

**5. Bestimmung des Sättigungsdruckes von
Wasserdampf unter 0° ;
von Karl Scheel und Wilhelm Heuse.**

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Die Regnaultschen Messungen des Sättigungsdruckes von Wasserdampf haben auch unter 0° bis in die neuere Zeit das Fundament aller bezüglichlichen Rechnungen gebildet, insbesondere haben die auf Grund dieser Messungen von Broch¹⁾ berechneten Tafeln überall Eingang gefunden, obwohl seine Interpolationsformel unter 0° keineswegs mit den Beobachtungen selbst in Einklang steht.

Auch die Regnaultschen Messungen selbst sind den heutigen Anforderungen nicht mehr gewachsen. Sie zeigen einmal eine sehr geringe innere Übereinstimmung — bei der am leichtesten festzuhaltenden Temperatur 0° differieren die Druckmessungen um mehr als 0,15 mm —, außerdem aber leiden sie an prinzipiellen Fehlern, so z. B. unnötiger Länge der Quecksilbersäulen und Gegenwart von beträchtlichen Luftresten. Endlich bleibt bei den Regnaultschen Beobachtungen unentschieden, ob die gemessene Größe in jedem einzelnen Falle den Sättigungsdruck des Wasserdampfes über Eis oder über Wasser darstellt.

Namentlich in dieser letzteren Hinsicht sind die neueren umfangreichen Messungen von Juhlin²⁾ und Marvin³⁾ einwandfrei. Die Beobachtungen von Juhlin erstrecken sich für den Sättigungsdruck über Wasser bis zu -13° , über Eis bis zu -50° ; Marvin beobachtete nur den Sättigungsdruck des Wasserdampfes über Eis bis hinab zu -52° .

1) O. J. Broch, Trav. et Mém. du bureau intern. des Poids et Mesures 1. A. p. 22. Paris 1881.

2) Julius Juhlin, Bih. till K. Svenska Vet.-Akad. Handl. 17. Afd. I. No. 1. 72 S. 1891.

3) C. F. Marvin, Extract No. 10 from Annual Report of the Chief Signal Officer 1891. p. 351—383. Washington 1892.

Die vergleichbaren Beobachtungen Juhlius und Marvins weichen jedoch teilweise beträchtlich, bis zu 0,06 mm, voneinander ab. Insonderheit zeigen die für 0° gefundenen Sättigungsdrucke noch eine Differenz von $+0,023$ bzw. $-0,011$ mm gegen den später in der Reichsanstalt¹⁾ gemessenen Wert.

Unter diesen Umständen erschien eine nochmalige Revision dieser für die Thermodynamik und die kosmische Physik wichtigen Daten mit verbesserten Hilfsmitteln wünschenswert. Die Beobachtungen, über welche im folgenden berichtet wird, erstrecken sich von 0° ausgehend für den Sättigungsdruck des Wasserdampfes über Wasser bis zu -16° , über Eis bis -68° . Diese Grenzen waren dadurch gegeben, daß es nicht gelang, Wasser bei wesentlich tieferer Temperatur als bei -16° flüssig zu erhalten, und daß der Sättigungsdruck über Eis bei -68° bereits auf 0,001 mm gesunken ist.

1. Methode und Versuchsanordnung.

Es wurde die statische Methode angewendet.

Das Wasser befand sich in zwei röhrenförmigen Gefäßen u_1 und u_2 (Fig. 1), die mit der übrigen ganz aus Glas hergestellten Apparatur verblasen waren. Die zwei Gefäße wurden vorgesehen, um die Unterkühlung unschädlich zu machen, welche eintritt, wenn bei Zuschaltung des Vakuums eine größere Dampfmenge schnell gebildet wird. Es wurde deshalb in der Weise vorgegangen, daß die nötige Dampfmenge fast vollständig dem einen der beiden Gefäße entnommen wurde, während darauf das andere nur den letzten Ausgleich und die Aufrechterhaltung des zu messenden Druckes zu besorgen hatte. Die entsprechenden Verbindungen wurden durch die Quecksilberumschalter U_1 und U_2 hergestellt.

