

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

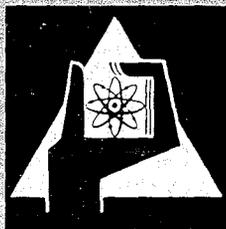
März 1968

KFK 734
EUR 3719 d

Institut für Reaktorbauelemente

Das hydraulische Potentiometer als Steuerelement
und Weganzeigegerät

O. Mühlhäuser



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1968

KFK 734

EUR 3719 d

Institut für Reaktorbauelemente

Das hydraulische Potentiometer als Steuer-
element und Weganzeigegerät +)

von

O. Mühlhäuser

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE

+) Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

Berichtigung zu

Bericht KFK 734

EUR 3719 d

Das hydr. Potentiometer
Mühlhäuser

Es muss heissen:

S. 42 (76) (77) statt m; ln

S. 43 (78) (79) statt m; ln

zweitletzte Formel statt m; ln

$$\text{S. 50 } \beta = \frac{1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

$$\beta = \frac{1}{11} \ln \frac{115,5}{90}$$

S. 54 (A_{11}) und Formel davor
statt m; ln

(A_{12}) und Formel davor
statt m; ln

S. 55 (A_{14}) und folgende Formel statt m; ln

S. 56 (A_{15}) statt $m \cdot A = a$; ln $A = a$

Formelzeichen

A	=	Arbeit (mkp)
A*	=	Abkürzung
a	=	Zähigkeitsfaktor $\frac{\text{kp sec}}{\text{m}^2}$
a'	=	Nutbreite (m)
B	=	Abkürzung $^{\circ}\text{C}/\text{m}$
B*	=	Zähigkeitsfaktor
b	=	Zähigkeitsfaktor ($^{\circ}\text{C}$)
b'	=	Nutentiefe
C	=	Konstante $^{\circ}\text{C}$
c	=	konstante $^{\circ}\text{C}$
D	=	2 Potentiometerbolzen-Durchmesser (m)
F _d	=	Druckanzeigefehler
F _w	=	Weganzeigefehler
h	=	Abkürzung kp/m^2 $^{\circ}\text{C}$
L	=	Potentiometerlänge (m)
n	=	Nutenzahl
p	=	Abgriffdruck kp/m^2
p _e	=	Einlaufdruck (kp/m^2)
p _a	=	Ablaufdruck (kp/m^2)
p	=	Druckgefälle (kp/m^2)
Q	=	Durchflußmenge (m^3/sec)
R	=	Ersatzwiderstand ($\text{kp sec}/\text{m}^5$)
r _B	=	Radius d. Potentiometerbolzens (m)
r _Z	=	Radius d. Potentiometerbüchse
s	=	Spaltweite (m)
s _m	=	mittlerer Spalt (m)
T ₀	=	Bezugstemperatur (konst) ($^{\circ}\text{K}$)
T	=	Temperatur ($^{\circ}\text{K}$)
x	=	Abgriffort des Potentiometers (m)
α	=	Zähigkeitskenngröße
α*	=	Abgriffverhältnis
β	=	Zähigkeitskenngröße
ϑ	=	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
ϕ	=	Hilfsgröße der Spaltweite
η	=	Zähigkeit d. Betriebsmittels ($\text{kp sec}/\text{m}^2$)
ξ	=	relativer Abgriffort

- ε = relative exzentrische Bolzenlage
 ψ = Änderungsfaktor der Zähigkeit
 K = Muttergröße der Spaltlänge
 λ = spez. Temperaturgefälle
 ν = Nebenschlußgröße
 ω = Arbeitsverhältnis

A. Das hydraulische Potentiometer

Allgemeines

In der hydraulischen Regel- und Meßtechnik tritt vielfach die Aufgabe auf

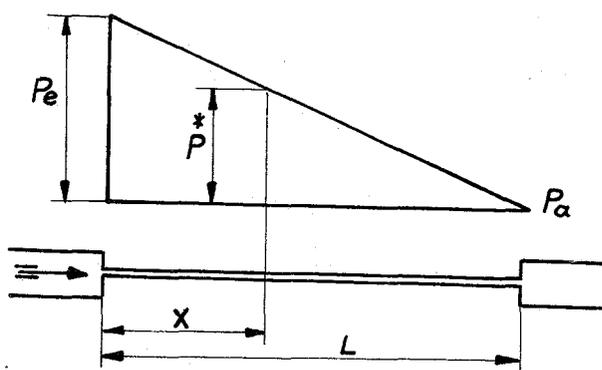
1. eine gegebene meist veränderliche Wegstrecke in einen dieser Wegstrecke adäquaten hydraulischen Druck bzw. Druckverhältnis umzuwandeln,
2. von einem vorgegebenen Druck einen konstanten oder veränderlichen Bruchteil abzugreifen.

Besonders geeignet für die Lösung dieser Aufgaben ist wegen seiner Einfachheit das hydraulische Potentiometer.

Dem Prinzip nach besteht das hydraulische Potentiometer aus einem Strömungskanal konstanten Querschnittes, der von einer Flüssigkeit (Gas) durchströmt wird, wobei zwischen Einlauf und Auslauf ein konstantes Druckgefälle Δp besteht und das mit einem an dem Kanal angebrachten festen oder verschieblichen Druckabgriff ausgerüstet ist.

Besteht in dem Kanal trägheitsfreie laminare Strömung, die für die ganze vorliegende Betrachtung als gegeben vorausgesetzt werden soll, so ist das Druckgefälle, abgesehen von kleinen Strecken am Ein- und Auslauf über die ganze Länge konstant. Der örtliche Druck ist dann eine lineare Funktion der durchströmten Wegstrecke.

Es gelten dann nach Abb. 1 folgende Zusammenhänge:



- P_e = Einlaufdruck
 $P_a = 0$ = Auslaufdruck
 P^* = Abgriffdruck
 L = Gesamtlänge d. Kanals
 X = Ort des Abgriffes vom Einlauf gemessen

$$\frac{dp}{dx} = \text{konst.}$$

Abb. 1

Dann ist

$$\frac{P_e - P_a}{L} = \frac{P^* - P_a}{L - X}$$

woraus sich ergibt

$$\boxed{\frac{P^*}{P_e} = 1 - \frac{X}{L}} \quad (1)$$

wird $p_a \neq 0$ gesetzt und für p^* geschrieben $p^{)*}$ so ergibt sich

$$\frac{P^{)*} - P_a}{P_e - P_a} = 1 - \frac{X}{L}$$

oder

$$\boxed{\frac{P^{)*}}{P_e - P_a} = \frac{P_a}{P_e - P_a} + 1 - \frac{X}{L}} \quad (1a)$$

oder mit

$$P_e - P_a = P_{ges}$$

$$\boxed{\frac{P^{)*}}{P_{ges}} = \frac{P_a}{P_{ges}} + 1 - \frac{X}{L}}$$

Ist das Druckgefälle über die Meßlänge nicht konstant, also

$$\frac{dp}{dx} \neq \text{const.}$$

so ergeben sich Abweichungen von obiger Beziehung (1).

Diese sind

- 1) bei gegebenem Weg x falsche Abgriffdrücke,
- 2) bei der Messung des Abgriffdruckes p_x mit einem linear geeichten Druckmeßgerät falsche Weganzeigen.

Die Ursachen für diese Fehler können folgende sein:

- 1) Der Kanalquerschnitt ist über die Meßlänge nicht konstant.
- 2) Am Abgriff wird dem Kanal Flüssigkeit entzogen oder zugeführt.
- 3) Die Zähigkeit der Betriebsflüssigkeit ändert sich beim Durchströmen des Kanales.

Der Einfluß des Strömungs- Ein- und Auslaufes auf den Druckverlauf kann leicht durch eine entsprechende Korrektur der Gesamtlänge L ausgeglichen werden. Bei den relativ zur Kanal-länge vorliegenden sehr engen Strömungsquerschnitten ist meist der Fehler ohnehin vernachlässigbar.

A₂ Bauformen

Die einfachste Bauform eines hydraulischen Potentiometers mit verschieblichem Abgriff besteht aus einem beiderseits verschlossenen Zylinder von doppelter Verschiebelänge, dem an einem Ende Flüssigkeit zugeführt, am anderen Ende abgeführt wird, der in der Längsmittle eine Abgriffbohrung hat und in dem ein mit definiertem Spalt eingepaßter Kolben verschoben werden kann. Das Bauprinzip ist in Abb.2 dargestellt.

Bei dieser Bauform befinden sich sämtliche 3 Flüssigkeitsanschlüsse am räumlich festliegenden Gehäuse.

Eine andere Bauform zeigt Abb.3. Hier liegt der Kolben räumlich fest, der Abgriff wird an diesen angebracht und die Zylinderbüchse wird verschoben. Diese Bauform ist bei einem hydraulisch angetriebenen Reaktor-Regelstabkonzept vorgesehen. Die Zu- und Abfuhr der Flüssigkeit ergibt sich hierbei aus dem Gesamtkonzept des Regelstabantriebes unmittelbar und ohne jede Komplikation.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit soll es sein, die natürlichen Leistungsgrenzen des Potentiometers aufzuzeigen, und seine Fehler zu untersuchen, gegebenenfalls Maßnahmen anzugeben, diese zu beheben bzw. zu umgehen.

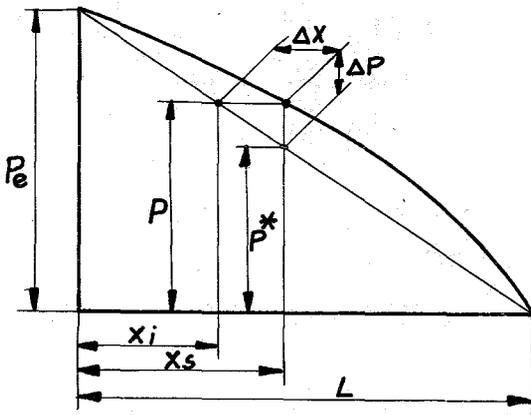
B. Theoretische Untersuchungen

1.) Fehlerbetrachtung

Die Fehlerbetrachtung geht davon aus, daß durch die angeführten Fehlereinflüsse, der Druckverlauf über die Meßlänge des Potentiometers von der idealen Geraden abweicht. Es sind 2 Fehler zu unterscheiden

- 1) Der Druckanzeigefehler F_d bei gegebenem Weg und einem in Linearen Druckeinheiten geeichtem Druckmesser.
- 2) Der Weganzeigefehler F_w bei gegebenem Weg und einem in linearen Wegeinheiten geeichten Druckmesser.

Hierzu Abb.4:



Es ist

p^* der zur Stellung x_s (Sollstellung) gehörende Druckwert bei linearer Charakteristik

p = der zur gleichen Stellung gehörende Druckwert bei nicht linearer Charakteristik

$\Delta p = p - p^* =$ Druckunterschied, d.h. Abweichung von der Linearität

x_s Stellungssollwert, d.h. tatsächliche Stellung des Potentiometerkolbens

x_i durch Druckablesung bei linearer Skaleneinteilung angezeigte Stellung des Potentiometerkolbens

$\Delta x = x_s - x_i =$ Stellungsanzeigefehler

Der relative Druckanzeigefehler ist dann

$$F_D = \frac{\Delta P}{P^*} = \frac{P - P^*}{P^*} = \frac{P}{P^*} - 1$$

oder p^* aus (1) ergibt sich

$$\boxed{F_D = \frac{P}{P_e} \left(1 - \frac{X_s}{L}\right)^{-1}} \quad (2)$$

Die Ermittlung des Weganzeigefehlers ergibt sich wie folgt
Es ist

$$\frac{P_e}{L} = \frac{\Delta P}{\Delta X}$$

oder

$$\Delta X = \Delta P \frac{L}{P_e}$$

Der relative Fehler der Weganzeige ist

$$\boxed{F_W = \frac{\Delta X}{X_s} = \frac{\Delta P}{P_e} \frac{L}{X_s}} \quad (3a)$$

oder

$$\boxed{F_W = \frac{P}{P_e} \frac{L}{X_s} - \frac{L}{X_s} + 1} \quad (3b)$$

von Interesse ist noch das Verhältnis des Druckanzeigefehlers zum Wegfehler. Dividiert man daher (2) durch (3), so ergibt sich

$$\boxed{\frac{F_D}{F_W} = - \frac{\xi}{1 - \xi}}$$

$$\xi = \frac{X}{L}$$

(4)

B₂ Der schief liegende Kolbenbolzen

Wie bereits dargelegt, besteht das einfachste Potentiometer aus einem mit Spiel in einer Zylinderbüchse verschiebbaren Kolben. Es wird unterstellt, daß der Kolben innerhalb der Büchse seine Lage frei wählen kann. Der Kolben wird dann mit Sicherheit aussermittig in der Bohrung liegen. Zu untersuchen ist, welchen Einfluß eine aussermittige Lage des Kolbens in der Büchse auf den Verlauf der Drucklinie und damit auf die Kennlinie des Potentiometers hat.

Zur Vereinfachung der Aufgabe sollen nur 3 diskrete Lagen betrachtet werden.

- 1) Der Kolben befindet sich achsparallel, jedoch aussermittig in der Bohrung.
- 2) Der Kolben befindet sich an seinem einen Ende in Mittellage, an seinem anderen Ende liegt er einseitig an der Wand an. (Schieflage)
- 3) Der Kolben liegt mit seinen beiden Enden an der Wand an. Die Berührungspunkte sind jedoch um 180° versetzt. (Überecklage)

Für den zylindrischen Ringspalt gilt die bekannte Durchflußbeziehung

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12 \eta Q}{2\pi r_m S^3} \quad (4)$$

mit $Q =$ Durchflußmenge m^3/sec

$$r_m = \frac{r_B + r_z}{2} = r_B + S \quad \text{mittlerer Spaltradius}$$

$r_B =$ Radius des Bolzens

$S =$ Spaltstärke

$dp =$ Druckgefälle über der Strömungskanallänge dx

B_{2.1} Wird der Bolzen achsparallel in der Bohrung verschoben, so kommt er in eine exzentrische Lage. Die relative Exzentrizität ergibt sich dann zu

$$\varepsilon = \frac{S_m - S_{\min}}{S_m} \quad (5)$$

Hier ist S_m der Spalt in zentrischer Lage
 S_{\min} die Weite des engsten Spaltteiles bei exzentrischer Lage.

Grenzfälle: Für Mittellage ergibt sich

$$\varepsilon = 0$$

für Lage an der einen Wand ergibt sich

$$\varepsilon = 1$$

Für den exzentrischen Spalt gilt die Durchflußbeziehung

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12 \eta Q^*}{2\pi r_m S_m^3 (1 + 1,5\varepsilon^2)} \quad (6)$$

Integriert ergibt sich der Druckabfall über der Gesamtkanallänge

$$\Delta p = \frac{12 \eta Q^* \cdot L}{2\pi r_m S_m^3 (1 + 1,5\varepsilon^2)} \quad (7)$$

Man kann sofort erkennen, daß der Druckabfall eine lineare Funktion der Länge ist. Von der Exzentrizität wird lediglich die Durchflußmenge beeinflusst.

Das Potentiometer mit achsparallel verlagertem Bolzen ist also anzeigegenau und fehlerfrei.

Das Integral ist

$$P \Big|_0^x = \frac{12 \eta Q^*}{2 \pi r_m S_m^3} \int_0^x \frac{dx}{1 + 1,5 \left(\frac{x}{L}\right)^2} \quad (10)$$

Man erhält integriert

$$\boxed{P \Big|_0^x = \frac{12 \cdot 0,816 \eta Q^* L}{2 \pi r_m S_m^3} \operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,225 \frac{x}{L} \Big|_0^x} \quad (12)$$

Mit den Randbedingungen

für $X = 0$	wird $P = P_e$	Zulaufdruck
$X = X$	$P = P$	Abgriffdruck
$X = L$	$P = P_a = (0)$	Ablaufdruck

ergibt sich

$$P_e - P_a = \frac{12 \cdot 0,816 \eta Q^*}{2 \pi r_m S_m^3} \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,225 \frac{1}{L} \cdot L - \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0 \right] \quad (13)$$

$$P - P_a = \frac{12 \cdot 0,816 \eta Q^*}{2 \pi r_m S_m^3} \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,225 \frac{1}{L} \cdot L - \operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,225 \frac{x}{L} \right] \quad (14)$$

Dividiert man (14) durch (13) so erhält man

$$\boxed{P_e - P_a = P_{ges}} \quad (15)$$

$$\boxed{\frac{P}{P_{ges}} = \frac{P_a}{P_{ges}} + 1 - \frac{\operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,225 \frac{x}{L}}{\operatorname{arc} \operatorname{tg} 1,225}} \quad (16)$$

Für den freien Ablauf, d.h. $p_a = 0$ schreibt sich

$$\boxed{\frac{P}{P_e} = 1 - \frac{\operatorname{arctg} 1.225 \frac{x}{L}}{\operatorname{arctg} 1.225}} \quad (17)$$

Der Druckverlauf für das ideale Potentiometer ist nach (1) wenn $p_a = 0$ gesetzt wird

$$\frac{P^*}{P_e} = 1 - \frac{x}{L}$$

Wird $p_a = 0$, so ist nach (1a) der ideelle Druckverlauf

$$\frac{P^{)*}}{P_{ges}} = \frac{P_a}{P_{ges}} + 1 - \frac{x}{L}$$

Der entstandene Fehler bei Schräglage ergibt sich aus der Differenz der beiden Drücke.

Also ist

$$\Delta p = p - p^{)*}$$

bzw.

$$\Delta p = p - p^{)*}$$

Also

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_a + P_{ges} \left[1 - \frac{\operatorname{arctg} 1.225 - \frac{x}{L}}{\operatorname{arctg} 1.225} \right] - p_a \\ &\quad - P_{ges} \left[1 - \frac{x}{L} \right] \end{aligned}$$

oder

$$\Delta p = P_e \left(1 - \frac{\operatorname{arctg} 1.225 \frac{x}{L}}{\operatorname{arctg} 1.225} \right) - P_e \left(1 - \frac{x}{L} \right)$$

Beide Beziehungen sind identisch, da für $p_a = 0$
 $p_{ges} = p_e$ und man erhält die Druckabweichung bei gleicher
Stellung

$$\Delta p = P_e \left[\frac{x}{L} - \frac{\arctg 1.225 \frac{x}{L}}{\arctg 1.225} \right] \quad (18)$$

Es hat sich damit gezeigt, daß es gleichgültig ist, ob
man den Außen- (Gegendruck) mit 0 oder einem endlichen
Wert einsetzt. Die Rechnung wird für $p_a = 0$ einfacher.

