Nr. 449

8429

## Berichte der Betriebskontrolle Oppau

# Zur Frage der Gleichgewichtsberechnung für Differenzdruckwaagen.

( Ringwaagen, Druckwaagen und ähnliche für Mengenmessung mittels Stauprinzip benutzten Waagen mit Flüssigkeitssäule )

von Dr. Wilde

I. G. FARBENINDUSTRIE AKTIENGESELLSCHAFT
LUDWIGSHAFEN AM RHEIN

## Zur Frage der Gleichgewichtsberechnung für Differenzdruckwaagen.

(Ringwaagen, Druckwaagen und ähnliche für Mengenmessung mittels Stauprinzip benutzten Waagen mit Flüssigkeitssäule)

von Dr.Hch.Wilde

(Mitteilung aus dem Physikalisch-Technischen Laboratorium der Betriebskontrolle Oppau der I.G.Farbenindustrie Aktiengesellschaft)

Die 5.Auflage der Durchflußmeßregeln des VDI (Din 1952), die in wenigen Monaten erscheinen wird, enthält zum ersten Mal einen Abschnitt über die Anwendung der Durchflußmessung im eichpflichtigen Verkehr, da die PTR die gesetzliche Zulassung der mittels Normdüse oder Normblende in Verbindung mit Ringwaage und Zählwerk durchgeführten Mengenmessung von Gasen vorbereitet. Es erscheint daher zweckmäßig, bestehende Unklarheiten über die Wirkungsweise der in vielen Industriebetrieben, vor allem in den Hochdruckbetrieben der chemischen Industrie sehr vielseitig für flüssige, gas- und dampfförmige Medien benutzten Ringwaage und der ihr ähnlichen Wirkdruckschreiber zu beseitigen und durch eine zusammenfassende Untersuchung die Ursache der Drehbewegung der Waage zu klären.

Im Schrifttum wird zur Erklärung der Drehbewegung einer Druckwaage entweder das Drehmoment, das auf die wirksame Begrenzungsflächen[1] der Waage ausgeübt wird[2], oder das Drehmoment, das durch die Schwerpunktsverlagerung der manometrischen Flüssigkeit bewirkt wird[3], herangezogen. Beide Wege haben in den Kreisen der Erzeuger und Benutzer

---

1) Vielfach wird hierfür der Ausdruck Trennwand benutzt. Vergleiche dazu S.6, wo zur Vermeidung von Unklarheiten die Benutzung des Ausdruckes "wirksame Endfläche" vorgeschlagen wird.

2) Siemens-Ringwaagen, ATM J 1233 - 3 (März 1933).
E.Schmidt, Messung kleiner Druckunterschiede bei hohen absoluten Drücken. Z.VDI 80 (1936) 635/36.
H.Weidemann, Zur Theorie der Ringwaage, Luftfahrtforschung 18 (1941) 223/28.
H.Toeller und G.Klee, Über die Radizierungen an Ringwaagen und deren Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Feinmech.und Präzision 50 (1942) 13/16 und 41/45.

3) G.Ruppel, Messung des Wirkdruckes bei der Durchflußmessung, ATM V - 1244-1. Ruppel gibt in dieser Arbeit für die U-Formdruckwaagen an, daß bei Aufstellung der Gleichgewichtsbedingung die Verlagerung des Schwerpunktes der manometrischen Flüssigkeit beachtet werden muß. Für Ringwaagen führt er aus, daß die Bewegung durch das Drehmoment zustande kommt, das auf die Trennfläche ausgeübt wird.

von Ringwaagen und vorübergehend auch im Schrifttum[4] zu verschiedenen Endergebnissen und sich scheinbar widersprechenden Auffassungen geführt.

Im Folgenden soll nun auf die, beiden Betrachtungsweisen zugrunde liegende Frage eingegangen werden, wie die Drehbewegung zustande kommt, bzw. wie die Gleichgewichtsbedingung am besten aufgestellt werden kann[5].

Ferner werden die Berichtigungsfaktoren für die Mengenanzeige von drucklos geeichten I.G.Hochdruckringwaagen bestimmt.

---

4) A.Gramberg, Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle, 5.Auflage, Berlin 1923 S.71/73.
Eucken-Jakob, Der Chemie-Ingenieur, Band II, 2 S.225
In beiden Arbeiten wird als Ursache für die Drehbewegung der Waage sowohl die Schwerpunktsverlagerung, als auch das Drehmoment auf die wirksamen Begrenzungsflächen der Waage angeführt. Damit ergab sich in der Gleichgewichtsbedingung der Faktor 2, der nicht richtig war. In den neuen Auflagen beider Werke sind die Gleichungen für die Gleichgewichtsbedingung richtig gestellt

5) Die Anregung dazu bekam der Verfasser von Dr.P.Gmelin und Dr.R.Witte, Oppau.

## I) Ringwaagen

a) Aufstellung der Gleichgewichtsbedingung.

