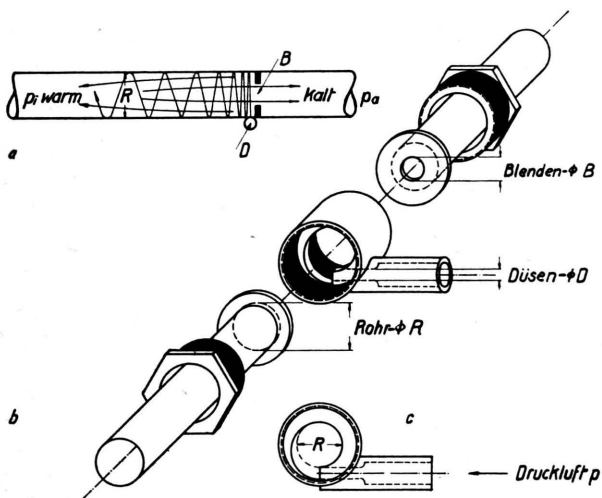


Abb. 1. Wirbelrohr.

- Schematische Darstellung.
- Wirbelrohr auseinandergeschraubt (Gewindeflächen schwarz).
- Ansicht des Düsenmittelstückes.

denöffnung von rechts eingesaugt. Dies kann verhindert werden, wenn eine Drossel am linken Rohrende angebracht wird. Die Drossel befindet sich in einer solchen Entfernung von der Düse, daß die Schraubenströmung bereits durch Reibung weitgehend abgeklungen ist (Entfernung ca. 50-facher Rohrradius). Durch die Drosselung läßt sich ein Austritt eines Luftanteils durch die Blende aus dem rechten Rohrteil um so mehr erzwingen, je größer ein in Drosselnähe gemessener Innendruck  $p_i$  wird. Die so nach rechts entweichende Luft entstammt dem achsennahen Gebiet der Drehströmung im linken Rohrteil. Sie ist im Zentrifugalfeld vom Gebiet hohen Druckes, von der Rohrwand her, auf den Druck  $p_i$  in Achsennähe entspannt worden und hat während dieser Expansion einen erheblichen Teil ihrer kinetischen Energie durch innere Reibung an solche periphere Schichten abgegeben, die

nach links dann mit erhöhter Temperatur entweichen. Von der entspannten Druckluft verläßt also ein Anteil  $\gamma$  die Wirbelröhre nach rechts abgekühlt und ein Anteil  $(1 - \gamma)$  nach links erwärmt.

Wenn keine innere Reibung vorhanden wäre, würde die Geschwindigkeit der Luft auf dem Entspannungsweg vom Umfang zur Achse bei genügendem Druckverhältnis bis auf Überschallgeschwindigkeit anwachsen. Die innere Reibung ist gerade in diesem Geschwindigkeitsbereich sehr wirksam. Sie verursacht einen Energiestrom von der Achse zum Umfang und hat das Bestreben, im ganzen Rohrquerschnitt gleiche Winkelgeschwindigkeit herzustellen.

Es tritt also eine Abnahme des Wärmeinhalts der nach rechts entweichenden Kaltluft und eine Zunahme des Wärmeinhalts von gleichem Betrage für die nach links strömende Heißluft auf, wenn ein Wärmeaustausch mit der Umgebung durch die Rohrwand verhindert wird.

Die Vorführung einer so (Abb. 1b) beschriebenen Wirbelröhre wirkt verblüffend. Durch geeignete Wahl der Luftanteile  $\gamma$  und  $(1 - \gamma)$  kann mit Druckluft von einigen atü und 20° C leicht eine Temperatur im linken Rohrteil von mehr als +200° C und rechts von -50° C erzeugt werden.

