

I 24 a

● **Thermische und kalorische Daten von Stickoxydul**

von

Dr.-Ing. Georg Kling



Gebühren

Mitteilungen des Technischen Prüfstandes Oppau

1944

Heft 4

7/2

Thermische und kalorische Daten von Stickoxydul

von

Dr.-Ing. Georg Kling



I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Ludwigshafen a. Rh.

845

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Bearbeitung der Stoffwerte aus der Literatur	3
a) Dampfspannungen	3
b) Siedetemperatur, Tripelpunkt, kritischer Punkt	4
c) Wichte, Kompressibilität	7
d) Verdampfungswärme, Schmelzwärme, Sublimationswärme	9
e) Spezifische Wärme	11
f) Wärmeleitvermögen	11
g) Dynamische Zähigkeit	11
B. Zusammenstellung der Stoffgrößen von N_2O	12
C t-s-Diagramm von Stickoxydul im Tripelgebiet	12
a) Berechnung der Enthalpie	12
b) Berechnung der Entropie	13
c) Aufzeichnung des t-s-Diagrammes	15
D. Messung der Kompressibilität von N_2O und des N_2 - N_2O Gleichgewichtes	15
a) Verfahren	15
b) Bestimmung des Kompressibilitätsbeiwertes K von N_2O	16
c) Bestimmung der Tausobaren von N_2 - N_2O -Gemischen	16

Thermische und kalorische Daten von Stickoxydul

Von Dr.-Ing. GEORG KLING

Inhalt:

Zur Berechnung von thermodynamischen und hydraulischen Vorgängen sowie von Wärmeaustauschern für alle Prozesse der Fabrikation und der Verwertung von N_2O werden die wichtigsten Stoffgrößen zusammengestellt und kritisch bearbeitet.

Soweit Unterlagen vorhanden sind, werden der feste, flüssige und gasförmige Aggregatzustand erfaßt. — Es werden die aus der Literatur entnommenen Zahlen angegeben und kritisch bearbeitet. Die in technische Dimensionen umgerechneten Werte sind in Diagramme eingezeichnet, durch die besten Werte ist eine Kurve gelegt. Das vorhandene Material wird zur Aufstellung einer Dampftabelle benutzt, und die Stoffgrößen werden tabellarisch geordnet. In einem beschränkten Bereich in Nähe des Tripelpunktes ist die Aufstellung eines t-s-Diagrammes möglich.

In einem besonderen Abschnitt werden Messungen der Kompressibilität von reinem N_2O beschrieben. Des weiteren werden die Tausobaren des Gemisches N_2-N_2O teilweise bestimmt.

A. Bearbeitung der Stoffwerte aus der Literatur ^{1) 2) 3) 4) 5)}

a) Dampfspannungen

Über Dampfspannungsmessungen sind in der Literatur zahlreiche Angaben zu finden. Diese umfassen einen Bereich von $-170^\circ C$ bis zum kritischen Punkt und sind nach den Originalangaben in der Tabelle 1 zusammen-

¹⁾ Landolt-Börnstein: „Physikalisch-Chemische Tabellen“.

²⁾ International Critical Tables.

³⁾ Gmelin: „Handbuch der anorganischen Chemie“ Bd. N₂ 1936.

⁴⁾ Physikalische Berichte, Jahrgang 1936 bis 1942.

⁵⁾ Henning: „Wärmetechnische Richtwerte“ 1938.

Tabelle 1

Dampfspannungen von N_2O

t	p	Be- merkungen	Forscher, Jahr	Quelle
148,480° K	18,21 mm QS	fest		
151,903° K	28,31 „ „ +	„		
155,48 ° K	43,75 „ „	„		
159,268° K	68,02 „ „ +	„	Blue und Giauque 1935	L. B. III. E. B. S. 2444
163,28 ° K	105,34 „ „	„		
167,529° K	165,60 „ „ +	„		+ Gmelin S. 530
172,32 ° K	266,55 „ „	„		
177,218° K	421,95 „ „ +	„		
182,26 ° K	658,95 „ „	Tripelpunkt		
— 87,9 ° C	1,00 Atm	flüssig	Regnault 1862	L. B. HW. S. 1346
0 ° C	36,08 „	„		
+ 20 ° C	55,30 „	„		
+ 40 ° C	83,37 „	„		
— 60 ° C	5,05 Atm	flüssig	Cailletet 1878	
— 34 ° C	13,19 „	„		
— 59,4 ° C	3,58 Atm	flüssig	Faraday 1845	
— 31,7 ° C	12,04 „	„		
— 1,7 ° C	33,40 „	„		
0 ° C	30,75 Atm	flüssig		
5 ° C	34,80 „	„	Villard 1897	Gmelin S. 529
8 ° C	37,40 „	„		
12 ° C	41,20 „	„		
16 ° C	45,30 „	„		
20 ° C	49,40 „	„		
103,1 ° K	0,0013 mm QS	fest		
108,1 ° K	0,0096 „ „	„		
113,1 ° K	0,0300 „ „	„	Black, von Praagh und Topley 1930	+ Gmelin S. 530
— 157,5 ° C	0,0590 „ „ +	„		
117,6 ° K	0,1140 „ „	„		
— 152,5 ° C	0,1820 „ „	„		
123,1 ° K	0,3060 „ „	„		
135,0 ° K	2,80 mm QS	fest	Eucken und Donath 1926	L. B. II. E. Bd. S. 1299
156,0 ° K	48,70 „ „	„		
161,3 ° K	89,10 „ „	„		

t	p	Be- merkungen	Forscher, Jahr	Quelle	
-80,5 °C	1,6 Atm.	flüssig	Britton 1929	L. B. II. E. Bd. S. 1299	
-59,5 °C	4,4 "	"			
-39,5 °C	9,7 "	"			
-24,0 °C	16,5 "	"			
-11,2 °C	23,8 "	"			
0 °C	30,3 "	"			
+11,0 °C	38,7 "	"			
+14,0 °C	43,9 "	"			
+18,0 °C	49,5 "	"			
+35,4 °C	75,0 "	Krit. Pkt.			
+4,8 °C	35,2 Atm	flüssig	Kuenen 1895 1897	Gmelin S. 529	
13,3 °C	43,4 "	"			
19,9 °C	50,8 "	"			
25,4 °C	57,45 "	"			
31,5 °C	65,4 "	"			
36,0 °C	71,9 "	Krit. Pkt.			
182,889° K	685,79 mm QS	flüssig	Blue und Giauque 1935	Gmelin S. 529	
183,802° K	724,53 " "	"			
184,738° K	766,47 " "	"			
185,848° K	818,92 " "	"			
184,0 °K	670 mm QS	flüssig	Hunter 1906		
184,6 °K	700 " "	"			
185,7 °K	750 " "	"			
186,0 °K	760 " "	"			
186,6 °K	800 " "	"			
183,0 °K	700 mm QS	flüssig	Burrell u. Robertson 1915 u. 1916		Gmelin S. 529
183,8 °K	730 " "	"			
184,4 °K	760 " "	"			
-89,4 °C	741,1 mm QS	flüssig	Grunmach 1904		
-151,7 °C	0,24 mm QS	fest	Whytlaw Gray 1907	Gmelin S. 530	
-138,1 °C	2,80 mm QS	fest	Eucken und Donath 1926	Gmelin S. 530	
-136,2 °C	3,64 " "	"			
-117,1 °C	48,70 " "	"			
-113,7 °C	72,30 " "	"			
-113,0 °C	77,30 " "	"			
-111,8 °C	89,10 " "	"			
-144,1 °C	1 mm QS	fest			Burrell, Robertson 1915 u. 1916
-138,9 °C	4 " "	"			
-131,3 °C	7 " "	"			
-127,0 °C	15 " "	"			
-121,1 °C	30 " "	"			
-117,2 °C	50 " "	"			
-110,8 °C	100 " "	"			
-106,7 °C	150 " "	"			
-103,7 °C	200 " "	"			
-99,5 °C	300 " "	"			
-96,4 °C	400 " "	"			
-93,9 °C	500 " "	"			
-91,9 °C	600 " "	"			
-91,0 °C	650 " "	"			
-90,6 °C	666 " "	Tripelpkt.			

gestellt. Während die Werte der Tabelle für festes N₂O befriedigend übereinstimmen, sind die Abweichungen in den Angaben für flüssiges N₂O wesentlich größer. Zur Prüfung der verschiedenen Werte und zur Erlangung einer gemittelten Dampfspannungskurve wurden sämtliche

Werte in einem $\log p - \frac{1}{T}$ - Diagramm aufgetragen, Bekanntlich ist für diese Darstellung eine angenähert lineare Gesetzmäßigkeit zu erwarten, die in Bild 1 auch weitgehend vorhanden ist. Aus dieser Kurve wurden rückwärts

die Drücke und Temperaturen entnommen und in Bild 2 und 3 als Dampfspannungskurven aufgetragen.

b) Siedetemperatur, Tripelpunkt, kritischer Punkt

Neben den Dampfspannungsmessungen liegen noch verschiedene Siedepunktbestimmungen bei 760 mm QS vor, die alle in der Tabelle 2 zusammengefaßt sind. Wie schon „Gmelin“ ausführte, ist es nicht möglich, an Hand

