**3. Eine Vergleichung einer Druckwage
von Schäffer und Budenberg mit dem offenen
Standardmanometer des Physikalischen Instituts
in Leiden zwischen 20 und 100 Atmosphären, als
Beitrag zur Theorie der Druckwage von S. und B.¹⁾;
von C. A. Crommelin und Frl. E. I. Smid.**

(Hierzu Tafel III.)

§ 1. *Einleitung. Zweck der Untersuchung.* — Die vor kurzem im Physikalischen Institute in Leiden vollendete Fortsetzung der Bestimmung der Isotherme von Wasserstoff bei gewöhnlicher Temperatur von 60–100 Atmosphären²⁾ bot zugleich eine willkommene Gelegenheit dar, um überzugehen zu einer schon seit langer Zeit geplanten Vergleichung einer Druckwage von Schäffer und Budenberg mit dem offenen Manometer des Physikalischen Instituts in Leiden.

Bei den Isothermenbestimmungen von Gasen unter hohem Drucke, die in Amsterdam von Hrn. Prof. Kohnstamm mit dem Instrumentarium des Van der Waals-Fonds unternommen sind, beruhen die Druckmessungen auf Anweisungen einer Druckwage von Schäffer und Budenberg, während auch die Bestimmung der Einheit, in welcher das Gasvolumen bei den Beobachtungen unter hohem Drucke ausgedrückt wird, von den Anweisungen einer solchen Druckwage beherrscht wird. Denn dieses Normalvolumen wird von Kohnstamm und Walstra³⁾ abgeleitet aus dem Volumen, das

1) Übersetzung einer gleichnamigen Abhandlung, erschienen in den Sitzungsberichten der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Amsterdam (im folgenden mit „Sitzungsber.“ zitiert), Juni 1915; Comm. Leiden Nr. 146c.

2) H. Kamerlingh Onnes, C. A. Crommelin u. Frl. E. I. Smid, Sitzungsber. Amsterdam Juni 1915, Comm. Leiden Nr. 146b.

3) Ph. Kohnstamm u. K. W. Walstra, Sitzungsber. Amsterdam, Dezember 1913, Januar und April 1914, und K. W. Walstra, Inaug.-Diss. Amsterdam 1914. Diese Abhandlungen enthalten auch eine Beschreibung der Druckwage.

zufolge der Isotherme von Wasserstoff, von Schalkwijk¹⁾ in Leiden mit Hilfe des offenen Manometers von Kamerlingh Onnes²⁾ bestimmt, gehört zu dem Drucke, angegeben von der Druckwage. Um bei den Untersuchungen von Kohnstamm und Walstra die beobachteten Drucke und Volumina umzurechnen auf wirkliche Drucke und Volumina, welche nötig sind, um die Zustandsgleichung aufstellen zu können, ist deshalb eine Untersuchung über den wirklichen Druck, der mit einer bestimmten Anweisung der Druckwage von Schäffer und Budenberg übereinstimmt, unentbehrlich.

Weil das soeben genannte offene Manometer zuläßt, absolute Druckbestimmungen bis 120 Atmosphären mit großer Genauigkeit zu verrichten, konnte durch eine Vergleichung der kleinen Druckwage, welche bei den Untersuchungen von Kohnstamm und Walstra gedient hat, in jedem Falle schon das Normalvolumen, das für die Messungen bei niedrigem Drucke gilt, festgestellt werden.

Weiter war für das Erlangen eines Urteils über die Genauigkeit der Bestimmung der sehr hohen Drucke die Vergleichung der kleinen Druckwage mit dem offenen Manometer, abgesehen von der Festsetzung des Wertes der Anweisungen innerhalb des untersuchten Gebietes, schon von großem Wert. Die Notwendigkeit einer solchen Vergleichung ist vor kurzem noch von Kohnstamm und Walstra dargelegt.

Von der Theorie der Druckwage ist noch wenig bekannt und selbst dieses Wenige ist noch nicht auf einigermaßen entscheidende Weise am Experiment geprüft. Und was schließlich das schlimmste ist, die bis jetzt angestellten Versuche bestätigen die Theorie nicht. Wir haben hier besonders die Arbeit von E. Wagner³⁾ im Auge, dessen Berechnungen in bezug auf ein Amagatmanometer mutatis mutandis auch auf eine Druckwage anzuwenden sind. Wagner berechnet die Kraft, welche der Zylinder eines Amagatmanometers

1) J. C. Schalkwijk, Sitzungsber. Amsterdam, Dezember 1900 und Januar 1901; Comm. Leiden Nr. 67 und Inaug.-Diss. Amsterdam 1902.