### §3. Zur Ermittlung der besten Bedingungen für den Betrieb eines Wirbelrohres

Bei der Konstruktion des Wirbelrohres nach Abb. 1 sind bereits die Ergebnisse verschiedener Vorversuche verwertet. Irgend eine Formgebung des Wälzbehälters, des warmen Rohrteiles, scheint wenig Einfluß auf die Wirksamkeit zu haben. Deshalb wird einfach ein innen glattes zylindrisches Rohr von genügender Länge verwendet. Das Rohr auf der Blendenseite kann beliebig geformt sein, darf nur den Kaltluftstrom nicht behindern. Ein günstiger Einfluß besonders geformter Blenden ist nicht ersichtlich gewesen. Ein Wärmeübergang von der kalten zur warmen Rohrseite ist durch die Verwendung von dünnwandigem Neusilberrohr und durch die bereits angegebene Verschraubung mit Flanschen gering gehalten.

Trotz des einfachen Aufbaues, der hiermit festgelegt ist, bleiben viele Variable, die einen Einfluß auf den Betrieb haben. Es wird schwer sein, diesen Einfluß theoretisch aus dem Verhalten der hier vorliegenden kompressiblen Strömung quantitativ abzuleiten. Deshalb soll versucht werden, ihn experi-

mentell zu ermitteln. Die Temperaturen  $T$  der beiden Strömungen hängen von folgenden Variablen ab:

1. Temperatur  $T_0$ , Druck  $p$  und Masse/Zeiteinheit  $G$  der zu entspannenden Druckluft.
2. Druck  $p_a$  außerhalb des Wirbelrohres.
3. Rohrdurchmesser  $R$ , Blendendurchmesser  $B$  und Düsendurchmesser  $D$  (dadurch ist  $G$  bestimmt).
4. Aufteilungsverhältnis

$$\gamma = \frac{\text{Masse der Kaltluft}}{\text{Masse der gesamten Luft}}$$

Die Bestimmung von Temperaturen strömender Gase stellt ein Problem dar. Da die entspannte Kaltluft ihre kinetische Energie sicher nicht restlos abgegeben hat und darin noch eine Drehströmung vorhanden ist, würde eine Messung der Temperatur mit Thermoelementen im Gasstrom zu falschen Werten führen. Deshalb werden einfach die Temperaturen  $T$  der Rohrwandungen außen gemessen. Die Rohre sind dabei außen gegen Ableitung thermisch isoliert. Auf diese Weise werden keine zu günstigen, vielmehr zu kleine Temperaturunterschiede bestimmt.

§ 4. Meßergebnisse

Abb. 2 enthält Meßergebnisse für ein Wirbelrohr mit  $R = 4,6$  mm. Ein Einfluß des Düsendurchmessers ist daraus nicht ersichtlich. Er ist mit  $D = 1,1$  mm als experimentell günstig gewählt worden. Kleinere Düsen sind sicher ungünstiger, weil dann die Drehströmung wegen der zu kleinen Ausflußmenge und der zu sehr ins Gewicht fallenden Rohrreibung zu schnell abklingt. Größere Düsen würden zu große Ausflußmengen ergeben, die vom Wirbelrohr nicht mehr ohne große Drucksteigerung ( $p_1$ ) bewältigt werden könnten. Das würde aber ein ungünstiges Entspannungsverhältnis  $p/p_1$  ergeben. Die Druckdifferenz ( $p_1 - p_a$ ) führt außerdem zu einem Drosselverlust.

Für vier verschiedene Eintrittsdrücke als Parameter werden die Temperaturen der kalten und warmen Rohrseite mit Meßpunkten in Abhängigkeit vom Verhältniswert  $\gamma$  wiedergegeben. Dieser kann durch ein Ventil am Ende des ca. 30 cm langen warmen Rohres (Drehströmung dort genügend abgeklungen) beliebig eingestellt werden. Der Wert  $\gamma$  wird aus den Angaben zweier Gas-