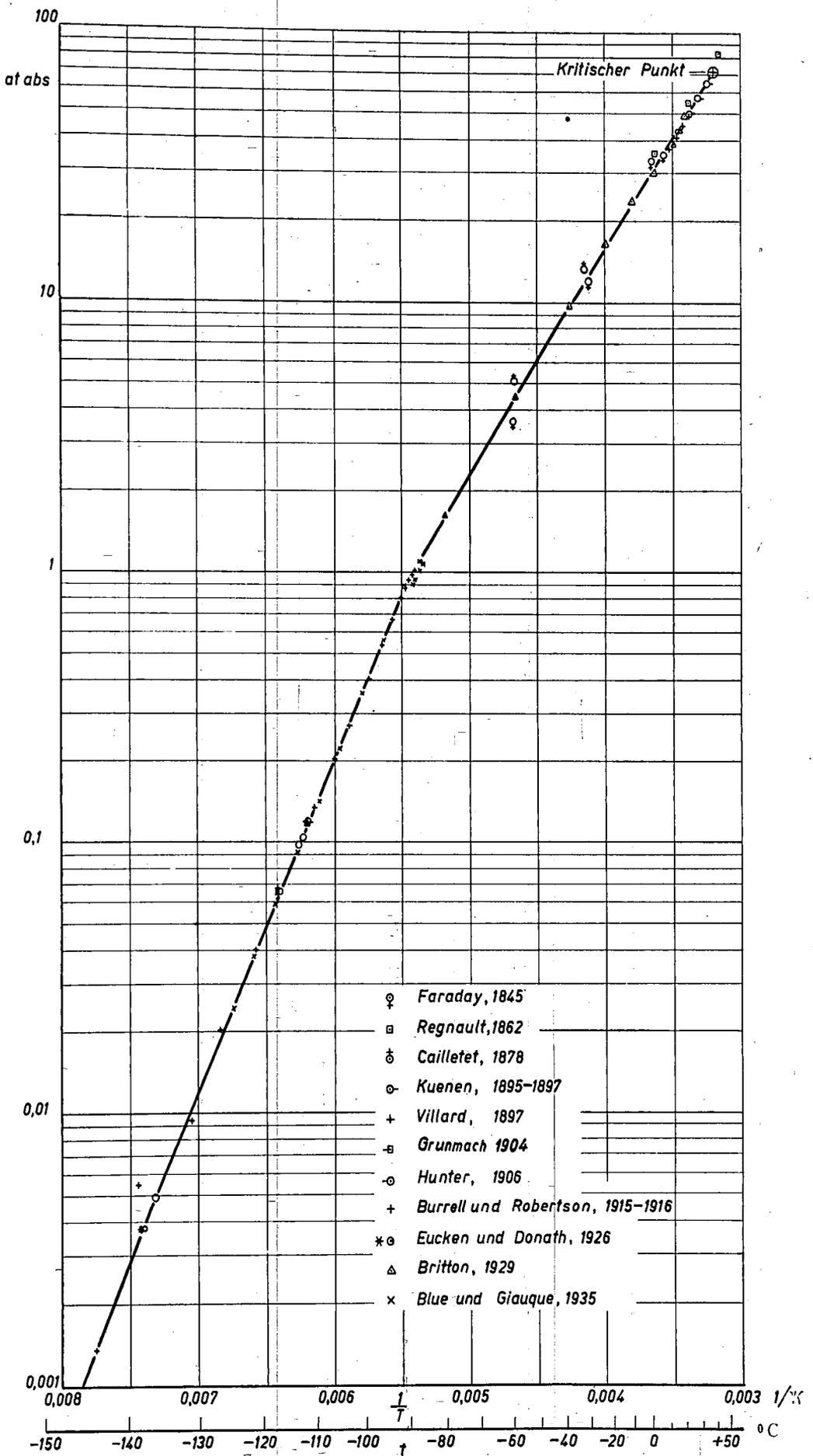


Bild 1. Dampfspannungen von festem und flüssigem N_2O

dieser Werte eine Aussage über den wahrscheinlich besten Wert zu machen. Eine Entscheidung läßt sich jedoch an Hand des Bildes 4 treffen, in dem das Gebiet von -87°C bis -92°C der Dampfspannungskurve dargestellt ist. Danach scheinen die neuesten Messungen von Blue und

Giauque, 1935, am zuverlässigsten zu sein. Dieser Kurve ist bei $p = 1,033$ atabs eine Siedetemperatur zu entnehmen von:

$$t_s = -88,57^{\circ}\text{C}.$$

Auch alle Angaben über den Tripelpunkt sind zusammengefaßt in Tabelle 3 angegeben. Trifft man wieder die Auswahl nach Bild 4, so ist auch hier der von Blue und Giauque angegebene Wert der beste:

$$t_{Tr} = -90,9^{\circ}\text{C}.$$

Der zugehörige Druck am Tripelpunkt ist:

$$p_{Tr} = 0,8956 \text{ atabs}.$$

Eine Messung des Schmelzpunktes liegt nicht vor. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Schmelzkurve in Nähe des Tripelpunktes senkrecht nach oben verläuft und damit der Schmelzpunkt gleich dem Tripelpunkt zu setzen ist. Über den weiteren Verlauf der Schmelzkurve läßt sich auf

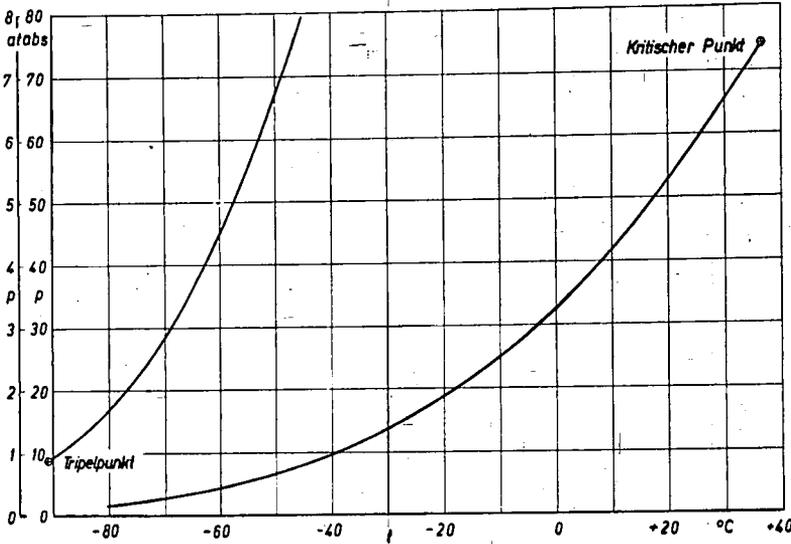


Bild 2. Dampfspannungen von flüssigem N_2O

Tabelle 2

Siedetemperaturen von N_2O (bei 760 mm QS)

t °C	Forscher, Jahr	Quelle
-87,2	Faraday 1845	L. B. HW I, II. EB. und Gmelin S. 531
-87,9	Regnault 1849	
-87,1	Hunter 1906	
-88,51	Blue u. Giauque 1935	
-88,8	Cailletet, Colardeau 1888	
-89,8	Ramsay, Shields 1893	
-89,5	Bergstrom 1922	
-88,7	Burrell, Robertson 1915	L. B. HW S. 359
-88,7	—	Henning
-89,5	—	I. C. T.

Tabelle 3

Tripelpunktstemperaturen von N_2O

t °C	T °K	Forscher, Jahr	Quelle
—	182,26	Blue u. Giauque 1935	Gmelin S. 531 und L. B. HW, III. EB.
—	182,4	Clusius, Hiller, Vaughen 1930	
-90,5	—	de Smedt, Keesam 1924	
-90,6	182,5	Burrell, Robertson 1915 u. 1916	
-90,8 bis -91,7	—	Biltz, Fischer, Wünnenberg 1930	
—	183,9	Hunter 1906	
-99	—	Wills 1874	L. B. HW, III. EB.
-101	—	Faraday 1845	
-102,3	—	Ramsay, Shields 1893	
-104	—	Menzel, Kretschmar 1929	
-90,8	—	—	Henning
-102,4	—	—	I. C. T.

Grund der Clausius-Clapeyronschen Gleichung aussagen,

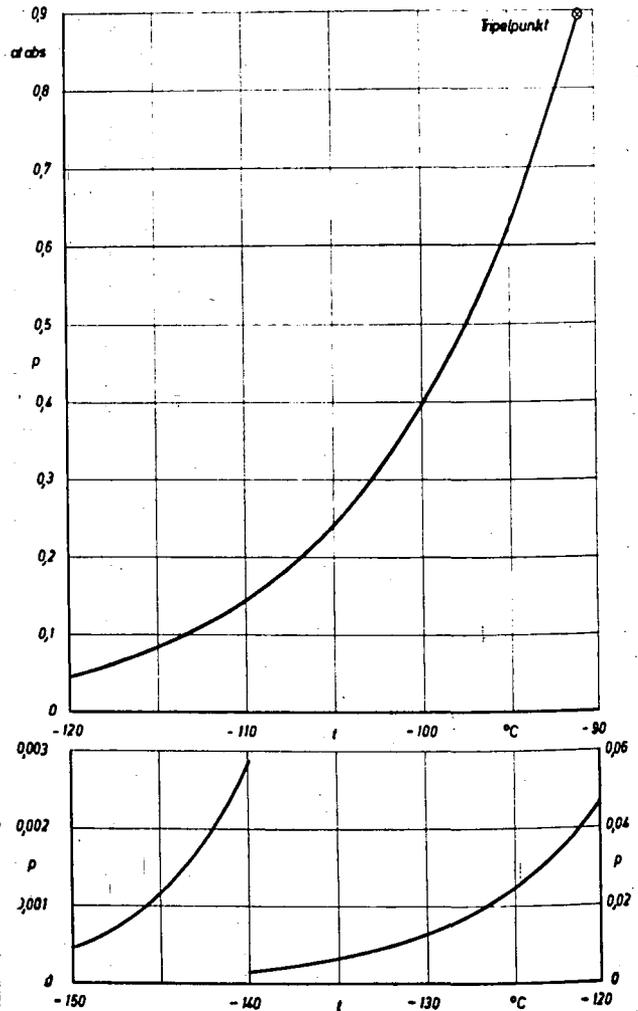


Bild 3. Dampfspannungen von festem N_2O

daß infolge der Volumenverkleinerung beim Erstarren der Differentialquotient $\frac{\partial P}{\partial T}$ positiv verläuft, d. h. daß die Schmelztemperatur mit steigendem Druck zunimmt.

