

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

SZABO

BETRIEBS- MESSTECHNIK

2

DRUCKMESSER

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1004-02/62

Herausgeber:
Ingenieurschule für Feinwerktechnik
Jena

Betriebsmeßtechnik

Lehrbrief 2

Druckmesser

von

Ing. Erich Scabo

3. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 3,50

Ag 616/ 87 /62

Best.-Nr. 1004-02/62

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Maßeinheiten und Begriffe	1
1.1	Begriffe	1
1.11	Kraft	1
1.12	Druck	1
1.13	Der Bezugsdruck	1
1.14	Atmosphärischer Luftdruck	2
1.15	Überdruck	2
1.16	Unterdruck	2
1.17	Absoluter Druck	2
1.18	Druckdifferenz	3
1.2	Maßeinheiten	3
1.21	Das technische Maßsystem - die technische Atmosphäre	3
1.22	Physikalisches Maßsystem	3
1.221	Das Newton Quadratmeter	4
1.222	Die physikalische Atmosphäre [atm]	4
1.223	Das CGS - System oder absolutes Maßsystem	5
1.23	mm - Wassersäule	6
1.24	Zusammenfassung	7
1.3	Druckbereiche	7
2.	Unmittelbar anzeigende Druckmesser	8
2.1	Flüssigkeitsmanometer	8
2.11	U - Rohrmanometer	8
2.12	Anforderungen an Meßflüssigkeiten	11
2.13	Korrekturen der Ablesung	13
2.14	Ausführung der Skalen	13
2.15	Verwendung in der Vakuumtechnik	15
2.16	Technische Ausführungsformen von U-Rohrmanometern	16
2.2	Gefäßmanometer	20
2.3	Flüssigkeitsmanometer für kleine Drücke	21
2.31	Mikromanometer nach Krell	22
2.32	Mikromanometer nach Recknagel - Berlowitz	27
2.33	Mikromanometer als Schrägrohrmanometer	28
2.34	Zweistoffmanometer	28
2.35	Wassersäulenminimeter	31

2.36	Ringwaage	32
2.37	Tauchglockenmanometer	38
2.38	Gleicharmige Hebelwaage als Mikromanometer	43
2.4	Manometer für höhere Drücke	45
2.41	Quecksilbermanometer für höhere Drücke	45
2.42	Mehrkommer - Quecksilbermanometer	46
2.43	Gasmanometer	48
2.44	Kolbenmanometer	50
2.441	Spindelpresse	52
2.442	Kolben - Differenzdruckschreiber	52
2.443	Kolbenmanometer mit Federausgleich	53
2.5	Vakuummeter	54
3.	Mittelbar anzeigende Druckmesser	55
3.1	Metallmanometer	55
3.11	Plattenfedermanometer	56
3.111	Druckmesser mit schlaffer Membrane	58
3.12	Dosenfedermanometer	60
3.13	Kapselfedermanometer	63
3.14	Röhrenfedermanometer	69
3.141	Röhrenfederbarometer mit Windungswinkel größer als 270°	75
3.142	Röhrenfederquerschnittsformen	77
3.2	Elektrische Druckmesser	78
3.21	Messung von Druckänderung durch Änderung des elektrischen Widerstandes	79
3.211	Widerstandsänderung eines gespannten Drahtes	79
3.212	Kohleldruckmesser	79
3.213	Elektrolytische Meßdose nach Schmaltz und Wallichs	81
3.214	Dehnungsmeßstreifen	81
3.22	Kraftmeßdosen durch Permeabilitätsänderung	83
3.23	Kraftmeßdosen durch Kapazitätsänderung	84
3.24	Kraftmeßdosen mit Piezokristall	85
4.	Atmosphärische Druckmessung	86
4.1	Flüssigkeitsbarometer	86

	Seite
4.11 Heberbarometer	87
4.12 Gefäßbarometer	89
4.13 Gefäßheberbarometer	90
4.14 Zweistoffbarometer	90
4.2 Metallbarometer - Aneroidbarometer	92
Wiederholungsfragen	96
Lösungen	98
Literaturquellen	102

1. Maßeinheiten und Begriffe

1.1 Begriffe

In diesem Lehrbrief wird von den verschiedenen Druckmeßgeräten gesprochen. Zum besseren Verständnis sollen zuerst wichtige Begriffe erklärt werden, deren genaue Kenntnis Voraussetzung für das Verständnis der folgenden Abschnitte ist.

1.11 Kraft P

Eine Kraft P ist durch das Produkt aus Masse mal Beschleunigung bestimmt.

$$P = m \cdot b \quad [kp]$$

P = Kraft	[kp]
m = Masse	[kp · s ² · m ⁻¹]
b = Beschleunigung	[m · s ⁻²]

1.12 Druck p

Der Druck dagegen ist der Quotient aus Kraft und Fläche,

$$p = \frac{P}{F} \quad [kp \cdot cm^{-2}] \quad F = \text{beaufschlagte Fläche} \quad [cm^2]$$

Man versteht also unter dem Druck p diejenige Kraft, die von einer Flüssigkeit, einem Gas oder einem festen Körper in einer bestimmten Ebene senkrecht auf die Flächeneinheit ausgeübt wird. Der Begriff Druck allein ist oftmals nicht aussagekräftig genug. Das ist besonders dann der Fall, wenn man die Differenz eines bestimmten Druckes zu einem anderen Druck - einem Bezugsdruck - messen will.

1.13 Der Bezugsdruck

Der Bezugsdruck kann einen festen Wert besitzen, er kann aber auch veränderlich sein. Häufig, aber keineswegs immer, ist der Bezugsdruck der jeweilige Atmosphärendruck oder atmosphärische Luftdruck.

1.14 Atmosphärischer Luftdruck

Der atmosphärische Luftdruck ist der Druck, den die Lufthülle der Erde durch ihr Gewicht erzeugt. Bekanntlich ist der atmosphärische Luftdruck nicht konstant, denn er wird beeinflusst von der jeweiligen Luftsäule und der Wichte. Die Wichte ist ihrerseits abhängig von der Luftfeuchtigkeit, von der Lufttemperatur, vom Staubgehalt und anderem mehr (es dürfte wohl bekannt sein, daß die Volumeneinheit warmer Luft leichter ist als die Volumeneinheit kalter Luft).

1.15 Überdruck

Der Überdruck steht im Zusammenhang mit dem Bezugsdruck. In DIN 1314 wird der Überdruck wie folgt festgelegt:

Überdruck = Druck vermindert um den Bezugsdruck!

Es ist also die errechnete Differenz aus Druck minus Bezugsdruck. Der Überdruck ist dann positiv, wenn der Druck größer als der Bezugsdruck ist.

1.16 Unterdruck (- at)

Der Unterdruck das Gegenteil zum Überdruck. Er steht ebenfalls mit dem Bezugsdruck in Verbindung. Auch hier die in DIN 1314 festgelegte Begriffsdefinition:

Unterdruck = Bezugsdruck vermindert um den Druck.

Man erhält demnach immer einen positiven Unterdruck, wenn der Druck kleiner als der Bezugsdruck ist.

1.17 Absoluter Druck

Der in den vorhergehenden Abschnitten gebrauchte Begriff "Druck" kann zur besseren Unterscheidung vom Überdruck und vom Unterdruck mit "absoluter Druck" bezeichnet werden. Absoluter Druck ist Bezugsdruck plus Überdruck oder Unterdruck. Mit geeigneten Meßgeräten z.B. Barometern (siehe Abschnitt 4) kann der absolute Druck gemessen werden.

1.18 Druckdifferenz

Eine Druckdifferenz wird nur zwischen zwei oder mehreren verschiedenen Drücken gemessen. Z.B. kann eine Druckdifferenz mit einem geeigneten Meßgerät in verschiedenen Rohrleitungen, Kesseln oder sonstigen Druckräumen ermittelt werden. Druckdifferenzmessungen gegen den atmosphärischen Luftdruck können ebenfalls mit entsprechenden Meßgeräten z.B. U-Rohrmanometern (siehe Abschnitt 2.1) vorgenommen werden.

1.2 Maßeinheiten

Wenn Messungen durchgeführt werden, müssen auch bestimmte festliegende Maßeinheiten vorhanden sein, mit denen das Meßergebnis ausgedrückt werden kann. So dient zum Bestimmen des Meßergebnisses einer Länge das altbekannte Meter. Bei der Messung eines Druckes können mehrere Maßeinheiten herangezogen werden. Es sind dies die zulässigen Maßeinheiten des technischen Maßsystems - m, kp, sec - und des physikalischen Maßsystems - cm, g, sec -.

1.21 Das technische Maßsystem - die technische Atmosphäre

Geht man von der eingangs (Abschnitt 1.12) erörterten Definition - Druck ist der Quotient aus Kraft pro Flächeneinheit - aus und verwendet die Maßeinheiten des technischen Maßsystems, so erhält man als Maßeinheit für den Druck $\text{kp} \cdot \text{m}^{-2}$. Festgelegt wurde aber die "technische Atmosphäre" bezeichnet mit $\text{at} = 1 \text{ kpom}^{-2}$. Nach Hengstenberg (Messen und Regeln in der chemischen Technik) wird die Festlegung dadurch geregelt, daß die Einheit $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ dem atmosphärischen Luftdruck, der wie bereits erwähnt auf jedem Körper der Erdoberfläche lastet und somit der praktisch wichtigste ist, etwa entspricht.