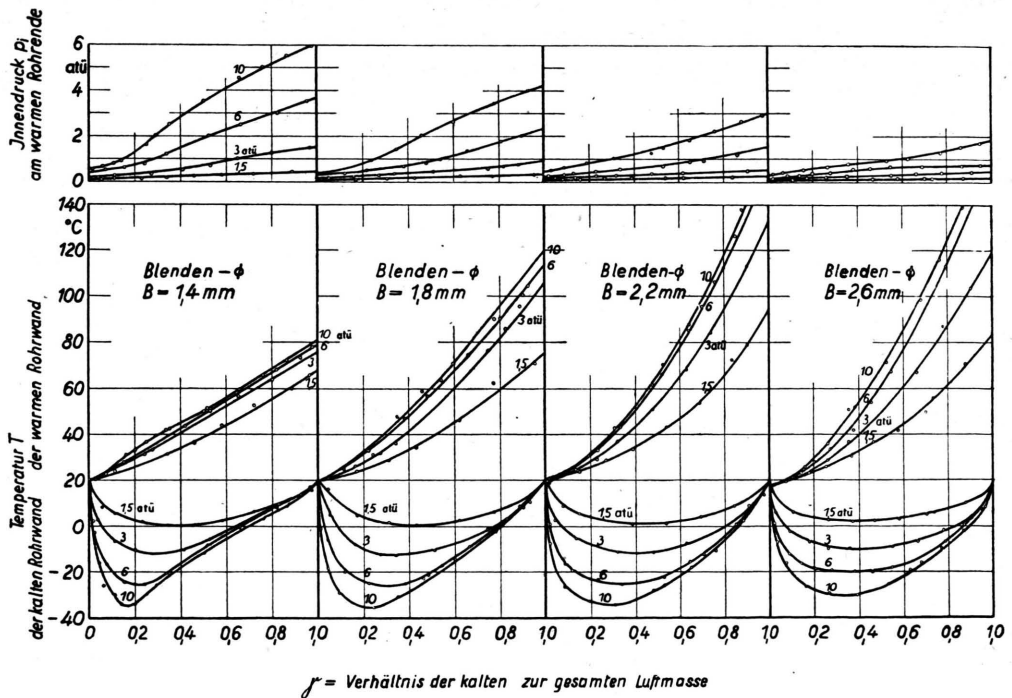


Abb. 2. Temperatur des Kalt- und Heißluftstromes und Innendruck eines Wirbelrohres Nr. 1 in Abhängigkeit von Außendruck, Luftanteil und Blendengröße. Konstante Größen:  $R = 4,6$  mm,  $D = 1,1$  mm,  $T_0 = 20^\circ$  C,  $p_a = 1$  at.

uhren für den kalten und warmen Luftstrom ermittelt. Die gesamte Ausflußmenge ist dem absoluten Druck  $p$  proportional, hängt kaum von der Ventileinstellung, also von  $\gamma$  ab und beträgt für die Düse 1,1 mm z. B. bei  $p = 10$  atü  $G = 7,0$  m<sup>3</sup> Luft/Stunde.

Der Innendruck  $p_i$  wird kurz vor dem Drosselventil gemessen und ebenfalls eingetragen. Mit vier verschiedenen Durchmessern wird der Einfluß der Blende gezeigt.

Die Temperaturen für die Kaltluft haben ein Minimum bei einem bestimmten  $\gamma$ -Wert. Je größer der Kaltluftanteil gewählt wird, um so größer ist die Temperatur der warmen Rohrwand. Zur Diskussion ziehe man den Verlauf von  $p_i$  heran. Man sieht, daß eine enge Blende (1,4 mm) besonders bei großen  $\gamma$  ungünstig ist, da hier  $p_i$  groß und damit der Drosselverlust ebenfalls groß wird. Für die größte Blende (2,6 mm) wird die Abkühlung im Minimum wieder geringer, weil die Luft durch eine so weite Blende noch mit erheblichem Wirbel austreten kann. Bei großen Anteilen  $\gamma$  (z. B. 0,8) ist die Abkühlung bei der größten Blende am günstigsten. Die Wahl der Blende hängt also davon ab, ob man nur eine tiefe Temperatur der Kaltluft oder auch gleichzeitig ihren Anteil  $\gamma$  groß machen möchte. Hier kann man die Blende 2,2 mm als günstige Kompromißlösung für beide Faktoren betrachten.

