

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM**

**KARLSRUHE**

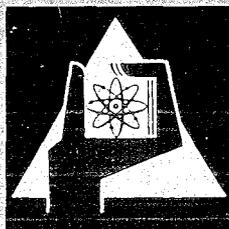
Oktober 1969

KFK 996

Institut für Heiße Chemie

Untersuchungen am Eingangsmießtank einer  
Wiederaufarbeitungsanlage (Accountability Tank)

B. F. Roth, W. Lindner, P. Fischer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1969

KFK-996

Institut für Heiße Chemie

Untersuchungen am Eingangsmeißtank einer Wieder-  
aufarbeitungsanlage (Accountability Tank)

B.F. Roth, W. Lindner, P. Fischer

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

23. Oktober 1969



## Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Beschreibung des Versuchsbehälters	3
2.1	Behälter-Konstruktion	3
3.	Kalibrierung des Ringbehälters mittels Steigrohr	3
3.1	Nicht meßbare Behälterfüllung	4
3.2	Kalibrierkurve	4
3.3	Gleichung und Genauigkeit der Kalibrierkurve	5
4.	Volumenbestimmung mit Lufteinperlmethode	7
4.1	Kalibrierung der U-Rohr-Manometer	7
4.2	Kalibrierkurven	8
4.2.1	Kalibrierkurve für Wasser	8
4.2.2	Kalibrierkurve für Tetrabromäthan	9
5.	Gravimetrische Tankinhaltsmessung mittels Kraftmeß- anlage	10
5.1	Beschreibung der Kraftmeßanlage (KMA)	10
5.2	Durchführung der Messungen	12
6.	Genauigkeitsvergleich Lufteinperlmethode-Kraftmeß- anlage	12
6.1	Abweichung des Tankinhaltes nach der Steigrohr- methode vom Tankinhalt nach der Lufteinperlmethode	13
6.2	Abweichung des Tankinhaltes nach der Steigrohr- methode vom Tankinhalt nach der KMA	14
7.	Untersuchung der Dampfstrahlpumpe	16
7.1	Betriebsdaten	16
7.2	Betriebsverhalten	17
7.3	Nicht förderbare Restmenge	18
8.	Herstellung repräsentativer Proben	18
8.1	Beschreibung der Mischvorrichtung	18
8.2	Untersuchung des Strömungsbildes	19
8.3	Bestimmung der Mischeffektivität	21
9.	Zusammenfassung	22
10.	Literaturverzeichnis	24
11.	Abbildungen	25
12.	Tabellen	53
13.	Anhang	61

## 1. Einleitung

In einer Wiederaufarbeitungsanlage für bestrahlte Kernbrennstoffe ist die möglichst genaue Kenntnis der durchgesetzten Uran/Plutonium-Mengen aus mehreren Gründen wichtig:

### - Betriebssicherheit

Der Betreiber muß jederzeit über den Verbleib des Spaltstoffes in der Anlage informiert sein, um die Ansammlung kritischer Mengen in den einzelnen Teilen der Anlage vermeiden zu können.

### - Wirtschaftlichkeit

Die Kenntnis des Spaltstoffgehaltes in den ein- und austretenden Strömen ist für den Betreiber einmal zur Bilanzierung einer Aufarbeitungskampagne und zum anderen zur optimalen Prozeßsteuerung wichtig.

### - Spaltstoffflußkontrolle

Um ein unerlaubtes Abzweigen des für die friedliche Nutzung bestimmten Spaltstoffes feststellen zu können, was Aufgabe einer internationalen Kontrollbehörde ist, muß der Spaltstofffluß möglichst genau kontrolliert werden.

Die U/Pu-Bilanzierung einer Kampagne wird durch Inventarbestimmungen im Eingangsmießbehälter (accountability tank) und in den Waste- und Produktbehältern durchgeführt. Der Eingangsmießbehälter dient in Wiederaufarbeitungsanlagen zur Aufnahme der Brennstoff-Lösung aus dem Auflöser, der normalerweise diskontinuierlich arbeitet. An dieser Stelle des Brennstoffzyklus kann die Spaltstoffmenge zum ersten Mal nach Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor durch eine direkte Meßmethode recht genau bestimmt werden.

Die bisher in allen technischen Aufarbeitungsanlagen üblichen Schritte zur Bestimmung der Spaltstoffmenge im Eingangsmeßbehälter sind:

- Durchmischen der Behälterfüllung
- Entnahme mehrerer Proben in einem bestimmten zeitlichen Abstand
- Dichtebestimmung

Die Dichte aliquoter Probenmengen werden durch Wägung bestimmt und so eine Aussage über ihre Repräsentativität gewonnen.

- Konzentrationsbestimmung
- Wenn die Dichtedifferenz der Proben einen bestimmten Toleranzwert nicht überschreitet, d.h. nach dem die Behälterfüllung ausreichend durchgemischt wurde, wird mittels chemischer Analysen die Konzentration an U-235 bzw. Pu-239 bestimmt.

- Volumenbestimmung

Mittels Eintauchrohren wird der hydrostatische Druck  $p$  der Flüssigkeit im Behälter (Blasendruckmethode) entweder über ein Präzisions- oder U-Rohrmanometer bestimmt.

Der Quotient aus diesem Druck und dem spez. Gewicht ergibt den Behälterfüllstand  $h$ , mit welchem man aus der zuvor für den Behälter aufgenommenen Kalibrierkurve das Füllvolumen  $V$  bestimmen kann.

Das Produkt aus Behälterfüllvolumen und Spaltstoffkonzentration der Lösung liefert das Spaltstoffinventar des Behälters.

Um mit technisch vernünftigem Aufwand eine möglichst genaue Spaltstoffinventarbestimmung durchführen zu können, wurden u.a. die Mischverhältnisse bei Herstellung repräsentativer Proben, die Kalibrierung, die Volumenbestimmung mittels Blasendruckmethode und die Gewichtsmessung mittels elektrischer Kraftmeßdosen genauer untersucht.

## 2. Beschreibung des Versuchsbehälters

Die Untersuchungen wurden an einem 1:1-Modell des Eingangsmeßbehälters der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK), einem Ringbehälter mit einem Füllvolumen von 800 l durchgeführt. Das Modell unterscheidet sich vom WAK-Behälter dadurch, daß Behälterboden und äußere Ringwand aus Plexiglas gefertigt wurden, um die Durchmischung visuell untersuchen zu können, sowie durch das Fehlen der Behälterwandkühlung.

### 2.1 Behälter-Konstruktion

Der Behälter ist für Lösungen von maximal 3 % U-235 geometrisch sicher ausgelegt. Die Konstruktion mit allen wichtigen Abmessungen zeigt Figur 1.

Behälteraußendurchmesser	1220 mm
Ringbreite	165 mm
Gesamthöhe	1600 mm

Die innere Behälterringswand und der Behälterdeckel wurden aus säurebeständigem Stahl, die äußere Wand und der Behälterboden, der eine Neigung von ca. 3 % hat, aus Plexiglas gefertigt.

Ein parallel zum Behälterboden angeordnetes ringförmiges Mischrohr mit am Umfang angebrachten radialen Bohrungen dient zum Durchmischen der Lösung durch Einblasen von Luft.

Alle Rohranschlüsse zum Behälter wie Zulaufstutzen, Dampfstrahlpumpe, Mischluft, Meßluft usw. sind am Deckel angebracht. Die Lage, Abmessungen und Eintauchtiefen dieser insgesamt 14 Rohre sind in Figur 2 dargestellt. Eine fotografische Aufnahme des Versuchsbehälters zeigt Figur 3.

## 3. Kalibrierung des Ringbehälters

Die Kalibrierkurve, die den Behälterfüllstand dem entsprechenden Füllvolumen zuordnet, muß so genau wie möglich bestimmt werden,

da sie bei der Bestimmung der Genauigkeit der Volumenmessung als Bezugskurve verwendet wird. Die Kalibrierung wurde in zwei Bereiche aufgeteilt, den nicht linearen Teil im Bereich des schrägen Behälterbodens und den größeren linearen Teil.

### 3.1 Nicht meßbare Behälterfüllung

Da das Lufteinperlrohr zur Niveau-Messung aus funktionstechnischen Gründen einen endlichen Abstand vom Behälterboden haben muß, in unserem Falle 19,5 mm, wurde diese nicht meßbare Behälterfüllung  $G_0$  gesondert bestimmt.  $G_0$  ist die Füllmenge, bei der das Lufteinperlrohr gerade in die Flüssigkeit eintaucht. Eine anschauliche Darstellung dieser Verhältnisse zeigt Figur 4. Für  $G_0$  ergaben sich  $9,668 \pm 0,023$  kg (siehe Anhang Punkt 2).

### 3.2 Kalibrierkurve

Die Kalibrierung wurde mit destilliertem Wasser in Schritten von je 20 kg durchgeführt. Diese Menge wurde auf einer zuvor geeichten Tischwaage (Meßbereich 30 kg, Skalenteilung 10 g) abgewogen. Als Einwägegefäß wurde eine Polyäthylenflasche verwendet. Durch die geringe Adhäsion der Polyäthylen-Oberfläche konnte die bei der Entleerung in der Flasche zurückbleibende Wassermenge auf wenige Tropfen reduziert werden, außerdem wurde nach jeder Entleerung (insgesamt 39) die Tareinstellung an der Waage überprüft und ggf. korrigiert. Eine Luftblasenbildung an den Innenwänden des Tanks wurde durch sorgfältiges Einfüllen und Vibrieren vermieden.

Nach Einfüllung von jeweils 20 kg Wasser wurden die zugehörigen Füllhöhen an einem am Ringtank angebrachten Glas-Steigrohr mit 6 mm Innendurchmesser mittels eines geeichten Höhenreißers mit einer Nonius-Feinablesung und einer daran befestigten Lupe bestimmt (siehe Fig. 5). Die Kapillarwirkung im Steigrohr wurde durch Aufdampfen von Dimethyldichlorsilan vermieden.

Die Kalibrierung wurde bei einer konstanten Raumtemperatur von 22°C durchgeführt.

Die schrittweise Füllung des Ringbehälters wurde, um grobe zufällige Ablesefehler zu vermeiden, von verschiedenen Mitarbeitern insgesamt fünfmal wiederholt. Die aufgenommenen Meßwerte sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Aus den einem best. G zugeordneten fünf Steighöhen  $h_1$  bis  $h_5$  wurde das arithmetische Mittel  $\bar{h}_j$  in Tabelle 3 errechnet.

Für jeden Eichschritt wurde diese mittlere Höhe  $\bar{h}_j$  über dem zugehörigen Füllgewicht aufgetragen. Die so gewonnene sehr genaue Eichkurve setzt sich daher aus 39 Einzelkurven zusammen. Eine solche Einzelkurve ist als Beispiel in Fig. 6 aufgetragen. Es wurde hier der 35-te Kalibrierschritt gewählt, da hier die Standardabweichung aus den Meßwerten  $h_1$  bis  $h_5$  am größten ist und nur deshalb eine übersichtliche zeichnerische Darstellung möglich ist. Bei der Gewichtsangabe wurde auf der Abszisse die nicht meßbare Behälterfüllung  $G_0$  berücksichtigt. Eine Füllstandszunahme von 1mm entspricht 0,52 kg. Da man über die Noniusteilung 1/10 mm ablesen kann, ist in diesem Diagramm das Gewicht auf 52 g genau bestimmbar.

### 3.3 Gleichung und Genauigkeit der Kalibrierkurve

Für die praktische Anwendung der Kalibrierkurve ist es nicht sinnvoll, den Tankinhalt aus 39 Einzeldiagrammen zu bestimmen. Deshalb wurde aus den Werten  $\bar{h}_j$  und  $G_j$  in Tab. 3 nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die ausgleichende Kalibriergleichung der Form:

$$h = a \cdot G + b$$

errechnet.

Bei einem am Behältersteigrohr abgelesenen Füllstand  $h$  ist:

$$G = \frac{h - b}{a}$$

Es bedeuten:

$a$  = Geradensteigung der ausgleichenden Geraden

$b = -a \cdot G_0$  nach Voraussetzung in 3.1

Damit gilt allgemein:

$$h_{St} = a(G - G_0) \quad I$$

und

$$G_{St} = \frac{h_{St}}{a_{St}} + G_0 \quad II$$

Mit den Zahlenwerten aus Tabelle 1 und 3 ergeben sich folgende Endformeln für die Behälterkalibrierung mit Hilfe des Steigrohres.

$$h_{St} = 1,911581 \cdot 0,999(G - 9,668) \pm (G \cdot 0,000960 + 0,05) \quad III$$

$G$  (kg  $H_2O$  bei  $22^\circ C$ )

$h_{St}$  (mm WS)

$$G_{St} = \left( \frac{h_{St}}{1,911581 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \pm (h_{St} \cdot 0,000263 + 0,076) \quad IV$$

Die Ermittlung der Gleichungen III und IV ist im Anhang in Kapitel 4.1 und 4.2 ausführlich beschrieben.

Die Kalibrierkurve  $h = f(G)$  ist in Fig. 7 dargestellt.

#### 4. Tankinhaltsbestimmung mittels Lufteinperlrohren

Der Tankinhalt wird mit Hilfe der Lufteinperlmethode gemessen. Die in einem Tauchrohr mit 8 mm Innendurchmesser (siehe Pos. 6 Fig. 2) stehende Flüssigkeit wird durch Preßluft verdrängt, wobei am unteren unter  $90^\circ$  abgeschnittenen Ende des Tauchrohres Luftblasen austreten. Der sich einstellende Druck  $p$  wird an einem U-Rohr-Manometer abgelesen. Die Füllstandshöhe ist der Quotient aus  $p$  und der Dichte der Manometerflüssigkeit. Die Flüssigkeit im Tank und Manometer standen unter Atmosphärendruck. Der Luftdurchsatz wurde so gewählt, daß der durch das Ablösen einer Luftblase am Tauchrohr entstehende Druckabfall und die dadurch entstehende oszillierende Bewegung der Manometerflüssigkeit so gering war, daß der Ablesefehler am U-Rohr-Manometer vernachlässigt werden konnte. Dieser optimale Luftdurchsatz  $Q_L$  betrug 25 l/h.

Zur Umrechnung der am U-Rohr abgelesenen Größe  $h = p/\gamma$  auf den Behälterinhalt wird die Kalibrierkurve  $h = f(G \text{ bzw. } V)$  benützt.

##### 4.1 Kalibrierung der U-Rohr-Manometer

Bei der Kalibrierung der U-Rohre wurde in gleicher Weise verfahren wie bei der in Kapitel 3 beschriebenen Kalibrierung mittels Steigrohr. Zum Vergleich wurde die Kalibrierung je einmal für ein U-Rohr mit destilliertem Wasser und mit Tetrabromäthan als Messflüssigkeit vorgenommen. Der sich in den U-Rohren einstellende Druck  $p$  mm Fl.S. wurde mit dem geeichten Höhenreißer gemessen. Die schrittweise Füllung des Tankes wurde von verschiedenen Mitarbeitern dreimal wiederholt. Aus den Meßwerten (Tabelle 4) wurde das arithmetische Mittel  $\bar{h}_j$  (Tabelle 5) gebildet.

#### 4.2 Kalibrierkurven

Für die Gleichungen der Kalibrierungen gilt wie unter Kapitel 3.3

$$h_u = a_u (G - G_o)$$

bzw.

$$G_u = \frac{h}{a_u} + G_o$$

Da das für die Kalibrierung im Tank verwendete Tauchrohr (Pos. 6 in Fig. 2) nur einen Innendurchmesser von 8 mm hat, ist wegen der Adhäsion des Wassers an der Tauchrohrinnenwand eine Kapillarsteighöhe  $h_K$  zu berücksichtigen, d.h. es wird ein um  $h_K$  höherer Füllstand gemessen.

Die allgemeine Gleichung der Kalibrierkurve lautet damit

$$h_u = a_u(G_u - G_o) + h_K \quad \text{V}$$

bzw.

$$G_u = \frac{h_u - h_K}{a_u} + G_o \quad \text{VI}$$

$$h_{u,K} \quad [\text{mm Fl.S.}]$$

$$G \quad [\text{kg}]$$

##### 4.2.1 Kalibrierkurve für Wasser als Manometerflüssigkeit

Die Kapillarsteighöhe  $h_K$  wurde experimentell ermittelt und beträgt für Wasser:

$$h_{K_{H_2O}} = 4 \text{ mm WS}$$

Die Endgleichungen wurden analog der Berechnung für die Kalibrierung mittels Steigrohr berechnet (siehe Anhang Kapitel 4.3 und 4.4)

$$h_u = (1,912500 \cdot 0,999(G - 9,668) + 4) \cdot (G \cdot 0,003737 + 0,13) \quad \text{VII}$$

$h_u$  (mm WS), G (kg H<sub>2</sub>O bei 22°C)

$$G_u = \left( \frac{h_u - 4}{1,912500 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \cdot (h_u \cdot 0,001023 + 0,133) \quad \text{VIII}$$

Die Kalibrierkurve  $h = f(G)$  ist zeichnerisch mit Fig. 7 identisch.

#### 4.2.2 Kalibrierkurve für Tetrabromäthan (TBÄ)

Für die Kapillarsteighöhe  $h_K$  bei TBÄ gilt:

$$h_{K \text{ TBÄ}} = h_{K \text{ H}_2\text{O}} \cdot \frac{\gamma_{\text{H}_2\text{O}} (22^\circ\text{C})}{\gamma_{\text{TBÄ}} (22^\circ\text{C})} \quad (\text{mm TBÄ-Säule})$$

$$h_{K \text{ TBÄ}} = 4 \cdot \frac{0,9977}{2,9620} = 1,35 \text{ mm TBÄ-Säule}$$

Die Kalibriergleichungen lauten damit:

$$h_u = (0,644803 \cdot 0,999 (G - 9,668) + 1,35) \pm (G \cdot 0,001382 + 0,11) \quad \text{IX}$$

$h_u$  (mm TBA),  $G$  (kg  $H_2O$  bei  $22^\circ C$ )

$$G_u = \left( \frac{h_u - 1,35}{0,644803 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \pm (h_u \cdot 0,003326 + 0,338) \quad \text{X}$$

Die Kalibrierkurve für das TBA-U-Rohr ist in Fig. 8 dargestellt. Bei anderen Temperaturen muß für die Manometerflüssigkeit eine Dichtekorrektur durchgeführt werden.

## 5. Gravimetrische Tankinhaltsmessung

Im Hinblick auf eine möglichst genaue Messung der Füllmenge im Rahmen einer Kontrolle des Spaltstoffflusses in der Wiederaufarbeitungsanlage wurde alternativ zur Einperlmethode eine gravimetrische Inhaltsbestimmung des Eingangsmeißtanks mit Hilfe einer elektronischen Kraftmeßanlage untersucht. Der technische Aufwand und die Genauigkeit dieser Methode werden mit der Lufteinperlmethode verglichen.

### 5.1 Beschreibung der Kraftmeßanlage

Das Meßprinzip beruht auf der Widerstandsänderung eines Dehnungsmeßstreifens unter Belastung. Das der Belastung proportionale elektrische Signal wird elektronisch verstärkt und zur Anzeige analog-digital umgewandelt. Fig. 9 zeigt das Blockschaltbild der Kraftmeßanlage.

Als Meßwertaufnehmer wurden drei Kraftmeßdosen mit einer maximalen Belastbarkeit von je 500 kp verwendet. Die Kraftmeßdosen haben gegenüber einer normalen Waage den Vorteil, daß der Meßweg bei Nennlast nur wenige 1/10 Millimeter beträgt. Dies ist eine notwendige Bedingung bei der Gewichtsmessung des fest in der Anlage verrohrten Eingangsmestanks.

Der Behälter ist auf einem verdrehungssteifen dreieckigen Stahlrahmen befestigt. Dieser Rahmen hängt, durch je ein Kugelgelenk verbunden, an den drei Kraftmeßdosen. Durch diese Aufhängung wird eine Verfälschung der Messungen durch horizontale Kraftkomponenten vermieden. Fig. 3 und 10 zeigen eine Aufnahme des Versuchsstandes mit zugehöriger Elektronik und die Aufhängung einer Kraftmeßdose.

Die wesentlichen technischen Daten der Kraftmeßanlage waren:

- 1) Kraftmeßdose: Typ U 1/500 (Fa. HBM)  
Meßbereich 0-500 kp  
Genauigkeitsklasse 0,1  
Empfindlichkeit 2 mV/V  
Meßweg 0,1-0,25 mm bei Nennlast  
Vollbrücke mit 4 DMS, Eigenwiderstand 120  
Maße 80 Ø x 115 mm
- 2) Verstärker: Trägerfrequenzmeßverstärker Typ KWS/3-5 (Fa. HBM)
- 3) Anzeiger: Analog/Digital-Umsetzer Typ ADU-100 (Fa. HBM)  
Anzeigebereich  $\pm$  6000 Einheiten  
Linearitätsabweichung 0,1 % vom Istwert oder 1 digit
- 4) Registrierung: Digital-Drucker Typ D 11G-7/US100 (Fa. Kienzle)  
Druckerausgang: Meßwert mit Datum, Uhrzeit und Vorzeichen Max. Ziffernzahl 14
- 5) Schreiber: Punktdrucker Typ ARU 410 (Fa. H.u.B.)  
Genauigkeitsklasse 0,5

## 5.2 Durchführung der Messungen

Die Messungen, die mit der Kraftmeßanlage durchgeführt werden, beschränken sich auf den unverrohrten Tank, d.h. die notwendigen Leitungen für den Lösungszulauf, Kühlung, Probenahme usw., waren nicht angeschlossen. Dies bedeutet eine Vereinfachung des Problems. Bei einem fest verrohrten Tank würden durch die Rohrsteifigkeit und Temperatureinflüsse die Messungen zusätzlich beeinflusst werden. Um diese Einflüsse zu mindern, ist ein erheblicher konstruktiver Aufwand für die Tankaufhängung und Rohrzuführungen erforderlich. Für den Genauigkeitsvergleich Lufteinperlmethode - Kraftmeßanlage, um den es hier im wesentlichen geht, genügt jedoch die Aussage, die anhand der Meßergebnisse für den unverrohrten Tank gemacht werden kann.

Die digitale Anzeige der Kraftmeßanlage war so ausgelegt, daß bei dem gesamten Meßbereich von 0 - 1500 kg eine Ablesung auf  $\pm 1$  kg möglich war. Bei diesem Meßbereich wurden 2 Meßreihen zu je 16 Messungen durchgeführt, wobei zwischen Füllen und Entleeren des Tankes unterschieden wurde.