1.22 Physikalische Maßsysteme

Wir unterscheiden verschiedene physikalische Maßeinheiten, die heute alle noch ihre volle Gültigkeit haben.

1.221 Das Newton Quadratmeter [N · m⁻²]

Das Newton Quadratmeter ist der Druck, den eine gleichmäßig verteilte Kraft von einem Newton auf eine Fläche von einem Quadratmeter ausübt. Diese Maßeinheit ist nach DIN 1314 die Einheit des MKS-Systems (Meter - Kilogramm - Sekunden - System) und tritt heute international immer mehr in den Vordergrund.

$$1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1,01972 \cdot 10^{-5} \text{ at} = 0,986923 \cdot 10^{-5} \text{ atm}$$

1.222 Die physikalische Atmosphäre atm

In der Physik wird eine andere Einheit zur Druckmessung verwendet. Sie führt die Bezeichnung Torr und ist angelehnt an das Druckmeßverfahren, das Torricelli mit Hilfe einer Quecksilbersäule durchgeführt hat. Das Torr ist der Bodendruck, der durch eine Quecksilbersäule von einem Millimeter Höhe, Null Grad Celsius und dem Normwert der Fallbeschleunigung erzeugt wird (siehe auch DIN 1305).

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm QS} \quad \text{QS} = \text{Quecksilbersäule}$$

Der Ausdruck 1 mm QS ist gesetzlich nicht mehr zulässig, er muß aber zum Zweck der Umrechnung bekannt sein, weil er in der bisherigen Fachliteratur häufig auftritt. Der Druck, der durch eine Quecksilbersäule von einer Höhe h [mm] und einem Querschnitt F [cm²] auf ihre Bodenfläche ausgeübt wird, ist gleich dem Gewicht der Säule. Das Gewicht ist die Kraft, die zur Druckerzeugung notwendig ist, und man kann setzen:

$$P = G$$

Bei 0°C ist die Wichte des Quecksilbers $13,595 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-3}$. Der Druck errechnet sich zu:

$$p = \frac{G}{F} = \frac{h \cdot 10^{-1} \cdot F \cdot 13,595}{F} = h \cdot 1,3595 \left[\text{p} \cdot \text{cm}^{-2} \right]$$

$$\text{Somit ist ein Torr} = 1,3595 \left[\text{p} \cdot \text{cm}^{-2} \right] = 1,3595 \cdot 10^{-3} \left[\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2} \right]$$

Man sieht, daß zur Berechnung des Druckes das Produkt $\gamma \cdot h$ wichtig ist, und daß die Angabe 1 mm QS nicht als eine Länge

aufzufassen ist. Abgeleitet wurde von der Einheit Torr die Einheit "physikalische Atmosphäre". Sie ist etwa dem mittleren atmosphärischen Luftdruck gemessen am Meeresspiegel (NN) gleich, der 760 Torr beträgt. Bezeichnet wird eine physikalische Atmosphäre mit atm.

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 760 \cdot 1,3595 \cdot 10^{-3} = 1,033 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} \\ = 1,033 \text{ at}$$

Mit dieser rechnerischen Entwicklung ist zu erkennen, daß die beiden Maßsysteme - das technische und das physikalische - in Verbindung miteinander stehen und sich eins in das andere umrechnen läßt. Es ist also:

$$1 \text{ atm} = 1,033 \text{ at} = 760 \text{ Torr} \\ 1 \text{ at} = 0,967841 \text{ atm} = 735,6 \text{ Torr}$$

Die technische Atmosphäre ist demnach um 3,3 % kleiner als die physikalische Atmosphäre.

Oftmals genügt die Angabe 736 Torr als technische Atmosphäre.

1.223 Das CGS-System oder absolutes Maßsystem

Die Physik verwendet neben den im vorhergehenden Abschnitt genannten Maßeinheiten $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$, Torr und atm noch die später eingeführten Maßeinheiten des CGS-Systems - auch absolutes Maßsystem - das von Gauß so benannte metrische Maßsystem gleich Zentimeter - Gramm - Sekunden - System an. Die Grundeinheit des Druckes ist hier das Mikrobar $\mu \text{ bar}$ (DIN 1314).

$$1 \mu \text{ bar} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2} = \frac{\frac{\text{g cm}}{\text{s}^2}}{\text{cm}^2} \\ 10^3 \mu \text{ bar} = 1 \text{ Millibar} [\text{mbar}] \\ 10^6 \mu \text{ bar} = 1 \text{ Bar} [\text{bar}]$$

Diese Maßeinheiten werden vorwiegend in der Wetterkunde verwendet. Das Bar ist nicht gleich der physikalischen oder der technischen Atmosphäre, sondern es liegt zwischen beiden. Es ist um etwa 2 % größer als die technische Atmosphäre und um etwa 1,2 % kleiner als die physikalische Atmosphäre. In der

Literatur wird manchmal statt Bar der Begriff absolute Atmosphäre gebraucht.

1.23 mm - Wassersäule (mm WS)

Im Abschnitt 1.21 wird von der technischen Maßeinheit $\text{kp} \cdot \text{m}^{-2}$ gesprochen. Sie ist angenähert gleich dem Bodendruck, der von einer 10 Meter hohen Wassersäule bei 4°C und dem Normwert der Fallbeschleunigung ausgeübt wird.

Allgemein gilt: $1 \text{ mm WS} = 1 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2}$

Der genaue Wert ist aber: $1 \text{ mm WS} = 0,99973 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2}$

Im praktischen Gebrauch findet jedoch die allgemeine Angabe Anwendung, denn sie ist verhältnismäßig bequem, wenn man sie der Einheit Torr gegenüberstellt.

$$1 \text{ Torr} = 1,3595 \cdot 10^{-3} \text{ mm WS}$$

Die folgende Tabelle soll die zwischen den Einheiten bestehenden zahlenmäßigen Beziehungen veranschaulichen.

	bar	mbar	μbar	kp/m^2	atm	Torr	at	N/m^2
1 bar $= 10^5 \text{ dyn/cm}^2$	1	10^3	10^6	$1,0197 \cdot 10^4$	0,9869	750,06	1,0197	10^5
1 mbar $= 10^2 \text{ dyn/cm}^2$	10^{-3}	1	10^3	$1,0197 \cdot 10$	$0,9869 \cdot 10^{-3}$	0,75006	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	$10^{2,5}$
$1 \mu\text{bar}$ $= \text{dyn/cm}^2$	10^{-6}	10^{-3}	1	$1,0197 \cdot 10^{-2}$	$0,9869 \cdot 10^{-6}$	$0,75006 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	10^{-1}
1 kp/m^2 $= 1 \text{ mm WS}$	$0,9807 \cdot 10^{-5}$	$0,9807 \cdot 10^{-2}$	$0,9807 \cdot 10^{-2}$	1	$0,9876 \cdot 10^{-4}$	$0,7356 \cdot 10^{-1}$	10^{-4}	$0,9807 \cdot 10$
1 atm $= 760 \text{ Torr}$	1,0133	$1,0133 \cdot 10^3$	$1,0133 \cdot 10^6$	$1,0332 \cdot 10^4$	1	760	1,0332	$1,0133 \cdot 10^5$
1 Torr $(= 1 \text{ mm WS})$	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	1,3332	$1,3332 \cdot 10^3$	13,595	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	1	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	$1,3332 \cdot 10^{-2}$
1 at. $= 1 \text{ kp/cm}^2$	0,9807	$0,9807 \cdot 10^{-3}$	$0,9807 \cdot 10^6$	10^4	0,9678	735,55	1	$0,9807 \cdot 10^5$
1 N/m^2 $= \text{kg/ms}^2$	10^{-5}	$10^{-2,5}$	10	$1,0197 \cdot 10^{-1}$	$0,9869 \cdot 10^{-5}$	$0,75006 \cdot 10^{-2}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	1

1.24 Zusammenfassung

Um irgend welchen Verwechslungen aus dem Wege zu gehen, ist es ratsam, in der Technik die Maßeinheiten 1 at; 1 kp · m⁻² oder 1 kp · cm⁻², in der Physik die Maßeinheiten 1 N · m⁻² und 1 Torr und in der Wetterkunde noch 1 μ bar und 1 bar zu verwenden.

1.3 Druckbereiche

In der Technik und Wissenschaft spricht man allgemein von kleinen, mittleren und hohen Drücken. Diese Angaben sind ohne Zahlenwerte nicht konkret genug. Als kleine Drücke und Kleinstdrücke kann man alle Drücke ansehen, die unter 1 at liegen. Solche Drücke treten in der Praxis z.B. bei der Dampfkondensation mit ungefähr 20 Torr auf. Drücke unter 1 Torr benötigt man in der Glühlampen- und Röhrenfertigung. Die Drücke in der sogenannten Hochvakuumtechnik - meist Laboratorienarbeiten - liegen bei etwa 10⁻⁶ at. Das Gebiet der mittleren Drücke, in das gleichzeitig die technischen Prozesse fallen, umfaßt die Drücke 1 at bis 20 at. Drücke, die darüber hinaus gehen, können als hohe Drücke bezeichnet werden. Sie kommen zum Beispiel vor in der Dampftechnik bis etwa 160 at, und in der chemischen Industrie bis etwa 300 at. Das sind aber noch nicht die höchsten in der Technik vorkommenden Drücke. So werden in der Kunststoffindustrie etwa 5000 at und auf einigen Gebieten der Forschung - auch wieder mehr in physikalischen Laboratorien - Drücke von mehr als 100 000 at verwendet.