Es lassen sich noch viele Einzelheiten aus den Kurven ablesen. Insbesondere sei darauf hingewiesen, daß bei  $\gamma = 0,5$  in jedem Fall die Abkühlung unter Zimmertemperatur gleich der Erwärmung über Zimmertemperatur ist. Man kann sich außerdem überzeugen, daß immer gilt:

$$\gamma \cdot \text{Abkühlung} = (1 - \gamma) \cdot \text{Erwärmung},$$

da ja die dem Kaltluftstrom entzogene Wärmemenge gleich der vom Heißluftstrom fortgeführten sein muß. Bemerkt werden soll noch, daß sich das Minimum der Temperatur jeweils sehr genau ohne besondere Messung einstellen läßt. Beim Erreichen der richtigen Ventileinstellung und des richtigen  $\gamma$ -Wertes (z. B.  $\gamma = 0,3$  bei 10 atü mit Blende 2,2 mm,  $T = -35^\circ$  C) hört man ein kochendes Geräusch. Beachtet werden muß noch, daß bei sehr kleinem  $\gamma$  die Temperatur der Kaltluft und bei  $\gamma$  nahe 1 die Temperatur der Heißluft wegen der kleinen transportierten Luftmenge leicht zu hoch bzw. zu niedrig gemessen wird.

Mit der Variierung des Rohrdurchmessers mußten eigentlich sämtliche Messungen an anderen

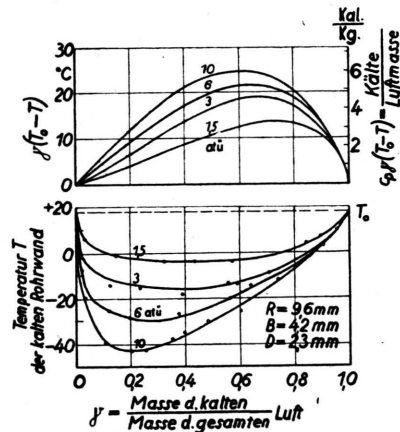


Abb. 3. Temperatur und Kältemenge des Kaltluftstromes eines Wirbelrohres Nr. 2 mit günstiger Blende.

Wirbelrohren wiederholt werden. Es genügt jedoch die Mitteilung von Messungen für den Kaltluftanteil in Abb. 3 im Fall der günstigsten Blende an einem weiteren Rohr. Die Rohrweite ist mehr als verdoppelt, die Düse proportional vergrößert worden. Für sämtliche Anfangsdrucke liegen die Tem-

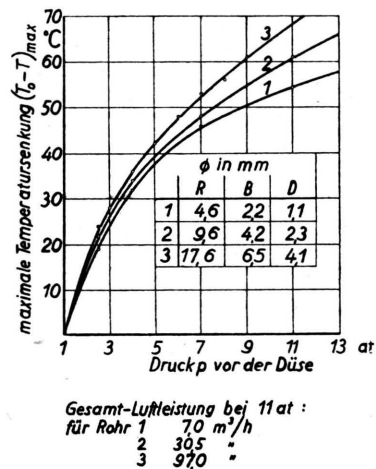


Abb. 4. Maximale Temperatursenkung für Wirbelrohre Nr. 1, 2 und 3.

peraturen jetzt tiefer als in Abb. 2. Abb. 4 enthält u. a. noch Daten für die tiefsten Temperaturen, die man in Abhängigkeit von  $p$  für ein drittes, nochmals in den Dimensionen fast verdoppeltes Rohr erhält. Die gesamte Ausflußmenge  $G$  aller Rohre läßt sich durch die Beziehung darstellen:

$$G = \text{const} \cdot F \cdot p$$

$$(\text{const} = 0,80 \frac{\text{kg}}{\text{Std. mm}^2 \cdot \text{at}}, F = \text{Düsenquerschnitt})$$



in mm<sup>2</sup>,  $p$  = Druck vor der Düse in at,  $G$  = kg Luft /Std.).