Die Ergebnisse aus diesen Meßreihen sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

## 6. Genauigkeitsvergleich Lufteinperlmethode - Kraftmeßanlage

Als Bezugsgröße für beide Methoden wurde der Tankinhalt, der sich rechnerisch aus Gleichung IV mit einer am Behältersteigrohr abgelesenen Füllhöhe  $h$  ergibt, gewählt. Bei diesem Füllstand wurde gleichzeitig die Anzeige der Kraftmeßanlage und die Anzeige an den U-Rohr-Manometern wie beschrieben abgelesen. Die Meßwerte sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

6.1 Abweichung des Tankinhaltes, bestimmt nach der Lufteinperlmethode, vom Tankinhalt, bestimmt durch die Kalibrierung der Steigrohrkalibrierung

---

Aus den Abweichungen  $\Delta G = G - G_{H_2O}$  bzw.  $\Delta G = G - G_{TBA}$  in Tabelle 7 ist ersichtlich, daß diese nur ein negatives bzw. positives Vorzeichen haben. Daraus ist zu schließen, daß die Kalibrierung, bezogen auf die Kalibriergleichung der Steigrohrkalibrierung, mit einem negativen bzw. positiven systematischen Fehler  $f_{SH_2O}$  bzw.  $f_{STBA}$  behaftet sind.

Größe und Vorzeichen der systematischen Fehler sind von den unterschiedlichen Werten der Geradensteigung, die für die Steigrohr- und U-Rohr-Kalibrierungen errechnet wurden, abhängig. Es wurden für  $f_s$  folgende Werte errechnet:

$$f_{SH_2O} = - 0,000480 \cdot G \quad [kg] \quad XI$$

$$f_{STBA} = 0,001045 \cdot G \quad [kg] \quad XII$$

In Fig. 11 ist der Verlauf der systematischen Fehler anschaulich dargestellt. Um einen Vergleich der Inhaltsbestimmung nach der Steigrohr- und U-Rohr-Kalibrierung vornehmen zu können, müssen die systematischen Fehler in den Gleichungen VIII und X berücksichtigt werden.

Es gilt dann für die U-Rohr-Kalibrierung mit Wasser:

$$G'_u = \left( \frac{h_u - 4}{1,912500 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \cdot 1,000480 + (h_u \cdot 0,001023 + 0,133)$$

G (kg), h (mm WS)

XIII

und für TBÄ:

$$G'_u = \left( \frac{h_u - 1,35}{0,644803 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \cdot 0,998955 + (h_u \cdot 0,003326 + 0,338)$$

$h$  [mm TBÄ-Säule]

XIV

Die Ermittlung der Gleichungen XI bis XIV ist im Anhang in Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

Berechnet man nun den Tankinhalt nach Gleichung IV (mit der am Steigrohr abgelesenen Füllhöhe  $h_{St}$ ) und nach Gleichung VIII und X (mit den Manometeranzeigen  $h_u$  für Wasser bzw. TBÄ), so erhält man die gleichen Zahlenwerte. Bei der Angabe der Endergebnisse ergeben sich nur Differenzen durch die unterschiedlichen Maximalfehler  $\Delta G_{max}$ .

## 6.2 Abweichung des Tankinhaltes, gemessen mit der Kraftmeßanlage, vom Tankinhalt, errechnet durch die Kalibriergleichung der Steigrohrkalibrierung

Die Abweichungen  $\Delta G = G_{St} - G_{KMA}$  in Tabelle 7 zeigen, daß diese beim Füllen des Tanks negativ und beim Entleeren positiv sind. Die Mittelwerte  $\overline{\Delta G}$  aus den jeweils 16 Messungen sind -1,04 und +1,27 kg. Anhand der jeweils in einer Meßreihe gleichen Vorzeichen läßt sich erkennen, daß  $\Delta G$  sich aus einem positiven bzw. negativen systematischen Fehler und einer Streuung  $\pm$  zusammensetzt.

Durch Versuche wurde festgestellt, daß der systematische Fehler der Kraftmeßanlage beim Füllen des Tankes -1 kg und beim Entleeren +1 kg ist.

Der positive systematische Fehler kann durch die Umschaltspanne des digitalen Anzeigergerätes erklärt werden. Die bei den Ver-

suchen verwendete digitale Anzeige erlaubte eine Ablesung, bei der die kleinste Einheit 1 kg betrug. Der Umschaltpunkt war jeweils am oberen Grenzwert, d.h. z.B. erfolgte die Umschaltung von Ziffer 1 und 2 bei dem Absolutwert von 1,999... . Dies bedeutet, daß beim Entleeren des Tanks z.B. der Wert 551 kg angezeigt wurde, die Tankfüllung jedoch 551,999... kg betrug. Die entstehende Abweichung beim Entleeren ist also stets positiv.

Die negative systematische Abweichung -1 kg kann so nicht eindeutig erklärt werden, wurde jedoch durch mehrere Meßreihen bestätigt.

Beim Vergleich der Tankinhaltsbestimmung mittels Kraftmeßanlage und Steigrohrkalibrierkurve kann zwischen Füllen und Entleeren des Tankes unterschieden werden, indem die digitale Anzeige der KMA wie folgt korrigiert wird:

$$\text{Füllen: } G'_{KMA} = G_{KMA} - 1 \quad [\text{kg}]$$

$$\text{Entleeren: } G'_{KMA} = G_{KMA} + 1 \quad [\text{kg}]$$

$$G_{KMA} = \text{digital angezeigter Wert in kg}$$

Da die kleinste Einheit der digitalen Anzeige 1 kg betrug, ist die Ableseunsicherheit  $\pm 1$  kg.

Die Endformeln für die gravimetrische Inhaltsmessung mittels Kraftmeßanlage lauten somit:

$$\text{Füllen des Tanks: } G'_{KMA} = (G_{KMA} - 1) \pm 1 \quad (\text{kg}) \quad \text{XV}$$

$$\text{Entleeren des Tanks: } G'_{KMA} = (G_{KMA} + 1) \pm 1 \quad (\text{kg}) \quad \text{XVI}$$

Kann in der Praxis zwischen Füllen und Entleeren nicht eindeutig unterschieden werden, so muß mit

$$G'_{KMA} = (G_{KMA} \pm 2) \text{ (kg)}$$

XVII

gerechnet werden.

Die systematischen Abweichungen für Füllen und Entleeren sind in Fig. 12 dargestellt. Die um die Mittelwerte bei +1 bzw. -1 streuenden Meßpunkte beschreiben die zusätzlichen zufälligen Fehler, deren Größe durch die Ableseunsicherheit der digitalen Anzeige mit  $\pm 1$  kg erfaßt wird. Die Genauigkeit (maximale Streubereich) der beiden Tankinhaltsmeßmethoden ist in Fig. 13/14 dargestellt. Danach ist der absolute Fehler  $\Delta G$  bei der Tankinhaltsmessung nach der Lufteinperlmethode mittels Wasser-U-Rohr  $\pm 1,668$  kg bei 800 l Tankfüllung. Der absolute Fehler bei der Tankinhaltsmessung nach der finanziell sehr aufwendigen gravimetrischen Methode mittels elektrischer Druckmeßdosens ist konstant  $\pm 2$  kg, wenn man nicht zwischen Entleeren und Füllen unterscheidet, was in der Praxis schwierig ist.

## 7. Untersuchung der Dampfstrahlpumpe

Zur Förderung der hochaktiven Lösung vom Meßbehälter zum Einspeisbehälter wird in der Regel eine Dampfstrahlpumpe (Prinzip der de Laval-Düse) verwendet. Diese Pumpe saugt über ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 27 mm die Lösung in der Nähe der tiefsten Stelle des Behälters an (siehe Figur 15 und 16).

### 7.1 Betriebsdaten

Die untersuchte Dampfstrahlpumpe der Fa. Wiegand hatte folgende Daten:

Typ:	Größe 2, Klasse A
Maße:	Einbaulänge 190 mm Einbauhöhe 80 mm Anschlüsse NW20
Material:	Gehäuse aus Gußeisen Treibdüse aus Rotguß
Theoretische Förderleistung:	2 m <sup>3</sup> /h Wasser bei einer Saughöhe von 2 m WS
Dampfdruck:	10 atü
Dampfverbrauch:	190 kg/h
Max. Gegendruck:	50 m WS

## 7.2 Betriebsverhalten

Die Abhängigkeit der Förderleistung von der Temperatur der zu fördernden Flüssigkeit ist in Fig. 17 und die Abhängigkeit vom Gegendruck bei verschiedenem Treibdampfdruck in Figur 18 dargestellt.

Für den Fall der Förderung von Wasser mit einer Temperatur von 20°C zeigt Figur 19 die Abhängigkeit der Förderleistung vom Treibdampfdruck bei freiem Ausfluß.

Der Dampfverbrauch wurde aus der Kondensatmenge unter der Annahme einer vollständigen Kondensation bei der Förderung bestimmt.

Figur 20 zeigt den gemessenen Dampfverbrauch bei Förderung von Wasser (20°C) im Bereich des normalen Betriebs-Treibdampfdruckes bei freiem Auslauf.

Zur Bestimmung der Verdünnung, d.h. der Kondensatmenge in der geförderten Flüssigkeit, wurden bei einem Treibdampfdruck von 1,85 atü je 3 Messungen und bei 4,5 atü je 5 Messungen durchgeführt. Der Kondensatanteil in % der tatsächlich geförderten Flüssigkeit als Funktion des Treibdampfdruckes ist in Figur 21 dargestellt.

Die Temperaturerhöhung der geförderten Flüssigkeit in Abhängigkeit vom Treibampfdruck zeigt Figur 22. Die Dampfstrahlpumpe wurde bei allen untersuchten Dampfdrucken mit maximaler Förderleistung gefahren.

### 7.3 Nicht förderbare Restmenge

Das Saugrohrende der Dampfstrahlpumpe hat einen Abstand von 10 mm vom Behälterboden (siehe Figur 16). Sobald während des Leerpumpens der Flüssigkeitsspiegel bis zum Saugrohrende abgesunken ist, saugt die Pumpe Luft und die Förderung bricht zusammen. Die nun im Behälter verbleibende Restflüssigkeitsmenge nach Abschalten der Dampfstrahlpumpe betrug 3,52 l Wasser, das sind ca. 0,44 %, bezogen auf 800 l Gesamtfüllung. Bei einem weiteren Versuch mit einer 25 % Kochsalzlösung ( $\rho = 1,16 \text{ g/cm}^3$ ) betrug die nicht förderbare Restmenge 5,5 l, d.h. ca. 0,69 % auf 800 l bezogen. Die nicht förderbare Restmenge setzt sich zusammen aus der Menge, die bei Zusammenbrechen der Förderung im Behälter zurückbleibt und der Menge, die nach Abstellen der Dampfstrahlpumpe aus dem Saugrohr in den Tank zurückfällt. Letztere betrug im Falle von Wasser ca. 1 l.

## 8. Herstellung repräsentativer Proben

Zur Spaltstoff-Inventarbestimmung einer Ringtankfüllung muß die Dichte der Lösung anhand einiger aus dem Tank gezogener Proben möglichst genau bestimmt werden. Damit diese Proben für die gesamte Behälterfüllung repräsentativ sind, wird der Tankinhalt zuvor durch Einblasen von Luft intensiv durchmischt.

### 8.1 Beschreibung der Mischvorrichtung

In den Rinbehälter taucht im Abstand von wenigen Millimetern vom Behälterboden ein ringförmiges Mischrohr mit einem Innendurchmesser von 17 mm, durch das über eine senkrechte Zuleitung vom Behälterdeckel aus über düsenförmige Bohrungen Mischluft zugeführt wird (siehe Fig. 1).

Das Mischrohr ist parallel zum Behälterboden angeordnet und kann bei unserem Versuchsbehälter in seinem Abstand vom Boden variiert werden. Dieses Mischrohr hat spiralförmig am Umfang jeweils um 30 mm in Rohrachse und um  $120^{\circ}$  zueinander versetzt radiale Bohrungen von 1,5 mm Durchmesser (siehe Einzelheit "A" in Fig. 1). Die aus diesen Bohrungen austretenden Luftblasen reißen beim Hochsteigen Flüssigkeit mit und durchmischen so die Tankfüllung.

## 8.2 Untersuchung des Strömungsbildes

Durch Zugabe von Kunststoffgranulat in dem wassergefüllten Behälter wurde der Verlauf der Mischströmung sichtbar gemacht.

Das verwendete Granulat (Vestyron 719-60, Körnung  $3 \times 3 \times 3$  mm, chemische Werke Hüls) war schwarz und hatte eine Dichte von  $1,05 \text{ g/cm}^3$ . Da dieses Granulat annähernd die gleiche Dichte wie die zu durchmischende Flüssigkeit (Wasser) hatte, konnte eine Verfälschung des Strömungsbildes durch Teilchensedimentation praktisch vermieden werden.

Das Strömungsbild in den verschiedenen Ringtanksektionen, die durch eine cm-Skala von 0 bis 380 am Behälterumfang gekennzeichnet waren, wurde fotografisch festgehalten und seine Abhängigkeit von verschiedenen Mischluftdurchsätzen bestimmt.

Das gesamte Strömungsbild wurde durch zwei verschiedene Lagen des Mischrohres grundsätzlich beeinflusst:

### 1) Mischrohr waagrecht in Bodennähe angeordnet.

Die Flüssigkeit wird längs des ganzen Behälterumfanges an der Behälterinnenwand senkrecht hochgerissen und fällt an der Außenwand wieder herunter. Tote Mischzonen treten nicht auf.

### 2) Mischrohr schräg geneigt, d.h. parallel zum Behälterboden.

Bei dieser Anordnung, wie sie auch für den WAK-Ringbehälter vorgesehen ist, stellte sich der in Fig. 23 schematisch dargestellte Strömungsverlauf ein.

Die Mischluft wird dem Mischrohr an der tiefsten Stelle zugeführt. An der gegenüberliegenden höchsten Stelle des Rohres ist der hydrostatische Druck geringer, so daß hier die meisten Luftblasen austreten, während an der tiefsten Stelle praktisch keine Blasen frei werden, sofern der Luftdurchsatz nicht extrem hoch ist. Die Flüssigkeit wird daher an der höchsten Stelle des Mischrohres von den Luftblasen hochgerissen, fällt auf der gegenüberliegenden Behälterseite wieder herunter und strömt in der Nähe des Bodens zur Seite mit hochliegendem Mischrohr zurück. Figur 24 und 25 zeigen Aufnahmen von der höchsten bzw. tiefsten Stelle des Mischrohres bei konstanten Luftdurchsätzen von 3300 l/h. Von der tiefsten zur höchsten Stelle nimmt die Zahl der aufsteigenden Luftblasen stetig zu. Figur 26 zeigt besonders deutlich an der tiefsten die durch die zum Behälterboden abwärts gerichtete Strömung auf die linke und rechte Behälterseite abgelenkte Luftblasenströmung.

Bei dieser Durchmischung bildet sich nach wenigen Minuten eine gleichmäßige Strömungsverteilung aus, es bilden sich praktisch keine toten Mischzonen.

Auf den Behälterboden abgesunkene Teilchen oder Schlamm werden im Gegensatz zur unter 1) behandelten Strömung durch die Rückströmung in Nähe des Behälterbodens aufgewirbelt und gut durchgemischt. Dieses Verhalten zeigten Versuche mit einem etwas schwereren Granulat (Ultramid B3S, Körnung 2,50x2,5 mm, BASF) der Dichte  $1,12 \text{ g/cm}^3$ . Um dieses Granulat, das bei Luftdurchsätzen von 1500 l/h in Bodennähe von der tiefsten zur höchsten Stelle umläuft (Figur 27) aufzuwirbeln und möglichst gleichmäßig zu verteilen, ist jedoch ein Luftdurchsatz von ca. 12000 l/h nötig. Die Durchmischung an der höchsten Stelle bei einem Luftdurchsatz von 12000 l/h zeigt Figur 28.

### 3.3 Bestimmung der Mischeffektivität

Da bei der Untersuchung des Strömungsbildes keine quantitative Aussage über den Grad der Durchmischung gemacht werden kann, wurde die Mischeffektivität in Abhängigkeit von Mischluftdurchsatz und Mischzeit durch Leitfähigkeits- bzw. Konzentrationsmessungen bestimmt.

Die Leitfähigkeitsänderung bei Zugabe einer bestimmten Kochsalzmenge in den Behälter in Abhängigkeit von der Mischzeit wurde mit Hilfe eines x,y-Schreibers bestimmt.

An drei verschiedenen Stellen im Ringbehälter (siehe Figur 29) wurde mittels einer mit feinmaschigem Drahtgewebe gegen die Luftblasen abgeschirmten Leitfähigkeitselektrode die Leitfähigkeitsänderung gemessen. Während der Durchmischung wurden schrittweise je 1,6 kg Kochsalz, was bei vollem Behälter einer Konzentrationszunahme von je 2 g/l entsprach, am Zulaufrohr eingefüllt. Von dem mit einem Leitfähigkeitsmesser (Fa. Radiometer, Typ CDM2d) gekoppelten x,y-Schreiber (Fa. Moseley, Autograph 2D-2M) wurde bei einer konstanten Mischluftzugabe die Leitfähigkeitsänderung als Funktion der Zeit geschrieben. Mit einem Mischluftdurchsatz von 500 l/h beginnend wurden die Mischkurven ( $\Delta\kappa = f(t)$ ) bei schrittweise um 250 l/h erhöhtem Durchsatz bis zu 3300 l/h aufgenommen. Zwei dieser Mischkurven zeigen die Figuren 30 und 31. Sie wurden an verschiedenen Meßstellen (siehe Fig. 29) bei gleichem Mischluftdurchsatz aufgenommen. Die Mischzeit bis zur Einstellung einer homogenen Lösung ( $\Delta\kappa = 0$ ) betrug ca. 5 Minuten. Die Mischzeit bei einem kleinen Luftdurchsatz von 500 l/h zeigt Figur 32. Die aus diesen Kurven ermittelten Mindest-Mischzeiten, die zur Einstellung einer homogenen Lösung benötigt wurden, wurden in Figur 33 als Funktion des jeweiligen Mischluftdurchsatzes aufgetragen. Der eckige Kurvenzug (dünne Linie) ergab sich aus den übertragenen Mischzeiten. Der Übergang in den horizontalen Kurvenbereich in Fig. 23/24/25 war nicht immer eindeutig zu bestimmen. Die dick ausgezogene Kurve in Fig. 33 stellt die extrapolierten Mischzeiten dar.

Um die Behälterabluftfilter nicht unnötig mit radioaktiven Aerosolen zu belasten, die sich während des Durchmischens bilden, ist es wichtig, für das zu durchmischende Lösungsgemisch diese Mischluftkurve zu kennen.

Die bei einem am Rotameter eingestellten Luftdurchsatz zur Homogenisierung einer Kochsalzlösung benötigte absolute Luftmenge ist in Figur 34 aufgetragen.

Die extrapolierte Kurve in Fig. 33 wurde zusätzlich wie folgt auf ihre Genauigkeit geprüft:

Während der Durchmischung wurden 1,6 kg NaCl in den vollen Behälter eingefüllt. Die Werte für Mischzeit und Rührluft wurden entsprechend Fig. 33 eingestellt. Nach Beendigung des Mischvorganges wurden dem Behälter bei 9 verschiedenen Luftdurchsätzen je drei Proben an den in Fig. 29 markierten Stellen entnommen. Danach wurden bei konstanter Temperatur je 10 ml (abgefüllt in einem Pyknometer) dieser Proben auf einer Analysenwaage abgewogen.

Als Maß für die Homogenität der Lösung wird die relative Standardabweichung der Probengewichte angesehen. Die größte Standardabweichung aus 3 Proben wurde bei einem Luftdurchsatz  $Q_L = 2250$  l/h errechnet, sie betrug 0,035 %, bei der Eurochemic liegt dieser Wert bei 0,2 %<sup>2)</sup>. Die relative Standardabweichung aller 27 gewogenen Proben betrug sogar nur 0,015 %.

## 9. Zusammenfassung

Zweck der durchgeführten Untersuchung war, die für eine gegebene Behälterkonstruktion wichtigen Eich- und Betriebswerte zu ermitteln. Eine optimale Auslegung einzelner Behälterkomponenten wie beispielsweise der Mischvorrichtung war nicht vorgesehen. Die Kalibrierung des Ringbehälters liefert eine sehr genaue Kalibriergleichung, in der die Behälterfüllung  $G_0$ , bei der die Messung mit den Einperlrohren beginnt, enthalten ist.

$G_0 = 9,668 \pm 0,023$  kg ( $H_2O$ ). Bei der Kalibrierung mittels Steigrohr kann auf 1/10 mm, d.h. auf 52 g  $H_2O$  genau abgelesen werden. Der gesamte Fehler der Kalibrierkurve beträgt

$\Delta G = \pm (h_{St} \cdot 0,000263 + 0,076)$  (kg) für  $h_{St}$  in mm WS, d.h. bei vollem Behälter (800 l  $H_2O$ ) ist  $\Delta G = \pm 0,42$  kg. Der Wert von  $G_0$  liegt bei der Eurochemic<sup>3)</sup> bei ca. 1,2 kg bei einer Steigung des Behälterbodens von 15 %, der WAK-Behälter hat 3,3 %.

Bei der Behälterinhaltsmessung mittels Einperlrohr über Differenzdruckmessung an einem mit Tetrabromäthan ( $\rho \sim 2,96$  g/cm<sup>3</sup>) gefüllten U-Rohr tritt ein Fehler von  $\Delta G = \pm (h_u \cdot 0,003326 + 0,338)$  (kg) auf, d.h. bei 800 l Wasserfüllung  $\pm 2,01$  kg (0,25 %). Der entsprechende Fehler bei mit Wasser gefülltem U-Rohr beträgt  $\pm 1,67$  kg bei vollem Tank.

Zum Vergleich beträgt der entsprechende Fehler beim Eurochemic-Eingangsmeßtank<sup>3)</sup> zwischen 0,7 bis 1 %.