Somit kann man sagen, daß sich der Druckbereich von Wissenschaft und Technik zwischen 10⁻⁶ at bis über 100 000 at erstreckt. Daraus läßt sich bereits ableiten, daß es kein Druckmeßgerät gibt, mit dem alle Drücke gemessen werden können. Praktisch existieren auch für die angegebenen Druckbereiche entsprechende Druckmeßgeräte, die sehr unterschiedlich in ihrem Aufbau sind.

2. Unmittelbar anzeigende Druckmesser

Aus den Begriffsbestimmungen des Druckes ergeben sich zwei unmittelbare Meßverfahren, die sich auf die Grundeinheiten stützen. Das eine Mal ist es der Bodendruck einer Wassersäule (mm WS). Das entspricht dem Meßprinzip des Flüssigkeitsmanometers, das den Druck durch die Höhenverschiebung einer Wassersäule mißt. Zum anderen ist es die Flächenbelastung (kp.cm^{-2}), die im Meßprinzip verwirklicht ist. Hier wird ein Kolben von bekanntem Querschnitt mit einer Kraft belastet.

2.1 Flüssigkeitsmanometer

Die direkt oder unmittelbar anzeigenden Druckmesser sind in der Regel Flüssigkeitsmanometer. Ihrer Empfindlichkeit nach unterscheiden sie sich in ihrer Bauart stark voneinander. Man kann sie in drei Gruppen teilen, die etwas über ihre Anwendung aussagen:

1. Flüssigkeitsmanometer für kleine und Kleinstdrücke
2. Flüssigkeitsmanometer für mittlere Drücke
3. Flüssigkeitsmanometer für hohe Drücke.

2.11 U-Rohrmanometer

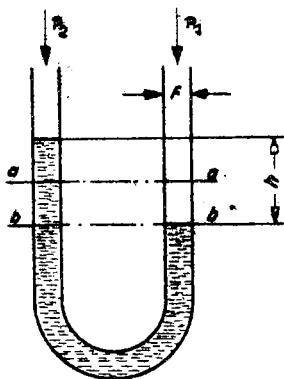


Abb. 1 U-Rohrmanometer

Die Grundform aller Flüssigkeitsdruckmesser ist das U-Rohrmanometer. Es besteht aus einem Glasrohr, das in eine U-Form gebogen ist und mit einer geeigneten Anzeige- und Meßflüssigkeit gefüllt ist. Die Schenkel haben den gleichen Durchmesser. Wenn sich das Gerät im Ruhezustand befindet, steht die Flüssigkeit in beiden Schenkeln des U-Rohres gleich hoch. Die beiden Flüssigkeitsspiegel bilden die Ebene a - a (siehe Abb.1) Ist dieser Zustand vorhanden, so spricht man vom Gleichgewicht, das

als Voraussetzung zur Druckbestimmung benötigt wird.

Mit dem U-Rohrmanometer wird stets eine Druckdifferenzmessung vorgenommen. Man schließt einen Schenkel an einen zu messenden Druckraum an und setzt den anderen Schenkel meist dem atmosphärischen Luftdruck aus, d.h. der Schenkel wird nicht verschlossen. Man hat dadurch eine Druckdifferenz zwischen Druckraum und äußerem Luftdruck und kann den herrschenden Über- oder Unterdruck messen. Es ist aber nicht in jedem Fall der Luftdruck der Bezugsdruck.

Wenn sich das U-Rohrmanometer im Gleichgewicht befindet, so muß auf den Flüssigkeitsspiegeln der gleiche Druck (Gleichgewichtszustand) herrschen von:

$$p_1 = \frac{P_1}{F} ; p_2 = \frac{P_2}{F}$$

$$p_1 = p_2$$

Wird ein Schenkel an einen Druckraum angeschlossen, in dem ein höherer Druck p_1 herrscht, so wird die Flüssigkeit von ihm um einen Betrag zurückgedrückt werden. Sie wird in dem anderen offenen Schenkel um den gleichen Betrag hochsteigen.

Die innere Richtkraft, die auf die Flüssigkeitssäule des angeschlossenen Schenkels drückt ist:

$$P_1 = p_1 \cdot F$$

Auf die Flüssigkeitsebene b - b (siehe Abb. 1) des freien Schenkels wirkt die äußere Richtkraft, die sich aus zwei Kräften zusammensetzt. Einmal aus P_1 und zum anderen aus dem Gewicht der hochgedrückten Flüssigkeitssäule mit der Verschiebungshöhe h.

$$P_1 = P_2 + h \cdot F \cdot \gamma$$

$$P_1 = p_2 \cdot F + h \cdot F \cdot \gamma$$

Nach der Gleichgewichtsbedingung muß $P_1 = P_2$ sein, danach ist:

$$p_1 \cdot F = p_2 \cdot F + h \cdot F \cdot \gamma$$

$$p_1 = p_2 + h \cdot \gamma$$

oder: $p_1 - p_2 = h \cdot \gamma$

$p_1 - p_2$ gibt eine Druckdifferenz an, die entweder als Über- oder als Unterdruck zu lesen ist.

Nach Abb. 1 ist bei

$$\begin{aligned} p_2 - p_1 &= p_u = h \cdot \gamma && \text{Überdruck} \\ p_1 - p_2 &= p_u = (-) h \cdot \gamma && \text{Unterdruck} \end{aligned}$$

Die U-Rohrmanometer sind in den meisten Fällen mit beziffer-ten Skalen versehen, so daß unmittelbar die Druckhöhe abgelesen werden kann. Wenn nur die Höhe h abgelesen wird, so kann unter Zuhilfenahme der Wichte der Meßflüssigkeit der Druck p berechnet werden:

$$p = h \cdot \gamma$$

Die Wichte der Flüssigkeit ist das Ausschlaggebende für die Anzeigeempfindlichkeit des Manometers.

Unter Anzeigeempfindlichkeit eines Meßgerätes - in diesem Falle eines Manometers - versteht man den Skalenweg (in Milli-metern, Winkelgrad oder Bogeneinheiten), der von einem Zeiger (z.B. Flüssigkeitsspiegel) bei der Änderung der Meßgröße um eine Maßeinheit zurückgelegt wird. Die Empfindlichkeit hat hier die Dimension: Länge / Meßgröße (siehe auch DIN 1319).

Man wird Flüssigkeiten mit einer kleinen Wichte für Manometer gebrauchen, die zur Messung von kleinen Drücken vorgesehen sind, weil leichte Flüssigkeiten auf eine Druckveränderung stärker reagieren. Zur Messung von großen Drücken werden da-gegen Flüssigkeiten mit einer großen Wichte genommen.

Als Beispiel soll umstehende Zusammenstellung dienen. Als Vor-aussetzung wurde hier eine begrenzte Meßrohrlänge angenommen, die 1 m beträgt. Im allgemeinen werden U-Rohrmanometer auch nicht länger sein, weil sie dann unhandlich und leichter zer-störbar werden. Nach Prof. Faltin werden für noch gerade handliche Manometer Geräte mit 2 m Rohrlänge angegeben. Das entspricht einem höchsten Druckbereich für eine Quecksilber-füllung bis 2,7 at Überdruck. Wenn das gleiche Gerät eine Wasserfüllung besitzt, können nur höchstens 0,2 at gemessen werden. Entsprechend den beiden Beispielen verhalten sich auch die anderen Meßflüssigkeiten.

Sperrflüssigkeit	γ	Anzeigeverhältnis zu WS	Meßbereich für 1m Meßrohr	ablesbar
Wasser	1	—	1000 mm WS = 0,1 atü	1mm WS
Alkohol	0,8	125 : 100	800 mm WS = 0,08 atü	1mm WS
Azetylentetra- bromid	1,954	51,2 : 100	1954 mm WS = 0,2 atü	2mm WS
Quecksiber 10°C	13,55	7,38 : 100	13550 mm WS = 1,35 atü	10 mm WS oder 0,01at
0°C	13,595	7,36 : 100	13595 mm WS = 1,36 atü	
20°C	13,546	7,382 : 100	—	

2.12 Anforderungen an Meßflüssigkeiten

Die verwendeten Meßflüssigkeiten müssen einige Bedingungen erfüllen. Es wird von ihnen eine gute Ablesemöglichkeit, d.h. eine gute Meniskenbildung - Flüssigkeitskuppe - und eine ebensolche Beständigkeit verlangt.

Eine gute Ablesung ist erst dann möglich, wenn die Flüssigkeit gut erkennbar ist. Nicht alle Meßflüssigkeiten besitzen eine Eigenfärbung, die durch das durchsichtige Glasrohr zu sehen ist. Bei Wasser, Alkohol oder Äther als Meßflüssigkeiten macht sich eine Einfärbung der Flüssigkeit notwendig, um den Meniskus gut feststellen zu können. Diese an sich durchsichtigen Flüssigkeiten werden mit Eosin oder Methylenblau eingefärbt. Die Zugabe des Farbstoffes muß aber fachgerecht erfolgen, weil, besonders bei Eosin der Farbstoff sich an den Glasrohrwänden leicht absetzt, verkrustet und sogar dünne Rohre zustopfen kann.