2) H. Kamerlingh Onnes, Sitzungsber. Amsterdam, April 1898; Comm. Leiden Nr. 44.

3) E. Wagner, Inaug.-Diss. München 1904 und Ann. d. Phys. 15. p. 906. 1901. Vgl. auch G. Klein, Inaug.-Diss. Technische Hochschule Berlin 1909.

erfährt, zufolge der Reibung des Öls, welches durch den kleinen Zwischenraum zwischen Kolben und Zylinder strömt, und findet, daß diese Kraft in der Praxis bei genauen Messungen meistens nicht vernachlässigt werden darf. Um deshalb aus den Angaben des Manometers den richtigen Druck zu berechnen, muß man an denselben eine Korrektion anbringen; aber da im Ausdrucke für die Kraft außer Konstanten des Apparates nur der Druck als Faktor auftritt, kann man diese Korrektion an die Fläche anbringen, auf welche der Druck wirkt; der so korrigierte Querschnitt, der funktionelle Querschnitt, ist deshalb den theoretischen Betrachtungen von Wagner zufolge eine Konstante des Apparates und weicht natürlich etwas von dem wirklichen Durchschnitt ab. Wagner bestimmte mittels Versuchen bei niedrigem Drucke den funktionellen Querschnitt seines Amagatmanometers; er maß den wirklichen Querschnitt und fand — beide einander gleich! Dieses Resultat ist streitig mit der Theorie, was, angenommen, daß Wagners Versuche Vertrauen verdienen, darauf weist, daß die Theorie nicht so einfach ist und daß vielleicht noch andere Faktoren da sind, welche ihren Einfluß geltend machen auf den funktionellen Querschnitt, wodurch es dann vielleicht selbst möglich wäre, daß der funktionelle Querschnitt sich abhängig vom Drucke zeigen würde.

Um dies alles zu Klarheit zu bringen, d. h. um eine Theorie der Druckwage aufzustellen und diese Theorie am Experiment zu prüfen, soll man einerseits das Instrument vom experimentellen Gesichtspunkt aus so ausführlich wie möglich studieren, d. h. die Anweisungen des Instruments über einem möglichst großen Gebiete von Drucken vergleichen mit denen eines Standardmanometers, und andererseits die Abmessungen der Einzelteile des Instruments sehr genauen Messungen unterwerfen. Auf Grund der also erhaltenen Resultate wird es dann vielleicht möglich sein, eine mehr exakte Theorie aufzubauen.

Würde sich nun bei der Prüfung zeigen, daß der funktionelle Querschnitt in Übereinstimmung mit Wagners Theorie über dem ganzen Gebiete der Vergleichung unabhängig vom Drucke ist, so würde man Grund haben, um auch außerhalb des Gebietes, über welchem die Vergleichung mit dem offenen Manometer fortgesetzt werden könnte (nämlich oberhalb

120 Atmosphären), zu extrapolieren und deshalb bei der Anweisung von 250 Atmosphären den wirklichen Druck mit demselben funktionellen Querschnitt, wie z. B. bei 100 Atmosphären gefunden wurde, zu berechnen; die große Druckwage des van der Waals-Fonds, die ein Meßbereich von 250 bis 5000 Atmosphären hat, könnte dann bei 250 Atmosphären mit der kleinen verglichen werden und die mit beiden Instrumenten von Kohnstamm und Walstra gemessenen Drucke der Isothermen von Wasserstoff könnten dann mit Hilfe der also bestimmten funktionellen Querschnitte korrigiert werden.

Vorläufig sind wir, auch in Zusammenhang mit der Bestimmung der Isotherme bei 20°C. , die in einer anderen Abhandlung¹⁾ behandelt ist, mit der Vergleichung nur bis 100 Atmosphären gegangen. Das Gebiet von 60—100 Atmosphären lieferte schon genug Auskunft, um eine weitere systematische Untersuchung von verschiedenen Fragen über die Theorie der Druckwage wünschenswert zu machen, eine Untersuchung, bei welcher aber die Leidener Apparate nicht nötig sind. Mit der Fortsetzung der Bestimmungen, die bei steigendem Drucke immer schwerer werden, haben wir gemeint warten zu können, bis diese Untersuchung vollendet sein wird.

