

## 2. *Über absolute Messung hoher Drucke mit dem Amagatschen Manometer;* *von Peter Paul Koch und Ernst Wagner.*

---

Die Veranlassung zu vorliegender Arbeit bot die Untersuchung des einen von uns<sup>1)</sup> „Über das Verhältnis der spezifischen Wärmen  $c_p/c_v$  in Luft als Funktion des Druckes bei den Temperaturen  $0^\circ$  und  $-79,3^\circ \text{C.}$ “, worin zur Messung der absoluten Druckwerte dasselbe Amagatmanometer (mit dem Reduktionsfaktor der Drucke 61,45) benutzt wurde, über dessen Leistungsfähigkeit und Konstantenbestimmung der andere von uns früher<sup>2)</sup> berichtet hatte. Obwohl nun die damals geübte Bestimmung des Reduktionsfaktors die bedenkliche Methode einer geometrischen Abmessung der beiden Kolbenflächen vermied und nach der sogenannten „Gewichtsmethode“ geschah, welche die wahren „funktionellen“ Druckflächen der beiden Kolben *einzel*n rein experimentell ermittelte und als eine ebenso zuverlässige und genaue (etwa 1 Promille Fehler höchstens), wie praktisch leicht ausführbare Methode sich zu bewähren schien, so blieb doch eine noch direktere experimentelle Nachprüfung des Reduktionsfaktors erwünscht. Diese mußte offenbar darin bestehen, daß sie die *zwei* beim Gebrauch des Instrumentes wirksamen Drucke *zugleich* direkt in Quecksilberhöhen maß. Denn eine solche Messung liefert augenscheinlich ohne jede Voraussetzung über das Zusammenwirken der einzelnen Kolben, wie sie die Gewichtsmethode bewußtmaßen macht, direkt die entscheidende Prüfung jener Zahl. Zugleich konnte auf diese Weise noch die Empfindlichkeit des Amagatmanometers bestimmt werden, d. h. die l. c. sogenannte „Indifferenzbreite“ der Einstellung des Quecksilbermeniskus gegen kleine Druckänderungen.

---

1) P. P. Koch, Ann. d. Phys. 27. p. 311. 1908.

2) E. Wagner, Ann. d. Phys. 15. p. 906. 1904. Als l. c. im folgenden bezeichnet.

Da der Reduktionsfaktor ca. 60 war, so erforderte der hohe Druck schon recht beträchtliche Quecksilberhöhen, damit der reduzierte Druck noch genau genug (auf wenigstens 1 Promille) meßbar wurde.

Die Möglichkeit zu dieser Messung gab uns der 25 m hohe Institutsturm, der durch seine geschützte Nordlage, seine im Verhältnis zum Innenraum sehr große Wandstärke einen selten günstigen Experimentierraum gewährte, indem er durch die Geringfügigkeit der Temperaturänderung mit der Höhe und größte zeitliche Temperaturkonstanz die unumgängliche Vorbedingung zur genauen Messung so hoher Quecksilberdrucke erfüllte.

#### Die Versuchsanordnung

war dementsprechend folgende: Das Quecksilber der *hohen Säule* lief in einem Stahlrohr, das aus zehn je 2—3 m langen dünnwandigen (ca.  $\frac{1}{3}$  mm Wandstärke) Mannesmannröhren von 5,2 mm innerem Durchmesser zusammengesetzt war, deren Inneres ausgiebig mit Benzin und auch mechanisch gereinigt war. Die Enden der einzelnen Röhren erhielten flach eingeschnittene Gewinde und wurden mittels heißfließenden Siegelacks durch aufgeschraubte Stahlmuttern verbunden, ein Verfahren, das sich sehr gut hinsichtlich der Dichtigkeit gegen den bis zu 30 Atm. gehenden Hg-Druck bewährte.

Die gesamte Röhre hing an einer Schnur, die über in die Turmdecke eingelassene Rollen lief und durch entsprechende Gewichte gespannt wurde. Nach Lage der Wendeltreppe im Turm ergaben sich vier ziemlich äquidistante Stationen, von denen aus die Ablesung des Quecksilberstandes geschehen sollte. Die unterste Station zu ebener Erde sei weiterhin als Station 1, die folgenden mit 2, 3, 4 bezeichnet. Bei 4 mündete das lange Stahlrohr direkt in ein Glasrohr von 30 cm Länge ein, während an den übrigen 3 Stationen in das Stahlrohr besondere massive Stahlstücke ebenfalls mittels heiß verkitteter Gewinde eingeschaltet waren, die von der Société Genevoise nach der gezeichneten Form hergestellt waren (Fig. 1).

In die Längsbohrung *L* mündete der durch den konischen Hahn *H* abschließbare Seitenkanal *S*, welcher einen kurzen Ansatz trägt, in den das Glasrohr *G* von 30 cm Länge parallel zu

$L$  eingekittet wird. Es war darauf geachtet, daß die vier Hg-Standglasrohre in einer Vertikalen übereinander lagen.

Bei Station 1 mündete das lange Stahlrohr in einem für hohe Drucke früher gebauten stählernen sehr massiven Druckzylinder (vgl. Fig. 2), der das 2,5 Liter haltende Quecksilberreservoir faßte. Sein Deckel war druckdicht mit Schrauben verschließbar, durch seine zentrale Bohrung führte das Stahlrohr gleichfalls durch eine einfache Verschraubung druckdicht ins Innere.