Der Meniskus möchte aber nicht nur durch die Färbung der Flüssigkeit ins Auge fallen. Man muß hier noch darauf achten, daß man der Flüssigkeit entsprechend genügend weite Schenkel verwendet, weil in engen Schenkeln die Oberflächenspannung der Flüssigkeiten eine scharfe Meniskusbildung nicht zuläßt,

und ein ungenaues Ablesen der Flüssigkeitshöhe ist die Folge davon.

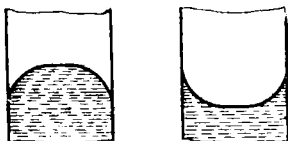


Abb. 2 Arten der Benetzung
durch Flüssigkeiten

Bei nicht benetzenden Meßflüssigkeiten, z.B. Quecksilber, wird der Meniskus eine konvexe Form (Abb. 2) annehmen. Die Flüssigkeitshöhe wird zu klein gemessen. Umgekehrt ist es bei benetzenden Flüssigkeiten, z.B. Wasser, wo der Meniskus eine konkave Form (Abb. 2) erhält. Man wird hier eine zu große Flüssigkeitshöhe messen. Es

macht sich also notwendig, U-Rohrmanometer mit - den verwendeten Meßflüssigkeiten entsprechend - weiten Schenkeln zu verwenden, die eine genügend große Meniskusbildung zulassen und eine genaue Ablesung ermöglichen. Z.B. soll die Schenkelweite bei Wasserfüllung nicht kleiner als 20 bis 30 mm und bei Quecksilberfüllung nicht kleiner als 8 bis 10 mm sein, auch, um die sogenannten Kapillarfehler möglichst klein zu halten.

Eine andere für eine gebrauchsfähige Meßflüssigkeit wichtige Eigenschaft ist die Unveränderlichkeit über längere Zeit hinaus, da sonst Meßfehler entstehen. Die Flüssigkeit darf z.B. ihre Wichte durch Aufnahme von Wasserdampf aus der Luft nicht verändern. Sie darf aber auch keine Verbindung mit dem zu messenden Stoff eingehen oder sich selbst leicht verflüchtigen.

Wenn neue Röhren in Gebrauch genommen werden sollen, so empfiehlt es sich, diese zuvor zu säubern. Sämtliche Verunreinigungen, besonders Fett, beeinträchtigen stark die Meniskusbildung. Man wird also vor der Füllung das Rohr mit Alkohol oder Äther (Benzin) gut ausspülen und den letzten nach dem Ausschütten noch vorhandenen Flüssigkeitsrest durch Erwärmung des Rohres ausdampfen.

2.13 Korrekturen der Ablesung

Wie aus der Physik bekannt sein dürfte, dehnen sich fast sämtliche Stoffe bei Erwärmung um einen bestimmten Betrag aus. Auch die Meßflüssigkeiten und die zur Ablesung angebrachten Skalen unterliegen diesem physikalischen Gesetz. Nur wird diese Ausdehnung nicht bei jeder Meßflüssigkeit bei der Messung berücksichtigt. Allerdings bezieht sich das nur auf bestimmte Temperaturbereiche. So wird in den meisten Fällen die Ausdehnung von Wasser und Quecksilber zwischen 0 bis 40°C vernachlässigt, da sie verhältnismäßig gering ist. Nach Hengstenberg beträgt die Ausdehnung für Wasser von 0° bis 30°C 0,4 %, bis 60°C 1,7 % und bis 90°C 3,6 %, während für Quecksilber für 10°C Temperaturdifferenz etwa 0,16 % in Frage kommen. Anders verhält es sich bei Alkohol und anderen Meßflüssigkeiten wie Petroleum, Benzol und Tetrachlorkohlenstoff. Die Ausdehnung beträgt hier bezogen auf je 10°C für Alkohol 1,1 %, Petroleum 0,9 %, Benzol 1,2 % und Tetrachlorkohlenstoff ebenfalls 1,2 %.

Ebenfalls vernachlässigt wird die Ausdehnung der Ableseskala, wenn bei Wasser und Quecksilberfüllung eine Glasskala verwendet wird, denn die Ausdehnung der Glasskala beträgt für je 10°C 1,74‰.

2.14 Ausführung der Skalen

Die U-Rohrmanometer sind bestimmt zur Messung mittlerer Drücke. Um die Druckdifferenz maßlich feststellen zu können, werden am zweckmäßigsten in Millimeter geteilte Holzmaßstäbe oder Glasmaßstäbe verwendet. Wegen der sehr kleinen Wärmeausdehnung von Holz und Glas benötigt man keine Temperaturkorrektur und die Messung wird beschleunigt. Die Skalen werden in der Regel zwischen die Schenkel des U-Rohrs angebracht. Dadurch wird das Ablesen der beiden Flüssigkeitsspiegel erleichtert. Häufig wird eine Skala verwendet, deren Teilung durchlaufend ist (Abb. 3 a). Diese Ausführungsart ist auch am zweckmäßigsten. Allerdings muß man an jedem Schenkel die Flüssigkeitshöhe h_1 und h_2 ablesen und dann aus den Ablesungen die Differenz bilden, die die Skalenhöhe h ergibt.

$$h = h_2 - h_1$$

Eine andere Ausführungsmöglichkeit der Skalen zeigt Abb. 3 b, die ebenfalls häufig, aber nicht so zweckmäßig sind. Hier ist der Nullstrich in der Mitte der Skala angeordnet. Zur Ermittlung der Skalenhöhe h sind auch hier zwei Ablesungen (h_1 und h_2) notwendig, jedoch wird keine Differenz, sondern die Summe daraus gebildet.

$$h = h_1 + h_2$$

Die Unzweckmäßigkeit der Skala äußert sich in dem schwierigen Auffüllen der Flüssigkeit bis zum Nullstrich. Allerdings wird die Druckmessung richtig, auch wenn die Flüssigkeit nicht genau in Nullstellung steht, nur ist dann die Ablesung umständlich.

Man hat auch versucht, die Skala nur an einem Schenkel anzubringen, wobei genau wie in Ausführung 3 b der Nullstrich auch in der Mitte liegt. Diese Art der Skala ist aber der schwierigen Ablesung wegen zu verwerfen und darum auch nicht weiter erläutert (Abb. 3 c).

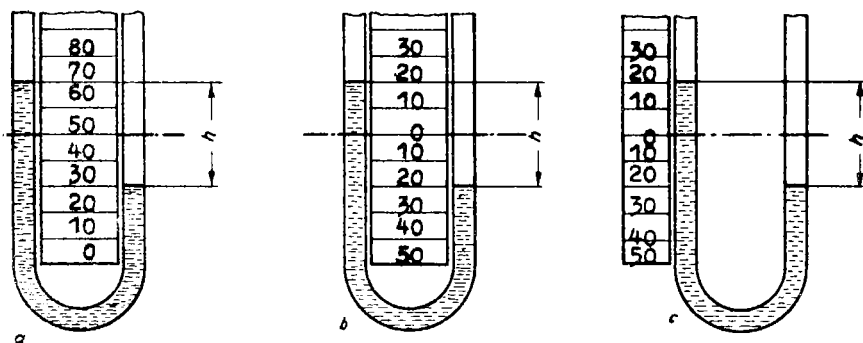


Abb. 3 Möglichkeiten der Skalenausführungen

Um das schwierige Auffüllen der Meßflüssigkeit bis zum Nullstrich bei U-Rohrmanometern mit einer Skala nach Abb. 3 b zu erleichtern, ordnet man die Skala nicht starr, sondern verschiebbar an. Dadurch kann man die Skala nach den Flüssig-

heitsspiegeln leicht und schnell einjustieren. In manchen Geräten erfolgt die Justage nicht durch die Verschiebung der

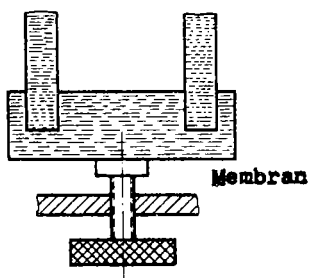


Abb. 4 Justiereinrichtung

Skala, sondern mit Hilfe einer Membrane und einer Mikrometerschraube (Abb.4) Durch das Verstellen der Schraube hebt oder senkt sich die Membrane und verändert die Höhe der Flüssigkeit in den Schenkeln. Eine weitere Möglichkeit der Justage kann mit Hilfe eines Nachfüllbehälters vorgenommen werden. Durch

entsprechende Konstruktion ist er ständig mit dem Manometer verbunden. Die Flüssigkeit wird durch einen Hahn entsprechend zugelassen oder abgesperrt.