Die Versuche wurden in der Weise angeordnet, daß man unter Benutzung auch des Umschalters U_3 das Manometer abwechselnd mit den Wassergefäßen u_1 und u_2 und dem Kondensationsgefäß K , welches sich in flüssiger Luft befand, in Verbindung setzte. Bei der Temperatur der flüssigen Luft

1) M. Thiesen u. K. Scheel, Wissenschaftl. Abh. der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt 3. p. 71—94. 1900.

konnte der Sättigungsdruck des Wasserdampfes als weit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegend angesehen werden, was auch unsere Messungen bestätigten.

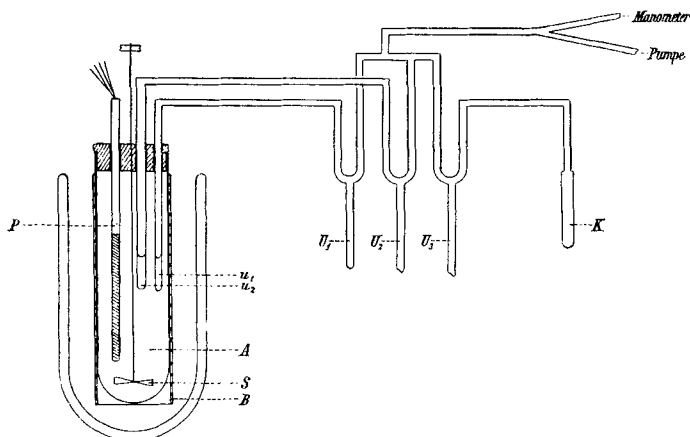


Fig. 1.

Das ganze System war vor Beginn der Versuche mittels einer Gaedepumpe gut von Luft befreit.

Die Wassergefäße u_1 und u_2 befanden sich in einem Bade konstanter Temperatur.

2. Temperaturbäder.

Zur Erzielung konstanter Temperatur mußten in den verschiedenen Bereichen verschiedene Mittel verwendet werden.

a) 0° . Bei 0° wurde die für Untersuchungen an Thermometern übliche Eispackung benutzt.

b) *Intervall 0° bis -21°* . Es wurden Gemische von Eis und Salzen verwendet, welche in einem Dewarschen Gefäße zu Brei verrührt wurden. Die Verdampfungsgefäße und das Platinthermometer P befanden sich in einem Alkoholbade A , welches in den Brei eingesetzt war. Das Alkoholbad wurde durch einen Schraubenrührer S in kräftiger Bewegung gehalten. Bei Benutzung der folgenden Salze wurden die nebengeschriebenen Temperaturen erreicht.

Kaliumnitrat KNO_3	$-2,8^\circ$
Magnesiumsulfat MgSO_4	-4 bis -5°
Bariumchlorid BaCl	$-7,3^\circ$
Ammoniumnitrat NH_4NO_3	$-8,5$ bis $-9,5^\circ$
Ammoniumchlorid NH_4Cl	$-15,2^\circ$
Natriumchlorid NaCl	-21°

Die Beobachtungen wurden in der Weise angeordnet, daß immer ein ganzer Tag auf eine Salzmischung verwendet und eine Reihe von Messungen über den Tag verteilt wurden. Die erzielten Temperaturen blieben dabei teilweise sehr konstant (KNO_3 , BaCl , NH_4Cl , NaCl). In den beiden anderen Fällen (MgSO_4 , NH_4NO_3) ließ die Temperaturkonstanz zu wünschen übrig, doch konnte man durch rechtzeitiges Nachfüllen von Salzbrei langsam verlaufende Temperatur-Umkehrpunkte erhalten.

c) *Intervall von -20 bis -50° .* Als Kühlmittel diente ein Gemisch von Alkohol und fester Kohlensäure, in welches das unter b) erwähnte Alkoholbad (*A* in Fig. 1) aber nicht direkt eingesetzt wurde, sondern erst unter Zwischenschaltung eines elektrisch heizbaren Metaldoppelmantels *B*. Zur Herstellung konstanter Temperaturen kühlte man zunächst das Bad auf unterhalb -50° ab, heizte dann bis nahe an die gewünschte Temperatur heran und ließ endlich nach Ausschaltung des Heizstromes Ausgleich eintreten. Nach einiger Übung erhielt man auf diese Weise in den Umkehrpunkten genügend lange Zeit die gewünschte Konstanz. Durch stufenweise fortgesetztes Erhöhen der Temperatur wurde so im ganzen Bereich eine Reihe von Beobachtungspunkten gewonnen.