Der Fehler bei der Gewichtsmessung mittels elektronischer Kraftmeßanlage liegt konstant bei  $\Delta G = \pm 2$  kg, wenn man zwischen

Füllen und Entleeren nicht unterscheidet. Der Vergleich zwischen der Volumenbestimmung nach der Lufteinperlmethode und der gravimetrischen Methode zeigt, daß die Lufteinperlmethode bei geringerem meßtechnischem Aufwand genau so gute (TBÄ) oder bessere Werte ( $H_2O$ -Manometer) als die erheblich aufwendigere gravimetrische Methode liefert. Es muß außerdem berücksichtigt werden, daß sich die Meßgenauigkeit der gravimetrischen Methode bei einem in der Praxis fest verrohrten Tank noch verschlechtern wird.

Die durch die Dampfstrahlpumpe nicht förderbare Restmenge im Tank muß bei der Bilanzierung berücksichtigt werden. Sie wurde bei einer 25 %-igen Kochsalzlösung ( $\rho = 1,16$  g/cm<sup>3</sup>) zu ca. 5,5 l bestimmt, d.h. 0,7 % der Gesamtmenge eines vollen Behälters. Die zur Homogenisierung der Lösung verwendete Ringrohrkonstruktion erwies sich als sehr günstig. Nach einer Mischzeit von ca. 5 Min. bei einem mittleren Mischluftdurchsatz von 2000 l/h wurde eine homogene Durchmischung erreicht. Um die Belastung der Behälterabluftfilter mit radioaktiven Aerosolen möglichst gering zu halten, wurden die Mindest-Mischluftmengen bestimmt.

## 10. Literaturverzeichnis

- 1) Analysis für Ingenieur-und Fachschulen , Hrsg. Prof.K. Bögel
- 2) W. Frenzel, W. Heinz, H. Moeken, Neue Technik B1/1969, S. 28
- 3) F. Franssen, W. Frenzel, ETR-Report-236 (Febr. 1969)

11. Abbildungen

Fig. 1 Ringbehälter 800 l

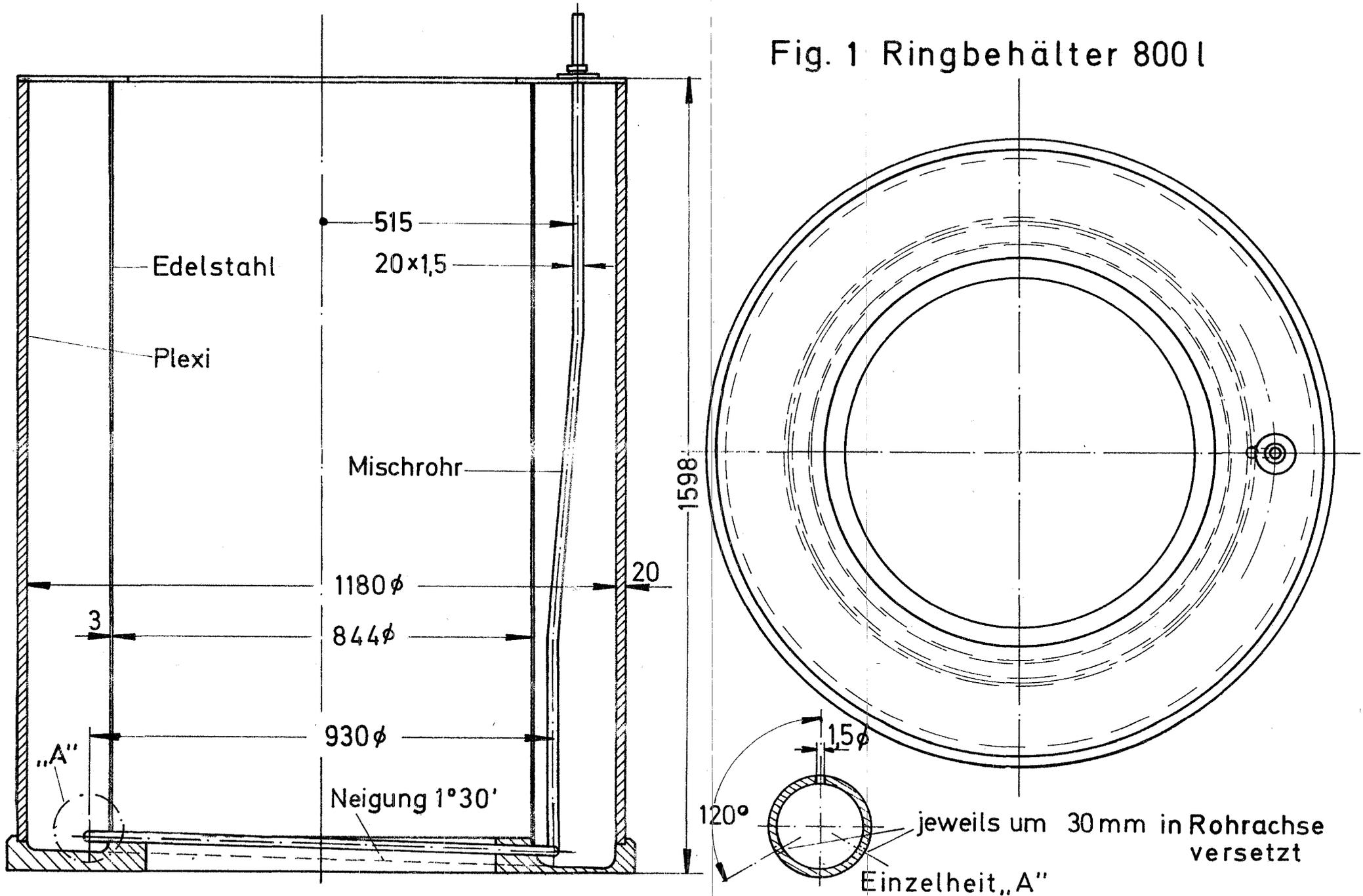
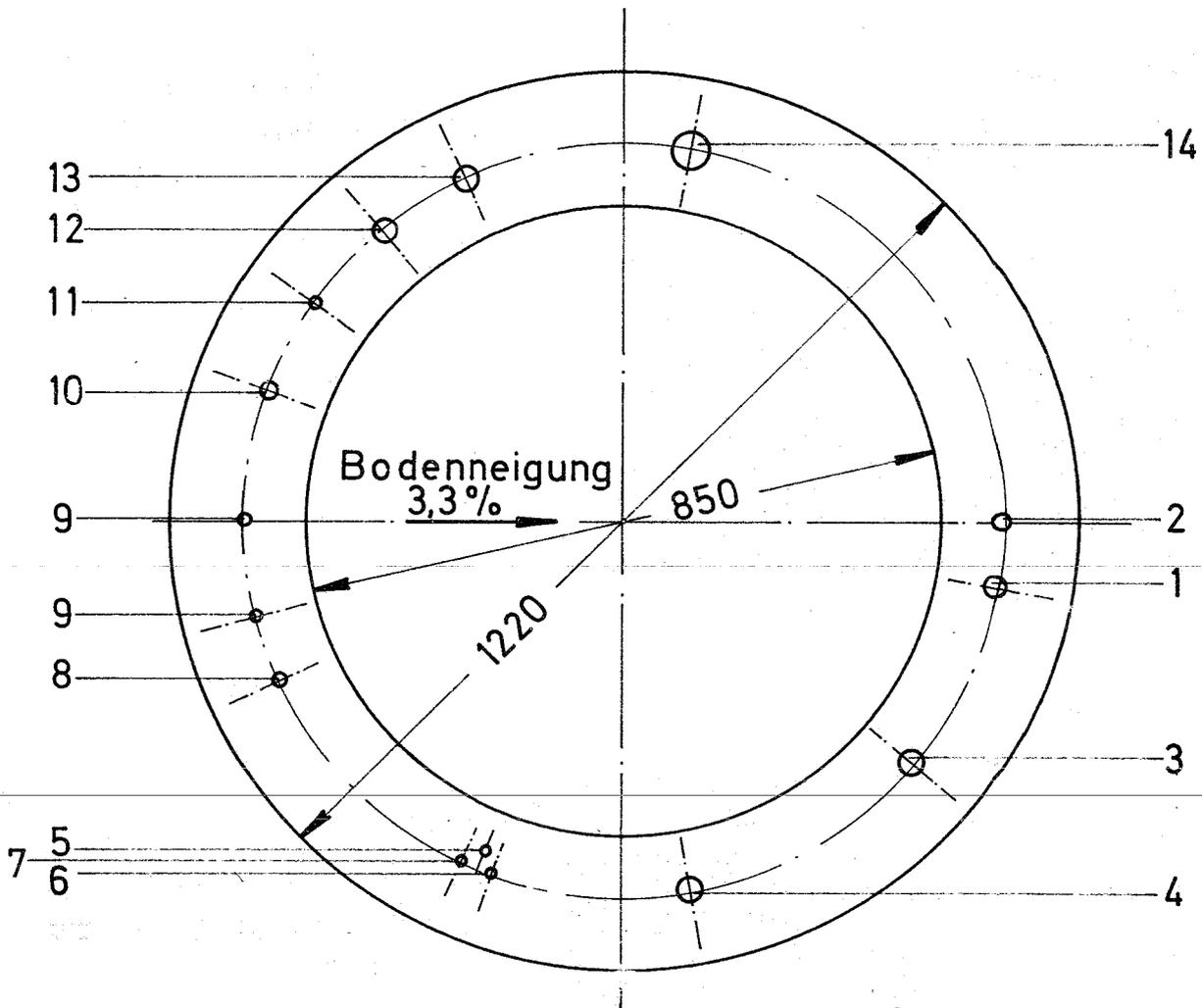
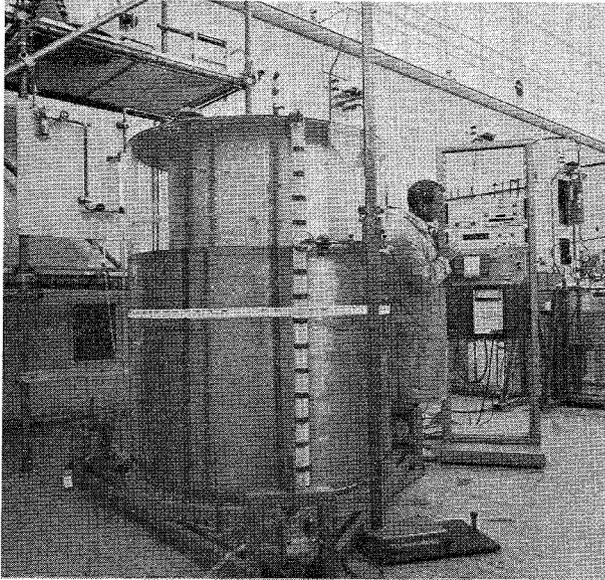


Fig. 2 Verrohrung des 800l-Ringtanks (Pleximodell)

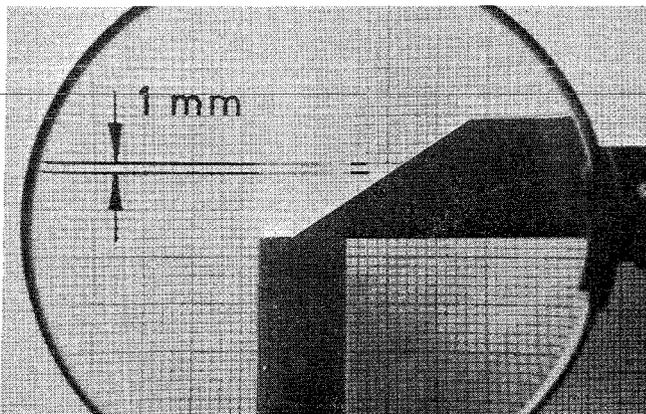


Pos.	1	Überlaufstutzen	NW 25 x 100
"	2	Rührluft	20 $\phi$ x 1 x 1523
"	3	Dampf-Jet	30 $\phi$ x 1,5 x 1613
"	4	Probenahme	30 $\phi$ x 1,5 x 1610
"	5	Niveau -	10 $\phi$ x 1 x 1293
"	6	und	10 $\phi$ x 1 x 1553
"	7	Dichtemessung	10 $\phi$ x 1 x 150
"	8	Probenahme	14 $\phi$ x 1,5 x 1550
"	9	Reserve	12 $\phi$ x 1 x 100
"	10	Temperaturmessung	20 $\phi$ x 1 x 1550
"	11	Reserve	12 $\phi$ x 1 x 1543
"	12	Reserve	30 $\phi$ x 1,5 x 1583
"	13	Entlüftung	30 $\phi$ x 1,5 x 100
"	14	Zulauf	50 $\phi$ x 1,5 x 100



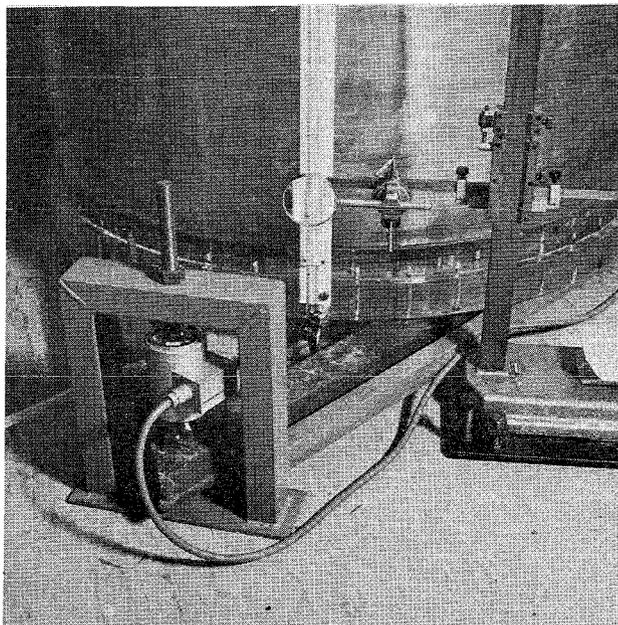
Figur 3

Versuchsstand des  
800 l Ringbehälters



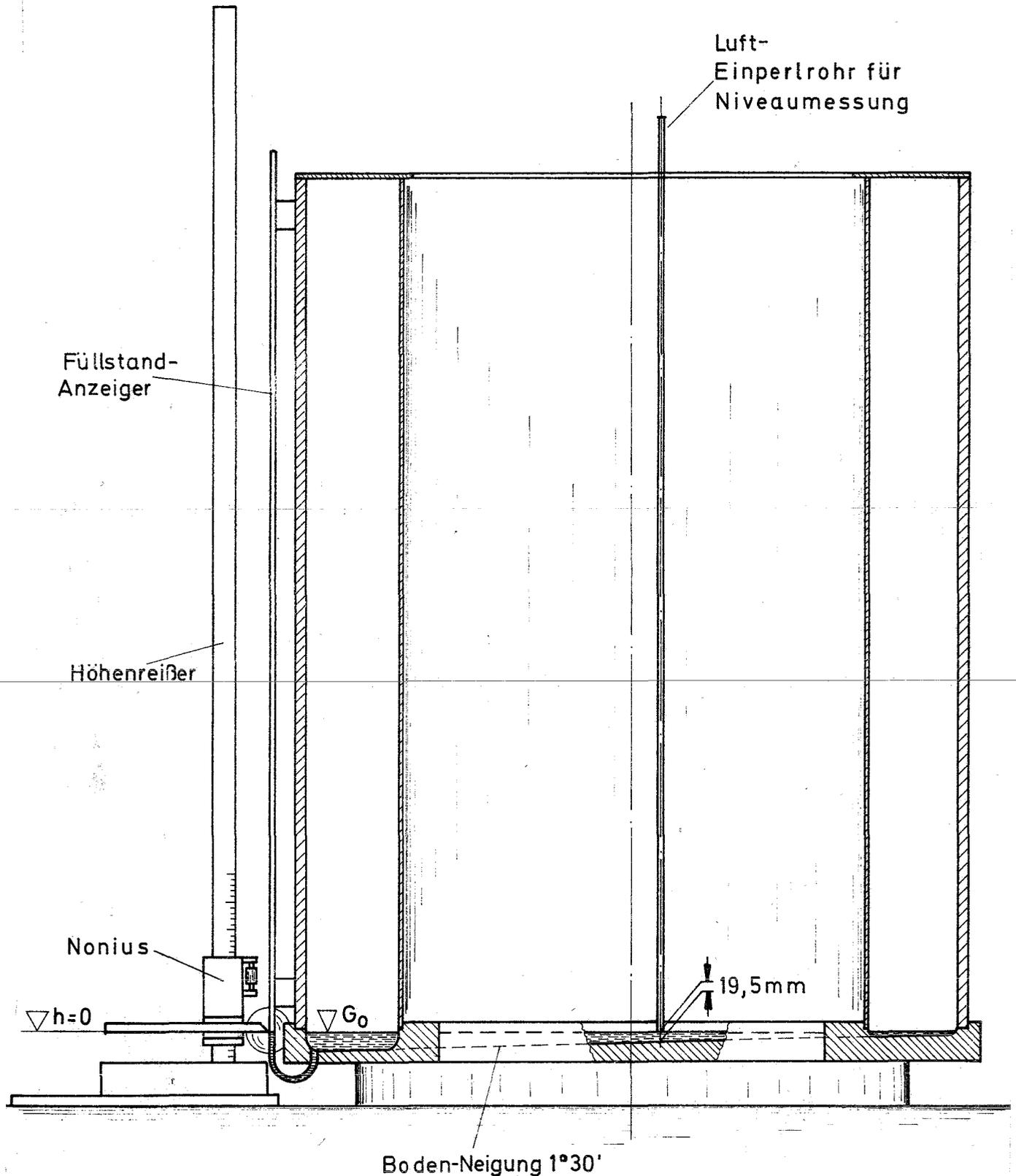
Figur 5

Ablesung des Füll-  
standes am Steigrohr  
bzw. U-Rohr



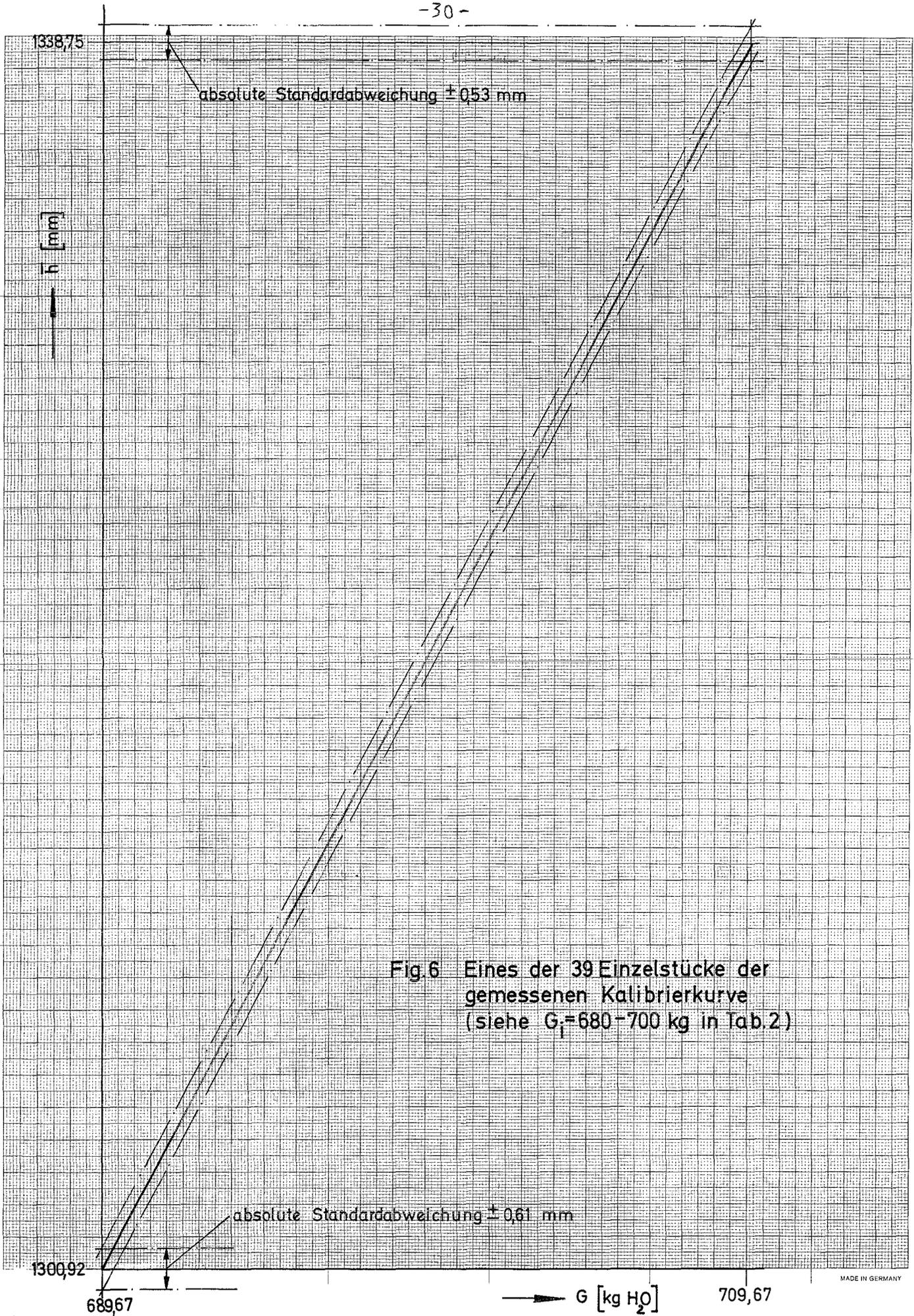
Figur 10

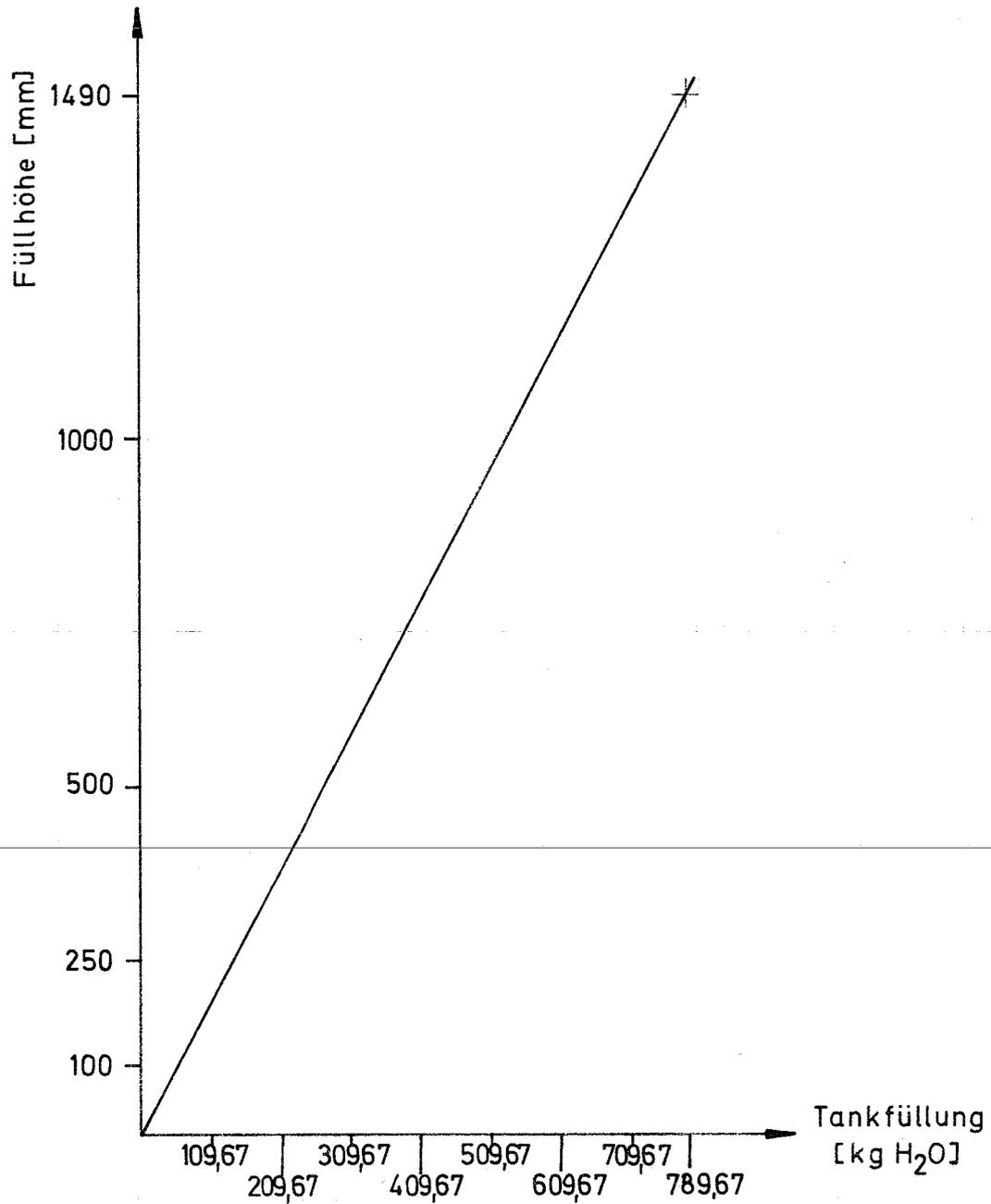
Aufhängung der Kraft-  
meßdosen



Füllgewicht  $G_0 = (9\,668 \pm 23,47)$  g dest. Wasser,  $22^\circ\text{C}$   
 $h=0$  Beginn der Kalibrierkurve