Die in Bild 1 dargestellte Ringwaage sei zentrisch gelagert, habe überall gleichen Ringquerschnitt und zeige den Druckunterschied $\Delta p$ an. In dem mit Luft gefüllten Raum I herrscht überall der Druck p, im Raum II der Druck $p + \Delta p$. Die Druckverteilung in dem Quecksilber zeigt Bild 2a. Es kommt hier noch der Schweredruck hinzu, der von dem Gewicht des Quecksilbers herrührt und den Druck mit der Quecksilberhöhe linear ansteigen läßt. An keiner Stelle der Ringwaage ist eine Unstetigkeit im Druck vorhanden, außer an der Endfläche. Der Druck eines Gases oder einer Flüssigkeit wirkt nun immer senkrecht auf die Gefäßwand d.h. in unserem Fall auf die Begrenzungswand der Ringwaage. Da die Waage zentrisch gelagert sein soll, so gehen alle Druckvektoren, die auf die Begrenzungswand der Ringwaage wirken, durch deren Drehachse und üben kein Drehmoment aus. Auf die Endfläche dagegen wirken zwei verschiedene Drücke, von links der Druck p und von rechts $p + \Delta p$. Das Gewicht der überstehenden Flüssigkeitssäule wirkt somit über das Gas auf die Trennwand und erzeugt dort ein Drehmoment, dessen Größe gegeben ist durch

$$\Delta p \cdot q \cdot R = h \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot q \cdot R,$$

wobei bedeutet:

$q$ = Fläche der Endfläche ( = Ringquerschnitt)
$R$ = Abstand der Endfläche vom Drehpunkt der Waage
$\Delta p = h \cdot (\gamma_1 - \gamma_2)$ = Druckunterschied.

Der von außen auf die beiden Endflächen und auch auf den übrigen Teil der Waage wirkenden Atmosphärendruck erzeugt kein Drehmoment.

Durch das durch den Druckunterschied hervorgerufene Drehmoment wird die Waage bis zu dem Ausschlagswinkel $\alpha$ gedreht, bei dem das entgegengesetzt gerichtete Drehmoment des Waagenkörpers die gleiche Größe erreicht. Wird das Drehmoment des Waagenkörpers z.B. durch ein Gewicht hervorgerufen, das fest an der Waage im Abstand $\ell$ vom Drehpunkt angebracht ist und beim Nullpunkt sich unter dem Drehpunkt befindet, dann ist dessen Drehmoment beim Ausschlagswinkel $\alpha$

$$-G \cdot \ell \cdot \sin \alpha .$$

Somit lautet die Gleichgewichtsbedingung

$$G \cdot \ell \cdot \sin \alpha = h \cdot q \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot q \cdot R .$$

Besteht die Ringwaage nur aus einem Halbkreis (Bild 3), dann sind die beiden Endflächen auseinander gerückt. An der Ableitung der Gleichgewichtsbedingung ändert sich dadurch nichts.

Dieselbe Gleichung erhält man, wenn man das durch den Druckunterschied hervorgerufene Drehmoment aus der Gewichtsverschiebung der Sperrflüssigkeiten berechnet. Man denkt sich die Flüssigkeiten starr mit dem Ringwaagenkörper verbunden und multipliziert die Gewichte

8433

der in den Räumen ABCD bzw. A'B'C'D' (Bild 1) eingeschlossenen Medien mit den zugehörigen Hebelarmen. Es ergibt sich das Drehmoment

$$h \cdot q \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot R^{6)},$$

wobei bedeutet

- $q$ = Ringquerschnitt
- $\gamma_1$ = Wichte der manometrischen Flüssigkeit (Sperrflüssigkeit)
- $\gamma_2$ = Wichte des in den Wirkdruckleitungen befindlichen Stoffes (Füllflüssigkeit oder Füllgas)
- $R$ = mittlerer Halbmesser der Waage.

Die Gewichte der in den unteren und oberen Kreisbogen symmetrisch auf beide Seiten der Waage verteilten Medien üben kein Drehmoment aus, da sich deren gemeinsamer Schwerpunkt auf der Symmetrieachse der Waage befindet.

---

6) in nebenstehendem Bild sei S der Schwerpunkt der Flüssigkeitssäule ABCD. Dann ist

$$OS = \frac{\int_0^{\xi} R \cos x \, dx}{\int_0^{\xi} dx} = \frac{R \cdot \sin \xi}{\xi};$$

Damit ergibt sich der Hebelarm zu

$$SS' = \frac{R \cdot \sin \xi}{\xi} \cdot \sin \beta .$$

Das Gewicht der eingeschlossenen Flüssigkeit beträgt

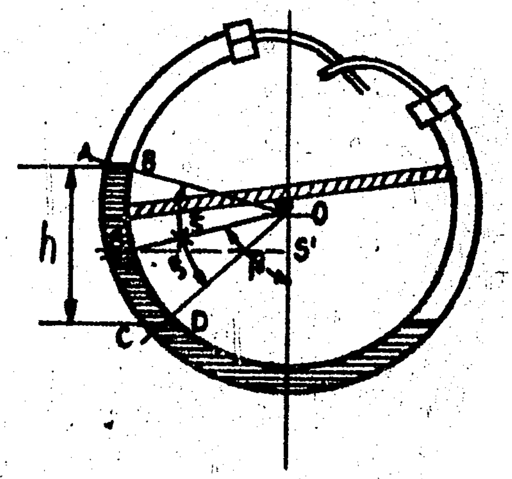
$$G = q \cdot \gamma \cdot 2 \cdot R \cdot \xi .$$