d) *Intervall von -50 bis -70° .* Das Verfahren zur Herstellung konstanter Temperaturen war demjenigen unter c) völlig analog, nur wurde an Stelle des Gemisches von Alkohol und fester Kohlensäure flüssige Luft verwendet. Um nach jedesmaligem Abstellen des Heizstromes konstante Temperaturen zu erhalten, durfte sich nur wenig flüssige Luft im Dewarschen Gefäße befinden, welche den Boden des Metaldoppelmantels *B* gerade berührte und dadurch in heftigem Sieden gehalten wurde. Als Kühlmittel wurde somit weniger die flüssige Luft als der kalte Luftdampf benutzt. Flüssige Luft

durfte also namentlich an den Temperatur-Umkehrpunkten stets in nur geringen Mengen nachgefüllt werden.

3. Druckmessung.

Zur Druckmessung wurde das von Lord Rayleigh angegebene Neigemanometer¹⁾ benutzt. Es besteht aus zwei miteinander fest verbundenen Glaskugeln als Druckkammern, welche zur Hälfte von einem gemeinsamen Reservoir aus mit Quecksilber gefüllt sind, und in welche von oben her je eine Glasspitze eingeschmolzen ist. Die Einstellung auf Berührung von Spitze mit ihrem Spiegelbild gleichzeitig in beiden Kammern geschieht durch Neigen des ganzen Manometers; die Größe der Neigung, welche durch Spiegel und Skala bestimmt wird, gibt unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse ein absolutes Maß für den Druckunterschied in beiden Kammern.

Lord Rayleigh hat mit diesem Manometer Drucke bis 1,5 mm gemessen. Um das Manometer für noch höhere Drucke brauchbar zu machen, mußte der Spiegel, welchen Lord Rayleigh oberhalb des Instrumentes angeordnet hatte, in die Verlängerung der Drehachse verlegt werden; dadurch wurde verhindert, daß bei größerer Neigung des Manometers sich der Abstand von Spiegel und Skala merklich änderte. Das Anvisieren der Spitzen geschah mit einem schwach vergrößernden Mikroskop; durch ein totalreflektierendes Prisma wurden die Bilder beider Spitzen nebeneinander ins Gesichtsfeld gebracht, wodurch die Beurteilung gleichen Abstandes beider Spitzen von ihren Spiegelbildern beträchtlich verschärft wurde. Das Mikroskop war mit dem drehbaren Teile des Manometers fest verbunden, so daß die Spitzen auch bei großen Neigungen des Manometers ihre Lage im Gesichtsfeld des Mikroskops nicht änderten.

Entsprechend der Benutzung für größere Neigungen wurde das Instrument im ganzen stabiler gebaut als die ursprüngliche Rayleighsche Form und auf genügende Biegsamkeit der

1) Lord Rayleigh, Phil. Trans. (A) 196. p. 208. 1901; Zeitschr. f. phys. Chem. 37. p. 713. 1901.

von den Meßkammern zur übrigen Apparatur führenden Glasfedern besonders geachtet.¹⁾

Das Manometer war von der Nullage (gleicher Druck in beiden Kammern) aus gerechnet auf Messung von Druckunterschieden von etwa 2,5 mm nach beiden Seiten brauchbar. Der gesamte Meßbereich betrug also 5 mm. Die Messung wurde in der Art ausgeführt, daß die eine Kammer, die Normalkammer, durch Anschluß an eine künstliche Atmosphäre konstanter Temperatur auf einem konstanten Druck (bei Messung der kleineren Drucke dem Vakuum) gehalten wurde, während die andere, die Meßkammer, abwechselnd mit dem Vakuum und dem Dampfraum in Verbindung stand.

Die Größen, welche in die Gleichung zur Berechnung des Druckes eingehen, sind Abstand der Spitzen, Abstand des Spiegels von der Skala und Skalenausschlag. Der Spitzenabstand wurde mit Hilfe eines Horizontalkomparators bestimmt. Hierbei waren die Manometerkugeln mit Wasser gefüllt und mit einer über beide reichenden Glasplatte bedeckt; in den Zwischenraum zwischen den äußeren Kugeloberflächen und der Glasplatte wurde ebenfalls Wasser gebracht. Auf diese Weise erschien der Spitzenabstand ohne Verzerrung. Die Messung wurde in gleicher Weise von der Vorder- und von der Rückseite ausgeführt und ergab als Spitzenabstand 30,110 bzw. 30,100 mm. Der Mittelwert 30,105 mm wurde in die späteren Berechnungen eingeführt.