Zur Messung der Höhe der hohen Quecksilbersäule lief ein 1,7 mm dicker Draht aus Invar (Nickelstahl, geliefert unter liebenswürdiger Vermittelung

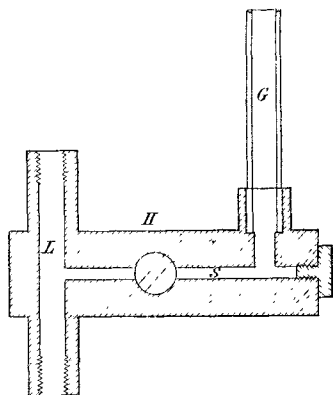


Fig. 1.  $\frac{1}{2}$  natürl. Größe.

des Hrn. Prof. Guillaume von den Stahlwerken in Imphy) vertikal dicht neben den vier Glasrohren vorbei. Unten war er an dem schweren Druckzylinder fixiert, oben bei Station 4 lief er über eine große Holzrolle von 54 cm Durchmesser (zur Vermeidung von für das Material schädlichen Verbiegungen) und ward vorschriftsgemäß mit 10 kg Gewicht gespannt. An diesem gegen Temperaturänderungen fast unempfindlichen Drahte waren dicht neben den Glasrohren je 30 cm lange Messingmaßstäbe durch Klemmungen befestigt und zur Vorsicht die Lage jedes Maßstabes gegen den Invardraht durch einige feine Feilstriche auf dem letzteren festgelegt. Da der reduzierte Quecksilberdruck am Amagatmanometer, wie sich im Verlauf der Arbeit herausstellte, auf ca.  $\frac{1}{10}$  mm Hg genau sich einstellte, so brauchte die Hochdrucksäule nur auf einige wenige Millimeter Hg genau abgelesen zu werden, was daher mit freiem Auge geschah.

Die Messung der Entfernung der Maßstäbe auf den einzelnen Stationen voneinander geschah mit einem 20 m langen in Millimeter geteilten Stahlbandmaß. Die maximale Höhe der Hg-Säule betrug ca. 23 m entsprechend einer Höhe von ca. 370 mm Hg am reduzierten Druck.

Zum Zwecke der *Temperaturmessung* hingen bei jeder Ablesestation frei in der Luft und dicht neben dem langen Stahlrohr Quecksilberthermometer.

Die *Aufstellung und Handhabung des Amagatmanometers* selbst geschah in der l. c. angegebenen bewährten Weise. Der Rand des Quecksilberbassins wurde mit einer Libelle horizontal gestellt, so daß die gleiche Aufstellung des Apparates später wieder gefunden werden konnte. Der Bronzekolben ward stets mit Rizinusöl gedichtet, der Stahlkolben in der ersten Versuchsreihe mit Melasse, später ebenfalls mit Rizinusöl. Da in der vorliegenden Untersuchung größere Anforderungen an die Genauigkeit der Messung des reduzierten Druckes zu stellen waren ( $\frac{1}{10}$  mm Hg), so wurde zur Vermeidung von Kapillarfehlern das Quecksilbersteigrohr recht weit (11 mm Durchmesser) gewählt. Die Stellung der Hg-Kuppe konnte an einer in die Vorderwand des Steigrohres geätzten Millimeterteilung abgelesen werden. Beobachtet wurde diese aus ca. 3 m Entfernung mittels Kathetometerfernrohrs, dessen Achse mit einer Libelle immer in gleiches Niveau mit der Hg-Kuppe gebracht war.

Zur *Erzeugung des Druckes* diente eine Bombe mit flüssiger Kohlensäure, die bei den herrschenden Temperaturen von  $10^{\circ}$  bis  $6^{\circ}$  C. gerade noch den maximalen Druck von 30 Atm. lieferte. Als freilich in der zweiten Versuchsreihe einmal die Temperatur auf ca.  $5^{\circ}$  gesunken war, mußte eine Stickstoffbombe von 200 Atm. Druck nachhelfen.

Wie aus der schematischen Zeichnung der Druckanlage (Fig. 2) zu ersehen ist, übermittelten Kupferkapillaren den Gasdruck gleichzeitig dem Amagatmanometer und dem Druckzylinder. Dieser empfing durch eine in seinem Boden befindliche Durchbohrung das etwas gebogene Stahlrohr, das wieder durch Verschraubung abgedichtet war. Mit Hilfe zweier konischer Stahlventile  $D_1$  und  $D_2$  Kammerlingh-Onnesscher Konstruktion konnte man sehr sicher und bequem den Gasdruck langsam zulassen und zur rechten Zeit das Drucksystem abschließen. Um den hierin gerade herrschenden Druck genau verfolgen zu können — was für den Moment wichtig zu wissen war, wann die Hähne zu den Hg-Standglasrohren auf den einzelnen Stationen bedient werden mußten —, diente ein bestes

Metallmanometer von Schäffer und Budenberg, Magdeburg, das bis 50 kg/qcm ging und in  $\frac{1}{6}$  kg/qcm geteilt war. — Endlich war noch eine große leere Kohlensurebombe in einem 500 Liter fassenden Wasserbad in das Drucksystem eingeschaltet, um den zu messenden Gasdruck möglichst konstant zu erhalten gegenüber etwaigen kleinen Undichtigkeiten. Solche haben sich in der Tat während unserer Versuche nicht gezeigt. Zum Entspannen des Druckes konnte das System durch das Ventil.  $D_2$  zur Atmosphère geöffnet werden.

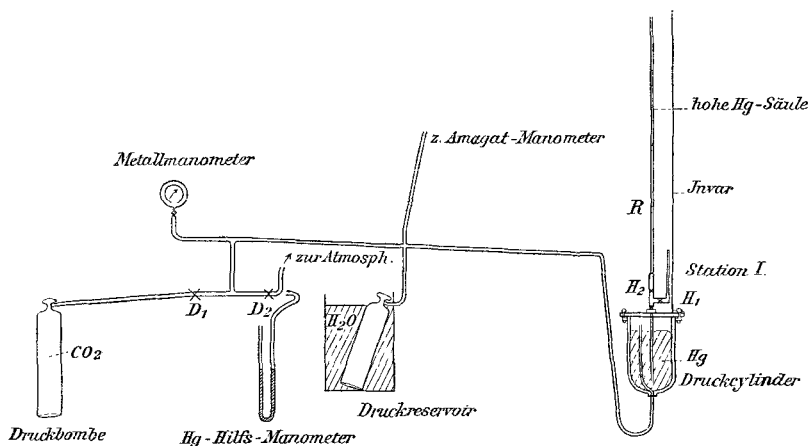


Fig. 2. (Druckanlage, schematisch.)