Für Rohr 2 in Abb. 3 ist noch das Produkt  $\gamma (T_0 - T)$  in Abhängigkeit von  $\gamma$  dargestellt. Es ist der erzielten Kälteleistung proportional. Man sieht, daß die dem Kaltluftstrom entzogene maximale Wärmemenge nicht an der Stelle  $\gamma$  tiefster Temperaturerniedrigung liegt.

Aus Abb. 4 geht hervor, daß mit noch größeren Wirbelrohren noch größere Temperatursenkungen und Kälteleistungen bei gleichem Druck erzielt werden können. Die Luftleistungen werden dann erheblich. Für derartige Messungen reicht der Kompressor des Instituts nicht mehr aus. Der mit dem Rohrdurchmesser steigende Wirkungsgrad wird ohne weiteres verständlich, wenn man bedenkt, daß Kälteverluste durch Wärmeleitung von der Achse des Wirbelrohres zur Peripherie und viele Reibungsverluste relativ geringer werden. Je größer der Rohrdurchmesser genommen wird, um so kleiner wird nach der Maßstabelle in Abb. 4 das

Verhältnis  $\frac{\text{günstigster Blenden-}\varnothing}{\text{Rohr-}\varnothing}$ . Aus einer re-

lativ kleinen Blende entweichen aber bevorzugt nur gut entspannte und nicht mehr wirbelnde kalte Luftmengen.

### § 5. Thermodynamischer Nutzeffekt des Wirbelrohres

Die Bestimmung des Nutzeffektes des Wirbelrohres soll durch Vergleich mit dem Vorgang der adiabatischen Entspannung eines idealen Gases mit Gewinn äußerer Arbeit durchgeführt werden. In einer Expansionsmaschine (z. B. offene Kaltluftmaschine) läßt sich theoretisch fortlaufend ein kalter Gasstrom der Temperatur  $T_1$  durch Entspannung eines Gases der Temperatur  $T_0$  vom Druck  $p$  auf  $p_a$  erzeugen. Es gilt dabei:

$$T_0/T_1 = (p/p_a)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Je Masseneinheit des Gases wird die Arbeit

$$E = c_p (T_0 - T_1)$$

gewonnen. Sie ist der erzielten Kälte  $Q$  äquivalent.

Zur Kompression des Gases benötigt man mindestens (isotherm) je kg die Arbeit:

$$A = RT_0 \ln (p/p_a).$$

Führt man statt des im Kompressor benutzten

Druckverhältnisses das bei der Entspannung erzielte Temperaturverhältnis nach der obigen Adiabatengleichung ein, so ist

$$A = c_p T_0 \ln (T_0/T_1).$$

Dieser Arbeitsaufwand wird vermindert um die bei der Entspannung gewonnene Expansionsarbeit. In bekannter Weise ist dann der Nutzeffekt der Expansionsmaschine:

$$\begin{aligned} \eta_E &= \frac{\text{gewonnene Kälte } Q}{\text{Kompressionsarbeit } A - \text{Expansionsarbeit } E} \\ &= \frac{T_0 - T_1}{T_0 \ln (T_0/T_1) - (T_0 - T_1)} \\ &= \frac{x - 1}{x \ln x - (x - 1)}, \quad \frac{T_0}{T_1} = x. \end{aligned}$$

Im Vergleich zur Expansionsmaschine leistet ein Wirbelrohr weniger. Nur *ein Teil* des eintretenden Druckgases wird hier fortlaufend zu einem Kaltgasstrom entspannt. Die ihm entzogene Wärme muß ein anderer Teil des Gases fortführen. Expansionsarbeit wird nicht gewonnen.