Der Abstand von Spiegel zu Skale wurde, soweit nötig, täglich mit einer Genauigkeit von 0,1 mm bestimmt; er betrug etwa 2270 mm und änderte sich von Tag zu Tag kaum merklich.

Als Skale wurde eine 800 mm lange Glasskale benutzt, welche innerhalb der erforderlichen Genauigkeit innere Teilungsfehler nicht hatte und deren Gesamtlänge auf 0,01 mm richtig war.

4. Temperaturmessung.

Zur Messung der Temperatur diente ein Platinthermometer, welches bereits früher gelegentlich der Bestimmung der

1) Konstruktionseinzelheiten der verbesserten Form des Rayleighschen Manometers wird eine später erscheinende Beschreibung in der Zeitschrift für Instrumentenkunde geben.

Ausdehnung des Platins unter 0° benutzt worden war und sich seit jener Zeit (Juli 1907) nicht merklich geändert hatte. Sein Eispunkt wurde während der Versuche mehrfach kontrolliert und in genügender Weise konstant gefunden. Auch eine Widerstandsbestimmung in flüssigem Sauerstoff bestätigte die frühere Eichung des Thermometers. Alle Temperaturmessungen wurden nach der Kompensationsmethode ausgeführt.

5. Versuchsergebnisse.

Den Ausgangspunkt der Versuche bei wechselnden Temperaturen bildeten eine Reihe von Beobachtungen bei 0° . Diese sind insofern von besonderer Wichtigkeit, als dadurch der Anschluß an die früheren Messungen¹⁾ in der Reichsanstalt von Thiesen und Scheel gewonnen wird. Es wurden 5 Versuchsreihen ausgeführt, welche sich aus 2 bis 4 nahe übereinstimmenden Einzelmessungen zusammensetzen. Die 5 Reihennittel sind im folgenden wiedergegeben; die Zahl der Einzelmessungen ist jedesmal als Gewicht hinzugefügt.

Messungen bei 0° .

Tag	Gewicht	Reihennittel	$B - M$
26. 1. 09	3	4,5797 mm	+0,0009 mm
28. 1. 09	3	4,5792 „	+0,0004 „
28. 1. 09	3	4,5803 „	+0,0015 „
11. 2. 09	2	4,5772 „	-0,0016 „
26. 2. 09	4	4,5774 „	-0,0014 „

Als Gesamtmittel ergibt sich hieraus

$$4,5788 \text{ mm} \pm 0,0006 \text{ mm}$$

in völliger Übereinstimmung mit dem Werte von Thiesen und Scheel

$$4,579 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm.}$$

Die Versuchsergebnisse bei wechselnder Temperatur sind in den folgenden beiden Tabellen, die sich auf Sättigungs-

1) M. Thiesen u. K. Scheel, *Wissensch. Abh. der Phys.-Techn. Reichsanstalt* **3**. p. 71—94. 1900.

drucke des Wasserdampfes über Wasser und über Eis beziehen, zusammengestellt. Die Tabellen sind nach fallender Temperatur geordnet; aus der ersten Spalte der Tabellen sind die zugehörigen Beobachtungstage zu erkennen, welche mit fortlaufenden römischen Ziffern bezeichnet sind. Die zweite Spalte enthält die Temperatur, die dritte den beobachteten Sättigungsdruck.

Beobachtete Sättigungsdrucke über Wasser.