Diese Verwendung des Gasdruckes anstatt einer hydraulischen Presse gewährte also sehr wesentliche Vorteile:

*einmal* erzielte man wirklich auf längere Zeit mit Sicherheit konstante Drucke, was bei den zeitraubenden Einstellungen und Abmessungen der Quecksilbersäule am Amagatmanometer sehr wichtig ist und

*dann* fallen diejenigen Korrekturen an den Quecksilberdrucken fort oder werden unbedeutend, die sonst durch die hydrostatischen Drucke der druckubermittelnden Flüssigkeiten selbst auftreten.

Es bleibt noch übrig, eine *kleine Hilfseinrichtung* zu erwähnen, die gestattete, die für die Höhenmessung der hohen Hg-Säule wichtige Senkung des Quecksilberniveaus innerhalb

des Druckzylinders direkt experimentell zu bestimmen. Zu dem Zwecke konnte das aus dem Druckzylinder in das hohe Stahlrohr gepreßte Quecksilber mittels des Hahnes  $H_2$  abgeschlossen werden, der in dem beschriebenen Stahlstück der Station 1 kurz oberhalb der Seitenbohrung angebracht war. Wenn hierauf der Gasdruck im Druckzylinder soweit erniedrigt wird, daß der entsprechende Hg-Stand auf Station 1 nach Öffnen von  $H_1$  gemessen werden kann, so braucht man nur denselben Gasdruck mit einem besonderen Hg-Hilfsmanometer (vgl. Fig. 2) zu messen, um den gesuchten Stand des Quecksilberniveaus im Druckzylinder unter dem auf Station 1 zu erhalten. Auf diese Weise, die uns die recht umständlichen Kalibrierungen des langen Stahlrohres und Druckzylinders ersparte, wurde für alle Stationen die Depression des Hg-Niveaus im Druckzylinder bequem ermittelt. Die Bestimmung der ganz entsprechenden Korrektur beim Amagatmanometer geschah wie früher durch Kalibrierung der Volumina. Das diesmal besonders weite Hg-Steigrohr (mit dem Querschnitt  $q$ ) wurde am Amagatmanometer selbst auf folgende einfache Weise kalibriert. Man mißt die kleine durch Belastung mit einem Gewicht hervorgebrachte Senkung  $h$  des Bronzekolbens, dessen Querschnitt  $Q$  uns bekannt ist, an einem mit diesem Kolben fest verbundenen und parallel mitbewegten Maßstab gegen einen feststehenden Fernrohrfaden; wenn man dann noch die dem verdrängten Volum  $Q \cdot h$  entsprechende Steigung  $H$  des Quecksilbers im Steigrohr beobachtet, so folgt einfach

$$q = \frac{h}{H} \cdot Q.$$

#### Gang der Versuche.

Mit der beschriebenen Anordnung wurden im ganzen zwei Reihen von Versuchen ausgeführt, die eine (Reihe 1) während der Herbstmonate Oktober und November bei einer mittleren Turmtemperatur von  $14^\circ$  bzw.  $7^\circ$  C. und mit durch Melasse gedichtetem Stahlkolben, die andere (Reihe 2) im März des darauffolgenden Jahres, nachdem das Amagatmanometer völlig auseinander genommen und wieder zusammengesetzt worden war, bei einer mittleren Temperatur von etwa  $5^\circ$  C. und mit durch Rizinusöl gedichtetem Stahlkolben.

Die Messung des Reduktionsfaktors der Drucke erfolgte in der Weise, daß, nachdem der gewünschte Druck hergestellt war, mindestens einen halben Tag bis zum Beginn der Ablesungen gewartet wurde, eine fast überflüssige Vorsichtsmaßregel, da die Temperaturdifferenzen entlang der ganzen Säule selten mehr als  $3^{\circ}$  betrugen und die täglichen Temperaturschwankungen im Turm minimal waren. Zwischen die Messungen bei höheren Drucken wurden häufig solche bei Station 1 eingefügt und während der Reihe 1 die nötigen Messungen vorgenommen zur Bestimmung des Absinkens des Quecksilberniveaus im Druckzylinder, wenn das Quecksilber im Steigrohr bis zu den einzelnen Stationen in die Höhe gedrückt war. Die Versuche an den einzelnen Stationen waren zeitlich so angeordnet, daß jede Station (natürlich ausgenommen Station 4) durchgemessen wurde, nachdem vorher eine höhere oder tiefere Station erledigt worden war.

Zur gleichzeitigen Ablesung zusammengehöriger Werte des hohen und des reduzierten Druckes waren drei Beobachter erforderlich. Der eine rotierte die Kolben des Amagatmanometers, hielt durch Regulieren des Rizinusölreservoirs den Bronzekolben auf konstantem Niveau und sorgte durch leichtes Klopfen am Steigrohr des Amagatmanometers für ein durch Kapillareinflüsse möglichst unbeeinflusstes Einspielen der Quecksilberkuppe, der zweite las mittels des Kathetometers die Einstellung der Quecksilbersäule und zwar von Kuppe und Rand an der Teilung des Amagatsteigrohres ab, und der dritte besorgte die Ablesung der hohen Säule von der Turmtreppe aus. Die Ablesungen erfolgten meist fünf- bis sechsmal für jeden Einzelwert zusammengehöriger Einstellungen des Quecksilbers in der hohen Säule und im Amagatmanometer, und zwar bei steigendem und fallendem Quecksilber im Amagatsteigrohr, was bewerkstelligt wurde durch Druck auf bzw. Zug am Bronzekolben von außen her bei ungeändertem Druck im Gesamtsystem.