§ 2. *Experimentelle Methode.* — Eine gleichzeitige Ablesung des offenen Manometers und der Druckwage war nicht möglich. Bei der Druckwage ist nämlich der Druck in den Ölleitungen nur dann konstant, wenn der Kolben mit den Gewichten frei dreht und dies dauert nicht länger als höchstens ein paar Minuten; ist die Rotationsbewegung fast zur Ruhe gekommen, und bringt man den Kolben mit der Hand wieder in Drehung, dann übt man, wie vorsichtig man es auch tut, auf den Kolben kleine vertikale Kräfte aus, die sich als Druckstöße in den Leitungen fortpflanzen und das Druckgleichgewicht zerstören. Nun fordern die Ablesungen am offenen Manometer eine viel längere Zeit als die paar Minuten, die die sich selber überlassene Druckwage uns zur Verfügung stellt, ja, wenn alle Röhren unter Druck stehen, dauert eine solche Ablesung, ausgeführt von zwei zusammenwirkenden Beobachtern, ungefähr $\frac{3}{4}$ Stunden.

1) H. Kamerlingh Onnes, C. A. Crommelin und Frl. E. I. Smid, l. c.

Mit einer gleichzeitigen Ablesung von Druckwage und offenem Manometer waren deshalb fast unüberwindliche Schwierigkeiten verbunden, so daß wir beschlossen, die Vergleichung auszuführen mit Vermittlung der beiden geschlossenen Wasserstoffmanometer des Leidener Instituts, M_{60} und M_{120} , von welchen das erste ein Meßbereich von 20—60 Atmosphären, das zweite ein Meßbereich von 60—120 Atmosphären besitzt. Wir wollen hier schon darauf hinweisen, daß diese Weise von Arbeiten der beabsichtigten Genauigkeit in keiner einzigen Hinsicht geschadet hat, sowie sich außerdem aus der Diskussion im folgenden Paragraph zeigen wird.

Die Figur auf Taf. III stellt das offene Manometer OM , die beiden geschlossenen Manometer M_{60} und M_{120} und die Druckwage DB mit ihrer Ölpreßpumpe OP nebst den Leitungen und Hähnen vor, durch welche die verschiedenen Instrumente miteinander in Verbindung gebracht werden. Die Einrichtung und Art der Bearbeitung der verschiedenen Manometer ist schon öfters beschrieben und abgebildet, so daß wir darauf jetzt nicht näher einzugehen brauchen.¹⁾

Eine kleine Komplikation verursachte noch das Überbringen des Druckes von den mit Öl gefüllten Leitungen der Druckwage auf die Leitungen der Leidener Manometer, in welchen für das Überbringen des Druckes immer zusammengepreßte Luft gebraucht wird. Das Überbringen geschah mittels des Stahlrohres D , mit dem Visierglase P_3 . Das Niveau des Öls darin konnte mit Hilfe der Ölpumpe OP immer passend auf richtiger Höhe gehalten werden. Als diese Einrichtung einige Zeit in Gebrauch war, zeigte es sich, daß kleine Druckänderungen im Öl, verursacht durch das Auflegen von kleinen Gewichten auf den Kolben, nur sehr langsam und träge nach

1) Offenes Standardmanometer: H. Kamerlingh Onnes, Sitzungsber. Amsterdam, Oktober 1898; Comm. Leiden Nr. 44, und J. C. Schalkwijk, Inaug.-Diss. Amsterdam 1902. H. Kamerlingh Onnes, C. Dorsman u. G. Holst, Sitzungsber. Amsterdam Juni 1915; Comm. Leiden Nr. 146a. — Manometer M_{60} : H. Kamerlingh Onnes u. H. H. F. Hyndman, Sitzungsber. Amsterdam März 1902; Comm. Leiden Nr. 78, § 17. H. Kamerlingh Onnes u. C. Braak, Sitzungsber. Amsterdam Dezember 1906; Comm. Leiden Nr. 97a, § 3. — Manometer M_{120} : H. Kamerlingh Onnes, C. Dorsman u. G. Holst, l. c. H. Kamerlingh Onnes, C. A. Crommelin u. Fr. E. I. Smid, l. c. — Druckwage: Ph. Kohnstamm u. K. W. Walstra, l. c.