Außerdem ist

$$h = R\left[\cos(\beta - \xi) - \cos(\beta + \xi)\right] = R \cdot 2 \cdot \sin \beta \cdot \sin \xi .$$

Damit wird das Drehmoment

$$G \cdot SS' = q \cdot \gamma \cdot 2R\xi \, \frac{R \cdot \sin \xi}{\xi} \sin \beta = h \cdot q \cdot \gamma \cdot R$$



Daß diese Betrachtungsweise über die Schwerpunktsverlagerung der Sperrflüssigkeit immer zu einem richtigen Ergebnis führt, wird durch folgenden Gedankenversuch bewiesen.
Wir denken uns die in Bild 1 dargestellte Druckwaage mit Quecksilber gefüllt, über dem sich Luft befindet. Der Druckunterschied an der Waage sei $\Delta p$, der dadurch hervorgerufene Ausschlag $\alpha$. Nun soll die Temperatur so weit gesenkt werden, daß das Quecksilber fest wird. Es ist kein Grund für die Annahme vorhanden, daß der Ausschlag der Waage sich dabei ändert. Es steht aber nun fest, daß das Drehmoment, das durch die Verschiebung der jetzt festen Sperrflüssigkeit hervorgerufen wird, zu dem gleichen Betrag, wie oben ausgeführt, berechnet werden muß.

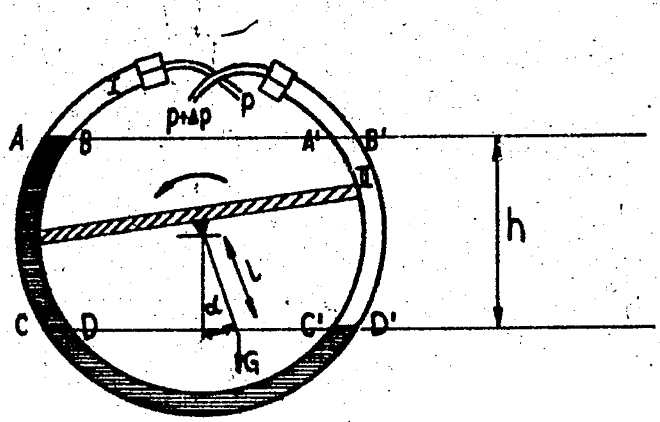



Bild 1
Ringwaage

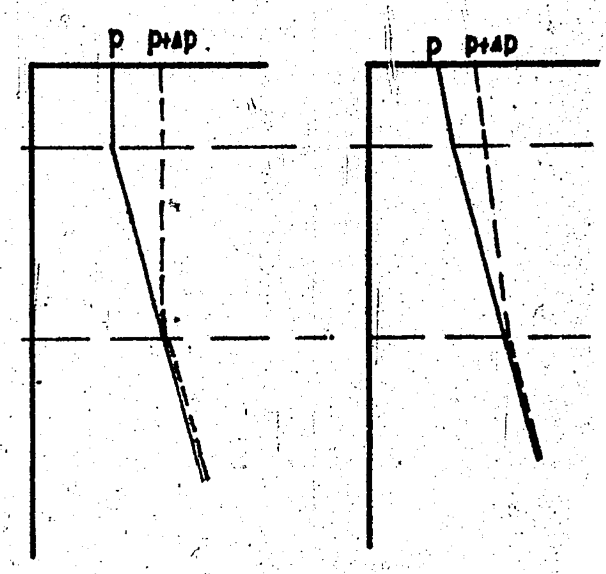



Bild 2
Druckverteilung in einer Ringwaage, wenn sich in Zuleitungen
a) Luft b) Wasser
befindet.