Als sehr wichtige Größen sind Druck, Temperatur und Wichte im kritischen Zustande anzusehen, da diese für viele allgemeine Beziehungen zwischen physikalischen Stoffgrößen benötigt werden. Die Zusammenstellung in Tabelle 4 zeigt allerdings beträchtliche Differenzen. Wie schon in einer kritischen Sichtung von Pickering angegeben ist, scheinen die Werte von Cardoso und Arni am zuverlässigsten zu sein. Sie ordnen sich auch gut in die Kurve von Bild 1 ein. Es ist demnach:

$$t_{\text{krit}} = +36,5^\circ\text{C},$$

$$p_{\text{krit}} = 74,05 \text{ atabs techn.}$$

Die kritische Wichte ist am zuverlässigsten dem Bild 5 zu entnehmen, indem die Gerade nach Mathias die Grenzkurven der Wichte schneidet bei

$$\gamma_{\text{krit}} = 0,45 \text{ kg/l.}$$

c) Wichte, Kompressibilität

Umfangreiche Messungen liegen auch vor über die Wichte im Sättigungszustand. Diese sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Sie erlauben, die Wichte im flüssigen

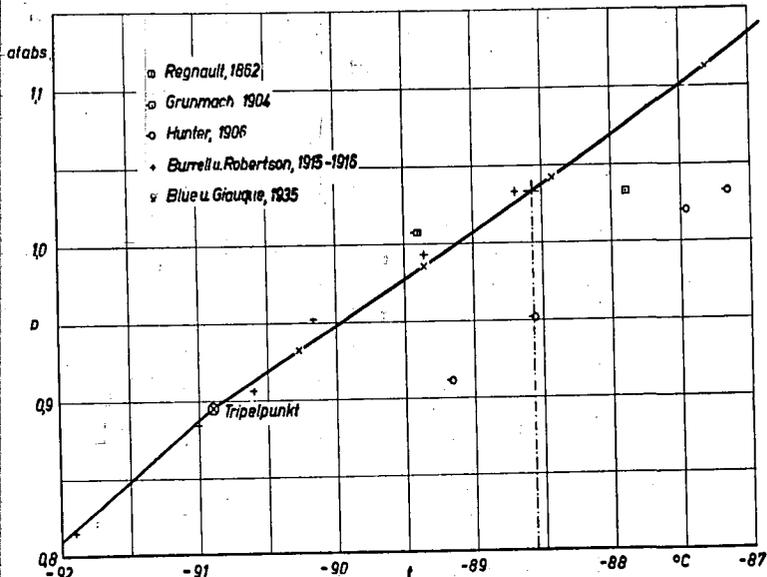


Bild 4. Dampfspannungen in Nähe des Tripelpunktes

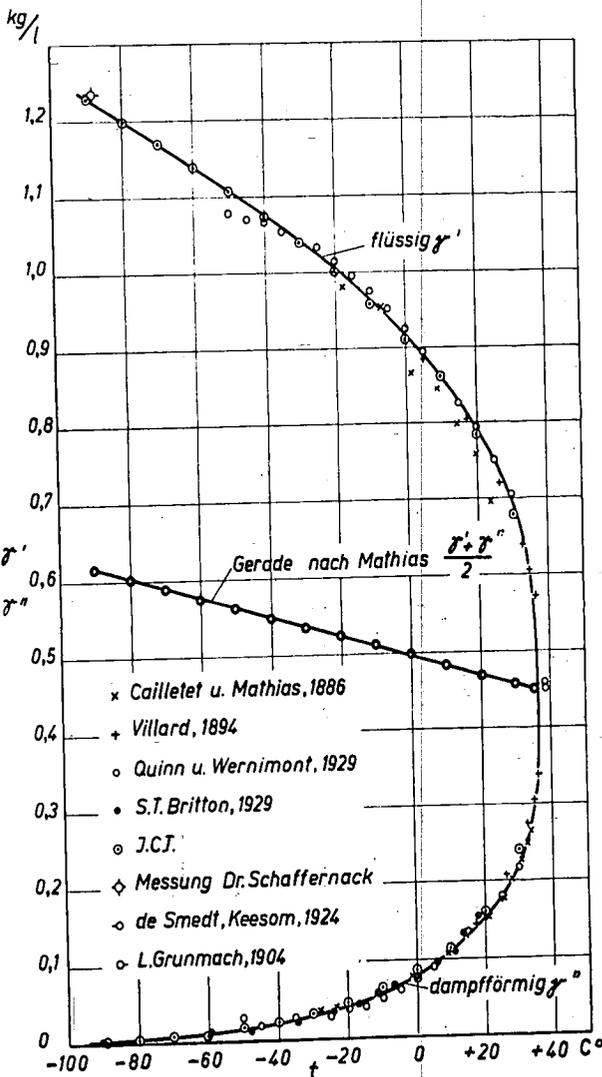


Bild 5. Wichte von N_2O im Sättigungszustand

Zustand γ' und im dampfförmigen Zustand γ'' bei Sättigung sehr genau vom Schmelzpunkt bis zum kritischen Punkt zu bestimmen. In Bild 5 sind alle Werte eingetragen und ist eine Kurve durch die am zuverlässigsten erscheinenden Punkte eingezeichnet. Zur Prüfung der Richtigkeit wurden die mittleren Wichten $\frac{\gamma' + \gamma''}{2}$ in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen, die sehr genau auf einer Geraden liegen. Dieses ist eine hervorragende Bestätigung der von Mathias angegebenen „Regel der geraden Mittellinie“ und damit indirekt eine Bestätigung der vorliegenden Sättigungskurve. Für die Wichte γ'' des gesättigten Dampfes wurde wegen des ungünstigen Maßstabes eine weitere Auftragung in Bild 6 vorgenommen.

Tabelle 4
Kritische Daten von N_2O

t_K °C	p_K Atm	d_K kg/l	Forscher, Jahr	Quelle
+ 35,4	75,0	—	Britton 1929	L. B. III. E. B. S. 277
+ 38,8	—	0,459	Quinn u. Wernimont 1929	L. B. II. E. B. S. 203
+ 36,5	71,7	0,45	Pickering 1924	L. B. I. E. B. S. 159
+ 35,4	75,0	—	Dewar 1884	L. B. HW. S. 262 Tab. 73
—	—	0,41	Cailletet u. Mathias 1886	
+ 38,8	77,5	0,454	Villard 1894	
+ 36,5	71,65	—	Cardoso u. Arni 1912	
+ 36,5	71,6	0,46	—	Henning
+ 36,4	73,07	—	Janssen 1878	Gmelin S. 528
+ 36,1	71,9	—	Kuenen 1895	
+ 36,5	71,7	0,451	—	I. C. T.

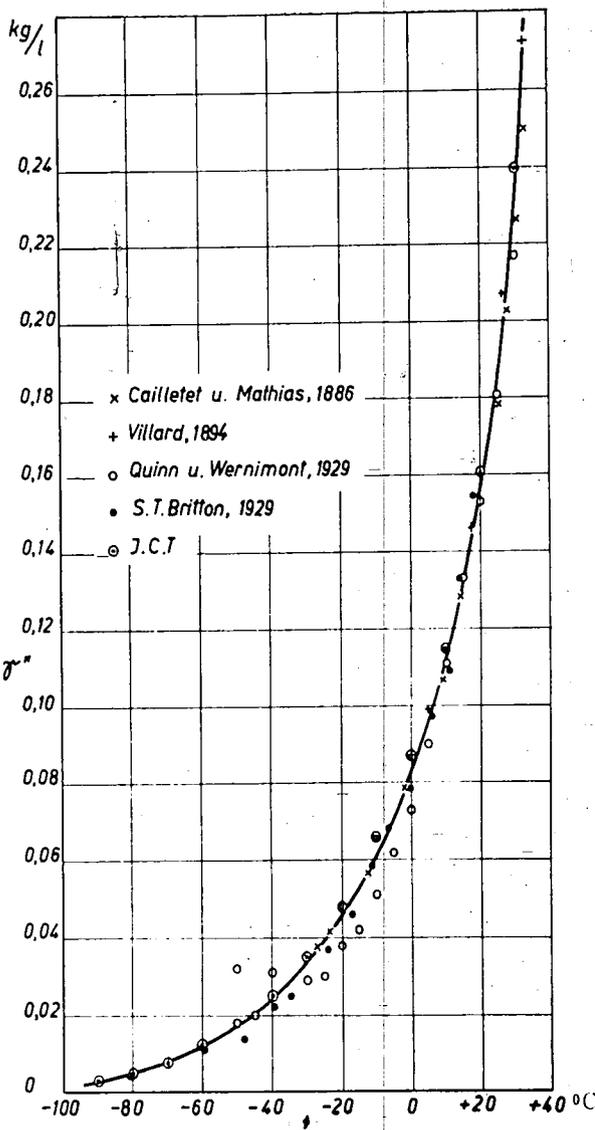


Bild 6. Wichte von N₂O im gesättigten dampfförmigen Zustand

Tabelle 5
Wichte von N₂O im Sättigungszustand

t °C	γ' kg/l	γ'' kg/l	Forscher, Jahr	Quelle
-28,0	—	0,0378	Cailletet u. Mathias 1886	L. B. HW S. 282
-23,5	—	0,0413		
-20,6	1,0003	—		
-18,0	0,9810	—		
-12,2	—	0,0566		
-7,3	0,953	—		
-1,5	—	0,0785		
+1,4	0,866	—		
+9,0	0,846	—		
+9,2	—	0,1066		
+14,1	—	0,1284		
+14,5	0,800	—		
+19,8	0,758	—		
+20,7	—	0,1532		
+23,7	0,698	—		
+25,4	—	0,1782		
+28,0	—	0,2023		
+30,7	—	0,2266		
+32,8	—	0,2500		
+33,9	—	0,2650		

t °C	γ' kg/l	γ'' kg/l	Forscher, Jahr	Quelle	
0	0,9105	0,0870	Villard	1894	L. B. HW S. 282
+5	0,885	0,0990			
+10	0,856	0,1140			
+17,5	0,804	0,1460			
+26,5	0,720	0,2070			
+32,9	0,640	0,2740			
+34,9	0,605	0,3050			
+36,3	0,572	0,3380			
-80,5	—	0,0045	St. Britton	1929	L. B. I. EB. S. 280
-59,5	—	0,0110			
-48,0	—	0,0140			
-39,5	—	0,0220			
-34,5	—	0,0250			
-24,0	—	0,0370			
-17,0	—	0,0460			
-11,2	—	0,0585			
-6,5	—	0,0681			
0	—	0,0786			
+6,0	—	0,0971			
+11,0	—	0,1091			
+14,0	—	0,1331			
+18,0	—	0,1546			
+35,4	—	Kr. Pkt.			
-50	1,079	0,032	Quinn und Wernimont	1929	L. B. II. EB. S. 208
-45	1,071	0,020			
-40	1,067	0,031			
-35	1,053	0,028			
-35	1,044	0,029			
-25	1,033	0,030			
-20	1,013	0,038			
-15	0,995	0,042			
-10	0,975	0,051			
-5	0,952	0,062			
0	0,925	0,073			
+5	0,894	0,090			
+10	0,861	0,111			
+15	0,826	0,133			
+20	0,793	0,153			
+25	0,750	0,181			
+30	0,704	0,217			
+38,8	0,451	0,459			
-89,5	1,226	0,0031	I. C. T. III	S. 229	
-80	1,199	0,0050			
-70	1,170	0,0080			
-60	1,140	0,0122			
-50	1,108	0,0180			
-40	1,075	0,0250			
-30	1,040	0,0350			
-20	1,001	0,0480			
-10	0,958	0,0660			
0	0,910	0,0870			
+10	0,856	0,1150			
+20	0,784	0,1610			
+30	0,679	0,2400			
+36,5	0,451	0,4510			