den Manometern M_{60} und M_{120} übergebracht wurden; es war deshalb wünschenswert, den Druck im Öl der Druckwage mittels Röhren, ausschließlich mit Flüssigkeit gefüllt, auf das Quecksilber der geschlossenen Manometer zu überbringen und so die Luftleitungen auszuschalten. Diese Einrichtung konnte bequem an M_{120} angebracht werden, indem man an Hahn K_{23} (der eigentlich dazu dient, um das Manometer beim Montieren mit Quecksilber zu füllen) ein Stahlrohr mit Visierglas P_1 anschraubt. Hinter diesem Visierglase wird ein zweites Visierglas P_2 montiert, und dieses zweite Visierglas stand in Verbindung mit den Ölleitungen. Vom Quecksilber unten im ersten Visierglase auf das Öl oben im zweiten Visierglase wird der Druck mittels Glyzerin überbracht.

Wir erzeugten nun den Druck erst auf die gewöhnliche Weise mit zusammengepreßter Luft; öffnete man dann den Hahn K_{30} und schloß man die Hähne K_{27} und K_{28} , dann hatte man eine Drucküberbringung ausschließlich mittels Flüssigkeiten. Das Weiteraufführen des Druckes geschah mit Hilfe der Ölpumpe. Diese Einrichtung entsprach vollkommen den Erwartungen; Druckänderungen von $\frac{1}{10000}$ im Öl der Druckwage wurden jetzt augenblicklich durch M_{120} angewiesen.

§ 3. *Genauigkeit.* — Damit man sich ein Urteil bilden könne über die zu erwartende Genauigkeit, dürfen hier einige Angaben folgen über die absolute und relative Genauigkeit der Anweisungen der verschiedenen Instrumente.

Das offene Manometer gibt, unter der Bedingung, daß es nicht leckt, und bei sorgfältig konstant gehaltener Zimmertemperatur, mit Sicherheit eine, natürlich absolute, Genauigkeit von 0,01 Proz.

Das Manometer M_{60} garantiert, wenn man bei der Ablesung von 0,1 mm sicher ist (und dies kann ohne Zweifel erreicht werden),

bei 20 Atmosphären eine Genauigkeit von 0,008 Proz.,

„ 60 „ „ „ „ 0,020 „

Für das Manometer M_{120} gelten die folgenden Zahlen:

bei 65 Atmosphären eine Genauigkeit von 0,007 Proz.,

„ 100 „ „ „ „ 0,016 „

Die für diese beiden Manometer angegebene Genauigkeit ist nicht nur relativ, sondern auch für eine große Anzahl Punkte absolut, weil beide Instrumente bei jenen Punkten direkt mit dem offenen Manometer verglichen sind. Was die Druckwage betrifft, so war weder über die absolute noch über die relative Genauigkeit beim Anfange unserer Untersuchung etwas mit Sicherheit bekannt. Nur hatte man feststellen können, daß die Empfindlichkeit der Einstellung in der Nähe des eingestellten Druckes sehr groß ist und gewiß wohl 0,02 bis 0,01 Proz. beträgt. War z. B. die Druckübertragung mit Flüssigkeiten in Wirkung und war die Druckwage belastet mit 65 kg, dann konnte man eine Zufügung von 10 g an die Belastung mit vollkommener Sicherheit auf M_{120} wahrnehmen. Die Ergebnisse über die Genauigkeit der Druckwage, die wir jetzt aus unserer Untersuchung bekommen haben, werden bei der Diskussion der Resultate zur Sprache kommen.