8435

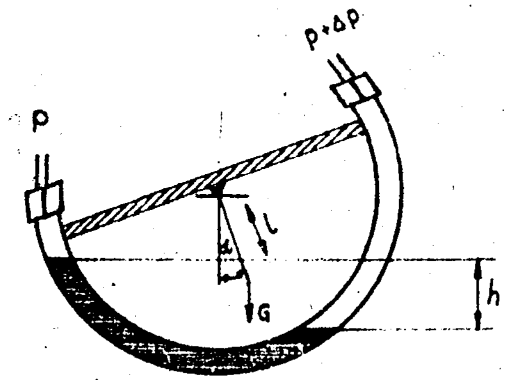



Bild 3
Halbkreisringwaage

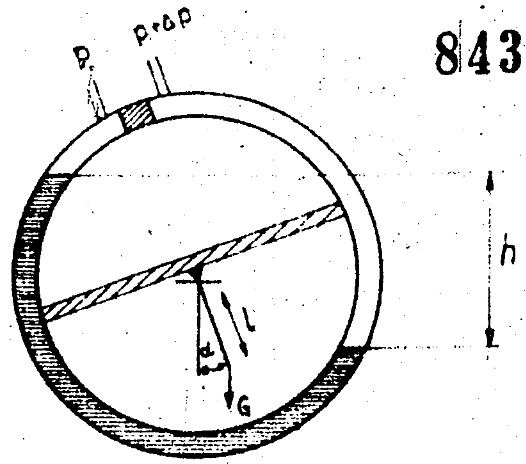



Bild 4
Vereinfachte Darstellung einer Vollkreis-Ringwaage

Die Kreisringwaage wird im Schrifttum meistens als Vollkreis, wie in Bild 4 gezeichnet, dargestellt. Die Druckzuführungen sind seitlich angebracht unddie beiden Endflächen durch eine Trennwand ersetzt. Durch diese Art der Darstellung wird nur die äußere Begrenzungsfläche der Waage geändert, die jedoch, wie bereits angegeben, für die Drehmomentenberechnung nicht in Frage kommt. Die inneren Begrenzungsflächen bleiben ihrer Form und Lage nach erhalten. Die Kräfte, welche an den beiden Endflächen angreifen, wirken jetzt auf die an ihre Stelle gesetzte Trennwand und erzeugen dort das gleiche Drehmoment, das auch an den Endflächen auftreten würde.
Der Begriff der Trennwand, an welcher das Drehmoment der Waage angreift, wurde durch die in Bild 4 angegebene vereinfachte Darstellung der Ringwaage eingeführt. Da bei einer wirklichen Ausführung einer Waage eine Trennwand meistens nicht vorhanden ist, so ist die Verwendung dieses Begriffes nicht angebracht und sogar irreführend. Hat man z.B. eine Drosselscheibe mit einer Differenzdruck-Meßanordnung, dann stellt die Drosselscheibe die Trennwand zwischen dem Differenzdruck dar, alles andere ist nur Verbindungsleitung mit Absperrflüssigkeit ohne jede Trennwand zwischen der Minus- und der Plusdruckentnahmestelle des Staugerätes. Es wird daher vorgeschlagen, die für das Drehmoment wirksamen Begrenzungsflächen einer Ringwaage mit dem Ausdruck "wirksame Endfläche" der Ringwaage zu bezeichnen.

Berechnung der Berichtigungszahlen für I.G.Hochdruckringwaagen.

Die Ringwaagen werden drucklos entweder mit Quecksilber/Luft, oder Quecksilber/Wasser geeicht. Werden nun solche Waagen zum Messen von Gasen oder Flüssigkeiten, deren Wichten sich wesentlich von derjenigen der Luft oder des Wassers, mit welcher sie geeicht wurden, unterscheiden, dann treten infolge der unsymmetrischen Bauart der Waagen Fehler auf. Diese werden durch Verschieben der Schraubgewichte wieder ausgeglichen, wenn die Möglichkeit besteht, daß man durch Anschließen eines Differentialmanometers die Waage nachprüfen kann. Bei Drücken über 100 at ist dies nicht mehr gut möglich. Für diese Fälle werden in Folgendem die auftretenden Fehler berechnet.

Bild 5 zeigt eine I.G.Hochdruckringwaage in Nullage. In dem Ringrohr fehlt zum Vollkreis das Bogenstück AB, das den Winkel $\delta$ ein-

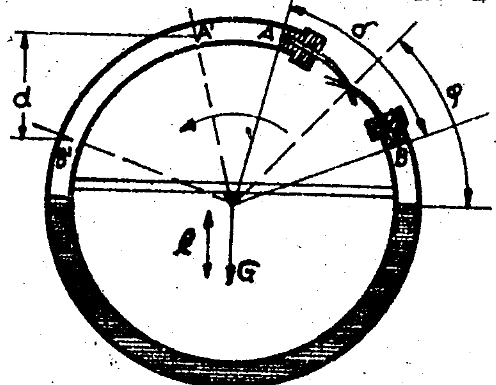



Bild 5
I.G.Hochdruckringwaage in Null-Lage.

schließt. Das dazu symmetrische auf der linken Seite liegende Bogenstück sei mit A'B' bezeichnet. Das beim Eichen der Waage in diesem Bogenstück befindliche Medium habe die Wichte $\gamma_E$, im Betrieb sei die Wichte $\gamma_2$. Ist $\gamma_E$ von $\gamma_2$ verschieden, dann bewirkt das in dem Bogenstück A'B' eingeschlossene Medium einen Druckunterschied, der von dem Winkel $\delta$, dem Ausschlagswinkel der Waage $\alpha$ und den Wichten $\gamma_2$ und $\gamma_E$ abhängt. Er errechnet sich zu

$$d\cdot(\gamma_2-\gamma_E) = 2\cdot R\cdot(\gamma_2-\gamma_E)\cdot\cos(\varphi+\alpha)\cdot\sin\delta/2$$

Die Gleichgewichtsbedingung für die Waage lautet somit:

$$q\cdot R\left[h(\gamma_1-\gamma_2)+2R(\gamma_2-\gamma_E)\cos(\varphi+\alpha)\sin\delta/2\right] = G\cdot\ell\cdot\sin\alpha + K\cdot\alpha$$

Die linke Seite der Gleichung stellt das durch den Gesamtdruckunterschied

$$h\cdot(\gamma_1-\gamma_2) + 2\cdot R\cdot(\gamma_2-\gamma_E)\cdot\cos(\varphi+\alpha)\sin\delta/2$$

hervorgerufene Drehmoment dar, die rechte Seite setzt sich aus dem Drehmoment des Waagenkörpers und dem der Kapillaren zusammen. Letzteres ist praktisch dem Ausschlagswinkel der Waage proportional.