Über die Wichte von festem N₂O liegen nur zwei voneinander abweichende Werte 1,606 bei -195°C und 1,55 (wahrscheinlich am Schmelzpunkt) vor.⁶⁾ Nach einer Messung von Dr. Schaffernack (Ammoniaklaboratorium Oppau) ist γ = 1,53 kg/l in der Nähe des Schmelzpunktes. Es ist anzunehmen, daß die Wichte des festen N₂O auch stark von eingeschlossenen Gasblasen beeinflusst wird. Die Temperaturabhängigkeit des γ von festem N₂O ist aus diesen wenigen Werten nicht zu ermitteln.

Die Wichte im überhitzten bzw. gasförmigen Zustand kann aus der Gasgleichung errechnet werden unter Be-

⁶⁾ Biltz, Fischer und Wünnenberg 1930 und de Smedt und Kusom 1924, Gmelin S. 525.

rücksichtigung der Kompressibilität (die im kritischen Gebiet sehr erheblich von Einfluß ist!). — Britton⁷⁾ hat ein Diagramm der $p \cdot v$ -Werte bei 20,45 und 67°C von 12 bis 50 Atm. angegeben. Da es nun auf den ersten Blick hin

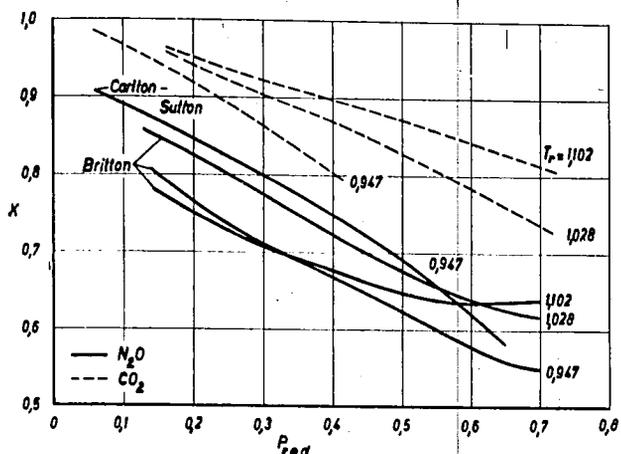


Bild 7. Kompressibilität von N_2O

$$p_{\text{red}} = \frac{p}{p_{\text{krit}}}; \quad T_{\text{red}} = \frac{T}{T_{\text{krit}}}$$

unwahrscheinlich war, daß sich die 45°- und 67°-Isothermen überschneiden, wurden diese Werte überprüft. Nach dem Gesetz der übereinstimmenden Zustände müßten die Kompressibilitäten von N_2O mit denen der sehr ähnlichen CO_2 übereinstimmen, sofern man bei gleichen reduzierten Drücken und reduzierten Temperaturen vergleicht. Dies ist in Bild 7 durchgeführt. Die Abweichung ist sehr groß. Nun wurde in der Originalarbeit festgestellt, daß die Wichtemessungen, die als Längenänderung einer mit einem Aluminiumstück beschwerten Feder (Verfahren von Mc Bain und Bakr) ermittelt wurden, als nicht sehr exakt anzusprechen sind. Es wurde daher abgelehnt, diese $p \cdot v$ -Werte in vorliegender Arbeit zu verwenden. Von Carlton-Sutton und Wyn Williams⁸⁾ liegen $p \cdot v$ -Messungen bei 20°C von 10 bis 46 Atm. vor. Auch diese sind in Bild 7 eingetragen und zeigen wiederum starke Abweichung sowohl von Britton wie von CO_2 . — Über die Kompressibilität von N_2O kann also nur durch neue Messungen eine Klärung erfolgen, wie dies im Teil D des Aufsatzes mitgeteilt ist.

d) Verdampfungswärme, Schmelzwärme, Sublimationswärme

Über die Verdampfungswärme liegen wenige Angaben vor (Tabelle 6). Eine direkte kalorimetrische Bestimmung ist nur die von P. A. Favre und von Blue und Giaque am Schmelzpunkt. Die anderen Werte sind indirekt errechnet nach der Clausius-Clapeyronschen Gleichung, der Troutonschen Regel und anderen Beziehungen. — Die Clausius-Clapeyronsche Gleichung setzt nun allerdings sehr genaue Bestimmungen der Dampfspannungen und

⁷⁾ G. T. Britton „Transactions of the Faraday Society, Vol. 25, 1929, S. 520.

⁸⁾ Carlton-Sutton und Wyn Williams, Proc. Phys. Soc. 48, 1936, S. 201.

Tabelle 6

Verdampfungs- u. Sublimationswärme von N_2O

t °C	r	Forscher, Jahr	Quelle
Nähe Schmelzpunkt	4444 cal/mol	P. A. Favre 1874	Gmelin S. 531
184,59 °K	89,92 kcal/kg	Blue u. Giaque 1935	L. B. III. E. B. S. 2706
135,5 °K	132,2 kcal/kg	Eucken u. Donath 1926	L. B. I. E. B. S. 804
160,0 °K	129,4 kcal/kg	Eucken u. Donath 1926	
-20 °C	66,9 kcal/kg	Cailletet und Mathias 1886	L. B. HW. S. 1478
0 °C	59,7 kcal/kg		
+20 °C	43,7 kcal/kg		
+35 °C	13,5 kcal/kg		
-88,7 °C	90 kcal/kg	—	Henning
-120 °C	5632 cal/mol	Burrell und Robertson 1915	L. B. I. E. B. S. 862
fest r = $5,809 + 2,79 \cdot 10^{-3} \cdot T - 2,35 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$		Kelley 1935	L. B. III. E. B. S. 2721
flüssig r = $5,911 - 0,01062 \cdot T$			

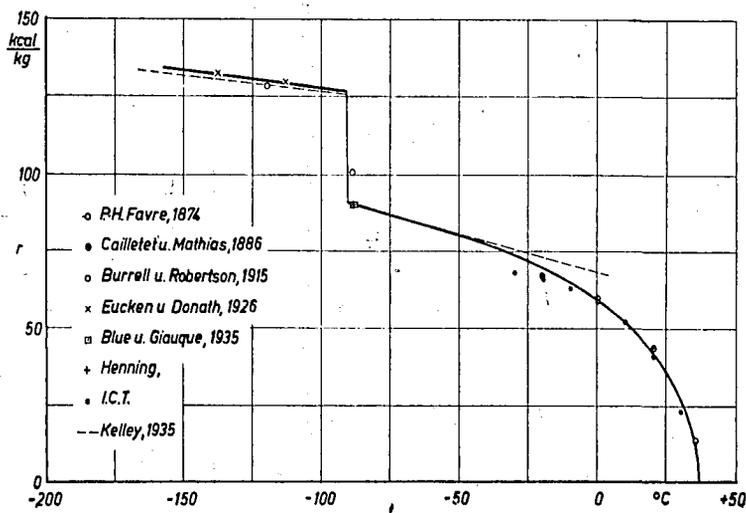


Bild 8. Verdampfungs- und Sublimationswärme von N_2O

der Dampfdichten voraus. Die in Bild 1 und 6 eingetragenen Meßwerte genügen dieser Genauigkeitsanforderung bei weitem nicht, da ja z. B. von den Dampfspannungen der erste Differentialquotient benötigt wird. Vor allem die Dampfdichte γ'' des voll gesättigten Dampfes wäre hierfür noch wesentlich genauer zu ermitteln. Wie aus Bild 6 zu ersehen ist, sind im Bereich von -50 bis 0°C erhebliche Streuungen der verschiedenen Forscher vorhanden, die sich in der Berechnung von r sehr stark auswirken. Wenigstens müßte der vom Verfasser versuchte Weg, die Verdampfungswärme nach Clausius-Clapeyron auf Grund der vorliegenden gesichteten Werte zu errechnen, als viel zu unsicher aufgegeben werden. Es wurden daher in Bild 8 die Werte der Tabelle 6 eingetragen und eine Kurve

nach freiem Ermessen gezogen. — Die in der Dampftabelle enthaltenen Werte sind demnach ziemlich unsicher.