§ 4. *Die Berechnungen.* — Die Berechnungen der Anweisungen des offenen Manometers sind im Prinzip sehr einfach; auf die verschiedenen Korrekturen muß aber die nötige Aufmerksamkeit verwendet werden, wenn man der Genauigkeit von 0,01 Proz. sicher sein will. Diese Korrekturen sind von Schalkwijk in seiner Inauguraldissertation ausführlich diskutiert worden, so daß wir uns hier auf ein paar Bemerkungen beschränken können. Die Korrektur infolge des Gewichtes der Säulen zusammengepreßter Luft, welche dazu dienen, um den Druck des einen Rohres auf das andere überzubringen, wird bei den höheren Drucken ziemlich bedeutend. Wir hätten statt Luft, Wasserstoff gebrauchen können¹⁾, was einen doppelten Vorteil bedeutet haben würde: erstens wird dadurch die Korrektur mehr als zehnmal kleiner, und zweitens ist die Isotherme von Wasserstoff bei 20° jetzt bis 100 Atmosphären mit großer Genauigkeit bekannt²⁾, so daß

1) Diese Methode wurde schon 1898 von H. Kamerlingh Onnes empfohlen; vgl. Sitzungsber. Amsterdam Oktober 1898, Comm. Leiden Nr. 44.

2) J. C. Schalkwijk, Sitzungsber. Amsterdam, Dezember 1900 und Januar 1901; Comm. Leiden Nr. 67; Sitzungsber. Amsterdam Mai und Juni 1901; Comm. Leiden Nr. 70; Inaug.-Diss. Amsterdam 1902. H. Kamerlingh Onnes, C. A. Crommelin u. Fr. E. I. Smid, Sitzungsber. Amsterdam Juni 1915; Comm. Leiden Nr. 146b. Für die Temperatur-

die Korrektur mit großer Genauigkeit berechnet werden kann. Wohl muß man dann über sehr reinen Wasserstoff verfügen, um sicher vom spezifischen Gewicht sein zu können, aber durch Destillation wird im Kryogenen Institut so vollkommen reiner Wasserstoff bereitet, daß der relativ große Einfluß von Spuren hinzugemischter Luft auf das spezifische Gewicht nicht gefürchtet zu werden braucht. Wir haben uns aber davon überzeugt, daß es für Drucke bis 100 Atmosphären noch nicht nötig war, zu dieser Komplikation überzugehen, und wir haben es deshalb bevorzugt, die Korrektur für Luft zu berechnen.

Dafür standen zu Gebote die Isothermen von Amagat¹⁾, welche von Brinkman²⁾ und von Kamerlingh Onnes³⁾ auf verschiedene Weise durch Gleichungen dargestellt sind, mit welcher Hilfe Korrekturtabellen berechnet wurden. Die Korrekturen, berechnet nach beiden Methoden, stimmen selbst bei 100 Atmosphären noch bis auf 0,5 mm überein. Die Resultate beweisen, so wie aus der Fortsetzung sich zeigen wird, daß auf diese Weise die Korrektur mit genügender Genauigkeit genähert wird.

Die Korrektur für die Zusammendrückbarkeit des Quecksilbers bleibt wohl, selbst bis 100 Atmosphären, gering, aber kommt doch in Betracht. Auch für diese Korrektur haben wir eine Tabelle berechnet, welcher der Zusammendrückbarkeitskoeffizient 0,00000392 nach Amagat zugrunde gelegt ist.

Die Korrektur infolge des Strömens des Quecksilbers durch die Röhre, ausführlich von Schalkwijk diskutiert, brauchte nicht angebracht zu werden: das Quecksilber stand vollkommen still. Infolge der an die Glasröhren gelöteten Stahlröhrchen, der Fiberpackungen und des Öls, in welches alle Verbindungen getaucht waren⁴⁾, ist es uns gelungen,

korrektur vergleiche man die empirische Zustandsgleichung von H. Kamerlingh Onnes in der Abhandlung von J. P. Dalton, Sitzungsber. Amsterdam, März 1909; Comm. Leiden Nr. 109a.

1) E. H. Amagat, Ann. de chim. et de phys. (6) **29**, Juni u. August 1893.

2) C. H. Brinkman, Inaug.-Diss. Amsterdam 1904.

3) Vgl. J. P. Dalton, Sitzungsber. Amsterdam, April 1909, § 2; Comm. Leiden Nr. 109c.

4) Die Öltröge sind auf der etwas schematisch gehaltenen Figur fortgelassen. Für einige der erwähnten Verbesserungen vgl. H. Kamerlingh Onnes, Sitzungsber. Amsterdam, Mai 1905; Comm. Leiden Nr. 94b.

das offene Manometer selbst bei 100 Atmosphären vollkommen frei von Lecken zu erhalten, während außerdem die Zimmertemperatur so gut konstant gehalten wurde (Dampfheizung, verbesserte Beleuchtung mit Metalldrahtlampen, die sehr wenig Wärme geben usw.), daß selbst bei den sehr zeitraubenden Ablesungen bei den höheren Drucken von Strömung fast nichts zu spüren war.