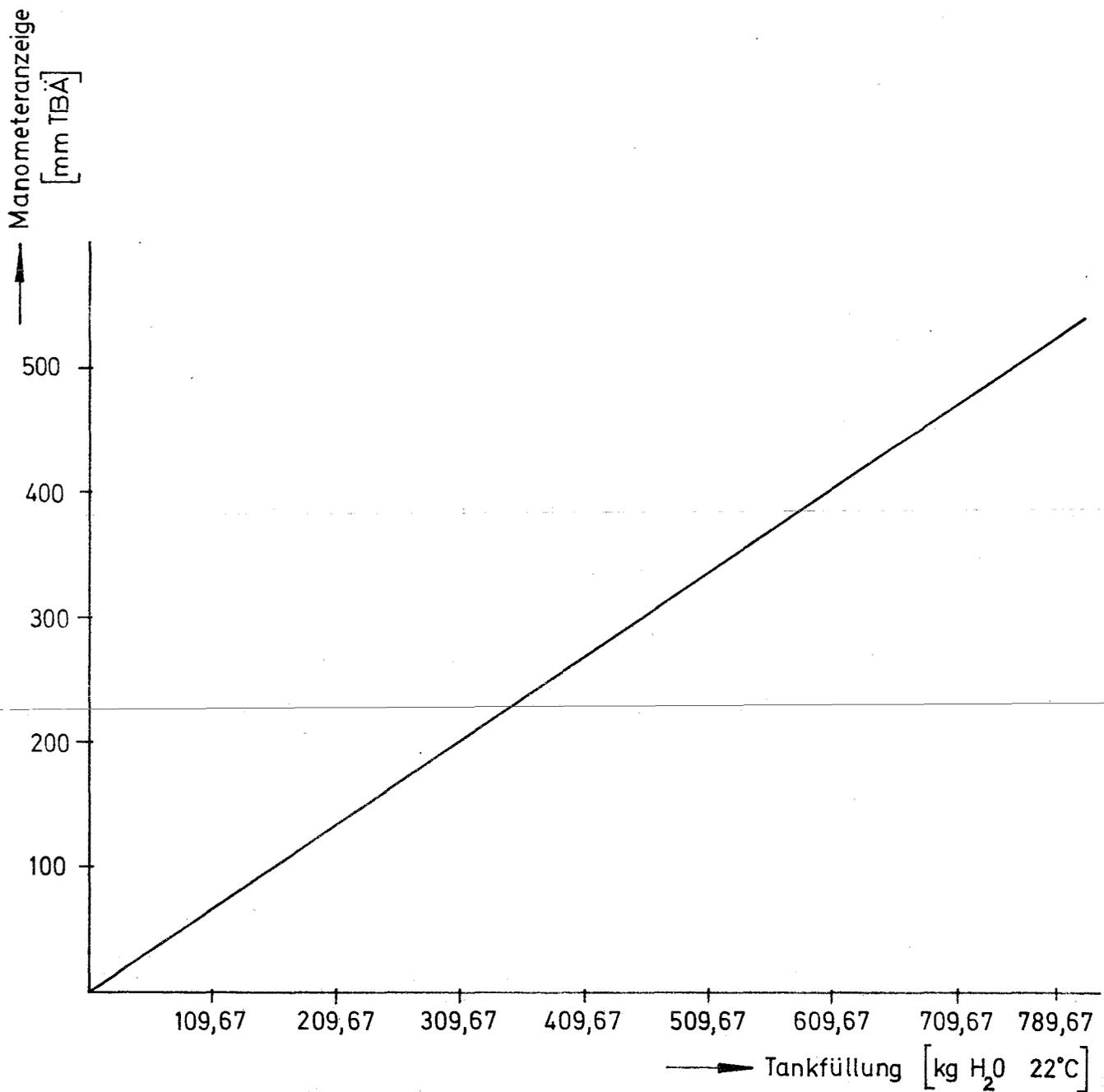
Fig.4 Meßanordnung bei der Tankkalibrierung





$$h = 1,911581 \cdot 0,999 (G - 9,668) \pm (G \cdot 0,000960 + 0,05) \text{ [mm H}_2\text{O]}$$
$$G \text{ [kg H}_2\text{O bei 22}^\circ\text{C]}$$

Fig.7 Kalibrierkurve für den 800l - Ringtank, ermittelt am Füllstands-Anzeiger



$$h = \left[ 0,644803 \cdot 0,9999 (G - 9,668) + 1,35 \right] \pm \left[ G \cdot 0,001382 + 0,11 \right] \text{ [mm TBÄ]}$$

$G$  [kg H<sub>2</sub>O bei 22° C]

Fig.8 Kalibrierkurve für den 800l Ringtank, ermittelt durch ein U-Rohr-Manometer, gefüllt mit Tetrabromäthan.

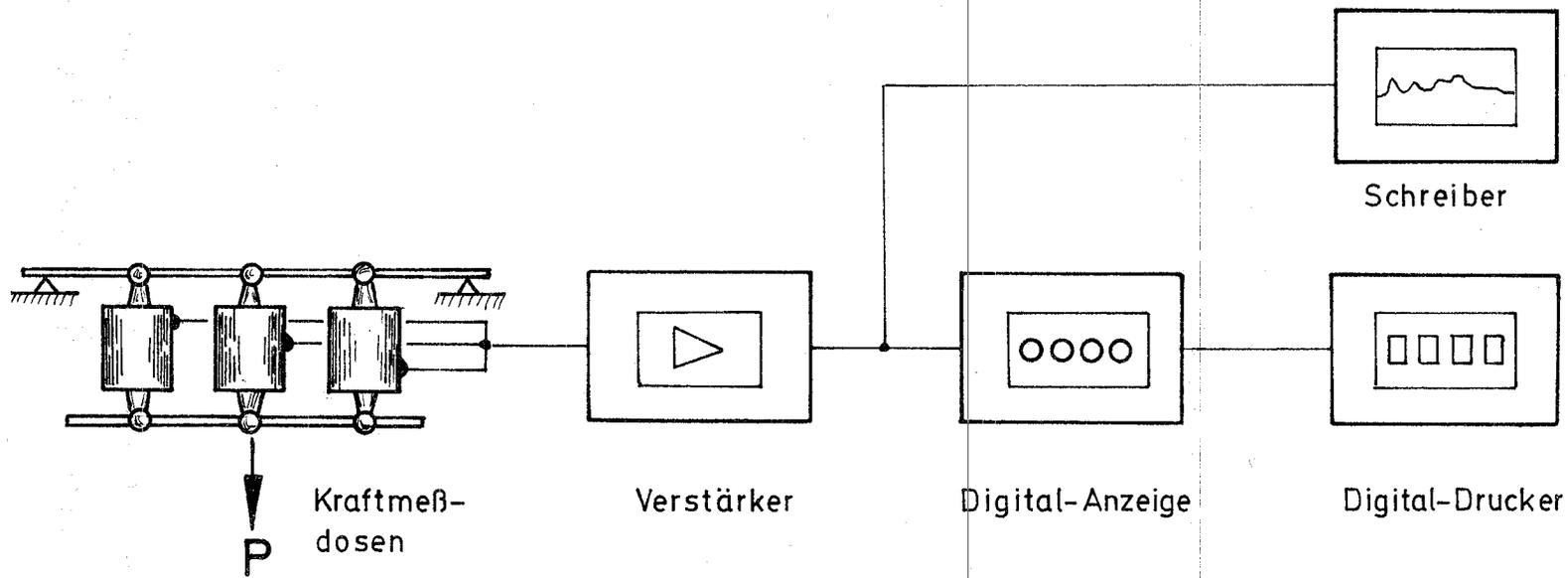


Fig. 9 Blockschaltbild der Kraftmeßanlage

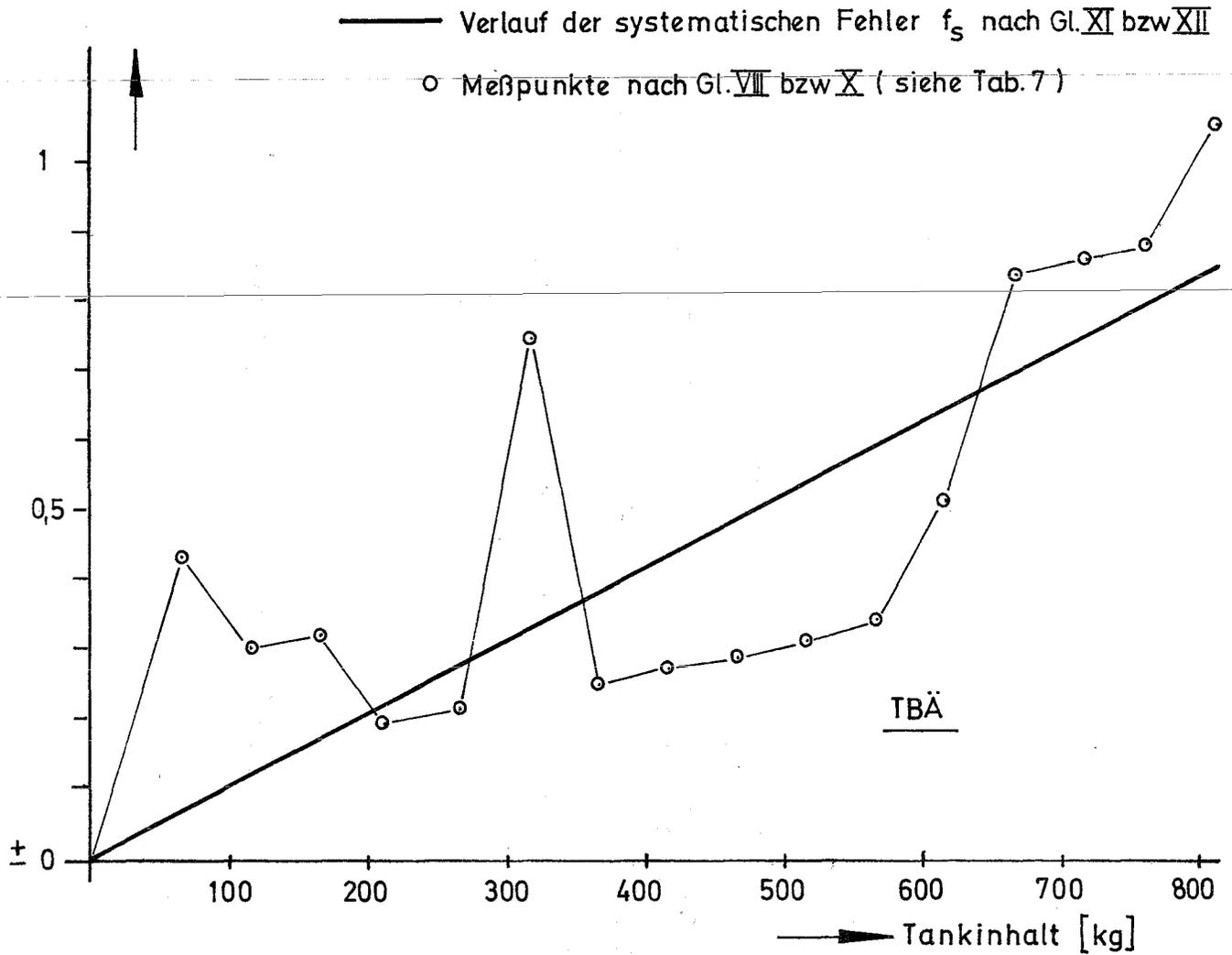
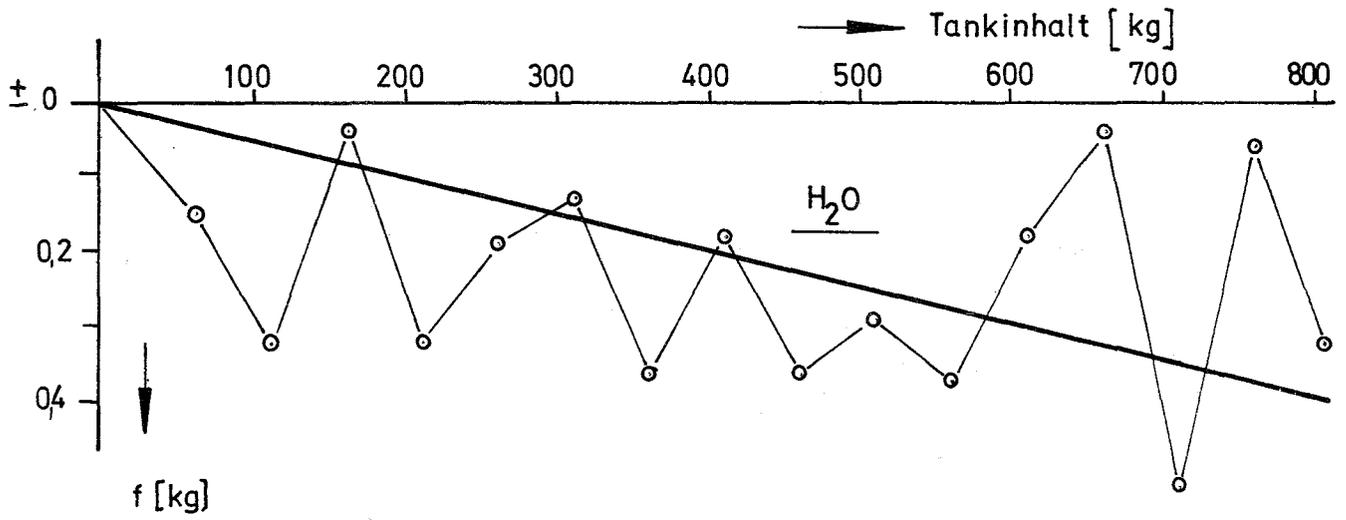


Fig.11 Verlauf der systematischen Fehler der U-Rohr-Kalibrierungen, bezogen auf die Steigrohrkalibrierung

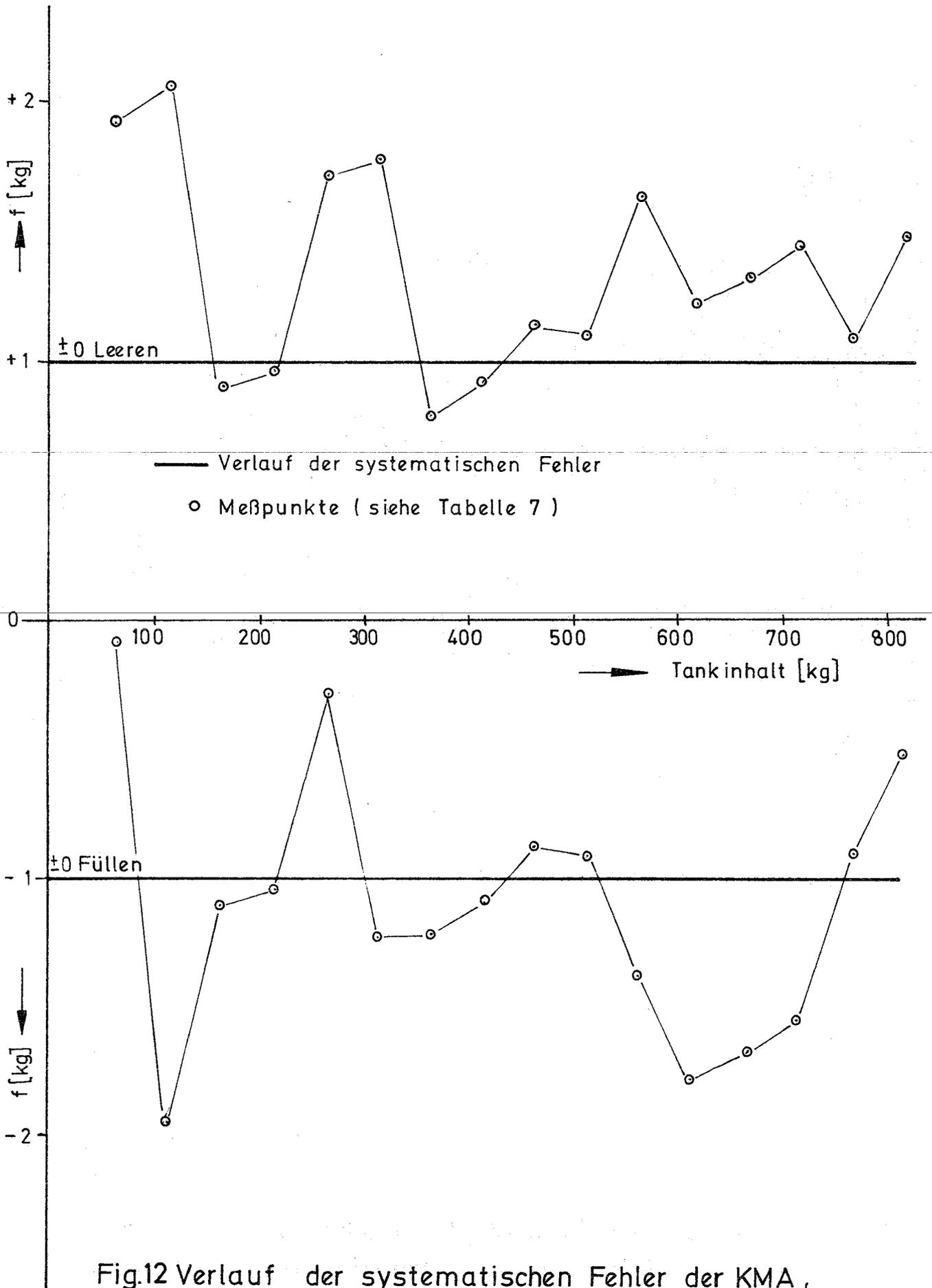


Fig.12 Verlauf der systematischen Fehler der KMA, bezogen auf die Steigrohrkalibrierung

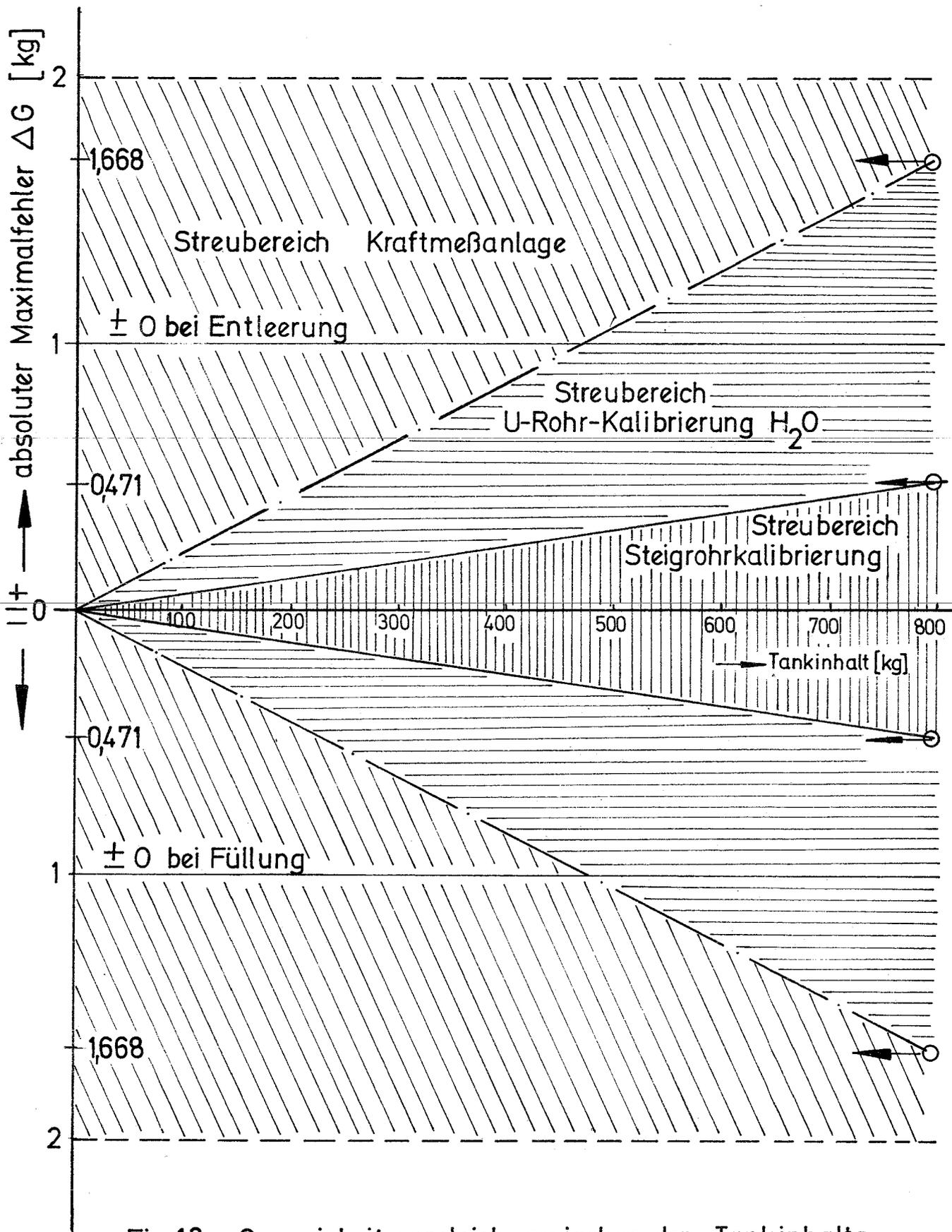


Fig. 13 Genauigkeitsvergleich zwischen den Tankinhaltsmeßmethoden: U-Rohr- $H_2O$  (nach Gleichung XIII) Kraftmeßanlage