Der relative Druckanzeigefaktor ergibt sich mit (2) und (17).

$$F_D = \left[1 - \frac{\arctg 1.225 \frac{x_s}{L}}{\arctg 1.225} \right] \frac{1}{1 - \frac{x}{L}} - 1 \quad (19)$$

Mit (3) ergibt sich der relative Weganzeigefaktor

$$F_W = \frac{L}{x_s} - \frac{L}{x_s} \frac{\arctg 1.225 \frac{x_s}{L}}{\arctg 1.225} - \frac{L}{x_s} + 1$$

oder

$$F_W = 1 - \frac{L}{x_s} \frac{\arctg 1.225 \frac{x_s}{L}}{\arctg 1.225} \quad (20)$$

Führt man ein

$$\frac{x_s}{L} = \xi \quad (21)$$

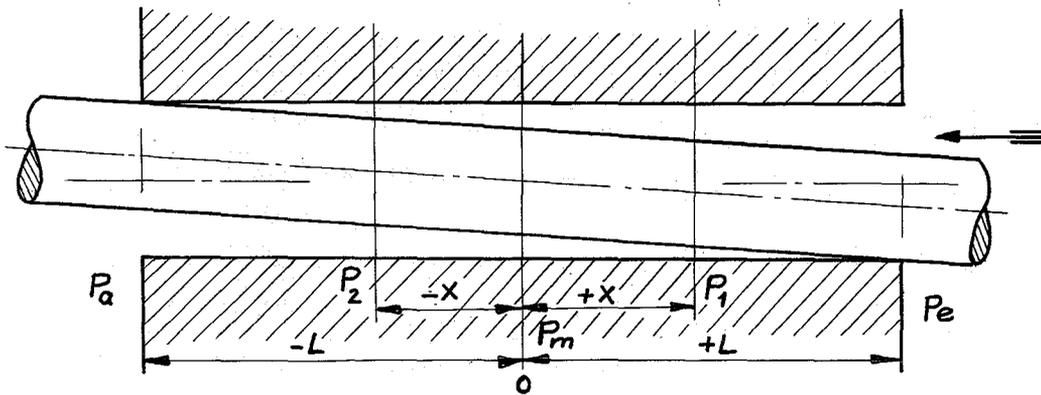
so schreiben sich (19) und (20) wie folgt

$$F_D = \left[1 - \frac{\arctg 1.225 \xi}{\arctg 1.225} \right] \frac{1}{1 - \xi} - 1 \quad (22)$$

$$F_w = 1 - \frac{1}{\xi} \frac{\arctg 1,225 \xi}{\arctg 1,225} \quad (23)$$

Der Verlauf der Fehler in Abhängigkeit von der Abgriffstellung wird unten näher untersucht und diskutiert.

B_{2.3} Zunächst soll die gleiche Untersuchung, jedoch durchgeführt werden für ein hydraulisches Potentiometer, dessen Bolzen so in der Bohrung liegt, daß er diese an den beiden Enden an gegenüberliegenden Punkten berührt. Der Bolzen liegt über Eck in der Bohrung (Abb.6).



Der Koordinaten-0-Punkt wird in die Längsmittle der Bohrung gelegt. Dann kann man auf die Beziehungen Gl. (12) zurückgreifen und durch Einsetzen der passenden Randbedingungen die entsprechenden Zusammenhänge ermitteln.

Die Randbedingungen sind

für	$X = +L$	ist	$P = P_e$
für	$X = +x$	ist	$P = P_1$
für	$X = -x$	ist	$P = P_2$
	$X = -L$		$P = P_a = 0$

Dann ergibt sich

$$P_e - P_a = \frac{12 \cdot 0,816 \cdot \eta \cdot Q \cdot L}{2\pi r_m s_m^3} \left[+2 \arctg 1,225 \right] \quad (24)$$

Es ist weiter

$$P_1 - P_a = A \left[\operatorname{arc\,tg} 1.225 \frac{+X}{L} + \operatorname{arc\,tg} 1.225 \right] \quad (25)$$

worin A als Abkürzung angeführt ist

$$A = \frac{12 \cdot 0.816 \cdot \eta \cdot QL}{2\pi r_m S_m^3}$$

$$P_2 - P_a = A \left[\operatorname{arc\,tg} 1.225 \frac{-X}{L} + \operatorname{arc\,tg} 1.225 \right] \quad (26)$$

Ferner ist nach

$$P_m - P_a = +A \operatorname{arc\,tg} 1.225 \quad (27)$$

Setzt man wie oben $p_a = 0$, so erhält man durch Division von (27) durch (24)

$$\frac{P_m}{P_e} = \frac{+\operatorname{arc\,tg} 1.225}{+2 \operatorname{arc\,tg} 1.225}$$

$$P_m = \frac{1}{2} P_e \quad (28)$$

Weiter (25) durch (24) ergibt

$$\frac{P_1}{P_e} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\arctg 1.225 \frac{+X}{L}}{\arctg 1.225} \right] \quad (29)$$

Weiter

$$\frac{P_2}{P_e} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\arctg 1.225 \frac{(-X)}{L}}{\arctg 1.225} \right] \quad (30)$$

Diese Beziehungen (29) und (30) sind der (17) völlig analog.

Für die Beurteilung des Fehlers ist es erforderlich, die Beziehung für das ideale Potentiometer, geschrieben für die vorliegenden Koordinaten, zu kennen.

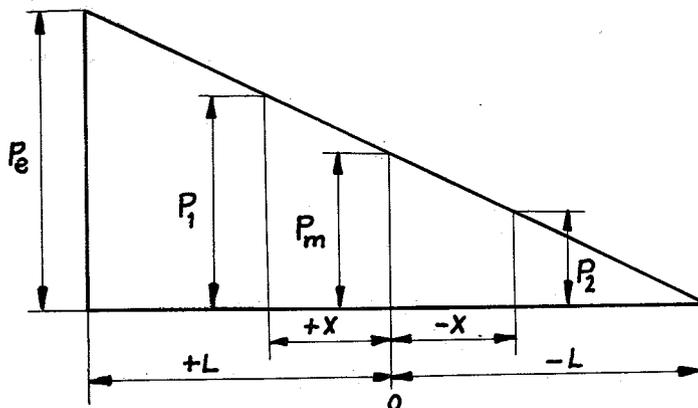


Abb. 7

Es gilt dann

$$\frac{P_e}{2L} = \frac{P_1^*}{L+X}$$

$$\frac{P_e}{2L} = \frac{P_2^*}{L+X}$$

Daraus

$$P_1 = \frac{1}{2} P_e \left[1 + \frac{X}{L} \right] \quad (31)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} P_e \left[1 + \frac{(-X)}{L} \right] \quad (32)$$

Der Druckanzeigefehler ist

$$F_{D1} = \frac{P_1}{P_1^*} - 1$$

Also

$$F_{D2} = \frac{P_2}{P_2^*} - 1$$

oder

$$F_{D1} = \left[1 + \frac{\operatorname{arctg} 1.225 \frac{X}{L}}{\operatorname{arctg} 1.225} \right] \frac{1}{1 + \frac{X}{L}} - 1 \quad (33)$$

Analog

$$F_{D2} = \left[1 + \frac{\operatorname{arctg} 1.225 \frac{-X}{L}}{\operatorname{arctg} 1.225} \right] \frac{1}{1 + \frac{-X}{L}} - 1 \quad (34)$$

Man kann sehen, daß die einzelne Fehlerabweichung je nachdem, in welchem Bereich der fragliche x-Wert liegt, verschiedene Werte hat, im Zulaufbereich, d.h. in der ersten Hälfte des Potentiometers liegt die Fehlerabweichung über der idealen Geraden, im Ablaufbereich liegt die Abweichung in der zweiten Potentiometerhälfte unter der Geraden.

Der Weganzeigefehler ist analog

$$F_w = \frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta P}{P_e} \frac{2L}{X}$$

bzw.

$$F_w = 2 \frac{P}{P_e} \frac{L}{X} - \frac{L}{X} + 1$$

Es ist damit

$$F_{w1} = 1 + \frac{\operatorname{arctg} 1.225 \frac{X}{L}}{\frac{X}{L} \operatorname{arctg} 1.225}$$

mit

$$\frac{X}{L} = \xi$$

ergibt sich

$$F_{w1} = 1 + \frac{\operatorname{arctg} 1.225 \xi}{\xi \operatorname{arctg} 1.225} \quad (35)$$

Für den negativen Bereich ergibt sich die gleiche Beziehung; es ist lediglich ξ bzw. X mit dem entsprechenden Vorzeichen einzuführen, so daß man

$$F_{w2} = 1 + \frac{\operatorname{arctg} 1.225 (-\xi)}{(-\xi) \operatorname{arctg} 1.225} \quad (36)$$

erhält.

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, daß das Potentiometer mit Ringspalt sehr empfindlich gegen Schiefelage des Kolbens im Zylinder ist. Es treten durch solche Schieflagen des Kolbens erhebliche Fehler, d.h. Abweichungen von der Linearität auf.

Dabei ist es für die Fehlergröße gleichgültig, wie die Abmessungen des Bolzens und die des Spaltes an sich sind. Maßgebend für die Fehlergrößen sind lediglich die relativen Exzentrizitäten.

Für das Potentiometer nach Fall B_{2.2} (Schieflage) ist in Abb.8 das Ergebnis der Rechnungen für Druckverlauf und Weganzeigefehler über der Potentiometerlänge aufgetragen. Die Abweichung von der Linearität ist offensichtlich. Der Weganzeigefehler erreicht Höchstwerte von etwa 35 %.

Für ein Potentiometer nach B_{2.3} (Übereck-Lage) sind die gleichen Ergebnisse in Abb.9 aufgetragen.

Gegenüber dem vorausgegangenen Fall sind die Abweichungen nur halb so groß. Sie schlagen jedoch nach beiden Seiten der O-Linie aus, so daß die Gesamtabweichungen vom gleichen Betrag wie oben sind.

Die Größe der Fehler zeigt, daß ein Potentiometer dieser Bauform als Meßgerät nicht brauchbar ist. Es sollen daher weitere Bauformen auf ihre diesbezügliche Brauchbarkeit untersucht werden.

B₃ Das Gewinderillen-Potentiometer

Das Gewinderillen-Potentiometer besteht, wie schon der Name sagt, aus einem Bolzen in einer Zylinderbüchse, bei dem entweder in die Oberfläche des Bolzens oder in die des Zylinders eine Gewinderille eingearbeitet ist.

Durch diese Maßnahme wird der Strömungskanal aufgeteilt in 2 Teile.

1. Den Ringspalt zwischen dem Bolzenaußendurchmesser und der Zylinderwand.
2. Die Gewinderille.

Da die Querschnittsfläche der Gewinderille durch eine evtl. Schiefelage des Bolzens in der Zylinderbüchse nicht verändert wird, war zu erwarten, daß dadurch die Anzeigefehler des Potentiometers reduziert werden könnten.

Die Durchrechnung der Verhältnisse bei dieser Bauform ergab jedoch, daß der Fehler nicht auf einen ausreichend kleinen Betrag reduziert werden konnte. Dies lag vornehmlich daran, daß Gewinderillen aus Herstellungsgründen nicht beliebig tief bzw. beliebig schmal gemacht werden können, sondern etwa in der Nähe quadratischer Abmessungen bleiben müssen. Außerdem zeigte sich noch, daß es schwierig ist, sehr lange und dünne Gewindebolzen, wie solche für den Entwurf von hydraulischen Regelstabantrieben vorgesehen waren, mit der erforderlichen Genauigkeit herzustellen.

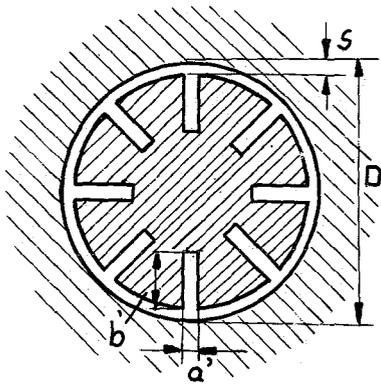
Die Untersuchungen an Gewinderillen um Potentiometer wurden deshalb nicht weiter fortgeführt. Auf die Vorlage der entsprechenden Rechnungen und die der Meßergebnisse soll deshalb auch an dieser Stelle verzichtet werden.

B₄ Das Längsnuten-Potentiometer

Nach kleineren Zwischenuntersuchungen zeigte es sich, daß ein Potentiometer, bei dem entweder im Bolzen oder in der Zylinderwand in vorzugsweise radialer Richtung Nuten eingearbeitet waren, die in ähnlicher Weise wie oben die Gewinderille in strömungstechnischer Hinsicht dem Ringspalt parallel geschaltet waren, weitgehend fehlerfrei sein mußten.

Da bei langen und relativ dünnen Potentiometern sich die Nuten nur auf den Bolzen anbringen lassen, wurde diese Bauform ausschließlich untersucht.

Den Querschnitt eines solchen Potentiometers zeigt Abb. 10. Sie zeigt ein solches bei dem im Bolzen 8 Nuten der Tiefe b' und der Weite a' angebracht sind. Der Durchmesser des Bolzens



sei D und der Spalt zwischen Bolzen und Büchse von der Weite s . Die Zahl der Nuten sei n .

Dann ist $b = n \cdot b'$

Abb. 10

Wie ersichtlich ist, haben die Nuten die achsparallel verlaufen ihre größte Erstreckung in radialer Richtung. Tangential ist sie sehr schmal. Die Nuten stehen also nur mit einer Schmalseite mit dem Ringspalt in Verbindung. Sie sind in strömungstechnischer Hinsicht dem Ringspalt parallel geschaltet, und der örtliche Druck ist in jedem Querschnitt im Ringspalt und in den Nuten gleich.

Der Strömungswiderstand setzt sich daher aus dem Widerstand des Ringspaltes und dem der Nuten zusammen. Bei einer Verlagerung des Bolzens in der Büchse bleibt der Widerstand der Nuten konstant, wogegen sich der des Ringspaltes der Exzentrizität entsprechend verändert.

Für die Elementarlänge dx des Potentiometer-Kanales gilt dann

a) für den Ringspalt

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12 \eta Q_R}{2 \pi r_m S_m^3 (1 + 1,5 \varepsilon_{(x)})^2} \quad (37)$$

worin $\varepsilon_{(x)} = f\left(\frac{x}{L}\right) = f\left(\frac{\xi}{L}\right)$

b) für die Nuten

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12 \eta Q_N}{ba'^3} \quad (38)$$

Diese Beziehungen kann man auch schreiben in der Form

$$\begin{aligned} dp &= \mathcal{R}_R \cdot Q_R \\ dp &= \mathcal{R}_N \cdot Q_N \end{aligned} \quad (39)$$

worin ist:

$$\mathcal{R}_R = \frac{12 \eta dx}{2 \pi r_m S_m^3 (1 + 1,5 \varepsilon_{(x)})^2} \quad (40)$$

$$\mathcal{R}_N = \frac{12 \eta dx}{ba'^3} \quad (41)$$

Da, wie schon erwähnt, die Druckgefälle für die Elementarlänge dx gleich sind, kann man einen Ersatzwiderstand nach den Beziehungen parallel geschalteter Widerstände ermitteln und mit diesen weiterrechnen.

Der Ersatzwiderstand ergibt sich aus

$$\frac{1}{\mathcal{R}_e} = \frac{1}{\mathcal{R}_R} + \frac{1}{\mathcal{R}_N}$$

oder

$$\boxed{R_e = \frac{R_R R_N}{R_R + R_N}} \quad (42)$$

(40) und (41) eingeführt ergibt sich daraus

$$\boxed{R_e = \frac{12 \eta dx}{2\pi r_m S_m^3 (1 + 1,5 \epsilon_{(x)}^2) + a^3 b}} \quad (43)$$

hieraus

$$\boxed{dp = \frac{12 \eta Q dx}{2\pi r_m S_m^3 + a^3 b + 2\pi r_m S_m^3 1,5 \epsilon_{(x)}^2}} \quad (44)$$

worin Q die gesamte jeden Querschnitt des Potentiometers durchströmende Flüssigkeitsmenge ist.

Die weitere Rechnung wird wieder wie oben unter B_{2.2} durchgeführt. Der Bolzen befindet sich an einem Ende in Mittel-lage am anderen Ende an der Wand.

Hier gilt wieder (8)

$$\epsilon_{(x)} = \epsilon_{max} \frac{x}{L}$$

bzw.

$$\text{mit } \epsilon_{max} = 1 \quad \epsilon_{(x)} = \frac{x}{L}$$

und man erhält aus (44)

$$dp = \frac{12 \eta Q dx}{2\pi r_m S_m^3 + a^3 b + 2\pi r_m S_m^3 1,5 \frac{x^2}{L^2}} \quad (45)$$

Dieser Ausdruck ist zu integrieren.

$$P \int_0^x = 12 \eta Q \int_0^x \frac{dx}{2\pi r_m S_m^3 + a^3 b + 2\pi r_m S_m^3 1,5 \left(\frac{x}{L}\right)^2}$$

Man erhält:

$$P \int_0^x = 12 \eta Q \left[\frac{1}{(2\pi r_m S_m^3 + a^3 b) \left(2\pi r_m S_m^3 \frac{1,5}{L}\right)} \cdot \arctg x \sqrt{\frac{2\pi r_m S_m^3 1,5}{L^2 (2\pi r_m S_m^3 + a^3 b)}} \right]_0^x$$

Die Randbedingungen sind wie oben

für $X = 0$ wird $P = P_e$
 $X = X$ wird $P = P$
 $X = L$ wird $P = P_a = 0$

Dann ergibt sich

$$P_e = \frac{12 \eta Q}{\sqrt{(2\pi r_m S_m^3 + a^3 b) 2\pi r_m S_m^3 \frac{1,5}{L^2}}} \left[\arctg L \sqrt{\frac{2\pi r_m S_m^3 1,5}{L^2 (2\pi r_m S_m^3 + a^3 b)}} - \arctg 0 \right]$$

$$P = \frac{12 \eta Q}{\sqrt{(2\pi r_m S_m^3 + a^3 b) 2\pi r_m S_m^3 \frac{1,5}{L^2}}} \left[\arctg L \sqrt{\frac{2\pi r_m S_m^3 1,5}{(2\pi r_m S_m^3 + a^3 b)}} \right]$$

$$- \arctg \frac{x}{L} \sqrt{\frac{2\pi r_m S_m^3 1,5}{2\pi r_m S_m^3 + a^3 b}} \right]$$

Beide Ausdrücke durcheinander dividiert ergibt:

$$P/P_e = 1 - \frac{\operatorname{arctg} \frac{X}{L} \sqrt{\frac{2\pi r_m s_m^3 \cdot 1,5}{2\pi r_m s_m^3 + a'^3 b}}}{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{2\pi r_m s_m^3 \cdot 1,5}{2\pi r_m s_m^3 + a'^3 b}}} \quad (46)$$

Dieser Ausdruck läßt sich wesentlich übersichtlicher gestalten, wenn man zwischen den Größen des Ringspaltes und denen der Nuten eine Beziehung wie folgt einführt.