An dem Beispiel einer Hochdruck-Gaswaage, welche mit 2/3 Empfindlichkeit[7] eingestellt ist und drucklos mit Luft geeicht wurde, sei diese Gleichung diskutiert. Es ist dann

| | |
|---|---|
| Wichte der Eich-Füllflüssigkeit | $\gamma_E = 1{,}29\ \mathrm{kg/m^3}$ |
| Wichte der Füllflüssigkeit im Betrieb | $\gamma_2 = 200 \div 1000\ \mathrm{kg/m^3}$ |
| Wichte der Absperrflüssigkeit | $\gamma_1 = 13\,550\ \mathrm{kg/m^3}$ |
| Querschnitt des Ringrohres der Waage | $q = 0{,}000706\ \mathrm{m^2}$ |
| Halbmesser der Waage | $R = 0{,}2\ \mathrm{m}$ |
| Winkel (vergl. Bild 5 ) | $\varphi = 51{,}5^\circ$ |
| Winkel ( " ) | $\delta = 65^\circ$ |
| Rückstell-Drehmoment der Gaskapillaren | $K = 0{,}04/30\ \mathrm{mkg/^\circ}$ . |

a) Schraubgewichte der Waage werden nicht verstellt. Der Nullpunkt der Waage ist geändert.

Die Waage werde für die Messung von Stickstoff von 200 at und 15°C benützt, und drehe sich um den Winkel $\alpha$. Der wahre Mengenstrom beträgt dann

$$Q_W = \mathrm{Const}\sqrt{h_1(\gamma_1-\gamma_2)} = \mathrm{Const}\sqrt{\frac{G\cdot e}{q\cdot R}\sin\alpha + \frac{K\alpha}{q\cdot R} - 2\cdot R(\gamma_2-\gamma_E)\cos(\varphi+\alpha)\sin\delta/2};$$

der auf Grund der Eichung dagegen gemessene Mengenstrom beträgt

$$Q_M = \mathrm{Const}\sqrt{h\cdot(\gamma_1-\gamma_E)} = \mathrm{Const}\sqrt{\frac{G\cdot e}{q\cdot R}\sin\alpha + \frac{K\cdot\alpha}{q\cdot R}}\,.$$

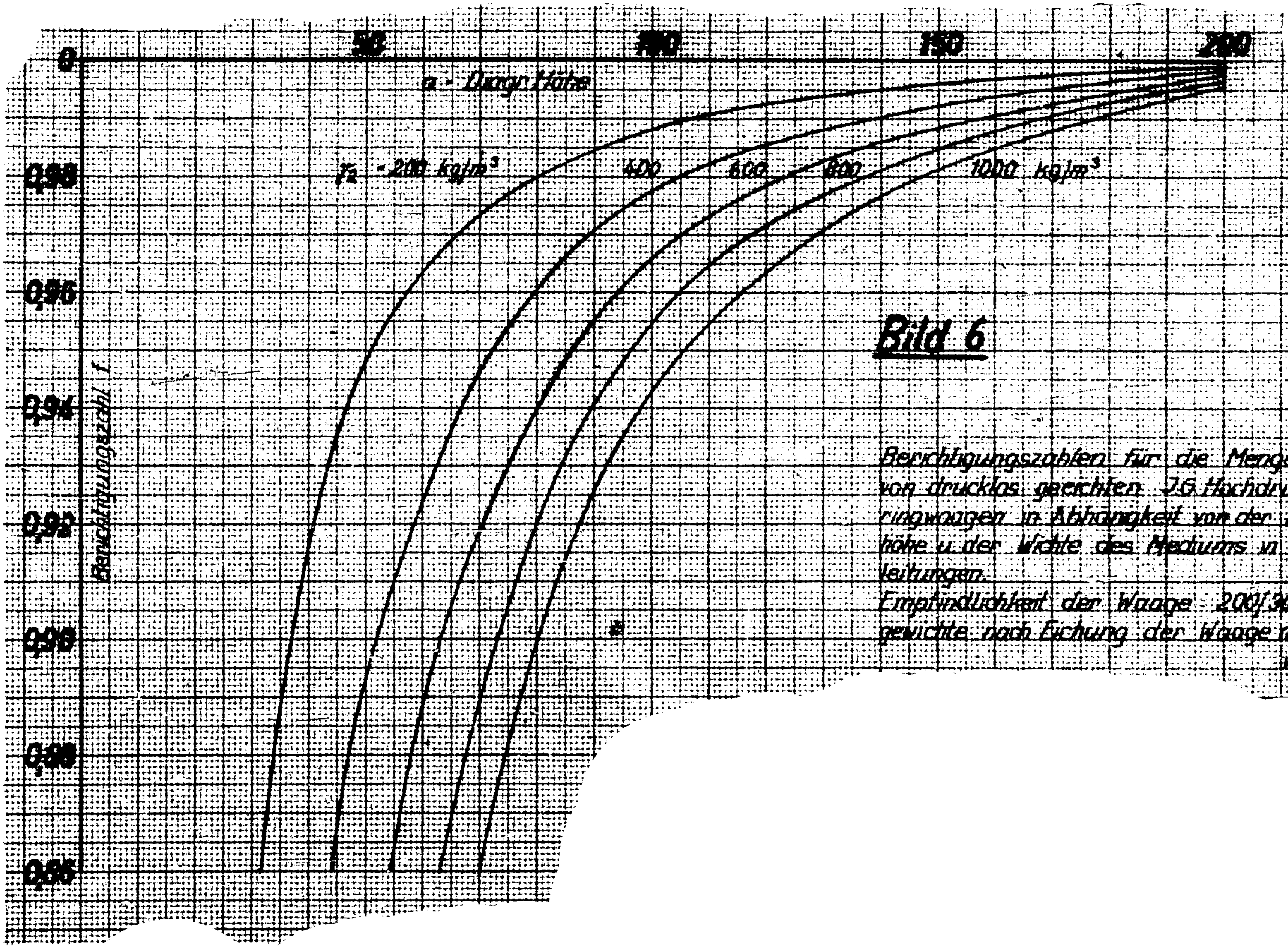
Die Berichtigungszahl ist somit:

$$f = Q_W / Q_M\,.$$

In Bild 6 sind die Berichtigungszahlen in Abhängigkeit von der Diagrammhöhe für verschiedene Wichten der Füllflüssigkeit ( $\gamma_2$ ) für eine drucklos geeichte Hochdruck-Ringwaage aufgetragen. Die Berichtigungszahlen nähern sich bei großen Diagrammhöhen dem Wert 1, für kleine Diagrammhöhen dagegen dem Wert Null, weil die Waage für den Wirkdruck Null nicht mehr die Null-Lage einnimmt. Die Abweichungen von der Null-Lage zeigt folgende Zahlentafel

| Wichte der Füllflüssigkeit $\gamma_2$ $\mathrm{kg/m^3}$ | Abweichung von der Null-Lage | |
|---|---|---|
| | Ausschlagswinkel $\alpha$ | a mm Diagrammhöhe |
| 200 | 11' | 16.2 |
| 400 | 22' | 22,8 |
| 600 | 33' | 28.0 |
| 800 | 44' | 32.3 |
| 1000 | 55' | 36.0 |

7) d.h. bei 200 mm Diagrammhöhe beträgt der Wirkdruck 300 mm.




8438

**Bild 6**

Berichtigungszahlen für die Mengenanzeige von drucklos geeichten J.G. Hochdruck-Gasringwaagen in Abhängkeit von der Diagrammhöhe u. der Wichte des Mediums in den Zuleitungen.
Empfindlichkeit der Waage 200/300. Schraubgewichte nach Eichung der Waage nicht mehr verstellt.

b) Waagrechte Schraubgewichte der Waage werden verstellt, damit der Nullpunkt erhalten bleibt.

Die in Bild 6 dargestellten Korrekturkurven gelten nur für den Fall, daß nach der Eichung der Waage an den Schraubgewichten nichts mehr verstellt wird. Man kommt jedoch zu kleineren Korrekturwerten, wenn man folgendermaßen vorgeht. Sobald die Waage unter Druck ist und damit die Null-Lage nicht mehr stimmt (Ventile zu dem Drosselgerät sind geschlossen, Umgang ist offen), verschiebt man das <u>horizontale</u> Schraubgewicht solange, bis die Waage die Null-Lage wieder einnimmt.[8] Diese prüft man zweckmäßig an der Bogenskala des Ringrohres und nicht an der Skala des Schreibzeuges nach. Durch das Verschieben des Schraubgewichtes entsteht ein zusätzliches Drehmoment, das sich mit dem sin $(90 + \alpha)$ ändert. Die Gleichgewichtsbedingung lautet somit:

$$q \cdot R \cdot \left[h_1 (\gamma_1 - \gamma_2) + 2 \cdot R \cdot (\gamma_2 - \gamma_E) \cos(\varphi + \alpha) \sin \delta/2\right] = G \cdot l \sin \alpha + K \cdot \alpha + D \cdot \sin(90 + \alpha).$$

Das zusätzliche Drehmoment ist dadurch bestimmt, daß für $h_1 = 0$ auch $\alpha = 0$ werden muß.

$$D = q \cdot R \cdot 2 \cdot R \, (\gamma_2 - \gamma_E) \cdot \cos\varphi \cdot \sin \delta/2$$

Für einen bestimmten Ausschlagswinkel $\alpha$ ist der wahre Mengenstrom

$$Q_W = Const \sqrt{h_1(\gamma_1 - \gamma_2)} = Const \sqrt{\frac{G \cdot l}{qR} \sin\alpha + \frac{K}{qR}\alpha + \frac{D}{qR}\sin(90+\alpha) - 2R(\gamma_2 - \gamma_E)\cos(\varphi+\alpha)\sin\delta/2}$$

der gemessene Mengenstrom beträgt

$$Q_M = Const \sqrt{h_1(\gamma_1 - \gamma_2)} = Const \sqrt{\frac{G l}{qR} \sin\alpha + \frac{K}{qR}\alpha + \frac{D}{qR}\sin(90+\alpha)}\,.$$