Die Korrekturen für die Kapillardepression sind nicht angebracht worden. Eine Diskussion lehrte, daß die algebraische Summe dieser Korrekturen keinen Einfluß auf die beabsichtigte Genauigkeit haben würde, besonders wenn durch Klopfen gegen die Röhre für schöne kugelförmige Menisci gesorgt wurde.¹⁾ Das Anbringen würde große Schwierigkeiten mit sich gebracht haben, weil bei der angewendeten Beleuchtungsweise die Höhen der Menisci mittels der Theodoliten, mit welchen die Menisci abgelesen werden, nicht zu bestimmen waren. In bezug auf die weiteren Korrekturen ist nichts Besonderes zu bemerken.

Die Berechnung der Anweisungen der Manometer M_{60} und M_{120} gibt ebensowenig Anlaß zu Bemerkungen. Was die Belastung der Druckwage betrifft, muß man beachten, daß diese aus dem Totalgewicht von Kolben und aufgelegten Gewichten besteht, vermehrt mit dem atmosphärischen Drucke, multipliziert mit dem funktionellen Querschnitt. Die Atmosphäre in Leiden ist 75,9488 cm Quecksilber gleichgesetzt, während weiter für 1 Atmosphäre 1,0336 kg pro Quadratcentimeter gestellt ist.

§ 5. *Messungen und Resultate.* — Wie in § 2 auseinander gesetzt wurde, bestanden die Messungen: 1. in einer Vergleichung von M_{60} und M_{120} mit dem offenen Manometer; 2. in einer Vergleichung der Druckwage mit M_{60} und M_{120} .

Wir werden zuerst die Messungen von 20–60 Atmosphären, ausgeführt mit Hilfe von M_{60} , besprechen.

Bevor wir dazu übergangen, M_{60} mit der Druckwage zu vergleichen, haben wir uns durch eine Vergleichung von M_{60} mit dem offenen Manometer²⁾ davon überzeugt, daß die An-

1) Auch hier beweisen die Resultate, daß die Behauptung wahr ist.

2) H. Kamerlingh Onnes, C. A. Crommelin und Frl. E. I. Smid, l. c.

weisungen des geschlossenen Manometers das Vertrauen, welches sie sich in den letzten Jahren immer erfreut hatten, wirklich noch verdienten. Wie in der zitierten Mitteilung erwähnt wird, gab diese Vergleichung als Resultat, daß das geschlossene Manometer, seit der letzten Vergleichung¹⁾ vor einigen Jahren, sich gar nicht geändert hatte.

Die Vergleichung von M_{60} mit der Druckwage geschah nun wie folgt. Es wurde eingestellt auf einen bestimmten Druck, die Druckwage wurde dann in Drehung gesetzt, und so lange gewartet, bis die Quecksilbersäule in M_{60} nicht mehr ihren Stand änderte. Die Druckübertragung geschah von Luft auf Öl, und weil die Druckstöße beim In-Drehung-Setzen und -Halten der Druckwage sich nur sehr träge nach M_{60} fortpflanzten, gelang es uns, an der Druckwage zu drehen, ohne daß einige Änderung im Stande der Quecksilbersäule gemerkt werden konnte. Blieb die Quecksilbersäule nun geraume Zeit konstant, dann wurde eine Ablesung getan.

Tabelle I gibt die Resultate von zwei Reihen Messungen. Bei den Messungen am 22. Juni war die Druckwage wieder sorgfältig zentriert, weil wir meinten, daß die Zentrierung zu wünschen übrig gelassen hatte.

Die in dieser Tabelle mit * bezeichneten Beobachtungen sind berechnet mit Hilfe der Isothermen von Schalkwijk und bei diesen Beobachtungen hat das geschlossene Manometer deshalb nicht nur als Indikator gedient. Die Übereinstimmung zwischen beiden Arten von Wahrnehmungen zeigte sich aber so ausgezeichnet, daß man die direkte Feststellung des Druckes mit dem offenen Manometer für die mit * bezeichneten Punkte unterlassen durfte.