Es soll gelten:

$$b = K \cdot 2\pi r_m ; \quad a' = \varphi s_m$$

oder

$$\begin{aligned} K &= \frac{b}{2\pi r_m} \\ \varphi &= \frac{a'}{s_m} \end{aligned} \quad (47)$$

Dann bekommt der $\sqrt{\quad}$ Ausdruck in (46) die Form

$$\sqrt{\quad} = 1,225 \frac{1}{\sqrt{1+K\varphi^3}}$$

und mit

$$\frac{X}{L} = \xi$$

erhält man

$$P/P_e = 1 - \frac{\operatorname{arctg} \xi \cdot 1,225 \frac{1}{\sqrt{1+K\varphi^3}}}{\operatorname{arctg} 1,225 \frac{1}{\sqrt{1+K\varphi^3}}} \quad (48)$$

Geht man mit (48) in die Fehlerbeziehungen (2) bzw. (3), so erhält man:

$$F_D = \frac{1}{1-\xi} \left(1 - \frac{\operatorname{arctg} \xi \cdot 1.225 \sqrt{\frac{1}{1+K \varphi^3}}}{\operatorname{arctg} 1.225} \right) - 1 \quad (49)$$

und

$$F_W = 1 - \frac{1}{\xi} \frac{\operatorname{arctg} \xi \cdot 1.225 \sqrt{\frac{1}{1+K \varphi^3}}}{\operatorname{arctg} 1.225 \sqrt{\frac{1}{1+K \varphi^3}}} \quad (50)$$

Bei weiterer Betrachtung der Formeln (48), (49) und (50) zeigt sich, daß der Wert der Ausdrücke durch die Größe $K \varphi^3$ bestimmt wird. Es wäre daher die Aufgabe einer fortgeführten Rechnung, diese Größe so zu bestimmen, daß der Fehler nur einen bestimmten Wert erreicht bzw. diesen unterschreitet.

Der Fehlerverlauf von F_W ist als Fkt. von ξ und für verschiedene Parameter von $K \varphi^3$ und zwar für die Werte

$$K \varphi^3 = 35, 70, 150, 200, 300, 400$$

durchgerechnet und in Abb. 11 dargestellt.

Man erkennt dort, daß für Werte $K \varphi^3 > \sim 50$ der Fehler kleiner bleibt als $0,01 = 1 \%$.

Betrachtet man entsprechend (47)

$$K \varphi^3 = \frac{b a'^3}{2 \pi r_m s_m^3}$$

etwas näher, so sieht man zunächst, daß im Zähler der Wert für die Nuten, im Nenner der für den Ringspalt steht. Man muß also, um den Weganzeigefehler klein zu halten, den Nutenwert wesentlich größer machen als den des Ringspaltes. Dabei sind die Werte des Ringspaltes im allgemeinen aus konstruktiven und Fertigungsgründen meist vorgegeben. Die Werte für die Nutabmessungen sind dann zu wählen.

Dabei ist es nicht gleichgültig, wie Breite b und Weite a der Nut zueinander festgelegt werden, da diese Größen, die Durchflußmenge, d.h. den Verbrauch des Potentiometers bestimmen.

Die Durchflußmenge durch den Ringspalt ist durch die konstruktiven Abmessungen festgelegt. Diejenige durch die Nuten kann daher variiert werden. Aus (38) ergibt sich diese zu

$$Q_N = \frac{ba^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} \quad (51)$$

Sie ist linear von der Breite b und in der dritten Potenz von der Weite a abhängig. D.h. die Weite der Nut macht sich sehr stark im Verbrauch bemerkbar.

B₅ Eine weitere Möglichkeit der Fehlerbegrenzung

Betrachtet man die Beziehung (23) und vergleicht diese mit (35) für negative Werte von ξ , so stellt man fest, daß beide völlig identisch sind. Zwischen beiden Formeln besteht jedoch inhaltlich der Unterschied in den Werten der Bezugsgrößen. Im Falle der Formel (23) ist die Länge L die gesamte Länge des Potentiometers, im Falle der Formel (35) jedoch nur die Hälfte der Baulänge. D.h. der Absolutfehler auf die Baulänge bezogen ist bei (35) halb so groß wie bei (23). Mit anderen Worten ein über Eck in der Bohrung liegender Bolzen hat als maximale Fehler nur die halben des an einem Ende, in der Mitte, am anderen Ende anliegenden Bolzen. Als Folgerung läßt sich daraus ableiten, daß eine wesentliche Verkleinerung des Absolutfehlers erreicht werden kann, wenn der Potentiometerbolzen mehrmals über Eck in der Bohrung anliegt, etwa wie das in Abb.17 schematisch dargestellt ist. Ein Vergleich der Fehlerkurven in Abb. 10 und Abb. 11 läßt die Fehlerminderung bei solchen Maßnahmen deutlich werden.

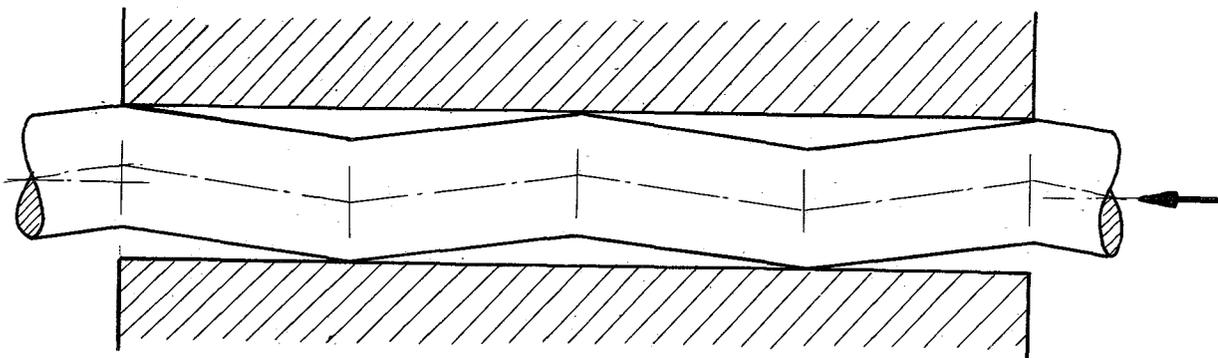


Abb 12

B₆ Das Potentiometer mit Abgriffstrom

Die Eingangs der Arbeit gemachten Voraussetzungen, insbesondere die, die zur Formel (1) führten, sind nur dann gegeben, wenn durch den Potentiometerkanal an allen Stellen der gleiche Flüssigkeitsstrom fließt. Das bedeutet, daß durch den Abgriff dem Kanal weder Flüssigkeit zu- noch abgeführt wird. Im allgemeinen läßt sich diese Forderung gut erfüllen, wenn an den Abgriff Geräte angeschlossen sind, die keinen Verbrauch, d.h. solche, die keine Leckverluste haben. Allerdings ist dabei zu beachten, daß diese Geräte, sofern sie Drücke in Wege umsetzen, bei Druckänderungen für die Dauer der Druckänderung ein, wenn auch meist kleines Füllvolumen benötigen.

Die anschließende Untersuchung soll ein möglichst quantitatives Bild verschaffen, wie groß der Einfluß eines Abgriffstromes bzw. Verbrauchers auf die Proportionalität des Potentiometers ist. Aus der Kenntnis dieser Zusammenhänge kann man dann z.B. die Einstellzeit eines aus Potentiometer und Druckmeßgerät bestehenden Meßkreises ermitteln, oder in einem Regelkreis die entsprechende Zeitkonstante der zusammenwirkenden Apparate-
teile.

Die bisherigen Rechnungen zum hydraulischen Potentiometer gingen davon aus, daß

- 1) die hintereinander geschalteten Strecken des Potentiometers gleich Widerstandswerte, bezogen auf die Elementarlänge hatten,
- 2) der Flüssigkeitsstrom durch beide Strecken gleich ist.

Punkt 1 bleibt auch bei vorliegenden Betrachtungen bestehen. Bei Punkt 2 wird angenommen, daß der Flüssigkeitsstrom durch die beiden Abschnitte des Potentiometers an diesem verschieden groß ist.

Es wird wieder davon ausgegangen, daß die Beziehung für die laminare Kanalströmung in der Form

$$\Delta p = R Q$$

geschrieben werden kann.

Dann kann man das Ersatzbild nach Abb. 13 der Betrachtung zugrunde legen.

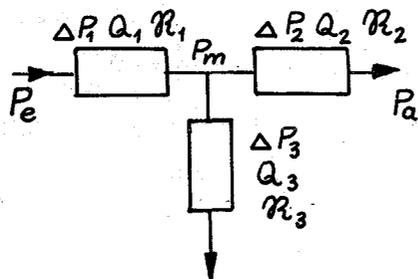


Abb. 13

Hier sind R_1 und R_2 die Ersatzwiderstände der Potentiometerabschnitte. R_3 ist der Ersatzwiderstand eines Verbrauchers mit dem Verbraucherstrom Q_3 .

Es werden weiter noch die gegenseitigen Verhältnisse festgelegt, so daß ist:

$$R_1 + R_2 = R_0 = \text{konst.}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\xi}{1-\xi} \quad \text{wo}$$

$$\xi = \frac{x}{L} = \frac{R_1}{R_0} = \text{Abgriffstellung}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P} = \alpha^* \quad \text{Abgriffverhältnis wo}$$

$$\Delta p = P_e - P_a$$

$$\frac{R_3}{R_0} = v \quad \text{Nebenschlußgröße}$$

$$R_0' = \text{Ersatzwiderstand des Gesamtwiderstandes}$$

$$(R_1; R_2; R_3)$$

Es sind dann

$$\Delta p = R_2 Q_2$$

bzw.

$$Q_2 = \frac{\Delta p}{R_2}$$

und

$$\Delta p = R_0' Q_1$$

bzw.

$$Q_1 = \frac{\Delta p}{R_0'}$$

Unter der Voraussetzung, daß $p_a = 0$, was oben als zulässig nachgewiesen wurde, gilt für den Abgriff

$$\Delta P_2 = P_m = R_3 Q_3$$

bzw.

$$Q_3 = \frac{\Delta P_2}{R_3}$$

Es ist weiter

$$R_2 \cdot Q_2 = R_3 Q_3$$

und daraus

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{Q_3}{Q_2}$$

Die Stromverteilung ist

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

bzw.

$$Q_2 = Q_1 - Q_3$$

Der Ersatzwiderstand des gesamten Gebildes ergibt sich leicht, wenn man beachtet, daß dieses aus einem Widerstand \mathcal{R}_1 und zwei parallelgeschalteten Widerständen \mathcal{R}_2 und \mathcal{R}_3 die in Serie mit \mathcal{R}_1 liegen, besteht.

Es ist daher

$$\mathcal{R}_0' = \mathcal{R}_1 + \frac{\mathcal{R}_2 \mathcal{R}_3}{\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3} \quad (52)$$

In diese Beziehung sind die einzelnen Widerstandswerte der rechten Seite auf \mathcal{R}_0 zu beziehen.

Es ist

$$\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_0 \xi$$

$$\mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_0 (1 - \xi)$$

$$\mathcal{R}_3 = \mathcal{R}_0 \nu$$

Dann ergibt sich

$$\frac{\mathcal{R}_0'}{\mathcal{R}_0} = \xi + \frac{\nu(1-\xi)}{(1-\xi)+\nu} \quad (53)$$

Gesucht ist der Abgriffdruck als Funktion der Widerstände in Abhängigkeit von dem Druckgefälle über der Widerstandsstrecke, also:

$$P_m/\Delta P = \frac{\Delta P_2}{\Delta P}$$

Wie leicht zu übersehen, ist

$$\Delta P_2 = Q_1 \frac{\mathcal{R}_2 \mathcal{R}_3}{\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3}$$

und

$$\Delta P = Q_1 \mathcal{R}_0'$$

so daß sich ergibt:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P} = \frac{1}{\mathcal{R}_0'} \frac{\mathcal{R}_2 \mathcal{R}_3}{\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3}$$

R_0 eingeführt und für $\Delta P = P_e$

für $P_a = 0$

gesetzt, erhält man:

$$\boxed{\frac{\Delta P_2}{P_e} = \frac{1}{\xi \left(\frac{1}{\nu} + \frac{1}{1-\xi} \right) + 1}} \quad (54)$$

Damit kann die Druckabweichung von dem idealen Druckverlauf ermittelt werden.

Die Abweichung ist

$$\Delta P = P_m - P^*$$

wo nach (1)

$$P^* = P_e (1 - \xi)$$

und

$$P_m = \Delta P_2$$

ist.

Also

$$\boxed{\Delta P = P_e \left[\frac{1}{\xi \left(\frac{1}{\nu} + \frac{1}{1-\xi} \right) + 1} - 1 + \xi \right]} \quad (55)$$

Der Weganzeigefehler, der hier nur ermittelt werden soll, ist entsprechend (3)

$$F_w = \frac{\Delta P}{P_e} \cdot \frac{1}{\xi}$$

Also

$$\boxed{F_w = \frac{1}{\xi^2 \left(\frac{1}{\nu} + \frac{1}{1-\xi} \right) + \xi} - \frac{1}{\xi} + 1} \quad (56)$$

Damit kann mit verschiedenen Werten von ν als Parameter der Anzeigefehler ermittelt werden.

Es wird eingesetzt:

= 1; 5; 10; 20; 50; 100; 500;

= 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9;

Das Ergebnis der Durchrechnung zeigt Abb. 14.

Man erkennt sofort, wie auch eine einfache Überlegung zeigen wird, daß mit zunehmendem Abgriffwiderstand, d.h. abnehmendem Abgriffstrom, der Anzegefehler entsprechend kleiner wird; grundsätzlich soll daher der Abgriffstrom so klein wie möglich sein, am besten gegen 0 gehen.

B_{6.1} Temperatur und Zähigkeitseinflüsse

Für sämtliche bisherigen Rechnungen wurde angenommen, daß die Zähigkeit des Betriebsmittels über die Länge des Strömungskanales und auch innerhalb des Kanales an allen Stellen von gleicher Größe war. Es ist leicht einzusehen, daß eine Veränderung der Zähigkeit von Einfluß auf die Anzeigenauigkeit des Potentiometers sein muß. Die Größe eines evtl. Einflusses soll daher etwas näher betrachtet werden.

Die Zähigkeitsänderung kann verschiedene Ursachen haben:

- 1) Der Flüssigkeit wird von außen Wärme zugeführt, so daß sich deren Temperatur erhöht (Heizen),
- 2) Der Flüssigkeit wird Wärme entzogen. Die Temperatur der Flüssigkeit sinkt (Kühlen).

- 3) Beim Durchströmen der Flüssigkeit durch den Potentiometerkanal wird aufgrund der inneren Reibung in der Flüssigkeit und der Reibung zwischen Flüssigkeit und Wand Energie in Wärme umgesetzt. Diese Erwärmung der Flüssigkeit bedingt eine Temperatur- und damit Zähigkeitsänderung der Flüssigkeit, die sich auf 3 Arten auswirken kann.
- a) Die entstehende Reibungswärme wird vollständig und unmittelbar an die Umgebung abgeführt. Dann bleibt die Temperatur des Strömungsmittels an allen Orten des Kanales gleich.

Der isotherme Fall:

Dieser Fall wird im allgemeinen den bekannten und den bisherigen Rechnungen zugrundegelegt und die Zähigkeit im betrachteten Bereich als konstant angenommen. Er entspricht jedoch nur bedingt den Verhältnissen der Wirklichkeit, höchstens bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, kleiner Zähigkeit bzw. einer flachen Temperatur - Zähigkeitskurve und großer Wärmeleitfähigkeit des Strömungsmittels und der Kanalwände.

Der entstehende Anzeigefehler, bezogen auf den idealen Fall, ist Null bzw. geht gegen diesen Wert.

- b) Die entstehende Reibungswärme bleibt völlig im Strömungsmittel. Die Wärmeleitfähigkeit des Strömungsmittels und der Kanalwände ist unendlich klein.

Der adiabatische Fall:

In diesem Fall wird die Temperatur der Flüssigkeit über der Kanallänge ständig zunehmend ansteigen. Im gleichen Maße wird die Zähigkeit des Strömungsmittels absinken. Wie leicht zu ersehen ist, entspricht auch dieser Fall nicht den Gegebenheiten der Wirklichkeit. Der Anzeigefehler strebt hier einem Höchstwert zu.

- c) Zwischen den beiden genannten Betriebsfällen liegen jene, bei denen ein Teil der entstehenden Wärme nach außen abgeführt wird. Der Restteil der Wärme bleibt in der Flüssigkeit, deren Temperatur sich entsprechend erhöht und deren Zähigkeit entsprechend absinkt. Der Anzeigefehler ist kleiner als in Fall 2, größer als in Fall 1.

B_{6.2} Durchrechnung der Zähigkeitseinflüsse

In der technischen Wirklichkeit kann zwar nicht übersehen werden, wie und in welcher Größe die einzelnen oben dargestellten Einflüsse wirksam sind. Trotzdem ist sehr von Wert, zu wissen, wie sich der Druckverlauf in den einzelnen Fällen, insbesondere bei Grenzzuständen, entwickelt.

Es werden daher folgende Fälle durchgerechnet:

- 1) Die Zähigkeit ändert sich linear mit der Kanallänge.
- 2) Es wird dem Potentiometerkanal von außen Wärme zugeführt. (Bei Wärmeabfuhr, d.h. Kühlung liegt der gleiche Fall jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen vor.)
- 3) Energieumsatz im Spalt bei gegebenem Wärmeabfuhrverhältnis, den adiabatischen Fall eingeschlossen.
Für diese verschiedenen Rechnungen wird unterstellt, daß die Geschwindigkeitsverteilung im Potentiometerkanal an allen Stellen parabolisch ist, was nach den Untersuchungen von Hausenblas [1] für eine erste Näherung unterstellt werden darf.

