

## Berichte der Betriebskontrolle Oppau

### Bandradizierung für Druckwaagen

VON DR. WILDE

mit Anhang v. 19.5.39 u. 24.5.40 :

Über die Verwendungsmöglichkeit der alten  
U-förmigen Druckwaage ( U - Druckwaage )  
an Stelle der Ringwaage.

von DR. GMELIN u. DR. WILDE



I. G. FARBENINDUSTRIE AKTIENGESELLSCHAFT  
LUDWIGSHAFEN AM RHEIN

Bandradizierung für Druckwaagen.

Übersicht:

- 1) Im Hinblick auf die Bedürfnisse der Mengemessung bei hohen und höchsten Drücken und mit größeren Druckdifferenzen wird eine Druckwaage mit U-Form berechnet. Für eine solche Waage können gerade Präzisionsrohre an Stelle der schwer in kleiner Stückzahl zu beschaffenden Ringrohre für höchste Drücke von mehreren 1000 atü Verwendung finden.
- 2) Für Druckwaagen mit Kreis- und U-Form werden die Abwälzkurven für eine Bandradizierung berechnet und konstruiert und die Rückstellkräfte angegeben.
- 3) Bei Kreisform der Druckwaage läßt sich durch Einführung einer Übersetzung (1:8) zwischen Waage und Radizierkurve eine Verringerung des Rückstellgewichtes von 10 auf 5 kg erreichen. Läßt man zu, daß in dem Boden des Druckwaagenkastens eine Öffnung angebracht wird, sodaß ein längeres Band verwendet werden kann, dann ist eine nochmalige Verringerung auf 3 kg möglich.
- 4) Bei der U-Form der Druckwaage ist nur mit einer Übersetzung zwischen Waage und Radizierkurve eine Lösung möglich. Die notwendigen Gewichte für ein Übersetzungsverhältnis 1:8 sind 4 kg bzw. 2 kg bei Zulassung eines längeren Bandes.

## I. Einleitung: Zweck der Arbeit.

Den Anlaß zu der vorliegenden Arbeit gab das Bedürfnis zu prüfen, ob die bisher nur mit 800 mm mittlerem Ringdurchmesser durchführbare Höchstdruckdampf-Ringwaage für große Druckdifferenzen (700 mm Hg - H<sub>2</sub>O) nicht durch eine wesentlich schmalere U-Waage von derselben Baubreite wie die normale 400  $\phi$ -Ringwaage (für 200 bzw. 300 mm Hg - H<sub>2</sub>O) ersetzt werden könnte. Dabei sollte durch die Anwendung der U-Form<sup>x)</sup> zugleich die Frage der Herstellung von Höchstdruckringwaagen für einige 1000 atü aus geraden, gezogenen Präzisionsrohren gelöst werden, da Ringrohre für einige 1000 atü in geringer Stückzahl von den Rohrwerken nicht hergestellt werden. Da die Anwendung der Bandradizierung für diese beiden Zwecke aus verschiedenen Gründen eine vorteilhafte Lösung der gestellten Aufgaben versprach, soll sie im folgenden kurz quantitativ behandelt werden<sup>1)</sup>.

## II. Wesen der Bandradizierung:

Bei einer Druckwaage ist die Anzeige in erster Annäherung proportional dem Differenzdruck und damit dem Quadrat der Menge, die durch ein Drosselgerät hindurchfließt, an dem dieser Differenzdruck auftritt. Erwünscht ist jedoch eine Anzeige, die linear mit der Menge sich ändert. Um dies zu erreichen, bedient man sich einer Radizier Vorrichtung. Die hierfür notwendigen Hilfsmittel sind in mannigfacher Art bereits entwickelt worden<sup>2)</sup>. In folgendem wird die Bandradizierung behandelt und die Formen der hierbei gebrauchten Radizierkurven berechnet.

Ein Differenzdruck bewirkt bei einer Druckwaage ein Drehmoment und dreht die Druckwaage bis zu dem bestimmten Ausschlagswinkel, bei dem das entgegengesetzt gerichtete Drehmoment der Druckwaage die gleiche Größe erreicht. Wird das Drehmoment der Waage durch ein fest an der Waage angebrachtes Gewicht hervorgerufen, dann verändert sich die Größe des Drehmomentes mit

- 1) Bereits 1939 wurde von dem gleichen Verfasser eine Berechnung der Druckwaage mit U-Form durchgeführt. (Siehe Anhang).
  - 2) vergl. z.B. H. Toeller u. G. Klee: Über die Radizierung an Ringwaagen und deren Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Feinmech. u. Präz. 50 (1942)
- x) Die erste Druckwaage dieser Form wurde im Juni 1915 von Dr. Gmelin gebaut. Inzwischen ist als erstes "drehbar aufgehängtes U-Rohr mit Zeiger" das von Cl. Herschel (1887) im ATM: V 1244-1 erwähnt worden.

$\sin \alpha$  ( $\alpha$  = Ausschlagswinkel der Waage) und man hat, wie oben angegeben, eine mit dem Quadrat der Menge proportionale Änderung des Ausschlags.

Befestigt man dagegen das Gewicht an einem Band, das sich beim Drehen der Waage auf einer Kurve auflegt, dann ist durch die Form der Kurve jedem Ausschlagswinkel  $\alpha$  der Waage ein bestimmter Hebelarm und damit auch ein bestimmtes Drehmoment der Waage zugeordnet.

Dieser Vorrichtung bedient sich man die Bandradizierung. Die Abwälzkurve für das Band des Gewichtes ist so bestimmt, daß die Bedingungsgleichung

$$\alpha = \text{Const} \sqrt{h} \quad (h = \text{Wirkdruck})$$

erfüllt ist. Die Konstante ist dabei durch die Angabe, bei welchem  $h_m$  der größte Ausschlagswinkel  $\alpha_m$  erreicht werden soll, bestimmt. Somit lautet die obige Gleichung:

$$\alpha = \frac{\alpha_m}{\sqrt{h_m}} \cdot \sqrt{h} \quad (1)$$

### III. Druckwaage mit Kreiswulstform:

Die Gleichgewichtsbedingung lautet mit den Bezeichnungen

- $q$  = Ringquerschnitt
- $S_1$  und  $S_2$  = spez. Gewicht der manometrischen Flüssigkeiten
- $R$  = Radius der Ringwaage
- $G$  = Rückstellgewicht
- $l$  = Hebelarm der Rückstellkraft.

$$q \cdot (S_1 - S_2) \cdot R \cdot h = \text{Drehmoment der Waage} = G \cdot l \quad (2)$$

Außerdem muß die Bedingungsgleichung

$$\alpha = \frac{\alpha_m}{\sqrt{h_m}} \cdot \sqrt{h} \quad (1)$$

erfüllt sein. Aus (1) und (2) folgt:

$$q \cdot (S_1 - S_2) \cdot R \cdot \frac{h_m}{\alpha_m^2} \cdot \alpha^2 = G \cdot l$$

oder

$$\alpha^2 = \frac{q \cdot (S_1 - S_2) \cdot R \cdot h_m}{G \cdot \alpha_m^2} \cdot \alpha^2 = \frac{A}{2} \cdot \alpha^2 \quad (3)$$

Die Gleichung (3) liefert zu jedem Ausschlagswinkel  $\alpha$  der Waage die Größe

des zugehörigen Hebelarmes 1, an dem das Rückstellgewicht G angreifen muß, wenn die Anzeige linear mit der Menge erfolgt, oder mit anderen Worten: Gleichung (3) liefert die Größe des Abstandes 1, den die Tangente an die Abwälzkurve beim Ausschlagswinkel  $\alpha$  vom Drehpunkt haben muß. Die Tangentenschar, deren Einhüllende die Abwälzkurve (= Radzierkurve) bildet, lautet

$$x \cdot \cos. \alpha + y \cdot \sin. \alpha - l = 0$$

(Hesse'sche Normalform der Geraden)

oder 1 (Gleichung 3) eingesetzt:

$$x \cdot \cos. \alpha + y \cdot \sin. \alpha - \frac{A}{2} \cdot \alpha^2 = 0.$$

Für kleine Ausschlagswinkel gilt

$$\frac{\alpha^2}{2} \sim 1 - \cos. \alpha.$$

Somit:

$$x \cdot \cos. \alpha + y \cdot \sin. \alpha - A \cdot (1 - \cos. \alpha) = 0.$$

Durch Differentiation nach dem Parameter  $\alpha$  und Elimination des Parameters ergibt sich daraus auf einfache Weise die Einhüllende und damit die Form der Radzierkurve zu

$$(x - A)^2 + y^2 = A^2. \quad (4)$$

Die Abwälzkurve hat somit die Form eines Kreises<sup>3)</sup> mit dem Radius

$$r = A = \frac{4 \cdot q \cdot (s_1 - s_2) \cdot R \cdot h_m}{G \cdot \alpha_m^2} = \frac{\text{Const.}}{G}$$

(vergleiche dazu Bild 1, Anlage 1).