Tag	Temperatur °	Druck in mm	R in mm	$B - R$ in 0,001 mm	$K - R$ in 0,001 mm	$B - K$ in 0,001 mm
V	— 2,798	3,729	3,734	— 5	— 2	— 3
V	— 2,814	3,724	3,729	— 5	— 2	— 3
IV	— 2,816	3,726	3,729	— 3	— 2	— 1
VI	— 2,830	3,726	3,725	+ 1	— 2	+ 3
VI	— 2,838	3,724	3,723	+ 1	— 2	+ 3
IV	— 3,918	3,432	3,436	— 4	— 1	— 3
I	— 4,842	3,209	3,207	+ 2	+ 2	0
I	— 4,853	3,204	3,204	0	+ 2	— 2
I	— 4,884	3,202	3,197	+ 5	+ 2	+ 3
I	— 4,900	3,193	3,193	0	+ 2	0
II	— 7,250	2,675	2,672	+ 3	+ 3	0
III	— 7,267	2,672	2,668	+ 4	+ 3	+ 1
III	— 7,279	2,669	2,666	+ 3	+ 3	0
II	— 7,298	2,668	2,662	+ 6	+ 3	+ 3
III	— 7,301	2,665	2,662	+ 3	+ 3	0
II	— 7,311	2,668	2,660	+ 8	+ 3	+ 5
II	— 7,313	2,661	2,659	+ 2	+ 3	— 1
II	— 7,316	2,659	2,658	+ 1	+ 3	— 2
VIII	— 8,804	2,373	2,370	+ 3	+ 1	+ 2
VIII	— 9,115	2,315	2,319	— 4	+ 1	— 5
VIII	— 9,812	2,191	2,191	0	+ 1	— 1
VII	— 15,176	1,421	1,426	— 5	— 2	— 3
VII	— 15,308	1,412	1,411	+ 1	— 2	+ 3

Beobachtete Sättigungsdrucke über Eis.

Tag	Temperatur °	Druck in mm	R in mm	$B - R$ in 0,001 mm	$K - R$ in 0,001 mm	$B - K$ in 0,001 mm
V	- 2,806	3,628	3,631	- 3	+ 2	- 5
VI	- 2,816	3,627	3,628	- 1	+ 2	- 3
V	- 2,823	3,629	3,626	+ 3	+ 2	+ 1
VI	- 2,838	3,628	3,621	+ 7	+ 2	+ 5
VI	- 2,855	3,628	3,616	+ 12	+ 2	+ 10
IV	- 3,995	3,286	3,286	0	+ 3	- 3
IV	- 4,064	3,264	3,267	- 3	+ 3	- 6
IV	- 4,142	3,248	3,246	+ 2	+ 3	- 1
IV	- 4,152	3,251	3,243	+ 8	+ 3	+ 5
III	- 7,257	2,492	2,489	+ 3	+ 4	- 1
III	- 7,291	2,489	2,481	+ 8	+ 4	+ 4
III	- 7,291	2,488	2,481	+ 7	+ 4	+ 3
II	- 7,296	2,488	2,480	+ 8	+ 4	+ 4
III	- 7,308	2,485	2,478	+ 7	+ 4	+ 3
II	- 7,318	2,485	2,480	+ 5	+ 4	+ 1
II	- 7,330	2,485	2,473	+ 12	+ 4	+ 8
VIII	- 8,597	2,220	2,215	+ 5	+ 4	+ 1
VIII	- 8,961	2,148	2,146	+ 2	+ 4	- 2
VIII	- 9,606	2,028	2,028	0	+ 4	- 4
VII	- 15,068	1,247	1,242	+ 5	+ 4	+ 1
VII	- 15,262	1,222	1,220	+ 2	+ 4	- 2
IX	- 20,786	0,726	0,726	0	0	0
IX	- 20,847	0,722	0,722	0	0	0
IX	- 20,908	0,719	0,717	+ 2	0	+ 2
IX	- 20,964	0,712	0,714	- 2	0	- 2
IX	- 21,015	0,711	0,711	0	0	0
IX	- 21,025	0,714	0,710	+ 4	0	+ 4
XIV	- 22,46	0,616	0,618	- 2	0	- 2
XI	- 23,41	0,562	0,563	- 1	- 1	0
XII	- 23,51	0,554	0,558	- 4	- 1	- 3
XIII	- 23,88	0,537	0,538	- 1	- 1	0
X	- 24,15	0,521	0,522	- 1	- 1	0
XIII	- 26,86	0,399	0,401	- 2	- 2	0
XI	- 26,90	0,397	0,398	- 1	- 2	+ 1
XIV	- 27,17	0,385	0,387	- 2	- 2	0
X	- 27,56	0,366	0,373	- 7	- 2	- 5
XV	- 28,56	0,337	0,336	+ 1	- 2	+ 3

Beobachtete Sättigungsdrucke über Eis (Fortsetzung).