B6.1.2 Als erstes wird der Fall behandelt:
Die Zähigkeit ändert sich linear mit der Kanallänge.

Dann gilt für den Querschnitt x

$$\eta_x = \eta_0 (1 - \psi \xi) \quad (37)$$

wenn η_0 die Eingangszähigkeit am Potentiometerzulauf, ξ wie oben

$$\xi = \frac{x}{L}$$

und ψ der Änderungsfaktor der Zähigkeit ist.
Die Untersuchung wird ferner auf einen konzentrischen Ringspalt unveränderlicher Abmessungen beschränkt.

Damit schreibt sich die bekannt Durchflußformel für den Ringspalt

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12 Q \eta_0 (1 - \psi \xi)}{2 \pi r_m S_m^3} \quad (58)$$

oder

$$dp = \frac{12 Q \eta_0}{2 \pi r_m S_m^3} dx - \frac{12 Q \eta_0 \psi}{2 \pi r_m S_m^3 L} \cdot x \cdot dx$$

Integriert ergibt sich

$$P \Big|_0^x = \frac{12 Q \eta_0}{2 \pi r_m S_m^3} \left[x - \frac{\psi}{L} \frac{x^2}{2} \right]_0^x$$

Mit den Randbedingungen

$$\begin{array}{ll} \bar{x} = 0 & p = p_e \\ \bar{x} = x & p = p \\ \bar{x} = 1 & p = p_a = 0 \end{array}$$

erhält man

$$p_e = \frac{12Q\eta_0}{2\pi r_m S_m^3} \left[+L - \frac{\psi}{L} \frac{L^2}{2} \right]$$
$$p = \frac{12Q\eta_0}{2\pi r_m S_m^3} \left[+L - \frac{\psi L^2}{L \cdot 2} - x + \frac{\psi}{L} \frac{x^2}{2} \right]$$

Daraus

$$\boxed{p/p_e = 1 - \frac{2\xi - \psi\xi^2}{2 - \psi}} \quad (59)$$

Für das ideale Potentiometer gilt wie oben

$$p^*/p_e = 1 - \xi$$

Die Fehlerabweichung ist, wie oben

$$\Delta p_a = p - p^*$$

so daß man die relative Abweichung erhält nach

$$\boxed{\frac{\Delta p_a}{p_e} = \xi - \frac{2\xi - \psi\xi^2}{2 - \psi}} \quad (60)$$

Der relative Wegfehler

$$F_w = \frac{\Delta p_a}{p_e} \cdot \frac{1}{\xi}$$

wird dann

$$\boxed{F_w = 1 - \frac{2 - \psi\xi}{2 - \psi}} \quad (61)$$

Um einen Überblick zu gewinnen, ist $F_w = f(\xi)$ für verschiedene Werte von ψ als Parameter durchgerechnet und in Abb. 15 aufgetragen. Man sieht beispielsweise, daß bei einem $\psi = 0,1$, d.h. einer 10%-igen Abnahme der Zähigkeit über die Potentiometerlänge der Anzeigefehler etwa den Wert 0,5 % erreicht.

B6.2.2 Heizung (Kühlung)

Hier wird angenommen, daß dem Strömungskanal von außen Wärme zu- bzw. abgeführt wird. Dadurch erhöht (vermindert) sich über die Kanallänge die Temperatur der Flüssigkeit. Es wird weiter unterstellt, daß die Wärmezufuhr (Abfuhr) so gestaltet ist, daß die Temperatur der Flüssigkeit eine lineare Funktion der Potentiometerlänge x ist. Die Eintrittstemperatur in den Kanal ist T_0 , die Austrittstemperatur T_a . Dann gilt

$$T_a - T_0 = \Delta T = \lambda \cdot x$$

Bei Wärmezufuhr hat λ positive, bei Wärmeabgabe negative Werte.

Aus der veränderlichen Flüssigkeitstemperatur ergibt sich eine entsprechend veränderte Zähigkeit der Flüssigkeit.

Für die Beschreibung der Abhängigkeit der Zähigkeit von der Temperatur wird die von Prandtl angegebene und von Nahme [2] diskutierte Beziehung

$$\eta = a \cdot e^{b/T} \quad (62)$$

benutzt.

Hier sind a und b Stoffkonstanten, die aus Messungen zu ermitteln sind.

Nahme hat diese Beziehung in die Näherungsform

$$\eta = a e^{\frac{b}{T_0 + \nu}}$$

die der Vogelschen Formel

$$\eta = K e^{\frac{b}{c + \nu}}$$

entspricht, gebracht und zu der Form

$$\eta \approx a e^{\frac{b}{T_0} \left(1 - \frac{\nu}{T_0}\right)}$$

vereinfacht

oder

$$\eta = \alpha e^{-\beta \mathcal{V}} \quad (63)$$

umgeschrieben mit den Abkürzungen

$$\alpha = a e \frac{b}{T_0} \quad \frac{\text{kg sec}}{\text{m}^2} \quad \beta = \frac{b}{T_0^2} \quad \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (64)$$

(65)

T_0 ist ein fester Grenzwert, der Temperatur von dem aus \mathcal{V} gerechnet werden soll.

Dann ist die Einlauftemperatur \mathcal{V}_1 die Auslauftemperatur \mathcal{V}_2 . $T_0 \neq 0^\circ\text{C}$ die aus der Temperatur-Zähigkeitskurve der betreffenden Flüssigkeit ermittelt werden muß.

Unter den bisher gemachten Voraussetzungen gilt für den Druckverlauf im Ringspalt mit der Beziehung (63) für die Zähigkeit

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12Q}{2\pi r_m S_m^3} \alpha e^{-\beta \mathcal{V}}$$

Hierin ist \mathcal{V} eine Funktion von X und zwar ist

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_0 + \lambda x$$

so daß sich

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12Q \alpha}{2\pi r_m S_m^3} C^{-(\beta \mathcal{V}_0 + \beta \lambda x)}$$

ergibt,

oder

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12Q \alpha}{2\pi r_m S_m^3} C^{-\beta \mathcal{V}_0} e^{-\beta \lambda x}$$

Integriert ergibt sich:

$$p \Big|_x^0 = \frac{12Q \alpha}{2\pi r_m S_m^3} e^{-\beta \mathcal{V}_0} (-) \frac{1}{\beta \lambda} e^{-\beta \lambda x}$$

Randbedingungen

$$\begin{array}{ll} \text{für } X = 0 & p = p_e \\ & X = X \\ & X = L \end{array} \quad \begin{array}{l} p = p_e \\ p = p \\ p = p_e = 0 \end{array}$$

mit der Abkürzung

$$M = \frac{12 Q \alpha}{2 \pi r_m s_m^3} C^{-\beta \vartheta_0}$$

ergibt sich

$$p_e - p_a = M \frac{1}{\beta \lambda} C^{-\beta \lambda L} - M (-) \frac{1}{\beta \lambda}$$

$$p - p_a = M \frac{1}{\beta \lambda} C^{-\beta \lambda L} - M (-) \frac{1}{\beta \lambda} C^{-\beta \lambda x}$$

Beide Gleichungen dividiert ergibt

$$\frac{p_e}{p} = \frac{e^{-\beta \lambda L} - 1}{e^{-\beta \lambda L} - e^{-\beta \lambda x}}$$

umgeformt erhält man

$$\boxed{\frac{p}{p_e} = \frac{1 - e^{-\beta \lambda (L-x)}}{1 - e^{-\beta \lambda L}}} \quad (66)$$

Für $B = 0$, d.h. konstante Zähigkeit ergibt sich unter Anwendung der L'Hospital'schen Regel

$$\frac{p}{p_e} = 1 - \frac{x}{L}$$

also die für das ideale Potentiometer bekannte Formel.

B_{6.2.3} Energieumsatz

Die in einer Drossel von der Elementarlänge dx umgesetzte Arbeit ist

$$\boxed{\alpha A_0 = Q \cdot dp} \quad (67)$$

Von der entstehenden Gesamtarbeit A_0 bleibt in der Flüssigkeit der Anteil A' . Das Verhältnis beider, das an allen Orten der Kanallänge gleich sein soll, ist

$$\omega = \frac{A'}{A_0}$$

wird $\omega = 1$, so liegt der adiabatische Fall vor.

Die im Strömungsmittel verbleibende Arbeit erwärmt dies über der Länge dx um den Betrag $\alpha \mathcal{V}$

Es ist

$$dA' = \omega dA_0 = Q \gamma c \alpha \mathcal{V} \quad 427$$

Mit dem Betrag der Arbeit aus (67) ergibt sich

$$\boxed{dp = \frac{1}{\omega} \gamma \cdot c \cdot 427 \alpha \mathcal{V}} \quad (68)$$

Durch die Elementarlänge dx dividiert und die Abkürzung

$$\frac{1}{\omega} \gamma c 427 = h \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right)$$

eingeführt, erhält man

$$\frac{dp}{dx} = h \frac{d\mathcal{V}}{dx}$$

Für das Druckgefälle über einem parallelen Spalt der Länge dx und der Breite b^* gilt

$$\boxed{\frac{dp}{dx} = \frac{12 \eta(\mathcal{V}) Q}{b^* \mathcal{V}^3}} \quad (69)$$

worin $\eta(\mathcal{V})$ der örtliche Wert der Zähigkeit ist.

Für die Abhängigkeit der Zähigkeit von der Temperatur gilt das gleiche wie unter B_{6.2.2} Gesagte.

Damit ergibt sich aus (69) und (63)

$$\boxed{\frac{dp}{dx} = \frac{12 Q}{b^* \mathcal{V}^3} \alpha e^{-\beta \mathcal{V}}} \quad (70)$$

hieraus

$$\frac{d\mathcal{V}}{dx} = \frac{1}{h} \frac{12Q}{b^* s^3} de^{-\beta \mathcal{V}}$$

bzw.

$$\alpha \mathcal{V} = \frac{1}{h} \frac{12Q}{b^* s^3} de^{-\beta \mathcal{V}} dx$$

umgeschrieben ergibt sich mit der Abkürzung

$$\boxed{\frac{12Q\alpha}{b^* s^3 h} = B^*} \quad (71)$$

$$\boxed{e^{\beta \mathcal{V}} d\mathcal{V} = B^* dx} \quad (72)$$

Integriert zwischen den Grenzen 0 und \mathcal{V} erhält man

$$\boxed{\frac{1}{\beta} e^{\beta \mathcal{V}} \Big|_0^{\mathcal{V}} = B^* x \Big|_0^x} \quad (73)$$

Die Randbedingungen sind

$$\begin{aligned} \text{für } X = 0; \mathcal{V} = 0 &= T_0 \\ X = X; \mathcal{V} = \mathcal{V} &= T_0 + \mathcal{V} \end{aligned}$$

Dann erhält man

$$\frac{1}{\beta} [e^{\beta \mathcal{V}} - 1] = B \cdot x$$

oder die Form

$$e^{\beta \mathcal{V}} = B\beta x + 1$$

bzw.

$$e^{-\beta \mathcal{V}} = \frac{1}{B^* \beta x + 1}$$

und damit

$$\eta = \alpha \cdot \frac{1}{B^* \beta x + 1} \quad (74)$$

so daß sich ergibt:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12Q}{b^* s^3} \frac{\alpha}{B^* \beta x + 1}$$

Man kann schreiben

$$\frac{12Q}{b^* s^3} = B^* \cdot \frac{1}{\alpha}$$

und erhält

$$\frac{dp}{dx} = B^* h \cdot \frac{1}{B^* \beta x + 1} \quad (75)$$

Integriert ergibt sich

$$p \Big|_0^x = \frac{h}{\beta} m (1 + B^* \beta x) \Big|_0^x$$

Mit den Randbedingungen

$x = 0$	$p = p_e$
$x = x$	$p = P$
$x = l$	$p = p_a = 0$

erhält man

$$p_e - p_a = + \frac{h}{\beta} m (1 + B^* \beta L) \quad (76)$$

$$p - p_a = + \frac{h}{\beta} m (1 + B^* \beta L) - \frac{h}{\beta} m (1 + B^* \beta x) \quad (77)$$

Dividiert ergibt sich

$$\boxed{p/p_e = 1 - \frac{m(1+B^*\beta x)}{m(1+B^*\beta L)}} \quad (78)$$

Für konstante Zähigkeit, d.h. $B = 0$ ergibt sich wie oben unter Anwendung der L'Hospitalschen Regel

$$p^*/p_e = 1 - \frac{x}{L}$$

Der Wegfehler wird dann entsprechend (3b) und etwas umgeformt

$$\boxed{F_w = 1 - \frac{m(1+B^*\beta L\xi)}{\xi m(1+B^*\beta L)}} \quad (79)$$

Hierin ist $B^*\beta L = A^*$ die kennzeichnende Größe. Sie ist

$$\boxed{A = B^*\beta L = \frac{12Q\alpha\omega L\beta}{b^*s^3\gamma c^427}} \quad (80)$$

Für verschiedene Werte von $A = B\beta L$ als Parameter ist der Fehler über der Potentiometerlänge ξ in Abb.16 dargestellt. Für die praktische Durchrechnung der Fehler ist diese Beziehung für A jedoch ungeeignet, da sie die Menge Q , die an sich unbekannt ist und durch Messungen nur schwer zu erfassen ist, enthält. Es ist daher Q durch den Einlaufdruck p_e zu ersetzen.

Zu diesem Zweck geht man aus von der Beziehung (76) und formt diese um in

$$m(1+B\beta L) = \frac{p_e\beta}{h}$$

oder

$$\boxed{B^*\beta L = A^* = c \frac{p_e\beta}{h} - 1} \quad (81)$$

Die für die Fehlerrechnungen interessanten Größen von A^* liegen in Bereichen $> 0,05$.

Man kann dann ohne allzu großen Fehler die Exp. Fkt. ersetzen durch

$$\exp(x) = 1 + x$$

so daß sich schließlich ergibt:

$$A^* = \frac{p_e \beta}{h}$$

oder ausgeschrieben

$$A^* = p_e \frac{\beta \omega}{\gamma_c 427} \quad (82)$$

Eine Fehlerbeeinflussung bei Energieumsatz ist also nur durch die Beeinflussung obiger Größen, nicht durch die etwaiger Geräteabmessungen möglich.

Die Größen $\beta \gamma_c$ sind Stoffgrößen des Betriebsmittels, daher durch dessen Wahl festgelegt.

ω ist eine Kenngröße für den Kühleffekt am Potentiometer, so daß mit p_e dem Betriebsdruck, die einzige an sich frei wählbare Größe bleibt.

Wieweit der Energieumsatz effektiv bei praktischen Verhältnissen zur Wirksamkeit kommt, soll ein kurzer zahlenmäßiger Überschlag ausweisen.

Diese Untersuchung wird für 3 Medien durchgeführt. Für diesen Fall wird adiabatische - also die ungünstigste - Durchströmung, d.h. $\omega = 1$ eingesetzt und die entstehende Temperaturzunahme ermittelt.

Nach (68) gilt

$$\frac{d\vartheta}{dp} = \frac{\omega}{\gamma \cdot c \cdot 427}$$

Es sind also nur die Werte der spezifischen Wärme c und das spezifische Gewicht γ zu kennen, um den Überblick zu gewinnen.

Es sind bei einer Ausgangstemperatur von 20°

	Hydr. Öl	Wasser	Luft (inkompressibel)	
γ	900	1000	1,293	kg/m ³
c	0,4	1	0,241	kcal/kg °C
$\gamma \cdot c$	360	1000	0,312	
427 · $\gamma \cdot c$	1,535 · 10 ⁵	427 · 10 ³	137,5	
$\frac{1}{\gamma \cdot c} \cdot 427$	0,651 · 10 ⁻⁵	0,234 · 10 ⁻⁵	0,727 · 10 ⁻²	

Daraus ergeben sich die für $\Delta \vartheta = 1^\circ$ Temperaturerhöhung zulässigen Druckgefälle $\Delta p = \gamma \cdot c \cdot 427$ für

- 1) Öl $\Delta p = 15,35 \cdot 10^4$ kg/m²
- 2) Wasser $\Delta p = 42,7 \cdot 10^4$ kg/m²
- 3) Luft $\Delta p = 0,01375$ kg/m²

Dieses Ergebnis sagt aus, daß

- 1.) Flüssigkeiten für den Betrieb von Potentiometern besser geeignet sind, da sie höhere Druckgefälle über der Potentiometerlänge zulassen, ohne durch den Energieumsatz mit stärkeren Fehlern belastet zu werden.
- 2.) Gase nur dann für Potentiometermessungen eingesetzt werden können, wenn die Druckgefälle über der Potentiometerlänge sehr klein, d.h. im Bereich von ca. 100 mm WS liegen.
- 3.) Daß eine Fehlerbetrachtung zum Energieumsatz bei Druckgefällen in der Größenordnung obiger Werte und kleiner sich erübrigt.

C. Messungen

C₁ Versuchseinrichtungen

Untersuchungen und Messungen wurden vorgenommen an 2 voneinander verschiedenen Potentiometern.

Das eine Potentiometer war Teil eines hydraulisch betriebenen Reaktor-Regelstab-Antrieb-Modells. Es hatte eine Verschiebe-, d.h. Meßlänge von 1500 mm.

In dieser Einrichtung sind zunächst die verschiedenen als brauchbar erscheinenden Potentiometerausführungen untersucht worden.

Den konstruktiven Aufbau des Modells zeigt Abb.17. Dem Prinzip nach war dieser Potentiometer ein solcher mit feststehendem Potentiometerbolzen und verschieblicher Zylinderbüchse, entsprechend Abb.3 .

Die verschiebliche Potentiometer-Zylinderbüchse ist als Zentralbohrung in den Regelstabkolben eingearbeitet. Die Betriebsflüssigkeit für das Potentiometer ist identisch mit der Betriebsflüssigkeit zur Verschiebung des Regelstabkolbens.

Der Potentiometerkolben ist als Längsnutenpotentiometer ausgeführt und im Zentrum mit einer Längsbohrung versehen, die mit der Abgriffnut durch kleine Radialbohrungen verbunden ist. Die Halterung des Potentiometerkolbens geschieht in den beiden Verschlussköpfen des Antriebszylinders.