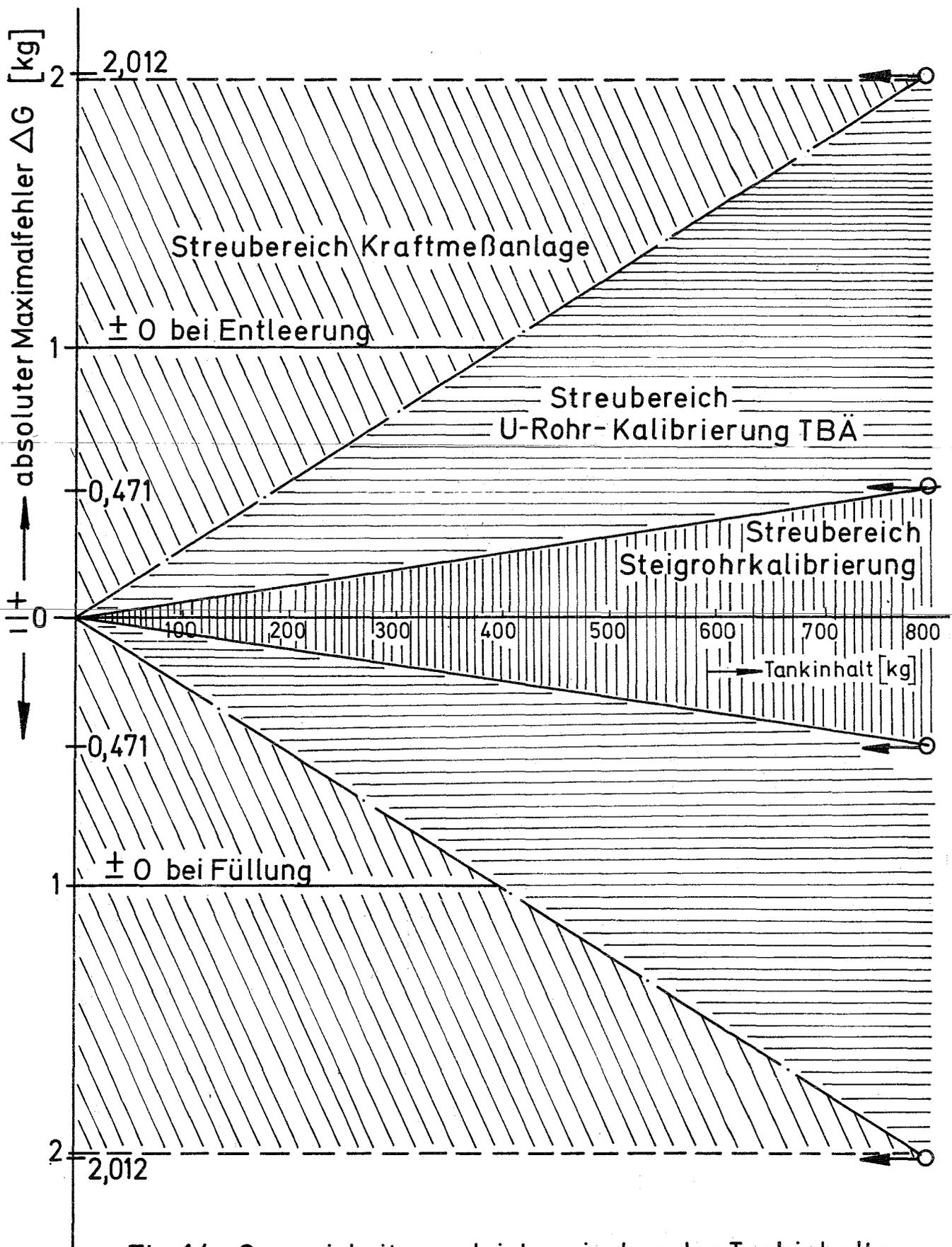


Fig. 14 Genauigkeitsvergleich zwischen den Tankinhaltsmeßmethoden: U-Rohr-TBÄ (nach Gleichung  $\bar{X}$ ) Kraftmeßanlage

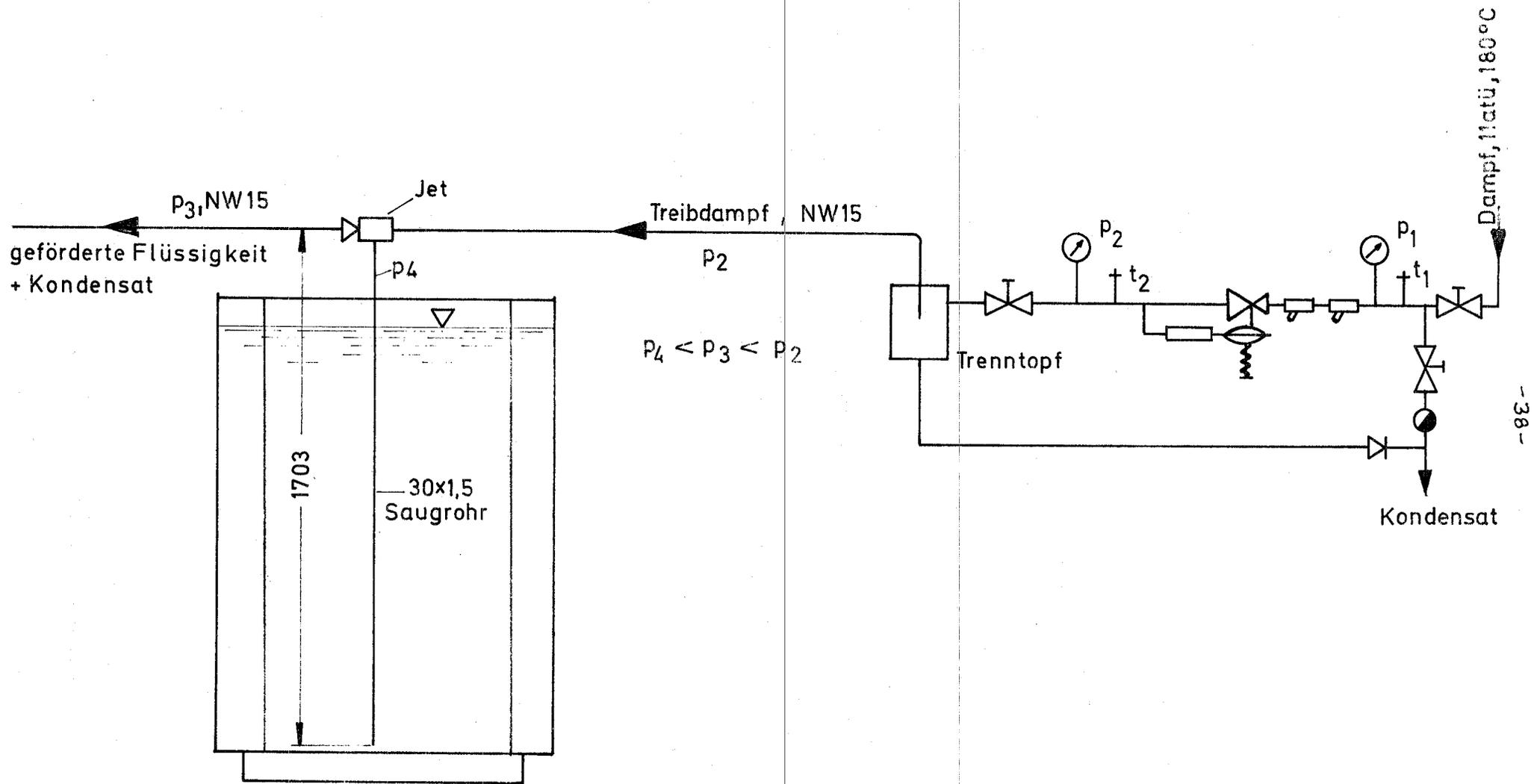
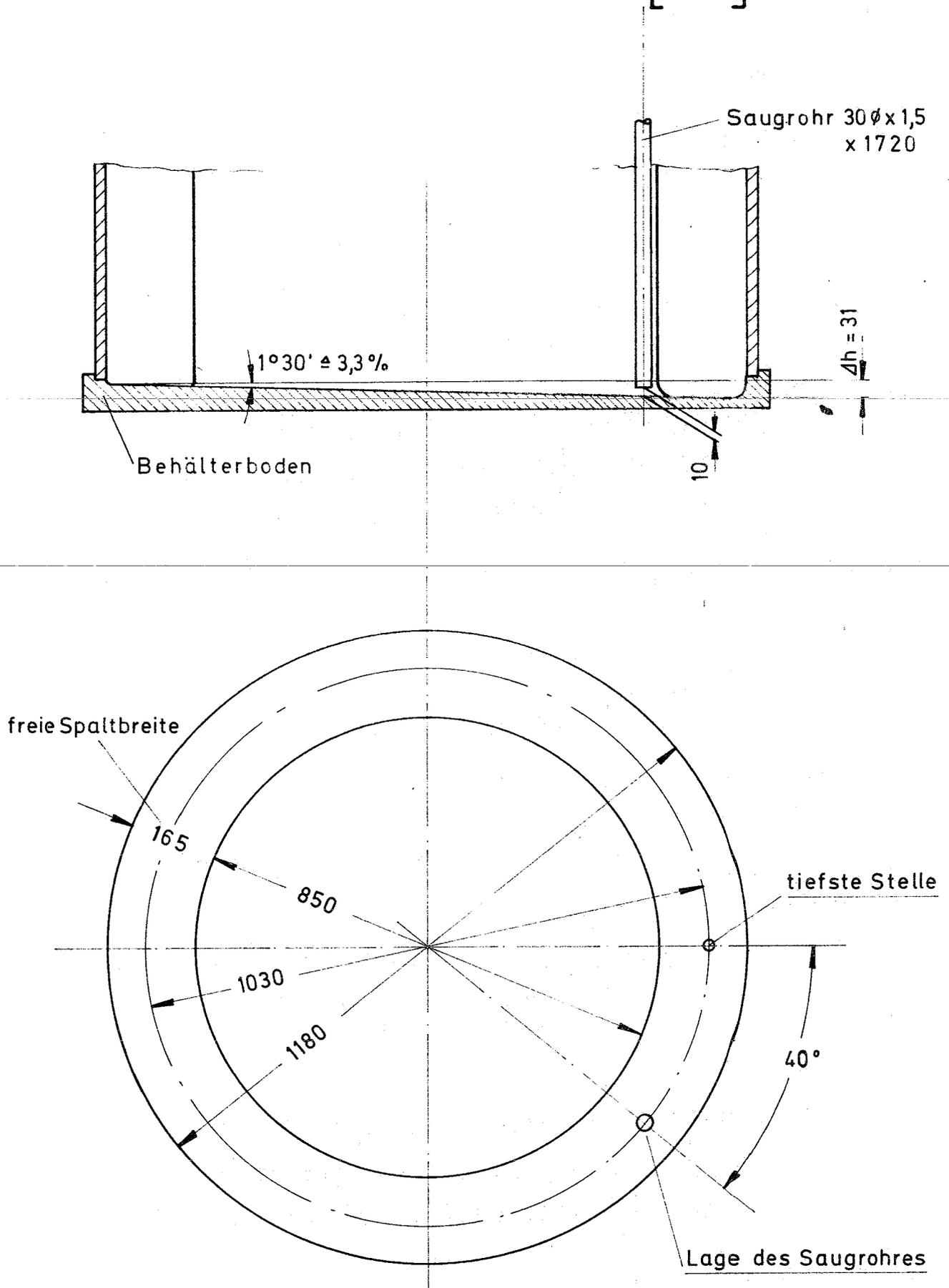


Fig.15 Meßanordnung bei Versuch mit Dampf - Jet

Fig.16 Abmessungen und Lage des Saugrohres im Ringbehälter [mm]



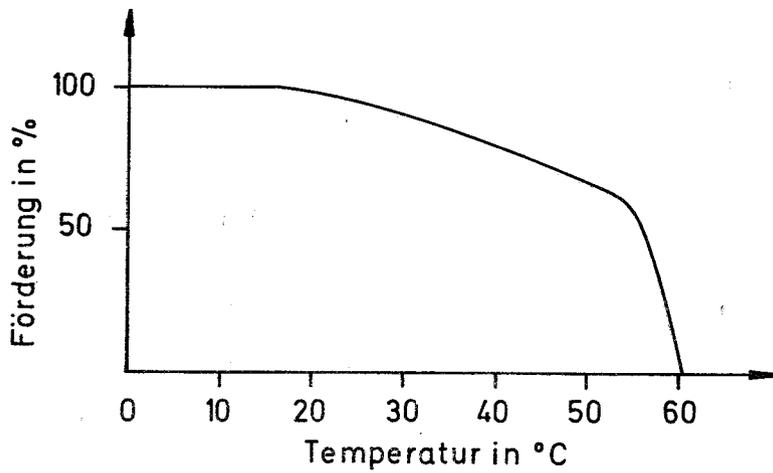


Fig.17 Förderleistung Dampf-Jet in Abhängigkeit von der Temperatur der zu fördernden Flüssigkeit

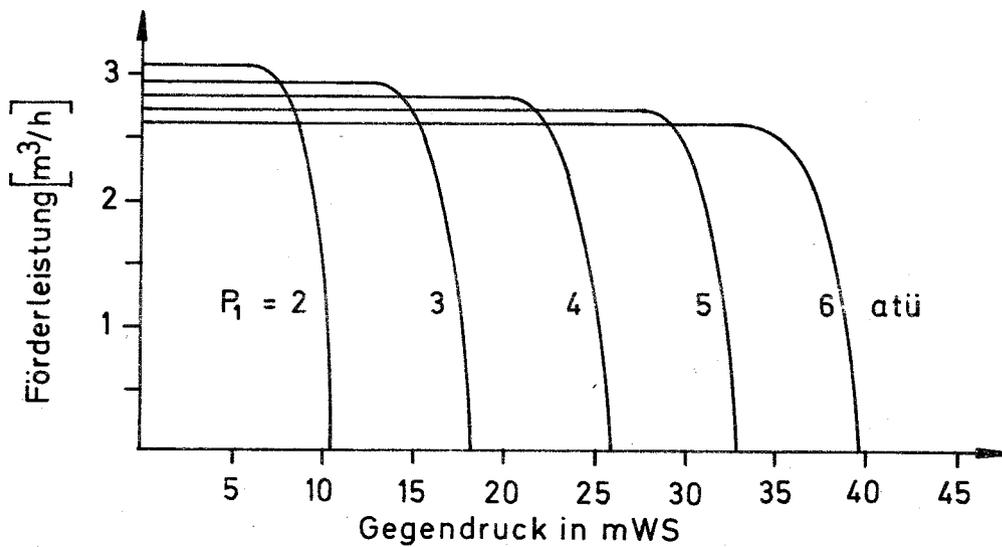


Fig.18 Förderleistung Dampf-Jet in Abhängigkeit vom Gegendruck bei verschiedenen Dampfdrücken

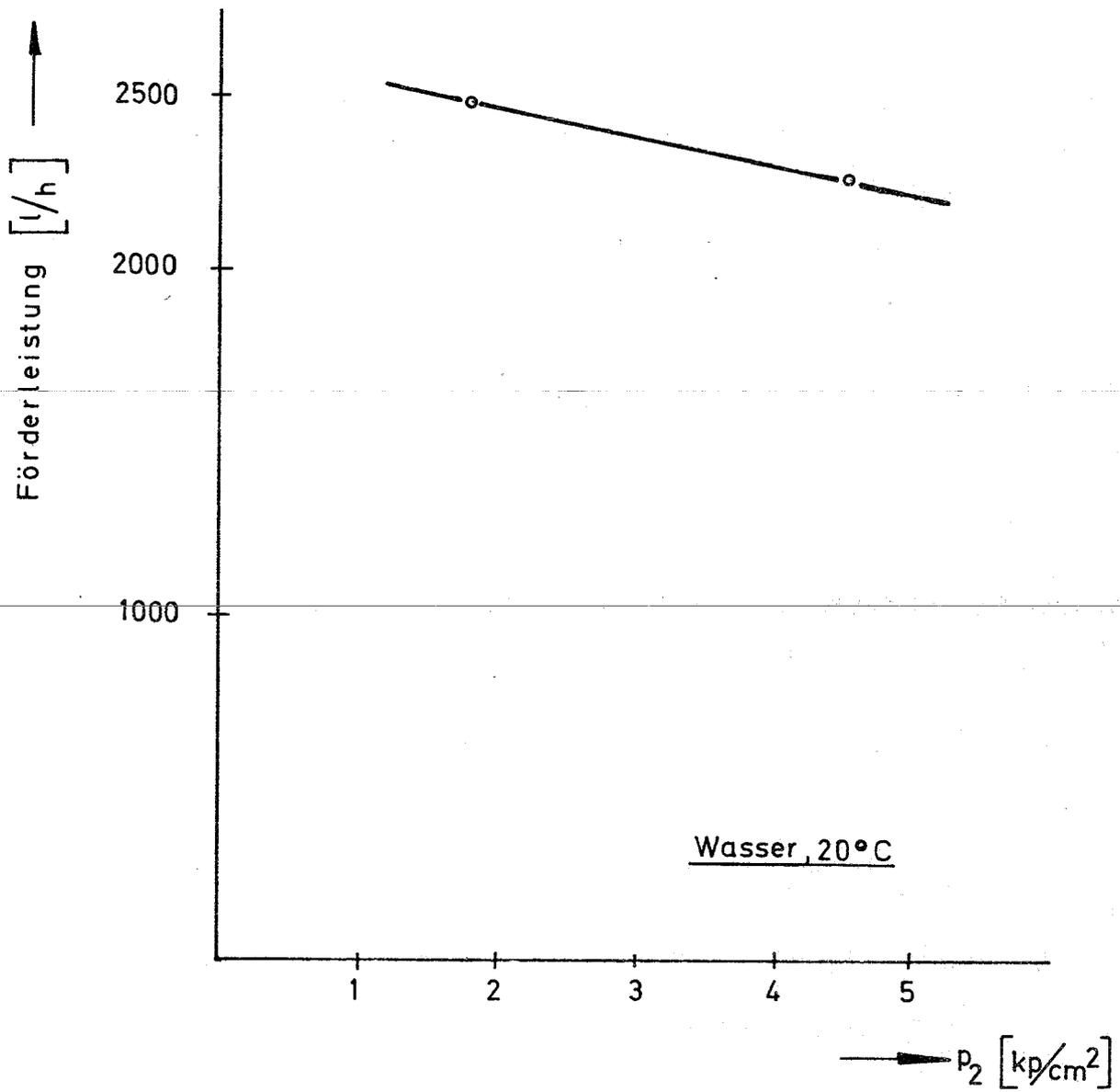


Fig.19 Förderleistung des Dampf-Jet in Abhängigkeit vom Speisedampfdruck bei freiem Ausfluss