#### **Ergebnisse.**

Die Zahlenwerte der im folgenden gegebenen Tabellen sind Mittelwerte aus Einzelablesungen. Diese erfolgten wie bemerkt am Amagatmanometer meist abwechselnd bei steigen-

der und fallender Säule bei konstantem Druck im Gesamtsystem. Dabei erwies es sich als nötig, um die Indifferenzbreite für die Einstellung des Kolbensystems auf ein Minimum herabzudrücken, diese Kolben, besonders bei den Meßreihen bei tieferen Temperaturen, längere Zeit bis zu einigen Minuten zu rotieren, um die durch die Zähigkeit des Rizinusöls bzw. der Melasse bedingten Widerstände zu überwinden. Die endgültige Ablesung der Quecksilberkuppe erfolgte erst dann, wenn bei dauerndem Kolbenrotieren eine Einstellungsänderung der Säule nicht mehr eintrat. Nur unter diesen Umständen stimmten die Ergebnisse dieser Einzelablesungen am Amagatmanometer innerhalb der Ablesemöglichkeit von  $\pm 0,1$  mm überein. Die beistehenden Schemata a) und b) geben Zahlenwerte für zwei bestimmte Fälle unter der ganzen Serie von gleich gut stimmenden Versuchen.

a) 7. X. 1908. Stahlkolben gedichtet mit Melasse.

Verhalten der Säule	Ablesung der Quecksilbersäule	
	Rand in cm	Kuppe in cm
steigend	42,20	42,36
fallend	42,20	42,37
steigend	42,19	42,36
fallend	42,19	42,36

b) 5. III. 1909. Stahlkolben gedichtet mit Rizinusöl.

Verhalten der Säule	Ablesung der Quecksilbersäule	
	Rand in cm	Kuppe in cm
fallend	42,50	42,70
steigend	42,50	42,70
fallend	42,49	42,70
steigend	42,50	42,70

Tab. 1 enthält die Werte für die Ablesungen an Station 1 der Reihe 1. In Kolonne 1 steht das Datum des Versuchs,



in 2 die hier übrigens völlig belanglose Temperatur des Beobachtungsraumes korrigiert. Die Korrekturen der im Turm benutzten Thermometer sind ermittelt durch unter den üblichen Vorsichtsmaßregeln erfolgten Vergleich mit einem von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt beglaubigten Thermometer. Durch besondere Messungen mit dem Assmannschen Aspirationspsychrometer wurde konstatiert, daß die in freier Luft im Turm aufgehängten Thermometer von Strahlung nicht beeinflußt waren und die wirkliche Temperatur der Luft anzeigten. In Kolonne 3 steht der Mittelwert der Einzelablesungen für den Rand der Quecksilbersäule im Amagatsteigrohr gemessen an der auf letzterem befindlichen Teilung in Zentimetern, in 4 der entsprechende Wert für die Kuppe und in 5 die zugehörige Einstellung der Kuppe an der am Boden des Turmes befindlichen Station 1 der hohen Säule, gemessen in Zentimetern an der am Invardraht befestigten Messingskala. Um direkt untereinander vergleichbare Werte zu erhalten, sind die Zahlen der Kolonne 5 alle auf die gleiche mittlere Kuppenhöhe der Säule im Amagatsteigrohr umgerechnet mittels des provisorischen Wertes 61,45 für das Kolbenquerschnittsverhältnis. Diese Zahlen geben damit ein Maß für die erreichte Gesamtgenauigkeit, wobei eine Abweichung von 6 mm bei höchster Säulenhöhe einer Meßgenauigkeit von ca. 0,25 Promille entspricht.

Tabelle 1.

1	2	3	4	5
Datum	$t^{\circ} \text{C.}$	Amagatsteigrohr		Station 1
		Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
3. X. 08	14,6	5,070	5,200	10,9
5. X.	14,7	5,057	5,200	10,9
13. X.	11,9	5,047	5,200	11,5
3. XI.	8,1	5,053	5,200	10,2
5. XI.	7,7	5,043	5,200	11,3
6. XI.	7,3	5,020	5,200	12,2
6. XI.	7,5	5,010	5,200	12,2
6. XI.	7,5	5,033	5,200	12,1
6. XI.	7,5	5,014	5,200	12,7

Die entsprechenden Werte für Station 1 der Reihe 2 finden sich in Tab. 2.

Tabelle 2.

1	2	3	4	5
Datum	$t^{\circ}\text{C.}$	Amagatsteigrohr		Station 1 Kuppe in cm
		Rand in cm	Kuppe in cm	
4. III. 09	3,9	5,330	5,500	16,0
4. III.	3,9	5,340	5,500	13,6
4. III.	3,9	5,321	5,500	13,7
9. III.	4,9	5,314	5,500	12,9
9. III.	4,9	5,271	5,500	13,6
9. III.	4,9	5,313	5,500	11,9

In den Tab. 3 und 4, 5 und 6, 7 und 8 findet man die Zahlenwerte für die Messungen an den Stationen 2, 3 und 4 je für die erste und zweite Reihe. Die Bedeutung der einzelnen Kolonnen ist die gleiche. Bei der Temperaturkolonne 2 sind Unterabteilungen eingeführt, überschrieben mit Amagat bzw. Station 1—4. Die für das Quecksilber des Amagatmanometers angegebenen Temperaturen sind ermittelt durch ein direkt in das Quecksilber eingetauchtes Thermometer und Mittelwerte aus den so erhaltenen Temperaturangaben bei Beginn und Ende der Messungen. Durch die unvermeidliche Nähe des Beobachters 1 sind sie stets etwas höher als die der Station 1.