Das gesamte Modell wird senkrecht aufgestellt. An der unteren Potentiometerkolbendurchführung kann der abgegriffene Druck abgenommen und weitergeleitet werden. Die Zufuhr der Betriebsflüssigkeit erfolgt durch den unteren Zylinderkopf. Der Antriebskolben ist mit einer Spaltdichtung in dem Zylinder geführt. Die durchtretende Betriebsflüssigkeit wird am oberen Zylinderkopf abgeführt.

Am Antriebskolben war weiter noch ein Dauermagnet angebracht, der ein auf der Außenfläche des aus unmagnetischem Material bestehenden Zylinderrohres einen leichten kleinen Anzeigeschlitten bzw. -Wagen der Verschiebung des Kolbens entsprechend mitschleppte und so die jeweilige Stellung des Antriebskolbens und damit die jeweilige Stellung des Potentiometers kennen ließ. Diese Art der Stellungsanzeige war zwar nicht von höchster Präzision, jedoch von ausreichender Genauigkeit, um die Brauchbarkeit der verschiedenen Potentiometerausführungen festzustellen.

Die Durchführung der Messung erfolgte gemäß dem Schaltplan nach Abb. 18.

Das Einfahren in die verschiedenen Potentiometerstellungen erfolgt durch Einstellen der Betriebsmittelzufuhr von Hand. Zur Druckmessung wurden Quecksilber-U-Rohr-Manometer verwendet.

Gemessen wurde:

1.) Das Gesamtdruckgefälle über der Potentiometerlänge

$$\Delta p_g = p_e - p_a$$

2.) Das Druckgefälle zwischen dem Zufuhrdruck und dem Abgriffdruck $\Delta p_p = p - p_a$

Einen so gemessenen repräsentativen Druckverlauf als Funktion des Verschiebeweges zeigt für ein Nutenpotentiometer Abb. 19.

Im Prinzip ergab sich eine fast auf einer Geraden liegende Kennlinie. Wie bei späteren Versuchen an einem zweiten Potentiometerversuchsstand gefunden wurde, sind die Abweichungen der gemessenen Linie von der Geraden darauf zurückzuführen, daß die in den Potentiometerkolben eingearbeiteten Längsnuten von unterschiedlicher Breite waren.

Aus Herstellungsgründen war es nicht möglich, die Nuten in einem Durchgang auf der Maschine zu fräsen, da die Potentiometerlänge größer war als die Maschinen-Arbeitslänge. Verständlicherweise ergaben sich dadurch beim Umspannen und Neuansetzen der Nut kleine Überschneidungen, die zu einer Verbreiterung der Nut führten. Da, wie oben nachgewiesen, die Breite der Nut mit der dritten Potenz in die Anzeige-fehler eingeht, machen sich kleine Aufweitungen, die nur ganz wenige Prozente der Nutbreite sind, sehr stark bemerkbar.

Da, wie schon gesagt, der Einfluß der Nutbreite erst später erkannt worden war, wurde zunächst angenommen, die gemessenen Fehlerabweichungen seien durch Ungenauigkeiten der Wegmessung verursacht.

Aus diesem Grunde und auch zur Bestätigung der schon recht befriedigenden Ergebnisse der Potentiometermessungen wurde ein zweiter Versuchsstand entworfen und gebaut, bei dem eine exakte Wegerfassung möglich sein sollte.

Der Aufbau dieser Versuchseinrichtung ist in Abb.20 dargestellt.

Die Bauform entsprach hier der der Abb.2, d.h. die Potentiometerbüchse ist feststehend, der Potentiometerkolben wird verschoben.

Bei dem Versuchsmodell betrug die Meßlänge 932 mm. Einzelheiten können der Abbildung entnommen werden. Aus Herstellungsgründen war die Zylinderbüchse 2-teilig ausgeführt worden und durch ein in der Mitte befindliches Klemmstück zusammengehalten. Die Verschiebung des Potentiometerkolbens geschah durch eine Gewindespindel mit Handrad. Dieser Teil der Einrichtung ist in Abb.20 nicht dargestellt. Die ganze Vorrichtung war auf einer ebenfalls nicht dargestellten prismatischen Schiene gehalten. Die Ablesung des Verschiebeweges konnte auf einer an der Schiene angebrachten Skala an einem an der Antriebsspindel befindlichen Zeiger erfolgen.

Der Potentiometerkolben entsprechend Abb. 21, war im Prinzip der Abb. 12 entsprechend ausgeführt. Durch kleine Wulste auf der Kolbenoberfläche, die eine Höhe von ca. 0,02 mm hatten und in Abständen von ca. 100 mm um 180° versetzt angebracht waren, war dafür gesorgt, daß der Kolben mehrfach über Eck anlag. Der Kolbenquerschnitt kann ebenfalls der Abb. 21 entnommen werden. Wie ersichtlich, sind 8 Radialnuten mit einer Breite von 0,4 mm und einer Tiefe von 5 mm angebracht. Der Ringspalt zwischen Zylinder und Bolzen hatte eine Weite von 0,025 mm. Dann ergibt sich für den Wert entsprechend Gl. (47) der Betrag von 2900, der entsprechend den Kurven in der Abb. 11 einen Anzeigefehler $\ll 0,1\%$ ergeben sollte. Den hydraulischen Schaltplan dieser Versuchseinrichtung zeigt Abb. 22.

Das Ergebnis einer repräsentativen Messung ist in Abb. 23 in Tabellenform und in Abb. 24 in einer Kurve dargelegt. Man erkennt sofort, daß die Kennlinie des Potentiometers innerhalb der Meßgenauigkeit absolut gerade ist.

Am Anfangspunkt, d.h. bei der Skalenlänge 0 sollte das Druckverhältnis 1 sein. Das ist jedoch nicht der Fall, sondern der gemessene Wert liegt etwas tiefer, bei 0,93. Die Ursache hierfür liegt im Anlaufdruckverlust der Kanalströmung.

Mit dieser Messung war der Beweis für die Richtigkeit der dem Entwurf des Potentiometers zugrunde gelegten Überlegungen und Rechnungen erbracht und dessen Brauchbarkeit erwiesen.

C₂ Temperatureinfluß

Eine weitere Messung sollte Aufschluß darüber bringen, wie weit sich ein Temperatureinfluß auf den Verlauf des Abgriffdruckes tatsächlich auswirkt. Zu diesem Zweck wurde das Versuchspotentiometer nach Abb. 20 von außen aufgeheizt, so daß dem Betriebsmittel (Wasser) bei Durchströmen des Potentiometers Wärme zugeführt wurde. Das Aufheizen geschah elektrisch mittels um den Potentiometerzylinder gewickelten Heizleitern.

Gemessen wurde der Druckverlauf über der Meßlänge, der mit dem der Formel (66) errechneten verglichen wurde.

Beide Ergebnisse sind in Abb. 25 aufgetragen.

Die Einlauftemperatur des Wassers betrug $\vartheta_1 = 15^\circ \text{C}$. Sie wird unmittelbar vor den Einlaufstutzen im Zulaufschlauch mit einem Thermometer gemessen. Die Ablauftemperatur, die in gleicher Weise im Ablaufschlauch gemessen wurde, war im Beharrungszustand $\vartheta_2 = 26,5^\circ \text{C}$.

Damit ergab sich eine Temperaturspanne von $\Delta t = 11,5^\circ$. Bei einer Potentiometerlänge von $l = 930 \text{ mm}$ betrug die spezifische Temperaturspanne

$$\lambda = \frac{11,5}{0,93} = 12,35 \text{ }^\circ\text{C/m}$$

Die Zähigkeitswerte sind der Zähigkeitskurve Abb. 26, die entsprechend den in der Hülle angegebenen Werten aufgezeichnet war, entnommen worden.

Es war

$$\begin{array}{l} \text{die Zähigkeit bei } 15,5^\circ \quad \mu_1 = 115,5 \cdot 10^{-0} \text{ kp sec/m}^2 \\ \text{die Zähigkeit bei } 26,5^\circ \quad \mu_2 = 90 \cdot 10^{-0} \text{ kp sec/m}^2 \end{array}$$

Damit konnte entsprechend der Beziehung (A_{12}) der Wert von β gefunden werden.

Es ist

$$\beta = \frac{1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} m \frac{\eta_1}{\eta_2}$$

also

$$\beta = \frac{1}{11} m \frac{115,5}{90}$$

$$\beta = 0,0221 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die Formel (66) lautet:

$$p/p_e = \frac{1 - e^{-\beta \lambda L}}{1 - e^{-\beta \lambda L}}$$

Die mit den Werten für β , λ , l und x errechneten Werte für p/p_e , bezogen auf den am Einlauf, d.h. bei der Potentiometerstellung 0 bestehenden relativen Druck von $p_o/p_e = 0,93$, sind in Abb.25 eingetragen und entsprechend gekennzeichnet.

Man sieht, daß eine außerordentlich gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und gerechneten Werten vorliegt.

Dies bedeutet, daß die mit einigen Vereinfachungen durchgeführte Ableitung der Beziehungen des Zähigkeitsverhaltens für die vorliegende Temperaturspanne absolut zulässig sind. Bei sehr viel größeren Temperaturspannen könnte allerdings eine merkbare Abweichung eintreten, doch dürfte in der Praxis im allgemeinen nur mit kleinen Temperaturspannungen zu rechnen sein, so daß die gebrachten Ableitungen als brauchbar angesehen werden können.

Anhang

Zähigkeitsverhalten von Betriebsflüssigkeiten für
Potentiometer.

Wenn auch im vorhergehenden Kapitel der Einfluß des Energieumsatzes über die Potentiometerlänge als im allgemeinen bedeutungslos nachgewiesen wurde, so ist doch mit Fällen zu rechnen, bei denen dies nicht mehr zutrifft und der Einfluß beachtet werden muß.

Dieser Fall liegt dann vor, wenn relativ hohe Drücke im Potentiometer umgesetzt werden, wenn eine extrem hohe Meßgenauigkeit gefordert wird und wenn ein Aufheizen oder Kühlen des Potentiometers gegeben ist.

Zur Durchrechnung der dann entstehenden Fehler sollen an dieser Stelle noch einige Angaben über das Zähigkeitsverhalten von Hydraulikölen, Wasser und anderen Flüssigkeiten gemacht bzw. es sollen Unterlagen über die in den vorausgegangenen Rechnungen angeführten Zähigkeitskennwerte gebracht werden.

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde für die Abhängigkeit der Zähigkeit von der Temperatur mit der Beziehung

$$\eta = a e^{b/T} \quad (A_1)$$

gerechnet.

Diese Beziehung läßt sich nachnahme [2] in die Näherungsform

$$\eta = a e^{\frac{b}{T_0 + \vartheta}} \quad (A_2)$$

bringen, und entspricht damit völlig der Vogel'schen Formel

$$\eta = K e^{\frac{b}{c + \vartheta}} \quad (A_3)$$

Setzt man beide Gleichungen (A_1) und (A_2) gleich, so ergibt sich damit

$$K = a \quad (A_4)$$

und

$$\frac{b}{T_0 + \vartheta} = \frac{b}{C + \vartheta} \quad (A_5)$$

woraus sich weiter ergibt, daß

$$\boxed{T_0 = C} \quad (A_6)$$

ist.

Nahme hat noch weiter vereinfacht und ist auf die Form

$$\boxed{\eta = \alpha e^{-\beta \vartheta}} \quad (A_7)$$

gekommen, mit der oben gerechnet wurde.

In dieser Beziehung ist

$$\boxed{\alpha = a e^{b/T_0}} \quad (A_8) \quad \text{und} \quad \boxed{\beta = \frac{b}{T_0^2}} \quad (A_9)$$

Den Wert für T_0 eingesetzt, erhält man den vorzugsweise interessanten Wert

$$\boxed{\beta = \frac{b}{C^2}} \quad (A_{10})$$

Nach aus der Literatur bekanntgewordenen Messungen an Hydraulikölen bzw. Mineralölen wird der Wert von C im Mittel mit dem Betrag

$$C = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

den Rechnungen zugrundegelegt.

Der Wert von b läßt sich dann beim Vorliegen einer Zähigkeits-Temperaturkurve leicht ermitteln, und zwar auf folgende Art und Weise.

Ein interessanter Zähigkeitsbereich sei durch die untere Temperatur ϑ_1 und die obere Temperatur ϑ_2 eingegrenzt.

Dann gilt für die Zähigkeit im unteren Temperaturpunkt

$$\eta_1 = a c \frac{b}{T_0 + \vartheta_1}$$

für den oberen Temperaturpunkt gilt

$$\eta_2 = a e \frac{b}{T_0 + \vartheta_2}$$

Logarithmiert und die Differenz aus beiden Beziehungen gebildet ergibt

$$m \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{b}{T_0 + \vartheta_1} - \frac{b}{T_0 + \vartheta_2}$$

und hieraus

$$b = \frac{1}{\frac{1}{T_0 + \vartheta_1} - \frac{1}{T_0 + \vartheta_2}} m \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (A_{11})$$

Auf direktem Wege und sehr viel einfacher jedoch läßt sich B finden; wenn man bei vorliegender Zähigkeitstemperaturkurve auf Gl. (A₇) zurückgreift.

Dann gilt für die beiden Temperaturpunkte:

$$\eta_1 = \alpha \cdot e^{-\beta \vartheta_1}$$

$$\eta_2 = \alpha e^{-\beta \vartheta_2}$$

Durch Logarithmieren und Subtrahieren der beiden Beziehungen erhält man

$$m \frac{\eta_1}{\eta_2} = -\beta \vartheta_1 + \beta \vartheta_2$$

und daraus

$$\beta = \frac{1}{(\vartheta_2 - \vartheta_1)} m \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (A_{12})$$

Mit diesem Wert von B läßt sich auch α ermitteln.

Führt man β in (A₇) ein, so kann man dies sofort anschreiben.

$$\alpha = \eta_1 e^{\beta \vartheta_1} \quad (A_{13})$$

Damit sind nunmehr die Einflußgrößen aus dem Temperatur-Zähigkeitsverhalten der Betriebsmittel bekannt und können oben an entsprechender Stelle verwendet werden.

Zum Vergleich sei noch erwähnt, daß die Shell-Tellus-Hydrauliköle im Mittel folgende Werte haben:

$$\begin{aligned} b &= 300 \text{ }^\circ\text{C} \\ \beta &= 0,04 \text{ } 1/^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Bei Wasser und anderen Flüssigkeiten bestehen grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge, d.h. bei Vorliegen der Temperatur-Zähigkeitskurve kann β bzw. α errechnet werden.

Zahlenwerte hierzu und zu anderen Flüssigkeiten sind ferner angegeben bei Gutmann und Simmons [3]. Allerdings ist dort nicht die Vogel'sche Gleichung, sondern die von Andrade der Betrachtung zugrundegelegt. Außerdem sind die Werte auf das englische Maß-System bezogen. Es ergibt sich also bei der zahlenmäßigen Durchrechnung die Zähigkeit in

$$\frac{Lb \text{ (forces) sec}}{ft^2}$$

Die Formel Andrade's lautet:

$$\eta = mAe \frac{B}{T+C} \quad (A_{14})$$

Setzt man diese wieder gleich der Formel (A₂)

$$ae \frac{b}{T_0 + \vartheta} = mAe \frac{B}{T+C}$$

so erhält man

$$\boxed{mA = a} \quad (A_{15})$$

und

$$\boxed{\frac{b}{T_0 + \mathcal{J}} = \frac{B}{T + C}} \quad (A_{16})$$

In der Formel (A₁₄) ist T die absolute Temperatur °K, des interessierenden Zähigkeitspunktes. C und B sind der Tab. II von Gutmann und Simmons zu entnehmende Werte.

Definitionsgemäß ist in Gl. (A₁₆)

$$\boxed{T_0 + \mathcal{J} = T} \quad (A_{17})$$

bzw.

$$\boxed{T_0 = T - \mathcal{J}} \quad (A_{18})$$

d.h. $T_0 = 273 \text{ }^\circ\text{K}$.

Weiter ergibt sich durch Einführen von (A₁₇) in (A₁₆)

$$\boxed{b = \frac{BT}{T + C}} \quad (A_{19})$$

und damit

$$\beta = \frac{BT}{(T + C)T_0^2} \quad (A_{20})$$

Die Beziehung (A₂₀) enthält nunmehr nur noch die Tabellenwerte B und C, die Betriebstemperatur des Zähigkeitspunktes in °K und die absolute Temperatur für $\mathcal{J} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Damit kann das Potentiometerverhalten bei Energieumsatz auch für die verschiedenen in obengenannter Tabelle angegebenen weiteren Flüssigkeiten ermittelt werden.