Die Schmelzwärme wurde bisher nur von Blue und Giauque bestimmt zu:

$$r_{\text{Schm}} = 35,5 \text{ kcal/kg.}$$

Die Sublimationswärme ist vor allem durch die beiden kalorimetrisch bestimmten Punkte von Eucken und Donath festgelegt (siehe Bild 8). Alle übrigen Angaben

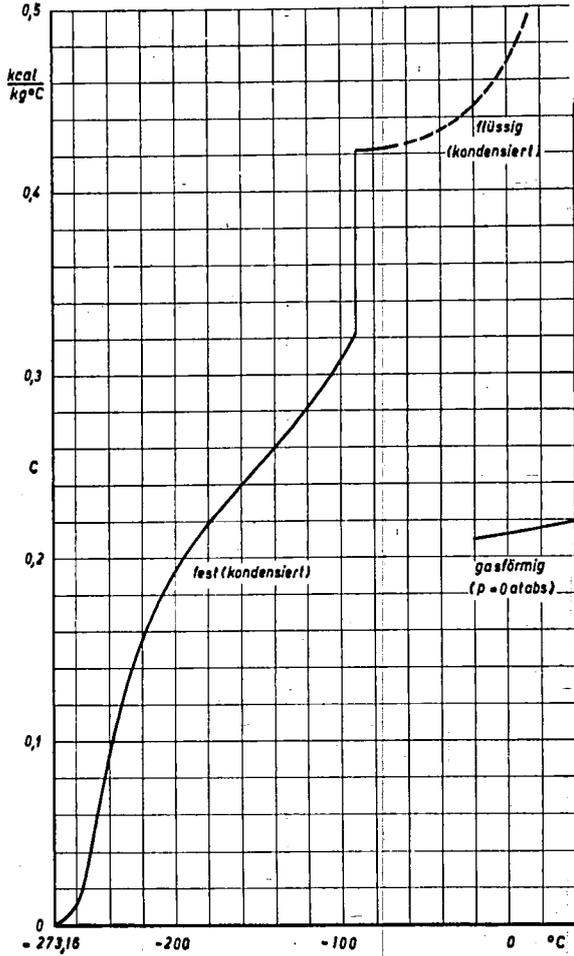


Bild 9. Spezifische Wärme von N₂O

Tabelle 7

Spezifische Wärme, Entropie und Enthalpie von N₂O

t °C	c _{p0} kcal/kg °C	Δ s _{ideal} kcal/kg °C	Δ i ₀ kcal/kg °C
0	0,203	0,000	0,000
25	0,210	0,041	5,18
100	0,228	0,088	22,2 ₄
200	0,245	0,146	45,9 ₈
300	0,259	0,194	71,2 ₂
400	0,270	0,236 ₅	97,6 ₀
500	0,281	0,274	125,2
600	0,289	0,310	153,2
700	0,297	0,341	182,9
800	0,302	0,370	212,8
900	0,306	0,397 ₅	243,5
1000	0,310	0,422	274,2

Weitere Werte siehe Justi⁹⁾, S. 147

Tabelle 8
Wärmeleitzahlen von N₂O

t °C	λ cal/cm sec °C	Forscher, Jahr	Quelle
0 100	0,0000350 0,0000506	interpolierte Werte	Winkelmann 1875
ca. 10	0,0000372		
0	0,0000361	Kannuliuk u. Martin	Gmelin S. 536
0	0,0000364	Dickins	
11,9	0,00003847	Dickins	
0	0,000038	Ibbs u. Hirst	
0	0,0000374	Gregory u. Archer	
8,661	0,00003891	Gregory u. Archer	
10,699	0,00003924	Gregory u. Archer	
12,744	0,00003960	Gregory u. Archer	
0	0,00003530	Weber	
0	0,00003515	relativ zu Luft 0°C λ = 0,0204	
-71,8	0,0000271		
t = -75 -50 -25 0 °C	λ = 0,0098 0,0109 0,0120 0,0130 kcal/mh °C	Henning	

Tabelle 9

Dynamische Zähigkeit von N₂O

t °C	η · 10 ⁷ Poise	Forscher, Jahr	Quelle
0	1366	Smith	1922
15	1441	Smith	1922
23	1449	Ishida	1923
100	1845	Smith	1922
-21,5	1249	v. Obermayer	1875
0	1408	Graham	1846
0	1362	H. Vogel	1914
20	1600	Graham	1846
25,0	1498	Fischer	1907
53,6	1606	v. Obermayer	1875
75,8	1739	Fischer	1907
100,3	1829	v. Obermayer	1875
141,6	1970	Fischer	1907
183,1	2161	Fischer	1907
224,4	2348	Fischer	1907
289,9	2610	Fischer	1907
413,6	3073	Fischer	1907
26,9	1488	Trautz u. Kurz	1931
76,9	1723		
126,9	1943		
176,9	2158		
226,9	2355		
276,9	2555		
0	1370	—	Henning
20	1460		
50	1600		
100	1830		
150	2040		
200	2250		
250	2460		
300	2650		

sind indirekte Bestimmungen aus Dampfdruckmessungen oder Wärmehaltsbestimmungen, die in der Bewertung gegenüber den direkten Messungen zurücktreten.

e) Spezifische Wärme

Die spezifische Wärme vieler Stoffe ist von Justi⁹⁾ sehr genau bearbeitet worden, so daß seinem Werk zuverlässige Daten zu entnehmen sind.

Für den kondensierten (festen und flüssigen) Zustand lagen die abweichenden Messungen von Eucken und Hauck (1926) sowie von Clausius, Hiller und Vaughn (1929) vor, die durch die neueren sorgfältigen Messungen von Blue und Giaque (1935) zu ersetzen sind.

Die spezifische Wärme im gasförmigen Zustand wurde von Kassel aus den spektroskopischen Messungen von Plyler und Barker errechnet. In guter Übereinstimmung hiermit liegen die Messungen von Eucken und v. Lüde, sowie Eucken und Mücke. Aus allen diesen Quellen hat Justi⁹⁾ die spezifische Wärme von 0 bis 3000° C errechnet, wie sie in der Tabelle 7 wiedergegeben ist. In Bild 9 ist die spezifische Wärme im festen, flüssigen und gasförmigen Zustand bei tiefen Temperaturen aufgetragen. Da später die Aufstellung von genauen Mollierdiagrammen beabsichtigt ist, sind in der Tabelle auch die von Justi berechneten Entropiedifferenzen und Enthalpiedifferenzen im idealen Gaszustand zwischen 0 und t° C mit übernommen worden. Im gleichen Zusammenhang interessiert auch der nach Blue und Giaque errechnete Wert der Standardentropie bei p = 1 Atm und T = 298,1° K (760 mm QS, 15° C) von

$$S = 51,44 \text{ kcal/kmol}^\circ$$

Die Zustandssummenberechnung ist im einzelnen bei Justi nachzusehen.

Für das Verhältnis C_p/C_v gibt Shilling (1927, Gmelin S. 535) einige Werte an:

t	C_p/C_v
14,5	1,3046
100	1,2753
200	1,2529
300	1,2347
400	1,2209
500	1,2095
600	1,2007

f) Wärmeleitvermögen

Das Wärmeleitvermögen im gasförmigen Zustand ist, entsprechend den besonderen Schwierigkeiten bei solchen Messungen, nur in Nähe der Zimmertemperatur bestimmt worden (siehe Tabelle 8). Nur die

⁹⁾ Justi: „Spezifische Wärme, Enthalpie, Entropie. Dissoziation technischer Gase“ 1938.

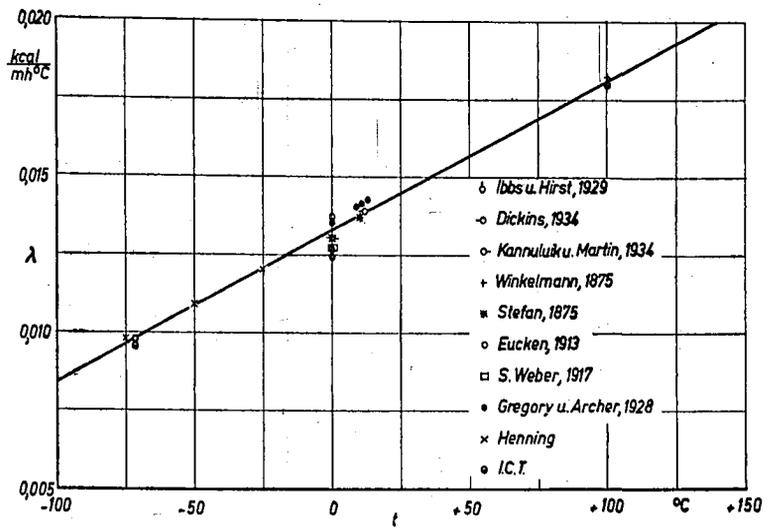


Bild 10. Wärmeleitvermögen von gasförmigem N₂O (p=1 atms)

Messungen von Winkelmann bei +100° C und von Eucken bei -71,8° C ermöglichen den Temperaturverlauf des Bildes 10 einzuzeichnen. Die Punkte aus Henning sowie aus den I. C. T. sind ohne eine Angabe über ihre Herkunft.

Bei höheren Drücken, im Sättigungszustand oder im verflüssigten Zustande sind keinerlei Angaben vorhanden.

g) Dynamische Zähigkeit

Die Zähigkeit im gasförmigen Zustand ist in dem weiten Temperaturbereich von -22 bis +413° C durch mehrere, gut übereinstimmende Meßwerte bestens bekannt. Die Originalwerte sind in Tabelle 9 angegeben, die in technische Einheiten umgerechneten Werte ergeben die Kurve in Bild 11.

Auch hier ist weder bei höherem Druck noch im Sättigungsgebiet oder im flüssigen Zustand irgendein Wert bekannt.