Tabelle 3.

Station 2, Reihe 1.

1	2			3	4	5
Datum	$t^{\circ}\text{C.}$			Amagatsteigrohr		Stat. 2
	Am.	Stat. 1	Stat. 2	Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
30. IX. 08 Vorm.	—	13,8	14,9	20,664	20,800	8,5
30. IX. 08 Nachm.	—	14,1	15,2	20,662	20,800	8,5
1. X. 08	—	13,6	14,6	20,670	20,800	7,4
6. X. 08	13,6	13,4	14,6	20,638	20,800	7,4

Tabelle 4.  
Station 2, Reihe 2.

1	2			3	4	5
Datum	$t^{\circ}\text{C.}$			Amagatsteigrohr		Stat. 2
	Am.	Stat. 1	Stat. 2	Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
8. III. 09 Nachm.	6,0	5,2	5,5	21,132	21,300	18,6
8. III. 09 „	6,0	5,2	5,5	21,074	21,300	18,4
8. III. 09 „	6,0	5,2	5,5	21,100	21,300	18,5

Tabelle 5.  
Station 3, Reihe 1.

1	2				3	4	5
Datum	$t^{\circ}\text{C.}$				Amagatsteigrohr		Stat. 3
	Am.	Stat. 1	Stat. 2	Stat. 3	Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
1. X. 08 Vorm.	15,5	13,6	14,6	15,0	31,244	31,400	7,5
1. X. 08 Nachm.	14,3	14,1	15,2	15,3	31,247	31,400	7,9
2 X. 08	14,1	13,6	14,7	14,9	31,243	31,400	7,5
6. X. 08	14,8	14,3	15,4	15,6	31,270	31,400	9,3
7. X. 08	13,0	12,5	13,9	14,6	31,240	31,400	7,2

Tabelle 6.  
Station 3, Reihe 2.

1	2				3	4	5
Datum	$t^{\circ}\text{C.}$				Amagatsteigrohr		Stat. 3
	Am.	Stat. 1	Stat. 2	Stat. 3	Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
8. III. 08 Vorm.	5,1	4,2	5,1	4,6	31,632	31,800	14,4
8. III. 08 „	5,1	4,2	5,1	4,6	31,632	31,800	15,4
8. III. 08 „	5,1	4,2	5,1	4,6	31,548	31,800	15,7

Tabelle 7.  
Station 4, Reihe 1.

1	2					3	4	5
Datum	$t^{\circ} \text{C.}$					Amagatsteigrohr		Stat. 4
	Am.	Stat. 1	Stat. 2	Stat. 3	Stat. 4	Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
2. X. 08	14,8	13,8	15,1	15,2	15,8	42,149	42,300	17,78
7. X. 08 Vorm.	13,4	12,8	14,5	14,8	15,2	42,115	42,300	16,49
7. X. 08 Nachm.	14,3	13,5	15,2	15,5	16,5	42,132	42,300	15,90
8. X. 08 Vorm.	14,0	13,5	15,0	15,3	15,8	42,138	42,300	15,67
8. X. 08 Nachm.	14,3	13,8	15,3	15,6	16,6	42,148	42,300	18,11
9. X. 08 Vorm.	14,1	13,3	15,0	15,2	15,5	42,130	42,300	17,58
9. X. 08 Nachm.	14,1	13,7	15,4	15,5	16,5	42,113	42,300	17,69
3. XI. 08	8,4	8,1	9,4	9,1	8,3	42,106	42,300	17,85
4. XI. 08 Vorm.	7,8	7,5	9,1	9,0	8,0	42,104	42,300	16,70
4. XI. 08 Vorm.	8,2	8,1	—	8,9	8,0	42,128	42,300	17,54
5. XI. 08	7,7	7,5	9,0	8,7	7,8	42,107	42,300	16,66

Tabelle 8.  
Station 4, Reihe 2.

1	2					3	4	5
Datum	$t^{\circ} \text{C.}$					Amagatsteigrohr		Stat. 4
	Am.	Stat. 1	Stat. 2	Stat. 3	Stat. 4	Rand in cm	Kuppe in cm	Kuppe in cm
5. III. 09	4,8	3,9	4,8	4,4	3,3	42,300	42,500	15,70
5. III. 09	4,8	3,9	4,8	4,4	3,3	42,257	42,500	15,21
5. III. 09	4,8	3,9	4,9	4,4	3,2	42,272	42,500	15,80

Die Werte der Kolonnen 3, 4 und 5 in den vorstehenden Tabellen sind zu korrigieren wegen der benutzten Maßstäbe. Die am Invardraht befestigten Messingmaßstäbe brauchten nur auf einige Millimeter genau zu sein. Ihre Richtigkeit konnte demnach durch einfachen Vergleich mit einer geeichten Millimeterteilung festgestellt werden. Die Teilung am Amagatsteigrohr mußte bedeutend höheren Genauigkeitsansprüchen genügen. Sie wurde deswegen auf dem großen Komparator des Instituts direkt verglichen mit einem Normalmeter aus Invarstahl. (Beides geliefert von der Société Genevoise.) Die

Korrekturen waren im allgemeinen kleiner, als für den vorliegenden Zweck in Betracht kam. Wo sie größer waren als 0,05 mm, sind sie im folgenden an den Mittelwerten angebracht.