Für die bei uns übliche Hochdruckringwaage ist

$$\begin{aligned} q &= 0,000\,706 \text{ m}^2 \\ s_1 - s_2 &= 12\,600 \text{ kg/m}^3 \\ h_m &= 0,3 \text{ m} \\ \alpha_m &= 30^\circ = 0,5236 \text{ (Bogenmaß)} \\ R &= 0,2 \text{ m.} \end{aligned}$$

Damit wird

$$r = \frac{4,08}{G} \text{ [m].}$$

3) Eine solche kreisförmige Abwälzkurve ist als Radziervorrichtung für einen auf dem Differenz-Kolbenprinzip aufgebauten Mengemesser der Betr.Kontr.Op für 350 atü schon seit 1937 praktisch in Benützung (s.A.N. 37 011 v.19.5.37).

Die notwendige Länge der Abwälzkurve umfaßt einen Winkelbereich von  $30^\circ$ . Wird verlangt, daß sie über die Ringwaage nicht hervorsteht, dann muß  $\frac{r}{z} \leq 0,2$ , d.h.  $G \geq 10$  kg sein.

#### IV. Maßnahmen zur Verringerung des Rückstellgewichtes:

Schaltet man zwischen Waage und Radizierkurve eine Übersetzung ein, dann kann man eine Verkleinerung des Gewichtes erreichen, da es jetzt möglich ist, zu größeren Hebelarmen für die Rückstellkraft überzugehen, ohne dabei gegen die Forderung zu verstoßen, daß die Radizierkurve nicht über den Ringwaagenkörper überstehen soll. Allgemein gilt, daß man mit umso kleineren Gewichten auskommt, je größer das Übersetzungsverhältnis gewählt wird. In Bild 2, Anlage 1 ist als Beispiel mit den Werten der Zahlentafel 1 die Radizierkurve für eine Übersetzung 1:8 und ein Gewicht  $G = 5$  kg gezeichnet.

Zahlentafel 1

h mm	$\delta \cdot \alpha^\circ$	1.G mkg	l m
4,7	30	0,00835	0,00017
18,5	60	0,0334	0,0066
42,3	90	0,0752	0,0150
75	120	0,1335	0,0267
117	150	0,2090	0,0418
169	180	0,3000	0,0600
230	210	0,4100	0,0820
300	240	0,5340	0,1068

Bild 2 läßt erkennen, wie die Kurve als Einhüllkurve einer Tangentenschar konstruiert wurde.

Das Band, das mit dem Gewicht  $G$  belastet wird, muß nun mindestens die gestreckte Länge der Radizierkurve (ca. 200 mm) haben, da es beim Vollausschlag der Waage über die gesamte Länge dieser Kurve aufliegt. Beim Ausschlagwinkel Null findet keine Auflage statt und das Band erreicht seine tiefste Lage. Die Maße für den gezeichneten Fall sind nun so gewählt, daß das Gewicht in seiner tiefsten Lage von dem Boden des Druckwaagenkastens noch einige cm entfernt ist. Läßt man aber zu, daß in der Bodenfläche des Kastens eine Öffnung angebracht wird, sodaß das Band länger gewählt werden kann und damit auch die Radizierkurve größer konstruiert werden kann, dann läßt sich eine Verringerung des Gewichtes auf ca. 3 kg ermöglichen.

V. Druckwaage mit U-Form: <sup>1)</sup>

Für diese Form der Druckwaage wurde ebenfalls die Radizierkurve bestimmt. Es besteht gegenüber der Kreisform der wesentliche Unterschied, daß hier nur durch Einfügung einer Übersetzung eine Lösung möglich ist. Es wurden verschiedene Fälle durchgerechnet. Es ergab sich dabei, wie bei der Druckwaage mit Kreisform, daß man mit umso kleineren Gewichten auskommt, je größer die Übersetzung gewählt wird. Ein Übersetzungsverhältnis 1:8 dürfte die günstigsten Abmessungen liefern. Dieser Fall ist in Tabelle 2 zusammengestellt und in Bild 4 konstruiert.

Die Gleichgewichtsbedingung für die Druckwaage mit U-Form (Bild 3, Anlage 2) wurde bereits früher (vergl. Fußnote 1) abgeleitet und lautet:

$$+ h^2 \cdot q_1 \cdot (S_1 - S_2) \frac{\sin \alpha}{4 \cdot \cos^2 \alpha} + h \cdot q_1 \cdot (S_1 - S_2) \cdot \frac{m}{2 \cdot \cos^2 \alpha} \\ - \sin \alpha \left[ q_1 \cdot (S_1 - S_2) a \cdot l - \frac{a^2}{2} + \frac{am}{2} - \frac{m^2}{4} + \frac{m^2}{4} \tan^2 \alpha - \frac{m}{2 \cos^2 \alpha} - mL \right] \\ + q_1 \cdot S_2 \cdot (2n \cdot l - n^2) + q_2 \cdot S_1 \cdot m \cdot l + q_2 \cdot S_2 \cdot (m \cdot l - m \cdot n) ] = \text{Drehmoment der Waage}$$

(vergl. dazu Bild 3, Anlage 2).

Damit errechnet sich mit dem bei Bild 3 angegebenen Zahlenwerten folgende Tabelle.

Zahlentafel 2

h mm	$\delta \cdot \alpha^{\circ}$ <sup>x)</sup>	G.1 mkg	l (für G= m 4 kg)
0	- 120	0,1265	0,032
4,7	- 90	0,1040	0,026
18,5	- 60	0,0842	0,021
42,3	- 30	0,0790	0,0198
75	-	0,0835	0,0209
117	+ 30	0,1030	0,0258
169	+ 60	0,1370	0,0343
230	+ 90	0,1950	0,0488
300	120	0,2871	0,0702

x) Nullage der Waage bei  $\alpha = - 15^{\circ}$ .

Mit den Werten dieser Tabelle ist in Bild 4, Anlage 2, die Radizierkurve konstruiert, für die das gestreckte Band in dem Druckwaagenkasten noch bequem Platz findet. Läßt man, wie bei der Kreisform der Druckwaage ausgeführt, größere Bandlängen zu, dann kann man mit einem Gewicht von 2 kg auskommen.

1) Eine Ergänzung hierzu siehe im Anhang.

Für Druckwaagen zur Messung von größeren Druckdifferenzen kann man die Radizierkurve in ähnlicher Weise berechnen. Als Beispiel sind in Zahlentafel 3 die Hilfswerte für ihre Konstruktion für eine Druckwaage (U-Form) für eine Druckdifferenz von 700mm (Hg-H<sub>2</sub>O) zusammengestellt.