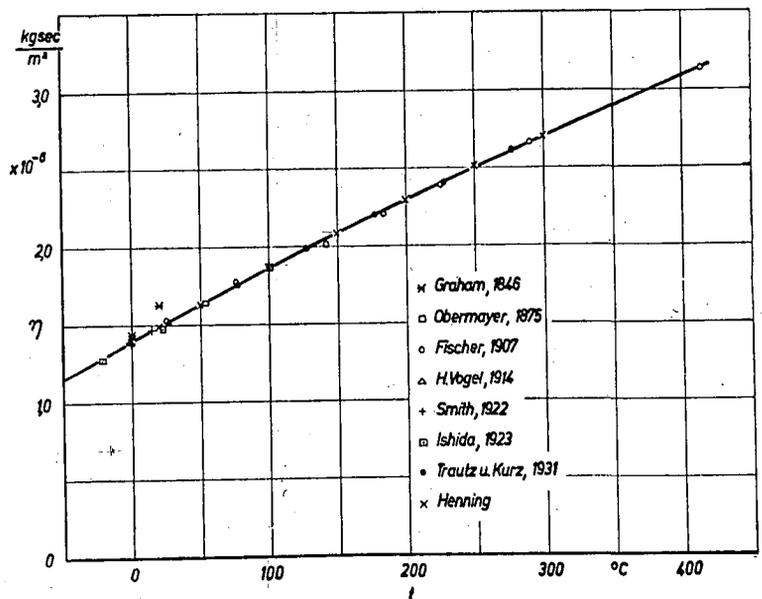


Bild 11. Dynamische Zähigkeit von gasförmigem N₂O (p=1 atms)

B. Zusammenstellung der Stoffgrößen von N₂O

Nach der vorhergehenden Bearbeitung können die folgenden Werte als die zuverlässigsten Angaben über N₂O mitgeteilt werden:

Molekulargewicht:	M	= 44,016
Normkubikmetergewicht:	$\gamma_{0,760}$	= 1,9780 kg/Nm ³
Siedepunkt:	t_S	= -88,57 °C
Schmelzpunkt:	$t_{Schm\ 760}$	= -90,9 °C
Tripelpunkt:	t_{Tr}	= -90,9 °C;
	p_{Tr}	= 0,8956 atabs
Kritischer Punkt:	t_{krit}	= +36,5 °C;
	p_{krit}	= 74,05 atabs techn.;
	v_{krit}	= 0,45 kg/l
Schmelzwärme:	r_{Schm}	= 35,5 kcal/kg
Standardentropie:	$S_{1/298,16}$	= 51,44 kcal/kmol ⁰

Für die spezifische Wärme c_p (bei 0 atabs), das Wärmeleitvermögen λ und die dynamische Zähigkeit η (bei ∞ 1 atabs) im gasförmigen Zustand geltende folgende Werte (Tabelle 10):

Tabelle 10

t °C	e_{p_0} kcal/kg °C	λ kcal/mh °C	$\eta \cdot 10^6$ kgsec/m ²
-100	—	0,0084	0,91
- 50	—	0,0109	1,16
0	0,213	0,0133	1,39
+ 50	0,221	0,0157	1,63
+100	0,228	0,0180	1,87
150	0,236	0,0205	2,08
200	0,245	—	2,29
250	0,252	—	2,50
300	0,259	—	2,70
350	0,265	—	2,90
400	0,270	—	3,09
450	0,276	—	—
500	0,281	—	—

Die Dampfspannungen, Wichten, spezifischen Volumina und Verdampfungswärmen sind vom Schmelzpunkt bis zum kritischen Punkt in der folgenden Dampftabelle (Tabelle 11) zusammengefaßt. Die Enthalpien und Entropien sind der Bearbeitung im Teil C entnommen.

Tabelle 11

Dampftabelle von Stickoxydul

t	T	p	γ'	γ''	v'	v''	r	i'	i''	s'	s''
°C	°K	atabs techn.	kg/l	kg/l	l/kg	l/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg grd	kcal/kg grd
-90,9	182,26	0,896	1,227	0,0028	0,8147	357,0	90,8	0	90,8	0	0,498
-80	193,16	1,700	1,199	0,0050	0,8340	200,0	88,0	4,7	92,7	0,025	0,480
-70	203,16	2,800	1,170	0,0080	0,8546	125,0	85,3	9,0	94,3	0,045	0,465
-60	213,16	4,480	1,140	0,0119	0,8772	84,02	82,7	13,3	96,0	0,066	0,454
-50	223,16	6,750	1,108	0,0173	0,9023	57,80	80,0	—	—	—	—
-40	233,16	9,800	1,075	0,0246	0,9300	40,65	77,0	—	—	—	—
-30	243,16	13,800	1,042	0,0337	0,9597	29,68	73,5	—	—	—	—
-20	253,16	18,850	1,005	0,0454	0,9950	22,03	69,6	—	—	—	—
-10	263,16	25,000	0,966	0,0608	1,0351	16,45	64,9	—	—	—	—
0	273,16	32,500	0,917	0,0826	1,0902	12,11	58,7	—	—	—	—
+10	283,16	41,800	0,857	0,1123	1,1665	8,901	51,6	—	—	—	—
+20	293,16	52,800	0,788	0,1580	1,2695	6,328	42,2	—	—	—	—
+30	303,16	65,900	0,694	0,2320	1,4410	4,310	26,6	—	—	—	—
+36,5	309,66	74,050	0,450	0,4500	2,2220	2,222	0	—	—	—	—

C. t-s-Diagramm von Stickoxydul im Tripelgebiet

a) Berechnung der Enthalpie

Als Grundlage wird das c_p -t-Diagramm Bild 9 benutzt, in dem die spezifische Wärme im kondensierten Zustand längs der Grenzkurven aufgetragen ist. Die Enthalpie berechnet sich nach folgender Beziehung auf Grund des ersten Hauptsatzes:

$$di = c_p \cdot dT - A \left[T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \cdot dp \quad (1)$$

Als Bezugspunkt wird der Tripelpunkt mit $T = 182,26^\circ \text{K}$ und $p = 0,896$ at abs festgesetzt, wo also $i_0 = 0$ ist. Die Integration der Gleichung liefert also:

$$i = \int_{T_0=182,26}^T c_p \cdot dT - A \cdot \int_{p_0=0,896}^p \left[T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \cdot dp \quad (2)$$

Es sei vorerst das zweite Glied, das die Schubarbeit berücksichtigt, vernachlässigt und der Wärmehalt allein aus der spezifischen Wärme berechnet.

Für den flüssigen Zustand ist c_p längs der Grenzkurve praktisch unabhängig vom Druck. Im Bereich von $182,26^\circ \text{K}$ bis $213,16^\circ \text{K}$ kann c_p als lineare Funktion von T angesehen werden. Da c_p auch nur sehr wenig ansteigt, kann man einen Mittelwert $c_p = 0,4233$ kcal/kg °C einsetzen und erhält

$$\Delta i = 0,4233 (T - 182,26) \quad (3)$$

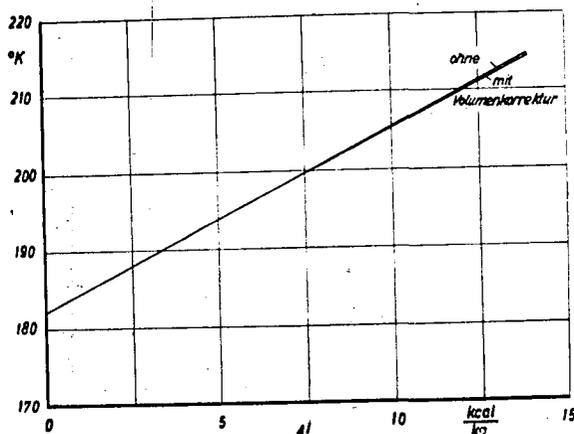


Bild 12. Zusammenhang zwischen Temperatur und Enthalpiezunahme längs der Flüssigkeitsgrenzkurve

Die so berechneten Enthalpien sind in Bild 12 als Kurve dargestellt. Es soll jetzt noch die durch die Wärmeausdehnung zu erwartende Korrektur berechnet werden. In dem betrachteten kleinen Temperaturbereich von 182,26 bis 213,16° K seien die Differentiale durch Differenzen ersetzt und die Grenzkurve als Isobare angesehen. Aus der Dampftabelle ist dann

$$-A \cdot \int_{p_0=0,8956}^p \left[T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \cdot dp$$

$$-A \cdot \left[T \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta T} \right) - v \right]_{x=0} \cdot \frac{4,48}{0,8956} \cdot \frac{\Delta p}{M}$$

$$= -\frac{1}{427} \left[197,7 \cdot \frac{(0,8772-0,8147)}{(213,16-182,26)} - 0,845 \right] \cdot 35840 \cdot 10^{-3}$$

$$= -0,0374 \text{ kcal/kg.}$$

Die Berücksichtigung dieser geringen Korrektur ergibt die in Bild 12 eingezeichnete Linie, aus der gerade Zahlenwerte für Δi für den Temperaturbereich zu entnehmen sind.

Im festen kondensierten Zustand ist die spezifische Wärme sehr stark temperaturabhängig. Im Bereich von $T = 153,16^\circ\text{K}$ bis $182,26^\circ\text{K}$ ist c_p nach folgender Temperaturfunktion berechenbar, die aus Bild 9 entwickelt wurde:

$$c = 0,322 - 0,001856(182,26 - T) + 0,00001535(182,26 - T)^2 \quad (4)$$

Die Gleichung (4) gibt c mit einer für vorliegenden Zweck genügenden Genauigkeit wieder. Durch Einsetzen von Gl (4) in Gl (2) und Integration erhält man:

$$\Delta i = 0,322 \cdot (182,26 - T) - 0,000928(182,26 - T) + 0,000005116 \cdot (182,26 - T)^2 \quad (5)$$

wobei Δi die Enthalpieabnahme von $182,26^\circ\text{K}$ aus zu niederen Temperaturen hin bedeuten. Diese Gleichung ist in Bild 13 als Kurve dargestellt. Eine Volumenkorrektur wurde für den festen Stoff nicht vorgenommen.

Die Enthalpie an der Dampfgrenzkurve i'' ist aus den Verdampfungs- bzw. den Sublimationswärmern (siehe Dampftabelle) zu erhalten. Für die Enthalpie im Sättigungsgebiet i_x gelten die einfachen linearen Gesetzmäßigkeiten:

$$i_x = i''' + x \cdot r \quad (6)$$

$$i_x = i'' + x \cdot r$$

Die Dampf- und Feststoffgehalte x sind also durch lineare Einteilung zwischen den Grenzkurven zu erhalten.

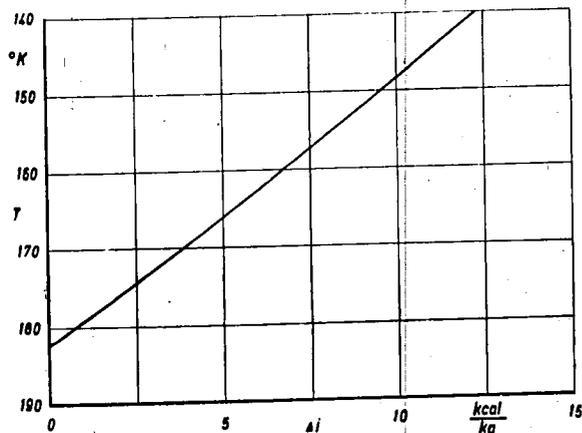


Bild 13. Zusammenhang zwischen Temperatur und Enthalpieabnahme längs der festen Grenzkurve

Im Flüssigkeitsgebiet sind die Isenthalpen fast waagrechte Linien. Nach Abschätzung aus dem Verhalten der sehr ähnlichen Kohlensäure ist die Inversionstemperatur um etwa 40°C höher als die Tripeltemperatur zu schätzen. Die Flüssigkeitsisenthalpen im vorliegenden Diagramm sind daher noch mit positivem Drosseloeffekt in willkürlicher Abschätzung der Neigung eingezeichnet.