Literatur

- [1] H. Hausenblas: 'Die nichtisotherme Strömung einer zähen Flüssigkeit durch enge Spalte und Kapillarröhren'.
Ing. Arch. XVIII 1950, S. 151

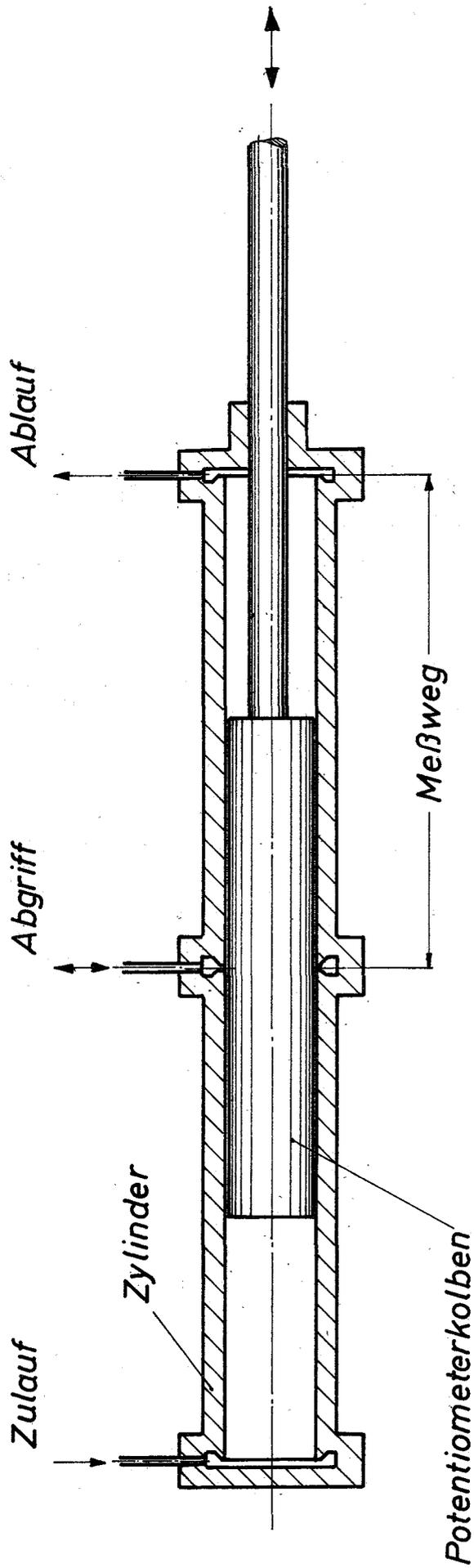
- [2] R. Nahme: 'Beiträge zur hydrodynamischen Theorie der Lagerreibung'.
Ing. Arch. XI 1940, S. 191

- [3] Gutmann u. Simmons: 'The Temperature Dependence of the Viscosity of Liquids'.
Journal of Appl.-Physics, Vol. 23 Nb. 9, Sept. 1952,
S. 977

- [4] U. Rost: 'Das Viscositäts-Verhalten von Schmierölen, Erdöl und Kohle'.
8. Jg. 1955, S. 468, 549, 650, 718

- [5] Erk u. Eck: 'Über die Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit von Schmierölen'.
Physik ZS 37, S. 113

- [6] E. Niemann: 'Maschinenelemente I. Bd. 1960, S. 264



Hydraulisches Potentiometer

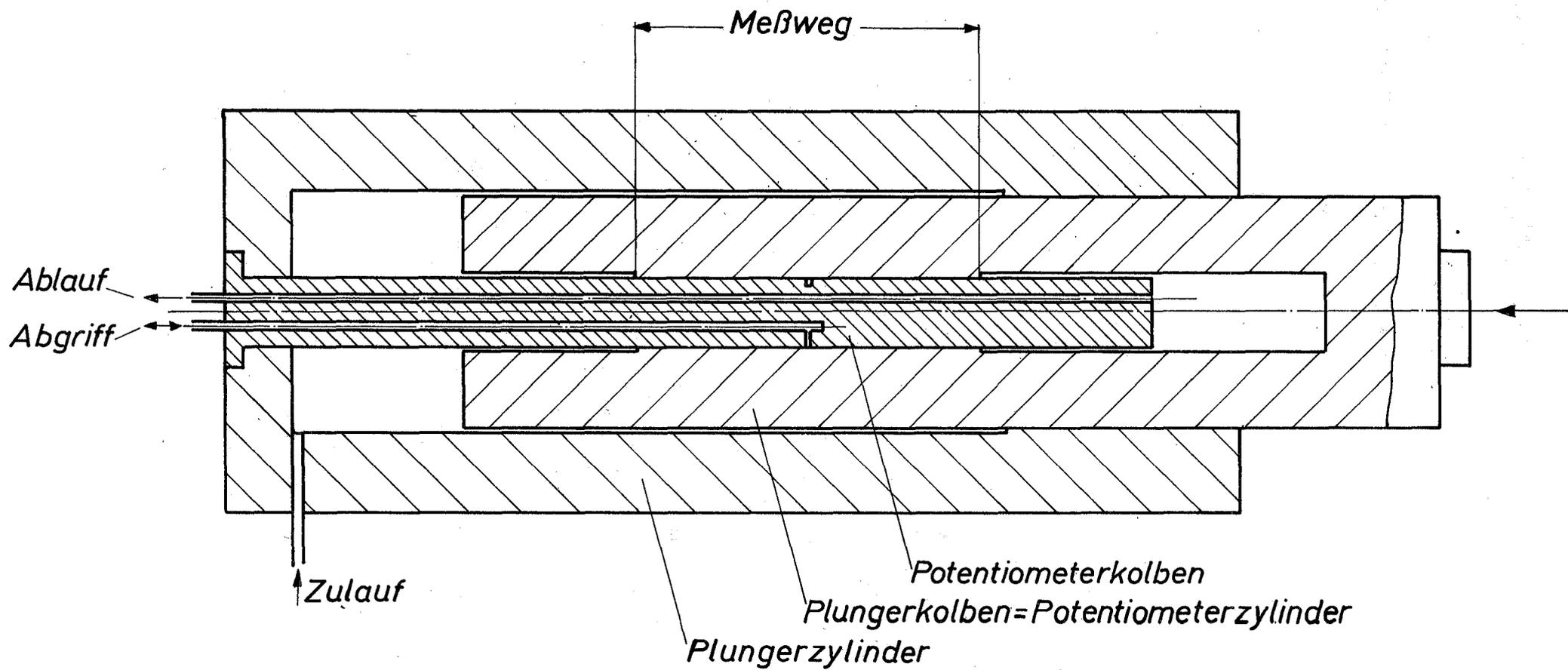


Abb. 3

Hydraulisches Potentiometer

Hydr Potentiometer

Druckverlauf p/p_e und

Weg - Anzeigefehler bei

Schiefelage

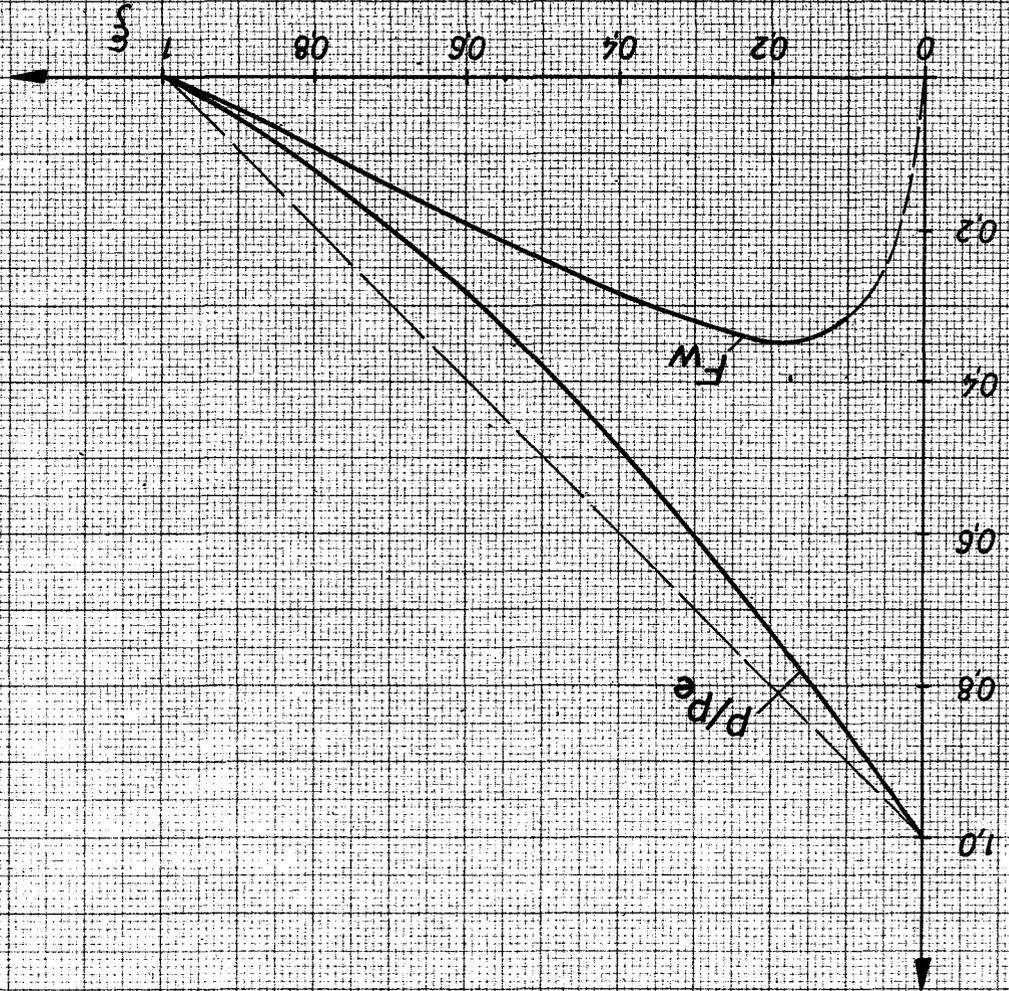


Abb. 8

Hydr. Potentiometer

Druckverlauf p/p_e und
Weg - Anzeigefehler bei
Über - Ecklage

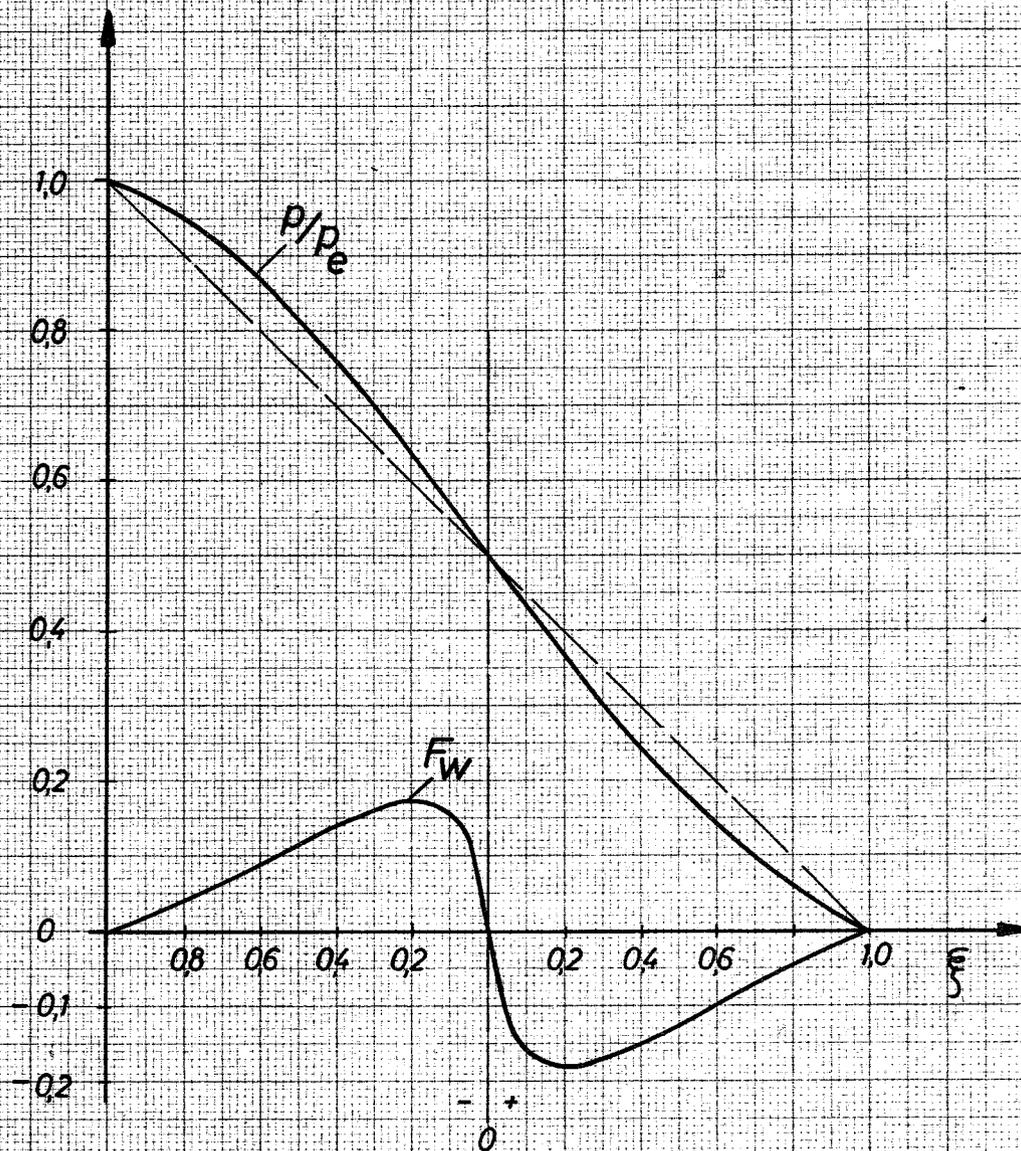


Abb. 9

Hydr. Potentiometer

Weg - Anzeigefehler F_w
für Nutenpotentiometer
mit Nutabmessungen als
Parameter

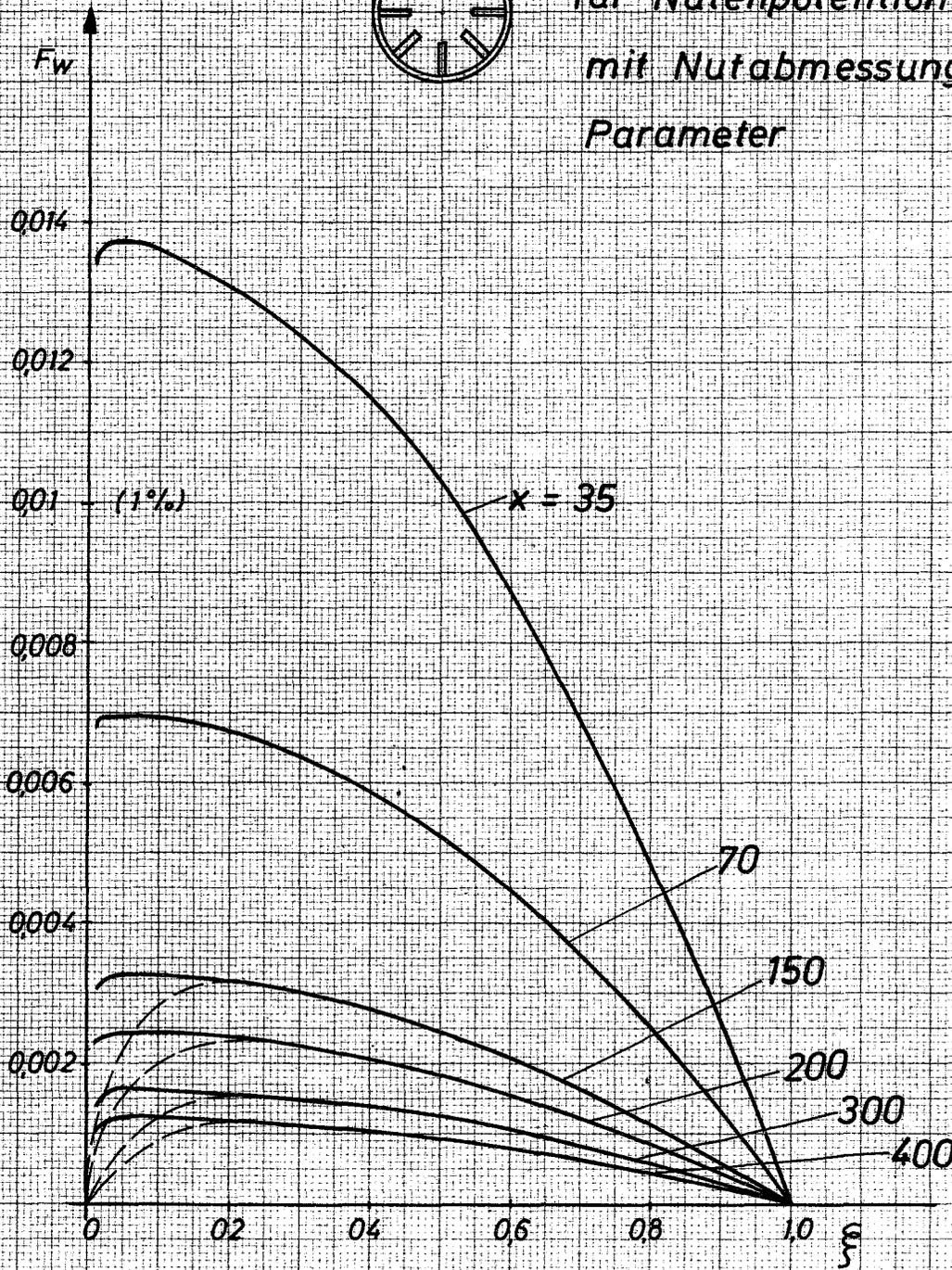
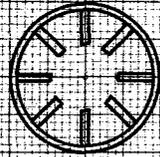