2.15 Verwendung in der Vakuumtechnik

Nun jetzt wurde vom U-Rohrmanometer als einem Gerät zur Druckdifferenzmessung gesprochen. Man kann es aber auch für die Anzeige des absoluten Druckes verwenden. Es macht sich nur erforderlich, daß man einen Schenkel luftdicht abschließt, am besten zuschmilzt und über der Flüssigkeit dieses Schenkels ein Vakuum entstehen läßt. Durch diesen Umbau ist aus dem direktanzeigenden Differenzdruckanzeiger ein Absolutdruckanzeiger geworden. Vorsicht aber bei Anwendung der Flüssigkeiten. Für dieses Gerät kann nicht jede Flüssigkeit genommen werden, weil sich über der Flüssigkeit im geschlossenen Schenkel durch die Raum- und Betriebstemperatur immer ein der Flüssigkeit entsprechender Dampf bildet, der einen Druck ausübt und das Meßergebnis nachteilig beeinträchtigt. Beim Wasser ist dieser entstehende Druck erheblich groß, so daß man es nicht für diese Art von Geräten verwenden kann. Anders ist es bei Quecksilber, das einen Dampfdruck von nur 0,002 Torr aufbringt. Bei Messungen braucht dieser geringe Druck des Quecksilbers nicht berücksichtigt zu werden. Direkt anzeigende Manometer mit Quecksil-

berfüllung sind in der Vakuumtechnik im Gebrauch. In dieser Ausführungsweise sind die Manometer aber mehr Barometer, die unter Abschnitt 4.1 näher behandelt werden.

2.16 Technische Ausführungsformen von U-Rohrmanometern

Die bisher beschriebene Ausführungsform des U-Rohrmanometers hat trotz des Vorteils recht kleiner Systemfehler den Nachteil, daß es sich in dieser Form allenfalls für Labormessungen, nicht aber für Betriebsmessungen verwenden läßt. Die Größe des Druckes bzw. Differenzdruckes läßt sich zwar ablesen, kann aber nicht registriert werden. Das Aufschreiben des Differenzdruckes über der Zeit ist z.B. bei der Durchflußmessung mit Drosselgeräten notwendig. Die aus Gründen der Ablesbarkeit aus Glas gefertigten U-Rohr-Schenkel sind äußerst empfindlich gegen Beschädigungen und eignen sich wenig für raue Betriebsbedingungen. Die beiden Glasschenkel werden daher durch stabile Metallgefäße ersetzt und der nunmehr unsichtbare Stand der Flüssigkeitsspiegel wird in einem Schenkel mit einem Schwimmer gemessen. Solche Geräte sind unter dem Namen "Schwimmermesser" bekannt. Die Bilder 4 a und 4 b zeigen die zwei wichtigsten Ausführungsformen der "Schwimmermesser".

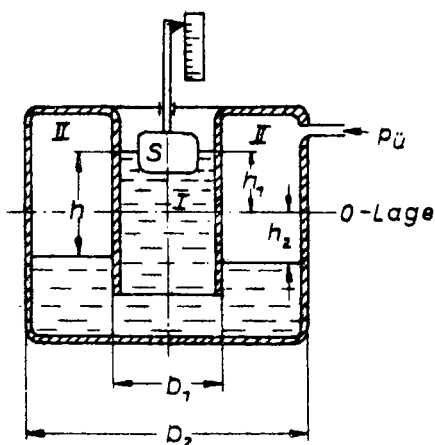


Abb. 4 a

Bei dem in Bild 4 a skizzierten Gerät sind die beiden U-Rohr-Schenkel durch den ringförmigen Druckraum II und den zylindrischen Schwimmerraum I ersetzt. Beide sind durch die Sperrflüssigkeit mit dem spezifischen Gewicht γ getrennt. Der Druck p_u wirkt im Druckraum auf den Spiegel der Flüssig-

keit, die dort um den Betrag h_2 sinkt, im Schwimmerraum um den Betrag h_1 ansteigt. Die Bewegung um h_1 wird mit dem Schwimmer 3 gemessen, dessen Bewegung geeignet auf einen Skalenzeiger übertragen werden kann. Das Gerät mißt also nicht die gesamte Druckhöhe $h = h_1 + h_2$ sondern nur h_1 . Es muß also p_u als Funktion von h_1 dargestellt werden. Es ist

$$p_u = (h_1 + h_2)\gamma$$

Weil das aus dem Raum II verdrängte Volumen gleich dem in Raum I eindringenden sein muß, gilt:

$$h_2 \cdot (D_2^2 - D_1^2) \frac{\pi}{4} = h_1 D_1^2 \frac{\pi}{4} \quad (\text{Wandstärken wurden vernachlässigt})$$

und

$$h_2 = h_1 \frac{D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}$$

Dann wird

$$p_u = h_1 \cdot \gamma \left(1 + \frac{D_1^2}{D_2^2 - D_1^2} \right)$$

$$p_u = h_1 \cdot \gamma \frac{D_2^2}{D_2^2 - D_1^2}$$

Das Gerät arbeitet nur exakt linear, wenn beide Gefäße genau kalibriert sind, d.h. D_1 und D_2 dürfen sich mit h nicht ändern.

Soll das Gerät als Differenzdruckmesser eingesetzt werden, dann wird das Gehäuse einschließlich Anzeigeeinrichtung gegen die Atmosphäre abgedichtet und mit dem zweiten Druck beaufschlagt, so daß sich der Druck auf beiden Seiten der Sperrflüssigkeit auswirken kann.

Bei dem in Bild 4 b gezeigten Gerät ist das U-Rohr-Prinzip klar zu erkennen. Es kann als Überdruckmesser und als Differenzdruckmesser verwendet werden. Mit dem größeren Druck ist stets das Gefäß II, das Plusgefäß zu beaufschlagen ($p_2 > p_1$). Die Druckhöhe wird wiederum nur einseitig und teilweise (h_1) mit einem Schwimmer gemessen, dessen Hub h_1 durch eine Stopf-

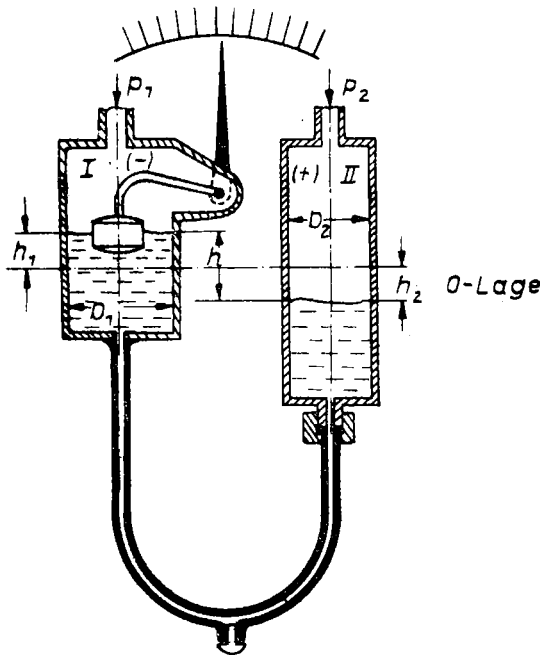


Abb. 4 b

büchse oder durch eine magnetische Kupplung aus dem Druckraum I auf das Anzeigewerk übertragen wird. Bei einer Stopfbüchsendurchführung ist zu beachten, daß hierbei auftretende, relativ große Reibmomente die Meßgenauigkeit beeinträchtigen. Rechnerisch gilt für das Gerät:

$$p_2 - p_1 = h \cdot \gamma = (h_1 + h_2) \cdot \gamma$$

Beachten wir wieder, daß

$$h_1 \cdot D_1^2 \frac{\pi}{4} = h_2 \cdot D_2^2 \frac{\pi}{4} \quad \text{ist und}$$

$$h_2 = h_1 \frac{D_1^2}{D_2^2}, \quad \text{dann wird}$$

$$p_2 - p_1 = h_1 \cdot \gamma \left(1 + \frac{D_1^2}{D_2^2} \right)$$

Die Druckdifferenz $p_2 - p_1$ ist nur noch von h_1 abhängig, wenn die Gefäße I und II genau kalibriert sind.

Die Bauform des U-Rohrmanometers besitzt einen großen Vorteil: Durch Austausch des Plusgefäßes II gegen ein anderes mit anderem Durchmesser D_2 kann der Meßbereich des Gerätes ΔP bei derselben maximalen Hubhöhe $h_{1 \max}$ des Schwimmers verändert werden.

Setzt man in der letzten Gleichung für $p_2 - p_1$ die maximal meßbare Druckdifferenz ΔP , d.h. den Meßbereich und für die Hubhöhe h_1 des Schwimmers den maximalen Wert $h_{1 \max}$ ein und löst nach D_2^2 auf, so erhält man

$$D_2^2 = \gamma \frac{h_{1 \max} \cdot D_1^2}{\Delta P - \gamma \cdot h_{1 \max}}$$

Je größer der gewünschte Meßbereich ist, desto kleiner wird der Durchmesser des einzusetzenden Plusgefäßes.

Berechnen Sie dazu folgendes Beispiel:

Das im Bild 6 skizzierte Gerät sei mit Hg ($\gamma = 13,595 \frac{\text{p}}{\text{cm}^3}$) gefüllt. Für die Meßbereiche $\Delta P = 1,6; 3,6; 6,4 \text{ m WS}$ soll die maximale Hubhöhe des Schwimmers 4 cm betragen! Wie groß werden die Durchmesser zu den einzelnen Meßbereichen gehörenden Plusgefäße D_2 (1,6); D_2 (3,6); D_2 (6,4) wenn das Minusgefäß den Durchmesser $D_1 = 6 \text{ cm}$ besitzt?