Zahlentafel 3

h mm	$\beta. \alpha^\circ$	G.l mkg	l (für G=6 kg) m
0	- 120	0,404	0,0674
11	- 90	0,317	0,0528
44	- 60	0,250	0,0417
99	- 30	0,208	0,0347
175	0	0,195	0,0325
274	30	0,217	0,0362
394	60	0,292	0,0487
536	90	0,442	0,0737
700	120	0,735	0,1226

Die Abmessungen der Waage sind dabei wie folgt gewählt:

m = 250 mm  
n = 800 "  
l = 425 "

(Vergl.dazu Bild 3, Anlage 2).

Die Konstruktion einer solchen Druckwaage für 120 atü mit 700 mm Hg-H<sub>2</sub>O Druckdifferenz und für 2000 atü mit 300 mm Hg Druckdifferenz ist im Gange.

*Wilde*

*Gruel*



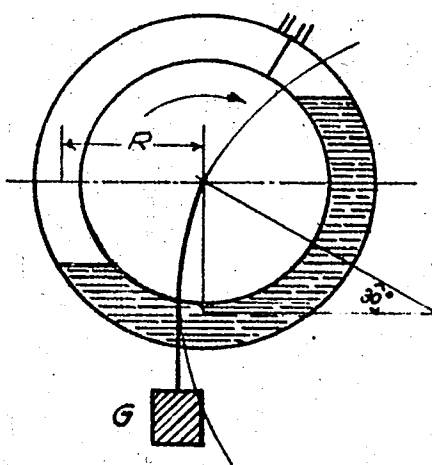


Bild 1 Abwalkurve für die Ringwaage

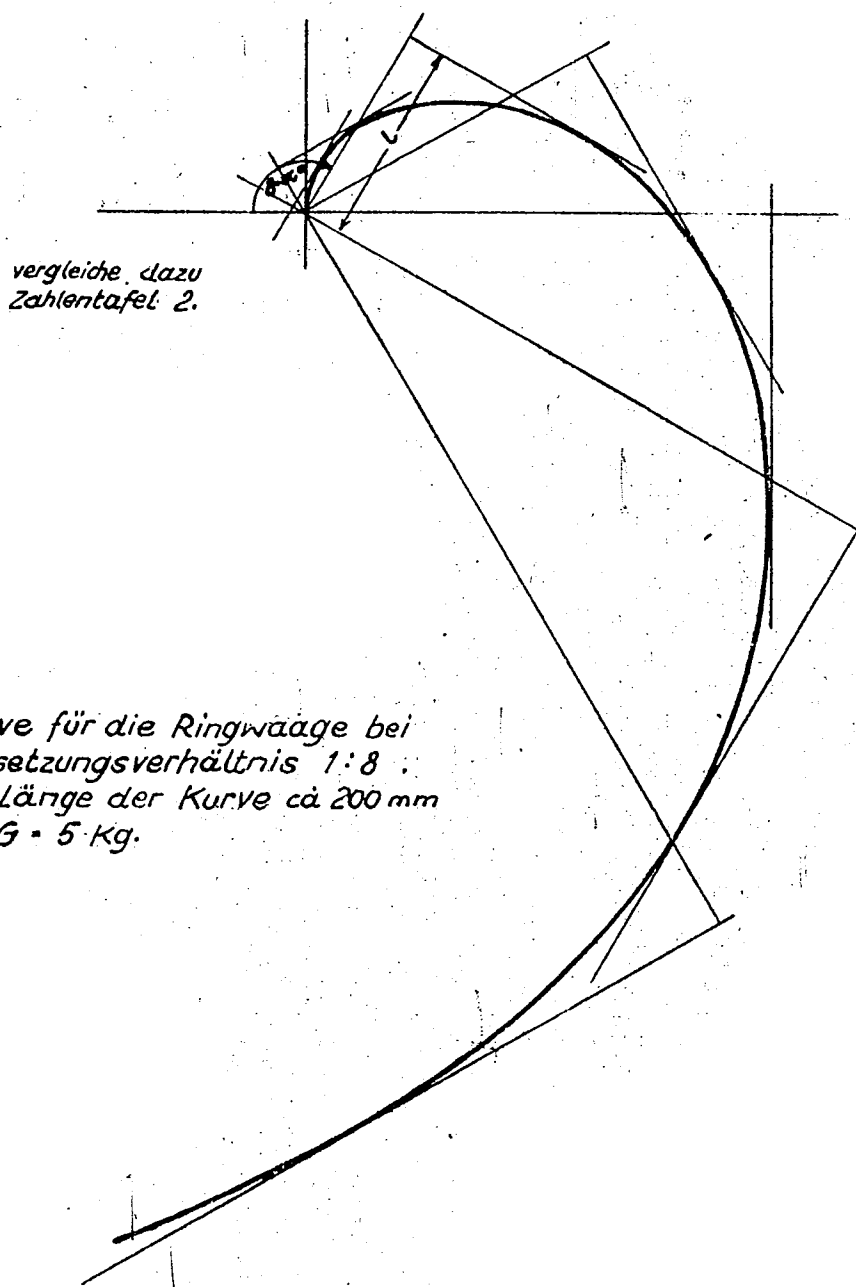
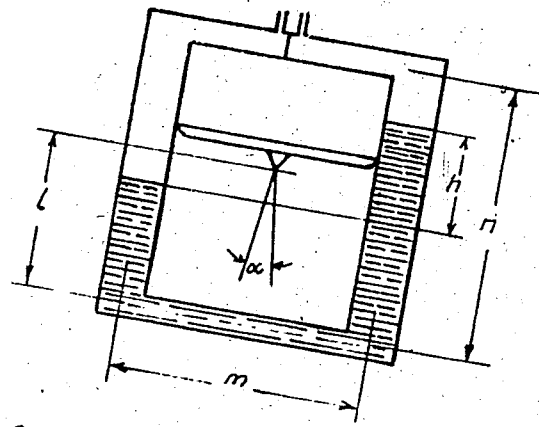


Bild 2 Abwalkurve für die Ringwaage bei  
einem Übersetzungsverhältnis 1:8  
Gestreckte Länge der Kurve ca 200 mm  
Gewicht  $G = 5 \text{ Kg}$ .

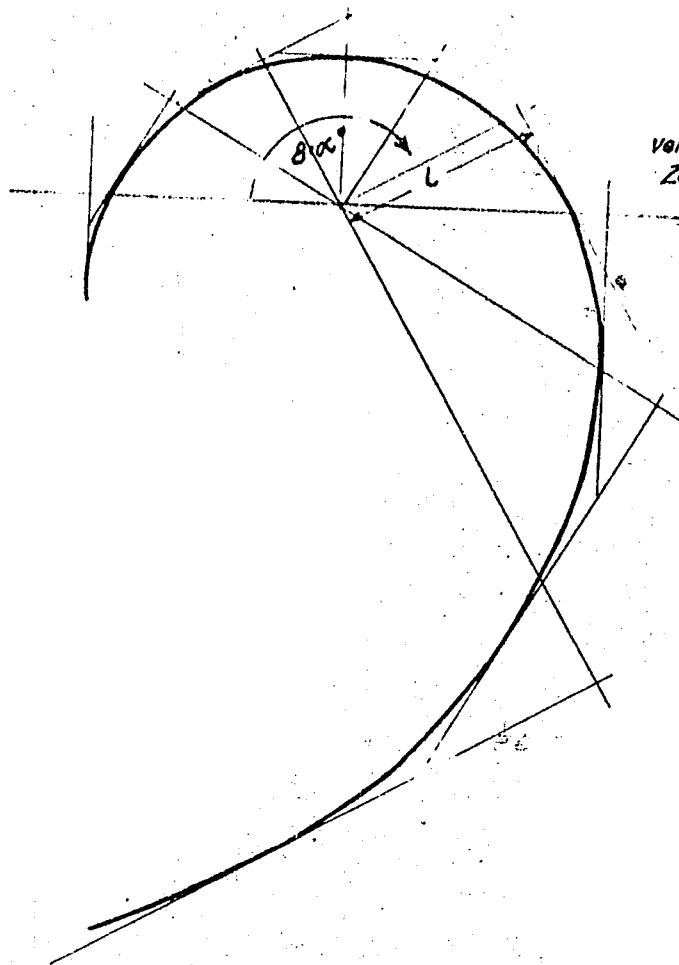
8418



- $m = 250 \text{ mm}$
- $r = 400 \text{ mm}$
- $L = 225 \text{ mm}$
- $a = 700 \text{ mm}$
- $q_1 = 706 \text{ mm}^2$
- $q_2 = 12,5 \text{ mm}^2$
- $S_1 - S_2 = 12500 \text{ kg/m}^3$

Querschnitt der dicken Rohre  $q_1$   
 " " dünnen "  $q_2$   
 Länge des Hg-Fadens  $a$

Bild 3 Druckwaage U-Form Nulllage bei  $\alpha = -15^\circ$



vergleiche dazu  
Zahlentafel 1.