Um die wirklichen einander entsprechenden Druckhöhen der beiden Quecksilbersäulen zu erhalten, müssen weiter bekannt sein die Abstände der auf dem Invardraht befestigten Maßstäbe voneinander und das Absinken der Quecksilberniveaus im Druckzylinder und im Bassin des Amagatmanometers bei wachsendem Druck.

Das zum Messen der Stationsabstände benutzte Stahlbandmaß war unter der gleichen Spannung wie bei diesen Messungen mit einem geeichten Millimetermaßstab verglichen. Die gefundenen Korrekturen waren durchwegs kleiner als die verlangte Genauigkeit. Das so bei bestimmter Temperatur geeichte Stahlbandmaß wurde dauernd im Turm aufbewahrt, so daß die Berücksichtigung der Temperaturkorrektur bei der Abstandsmessung mit Sicherheit erfolgen konnte. Der die Messingmaßstäbe tragende Invardraht bot dann die Gewähr, daß die einmal gemessenen Abstände der Maßstäbe von der Temperatur nicht mehr beeinflußt wurden. Wären übrigens die unerwartet guten Temperatureigenschaften des Turmes vorher bekannt gewesen, so hätte man die Benutzung des Invardrahtes umgehen können.

Die Abstandsmessungen der einzelnen Stationen voneinander mit dem Stahlbandmaß stimmten bei konstanter Spannung des letzteren auf Bruchteile eines Millimeters untereinander überein.

Das Absinken des Quecksilberniveaus im Druckzylinder, wenn das Quecksilber bis zu den verschiedenen Stationen ins Steigrohr gedrückt war, wurde mit dem Hilfsmanometer (Fig. 2) gemessen. Die Papierskala desselben war mit einer geeichten Millimeterskala verglichen, und die an sich nicht unbedeutenden, jedoch praktisch belanglosen Korrekturen sind angebracht. Die Zahlenwerte für das Absinken des Niveaus im Druckzylinder sind in Tab. 9 angeschrieben. Es steht in Kolonne 1 die Station, bis zu der das Quecksilber reichte, und in 2 die zugehörige Lage des Niveaus im Druckzylinder unter dem Nullstrich des Messingmaßstabes auf Station 1 gemessen in Zentimetern.

Tabelle 9.

Station, bis zu der das Quecksilber im Steigrohr steht	Lage des Quecksilberniveaus im Druckzylinder unter dem Nullstrich des Maßstabes auf Station 1 in cm
1	28,1
2	30,8
3	32,5
4	34,3

Die Beziehung zwischen der Niveausenkung im Druckzylinder und der zugehörigen Säulenhöhe im Steigrohr (vgl. Tabb. 11 und 12) ist innerhalb der Meßmöglichkeit linear.

Die Niveausenkung im Bassin des Amagatmanometers, wenn das Quecksilber im Amagatsteigrohr bis zu bestimmten, den verschiedenen Stationen entsprechenden Stellen reichte, wurde nach der von Wagner (l. c.) angegebenen Formel berechnet. Als Querschnitt des Bassins wurde die schon früher bestimmte und jetzt bestätigte Zahl 77,45 cm<sup>2</sup> benutzt, der Querschnitt des Steigrohres ergab sich übereinstimmend aus mehreren direkten Quecksilberauswägungen und aus dem Verfahren mit dem Bronzekolben (vgl. p. 36) zu 0,960 cm<sup>2</sup>. Die Dichte des Rizinusöles, die in den Wert der Niveausenkung eingeht, weil eine Quecksilbersäulenhöhe durch die eine Rizinusölsäule ersetzt wird, wurde zu 0,96 bestimmt.

Die Werte für das Absinken des Niveaus im Bassin des Amagatmanometers stehen in Tab. 10. Es findet sich in Kolonne 1 die Steigung der Quecksilbersäule im Amagatsteigrohr von Station 1 an gerechnet in Stationen, in 2 die zugehörige Absenkung des Quecksilbers im Bassin, ausgedrückt in Zentimetern Quecksilber.

Tabelle 10.

Steigung des Quecksilbers von Station 1 bis Station	Absenkung des Quecksilber- niveaus im Bassin in cm Hg
2	0,181
3	0,303
4	0,428

In bezug auf weitere für die Berechnung des Übertragungsverhältnisses mögliche Fehlerquellen ist noch das Folgende zu bemerken:

Der Invardraht hing bei allen Versuchen genau vertikal. Eine Korrektion wegen seiner Schiefe entfällt somit. Dasselbe gilt für das Amagatsteigrohr bei den Messungen der Reihe 1. Dagegen stand es bei denen der Reihe 2 merklich schief, indem es einen Winkel von  $1^{\circ} 25'$  mit der Vertikalen bildete. Die an ihm abgelesenen Drucke waren also zu groß und durch Multiplikation der abgelesenen Höhe mit 0,9997 zu reduzieren.

Die Dichte des für die hohe Säule benutzten Quecksilbers wurde durch eine Pyknometerbestimmung ermittelt, da es direkt einer Originalbombe von Almaden entnommen und nur getrocknet und filtriert war. Sie stimmte genügend genau überein mit der reinen Materials. Das Quecksilber im Amagatmanometer war vor der Benutzung im Vakuum destilliert und somit einwandfrei.

Die mittlere Temperatur der hohen Quecksilbersäule wurde durch graphisches oder rechnerisches Mittelnehmen ausgewertet. Die auf beide Arten erhaltenen Mittel stimmten auf  $0,1^{\circ} \text{C}$ . untereinander.

Korrekturen für Abnahme von Schwere und Luftdruck mit der Höhe, Kompressibilität des Quecksilbers und hydrostatischen Druck der Gassäulen in den Räumen und Verbindungsröhren der Druckanordnung wurden als in Summe nicht in Betracht kommend vernachlässigt.