Bei richtiger Rechnung erhalten Sie:

$$D_2 (1,6) = 4,3 \text{ cm}$$

$$D_2 (3,6) = 2,53 \text{ cm}$$

$$D_2 (6,4) = 1,83 \text{ cm.}$$

2.2 Gefäßmanometer

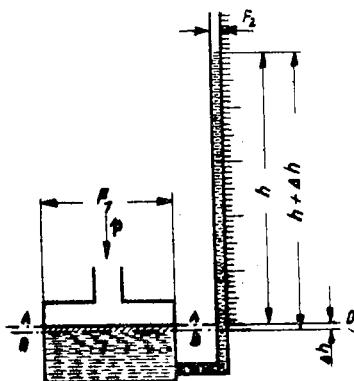


Abb. 5 Gefäßmanometer

Diese Art Manometer werden auch als "Einrohrmanometer" oder "Gefäßmanometer" bezeichnet, weil man sie ohne stützenden Umbau aufstellen kann. Dazu verhilft ein größeres, meist aus Metall bestehendes Gefäß, das gleichzeitig einen Schenkel des Manometers darstellt. Der zweite Schenkel ist am Gefäß angebracht und ist genau wie bei den anderen Manometern ein Glasrohr. Dieses Glasrohr dient zur Ablesung des Druckes. Es ist mit einer Skala versehen. Im Gefäßdeckel ist ein Anschlußstutzen

angebracht, der mit dem Druckraum durch eine entsprechende Druckleitung verbunden wird. Der Druck wirkt somit auf eine größere Fläche als beim einfachen U-Rohrmanometer. Es tritt jedoch bei diesem Manometer immer ein Fehler auf.

Im Ruhezustand stimmt der Flüssigkeitsspiegel mit der Nullstellung der Flüssigkeit im Meßschenkel überein. Übrigens wird hier die Skala meist direkt auf das Glasrohr gebracht. Wenn nun das Gerät angeschlossen wird, so drückt der aufgegebene Druck die Meßflüssigkeit im Gefäß um einen Betrag nach unten, so daß der Spiegel nicht mehr in der Nullpunktebene steht. Das ist gleichbedeutend mit der Annahme, daß der Nullpunkt nach unten verschoben worden ist. Diese Annahme wird gebraucht bei der Errechnung der erzielten Flüssigkeitshöhe durch den beaufschlagten Druck. Dieser kleine Höhenzuwachs in der Kapillare wird mit Δh bezeichnet. Seine Größe wird mit Hilfe der verdrängten Volumen bestimmt.

$$V_1 = V_2$$

$$V_1 = F_1 \cdot \Delta h$$

$$F_1 = D_1^2 \frac{\pi}{4}$$

$$V_2 = F_2 \cdot h$$

$$F_2 = D_2^2 \frac{\pi}{4}$$

$$F_1 \cdot \Delta h = F_2 \cdot h$$

$$\Delta h = h \cdot \frac{F_2}{F_1}$$

Die Flüssigkeitshöhe im Glasrohr, ausgehend von dem durch den Druck entstandenen Meniskus im Gefäß, bezeichnet man mit h' , die sich errechnen läßt aus:

$$h' = h + \Delta h$$

$$= h + h \cdot \frac{F_2}{F_1}$$

$$h' = h \left(1 + \frac{F_2}{F_1} \right)$$

Den Faktor $1 + \frac{F_2}{F_1}$ kann man für ein betrachtetes Gefäß als konstant ansehen und dies in der Gleichung entsprechend auf die korrigierte Höhe ändern.

$$c = 1 + \frac{F_2}{F_1}$$

$$h' = h \cdot c$$

Homit wird der Druck errechnet aus:

$$p = h' \cdot \gamma$$

Bei genauen Messungen muß die Korrektur immer vorgenommen werden. Um diese umständliche Korrektur zu umgehen, bedient man sich wieder einer Nachstelleinrichtung für den Nullpunkt. Die Ablesung kann schneller erfolgen.

4.3 Flüssigkeitsmanometer für kleine Drücke

Mit den bisher behandelten Manometern lassen sich kleine Drücke oder kleine Druckdifferenzen nicht mehr genau messen, weil die Empfindlichkeit dieser Geräte nicht größer ist. Auch dann wird die Ablesung noch zu grob, wenn man eine spezifisch leichte Flüssigkeit als Wasser nimmt, z.B. Alkohol mit einer Dichte von $\gamma = 0,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Alkohol ist aber nicht frei von

Nachteilen. Bei längerem Gebrauch nimmt er Wasser aus der Luft auf und verändert somit seine Wichte.

Um nun noch diese kleinen Drücke meßbar zu machen, sind die **Mikromanometer** entwickelt worden. Einige von ihnen werden hier behandelt, wobei die in den Abschnitten 2.31, 2.32 und 2.33 ausgeführten Manometer auch Schrägrohrmanometer genannt werden.

Bei sorgfältiger Konstruktion kann mit ihnen ein Mindestdruck von 10^{-2} bis 10^{-3} mm Wassersäule gemessen werden.

2.31 Mikromanometer nach Krell

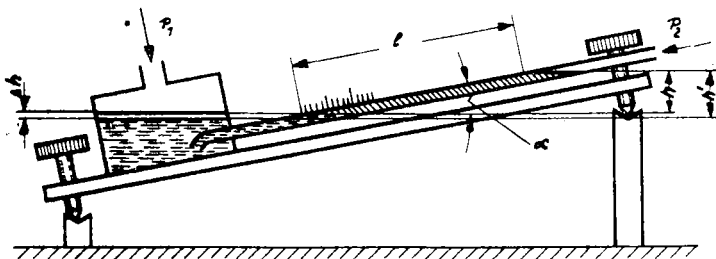


Abb. 6 Mikromanometer nach Krell

Aus der Abb. 6 ist die grundsätzliche Bauform der Mikromanometer nach Krell zu ersehen. Sie ähnelt dem Gefäßmanometer, nur daß hier das Meßrohr genau waagrecht am Gefäß eingebaut ist und in den weiten Schenkel hineinreicht. Es ist also nicht nur einfach angebaut. Wir haben somit ein U-Rohr, das zwei ungleich weite Schenkel besitzt, einer davon ist in die Waagerechte gebogen worden. Durch diese Anordnung des Meßschenkels ist aber die Empfindlichkeit des Gerätes sehr stark vergrößert worden, so daß man damit sehr kleine Drücke messen kann. Ein kleiner beaufschlagter Druck hat bereits einen großen Meniskusausschlag zur Folge.

Das ganze Gerät kann durch Unterstellen von Stützen verschiedene Neigungen erhalten, die man als Verhältnis

$$\frac{1}{x} = \frac{h}{l} \cdot \sin \alpha$$

angibt (Höhe der Flüssigkeit zu Länge des Flüssigkeitsausschlages). Je größer der Wert des Quotienten wird, um so kleiner wird die Empfindlichkeit; das besagt, daß man je nach Höhe der zu messenden Drücke den Meßbereich beschränkt bestimmen und einstellen kann durch die Wahl eines bestimmten Neigungsverhältnisses, eines bestimmten Neigungswinkels α .

Mit Hilfe von Wasserwaagen und Mikrometerschrauben kann eine genaue Einstellung einer verlangten Neigung erzielt werden.

Mit diesem Kleindruckmesser macht sich die Niveauänderung, bezogen auf die Nullstellung, stärker bemerkbar als beim Gefäßmanometer. Die Niveaudifferenz wird am größten, um so mehr der Neigungswinkel gegen Null geht.

Durch eine bestimmte Neigung erhält man bei Einwirkung eines Druckes einen Ausschlag der Meßflüssigkeit von l [mm] und eine manometrische Säulenhöhe von h [mm].

Die Höhe h läßt sich dann aus der Beziehung:

$$\sin \alpha = \frac{h}{l}$$

zu

$$h = l \cdot \sin \alpha$$

α = Neigungswinkel gegen die waagerechte

berechnen.

Die Beziehung gibt die Größe der Säulenhöhe ohne Berücksichtigung der Nullpunktänderung an. Man darf die Veränderung nicht vernachlässigen, da sie, wie das weiter unten ausgeführte Beispiel zeigt, einen immerhin erheblichen Fehler ergibt.

Wenn das Gefäß einen Innendurchmesser von $D = 100$ mm und die Flüssigkeit in der Kapillare einen Vorlauf von $l = 250$ mm bei einem Kapillardurchmesser von $d = 1,5$ mm hat, so senkt sich der Meniskus im Gefäß um die Höhe Δh .

$$\Delta h = \frac{l \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}}{D^2 \cdot \frac{\pi}{4}} = \frac{250 \cdot 1,5^2}{100^2} = \frac{0,45}{8} = 0,06 \text{ mm}$$

Nimmt man ein Neigungsverhältnis $1 : 100$ an, wobei $l = 200$ mm einem Druck von 2 mm WS entspricht, so erhält man durch die Vernachlässigung der Niveauveränderung einen beachtlichen Feh-

ler. Denn:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{0,06}{2,5} \cdot 100 = 2,4 \%$$

Daraus läßt sich erkennen, daß man die Vernachlässigung nicht eingehen soll. Rechnerisch kann die Nullpunktveränderung festgehalten werden. Bei Druckeinwirkung auf das Gerät wird das aus dem Gefäß verdrängte Volumen gleich dem vorlaufenden Volumen in der Kapillare sein: $V_1 = V_2$.