Bild 4 Abwälzkurve für eine Druckwaage U-Form bei einem Übersetzungsverhältnis 1:8  
 Gestreckte Länge der Kurve ca 200 mm  
 Gewicht  $G = 4 \text{ kg}$

Anhang vom 19.5.1939 und 24.5.1940:

Über die Verwendungsmöglichkeit der alten U-förmigen Druckwaage  
(U-Druckwaage) an Stelle der Ringwaage,

(von Dr. Gmelin und Dr. Wilde).

Zusammenfassung:

Die Abweichungen des Ausschlages von der Winkelproportionalität und die Füllungsfehler wurden für eine Ringwaage und eine U-förmige Ringwaage, und zum Vergleich für eine V-förmige und eine Trapez-Druckwaage berechnet und gefunden, daß die U-Form (U-Druckwaage) unbedenklich statt der Kreiswulstform (Ringwaage) benutzt werden kann, während die V- und Trapez-Form zu große Füllungsfehler und die V-Form außerdem zu große Abweichungen des Ausschlages von der Winkelproportionalität ergibt.

Die beiden letzteren Formen können dagegen als Null-Instrumente für Kompensationsgeräte (wie z.B. in Merseburger Bauart) unbedenklich Verwendung finden. Der Bau einer U-Waage für 700 mm Wirkdruck anstelle der 800  $\phi$ -Ringwaage für Höchstdruckdampf und einer solchen für 2000 atü für Sonderzwecke ist vorgesehen.

I. Aufgabenstellung und Überblick.

Unter den ersten Oppauer Versuchsausführungen für Druckwaagen vom Jahre 1915<sup>1)</sup> wurde auch eine solche mit einem U-förmigen Flüssigkeitsrohr benutzt.

Diese mit Wasserfüllung einmalig ausgeführte Ausführung wurde trotz der Unabhängigkeit ihrer Empfindlichkeit von der Höhe der Füllung wieder verlassen, weil damals größter Wert auf einen der Druckdifferenz möglichst winkelproportionalen Ausschlag gelegt wurde, der in bester Annäherung bekanntlich nur von der Kreisringform für das Flüssigkeitsrohr erreicht wird.

<sup>1)</sup> Labor-Journal B.A.S.F. II, 3.6.1915.

Nachdem nun heute schon mehrmals Schwierigkeiten in der Beschaffung gut kalibriger und kreisrunder Rohrbogen aufgetreten sind und weiterhin auftreten können, wurde geprüft, ob es nicht doch möglich wäre, gerade Präzisionsrohre in U-Anordnung nach Anlage 3 an Stelle der Rohrbogen für Druckwaagen, insbesondere solche für hohe Drücke und höhere Druckdifferenzen<sup>1)</sup>, zu verwenden. Mit dieser Prüfung, die rein rechnerisch durchgeführt werden kann, wurde Herr Dr. Wilde beauftragt. Der Gang seiner Rechnung ist im folgenden (Anlage 1-4) zusammengefaßt. Es wurden sowohl die Füllungsfehler, die im Betrieb so klein wie möglich sein sollen, als die Abweichungen der Ausschläge von der Winkelproportionalität, die man nötigenfalls in die Wurzelkurve einzeichnen kann, für die Kreisform, für die alte U-Form und zum Vergleich auch noch für die schon für Vakuumregelung benutzte V-Form berechnet. Die ganze Rechnung gibt zugleich einen Einblick in die Theorie der Druckwaage.

Das in Anlage 1 zusammengestellte Endergebnis zeigt, daß auch die U-Form unbedenklich statt der Kreisform benutzt werden kann. Denn die Füllungsfehler (berechnet für  $\pm 25$  mm Änderung der Normalfüllung) sind bei den praktisch wichtigsten Ausschlägen zwischen  $5^\circ$  und  $30^\circ$  selbst bei  $\pm 25$  mm Änderung so gut wie zu vernachlässigen und die Abweichungen der Ausschläge von der Winkelproportionalität weichen erst von  $2/3$  des Vollausschlags merklich von denen der Kreisform ab. Sie können unbedenklich in die Wurzelkurve eingeeicht werden, da ja die Abweichungen vom Sinus und die Kaliberfehler bei den Ringrohren und der Einfluß der Kapillaren sowieso eingeeicht werden müssen. Die Verwendung der konstruktiv vielleicht einen kleinen Vorteil bietenden V-Form ist weniger wegen ihrer wesentlich stärkeren Anhängigkeit von der Winkelproportionalität (128 % gegenüber 28,7 % bzw. 4,6 % beim U- bzw. Ringrohr) als wegen der großen Füllungsfehler für Betriebszwecke<sup>2)</sup> abzulehnen.

Zur Aushilfe bei Schwierigkeiten in der Beschaffung können nach vorliegender Untersuchung also unbedenklich statt Ringrohrbogen U-förmig angeordnete gerade Rohre benutzt werden. Insbesondere sollen letztere für Drücke

- 
- 1) Ersatz für die viel Raum einnehmende 800  $\phi$ -Waage für 700 mm Wirkdruck.
  - 2) Bei ihrer Verwendung als Nullinstrument in Kompensationsanordnungen, wie sie z.B. von der Betriebskontrolle Merseburg gebaut werden, fallen diese Fehler nicht ins Gewicht.

über 700 at verwendet werden, wo eine Herstellung von Spezial-Ringrohren wegen zu kleiner Stückzahl <sup>viel</sup> zu teuer wird.

Wir haben für alle Fälle die Konstruktion einer U-Druckwaage unter tunlichster Benutzung der Ringwaagen-Konstruktionsteile vorbereitet.

## II. Berechnungen.

In den Anlagen sind die Ausgangsgleichungen (I) und die Endergebnisse (II) der Berechnungen für die verschiedenen Formen der Druckwaagen angegeben. Die in Gleichung (I) vorkommenden Gewichte und Hebelarme lassen sich für die U- und V-Form durch elementare Rechnungen als trigonometrische Ausdrücke angeben. Setzt man diese Ausdrücke in Gleichung (I) ein und faßt zusammen, so erhält man Gleichung (II), die nach fallenden Potenzen von h geordnet ist. Die Rechnung ist ohne jede Vernachlässigung durchgeführt, sodaß Gleichung II das genaue Ergebnis darstellt.

Während für die Berechnung der Druckwaagen für U- und V-Form nur elementare Rechnungen notwendig waren, muß für die Kreisform zur Berechnung des Hebelarmes (FB) eine Integration durchgeführt werden, und zwar ist

$$FB = \frac{\int_0^x R \cos \xi \cdot d\xi}{\int_0^x d} \cdot \sin \alpha .$$

Auch hier ergibt sich dann das Endergebnis ohne Vernachlässigung irgendwelcher Glieder.