Abb.11



Hydr. Potentiometer

Weg - Anzeigefehler F_w
bei Abgriff - Strom

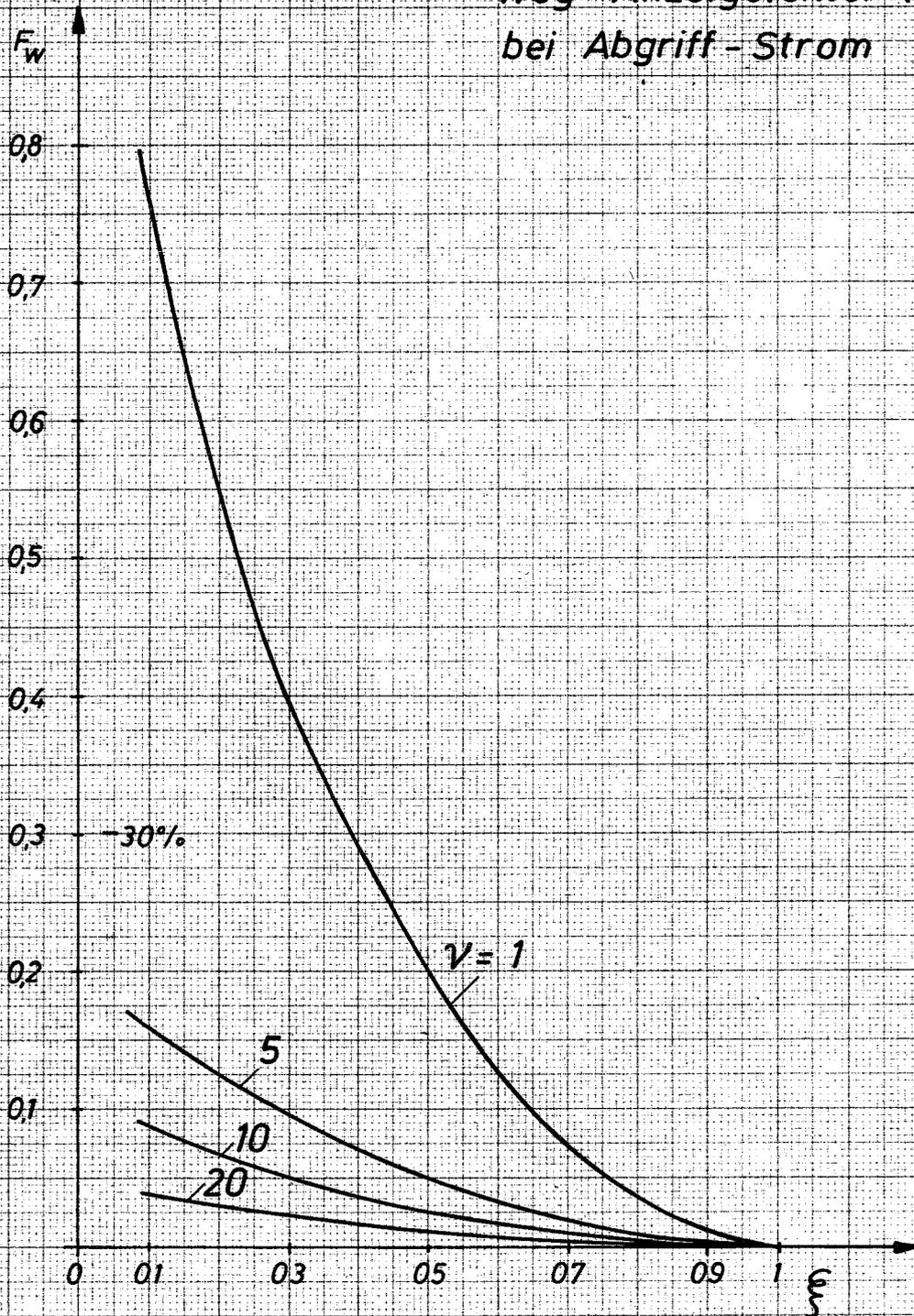


Abb.14

Hydr. Potentiometer

Weg- Anzeigefehler F_w

bei linearer Zähigkeitsänderung

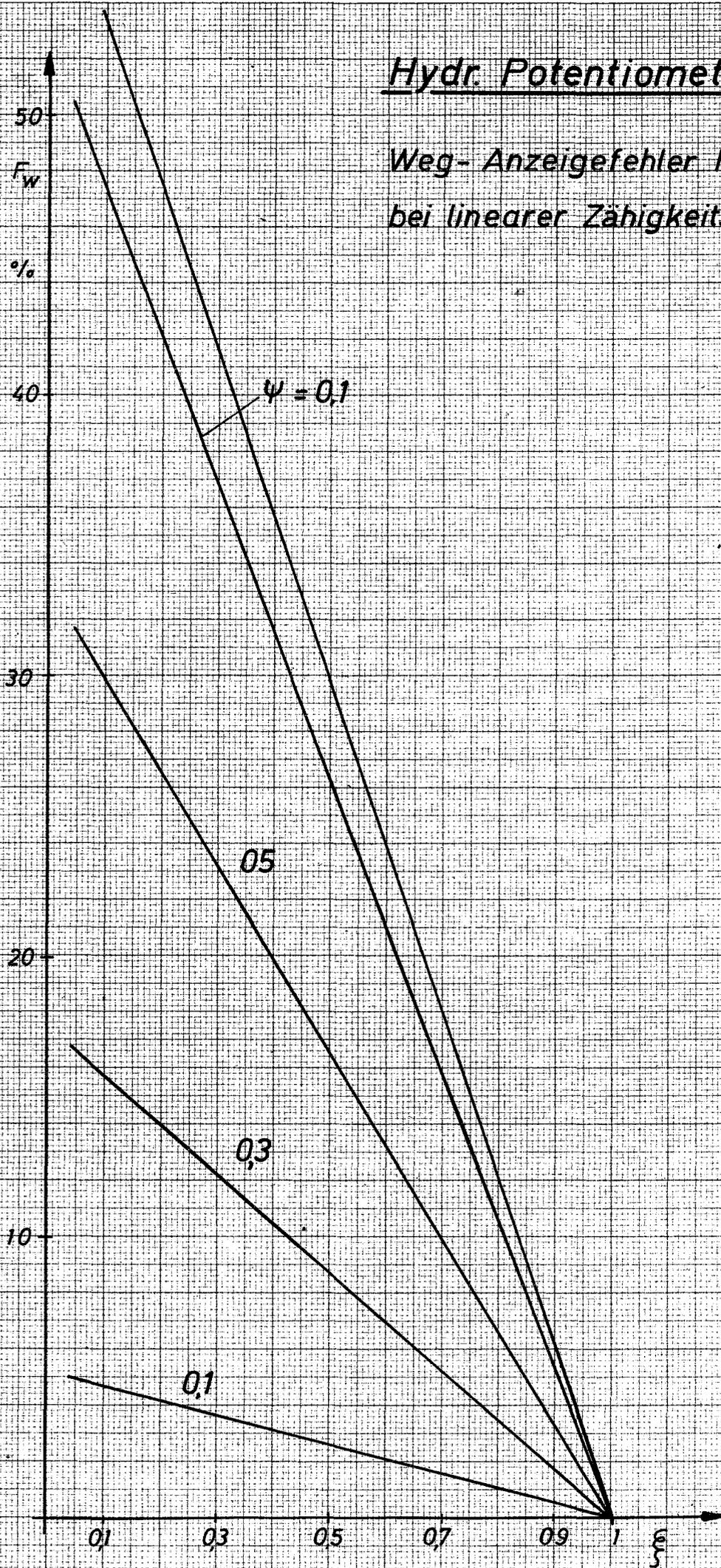


Abb.15

Hydr. Potentiometer

Weg - Anzeige fehler F_w
bei Energieumsatz

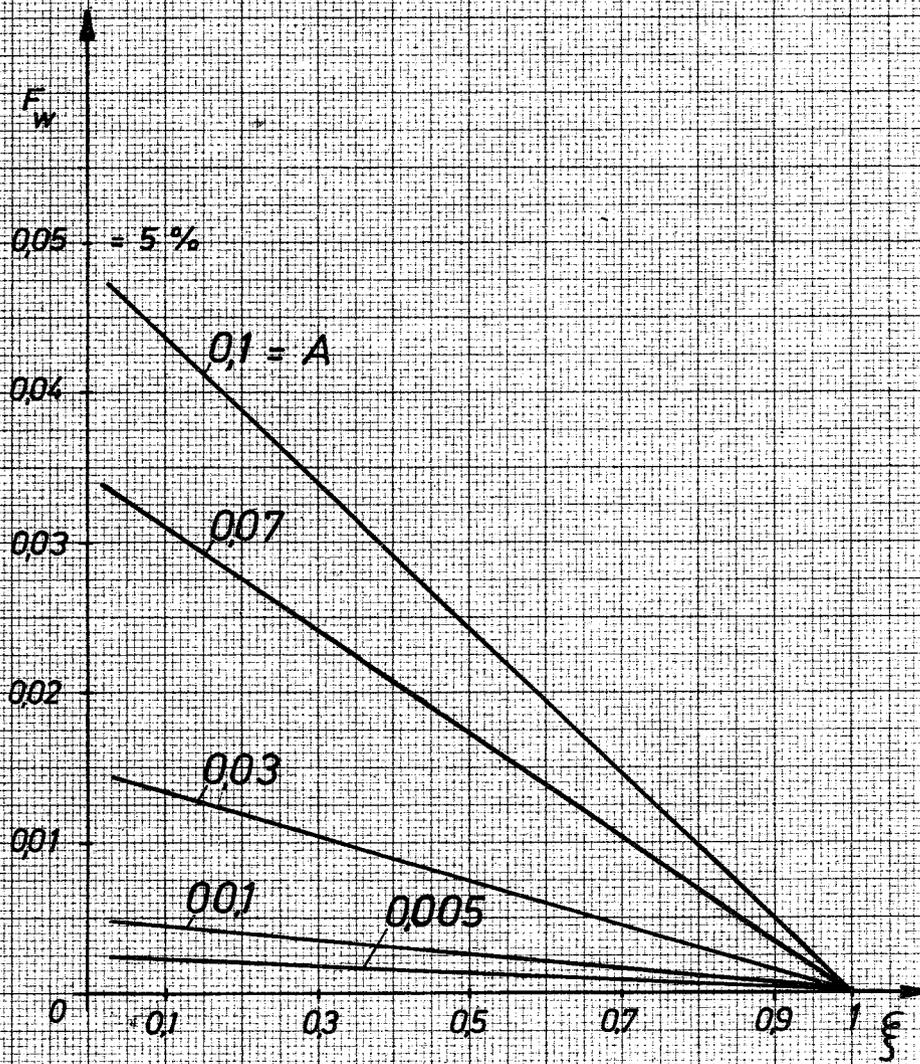
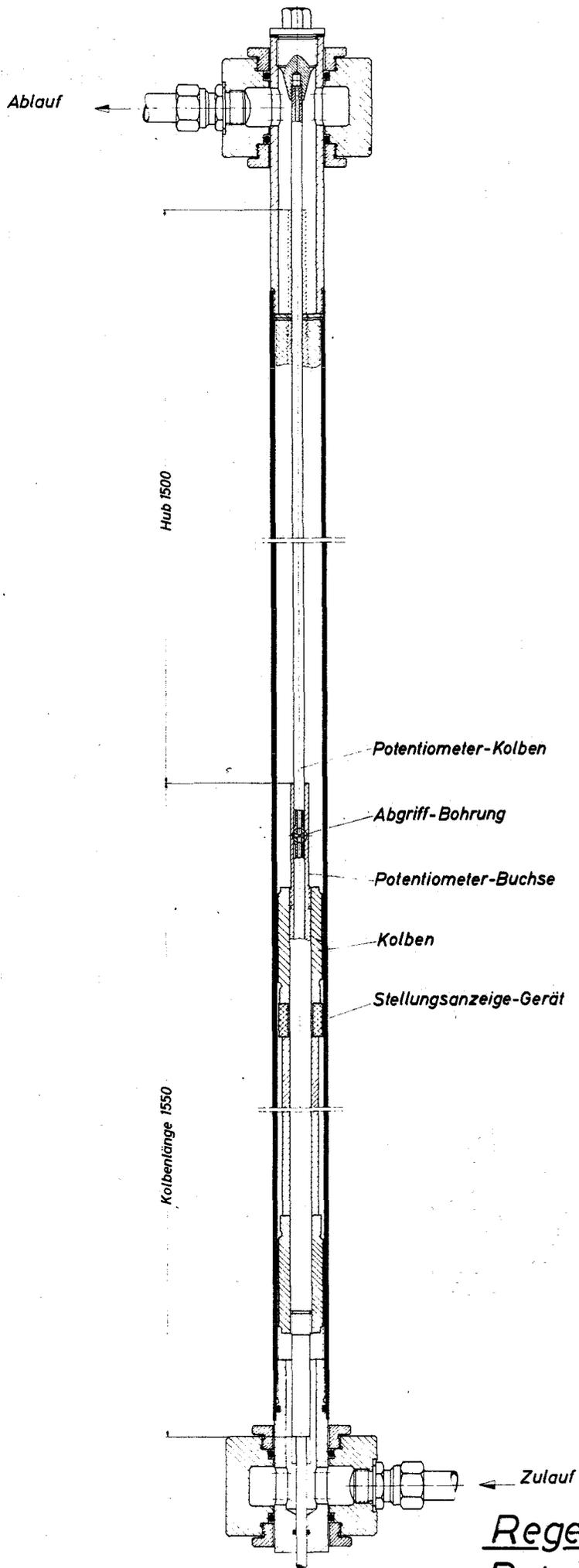
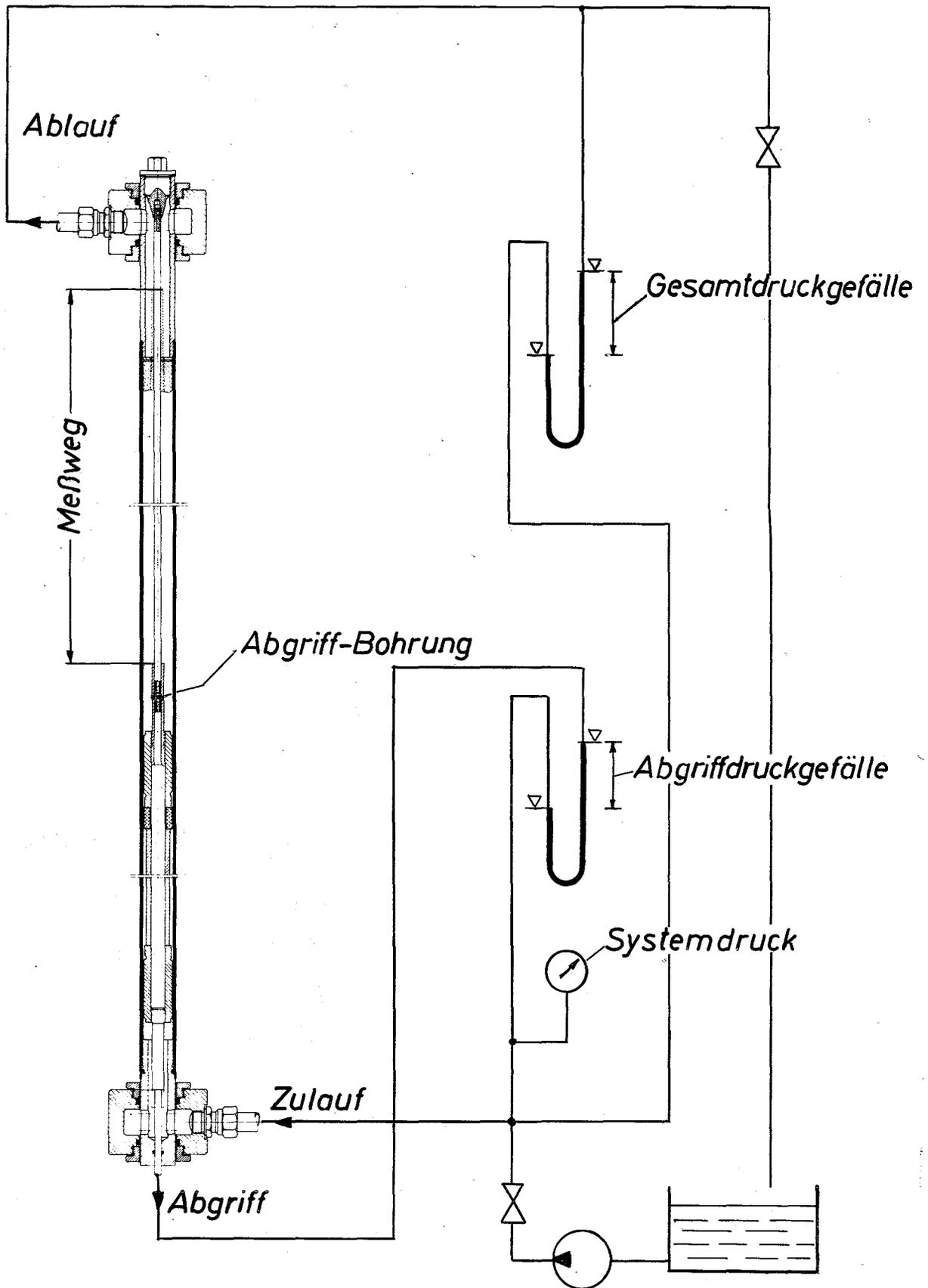


Abb.16



Regelstab-
Potentiometer

Abb. 17



Regelstab Potentiometer Versuchsschaltplan

b'/a'