Nach der früher in § 2 erläuterten Wirkungsweise wird ein Teil des Gases auf einem Spiralweg durch die Blende entspannt. Die innere Reibung versucht, auf dem Entspannungsweg im Zentrifugalfeld konstante Winkelgeschwindigkeit zu erzeugen. Diese ließe sich durch Einbau eines Schaufelrades vor der Düse im Inneren des Wirbelrohres auch direkt erzwingen. Man hätte dann eine Expansionsmaschine, in die das Gas am Umfang mit Druck eintritt und in Achsennähe durch die Blende ohne Geschwindigkeit entspannt austritt, wenn man dem Schaufelrad mechanische Energie entnimmt. In diesem gedachten Fall könnte das *gesamte* Druckgas als Kaltgas aus der Blende entweichen. Der Nutzeffekt wäre gleich dem abgeleiteten  $\eta_E$ . Die dem Schaufelrad zu entnehmende Arbeit  $E$  könnte durch ein an der Achse befindliches Reibkissen in Wärme verwandelt werden. Diese könnte durch einen abgezweigten winzigen Anteil des entspannten Gases nach der warmen Seite des Wirbelrohres fortgeführt werden, und zwar mit beliebig hoher Temperatur.

Das auf diese Weise umgeändert gedachte Wirbelrohr mit verborgener Turbine würde das wirklich vorhandene Wirbelrohr im Nutzeffekt übertreffen, da ja fast das ganze Gas kalt entspannt aus der Blende entweicht. Eine Expansionsarbeit wird nicht gewonnen. Ihr Wärmeäquivalent taucht im

Heißgasanteil, getragen von einer winzigen Gasmenge, auf. Der Nutzeffekt dieses gedachten „idealen Wirbelrohres“ soll zum Vergleich mit dem wirklich vorliegenden herangezogen werden. Man erhält ihn, indem man den Betrag der Expansionsarbeit  $E$  im Nenner von  $\eta_E$  fortläßt:

$$\eta_W = \frac{x-1}{x \ln x}$$

Man ersieht aus Abb. 5 den Verlauf beider theoretischer Nutzeffekte  $\eta_E$  und  $\eta_W$  in Abhängigkeit von  $x$ . Außerdem ist (nur zum Vergleich) der Nutzeffekt einer „Carnot-Maschine“  $\eta_C$  eingetragen. Eine solche Maschine ist zwar für die Aufgabe der Herstellung eines fortlaufenden Kaltgasstromes der Temperatur  $T_1$  unzuweckmäßig, wird aber doch häufig in dieser Art in der Praxis verwendet. Aus den oberen Maßstäben ist zu entnehmen, mit welchem Entspannungsverhältnis  $p/p_a$  für ein- und zweiatomige Gase das entsprechende Temperaturverhältnis  $T_0/T_1$  erreicht wird.  $\eta_C$  und  $\eta_E$  gehen für  $x = 1$  gegen  $\infty$ , sämtliche  $\eta$  nähern sich für große  $x$  dem Wert Null.

Der theoretische Nutzeffekt des Wirbelrohres ist also besonders bei Anwendung großer Druckverhältnisse relativ günstig und nähert sich dann dem Wert für  $\eta_E$ .

Nach diesen theoretischen Überlegungen kann der Vergleich mit den experimentellen Daten des Wirbelrohres vorgenommen werden. In Tab. 1 ist das Ergebnis zu finden. Es betrifft das bisher größte untersuchte Wirbelrohr Nr. 3 ( $\varnothing = 17,6$  mm). Die Daten der Zeile 2 sind der Abb. 4 entnommen. Die der Kältemenge proportionale Größe

$$[\gamma (T_0 - T)]_{\max}$$

in Zeile 5 stammt aus Abb. 3 und ist mit dem Faktor 1,1 (siehe Abb. 4) multipliziert worden, um entsprechende Werte für Rohr 3 zu erhalten. Man sieht, daß die Temperaturnutzen  $\alpha$  fast 50% er-