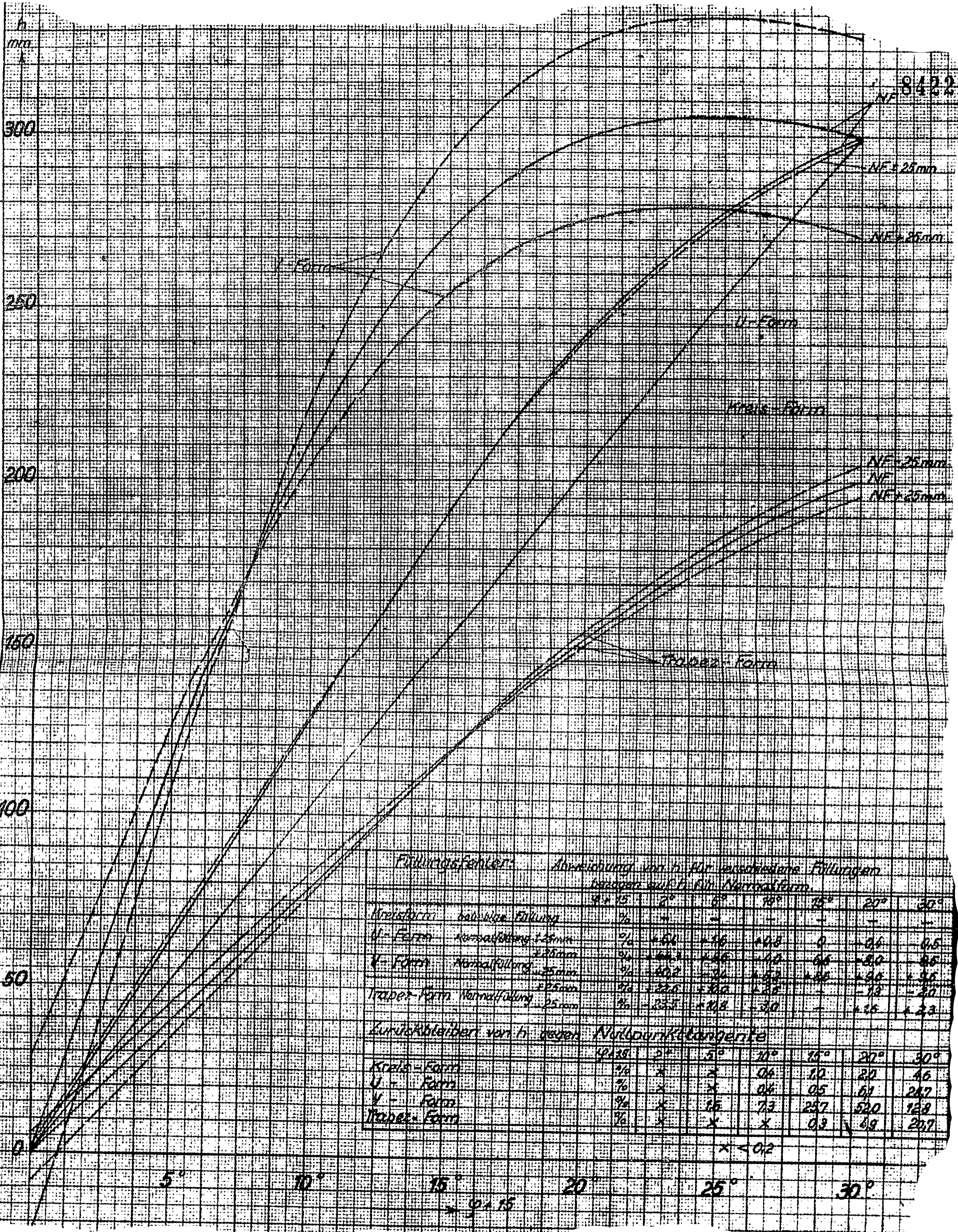
Die Maße der Waage für die numerische Berechnung, deren Ergebnis in Anlage 1 zeichnerisch dargestellt ist, wurden so gewählt, daß ein Wirkdruck bis 300 mm gut gemessen werden kann. Das Drehmoment  $G \cdot r$  ist so bestimmt, daß in der Nulllage der Ausschlagswinkel  $\varphi = -15^\circ$  und beim maximalen Wirkdruck ( $h = 300$  mm)  $\varphi = +15^\circ$  beträgt.

Für die U-Form ergibt sich:

$$G \cdot r = 0,484 \text{ mkg}, \quad \beta = 26^\circ 15',$$

für die V-Form

$$G \cdot r = 0,221 \text{ mkg}, \quad \beta = 59^\circ 10'.$$



**Füllungsfehler:** Abweichung von h für verschiedene Füllungen bezogen auf h für Normalform.

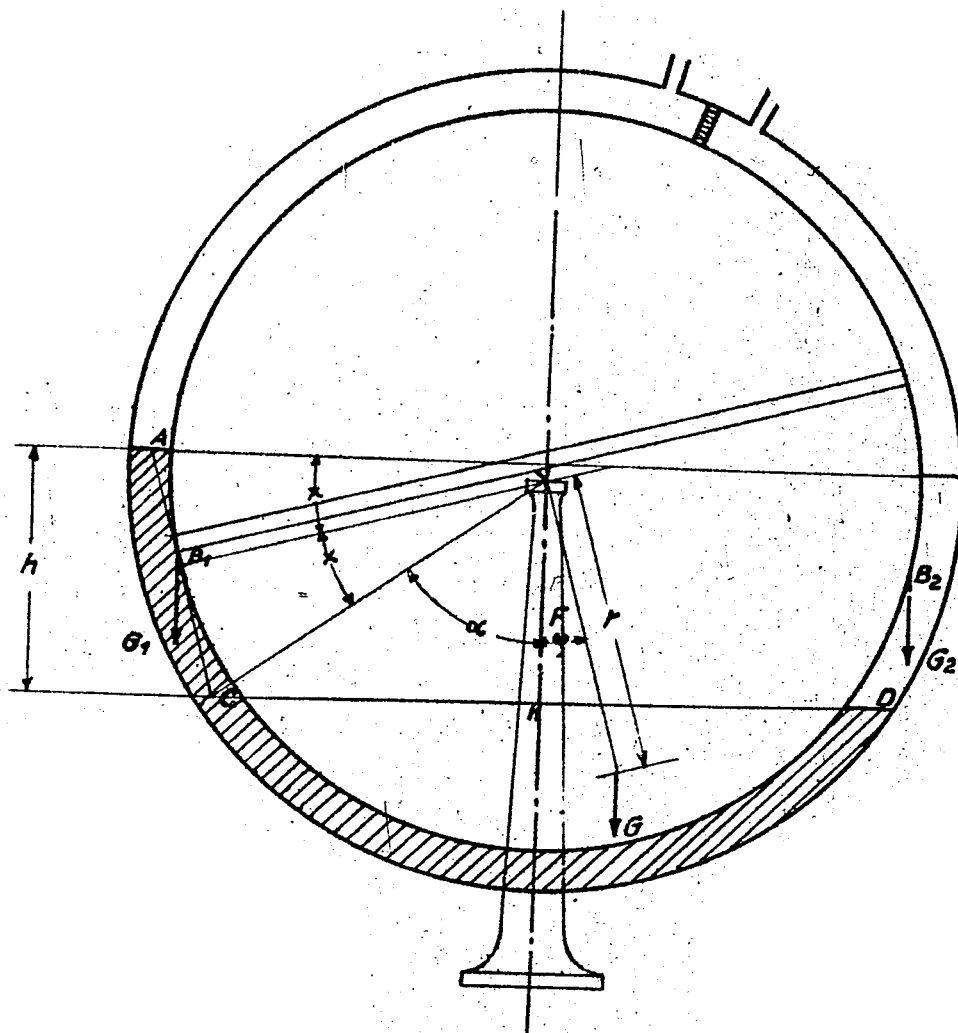
	9+15	2°	5°	10°	15°	20°	30°
Kreisform beliebige Füllung	%	-	-	-	-	-	-
U-Form Normalfüllung 25mm	%	+0,4	+1,6	+4,8	0	-0,6	-0,5
V-Form Normalfüllung 25mm	%	+0,2	+0,6	+1,8	+0,6	+0,0	-0,5
Trapez-Form Normalfüllung 25mm	%	+2,5	+1,0	+1,8	-	-1,3	-2,0
Kreis-Form	%	+2,5	+1,8	+3,0	-	+1,5	+2,3