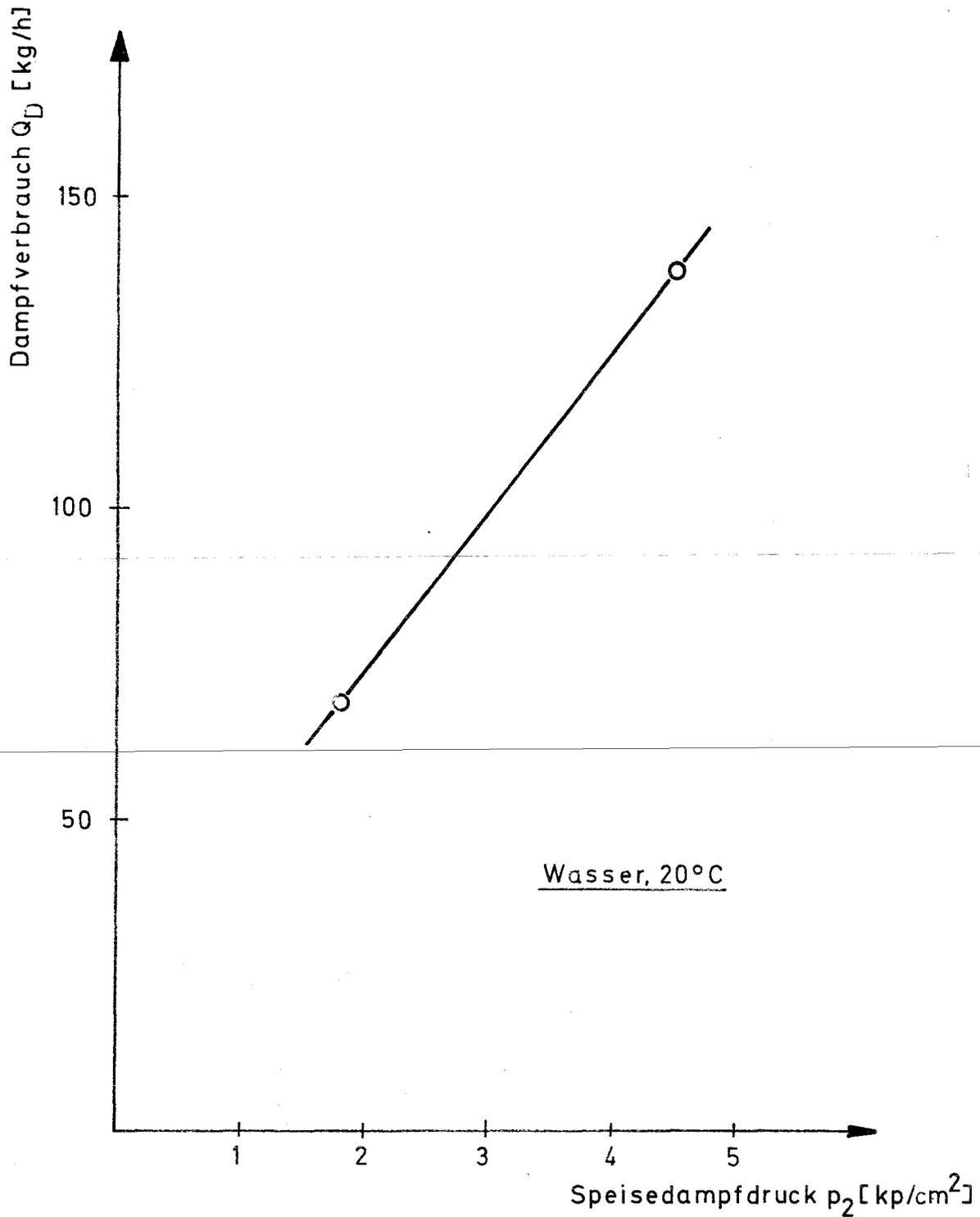


Fig.20 Dampfverbrauch des Dampf-Jet in Abhängigkeit vom Speisedampfdruck bei freiem Auslauf

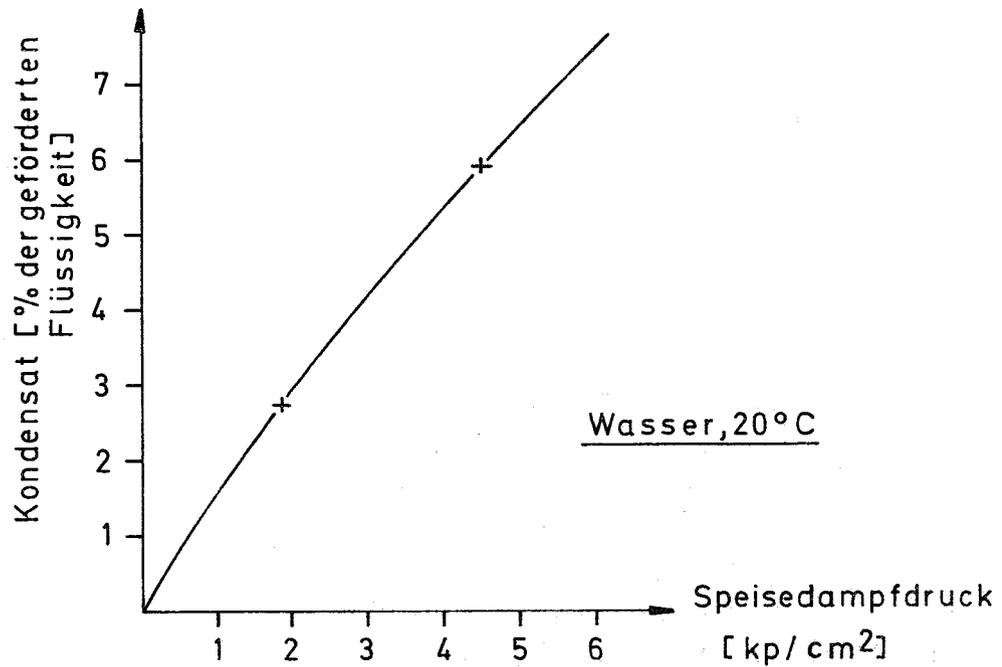


Fig.21 Kondensat in Abhängigkeit vom Speisedampfdruck

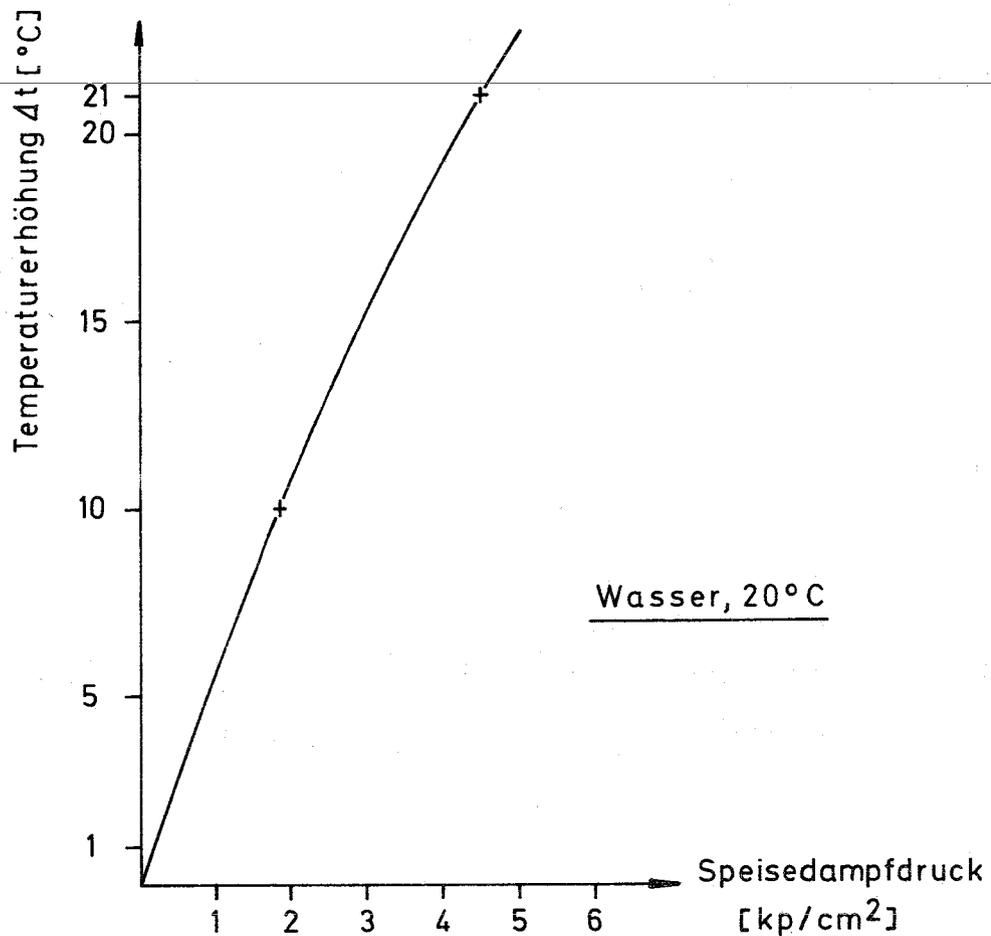


Fig.22 Temperaturerhöhung der geförderten Flüssigkeit in Abhängigkeit vom Speisedampfdruck

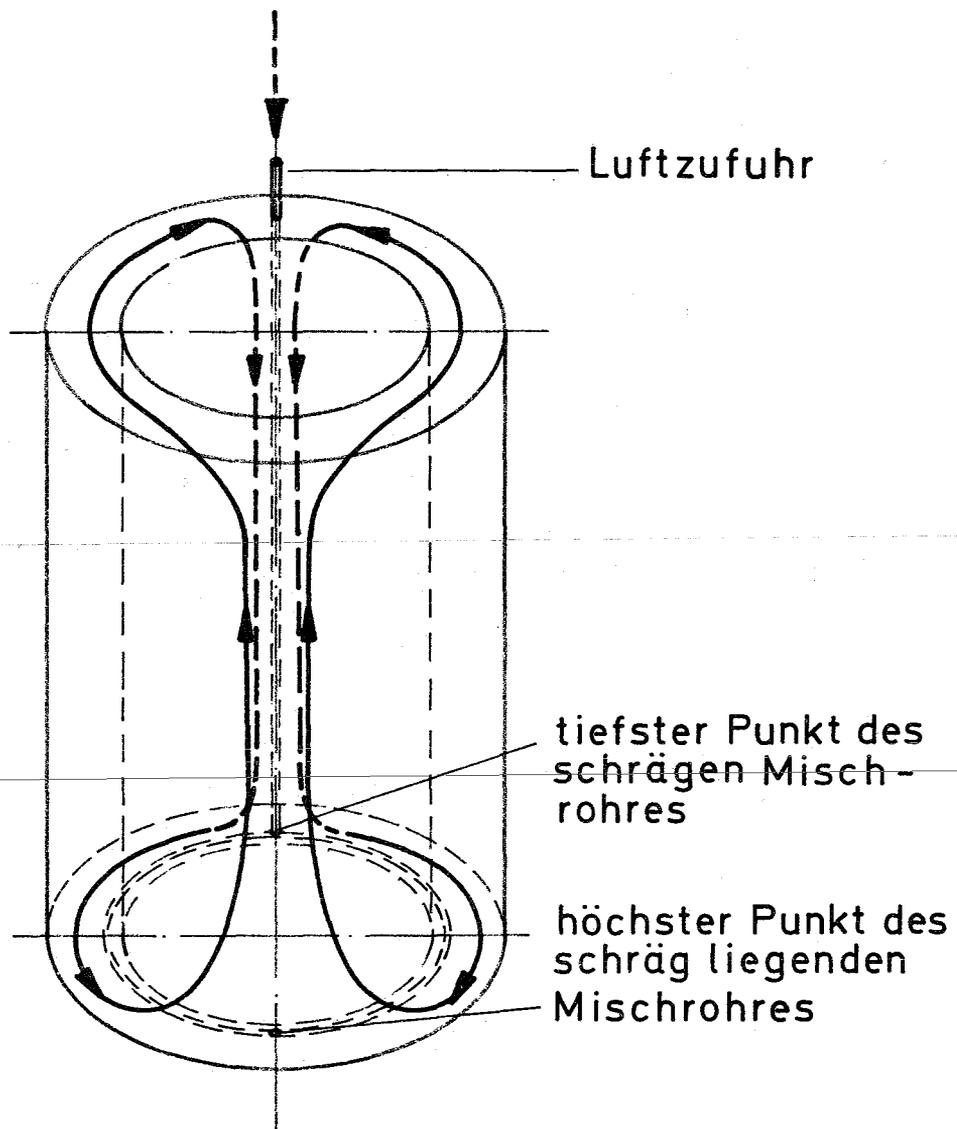
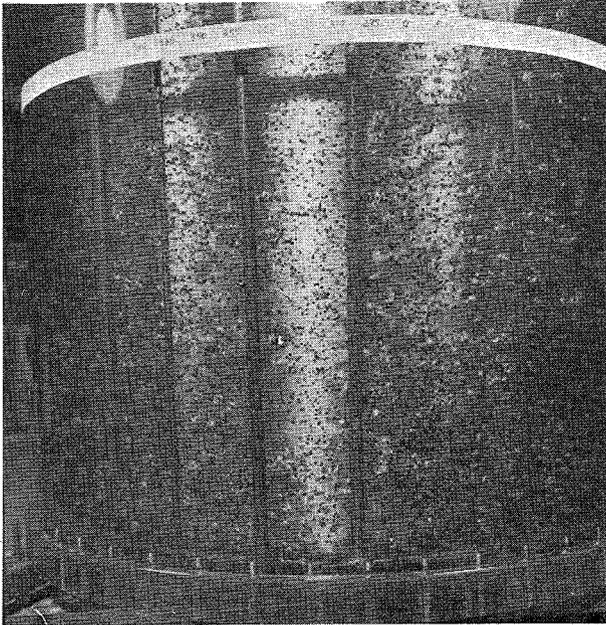


Fig.23 Strömungsbild im 800l Ringbehälter bei Schräglage des Mischrohres

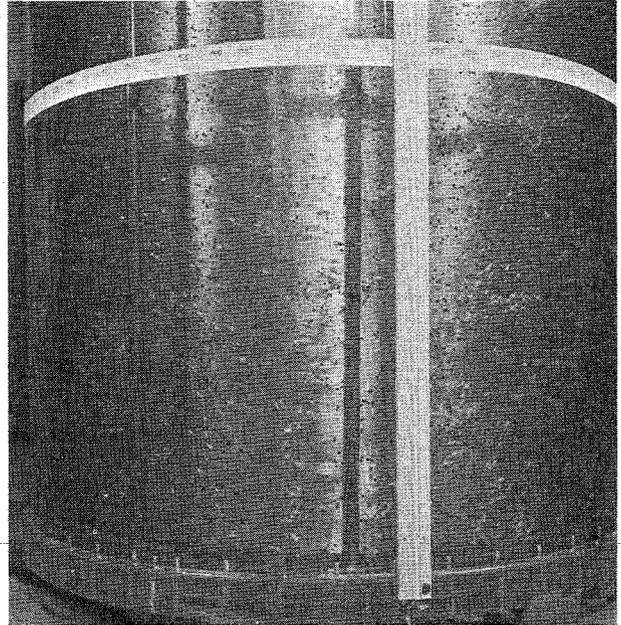


Figur 24

Höchste Stelle

Luftdurchsatz 3300 l/h

Granulat  $\rho = 1,05$

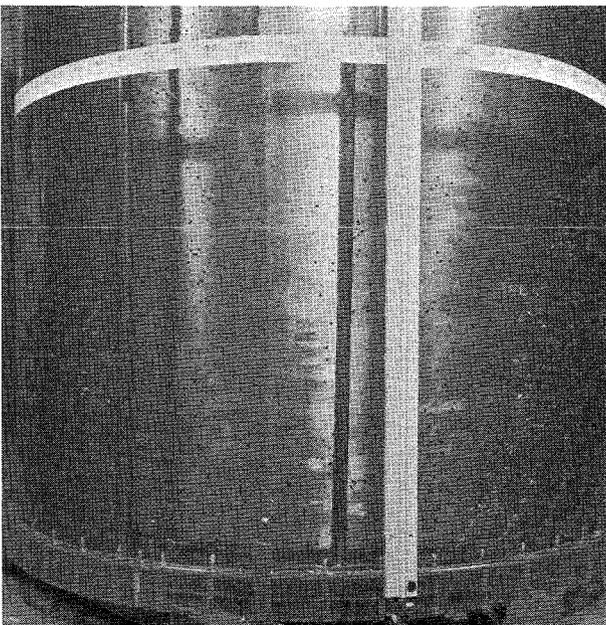


Figur 25

Tiefste Stelle

Luftdurchsatz 3300 l/h

Granulat  $\rho = 1,05$

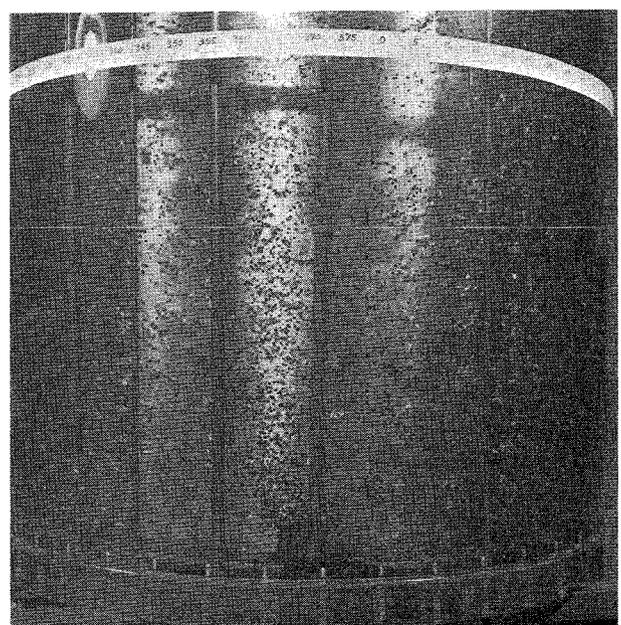


Figur 26

Tiefste Stelle

Luftdurchsatz 1500 l/h

Granulat  $\rho = 1,05$

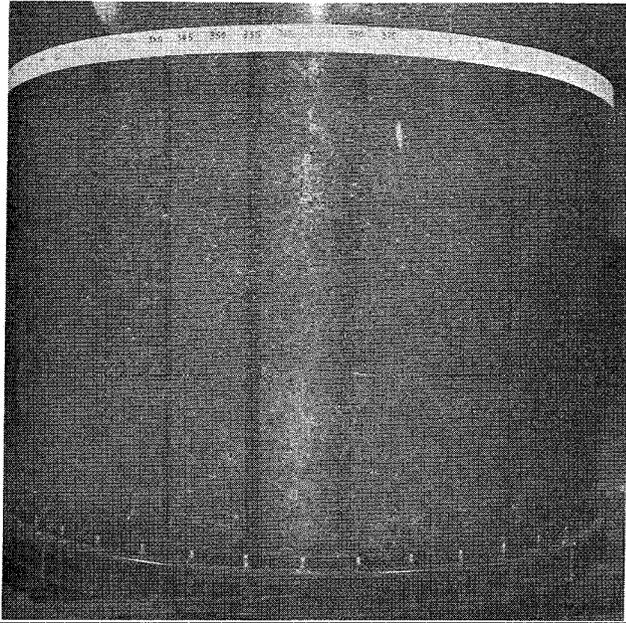


Figur 27

Höchste Stelle

Luftdurchsatz 1500 l/h

Granulat  $\rho = 1,05$

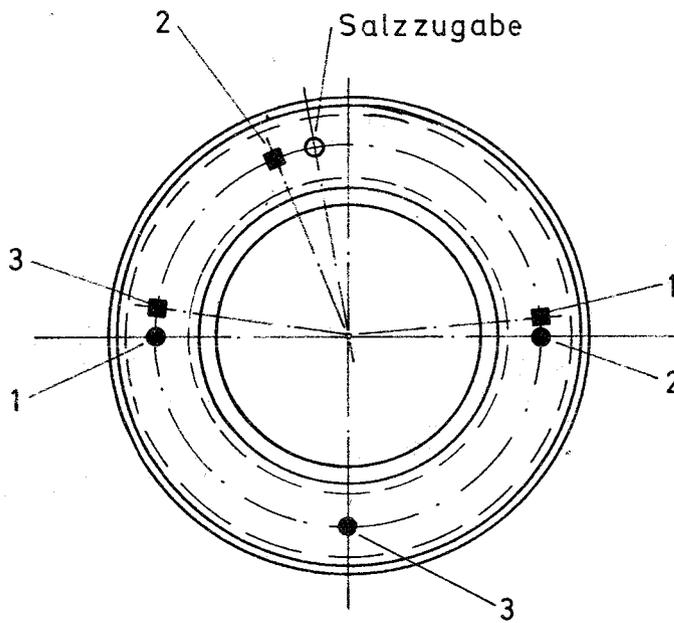
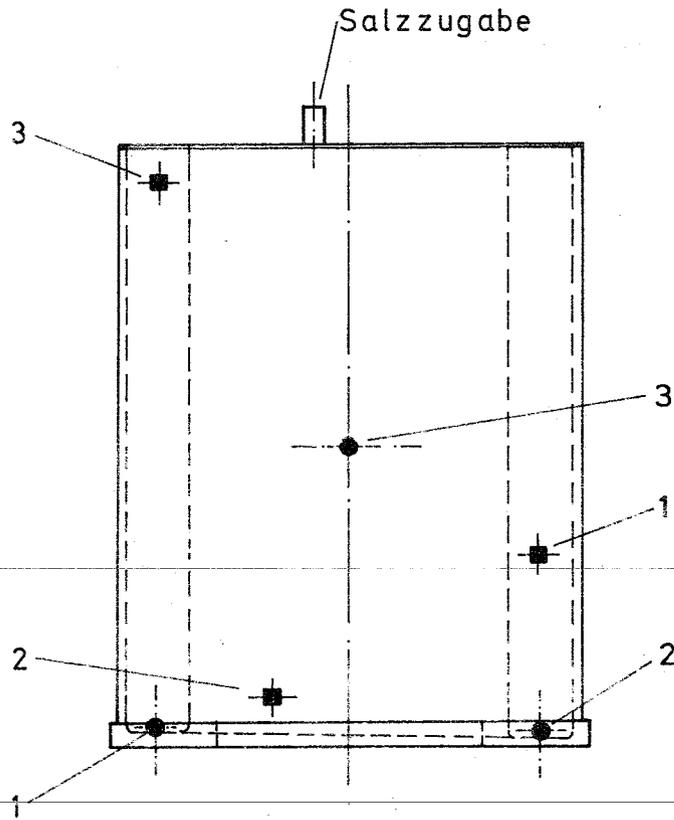


Figur 28

Höchste Stelle

Luftdurchsatz 12000 l/h

Granulat = 1,12



- Meßstellen für Leitfähigkeitsmessungen
- Probenahmestellen für Genauigkeitsbetrachtungen

Fig.29 Meß - und Probenahmestellen  
am 800 l-Ringbehälter

Fig.30 Bestimmung der Mindestmischzeit (I)