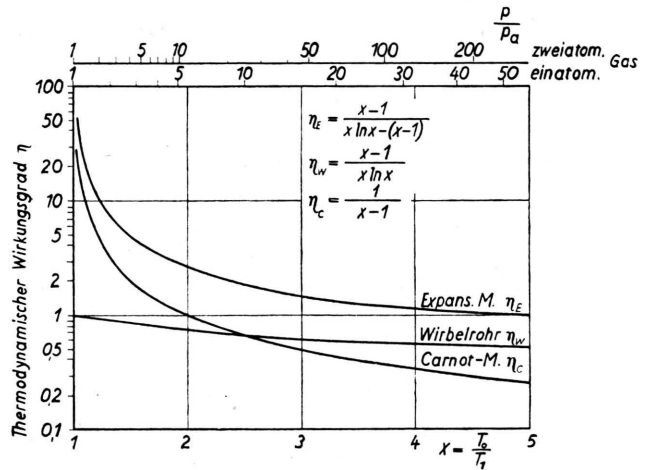


Abb. 5. Nutzeffekt von 3 Vergleichs-Kältemaschinen.

1	Experimentell benutztes Druckverhältnis $p/p_a$ . .	2,5	4	7	11
2	Maximale Temperatur-senkung $(T_0 - T)_{\max}$ in Grad . . . . .	24	36	52	68
3	Theoretische Temperatur-senkung $(T_0 - T_1)$ in Grad . . . . .	67	95	124	144
4	Temperaturnutzen $\alpha = \frac{(T_0 - T)_{\max}}{T_0 - T_1}$ . . .	0,36	0,38	0,42	0,47
5	$[\gamma (T_0 - T)]_{\max}$ in Grad .	15,5	21	24	27,5
6	Kälteausbeute $\beta = \frac{[\gamma (T_0 - T)]_{\max}}{T_0 - T_1}$	0,23	0,22	0,19	0,19
7	Theoretischer Nutzeffekt $r_w$ des Wirbelrohres . .	0,88	0,81	0,77	0,72
8	Praktischer Nutzeffekt $\beta \cdot r_w$ des Wirbelrohres	0,20	0,17	0,15	0,14

Tab. 1. Zum Nutzeffekt des Wirbelrohres Nr. 3  $R = 17,6$  mm,  $T_0 = 18^\circ$  C,  $p_a = 1$  at

reicht. Die als Kälteausbeute bezeichnete Größe  $\beta$  bedeutet das Verhältnis zwischen praktisch erzielter und theoretisch berechneter Kälteleistung. Sie beträgt rund 20%. Der praktische thermodynamische Nutzeffekt ist in Zeile 8 gleich  $\beta \cdot \eta_W$  gesetzt. Dies gilt, wenn auch praktisch ein idealer Luftkompressor benutzt wird.

Wahrscheinlich sind alle Ausbeuten in Wirklichkeit noch besser, denn erstens sind die Temperaturen sicher noch zu ungünstig gemessen, und es ist zweitens nicht berücksichtigt, daß die Kompressorluft Feuchtigkeit enthält, die sich im Kaltluftteil durch Eisnebel bemerkbar macht.

§ 6. Zur Anwendung des Wirbelrohres

Nachdem jetzt Ergebnisse über den Nutzeffekt eines günstig gebauten und mit Luft betriebenen Wirbelrohres vorliegen, kann ein Ausblick auf Anwendungen gegeben werden.

Wenig hoffnungsvoll scheint die Verwendung als Ersatz für die bekannten Kühlmaschinen nach dem bisher Erreichten zu sein. Diese haben im Gebiet der kleinen Druckverhältnisse bessere Nutzeffekte. Trotzdem sind Fälle denkbar, wo ein Wirbelrohr wegen des einfachen Aufbaues in Frage kommt (z. B. Kühlung vor Ort im Bergwerk).

Anders liegen die Verhältnisse bei tiefen Ausgangstemperaturen und bei hohen Druckverhältnissen. Im Gebiet der Gasverflüssigung wird sich das Wirbelrohr als wirksamer Kälteapparat dem Drosseleffekt überlegen zeigen. Für diese Anwendung auf Tiefsttemperaturen sind weitere Messungen geplant, über die später berichtet werden soll.