**Zurückbleiben von h gegen Normaltangente**

	9+15	2°	5°	10°	15°	20°	30°
Kreis-Form	%	x	x	0,4	1,0	2,0	4,6
U-Form	%	x	x	0,4	0,5	0,1	2,7
V-Form	%	x	1,5	7,3	23,7	52,0	12,8
Trapez-Form	%	x	x	x	0,3	0,9	2,7

x < 0,2



Mittlerer Durchmesser des Ringes :  $2 \cdot R$   
 Länge des Quecksilberfadens :  $a$  mm  
 Querschnitt des Rohres :  $q$  mm<sup>2</sup>  
 Spez. Gewichte der Flüssigkeiten :  $S_1$  und  $S_2$

Gleichgewichtsbedingung:

$$G \cdot r \cdot \sin \varphi - G_1 \cdot FB_1 + G_2 \cdot FB_2 = D$$

$$(I) \quad G \cdot r \cdot \sin \varphi - FB (G_1 - G_2) = D$$

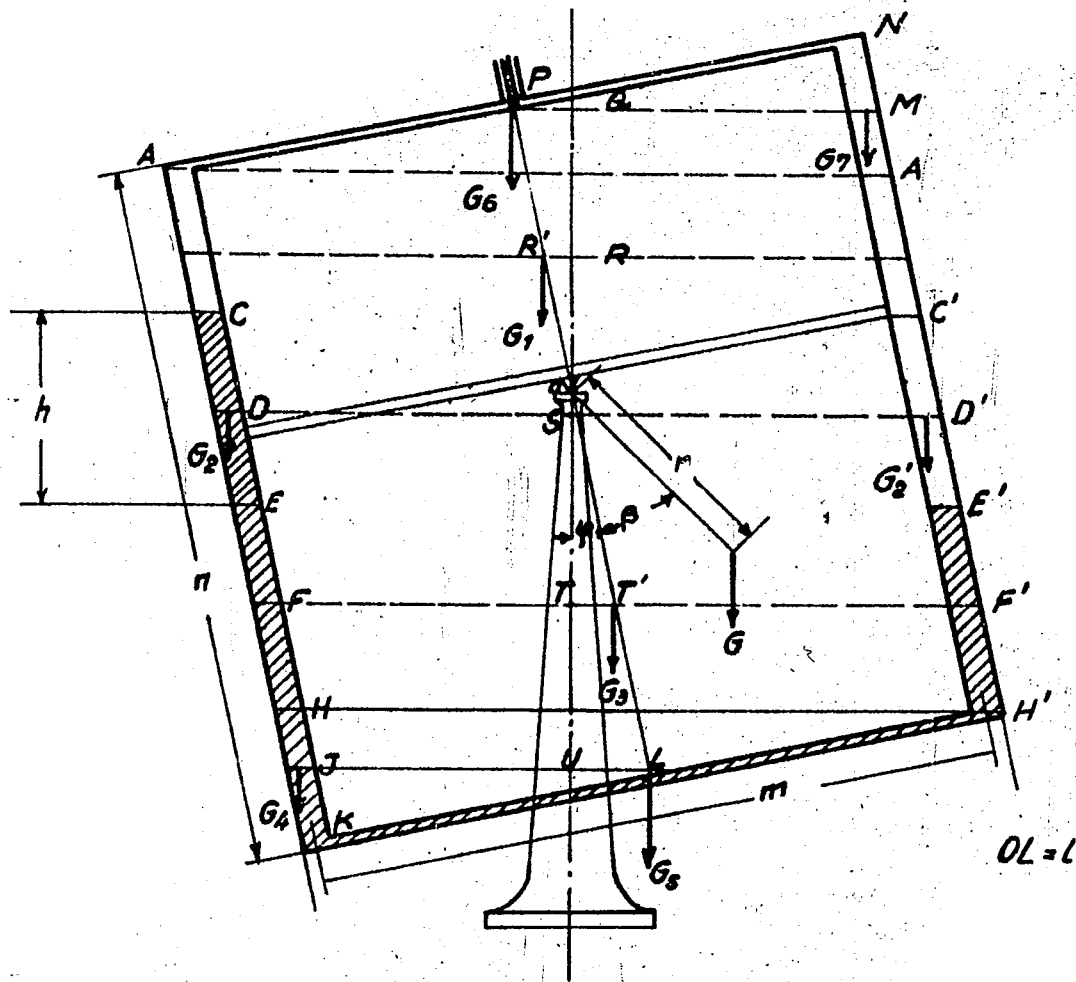
$$G_1 - G_2 = q \cdot (S_1 - S_2) \cdot 2R \cdot x$$

$$FB = R \cdot \frac{\sin x}{x} \cdot \sin \alpha ; \sin x = \frac{h}{2 \cdot R \cdot \sin \alpha}$$

$$= R \cdot \frac{h}{2R} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha \cdot x}$$

Eingesetzt in I:

$$(II) \quad h = \frac{G \cdot r}{q \cdot (S_1 - S_2) \cdot R} \cdot \sin \varphi$$



Querschnitt der Rohre AK und NH' :  $q_1 = \text{mm}^2$   
 Querschnitt der Rohre KH' und AN :  $q_2 = \text{mm}^2$   
 Spez. Gewichte der Flüssigkeiten :  $S_1$  und  $S_2$   
 Länge des Quecksilberfadens :  $a \text{ mm}$

Gleichgewichtsbedingung:

$$(I) \quad G \cdot r \cdot \sin(\gamma + \beta) - G_1 \cdot RR' - G_2 \cdot SD + G_2' \cdot SD' + G_3 \cdot TT' - G_4 \cdot UJ + G_5 \cdot UL - G_6 \cdot QP + G_7 \cdot QM = 0$$

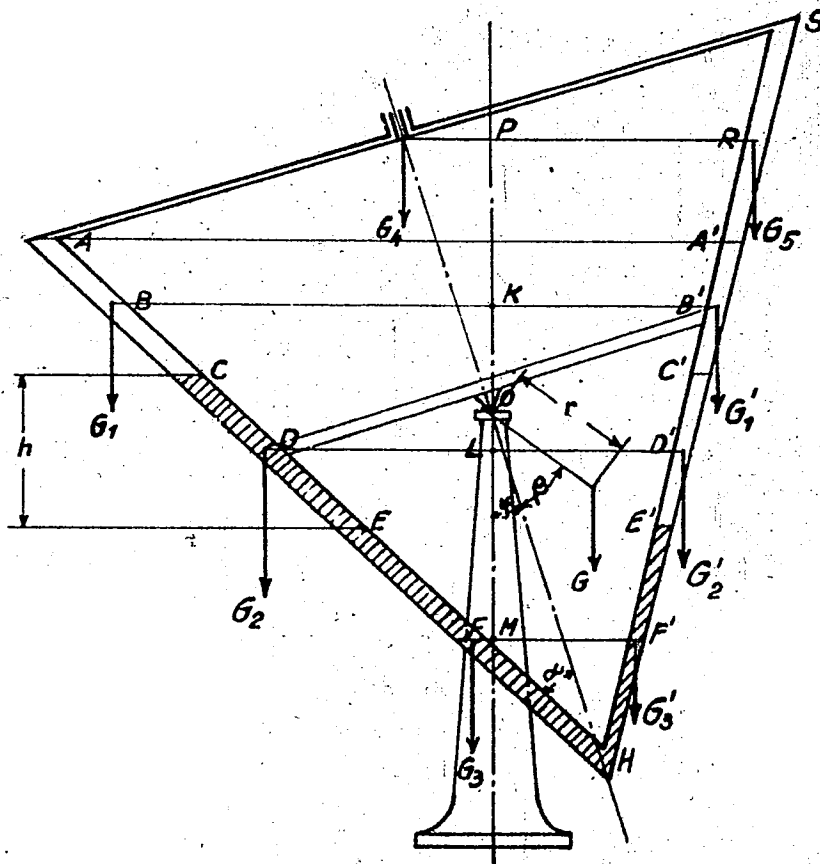
oder

$$(II) \quad -h^2 \cdot q_1 (S_1 - S_2) \cdot \frac{\sin \gamma}{4 \cdot \cos^2 \gamma} - h \cdot q_1 (S_1 - S_2) \cdot \frac{m}{2 \cdot \cos^2 \gamma} + \sin \gamma \left[ q_1 (S_1 - S_2) \left( a \cdot L - \frac{a^2}{4} + \frac{am}{2} - \frac{m^2}{4} + \frac{m^2}{4} \cdot \tan^2 \gamma - \frac{m}{2 \cdot \cos^2 \gamma} - m \cdot L \right) + q_1 \cdot S_2 \cdot (2n \cdot L - n^2) + q_2 \cdot S_1 \cdot m \cdot L + q_2 \cdot S_2 (m \cdot L - m \cdot n) \right] + G \cdot r \cdot \sin(\gamma + \beta) = 0$$