Wir gehen jetzt über zu den Messungen von 60–100 Atmosphären, ausgeführt mit Hilfe von M_{120} .

Bei diesem Instrumente konnten wir nicht so wie bei M_{60} über die Verifikation der Einstellungen mittels der Isothermen und der Kalibration verfügen, da die Eichung vor einigen Jahren²⁾ die wünschenswerte Genauigkeit nicht völlig geliefert zu haben schien, auf Grund dessen sie zugleich mit diesen Bestimmungen wiederholt und ausgebreitet und durch eine

1) H. Kamerlingh Onnes, C. Dorsman u. G. Holst, l. c. § 3, Schluß.

2) Ibid. § 4.

Tabelle I.

Vergleichung der Druckwage mit M_{60} .

Datum	Nr.	Belastung der Druck- wage in kg	M_{60} in kg pro qcm, vermin- dert mit dem atmosphäri- schen Drucke	Reziproker funktioneller Querschnitt in qcm	Funk- tioneller Quer- schnitt in qcm
6. Febr. 1915	I	21,650	21,729	1,0036	0,9964
	IX*	25,650	25,744	36	64
	II*	31,410	31,520	35	65
	VIII*	36,000	36,121	33	67
	III	41,760	41,895	32	68
	VII*	46,050	46,188	30	70
	IV*	50,130	50,269	28	72
	VI*	55,710	55,848	25	75
	V	61,300	61,445	24	76
22. Juni 1915	VIII*	25,000	25,089	1,0035	0,9965
	I*	30,000	30,086	28	72
	VII*	35,000	35,092	26	74
	II	40,000	40,114	28	72
	VI*	45,000	45,098	22	78
	III*	50,000	50,120	24	76
	V *	55,000	55,112	20	80
	IV	60,000	60,112	19	81

neue Eichung ersetzt wurde. Wir haben in diesem Gebiete die Vergleichung denn auch bei einer großen Anzahl Punkte ausgeführt. Die dabei gebrauchten Einstellungen konnten nach der Vollendung dieser Untersuchung¹⁾ jede für sich geprüft werden durch Vergleichung mit der aus den sämtlichen Punkten abgeleiteten Isothermen. Wäre das Manometer mit einem anderen Gase oder mit einer willkürlichen Gasmischung gefüllt gewesen, seinen Dienst als Vermittler zwischen Druckwage und offenem Manometer hätte es darum ebensogut leisten können.

In Tabelle II teilen wir die Resultate der Vergleichung der Druckwage mit M_{120} für ein Gebiet von 60—100 Atmosphären mit. Die Messungen am 27. und 29. März und am 24. Juni sind ausgeführt mit der Drucküberbringung Gas—Flüssigkeit (ebenso wie die Messungen mit M_{60}), die am 23. und 24. April und am 18. und 19. Juni dagegen mit Hilfe des später angebrachten Flüssigkeitssystems Quecksilber—Glyzerin—Öl, so wie dies in einem der vorigen Paragraphen beschrieben ist.

1) H. Kamerlingh Onnes, C. A. Crommelin u. Frl. E. I. Smid, l. c.

Tabelle II.
Vergleichung der Druckwage mit M_{120} .

Datum	Nr.	Belastung der Druck- wage in kg	M_{120} in kg pro qcm, ver- mindert mit dem atmo- sphär. Drucke	Reziproker funktioneller Querschnitt in qcm	Funk- tioneller Quer- schnitt in qcm
27. März 1915	I	67,000	67,143	1,0021	0,9979
	II	71,050	71,210	22	78
	III	75,000	75,147	19	81
	IV	79,650	79,865	27	73
	V	83,500	83,729	27	73
	VI	87,550	87,795	28	72
	VII	91,050	91,291	26	74
	VIII	95,550	95,790	25	75
	IX	99,500	99,815	31	69
	X	103,500	103,884	37	63
29. März 1915	X	67,200	67,329	1,0019	0,9981
	IX	71,100	71,236	19	81
	VIII	75,100	75,248	19	81
	VII	79,600	79,776	22	78
	VI	83,050	83,329	33	67
	V	87,550	87,745	22	78
	IV	91,050	91,292	26	74
	III	95,450	95,694	25	75
	II	99,350	99,667	32	68
24. Juni 1915	I	103,350	103,686	32	68
	II	75,000	75,187	1,0025	0,9975
	VII	80,000	80,216	27	73
	III	85,000	85,234	27	73
	VIII	90,000	90,271	30	70
	IV	95,000	95,298	31	69
23. April 1915	IX	100,000	100,362	36	64
	I	67,000	67,174	1,0026	0,9974
	II	71,000	71,212	29	71
	III	75,000	75,217	29	71
	IV	79,000	79,239	30	70
	V	83,000	83,268	32	68
	VI	87,000	87,263	30	70
	VII	91,000	91,294	32	68
	VIII	95,000	95,338	35	65
	IX	99,000	99,383	38	62
24. April 1915	X	103,000	103,406	39	61
	X	67,000	67,174	1,0026	0,9974
	IX	71,000	71,180	26	74
	VIII	75,000	75,229	30	70
	VII	79,000	79,259	32	68
	VI	83,000	83,272	32	68
	V	87,000	87,278	32	68