Es ist aber:

$$\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot l = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \Delta h \quad \text{oder} \quad l \cdot F_2 = \Delta h \cdot F_1$$

Daraus läßt sich die Höhe Δh errechnen:

$$\Delta h = l \cdot \frac{F_2}{F_1}$$

Berücksichtigt man noch die zusätzliche Höhe in der Kapillare:

$$h = l \cdot \sin \alpha,$$

so erhält man als Gesamtdruckhöhe = korrigierte Höhe (Druckhöhe):

$$h' = h + \Delta h = l \cdot \frac{F_2}{F_1} + l \cdot \sin \alpha = l \left(\frac{F_2}{F_1} + \sin \alpha \right).$$

Der Meßdruck $p_1 - p_2$ (bei Differenzdruckmessung) errechnet sich nach der entsprechenden Wichte der Meßflüssigkeit zu:

$$(p_1 - p_2) = h \cdot \gamma = l \cdot \gamma \sin \alpha$$

Bei den Geräten wird die Neigung nicht willkürlich gewählt, sondern man stellt den Neigungswinkel α so ein, daß ein ganzzahliges Verhältnis $\frac{1}{x_1}$ entsteht. Man wählt als Neigung z.B. $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{5}$; $\frac{1}{10}$; $\frac{1}{25}$; $\frac{1}{50}$; $\frac{1}{100}$; $\frac{1}{200}$; das bedeutet: bei der Niveauehebung in der Kapillare um 1 mm hat die Meßflüssigkeit einen Ausschlag oder eine Fadenlänge von 2; 5; 10; ... 100; ... mm, entsprechend den oben angegebenen Werten.

Z.B. soll ein Mikromanometer nach Krell eine Alkoholfüllung mit $\gamma = 0,8 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-3}$ und einem Verhältnis von 1 : 4 haben. Der Neigungswinkel α ist dann:

$$\gamma \cdot \sin \alpha = \frac{h}{l} = \frac{1}{4}$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{4 \cdot \gamma} = \frac{1}{0,8 \cdot 4} = \frac{1}{3,2} = 0,313$$

$$\alpha = 18^{\circ} 14'$$

γ wird, da die Meßflüssigkeit Alkohol und nicht Wasser ist, in der Rechnung berücksichtigt.

Daraus ist zu sehen, daß die Meßflüssigkeit durch ihre Wichte Einfluß auf die Ausschlaglänge bzw. die Empfindlichkeit hat.

Daneben wird die Fadenlänge durch Alkohol länger sein als bei Wasser. Bei 1 : 200 wird α :

$$\gamma \cdot \sin \alpha = \frac{1}{200} ;$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{0,8 \cdot 200} = \frac{1}{160} = 0,00625$$

$$\alpha = 23'$$

Es wird angenommen, daß die Baulänge des Meßrohres $l = 200$ mm ist. Der Meßbereich wird dann bei einem Verhältnis von 1 : 4 sein:

$$\frac{200}{4} = 50 \text{ mm WS}$$

und bei 1 : 200

$$\frac{200}{200} = 1 \text{ mm WS}$$

Daraus ist ersichtlich, daß bei kleinen Drücken und kleinem Meßbereich die Empfindlichkeit am größten ist und umgekehrt.

Bei diesen Manometern ist durch die starke Neigung eine Kapillare mit großem, lichtem Durchmesser wie bei den U-Rohrmanometern nicht mehr möglich, weil die Meniskusbildung sehr erschwert wird. Man verwendet Glasrohre mit einem lichten Durchmesser von etwa 1,5 bis 3 mm. Aber auch hier ist die Abflachung noch sehr stark, so daß man etwas Schwierigkeiten mit der Ablesung hat. Man wird zur Ablesung die obere Meniskus-

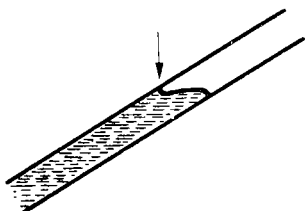


Abb. 7 Meniskusbildung im Schrägrohr

das Einfüllen steigt der Flüssigkeitsspiegel im Gefäß und in dem Meßschenkel um die Höhe $h_0 = l_0 \cdot \sin \alpha$.



Abb. 8 Eichung des Manometers

kante nehmen, da sie noch am schärfsten abgebildet wird (Abb. 7). Andere Fehler können sich durch die Ungleichmäßigkeit des Kapillardurchmessers einstellen.

Die Eichung des Mikromanometers erfolgt durch das Hinzufügen von einer genau gewogenen Meßflüssigkeitsmenge

$$G_0 = V_0 \cdot \gamma_0.$$

$$\text{Es wird: } V_0 = F_1 \cdot h_0 + F_2 \cdot l_0 = \frac{G_0}{\gamma}$$

$$= F_1 \cdot l_0 \cdot \sin \alpha + F_2 \cdot l_0$$

$$= l_0 \cdot (F_1 \cdot \sin \alpha + F_2)$$

$$= l_0 \cdot F_1 \left(\sin \alpha + \frac{F_2}{F_1} \right)$$

$$= \frac{G_0}{\gamma}$$

$$\frac{G_0}{l_0 \cdot F_1} = \gamma \cdot \left(\sin \alpha + \frac{F_2}{F_1} \right) = K$$

K gibt den Übersetzungsfaktor des Mikromanometers an, er entspricht gleich dem Kehrwert der Empfindlichkeit.

Für Wasser als Meßflüssigkeit wird, da $\gamma = 1$ ist:

$$K = \sin \alpha + \frac{F_2}{F_1}$$

Es ergibt sich daraus ohne weiteres die Möglichkeit, bei der Berechnung der Neigung für einen geforderten Übersetzungsfaktor durch die Berücksichtigung des Querschnittsverhältnisses

$\frac{F_2}{F_1}$ einen Fehler durch die Vernachlässigung der Niveauperänderung (Spiegelabsenkung) vollkommen ausschalten.

Von Nachteil bei diesem Mikromanometer ist der elliptische Flüssigkeitsspiegel zu werten, dessen Flächenbestimmung umständlich ist.

2.32 Mikromanometer nach Recknagel - Berlowitz

Die schlechte Flächenbestimmung beim Mikromanometer nach Krell wird bei der Gerätebauart nach Recknagel ausgeschaltet. Man hat hier das Meßrohr nicht starr mit dem weiten Schenkel verbunden, sondern hat es beweglich - schwenkbar - gestaltet. Man kann somit verschiedene Neigungen einstellen und damit mehrere Meßbereiche erhalten, ohne daß das ganze Gerät gehoben werden muß.

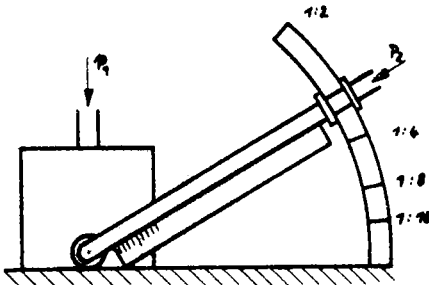


Abb. 9 Mikromanometer nach
Recknagel - Berlowitz

An der Neigungsskala sind aber selten die Gradzahlen angegeben. Man gibt in der Regel gleich die Übersetzungsverhältnisse an. Da die Mikromanometer nach Krell und Recknagel mit einer Alkoholfüllung arbeiten, sind die Verhältniswerte für Alkohol auf der Neigungsskala zu finden. Durch diese Neigungsskala ist

die Einstellung und die Ablesung, also die Betriebsbereitschaft, schneller zu erreichen (Abb. 9).

Dr. Berlowitz hat den Drehpunkt des Meßrohres mit dem Flüssigkeitsspiegel und Nullpunkt zusammengelegt.

2.33 Mikromanometer als Schrägmanometer

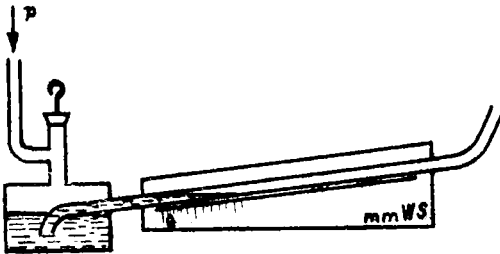


Abb. 10 Mikromanometer als
Schrägrohrmanometer

Neben dem Mikromanometer nach Krell und Recknagel - Berlowitz kennt man noch eine andere Bauart der Kleindruckmanometer. Ebenso wie die vorgenannten Manometer handelt es sich auch hier um Schrägrohrmanometer, die auch nur mit Schrägrohrmanometer benannt

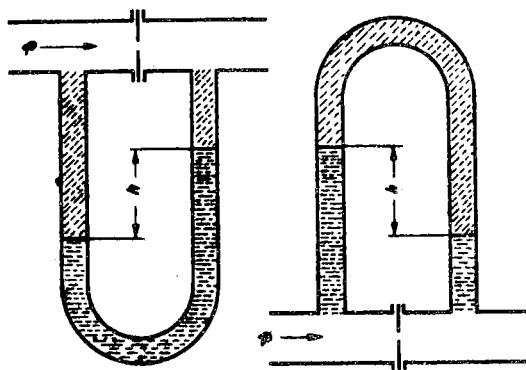
werden. Sie werden im VEB Junkalor, Dessau in verschiedenen Meßbereichen hergestellt.