Zahlenmäßige Ergebnisse siehe Anlage 1

für  $m = 250 \text{ mm}$  ;  $n = 400 \text{ mm}$  ;  $L = 225 \text{ mm}$   $q = 706 \text{ mm}^2$   
 $q_1 = 706 \text{ mm}^2$  ;  $q_2 = 12,5 \text{ mm}^2$  ;  $S_1 = 13,6$  ;  $S_2 = 1$





OH = L

Querschnitt der Rohre AH und HS :  $q_1$  mm<sup>2</sup>  
 Querschnitt des Rohres AS :  $q_2$  mm<sup>2</sup>  
 spez. Gewichte :  $s_1$  und  $s_2$   
 Länge des Quecksilberfadens :  $a$  mm

Gleichgewichtsbedingung:

$$(I) G \cdot r \cdot \sin(\gamma + \beta) - G_1 \cdot KB - G_2 \cdot LD - G_3 \cdot MF + G_1' \cdot KB' + G_2' \cdot LD' + G_3 \cdot MF' - G_4 \cdot PQ + G_5 \cdot PR = 0$$

oder

$$(II) -h^2 \cdot q_1 \cdot (s_1 - s_2) \cdot \frac{\text{tg } \gamma}{4 \cos \alpha \cdot \cos \gamma} - h \cdot q_1 \left[ (s_1 - s_2) \frac{a \cdot \text{tg } \alpha}{2 \cos^2 \gamma} + s_2 \cdot L \cdot \frac{\text{tg } \gamma}{\cos \alpha} \right] - q_1 (s_1 - s_2) \left[ \frac{\alpha^2 \cdot \cos^2(\alpha - \gamma) \cdot \sin(\alpha + \gamma) - \cos^2(\alpha + \gamma) \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{2 \cdot (2 \cos \alpha \cdot \cos \gamma)^2} - \alpha \cdot L \cdot \sin \gamma \right] + q_1 \cdot s_2 \left[ L \cdot m \cdot \left( \frac{\sin \gamma \cdot 2 \cos \alpha \cdot \cos \gamma}{\cos(\alpha - \gamma)} + \frac{\sin^2 \gamma}{\sin(2\alpha + \gamma)} \right) + \frac{m^2}{2} \cdot \frac{\sin 2\alpha \cdot \sin \gamma}{\sin^2(2\alpha + \gamma)} \right] - \frac{m^2}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha + \gamma) \cdot \cos^2(\alpha - \gamma) - \sin(\alpha - \gamma) \cdot \cos^2(\alpha + \gamma)}{\cos^2(\alpha - \gamma)} - m^2 \frac{\cos \alpha \cdot \sin^2 \gamma}{\sin(2\alpha + \gamma)} - q_2 \cdot s_2 \cdot m \cdot (m \cdot \cos \alpha - L) \cdot \sin \gamma + G \cdot r \cdot \sin(\gamma + \beta) = 0$$

Zahlenmässige Ergebnisse siehe Anlage 1

für  $m = 440$  mm ;  $L = 254$  mm ;  $\alpha = 30^\circ$   
 $q_1 = 706$  mm<sup>2</sup> ;  $q_2 = 12,5$  mm<sup>2</sup> ;  $s_1 = 13,6$  ;  $s_2 = 1$

30. September 1942. rr.

8426

Nachtrag vom 24.5.1940

zu der Aktennotiz Nr. 39 006 vom 19. Mai 1939.

In Anlage 5 und 5a sind die in dem vorgenannten Bericht beschriebenen Berechnungen für eine Druckwaage in Trapezform durchgeführt. Für die zahlenmäßige Berechnung wurden die Maße so gewählt, daß die Druckwaage in die bisherigen Schränke eingebaut werden können. Das hat zur Folge, daß mit dieser Einschränkung nur ein Wirkdruck von ca. 200 mm gemessen werden kann.

Die Rechnung ergibt eine ( $\phi$  - h)-Kurve (Anlage 1), die nur bis zu einem Ausschlagwinkel von  $20^\circ$  praktisch gerade ist (in Übereinstimmung mit den Me-Ver suchen). Die Empfindlichkeit für Füllungsfehler ist, wie zu erwarten war, wesentlich größer als bei der U-Form.