Im Überhitzungsgebiet sind die Isenthalpen nicht berechenbar, da keine c_p -Werte verfügbar sind; ebenso fehlen bisher genaue Volumenmessungen oder Drosselversuche in diesem Gebiet.

b) Berechnung der Entropie

Die Entropie läßt sich auf Grund der folgenden allgemein gültigen thermodynamischen Beziehung errechnen:

$$ds = \frac{c_p}{T} \cdot dt - A \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dp \quad (7)$$

Es wird wieder im Tripelpunkt $s = 0$ gesetzt. Die Integration liefert:

$$s = \int_{T_0=182,26}^T \frac{c_p}{T} \cdot dT - A \int_{p_0=0,896}^p \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dp \quad (8)$$

Die Volumenkorrektur des zweiten Gliedes kann im vorliegenden kleinen Temperaturgebiet wieder vernachlässigt werden, da die Kompressibilität des festen Stickoxyduls geringfügig ist gegenüber der des flüssigen Stoffes. Auch kann wieder mit Differenzen anstelle von Differentialen gerechnet werden.

Nach der c_p -Kurve Bild 9 ergibt sich folgende Tabelle im flüssigen Gebiet:

$T =$	182,26	193,16	203,16	213,16° K
$c =$	0,422	0,423	0,424	0,425 kcal/kg° C
$c =$	0,002313	0,002188	0,002086	0,001994
T				

Die Entropiezunahme Δs von der Temperatur $182,26^\circ\text{K}$ bis $T^\circ\text{K}$ ist dann angenähert

$$\Delta s = (T - 182,26) \left(\frac{c}{T} \right)_{182,26+T} \quad (9)$$

Man erhält die Entropiezunahmen Δs

von $182,26^\circ\text{K}$ bis $193,16^\circ\text{K}$	$\Delta s = 0,0245$ Clausius/kg
„ $182,26^\circ\text{K}$ bis $203,16^\circ\text{K}$	$\Delta s = 0,0460$ Clausius/kg
„ $182,26^\circ\text{K}$ bis $213,16^\circ\text{K}$	$\Delta s = 0,0665$ Clausius/kg.

Damit ist die Flüssigkeitsgrenzkurve im T-s-Diagramm zu zeichnen.

Für die Grenzkurve im festen Gebiet wird analog vorgegangen:

$T =$	182,26	173,16	163,16	153,16
$c =$	0,322	0,3072	0,2938	0,2812
$c =$	0,001765	0,001772	0,001799	0,001834.
T				

Man erhält die Entropieabnahmen $-\Delta s$

von $182,26$ bis $173,16^\circ\text{K}$	$\Delta s = -0,0161$
„ $182,26$ bis $163,16^\circ\text{K}$	$\Delta s = -0,03402$
„ $182,26$ bis $153,16^\circ\text{K}$	$\Delta s = -0,05235.$

Nach Addition der Schmelzentropie

$$s_{\text{Schm}} = \frac{35,5}{182,26} = 0,1945 \text{ Clausius/kg}$$

ist damit die Grenzkurve fest zu zeichnen.

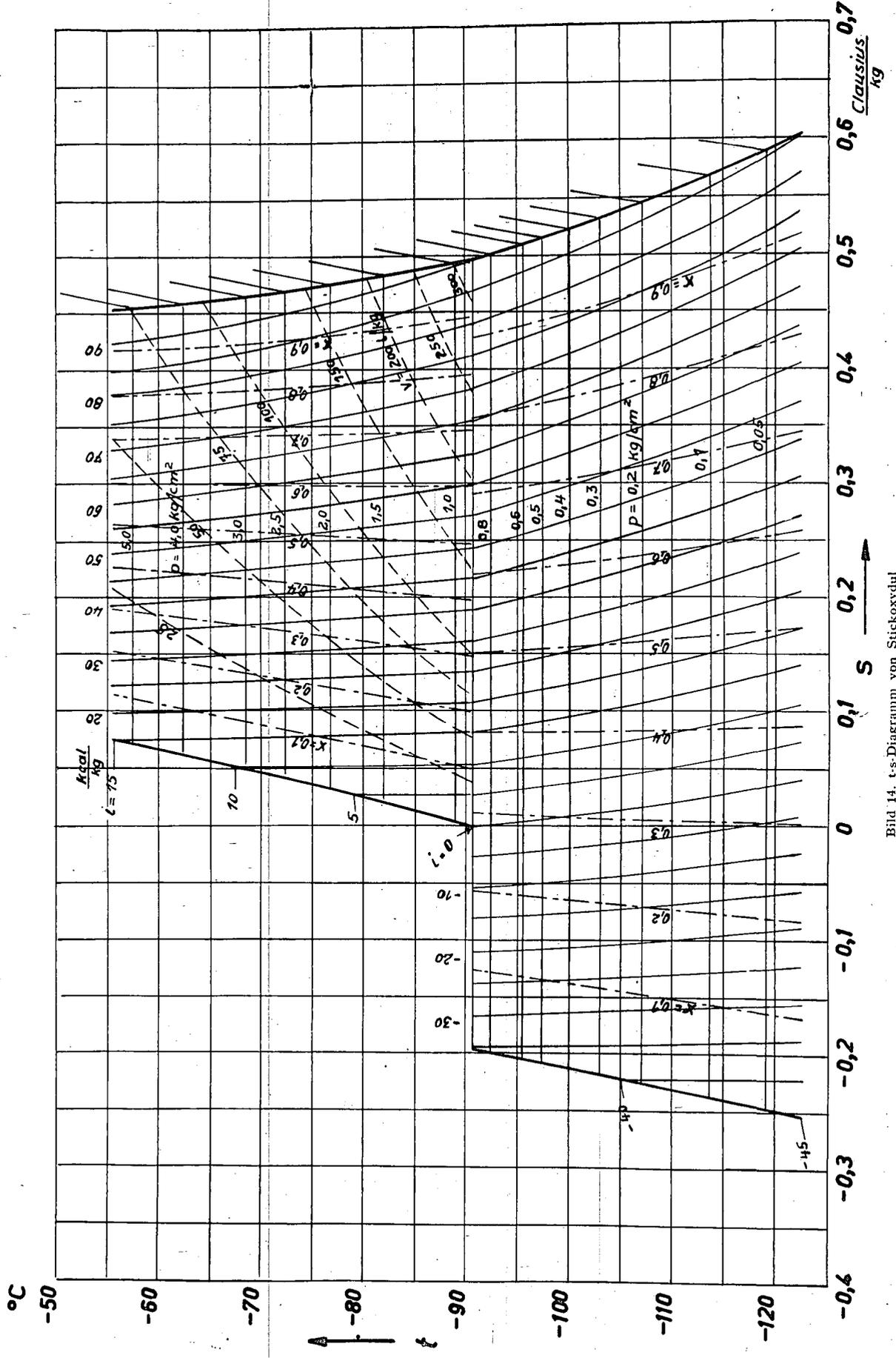


Bild 14. t-s-Diagramm von Stickoxydul

Aus der flüssigen und festen Grenzkurve erhält man die Dampfdruckkurve durch Addition der Verdampfungs- bzw. der Sublimationsentropie

$$s = \frac{r}{T} \quad (10)$$

Für das überhitzte Gebiet sind vorerst keine Berechnungen möglich aus den gleichen Gründen, die bei der Enthalpie gültig waren.

c) Aufzeichnung des t-s-Diagrammes

In einem T-s-Koordinatensystem werden zuerst die drei Grenzkurven nach den in Abschnitt 2 angegebenen Entropiewerten eingezeichnet. Das zwischen diesen liegende Feld wird linear aufgeteilt in Linien gleichen Flüssigkeits- bzw. Feststoffgehalts. Dann können die Isenthalpen nach den Angaben von Abschnitt 1 eingetragen werden. Nach der Dampfdruckkurve, Bild 2 und 3, werden schließlich noch die Isobaren eingezeichnet. Die Isobaren lassen sich ebenfalls in einfacher Weise konstruieren, da das Volumen an den Grenzkurven genau bekannt ist, Bild 5 und 6, und im Satteldampfgebiet $v = v' + x(v'' - v')$ gilt. Gegenüber dem Entwurfblatt wurde das in Bild 14 dargestellte Diagramm mit einer Ordinatenenteilung in °C versehen.

Die Genauigkeit des Diagramms kann in vorliegendem Format mit Differenzen unter 1 mm angegeben werden, sowohl hinsichtlich der Zeichengenauigkeit, wie auch hinsichtlich der Berechnung aus den physikalischen Daten.