Die Berichtigungszahl ist damit $f = Q_W/Q_m$. Die Berichtigungszahlen sind praktisch unabhängig von der Diagrammhöhe und in folgender Zahlentafel zusammengestellt. Für das Drehmoment der Kapillaren ist eingesetzt:

für Gaswaagen: $K = \frac{0{,}04}{30}$ mkg/°

für Flüssigkeitswaagen: $K = \frac{0{,}13}{30}$ mkg/°

---

Nach Dr.Schrader, Ludwigshafen/Rhein

| | Empfindlichkeit [9] | $\gamma_z$ kg/$m^3$ | D mkg | Berichtigungszahl f |
|---|---|---|---|---|
| Gaswaagen $\gamma_E$ = 1,2 kg/$m^3$ | 200/100 | 0 | + - | 1 |
| | | 200 | + 0,0047 | 1,0062 |
| | | 400 | + 0,0095 | 1,0125 |
| | | 600 | + 0,0143 | 1,0188 |
| | | 800 | + 0,0190 | 1,0250 |
| | | 1000 | + 0,0238 | 1,0314 |
| | 200/200 | 0 | + - | 1 |
| | | 200 | + 0,0047 | 1,0031 |
| | | 400 | + 0,0095 | 1,0062 |
| | | 600 | + 0,0143 | 1,0093 |
| | | 800 | + 0,0190 | 1,0124 |
| | | 1000 | + 0,0238 | 1,0155 |
| | 200/300 | 0 | + - | 1 |
| | | 200 | + 0,0047 | 1, 0021 |
| | | 400 | + 0,0095 | 1,0042 |
| | | 600 | + 0,0143 | 1,0063 |
| | | 800 | + 0,0190 | 1,0084 |
| | | 1000 | + 0,0238 | 1,0105 |
| Flüssigkeits-Waagen $\gamma_E$ =1000 kg/$m^3$ | 200/100 | 1000 | - | 1 |
| | | 800 | - 0,0047 | 0,9931 |
| | | 600 | - 0,0095 | 0,9862 |
| | | 400 | - 0,0143 | 0,9793 |
| | | 200 | - 0,0190 | 0,9724 |
| | | 0 | - 0,0238 | 0,9655 |
| | 200/200 | 1000 | - | 1 |
| | | 800 | - 0,0047 | 0,9966 |
| | | 600 | - 0,0095 | 0,9932 |
| | | 400 | - 0,0143 | 0,9898 |
| | | 200 | - 0,0190 | 0,9864 |
| | | 0 | - 0,0238 | 0,9830 |
| | 200/300 | 1000 | - | 1 |
| | | 800 | - 0,0047 | 0,9978 |
| | | 600 | - 0,0095 | 0,9955 |
| | | 400 | - 0,0143 | 0,9933 |
| | | 200 | - 0,0190 | 0,9910 |
| | | 0 | - 0,0238 | 0,9887 |

9) Vergl. Fußnote 7

II. Druckwaagen beliebiger Form

Bei Druckwaagen, die nicht zentrisch gelagert und deren Querschnitte nicht überall gleich groß sind, was bei bestimmten radizierenden Ausführungen von Druckwaagen der Fall ist, greifen nicht nur an den Endflächen, sondern auch an den übrigen Begrenzungsflächen der Waage Kräfte an, die Drehmomente hervorrufen. Bild 7 zeigt eine solche Waage. Sie sei so gebaut, daß der Schwerpunkt des Waagenkörpers mit dem Drehpunkt zusammenfalle. Die Rückstellkraft der Waage wird dann allein durch das Gewicht G hervorgerufen. Die Druckdifferenz sei wieder $\Delta p$, der Ausschlagswinkel $\alpha$; die Sperrflüssigkeit der Waage sei Quecksilber und darüber befinde sich Luft. Wie bereits ausgeführt, wirkt der Druck der Luft und des Quecksilbers senkrecht auf die Begrenzungsflächen der Waage.

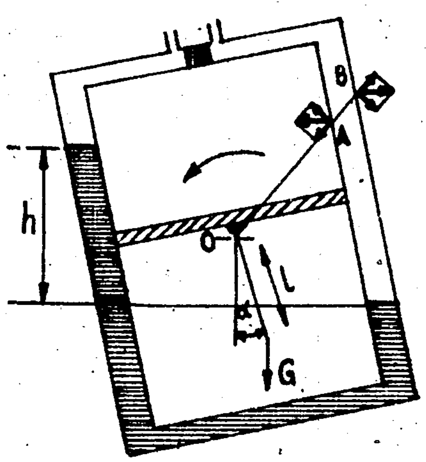



Bild 7
U-Form-Druckwaage

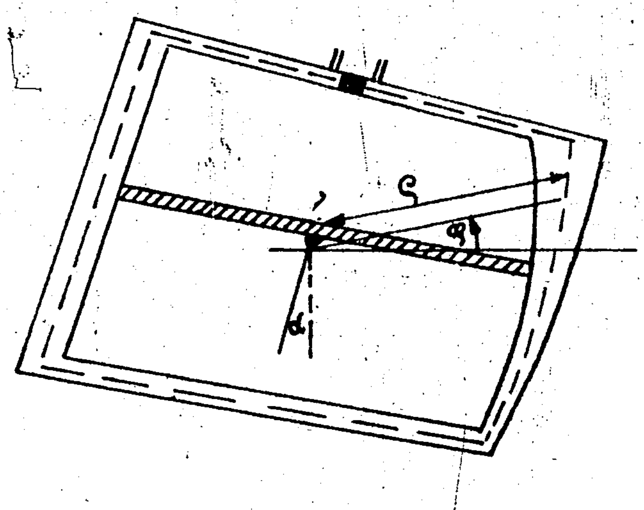



Bild 8
Druckwaage von beliebiger Form und veränderlichem Querschnitt

Die Druckvektoren, die senkrecht auf die Gefäßwand wirken, z.B. in den Punkten A und B, bilden mit der Geraden OA, die durch den Drehpunkt geht, einen Winkel und können mit Hilfe des Kräfteparallelogramms in zwei Kräfte zerlegt werden, von denen die eine in Richtung der Geraden OA und die andere senkrecht dazu wirkt. Die Druckvektoren, die durch den Drehpunkt gehen, üben kein Drehmoment aus, dagegen die dazu senkrecht stehenden. Gegenüber der Kreisringwaage besteht nur der Unterschied, daß nicht nur an den Endflächen der Waage, sondern auch an den übrigen Begrenzungsflächen Drehmomente angreifen.