Tag	Tem- peratur °	Druck in mm	R in mm	$B - R$ in 0,001 mm	$K - R$ in 0,001 mm	$B - K$ in 0,001 mm
XII	-30,16	0,281	0,285	-4	-2	-2
XIV	-31,02	0,259	0,261	-2	-3	+1
XI	-32,10	0,232	0,233	-1	-3	+2
XIII	-32,26	0,228	0,229	-1	-3	+2
X	-32,74	0,215	0,218	-3	-3	0
XIV	-34,57	0,177	0,179	-2	-3	+1
XV	-37,24	0,132	0,134	-2	-3	+1
XI	-39,00	0,108	0,110	-2	-3	+1
X	-39,56	0,099	0,104	-5	-3	-2
XIII	-41,67	0,080	0,082	-2	-3	+1
XIV	-42,33	0,073	0,076	-3	-3	0
XII	-42,98	0,066	0,070	-4	-3	-1
XV	-43,94	0,060	0,063	-3	-2	-1
XI	-47,31	0,042	0,041	+1	-2	+3
XVIII	-48,7	0,035	0,036	-1	-2	+1
XVII	-48,9	0,033	0,035	-2	-2	0
XIX	-49,4	0,033	0,033	0	-1	+1
XVI	-49,8	0,030	0,031	-1	-1	0
X	-51,1	0,024	0,027	-3	-1	-2
XVIII	-52,0	0,023	0,024	-1	-1	0
XVII	-52,3	0,021	0,023	-2	-1	-1
XIX	-52,6	0,021	0,022	-1	-1	0
XVI	-54,0	0,018	0,018	0	-1	+1
XVIII	-54,5	0,016	0,017	-1	-1	0
XVII	-55,9	0,013	0,014	-1	-1	0
XVI	-56,4	0,013	0,014	-1	-1	0
XIX	-56,6	0,012	0,013	-1	-1	0
XVIII	-59,6	0,007	0,009	-2	-1	-1
XVII	-61,5	0,005	0,007	-2	-1	-1
XVI	-62,6	0,004	0,006	-2	-2	0
XIX	-63,6	0,004	0,005	-1	-2	+1
XVIII	-64,2	0,003	0,005	-2	-2	0
XVII	-65,1	0,001	0,004	-3	-2	-1
XIX	-65,9	0,002	0,004	-2	-2	0
XVIII	-67,5	0,001	0,003	-2	-2	0
XIX	-67,9	0,001	0,003	-2	-2	0

6. Auswertung und Diskussion der Beobachtungen.

Versuche, die Beobachtungen durch Gleichungen der Hertz'schen Art¹⁾ darzustellen, ergaben als die hierfür am besten geeigneten Formeln für den Sättigungsdruck p über Wasser

$$\log p = 23,55887 - 5 \cdot \log T - \frac{2925,82}{T},$$

Sättigungsdruck p' über Eis

$$\log p' = 11,50406 - 0,4 \cdot \log T' - \frac{2694,2}{T'},$$

wo T die absolute Temperatur bezeichnet.

Die hiernach berechneten Werte sind in den vorstehenden Tabellen unter R verzeichnet; eine weitere Spalte der Tabellen $B - R$ gibt die Unterschiede gegen diese Werte im Sinne Beobachtung minus Rechnung wieder.

Es ist sofort ersichtlich, daß die obigen Formeln die Beobachtungen nicht voll darzustellen vermögen. Die Abweichungen sind zu groß, als daß sie sich durch die Beobachtungsfehler erklären ließen; außerdem weisen sie, wie ein Blick auf die Spalte $B - R$ lehrt, systematische Gänge auf.

Man hat darum, um auch diesen Abweichungen Rechnung zu tragen, ein graphisches Ausgleichsverfahren angewendet. Hierbei wurden die Abweichungen, welche nahe beieinander liegenden Temperaturen zugehören, zu Mittelwerten vereinigt, und in Abhängigkeit von der Temperatur in ein Koordinatensystem (Fig. 2 für Wasser, Fig. 3 für Eis) eingetragen. Aus

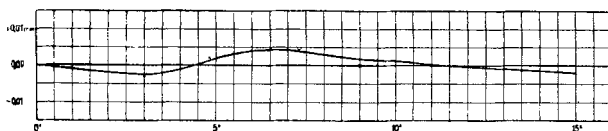


Fig. 2. Δp_{Wasser} .

den durchgezogenen Kurven sind die Werte der mit $K - R$ überschriebenen Spalten entnommen. Die Kurven in Verbindung mit den obigen Formeln geben also unsere Beobachtungen am besten wieder und sind zur Aufstellung der folgenden, von

1) H. Hertz, Wied. Ann. 17. p. 198. 1882.