Meßdruck

b' = Abgriffdruck

a' = Gesamtdruck

1,0

0,9

0,8

0,7

0,6

0,5

0,4

0,3

0,2

0,1

Hydr. Potentiometer I

Durchmesser D = 8 mm

8 Längskanäle

Tiefe der Kanäle = 1,5 mm

Weite der Kanäle = 0,5 mm

Verschiebeweg
mm

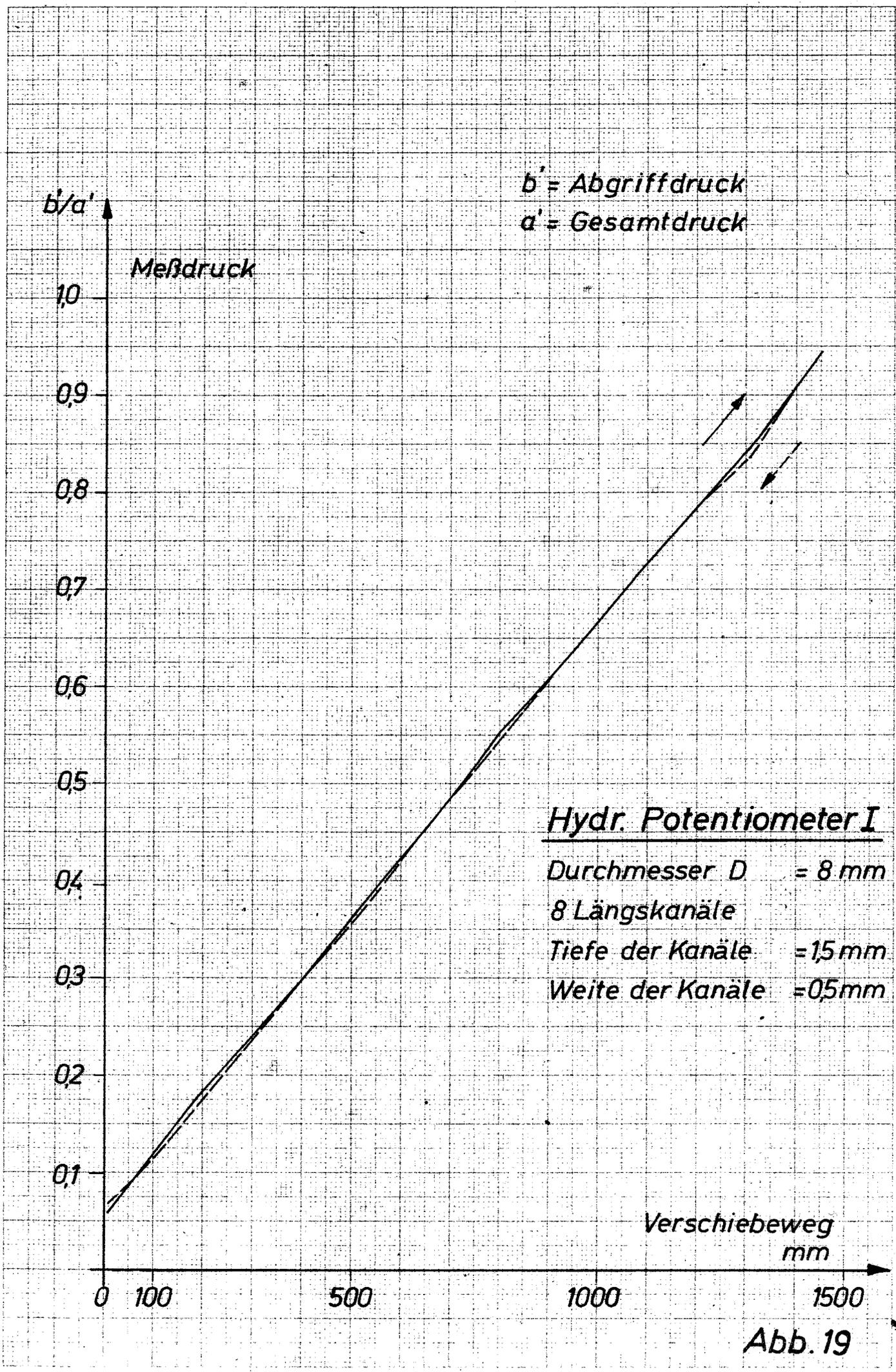
0 100

500

1000

1500

Abb. 19



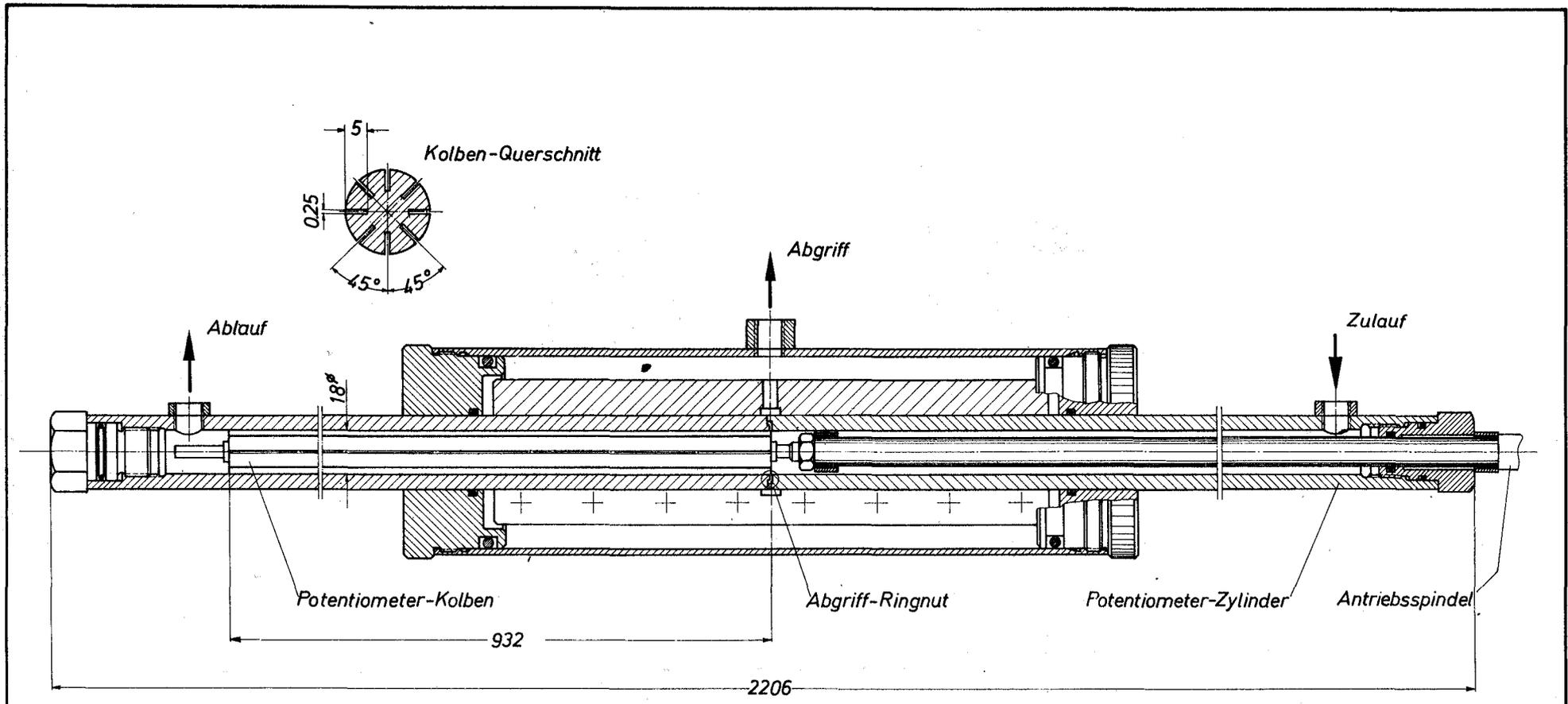
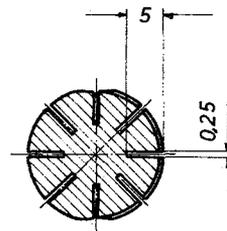
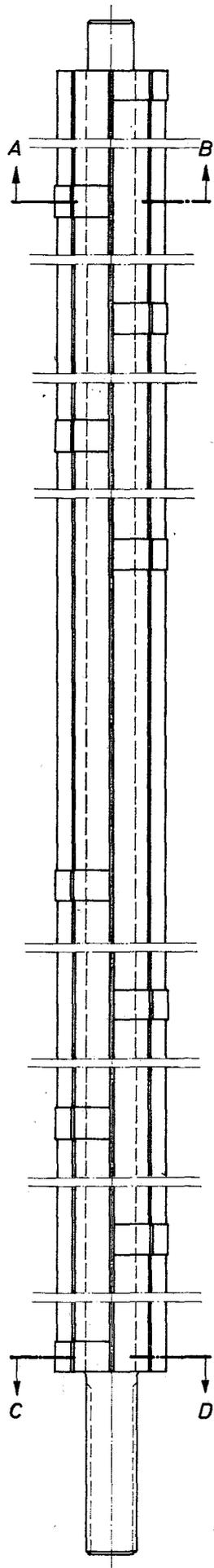
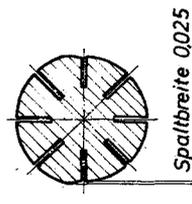


Abb. 20
 R 25.00-2-329

Potentiometer-Versuchs-Meßeinrichtung



Schnitt A-B

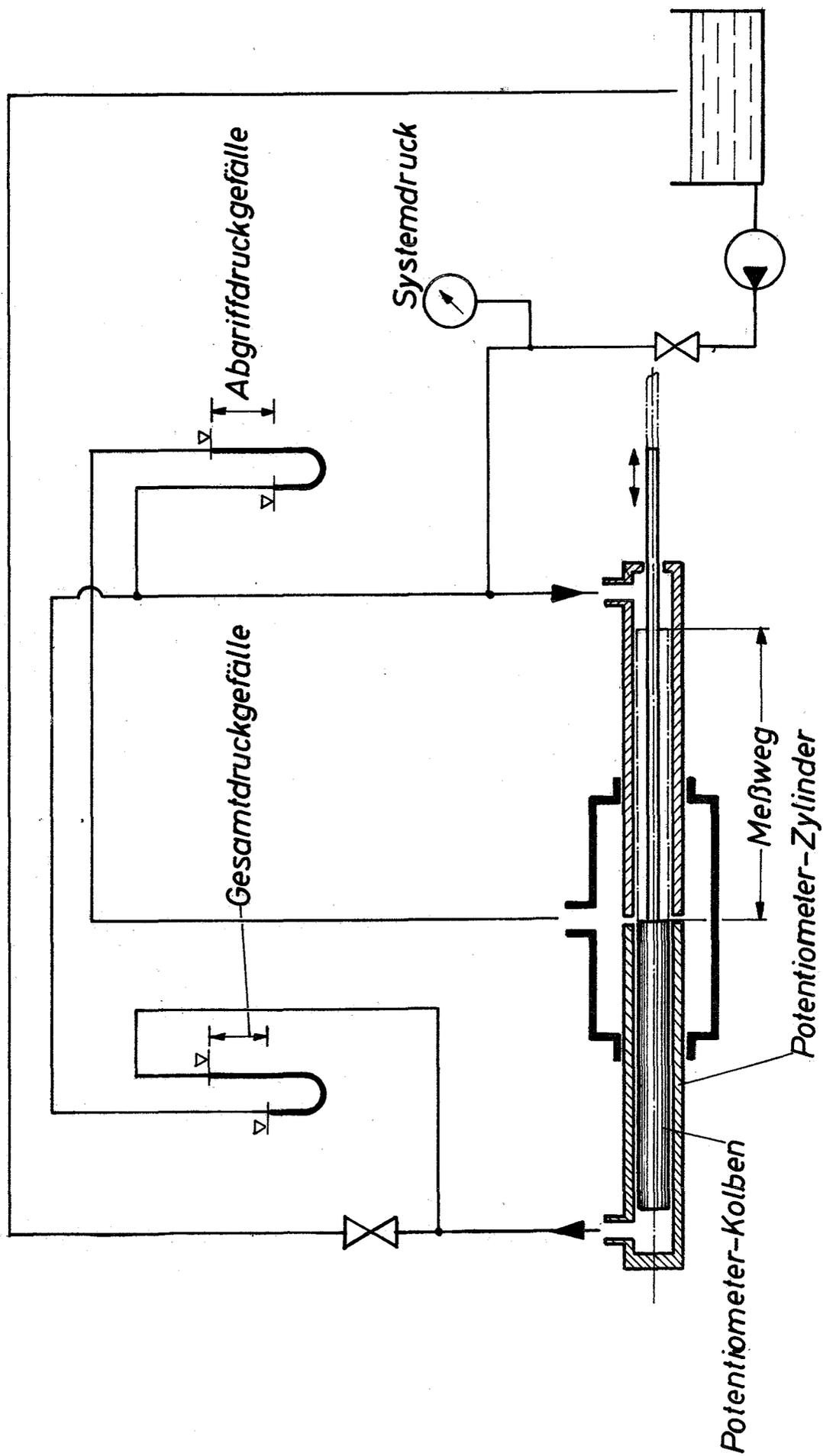


Schnitt C-D

Potentiometer-Kolben II

Abb. 21

R25.32-2-335



Hydraulischer Potentiometer Versuchsschaltplan

Hydr. Potentiometer I
 Kolben - ϕ 18 mm, 8 Nuten 5 \times 0,4

a' = Gesamtdruck
 b' = Abgriffdruck

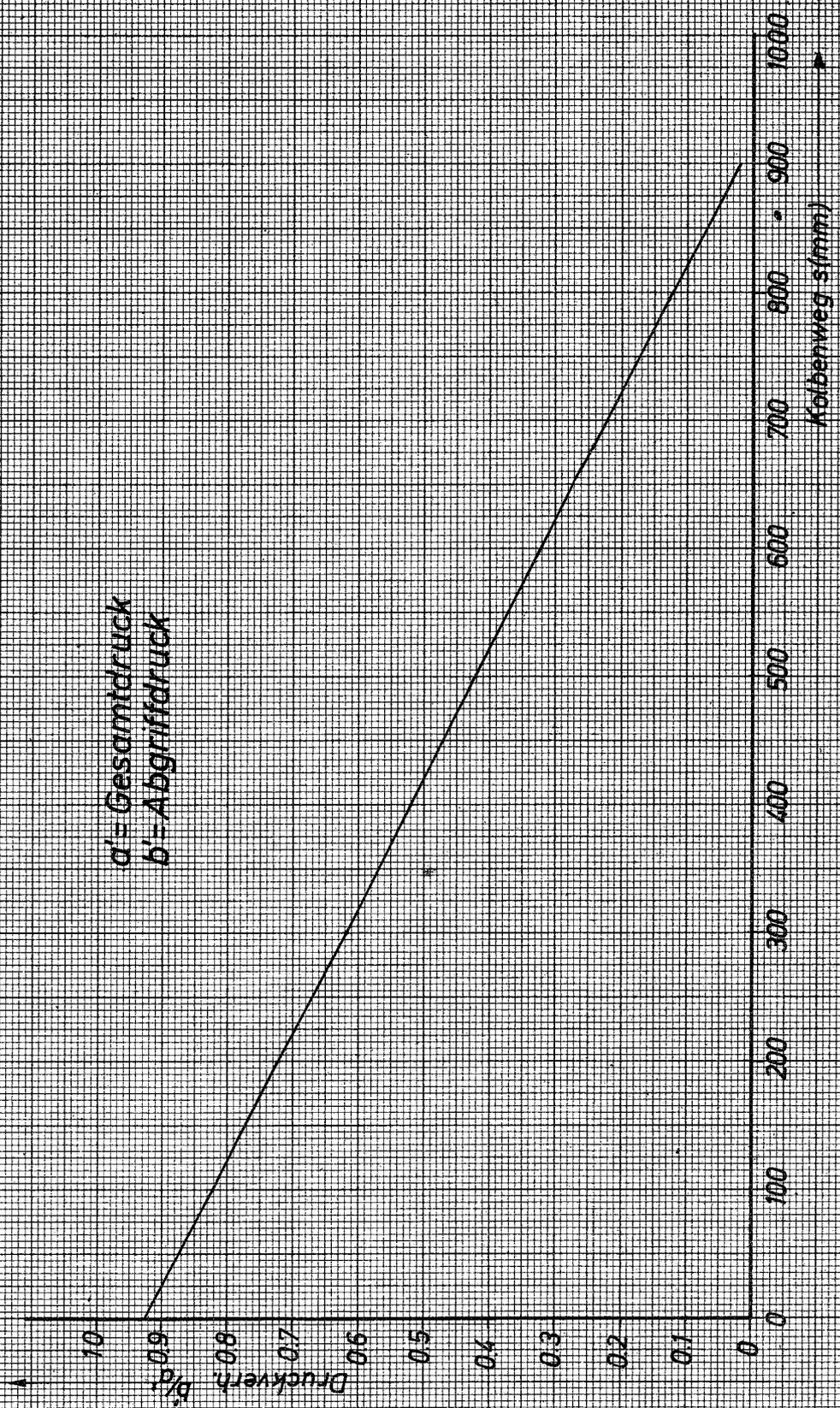


Abb. 24

Hydr. Potentiometer II (Temperatur - Einfluß)

Kolben- \varnothing 18mm, 8Nuten 5 \times 0,4

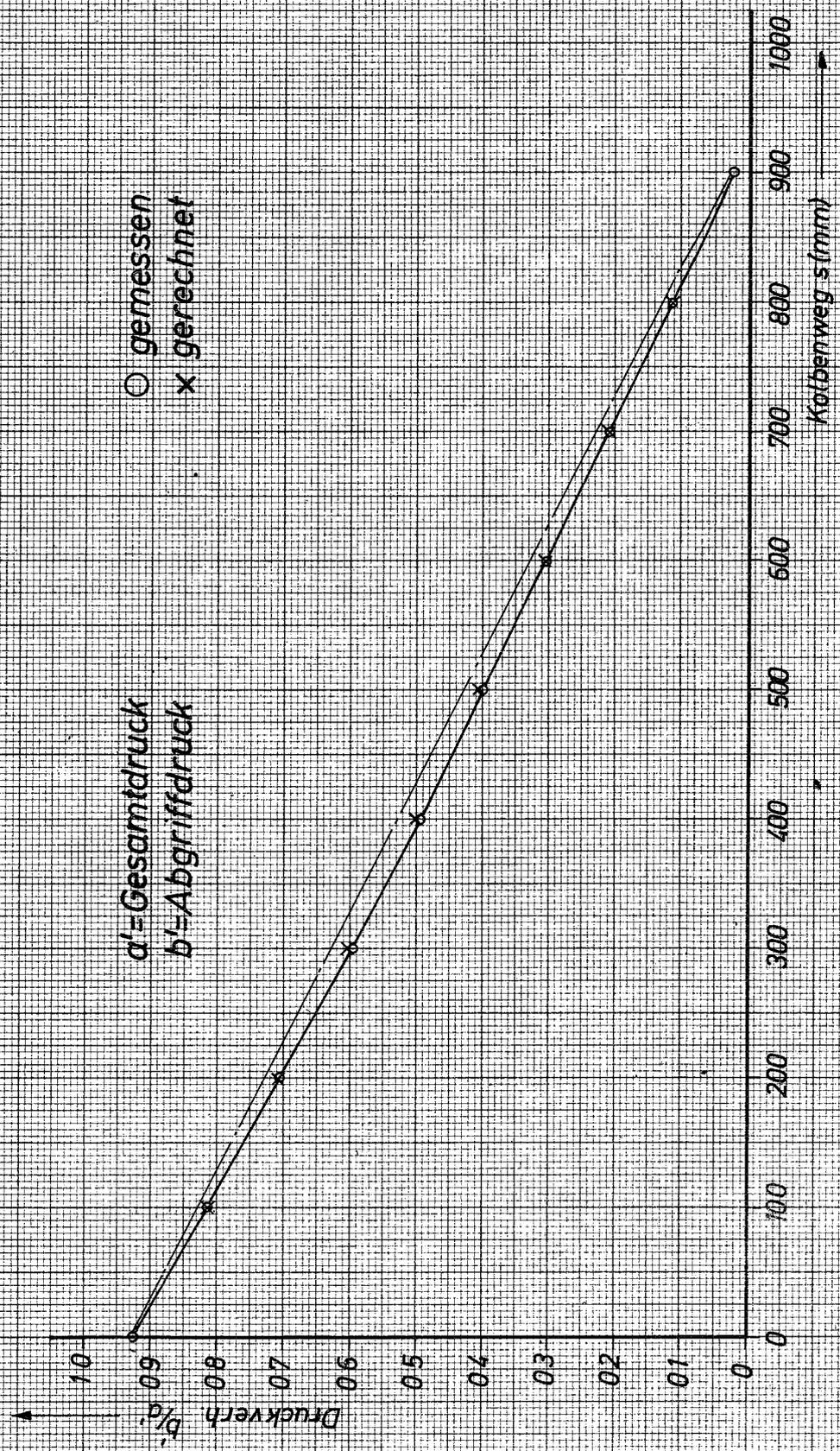


Abb. 25

Zähigkeit von Wasser η (t)