Um die Gleichgewichtsbedingung für eine Druckwaage beliebiger Form aufzustellen, muß man also die Summe aller auftretenden Drehmomente bestimmen und diese dem Drehmoment der Rückstellkraft gleich setzen. Dies ist eine Aufgabe, die nicht leicht durchzuführen sein wird. Wesentlich einfacher kommt man jedoch zum Ziel, wenn man, wie eingangs erwähnt, sich die Sperrflüssigkeit starr mit dem Druckwaagenkörper verbunden denkt, ihre Schwerpunkte bestimmt und die so entstehenden Drehmomente aufstellt.

Auf diese Weise ergibt sich in Polarkoordinaten die Gleichgewichtsbedingung für eine Druckwaage von beliebiger Form und veränderlichem Querschnitt zu

$$G \cdot \ell \cdot \sin\alpha = \int \rho \cdot q \cdot \gamma \, \sin\varphi \sqrt{\rho^2 + \rho'^2} \, d\varphi$$

wenn bedeutet:

$\rho = f(\varphi)$ die Gleichung der Mittellinie der Druckwaage (in Bild 8 gestrichelt gezeichnet) in Polarkoordinaten $\rho$ und $\varphi$,

$q(\varphi)$ = Querschnitt der Waage

$\gamma(\varphi)$ = die Wichte der manometrischen Flüssigkeiten.

Die linke Seite stellt das Drehmoment dar, das durch das Gewicht des Waagenkörpers hervorgerufen wird, die rechte Seite ist die Summe der Drehmomente, welche die starr gedachte Sperrflüssigkeit und das über dieser befindliche Medium erzeugt.

Für einfache Formen der Druckwaage, wenn die Rohre z.B. aus Geraden oder aus Kreisbogen bestehen, läßt sich die Gleichung leicht ausrechnen; man kann sogar die Integration, wenn man von Teilen der Sperrflüssigkeit der Druckwaage den Schwerpunkt angeben kann, umgehen.

<u>Zusammenfassung:</u>

Im Schrifttum werden als Ursache für die Drehbewegung einer Druckwaage einerseits das Drehmoment, das auf die wirksamen Begrenzungsflächen der Waage ausgeübt wird und andererseits das Drehmoment, das durch die Schwerpunktsverlagerung der manometrischen Flüssigkeit bewirkt wird, herangezogen.

Beide Erklärungen haben zu verschiedenen, sich teilweise widersprechenden Auffassungen geführt.

In vorliegender Arbeit wird die Frage beantwortet, wie die Drehbewegung bei einer Druckwaage zustande kommt, bzw. wie die Gleichgewichtsbedingung am besten aufgestellt werden kann.

8443

Es hat sich ergeben:

1) Beide Betrachtungsweisen führen, richtig durchgerechnet, quantitativ zu demselben, mit der Wirklichkeit übereinstimmenden Ergebnis.

2) Die Drehbewegung einer Druckwaage wird durch das Drehmoment, das auf die für das Drehmoment wirksamen Begrenzungsflächen der Druckwaage ausgeübt wird, hervorgerufen.

3) Die auf der Schwerpunktsverschiebung aufgebaute Behandlung liefert auch für den allgemeinen Fall, d.h. für Druckwaagen von nicht kreiswulstförmiger Gestalt auf einfache Art die Gleichgewichtsbedingung, welche über die Berechnung der auf die Begrenzungsflächen ausgeübten Drehmomente nur schwierig abzuleiten wäre. Erstere Behandlung ist daher der letzteren vorzuziehen

Es wurden die Berichtigungszahlen für die Mengenmessung für I.G.Hochdruckringwaagen berechnet, wenn diese für ein Medium benutzt werden, dessen Wichte sich von der Wichte der Füllflüssigkeit bei der Eichung unterscheidet. Es wurden 2 Fälle behandelt:

a) Die Waage wird nach der Eichung nicht mehr verändert, d.h. die Schraubgewichte werden nicht verschoben. Der veränderte Nullpunkt der Waage im Betrieb wird nicht korrigiert. Es ergeben sich Berichtigungszahlen, die mit der Diagrammhöhe sich ändern. Bild 6 zeigt die Berichtigungszahlen für eine Gaswaage für 200/300 Empfindlichkeit.

b) Bei Inbetriebnahme der Waage werden die waagrechten Schraubgewichte solange verschoben, bis der Nullpunkt sich wieder einstellt. Die Berichtigungszahlen sind praktisch für alle Diagrammhöhen konstant und in einer Zahlentafel für die meist vorkommenden Fälle zusammengestellt.

Wilde