Grad zu Grad fortschreitenden Tabellen für den Sättigungsdruck des Wasserdampfes über Wasser und Eis benutzt.

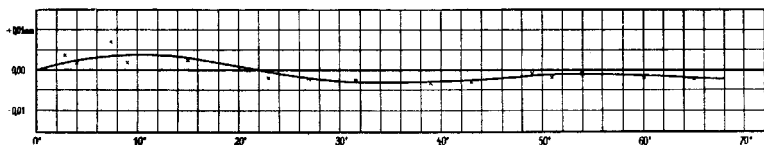


Fig. 3. Δp_{Eis} .

Tafel für die Sättigungsdrucke des Wasserdampfes in mm

1. über Eis.

Temp. °	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
— 0	4,579	4,219	3,885	3,575	3,288	3,022	2,776	2,548	2,337	2,143
— 10	1,963	1,797	1,644	1,503	1,373	1,253	1,143	1,041	0,948	0,863
— 20	0,784	0,712	0,646	0,586	0,530	0,480	0,434	0,392	0,354	0,319
— 30	0,288	0,259	0,233	0,209	0,188	0,168	0,151	0,135	0,120	0,108
— 40	0,096	0,085	0,076	0,068	0,060	0,053	0,047 ₈	0,042 ₈	0,037 ₈	0,033 ₅
— 50	0,029 ₆	0,026 ₂	0,023 ₁	0,020 ₃	0,017 ₈	0,015 ₆	0,013 ₆	0,011 ₈	0,010 ₂	0,008 ₇
— 60	0,007 ₈	0,006 ₁	0,004 ₉	0,003 ₈	0,002 ₆	0,002 ₃	0,001 ₇	0,001 ₂	0,000 ₈	—

2. über Wasser.

— 0	4,579	4,259	3,958	3,678	3,415	3,171	2,942	2,727	2,525	2,337
— 10	2,160	1,996	1,843	1,701	1,568	1,445	1,331			

Andererseits erlauben die Kurvenwerte ($K - R$) die Fehler der einzelnen Beobachtungen selbst abzuleiten, wie sie in der letzten Spalte ($B - K = [B - R] - [K - R]$) vorstehender Tabellen aufgeführt sind. Auf Grund dieser Zahlen kann man den Fehler des Resultates bei den tieferen Temperaturen auf weniger als $\pm 0,001$ mm bewerten. Bei den wenig unter 0° liegenden Temperaturen ist er entsprechend den Schwierigkeiten, die Temperatur konstant zu erhalten, etwas größer; doch entspricht er einer Unsicherheit der Temperatur von höchstens $\pm 0,01^\circ$.

Es wäre wohl erwünscht gewesen, die Beobachtungen bei den tieferen Temperaturen (unterhalb -50°) mit dem früher¹⁾

1) K. Scheel u. W. Heuse, Zeitschr. f. Instrk. 29. p. 14. 1909.

beschriebenen Membranmanometer anzustellen. Hiermit würde im Intervall -50 bis -70° eine größere Genauigkeit erreicht, und auch das Intervall unter -70° der Beobachtung zugänglich geworden sein. Es zeigte sich jedoch, daß die Innenwandungen des Membranmanometers, wenn sie längere Zeit mit dem Vakuum in Verbindung gestanden hatten, bei Einführung von Wasserdampf diesen in beträchtlichem Maße aufnahmen¹⁾. Infolgedessen stieg der Druck im Membranmanometer nur sehr langsam an; Gleichgewicht trat erst nach mehreren Stunden ein, es ließ sich aber nicht entscheiden, ob der dann erreichte Druck wirklich der Sättigungsdruck war, oder ob man es nicht vielmehr mit einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Verdampfung und Kondensation zu tun hatte.