D. Messung der Kompressibilität von N₂O und des N₂-N₂O Gleichgewichtes

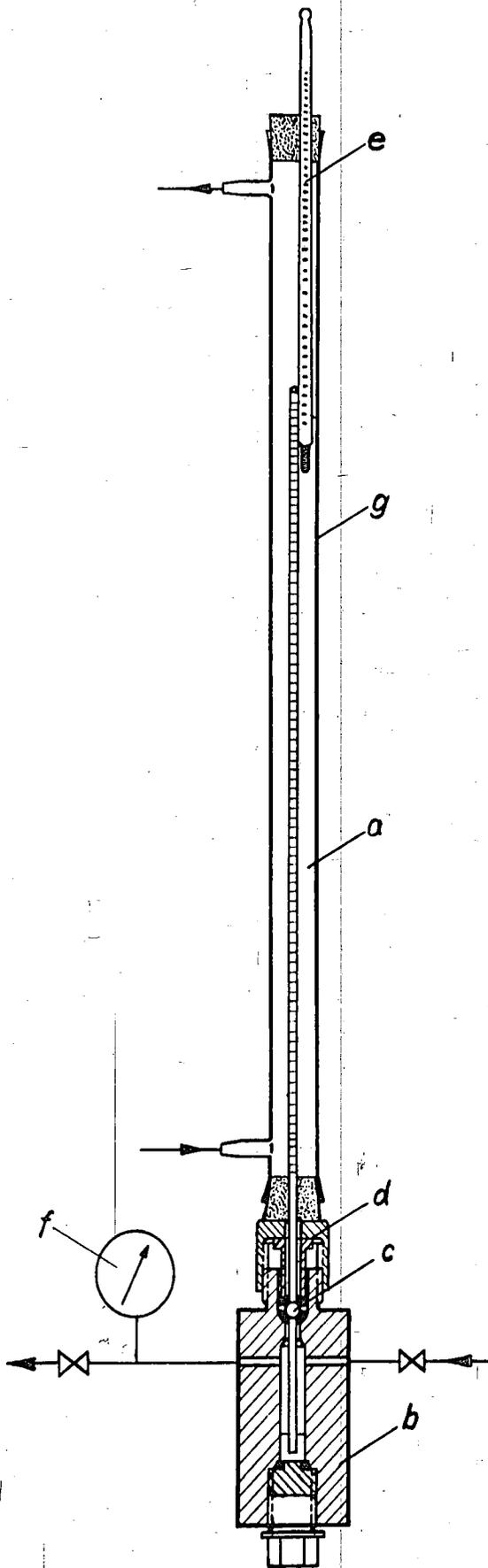
a) Verfahren

Die Apparatur (siehe Abb. 15) wurde in Anlehnung an ein von Sydney Young entwickeltes, später von Bahlke und Kay verbessertes Verfahren entworfen. Sie besteht im wesentlichen aus einer etwa 600 mm langen Glaskapillare (a) von 1,7/8 mm Ø, die an ihrem oberen Ende geschlossen ist. Das untere, offene Ende taucht in das Quecksilberbad in dem Druckgefäß (b) ein. Mit einem Wulst (c) wird die Kapillare in der Packung der Stopfbüchse (d) gehalten. Der aus dem Druckgefäß herausragende Teil der Kapillare ist von einem Glasrohrmantel (g) umgeben, in den Dampf geleitet wird oder der von einer mittels Thermostat genau temperierten Flüssigkeit durchflossen wird. Die Temperatur wird an einem Normalthermometer (e) abgelesen. In das Druckgefäß (b) kann Stickstoff aus einem Hochdruckvorratsbehälter geleitet werden. Der gewünschte Druck wird an einem Manometer (f) eingestellt. In die Außenwand der Kapillare ist eine Volumenteilung eingezätzt.

Die Kapillare wird nun mittels einer dünnen Haarkapillare unter Quecksilberabschluß mit N₂O gefüllt und in das Druckgefäß eingebaut. Dann wird das Volumen V bei Normalbedingungen ($T_0 = 273,16^\circ\text{K}$ und $P_0 = 760 \text{ mm QS}$) abgelesen. Die Messungen erfolgen dann derart, daß bei einer bestimmten Temperatur T der Druck P verändert wird und die jeweiligen Volumina V abgelesen werden. Der Kompressibilitätsbeiwert K, bezogen auf 0°C und 760 mm QS, ist dann

$$K = \frac{P \cdot v}{P_0 \cdot v_0} \cdot \frac{T_0}{T}$$

Bild 15. Schema der Apparatur zur Messung der Kompressibilität von N₂O und der Gleichgewichtskurven von N₂-N₂O-Gemischen



b) Bestimmung des Kompressibilitätsbeiwertes K von N_2O

Die Messungen wurden an technisch reinem N_2O vorgenommen, in dem noch ein geringer Prozentsatz von N_2 enthalten ist. Die Probe ist aus der flüssigen Phase einer noch halb gefüllten Druckflasche entnommen worden.

Der Druckbereich betrug 0 bis 60 at, da bei höheren Drücken (etwa 80 bis 100 at) die Kapillaren öfter abrisen. Der Temperaturbereich ging von $-30^\circ C$ bis zu $+100^\circ C$; wobei die untere Grenze durch den Erstarrungspunkt des Quecksilbers ($-36^\circ C$) gegeben ist.

In Bild 16 sind die Kompressibilitätsbeiwerte K in Abhängigkeit von Druck und Temperatur dargestellt. Die Abweichung vom Gasgesetz ist danach sehr stark und bei niederen Temperaturen auch schon bei kleinem Druck zu berücksichtigen.

Die Streuung der einzelnen Meßpunkte ist ziemlich groß. Sie erfüllt bei weitem noch nicht die Genauigkeitsanforderungen, die im Hinblick auf die beabsichtigte Verwendung dieser Messungen als Grundlage zur Berechnung weiterer thermodynamischer Größen (Enthalpie, Entropie, spezifische Wärme usw.) zu verlangen ist. Für einfache Wichteberechnungen dagegen sind die Isothermen in Bild 16 bereits gut anwendbar.

c) Bestimmung der Tausobaren von N_2-N_2O -Gemischen

Die Kapillare wird unter atmosphärischem Druck zuerst teilweise mit N_2O gefüllt und dann N_2 nachgefüllt. Aus dem Teilvolumen des N_2O und dem Gesamtvolumen sowie den Molekulargewichten beider Anteile sind die Gewichtsprocente N_2O und N_2 zu berechnen. Die Kapillare wird dann in das Druckgefäß eingebaut. Wird der Meßdruck erhöht, so sammelt sich bei einem bestimmten

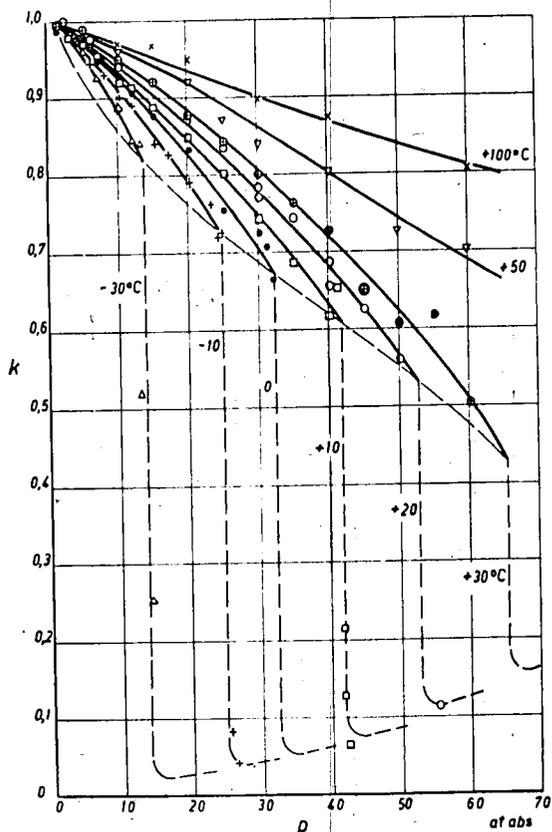


Bild 16. Kompressibilität von Stickoxydul

Druck das erste Tröpfchen von kondensiertem N_2O über dem Quecksilber in der Kapillare an. In gleicher Art werden für verschiedene Temperaturen die Kondensationsdrücke gemessen und damit die „untere Dampfdruckkurve“ dieses ersten Gemisches bestimmt. Die Kapillare muß dann in einem anderen Gemischverhältnis neu gefüllt werden, für das in gleicher Weise die „untere Dampfdruckkurve“ ermittelt werden kann.

Aus einer Reihe derartiger Dampfdruckkurven verschiedener Gemische lassen sich bei einem bestimmten Druck p von z. B. 60 at danach die Kondensationstemperaturen für die erste Flüssigkeitsausscheidung ablesen. In Bild 17 sind diese Taupunkttemperaturen in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung aufgetragen. Für reines N_2O sind die Sättigungstemperaturen aus Bild 2 abgelesen, für reines N_2 ist die Sättigungstemperatur aus der Stoffwertesammlung des Technischen Prüfstandes entnommen.

Trotz der Streuung der Versuchspunkte lassen sich aus den vorliegenden Messungen mit genügender Genauigkeit die Tausobaren für 20, 40 und 60 at abs in das t - ξ -Diagramm des Bildes 17 einzeichnen. Wichtig an diesem vorläufigen Ergebnis unserer Versuche ist die Feststellung, daß die Gleichgewichtskurven N_2-N_2O für Gemische für zu 50% Zumengung von N_2 keine Wendepunkte oder Überhöhungen aufweisen, daß also kein azeotropisches Gemisch auftritt.

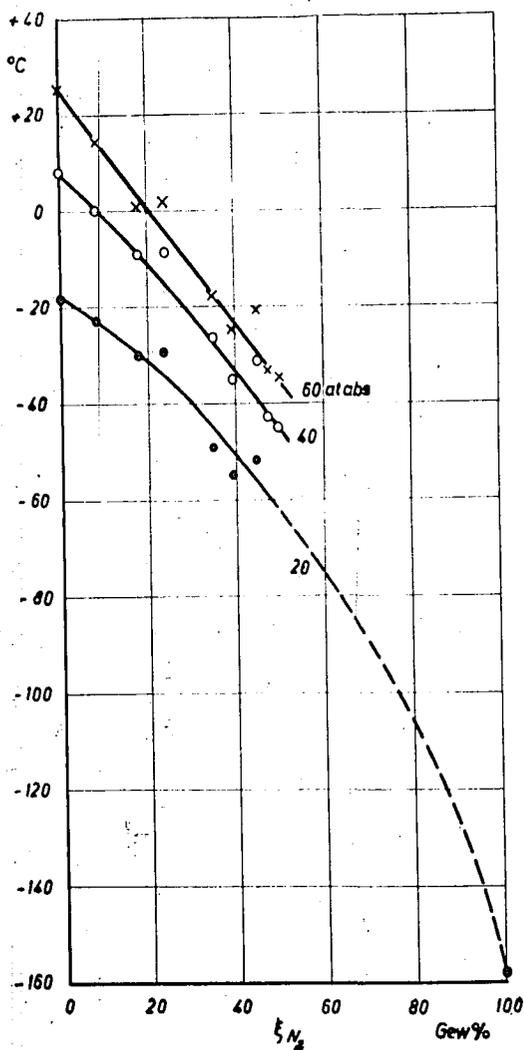


Bild 17. Tausobaren von N_2-N_2O -Gemischen