Tabelle II (Fortsetzung).

Datum	Nr.	Belastung der Druck- wage in kg	M_{120} in kg pro qcm, ver- mindert mit dem atmo- sphär. Drucke	Reziproker funktioneller Querschnitt in qcm	Funk- tioneller Quer- schnitt in qcm
24. April 1915	IV	91,000	91,313	1,0034	0,9966
	III	95,000	95,328	34	66
	II	99,000	99,395	39	61
	I	103,000	103,423	41	59
18. Juni 1915	III	70,000	70,185	1,0026	0,9974
	IV	80,000	80,263	32	68
	V	90,000	90,295	32	68
	VI	100,000	100,390	39	61
18. Juni 1915	X	70,000	70,181	1,0025	0,9975
	IX	80,000	80,256	32	68
	VIII	90,000	90,301	33	67
	VII	100,000	100,360	36	64
19. Juni 1915	III	70,000	70,179	1,0025	0,9975
	IV	80,000	80,247	30	70
	V	90,000	90,286	31	69
	VI	100,000	100,375	37	63

§ 6. *Diskussion.* Aus den Resultaten aller Messungen, wie sie zusammengefaßt sind in obenstehenden Tabellen, zeigt sich das Folgende:

1. Der funktionelle Querschnitt ist nicht unabhängig vom Drucke, doch beim Steigen des Druckes über 20 Atmosphären nimmt er zu, um durch ein Maximum bei etwa 70 Atmosphären zu gehen, und dann wieder und wohl stärker abzunehmen, soweit die Vergleichung ausgedehnt wurde. Die größte Abweichung war 0,0020.

2. Bei wiederholten Bestimmungen wurde für den funktionellen Querschnitt nicht immer derselbe Wert gefunden; die größte Abweichung beträgt hier ungefähr 0,0005.

3. Der funktionelle Querschnitt unterscheidet sich vom geometrischen Querschnitt, wie dieser von Schäffer und Budenberg angegeben wird (1 qcm), und wohl ungefähr 0,0030.

4. Die Empfindlichkeit der Druckwage, $\frac{1}{10000}$, übertrifft deshalb weit ihre Genauigkeit. Um diese zu dem Werte der Empfindlichkeit aufzuführen, muß die Theorie des Instruments entwickelt und ein Mittel gefunden werden, um konstante

Anweisungen zu erhalten innerhalb der Grenzen der Empfindlichkeit. Wahrscheinlich muß eine Druckwage, um diese Genauigkeit zu erreichen, wohl immer unmittelbar oder mittelbar mit einem offenen Manometer verglichen werden.

5. Von den Drucken, gemessen mit einer nicht untersuchten Druckwage von Schäffer und Budenberg, kann man, angenommen, daß der Kolben keinen größeren Abmessungsfehler hat als 0,1 Promille, vorläufig auf nicht mehr als $\frac{1}{400}$ sicher sein.

Schließlich sagen wir Hrn. Prof. Kamerlingh Onnes in Leiden und Hrn. Prof. Kohnstamm in Amsterdam herzlichst Dank für ihr fortdauerndes Interesse an unserer Arbeit.

Leiden, Physikalisches Institut der Reichs-Universität,
im Juni 1915.

(Eingegangen 12. Oktober 1916.)