Die für die endgültige Berechnung des Übertragungsverhältnisses benutzten Werte finden sich in den Tab. 11 und 12 für die Reihen 1 und 2. Es steht in Kolonne 1 die Nummer der Station, in 2 die Einstellung des Quecksilbers im Amagatsteigrohr mit sämtlichen besprochenen Korrekturen (Teilung, Schiefe, Niveauabsenkung) in Zentimetern gemittelt aus den Einzelversuchen, soweit es die Temperaturverhältnisse gestatteten, in 3 die Temperatur, in 4 die entsprechenden Steighöhen der hohen Quecksilbersäule mit sämtlichen Korrekturen in Zentimetern, in 5 die mittlere Temperatur der hohen Säule wieder, soweit angängig, in Temperaturgruppen zusammengefaßt und in 6 das Übertragungsverhältnis berechnet durch jedesmaliges Beziehen der Stationen 2, 3, 4 auf Station 1,

wo nötig nach Reduktion der beiden Quecksilbersäulen auf die gleiche Temperatur.

Tabelle 11.

Reihe 1.

1	2	3	4	5	6
Station	Einstellung des Hg im Amagatsteigrohr in cm	$t^{\circ}\text{C.}$ des Amagats	Steighöhe des Hg an der hohen Säule in cm	Mittlere Temp. der hohen Säule	Übertragungsverhältnis
1	5,200	—	39,7	—	—
2	20,976	14,0	1008,9	14,4	61,43
3	31,691	14,5	1667,3	14,3	61,44
4	42,723	14,2	2343,8	15,0	61,40
4	42,723	8,0	2344,0	8,7	61,40

Tabelle 12.

Reihe 2.

1	2	3	4	5	6
Station	Einstellung des Hg im Amagatsteigrohr in cm	$t^{\circ}\text{C.}$ des Amagats	Steighöhe des Hg an der hohen Säule in cm	Mittlere Temp. der hohen Säule	Übertragungsverhältnis
1	5,500	—	41,7	—	—
2	21,470	5,4	1023,0	5,4	61,45
3	32,082	5,1	1674,6	4,8	61,43
4	42,911	4,8	2340,0	4,3	61,43

Bei der guten Übereinstimmung der von den verschiedenen Stationen für das Übertragungsverhältnis gelieferten Werte, die zudem keine systematische Abhängigkeit von der Säulenhöhe zeigen, genügt einfaches Mittelnehmen und man erhält somit als Endwert der Reihe 1: 61,42 und der Reihe 2: 61,44. Somit wäre der Gesamtendwert für das Übertragungsverhältnis: 61,43.

Da das seinerzeit zur Messung der Isothermen der Luft von dem einen von uns benutzte Übertragungsverhältnis des



Amagatmanometers mit 61,45 in die Rechnung eingeführt war, sind mit dem vorliegenden Resultat diese Isothermen auch von Seite der Druckmessung auf eine absolute Basis gestellt, falls eine Extrapolation auf 200 Atm. erlaubt ist.

Vergleichung des im vorstehenden direkt ermittelten Wertes des Reduktionsfaktors mit dem nach der „Gewichtsmethode“ erhaltenen.

Trotz der guten Übereinstimmung der beiden genannten Werte, die nach vorstehender Untersuchung 61,43 und nach der *früher*, l. c., angewandten Gewichtsmethode 61,45 betrugen, wurde dennoch die letztere Methode jetzt wiederholt — schon deshalb, weil ein einwandsfreier Vergleich sich auf einen gleichzeitigen Zustand der Kolben beziehen soll — und zwar unter Verbesserung der Druckmessung durch Anwendung weiterer Hg-Steigrohre (Durchmesser 13 mm statt 6 mm). Diese brachte den ferneren Vorteil gegen den l. c., p. 917 beschriebenen Übelstand, daß namentlich beim Bronzekolben durch den Ölausfluß zwischen Kolben und Zylinder die ins Gleichgewicht eingespielte Hg-Kuppe sich senkt, sobald mit dem Rotieren des Kolbens aufgehört wird. Es ist wahrscheinlich, daß die früheren Beobachtungen am Bronzekolben — die von nur einem Beobachter gemacht sind und darum eine kleine Zeitdifferenz nötig machten zwischen der Ablesung der Kuppe und dem Aufhören der Rotation — aus diesem Grunde eine zu kleine Hg-Höhe ergeben haben. Diesmal wurde von zwei Beobachtern gleichzeitig das Einspielen des Quecksilbers *während* der Kolbenrotation beobachtet. Im einzelnen sei auf die Beschreibung der Methode l. c. verwiesen. Bei beiden Kolben wurde Rizinusöl verwandt. Die folgenden Tabellen enthalten die Resultate.

Bronzekolben.

Belastung $P$ in g	Hg-Stand $h$ in cm	
	beob.	ber.
200,1	5,912	5,911
1000	10,507	10,510
5000	33,509	33,509
6000	39,258	39,259

Die unter „beob.“ angegebenen Zahlen sind Mittelwerte aus mehreren Einzeleinstellungen für steigende und fallende Quecksilbersäule (vgl. p. 37), die sich im Maximum und selten um nur 0,1 mm unterschieden. Die „ber.“ Werte sind mittels der Methode der kleinen Quadrate aus folgender Formel abgeleitet:

$$h = 4,760 + 0,0057498 P.$$

Die Unterschiede zwischen den berechneten und beobachteten Werten sind überraschend klein und betragen höchstens 0,03 mm Hg, was einer Kraft von nur 0,5 g Gewicht entspricht. Aus obiger Formel folgt nach Anbringung einiger kleinen Korrekturen, die die Temperatur des Maßstabes und den Luftauftrieb betreffen, für den Querschnitt  $Q$  des Bronzekolbens bei 20°

$$\underline{Q_{20} = 12,670 \text{ qcm}} \text{ (früher 12,686 qcm).}$$

Stahlkolben.