## Über natürliche Zerfallsspektren von Benzolderivaten und ihren Zusammenhang mit dem Phosphoreszenzleuchten

Von H. SCHÜLER und A. WOELDIKE

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, Hechingen

(Naturforschg. 1, 214—217 [1946]; eingegangen am 5. April 1946)

Bei Beobachtung von Emissionsspektren organischer Substanzen zeigt sich an Mono- und Diderivaten des Benzols, daß angeregte Molekülzustände existieren, aus denen heraus die Moleküle von selbst zerfallen und zwar so, daß eines der Bruchstücke im angeregten Zustand zurückbleibt. Bei den untersuchten Substanzen wird beim Zerfall der Phenylrest angeregt, und zwar sein Bindungselektron zum abgerissenen Substituenten hin. Dadurch entstehen zwei Typen von Spektren (blau und grün), deren Zusammenhänge diskutiert werden. Auffallende Ähnlichkeiten zwischen diesem Zerfallsleuchten in der Gasphase und den Phosphoreszenzerscheinungen in der festen Phase lassen den Schluß zu, daß das Phosphoreszenzleuchten in den betrachteten Fällen von Störstellen im Krystall herrührt, an denen zwischen Substituent und Phenylrest eine derartig starke Lockerung der Bindung eingetreten ist, daß man von einer Anregung eines Molekülbruchstückes sprechen muß. Diese eindeutige Zuordnung eines Leuchtprozesses in der festen Phase zu einem Leuchtprozeß in der gasförmigen Phase gestattet einen Einblick in die Vorgänge der festen Phase.

Die natürlichen Zerfallsspektren organischer Moleküle, deren Existenz bereits in früheren Untersuchungen<sup>1</sup> von den Verfassern festgestellt wurde, beweisen, daß es bei den vielatomigen Molekülen Anregungszustände gibt, in denen die aufgenommene Elektronenenergie dazu benutzt wird, das Molekül zu zerlegen und mindestens eines von den Bruchstücken in einem angeregten Zustand zurückzulassen. Das Spektrum dieses angeregten Molekülbruchstückes ist dann der unmittelbare Ausdruck für den eben dargelegten Zerfall. Voraussetzung dabei ist natürlich, daß durch die experimentellen Manipulationen alle gewaltsamen Zerstörungen der Moleküle vermieden sind und daß tatsächlich nur der elementare Zerfallsprozeß auftritt<sup>2</sup>. Während bei den zweiatomigen Molekülen der Ablauf solcher Zerfallsprozesse von vornherein eindeutig festgelegt und schon verschiedentlich

beobachtet ist, kann man bei den vielatomigen Molekülen die Bruchstücke, in die das Molekül zerfallen wird, und die Bruchstücke, die angeregt zurückbleiben, a priori nicht festlegen, ganz abgesehen davon, daß bei den organischen Molekülen solche Zerfallsprozesse bisher noch nicht diskutiert worden sind. Es ist nun an einer Reihe von Benzolderivaten der natürliche Zerfall studiert worden. In Tab. 1 sind die Resultate wiedergegeben. Die ersten Substanzen von Toluol bis Benzoesäure zeigen neben ihren spezifischen Emissionsspektren im Ultraviolett, die auf die Anregung der  $6\pi$ -Elektronen des Benzolringes zurückzuführen sind, alle im Sichtbaren das gleiche Spektrum. Wegen seiner Farbe haben wir es als das „blaue Spektrum“ bezeichnet. Die Wellenlängen seiner markantesten Banden sind, wie früher bereits mitgeteilt:  $\lambda=3713$ ;  $3970,3$ ;  $4263,0$ ;  $4597,4$ ;  $4985,4$ ;  $5420,3$  AE. Ein Bild

<sup>1</sup> H. Schüler u. A. Woeldike, Physik. Z. 43, 17 [1942].

<sup>2</sup> H. Schüler u. A. Woeldike, Physik. Z. 42, 390 [1941].