Mit den in Anlage 5 angegebenen Maßen errechnet sich

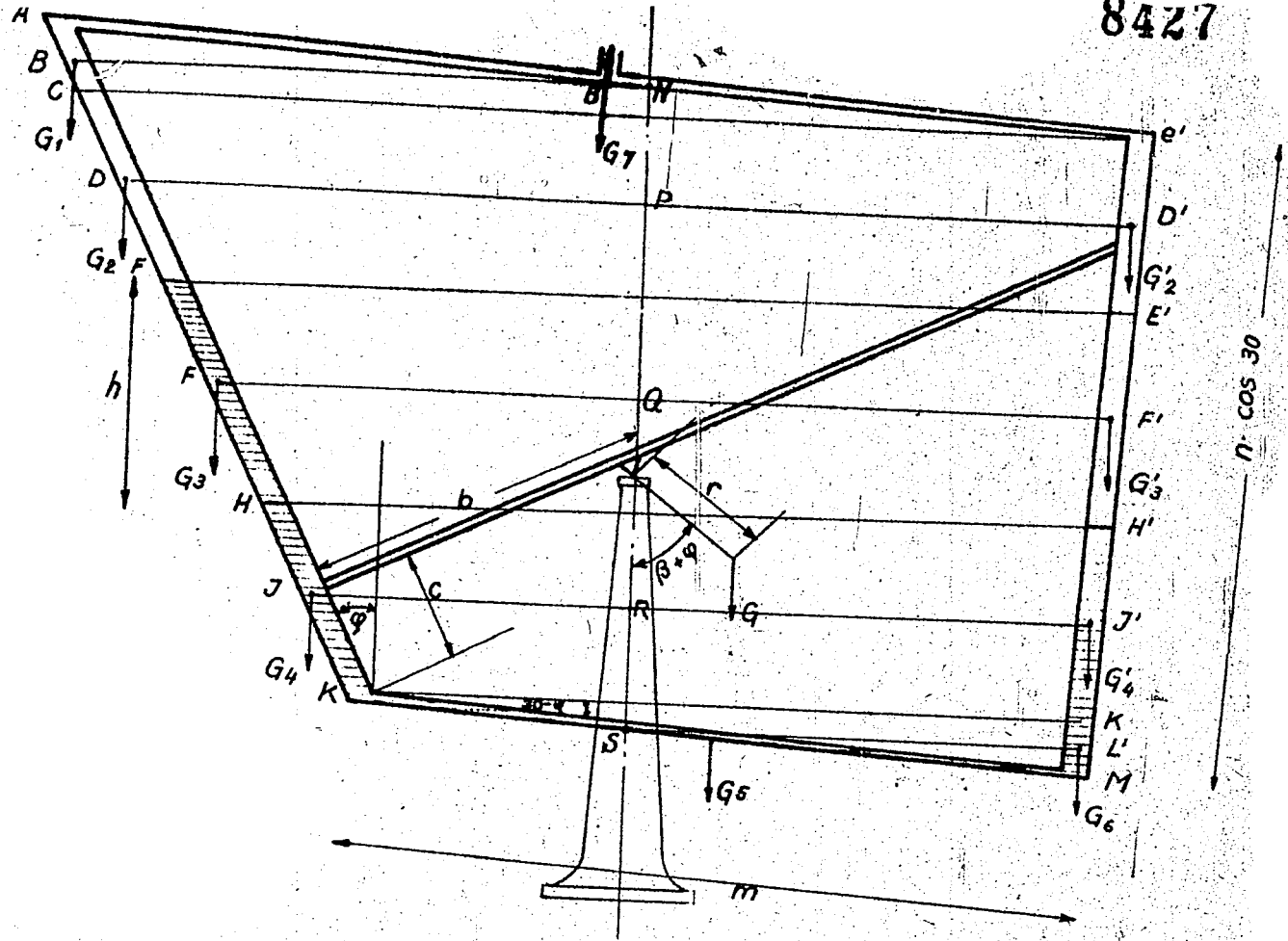
$$G \cdot r = 1,02 \text{ mkg}$$

$$\beta = - 12^\circ 10'$$

Bezüglich der Verwendbarkeit für Kompensationsanordnungen gilt das auf Seite 2 in Fußnote 2 für die V-Form Gesagte.

*Wilde*

2 Anlagen.



Querschnitt der Rohre AK und C'M:  $q_1 \text{ mm}^2$ , Querschnitt der Rohre AC'u.KM:  $q_2 \text{ mm}^2$   
 Spez. Gewicht der Flüssigkeiten  $\delta_1 + \delta_2$ .

Gleichgewichtsbedingung: Länge des Hg Fadens:  $EK + MH' = a \text{ mm}$

$$G_1 \cdot BN + G_2 \cdot DP + G_3 \cdot FQ + G_4 \cdot JR - G_5 \cdot LS - G_6 \cdot L'S - G_4' \cdot J'R - G_3' \cdot F'Q - G_2' \cdot D'P - G_7 \cdot NB' - G_7 \cdot \sin(\beta + \varphi) = 0$$

$$G_1 = \left[ n \cdot \frac{\sin 30 \cdot \sin(30 - \varphi)}{\cos \varphi} + m \cdot \frac{\sin(30 - \varphi)}{\cos \varphi} \right] q_1 \cdot \delta_2$$

$$G_2 = \left[ n \cos 30 - m \operatorname{tg}(30 - \varphi) - \left( a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg}(30 - \varphi) \right) \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + \cos(30 - \varphi)} - \frac{h}{\cos(30 - \varphi)} \right] \frac{\cos(30 - \varphi)}{\cos \varphi} q_1 \cdot \delta_2$$

$$G_3 = \frac{h}{\cos \varphi} \cdot q_1 \cdot \delta_1$$

$$G_4 = \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg}(30 - \varphi) \right] \frac{\cos(30 - \varphi)}{\cos \varphi + \cos(30 - \varphi)} \cdot q_1 \cdot \delta_1$$

$$G_5 = m \cdot q_2 \cdot \delta_1$$

$$G_6 = m \cdot \operatorname{tg}(30 - \varphi) \cdot q_1 \cdot \delta_1$$

$$G_4' = \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg}(30 - \varphi) \right] \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + \cos(30 - \varphi)} \cdot q_1 \cdot \delta_1$$

$$G_3' = \frac{h}{\cos(30 - \varphi)} \cdot q_1 \cdot \delta_2$$

$$G_2' = \left[ n \cdot \cos 30 - m \operatorname{tg}(30 - \varphi) - \left( a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg}(30 - \varphi) \right) \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + \cos(30 - \varphi)} - \frac{h}{\cos(30 - \varphi)} \right] \cdot q_1 \cdot \delta_2$$

$$G_7 = (m + n \cdot \sin 30) \cdot q_2 \cdot \delta_2$$

$$BN = b \cos \varphi - c \cdot \sin \varphi + n \left[ \cos 30 \cdot \cos (30 - \varphi) + \frac{\sin 30 \cdot \sin (30 - \varphi)}{2} \right] \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} - \frac{m}{2} \cdot \frac{\sin (30 - \varphi)}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi$$

$$DP = b \cos \varphi - c \sin \varphi + \frac{1}{2} \left[ n \cos 30 - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right] \cos (30 - \varphi) \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} + \left\{ \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right] \frac{\cos (30 - \varphi)}{\cos \varphi + \cos (30 - \varphi)} + \frac{h}{\cos \varphi} \right\} \cdot \frac{\sin \varphi}{2}$$

$$FQ = b \cos \varphi - c \sin \varphi + \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right] \frac{\cos (30 - \varphi)}{\cos \varphi + \cos (30 - \varphi)} \cdot \sin \varphi + \frac{h}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sin \varphi}{2}$$

$$JR = b \cos \varphi - c \sin \varphi + \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right] \cdot \frac{\cos (30 - \varphi)}{2 \cdot (\cos \varphi + \cos 30 - \varphi)} \cdot \sin \varphi$$

$$LS = \frac{m}{2 \cos (30 - \varphi)} - \frac{m}{2} \frac{\operatorname{tg} (30 - \varphi)}{\cos \varphi} \sin 30 + \frac{m}{2} \cdot \frac{\sin (30 - \varphi) \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} - b \cos \varphi + c \sin \varphi$$

$$L'S = \frac{m}{\cos (30 - \varphi)} - \frac{m}{2} \frac{\operatorname{tg} (30 - \varphi)}{\cos \varphi} \sin 30 + \frac{m}{2} \frac{\sin (30 - \varphi) \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} - b \cdot \cos \varphi + c \cdot \sin \varphi$$

$$J'R = \frac{m}{\cos (30 - \varphi)} - b \cos \varphi + c \sin \varphi + \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right] \frac{(\sin 30 - \sin \varphi \cos (30 - \varphi))}{2 (\cos \varphi + \cos (30 - \varphi))}$$

$$FQ = \frac{m}{\cos (30 - \varphi)} - b \cdot \cos \varphi + c \sin \varphi + \left\{ \left[ a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right] \cdot \frac{1}{\cos \varphi + \cos (30 - \varphi)} + \frac{h}{2 \cdot \cos (30 - \varphi) \cdot \cos \varphi} \right\} \sin 30 - \sin \varphi \cos (30 - \varphi)$$

$$D'P = \frac{m}{\cos (30 - \varphi)} - b \cos \varphi + c \sin \varphi$$

$$+ \left\{ \left( a - \frac{h}{\cos \varphi} - m \operatorname{tg} (30 - \varphi) \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot (\cos \varphi + \cos (30 - \varphi))} + \frac{h}{2 \cdot (\cos (30 - \varphi) \cdot \cos \varphi)} + \frac{n \cos 30 - m \operatorname{tg} (30 - \varphi)}{2 \cos \varphi} \right\} \cdot (\sin 30 - \sin \varphi \cdot \cos (30 - \varphi))$$

$$NB' = \frac{m + n \cdot \sin 30}{2} \cdot \frac{\sin 60}{\cos \varphi} - b \cos \varphi + c \sin \varphi - n \left[ \cos 30 \cdot \cos (30 - \varphi) + \frac{\sin 30 \cdot \sin (30 - \varphi)}{2} \right] \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} + \frac{m}{2} \cdot \frac{\sin (30 - \varphi) \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi}$$

Zahlenmässige Ergebnisse siehe Anlage 1

für  $m = n = 260 \text{ mm}$ ,  $b = 130 \text{ mm}$ ,  $c = 45 \text{ mm}$

$q_1 = 706 \text{ mm}^2$ ,  $q_2 = 12,5 \text{ mm}^2$ ,  $S_1 = 13,6$ ,  $S_2 = 1$