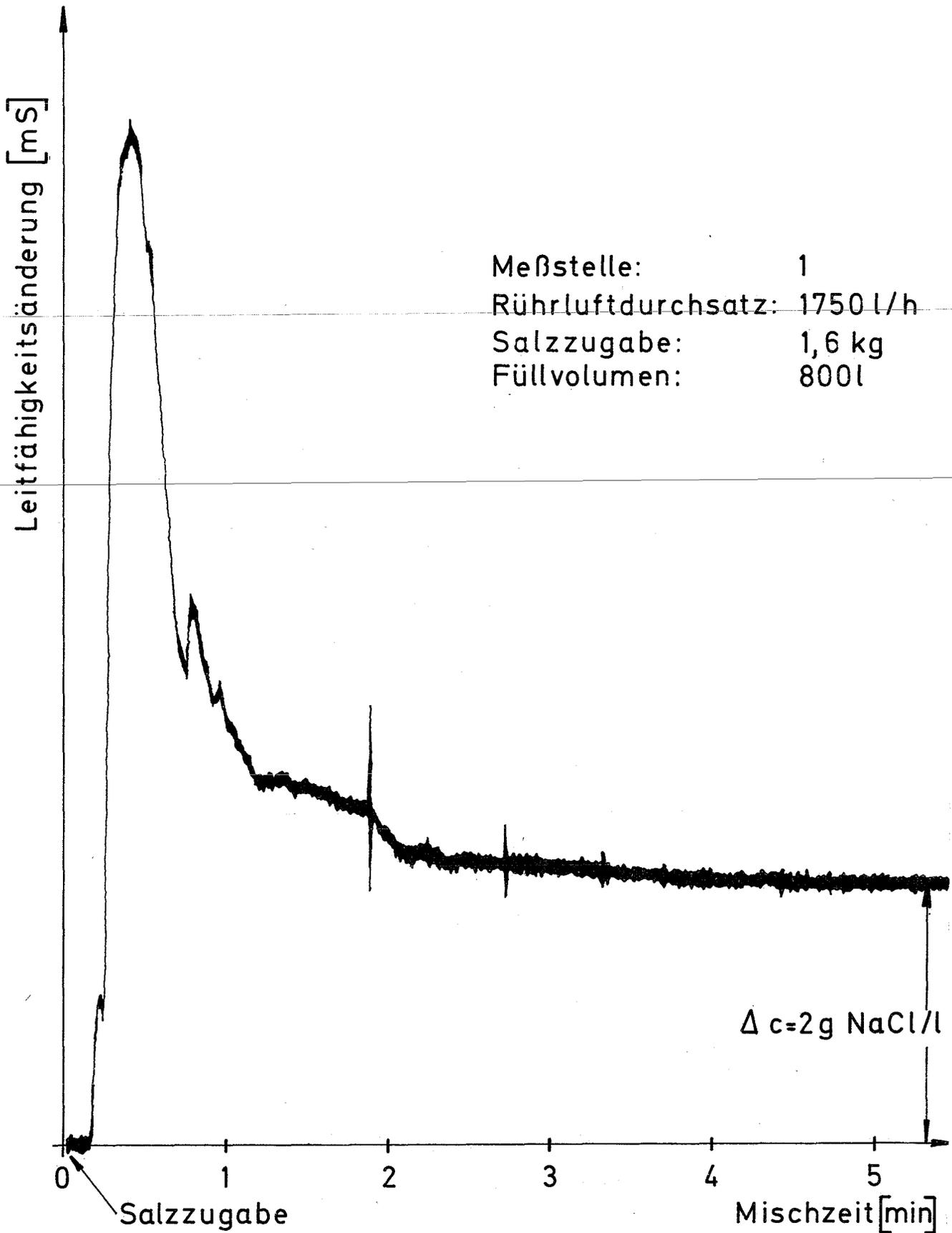


Fig.31 Bestimmung der Mindestmischzeit (II)

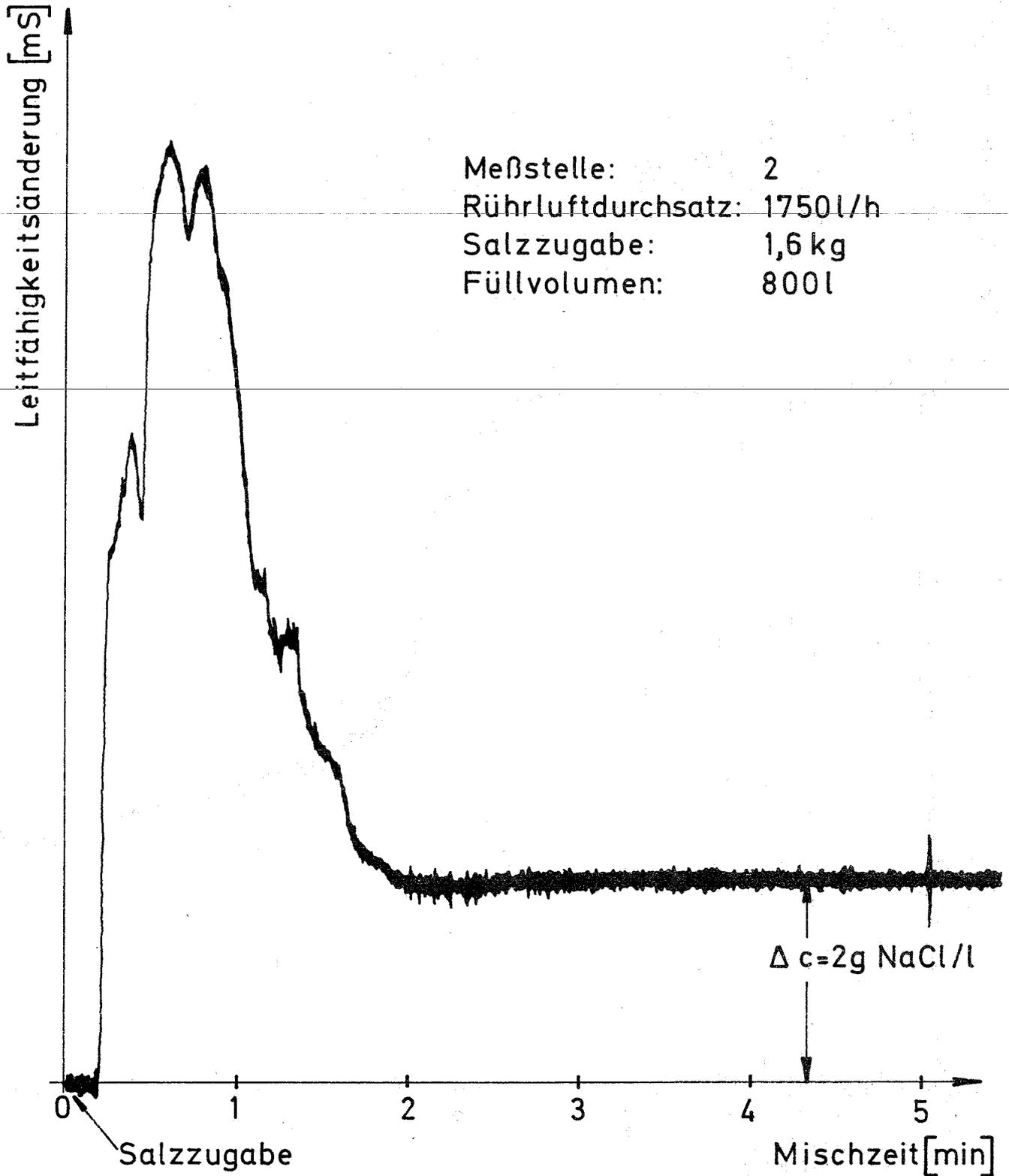
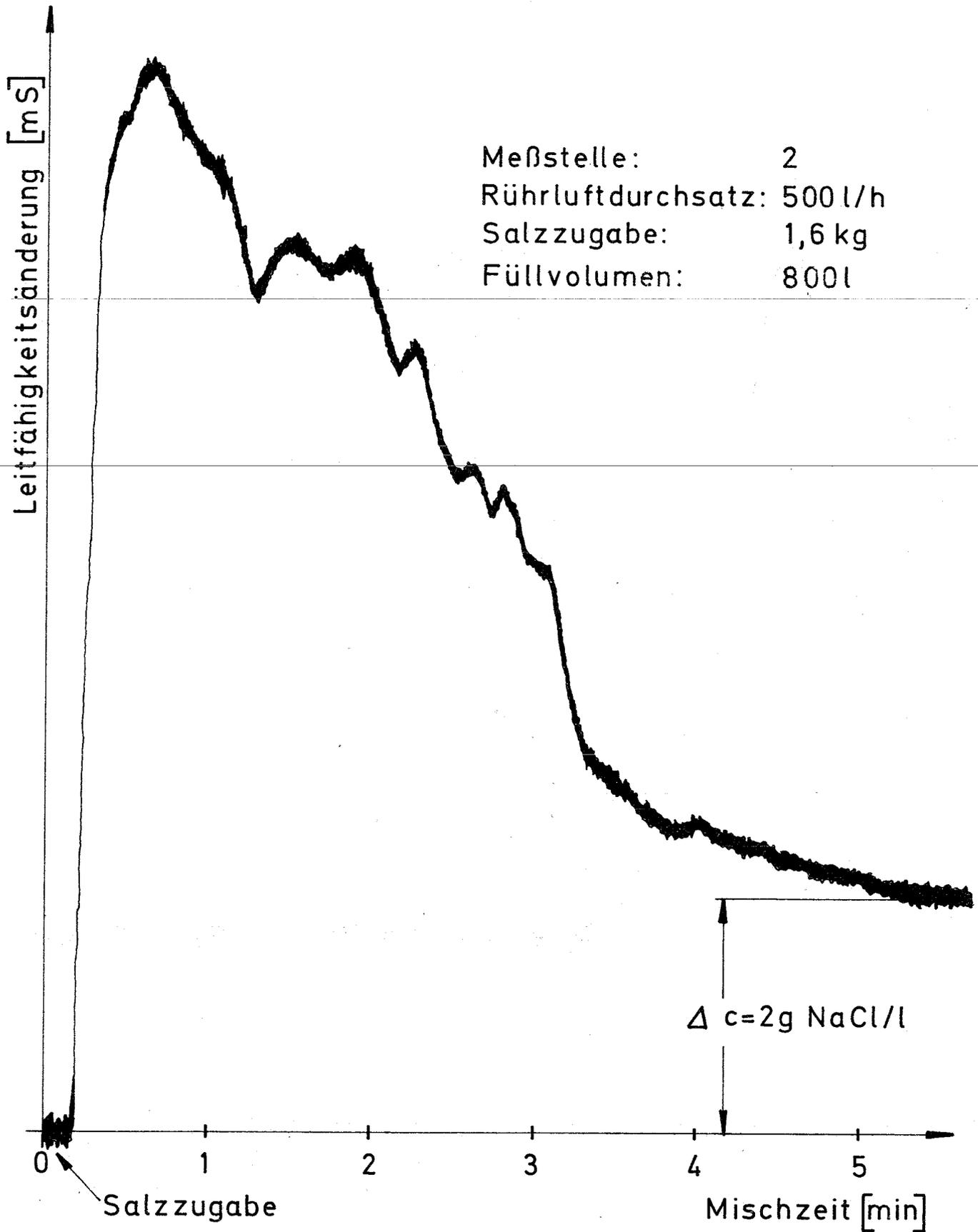


Fig.32 Bestimmung der Mindestmischzeit (III)



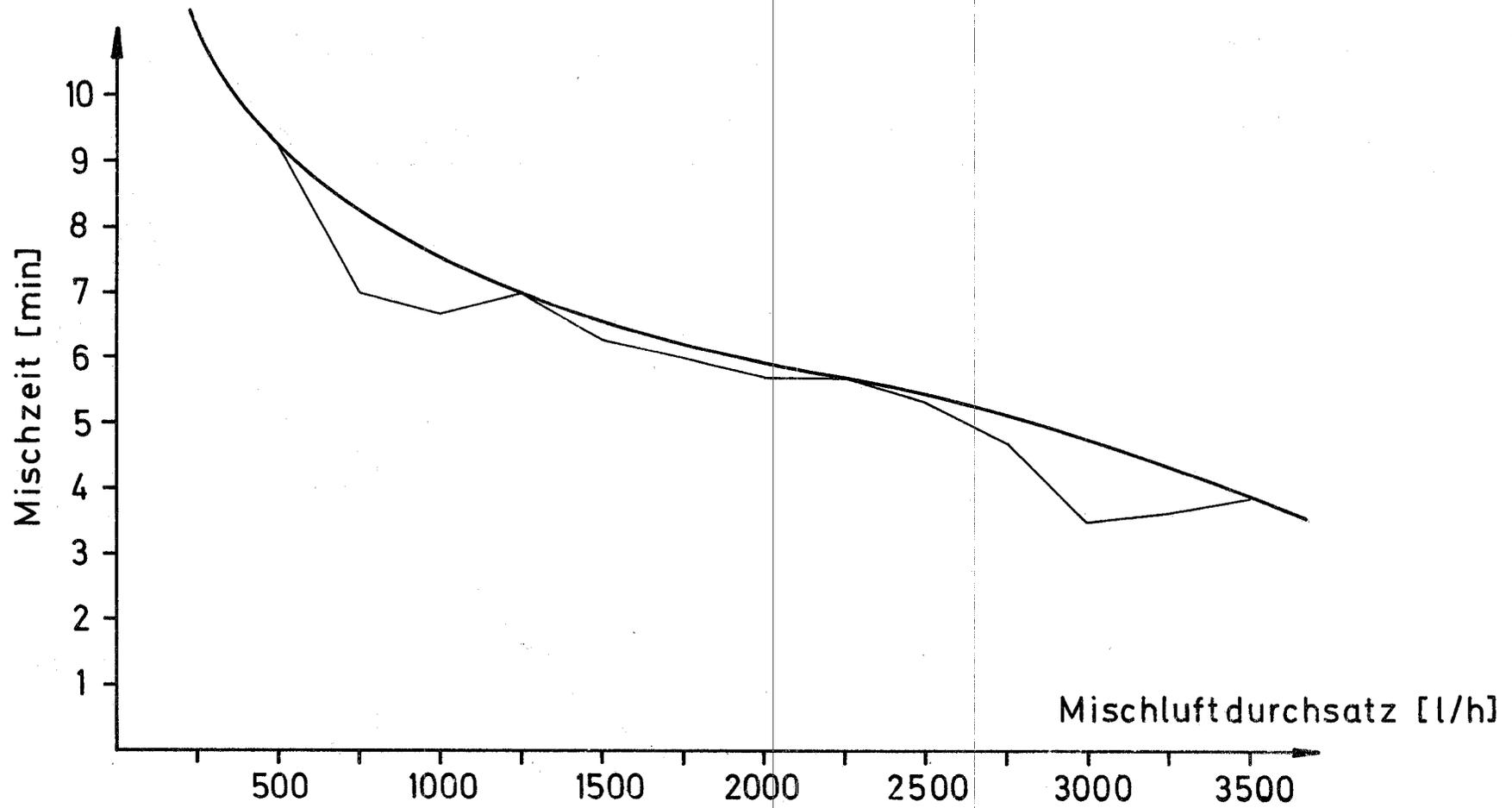


Fig. 33 Mischdauer zur Homogenisierung einer NaCl- Lösung (2g/l) in dest. H<sub>2</sub>O im 800l-Ringbehälter in Abhängigkeit vom Rührluftdurchsatz

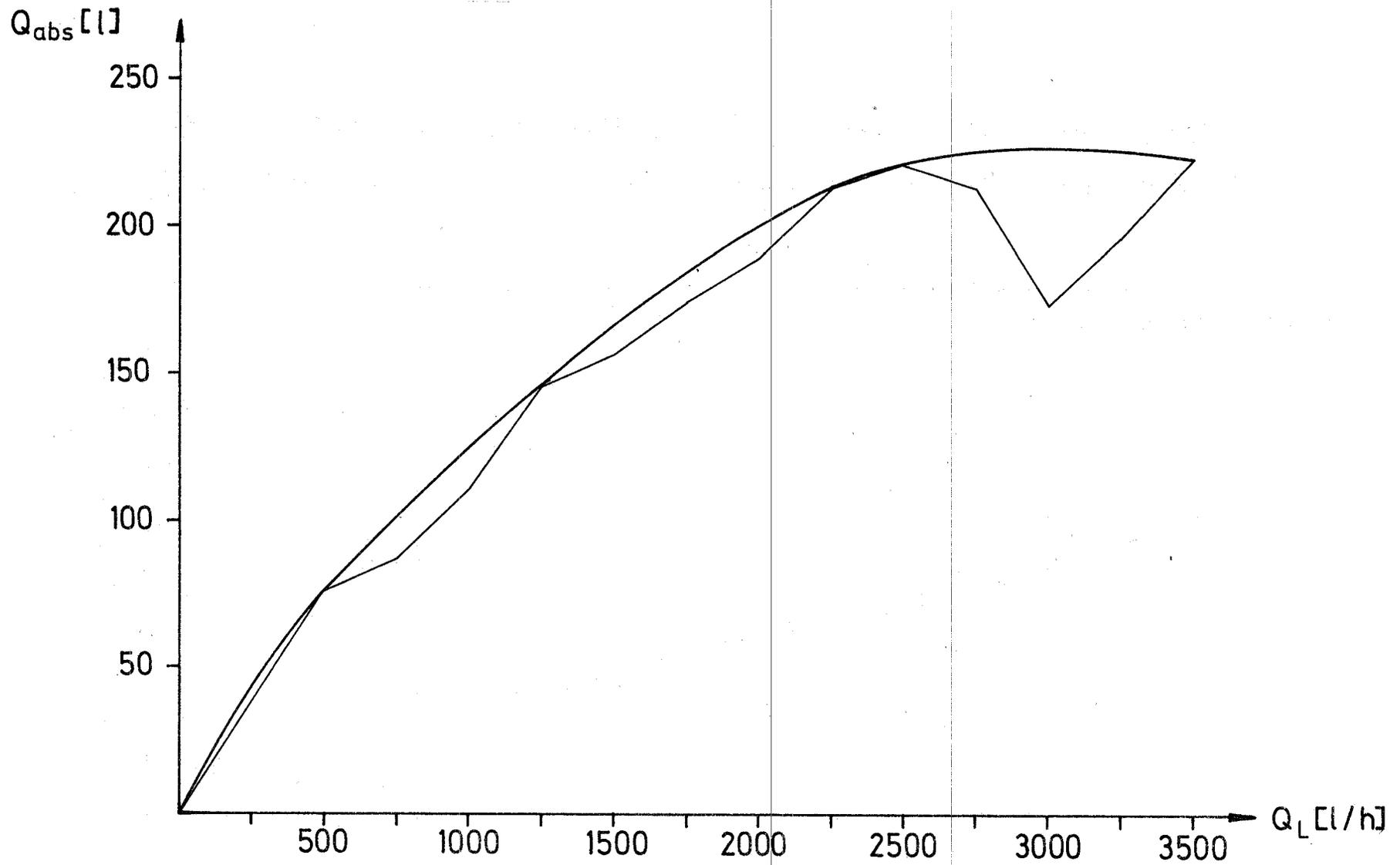


Fig.34 Absolut benötigte Luftmenge zur Homogenisierung einer NaCl-Lösung(2g/l) in dest. H<sub>2</sub>O im 800l-Ringbehälter in Abhängigkeit vom Rührluftdurchsatz

12. Tabellen

n	$G_{oi}$ [g]	$\bar{G}_o - G_{oi}$	$(\bar{G}_o - G_{oi})^2$
1	9680	- 12	144
2	9675	- 7	49
3	9675	- 7	49
4	9705	- 37	1369
5	9650	18	324
6	9690	- 22	484
7	9635	33	1089
8	9670	- 2	4
9	9670	- 2	4
10	9630	38	1444
	$\sum G_{oi} =$ 96681	0	$\sum (\bar{G}_o - G_{oi})^2 =$ 4960

$$\bar{G}_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{oi}$$

Tabelle 1 Bestimmung der nicht meßbaren  
Behälterfüllung

Tabelle 2 Meßwerte der Ringbehälter - Kalibrierung

$G_i$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$
20	38,5	38,8	38,8	38,9	38,7
40	77,0	76,8	77,2	77,3	76,9
60	115,3	115,1	115,6	115,5	115,4
80	153,7	153,4	153,7	153,9	153,8
100	192,2	191,6	192,1	192,2	192,2
120	230,3	229,9	230,4	230,3	230,4
140	268,4	268,4	268,7	268,7	268,6
160	306,6	306,6	307,0	307,0	306,9
180	345,1	344,9	345,3	345,3	345,2
200	383,3	383,3	383,8	383,6	383,4
220	421,9	421,8	422,3	421,9	421,9
240	460,2	460,1	460,5	460,2	460,1
260	498,4	498,2	498,6	498,4	498,6
280	536,5	536,3	536,8	536,8	536,7
300	574,8	574,4	574,9	574,8	574,7
320	613,1	612,8	613,3	613,1	613,0
340	651,2	650,8	651,5	651,3	651,3
360	689,5	689,2	689,6	689,5	689,5
380	728,0	727,4	727,8	727,9	727,8
400	766,2	765,6	766,1	766,2	766,1
420	804,4	804,1	804,5	804,5	804,4
440	842,6	842,2	842,7	842,9	842,7
460	881,1	880,9	881,2	881,3	881,0
480	919,3	919,0	919,4	919,5	919,4
500	957,7	957,2	957,5	958,0	957,8
520	996,2	995,7	996,0	996,4	996,1
540	1034,2	1034,2	1034,6	1034,5	1034,5
560	1072,4	1072,6	1073,0	1072,8	1072,8
580	1110,2	1110,7	1111,0	1110,9	1110,8
600	1148,4	1148,3	1148,8	1149,1	1148,8
620	1186,4	1186,9	1187,2	1186,9	1186,7
640	1224,4	1224,8	1225,3	1225,0	1224,8
660	1262,2	1262,9	1263,2	1263,2	1263,0
680	1300,2	1301,1	1301,4	1301,1	1300,8
700	1337,9	1339,0	1339,3	1338,8	1338,5
720	1375,9	1376,7	1377,0	1376,8	1376,4
740	1413,2	1415,1	1415,6	1415,0	1414,7
760	1451,8	1453,0	1453,5	1452,8	1452,7
780	1489,7	1491,0	1491,3	1490,9	1490,6
15600 39 $\sum_{i=1} G_i$ i=1			$G_i$ [kg]		
			$h_i$ [mm]		