Dagegen wurde das Membranmanometer mit Vorteil verwendet, um einen etwaigen Einfluß der Dämpfe von Quecksilber und Fett zu studieren, welche, Quecksilber als Abschlußflüssigkeit, Fett als Dichtungsmittel für die Schiffe am Membranmanometer, nicht vermieden werden konnten. Es zeigte sich nämlich, daß eine lokale Abkühlung des mit gesättigtem Quecksilber- und gesättigtem Fettdampfe gefüllten hochevakuierten Systems auf -190° bei Gegenwart von Quecksilber und Fett von Zimmertemperatur den Druck im System, wenn überhaupt, sicher um weniger als $0,00003$ mm erniedrigte. Das bedeutet, daß bei allen vorliegenden Beobachtungen das System stets mit bei Zimmertemperatur gesättigtem Quecksilber- und Fettdampf gefüllt war, deren Einfluß also bei der Art, wie die Messungen angestellt sind, eliminiert ist.

7. Vergleichung der Beobachtungen mit Formeln.

Es ist schon oben (p. 733) darauf hingewiesen, daß die beobachteten Sättigungsdrucke des Wasserdampfes sowohl über Eis, als auch über Wasser sich nicht restlos durch Gleichungen nach Art der von Hertz abgeleiteten Formeln darstellen lassen.

1) Über ähnliche Beobachtungen, aber bei höheren Drucken, vgl. T. Ihmori, Wied. Ann. **31**. p. 1006—1014. 1887.

Das gleiche gilt für Formeln, die Thiesen¹⁾ für die Sättigungsdrucke des Wasserdampfes über Eis und über Wasser gegeben hat, wie die folgende Tabelle zeigt:

Vergleichung mit der Thiesenschen Formel.

Temp.	Sättigungsdruck des Wasserdampfes in mm					
	über Eis			über Wasser		
	Beobachtet	Thiesen	B.—Th.	Beobachtet	Thiesen	B.—Th.
0°	4,579	4,581	−0,002	4,579	4,581	−0,002
−5	3,022	3,010	+0,012	3,171	3,162	+0,009
−10	1,963	1,946	+0,017	2,160	2,145	+0,015
−15	1,253	1,237	+0,016	1,445	1,432	+0,013
−20	0,784	0,772	+0,012			
−25	0,480	0,473	+0,007			
−30	0,288	0,284	+0,004			
−35	0,168	0,167	+0,001			
−40	0,096	0,096	±0,000			
−45	0,053	0,054	−0,001			
−50	0,030	0,029	+0,001			
−55	0,016	0,016	±0,000			
−60	0,007	0,008	−0,001			
−65	0,002	0,004	−0,002			

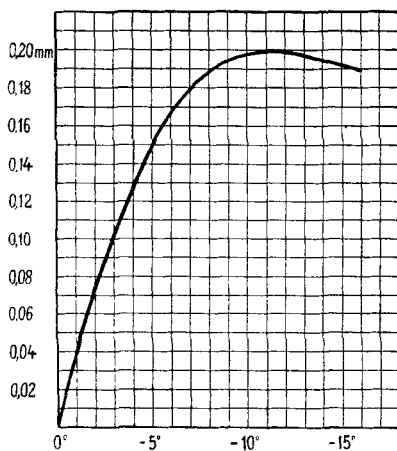


Fig. 4. $p_{\text{Wasser}} - p_{\text{Eis}}$.

1) M. Thiesen, Wied. Ann. **67**. p. 690—695. 1899.

Dagegen findet eine andere von Thiesen¹⁾ abgeleitete Beziehung volle Bestätigung. Thiesen weist darauf hin, daß der Unterschied der Sättigungsdrucke des Wasserdampfes über Wasser und über Eis ein Maximum haben müsse, weil er sowohl bei 0° als auch bei sehr tiefer Temperatur verschwinde. Er berechnet die Lage dieses Maximums, ausgehend von der Clapeyronschen Gleichung, zu $-11,7^\circ$. Die in Fig. 4 dargestellte Kurve gibt nach den vorliegenden Beobachtungen die Differenz der Sättigungsdrucke in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Kurve lehrt, daß das angezeigte Maximum wirklich bei der berechneten Temperatur liegt.

Charlottenburg, 6. Mai 1909.

1) M. Thiesen, l. c.

(Eingegangen 15. Mai 1909.)