Belastung $P$ in g	Hg-Stand $h$ in cm	
	beob.	ber.
0,95	12,78	12,80
54,58	31,98	31,96
101,55	48,76	48,75
154,45	67,65	67,65
200,73	84,18	84,19

Hier sind unter  $P$  Mittelwerte der Einzelbelastungen eingetragen, die für ein und denselben Hg-Stand Gleichgewicht ergaben. Die Einzelwerte differierten um 0,05 g höchstens. Durch folgende Formel lassen sich, wie die Tabelle zeigt, die beobachteten Werte in linearer Abhängigkeit ebenfalls vortrefflich gut darstellen:

$$h = 12,46 + 0,35736 P.$$

Ein Mangel in der Vertikalisierung von Maßstab und Kolbenachse wurde durch eine entsprechende Korrektur berücksichtigt. Sonach ergab sich für den Querschnitt des Stahlkolbens für 20°:

$$\underline{q_{20} = 0.20657 \text{ qcm}} \text{ (früher 0,20645 qcm).}$$

Ein Vergleich mit den früheren Werten zeigt also eine sehr gute Übereinstimmung der Druckflächenwerte beim Stahlkolben, dagegen eine, wenn auch kleine, so doch außerhalb der Versuchsfehler liegende Differenz beim Bronzekolben, welche durch den oben erörterten Mangel der Ablesung in der früheren Messung, i. c., veranlaßt wurde; es ist dies um so wahrscheinlicher, als andere — nicht benutzte — frühere Versuchsreihen, die auch mit zwei Beobachtern wie jetzt angestellt waren, eine sehr gute Übereinstimmung mit dem jetzt erhaltenen Werte zeigen.

Wir erhalten also nach der *Gewichtsmethode* für den Reduktionsfaktor

$$n = 61,34 \pm 0,01.$$

Da die *direkte Eichung* mit der hohen Quecksilbersäule für den wahren Reduktionsfaktor  $n = 61,43 \pm 0,02$  liefert, so erhebt sich die Frage, warum die an sich so einwandsfrei erscheinende Gewichtsmethode einen Wert liefert, der eine kleine, aber doch deutlich außerhalb der Versuchsfehler beider Methoden liegende Differenz gegenüber dem wahren Werte aufweist?

Die einzige fragwürdige Voraussetzung der Gewichtsmethode ist, daß die beiden Kolben als *System*, wie sie im Amagatmanometer zur Verwendung kommen, auch wirklich mit dem Quotienten ihrer *einzelnen* bestimmten Druckflächen wirken, daß also eventuell mangelhafte Koaxialität des Kolbensystems ohne Bedeutung bleibe. Zur Prüfung dieser Frage wurde eine Messung dieses Winkels der beiden Kolbenachsen gegeneinander vorgenommen. Zu diesem Zwecke wurde ein kleiner Spiegel zentrisch und ungefähr senkrecht zur Achse des betreffenden Kolbens befestigt. Mittels einfachen okularen Visierens durch ein Loch in einem Kartenblatt, das genau vertikal und in größerer Entfernung über der Kolbenachse (Spiegelmitte) stand, konnte die Abweichung der Achse vom Lot bestimmt werden, indem man die Wanderung des Lochmarkenbildes im Spiegel bei Rotation des Kolbens zeichnerisch auf dem Blatte verfolgte. Es ergaben sich hierbei folgende Winkel: für den Bronzekolben 35', für den Stahlkolben 28'. Zugleich fand sich für den Winkel zwischen den beiden Ebenen,

die jede das Lot und eine Kolbenachse enthalten, ebenfalls zeichnerisch ca.  $70^\circ$ . Daraus ergibt sich ein *Winkel von nur ca.  $43'$*  zwischen den beiden Kolbenachsen, der seiner Kleinheit wegen wohl mit Sicherheit ohne jeden Einfluß auf das Übertragungsverhältnis ist.

In Anbetracht der sehr hohen Präzision, deren die Gewichtsmethode fähig ist, und des Umstandes, daß sie in den allermeisten Fällen den einzig gangbaren und bequemen Weg zur Ermittlung des Reduktionsfaktors darstellt — im Vergleich zu der hier beschriebenen direkten Prüfung, die außergewöhnliche experimentelle Gelegenheiten voraussetzt —, bleibt es jedenfalls erwünscht, wenn die erwähnte letzte kleine Unstimmigkeit in ihr noch eine Aufklärung fände.

#### Ergebnis der vorstehenden Arbeit.

1. Für einwandsfreie *absolute* Druckmessung bedarf das Amagatmanometer einer Eichung mit direkten hohen Quecksilbersäulen, welche für unser Instrument einen Übertragungsfaktor ergeben hat, der innerhalb der Drucke von 10—23 m Hg und bei den zwei Temperaturen  $14^\circ$  und  $5^\circ$  C., bis auf  $\frac{1}{2}$  Promille konstant ist.

2. Das (vorliegende) Amagatmanometer besitzt eine Höchstempfindlichkeit von ca.  $\pm 0,004$  Atm. (bis zu ca. 30 Atm., der Untersuchungsgrenze in unserem Falle), entsprechend einer Einstellungsgenauigkeit der reduzierten Hg-Säule auf  $\pm 0,05$  mm Hg.

3. Die „Gewichtsmethode“ (l. c., p. 912) zur Ermittlung der Druckflächen und des Übertragungsverhältnisses der Drucke beim Amagatmanometer hat sich für Genauigkeitsansprüche an *absolute* Druckmessung bis zu  $1\frac{1}{2}$  Promille bewährt.

München, Physik. Institut d. Universität, Oktober 1909.

(Eingegangen 20. Oktober 1909.)

---