Tabelle 3 Rechenwerte für Fehlerbestimmung der Kalibrierung

$\bar{h}_j = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \cdot h_j$	$\bar{h}_j^2$	$\bar{h}_j \cdot G_i$	$G_i^2$
38,7	1 497,7	774	400
77,1	5 944,4	3 084	1 600
115,4	13 317,2	6 924	3 600
153,7	23 623,7	12 296	6 400
192,1	36 902,4	19 210	10 000
230,3	53 038,1	27 636	14 400
268,6	72 146,0	37 604	19 600
306,8	94 126,2	49 088	25 600
345,2	119 163,0	62 136	32 400
383,5	147 072,3	76 700	40 000
422,0	178 084,0	92 840	48 400
460,2	211 784,0	110 448	57 600
498,4	248 402,6	129 584	67 600
536,6	287 939,6	150 248	78 400
574,7	330 280,1	172 410	90 000
613,1	375 891,6	196 192	102 400
651,2	424 061,4	221 408	115 600
689,5	475 410,3	248 220	129 600
727,8	529 692,8	276 564	144 400
766,0	586 756,0	306 400	160 000
804,4	647 059,4	337 848	176 400
842,6	709 974,8	370 744	193 600
881,1	776 337,2	405 306	211 600
919,3	845 112,5	441 264	230 400
957,6	916 997,8	478 800	250 000
996,1	992 215,2	517 972	270 400
1034,4	1069 983,4	558 576	291 600
1072,7	1150 685,3	600 712	313 600
1110,7	1233 654,5	644 206	336 400
1148,7	1319 511,7	689 220	360 000
1186,8	1408 494,2	735 816	384 400
1224,9	1500 380,0	783 936	409 600
1262,9	1594 916,4	833 514	435 600
1300,9	1692 340,8	884 612	462 400
1338,7	1792 117,7	937 090	490 000
1376,6	1895 027,6	991 152	518 400
1414,7	2001 376,1	1046 878	547 600
1452,8	2110 627,8	1104 128	577 600
1490,7	2222 186,5	1162 746	608 400
29867,5	30094132,3	15724286	8216000
$(\sum G_i)^2 = 15600^2 = 243360000$			$\sum_{i=1}^{39} G_i^2$

Tab. 4 Meßwerte der Tankkalibrierung mittels U-Rohr-Manometer

$G_i$	Wasser			Tetrabromäthan		
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
20	43,2	43,0	42,7	14,8	14,2	14,5
40	82,3	81,5	81,1	27,4	27,3	27,2
60	120,1	119,6	119,4	40,4	40,2	40,4
80	157,8	157,5	158,0	53,1	53,4	53,2
100	196,6	196,7	196,4	66,1	66,0	66,0
120	234,1	234,4	234,7	78,8	79,0	79,1
140	273,1	272,6	272,9	92,5	91,8	91,9
160	310,6	310,9	311,1	104,7	104,9	104,9
180	349,4	349,5	349,6	117,9	117,6	117,9
200	388,2	388,2	388,2	130,4	130,4	130,6
220	425,2	425,7	426,1	143,4	143,5	143,5
240	464,2	464,1	464,4	156,6	156,4	156,6
260	502,3	502,3	502,2	169,5	169,4	169,5
280	540,3	541,2	541,2	183,1	182,5	182,4
300	579,7	578,9	578,7	195,3	195,2	195,3
320	616,3	616,6	616,3	208,4	208,2	208,4
340	655,7	655,5	655,6	221,2	221,2	221,2
360	693,4	693,6	693,6	234,4	234,1	234,2
380	732,5	734,4	732,2	247,1	246,9	247,1
400	770,8	770,7	770,4	260,1	260,0	260,1
420	808,8	808,4	808,6	273,2	272,8	272,9
440	846,5	846,0	846,6	285,9	286,0	285,8
460	884,8	884,7	885,0	298,6	298,7	298,8
480	923,3	923,4	923,4	311,5	311,7	311,5
500	962,2	962,0	962,0	325,0	324,8	324,9
520	1001,1	1000,7	1000,8	337,9	337,6	337,7
540	1038,9	1039,1	1039,0	350,5	350,5	350,6
560	1076,9	1077,2	1077,2	363,7	363,6	363,6
580	1115,4	1115,1	1115,4	376,6	376,5	376,6
600	1153,6	1153,5	1153,3	389,5	389,4	389,6
620	1190,5	1190,6	1190,3	402,1	402,5	402,2
640	1229,2	1229,5	1229,7	415,3	415,4	415,5
660	1267,7	1267,7	1268,2	428,1	428,0	428,0
680	1305,6	1304,9	1305,5	439,2	439,6	439,7
700	1343,6	1343,3	1343,6	452,4	452,5	452,7
720	1382,0	1381,8	1381,8	465,4	465,3	465,5
740	1419,6	1419,2	1420,0	478,2	478,1	478,0
760	1458,0	1458,1	1458,7	490,5	490,9	491,0
780	1495,4	1494,8	1495,7	503,3	503,8	503,6
$\Sigma G_i =$ 15 600	$(\Sigma G_i)^2 = 15\,600^2 = 243\,360\,000$					

Tab. 5 Rechenwerte für die Fehlerbestimmung der U-Rohr Kalibrierung  $H_2O$

$\bar{h}_j = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 h_j$	$\bar{h}_j^2$	$\bar{h}_j \cdot G_i$	$G_i^2$
42,96	1845,56	859,20	400
81,83	6693,46	3265,20	1600
119,70	14328,09	7182,20	3600
157,76	24888,22	12620,20	6400
196,56	38635,83	19656,00	10000
234,40	54943,36	28128,00	14400
272,86	74452,58	38800,40	19600
310,86	96633,94	49737,60	25600
349,50	122150,25	62910,00	32400
388,20	150699,24	77640,00	40000
425,66	181186,44	93645,20	48400
464,26	215537,35	111422,40	57600
502,26	252265,11	130587,60	67600
540,90	292572,81	151452,00	78400
579,10	335356,81	173730,00	90000
616,40	379948,96	197248,00	102400
655,60	429811,36	292904,00	115600
693,53	480983,86	249670,80	129600
732,36	536351,17	278296,80	144600
770,63	593870,60	308252,00	160000
808,60	653833,96	339612,00	176400
846,36	716325,25	372398,40	193600
884,83	782924,13	407021,80	211600
923,36	852593,69	443212,80	230400
962,10	925636,41	481050,00	250000
1000,86	1001720,74	520447,20	270400
1039,00	1079521,00	561060,00	291600
1077,10	1160144,41	603176,00	313600
1115,30	1243894,09	646874,00	336400
1153,46	1303469,97	692076,00	360000
1190,46	1417195,01	738085,20	384400
1229,46	1511571,89	786854,40	409600
1267,86	1607468,98	836787,60	435600
1305,33	1703886,41	887624,40	462400
1343,50	1804992,25	940450,00	490000
1381,86	1909537,06	994939,20	518400
1419,60	2015264,16	1050504,00	547600
1458,26	2126522,23	1108277,60	577600
1495,30	2235922,09	1166334,00	608400
$\Sigma = 30037,73$	$\Sigma = 30326548,73$	$\Sigma = 15794192,60$	$\Sigma = 8216000$

Tab. 6 Rechenwerte für die Fehlerbestimmung der U-Rohr Kalibrierung

TBA

$\bar{h}_j = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 h_j$	$\bar{h}_j$	$\bar{h}_j \cdot G_i$	$G_i^2$
14,50	210,25	290,00	400
27,30	745,29	1092,00	1600
40,33	1626,51	2419,80	3600
53,23	2833,43	4258,40	6400
66,03	4359,96	6603,00	10000
78,96	6234,68	9475,20	14400
92,06	8475,04	12888,40	19600
104,83	10989,33	16772,80	25600
117,80	13876,84	21204,00	32400
130,46	17019,81	26092,00	40000
143,46	20580,77	31561,20	48400
156,53	24501,64	37567,20	57600
169,46	28716,69	44059,60	67600
182,66	33364,68	51144,80	78400
195,26	38126,47	58578,00	90000
208,33	43401,39	66665,60	102400
221,16	48911,75	75194,40	115600
234,23	54863,69	84322,80	129600
247,03	61023,82	93871,40	144400
260,06	67631,20	104024,00	160000
272,96	74507,16	114643,20	176000
285,90	81738,81	125796,00	193600
298,70	89221,69	137402,00	211600
311,56	97069,63	149548,80	230400
324,90	105556,01	162450,00	250000
337,73	114061,55	175619,60	270000
350,53	122871,28	189286,20	291600
363,63	132226,78	203632,80	313600
376,56	141797,43	218404,80	336600
389,50	151710,25	233700,20	360000
402,26	161813,11	249401,20	384400
415,40	172557,16	265856,00	409600
428,03	183209,68	282499,80	435600
439,50	193160,25	298860,00	462600
452,53	204783,40	316779,00	490000
465,40	216597,16	335088,00	518400
478,10	228579,61	353794,00	547600
490,80	240884,64	373008,00	577600
503,56	253572,67	392776,80	608400
$\Sigma = 10131,23$	$\Sigma = 3453415,51$	$\Sigma = 5326622,80$	$\Sigma = 8216000$

Tab. 7 Genauigkeitsvergleich Lüfteinperlmethode — Kraftmeßanlage

Steigrohr	U-Rohr H <sub>2</sub> O		U-Rohr TBÄ		Kraftmeßanlage			
	G nach VIII	ΔG	G nach X	ΔG	Füllen	ΔG	Entleeren	ΔG
63,92	64,07	-0,15	63,49	+0,43	64	-0,08	62	+1,92
113,05	113,37	-0,32	112,75	+0,30	115	-1,95	111	+2,05
162,90	162,94	-0,04	162,58	+0,32	164	-1,10	162	+0,90
212,96	213,28	-0,32	212,77	+0,19	214	-1,04	212	+0,96
262,71	262,90	-0,19	262,50	+0,21	263	-0,29	261	+1,71
312,78	312,91	-0,13	312,03	+0,75	314	-1,22	311	+1,78
361,79	362,15	-0,36	361,54	+0,25	363	-1,21	361	+0,79
411,91	412,09	-0,18	411,64	+0,27	413	-1,09	411	+0,91
462,13	462,49	-0,36	461,84	+0,29	463	-0,87	461	+1,13
512,09	512,38	-0,29	511,78	+0,31	513	-0,91	511	+1,09
561,63	562,00	-0,37	561,29	+0,34	563	-1,37	560	+1,63
611,22	611,40	-0,18	610,79	+0,51	613	-1,78	610	+1,22
662,33	662,37	-0,04	661,49	+0,84	664	-1,67	661	+1,33
711,45	711,96	-0,51	710,59	+0,86	713	-1,55	710	+1,45
762,09	762,15	-0,06	761,21	+0,88	763	-0,91	761	+1,09
801,48	801,80	-0,32	800,42	+1,06	802	-0,52	800	+1,48

13. Anhang

1. Berechnung der Geradensteigung a
  - 1.1 Berechnung des mittleren Fehlers von a
  2. Bestimmung der Konstanten b
  3. Berücksichtigung des systematischen Fehlers der Kalibrierwaage
  4. Ermittlung der maximalen Gesamtfehler der Kalibriergleichung
    - 4.1 Gleichung III
    - 4.2 Gleichung IV
    - 4.3 Gleichung VII/IX
    - 4.4 Gleichung VIII/X
  5. Berechnung der systematischen Fehler  $f_{\text{SH}_2\text{O}}$  und  $f_{\text{STBA}}$  der U-Rohr-Kalibrierung, bezogen auf die Steigrohrkalibrierung
-

1. Bestimmung der Geradensteigung a

Es gilt allgemein<sup>1)</sup>:

$$a = \frac{(G_i \bar{h}_j)n - G_i \cdot \bar{h}_j}{n G_i^2 - (G_i)^2}$$

Mit den Werten aus Tabelle 3 wird:

$$a = 1,911581 \quad \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg H}_2\text{O bei } 22^\circ\text{C}} \right]$$

=====

1.1 Bestimmung des mittleren Fehlers von a

Es ist

$$\Delta a = m \sqrt{\frac{n}{n \cdot G_i^2 - (G_i)^2}}$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{v^2}{n - 2}}$$

$$v^2 = a \cdot G_i^2 + \bar{h}_j^2 - 2a \cdot G_i \bar{h}_j$$

Mit den Werten aus Tab. 3 ist:

$$\Delta a = \pm 0,000961 \quad \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg H}_2\text{O bei } 22^\circ\text{C}} \right]$$

2. Bestimmung der Konstanten b

Nach 3.1 ist  $b = -a \cdot G_0$  (mm)

$G_0$  wurde aus 10 Messungen (Werte Tab. 1) errechnet:

$$G_0 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} G_{0i} \pm \Delta G_0$$

$$G_0 = (9,668 \pm 0,023) \text{ (kg)}$$

=====

Mit der Geradensteigung  $a$  ist:

$$b = -(1,911581 \pm 0,000961) \cdot (9,668 \pm 0,023) \text{ (mm)}$$

=====

3. Berücksichtigung des systematischen Fehlers der Kalibrierwaage

Der systematische Fehler der zur Kalibriergewichtsmessung verwendeten Waage wurde vom Eichamt Karlsruhe mit

$$f_S = -0,001 \cdot G \text{ (kg)}$$

=====

bei einer Belastung von 20 kg, den Kalibrierschritten entsprechend, bestimmt.

In den Gleichungen I und II wird  $f_S$  durch

$$G' = k \cdot G = (1 - f_S)G = 0,999 \cdot G$$

berücksichtigt.

#### 4. Ermittlung der maximalen Gesamtfehler der Kalibrierung

Die Größen zur Bestimmung von  $h$  bzw.  $G$  sind alle mit einem bestimmten Einzelfehler  $\Delta$  behaftet.

Es sind dies im einzelnen:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \pm 0,1 \quad (\text{mm}) && \text{Ablesegenauigkeit des Höhenmeßgerätes} \\ \Delta G &= \pm 0,01 \quad (\text{kg}) && \text{Ablesegenauigkeit der Kalibrierwaage} \\ \Delta a &= \pm 0,000961 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg H}_2\text{O bei } 22^\circ\text{C}} \right] && \text{Mittlerer Fehler der Geraden-} \\ &&& \text{steigung} \\ \Delta G_0 &= \pm 0,023 \quad (\text{kg}) && \text{Mittlerer Fehler von } G_0 \end{aligned}$$

~~Die Verknüpfung dieser Einzelfehler ist durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz für wahre Fehler~~

$$\Delta y_{\max} = \pm \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_K} \Delta x_K \right|$$

gegeben.

#### 4.1 Gleichung III

Wird das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf Gleichung I angewendet, so gilt für den absoluten Maximalfehler von  $h$ :

$$\Delta h_{\max} = \pm \left| \frac{\partial h}{\partial a} \Delta a \right| + \left| \frac{\partial h}{\partial G} \Delta G \right| + \left| \frac{\partial h}{\partial G_0} \Delta G_0 \right|$$

Gleichung I lautet mit der Berücksichtigung des systematischen Fehlers der Kalibrierwaage:

$$h = a \cdot k \cdot (G - G_0) \quad \text{I}$$

$$\Delta h_{\max} = \pm |k \cdot (G - G_0) \Delta a| + |a \cdot k \cdot \Delta G| + |a \cdot k \cdot \Delta G_0|$$

Mit den Zahlenwerten für a, k und G<sub>0</sub> ergibt sich

$$\Delta h_{\max} = \pm (G \cdot 0,000960 + 0,05) \quad (\text{mm})$$

=====

Die Gleichung für h lautet damit:

$$h = a \cdot k (G - G_0) \pm (G \cdot 0,000960 + 0,05) \quad (\text{mm})$$

und mit den Zahlenwerten für a, k und G<sub>0</sub>

$$h = 1,911581 \cdot 0,999 \cdot (G - 9,668) \pm (G \cdot 0,000960 + 0,05) \quad \text{III}$$

$$h \quad (\text{mm}) \quad , \quad G \quad (\text{kg H}_2\text{O bei } 22^\circ\text{C})$$

#### 4.2 Gleichung IV

Unter Berücksichtigung des systematischen Fehlers f<sub>S</sub> der Kalibrierwaage ist:

$$G = \frac{h}{a \cdot k} + G_0 \quad (\text{kg}) \quad \text{II}$$

Analog zu 4.1 ist

$$\Delta G_{\max} = \pm \left| \frac{\partial G}{\partial h} \Delta h \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial a} \Delta a \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial G_0} \Delta G_0 \right|$$

$$\Delta G_{\max} = \pm \left| \frac{\Delta h}{a \cdot k} \right| + \left| \frac{-h}{a^2 \cdot k} \Delta a \right| + |\Delta G_0| \quad (\text{kg})$$

mit den Zahlenwerten

$$\Delta G_{\max} = \pm (h \cdot 0,000263 + 0,076) \quad (\text{kg})$$

und

$$G = \left( \frac{h}{a \cdot k} + G_0 \right) \pm (h \cdot 0,000263 + 0,076) \quad (\text{kg})$$

Mit den eingesetzten Zahlenwerten für a, k und G<sub>0</sub>

$$G = \left( \frac{h}{1,911581 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \pm (h \cdot 0,000263 + 0,076) \quad \text{IV}$$

#### 4.3 Gleichung VII/IX

Der maximale Gesamtfehler  $\Delta h_{\max}$  errechnet sich, wobei noch die Kapillarsteighöhe  $h_K$  als zusätzliche fehlerbehaftete Größe hinzukommt ( $\Delta h_K = \pm 0,1 \text{ mm}$ ) aus

$$\Delta h_{\max} = \pm \left| \frac{\partial h}{\partial a} \Delta a \right| + \left| \frac{\partial h}{\partial G} \Delta G \right| + \left| \frac{\partial h}{\partial G_0} \Delta G_0 \right| + \left| \frac{\partial h}{\partial h_K} \Delta h_K \right|$$

$$\Delta h_{\max} = |(G - G_0) \cdot k \cdot \Delta a| + |a \cdot k \cdot \Delta G| + |a \cdot k \cdot \Delta G_0| + |\Delta h_K|$$

Mit den Zahlenwerten für a (errechnet wie im Anhang Kap. 1) und  $G_0$  gilt für die U-Rohr-Kalibrierung mit Wasser:

$$\Delta h_{\max} = \pm (G \cdot 0,003737 + 0,13) \quad (\text{mm})$$

$$h = \left( 1,912500 \cdot 0,999(G - 9,668) + 4 \right) \pm (G \cdot 0,003737 + 0,13) \quad \text{VII}$$

h (mm) G (kg H<sub>2</sub>O bei 22°C)

Für die U-Rohr-Kalibrierung mit TBÄ gilt analog:

$$\Delta h_{\max} = \pm (G \cdot 0,001382 + 0,11) \quad (\text{mm})$$

$$h = \left( 0,644803 \cdot 0,999(G - 9,668) + 1,35 \right) \pm (G \cdot 0,001382 + 0,11) \quad \text{IX}$$

G (kg H<sub>2</sub>O bei 22°C)

#### 4.4 Gleichung VIII/X

Analog zu Kap. 4.1 im Anhang ist:

$$\Delta G_{\max} = \pm \left| \frac{\partial G}{\partial h} \Delta h \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial a} \Delta a \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial G_0} \Delta G_0 \right| + \left| \frac{\partial G}{\partial h_K} \Delta h_K \right|$$

$$\Delta G_{\max} = \pm \left| \frac{\Delta h}{a \cdot k} \right| + \left| \frac{h + h_K}{a^2 \cdot k} \Delta a \right| + \left| \Delta G_0 \right| + \left| \frac{\Delta h_K}{a \cdot k} \right|$$

Die Zahlenwerte eingesetzt ergibt für Wasser:

$$\Delta G_{\max} = \pm (h \cdot 0,001023 + 0,133) \quad (\text{kg})$$

$$G = \left( \frac{h - 4}{1,912500 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \pm (h \cdot 0,001023 + 0,133) \quad \text{VIII}$$

Die Zahlenwertgleichungen für TBÄ lauten entsprechend:

$$\Delta G_{\max} = \pm (h \cdot 0,003326 + 0,338) \text{ kg}$$

und

$$G = \left( \frac{h - 1,35}{0,644803 \cdot 0,999} + 9,668 \right) \pm (h \cdot 0,001023 + 0,133) \text{ X}$$

5. Berechnung der systematischen Fehler  $f_{\text{SH}_2\text{O}}$  und  $f_{\text{STBÄ}}$  der  
U-Rohr-Kalibrierung, bezogen auf die Steigrohrkalibrierung

Außer dem systematischen Fehler  $h_K$ , der in Gl. V und VI bereits berücksichtigt wurde, sind die Gleichungen für die U-Rohr-Kalibrierung noch zusätzlich mit einem systematischen Fehler behaftet (Siehe Vorzeichen der Abweichungen in Tabelle 7).

Die Erklärung hierfür ist folgende:

Theoretisch müssen die Geradensteigungen  $a$  für Steigrohr- und U-Rohr-Kalibrierung gleich sein.

Durch Störeinflüsse (Luftreibung; Ablösen der Luftblasen am Tauchrohr; evtl. unregelmäßige Querschnitte der U-Rohre) bei der U-Rohr-Kalibrierung differieren jedoch die Zahlenwerte für  $a$ .

Experimentell ermittelt wurden:

Steigrohr:	$a = 1,911581$
U-Rohr(H <sub>2</sub> O)	$a = 1,912500$
U-Rohr(TBÄ)	$a = 1,909584$ (Dieser wert wurde mit dem Dichtefaktor 2,9615 auf Wasser umgerechnet)

Für den systematischen Fehler gilt:

$$f_S = G \left( 1 - \frac{a_u}{a_{\text{St}}} \right)$$

Die Zahlenwerte der Steigungen  $a_u$  (für H<sub>2</sub>O-U-Rohr) und  $a_{St}$  (für Steigrohr) eingesetzt liefert Gleichung XI und XII

$$f_{SH_2O} = G \left( 1 - \frac{1,912500}{1,911581} \right) = - G \cdot 0,000480 \quad \text{XI}$$

$$f_{STBA} = G \left( 1 - \frac{1,909584}{1,911581} \right) = G \cdot 0,001045 \quad \text{XII}$$

Die auf die Steigrohrkalibrierung bezogenen Bestimmungsgleichungen für G der U-Rohr-Kalibrierung lauten dann:

$$\begin{aligned} G' &= G - f_S \quad (G \text{ nach VIII bzw. X}) \\ G' &= G - G \left( 1 - \frac{a_u}{a_{St}} \right) \\ G' &= G \cdot \frac{a_u}{a_{St}} \end{aligned}$$

Für Wasser als U-Rohr-Flüssigkeit ist:

$$\frac{a_u}{a_{St}} = \frac{1,912500}{1,911581} = 1,000480$$

Damit wird

XIII

$$G' = \left( \frac{h - 4}{0,999 \cdot 1,912500} + 9,668 \right) \cdot 1,000480 \pm (h \cdot 0,001023 + 0,133)$$

Für TBA ist:

$$\frac{a_u}{a_{St}} = \frac{1,909584}{1,911581} = 0,998955$$

und

XIV

$$G' = \left( \frac{h - 1,35}{0,999 \cdot 0,644803} + 9,668 \right) \cdot 0,998955 \pm (h \cdot 0,003326 + 0,338)$$