Bei dem Recknagel - Manometer konnte das Meßrohr verschiedene Neigungen einnehmen; bei dem Schrägrohrmanometer ist die Neigung konstant. Das heißt aber nicht, daß diese Art der Schrägrohrmanometer ausschließlich nur mit einer feststehenden einmal ermittelten Neigung gebaut werden, sondern man kann auch hier verschiedene Neigungen bekommen, nur werden sie vom Hersteller eingestellt und sind dann nicht mehr verstellbar. (Abb. 10). Durch die eingestellte Neigung und Wahl der Meßflüssigkeit können verschiedene Meßbereiche erzielt werden. Je kleiner der Winkel ist, umso größer ist der Ausschlag der Flüssigkeit und die Ablesegenauigkeit. Für die entsprechenden Meßbereiche muß das Schrägrohrmanometer auch entsprechenden Eichungen unterzogen werden.

2.34 Zweistoffmanometer

Das Messen kleiner Drücke kann außer den Geräten mit ungleich weiten Schenkeln auch mit Geräten gleicher Schenkelweite durchgeführt werden. Nur verwendet man nicht eine Sperr- oder Meßflüssigkeit, sondern zwei. Die beiden Flüssigkeiten haben natürlich zwei verschiedene Wichten. Die mit der größeren

Wichte ist immer unter der leichteren angeordnet, gleich ob das Gerät hängend oder stehend angebracht ist (Abb. 11, 12, 13).



Die beiden Flüssigkeiten dürfen einander nicht löslich sein und müssen eine gut erkennbare Trennfläche für eine sichere Ablesung besitzen. Einer Mischung sollen sich die beiden Flüssigkeiten auch widersetzen. Angestrebt wird, daß Flüssigkeiten ausgewählt werden, deren Wich-

Abb. 11 und 12 Zweistoffmanometer in verschiedener Meßstellung

tendenzdifferenz klein ist. Dadurch erreicht man eine größere Empfindlichkeit bei der Messung.

Als zweckmäßig haben sich die in der Tabelle aufgeführten Zusammenstellungen ergeben.

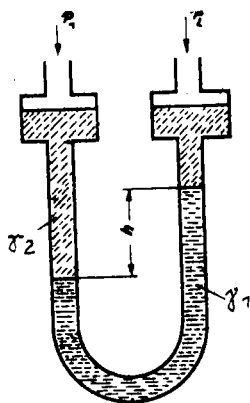
	γ_w	γ_2	$\Delta \gamma$
Wasser und Benzin	1	0,72	0,28
Wasser und Petroleum	1	0,80	0,20
Wasser und Nitrobenzol	1	1,201	0,201
Chloroform und Wasser	1	1,489	0,489
Wasser und Tetrachlorkohlenstoff	1	1,594	0,594
Wasser und Azethylen-tetra-bromid	1	1,954	0,954
Wasser und Gasöl	1	0,81 - 0,86	0,19 - 0,14

Die Flüssigkeiten sind an und für sich farblos, ergeben aber trotzdem eine gute sichtbare Trennfläche durch die verschiedenstarke Lichtbrechung.

Die Gewichts-differenzen der Flüssigkeiten ergeben eine 2 bis rund 7 mal so große Empfindlichkeit wie die reine Wasserfüllung. Jedoch muß bei der Verwendung von Petroleum und haupt-

sächlich Gasöl auf eine langsame Druckveränderung geachtet werden, weil kleine Tröpfchen beim schnellen Wechseln von der übrigen Flüssigkeit losgerissen werden und an der Glaswand hängen bleiben. Dadurch wird aber der Meniskus ungenau und die Ablesung leidet darunter.

In seiner Wirkung kann das Zweistoffmanometer einer Waage gleichgesetzt werden, so daß auch hier eine Gleichgewichtsbedingung aufgestellt werden kann.



$$p_1 + h \cdot \gamma_2 = p_2 + h \gamma_1$$

$$p_1 - p_2 = h \gamma_1 - h \gamma_2$$

$$p = h (\gamma_1 - \gamma_2)$$

$$p = h \cdot \Delta \gamma$$

Abb. 13 Zweistoffmanometer
(für Gasdruckmessung)

Das Zweistoffmanometer nach Abb. 13 wird in den meisten Fällen seinen Zweck erfüllen. Die zwei Niveaubehälter über den Schenkeln sollen einen guten Ausschlag gewährleisten, auch bei Beaufschlagung kleinster Drücke. Außerdem wird sich immer genügend Flüssigkeit in den Schenkeln befinden.

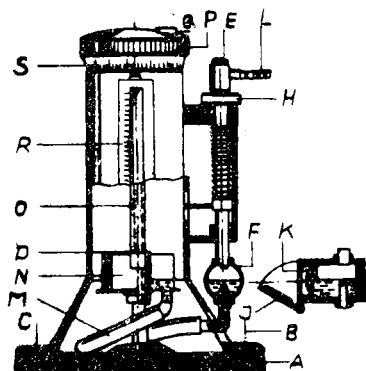
Man kennt drei verschiedene Anordnungen der Zweistoffmanometer. Die einfachste Bauart stellt das hängende Manometer (Abb. 11) dar. Es hat aber einen Nachteil, vor allem dann, wenn das Gerät an irgend welche Leitungen angeschlossen wird. Es kann nämlich möglich sein, daß sich die Zuleitungen durch Schmutzteilchen zusetzen, was zu Meßunsicherheiten führt. Das kann verhindert werden, indem man die Zuleitung nach oben führt, während das Manometer in hängender Stellung bleibt. Trotzdem ist diese Ausführung nicht fehlerfrei. Luftblasen, die eventuell durch unsachgemäßes Füllen in das Gerät gelangt sind, können sich in den Steigleitungen sammeln und das Ergebnis der

Ablesung beeinflussen. Eine Einrichtung zur Entlüftung vorzusehen ist daher notwendig. Die dritte Anbaumöglichkeit ist in Abb. 12 zu sehen. Ein U-Rohrmanometer wird umgekehrt am Meßort befestigt. Diese Manometer haben an der höchsten Stelle ein Nachfüllgefäß (in der Abb. nicht enthalten), damit die Menge der Meßflüssigkeit justiert werden kann. Man muß hierbei aber auf die ständige Füllung der Leitung achten, denn sonst läuft die leichtere Flüssigkeit aus dem U-Rohr heraus, und eine neue Füllung ist erforderlich. Übrigens muß die Prüf- flüssigkeit schwerer sein als die Sperrflüssigkeit.

2.35 Wassersäulenminimeter

Ein weiterer Vertreter der Mikromanometer ist das Wassersäulenminimeter vom VEB Geräte- und Regler-Werk Teltow. Es wird zur Messung von geringen Drücken von 0 bis 150 mm WS verwendet. Der Name des Gerätes weist bereits auf die Verwendung von Wasser als Meßflüssigkeit hin. Zwei miteinander kommunizierende Gefäße bilden das Prinzip des Gerätes. Das Minimeter gewährt eine sehr sichere Anzeige und Ablesung des Druckes. Jedoch muß beachtet werden, daß es sich nicht zur Messung schneller Druckschwankungen eignet. Die sichere Anzeige wird einmal durch die bereits erwähnten Gefäße (Abb. 14: Ausgleichsgefäß N und Beobachtungsgefäß F) und zum anderen durch eine Spitzensonde oder Einstellmarke (Abb. 14: Einstellmarke G) ermöglicht. Meßfehler wie Kapillarwirkung, Auswirkungen der Oberflächenspannung, Verunreinigungen an den Gefäßwänden werden durch die im Querschnitt großen Gefäße und die sich in der Mitte des Beobachtungsgefäßes befindenden Spitzensonde ausgeschaltet.

Das Ausgleichsgefäß ist in der Höhe verstellbar angeordnet und steht durch einen Verbindungsschlauch (M) mit dem Beobachtungsgerät (F) in Verbindung. Ebenfalls unbeweglich angebracht ist die Einstellmarke (G), durch deren Spitze die Nulllinie des Gefäßes bestimmt wird. Wenn das mit Hilfe zweier Stützen (D und L) an zwei Druckräume angeschlossen wird, so findet eine Niveauverschiebung der Flüssigkeitsspiegel in den Gefäßen statt. Um die Nullstellung wieder zu erreichen, wird das Ausgleichsgefäß durch Drehung am Kordelring (P) solange verstellt, bis



- A = Gehäuse
- B = Fußschrauben
- C = Libelle
- D = Schlauchschnippel (-)
- E = Verschlussschraube
- F = Beobachtungsgefäß
- G = Einstellmarke
- H = Kordelmutter
- J = Kippspiegel
- K = Linse
- L = Schlauchschnippel (+)
- M = Verbindungsschlauch
- N = Ausgleichsgefäß
- O = Meßspindel
- P = Kordelring
- Q = Knopf
- R = Maßstab
- S = Feinstellung

Abb. 14 Wasserminimeter

die Spitzensonde und der Flüssigkeitsspiegel im Beobachtungsgefäß eine Linie bilden. Damit ist der Gleichgewichtszustand wieder hergestellt worden. Der Höhenunterschied der Verstellung, der an der Hauptteilung (auch Maßstab R genannt) und an der Feinteilung (S) des Kordelringes abgelesen wird, entspricht der Druckdifferenz der beiden Druckräume. Durch eine optische Einrichtung im Beobachtungsgefäß, kann das Zurückführen des Flüssigkeitsspiegels in die Nullstellung besser beobachtet werden. Mit zwei Fußschrauben und einer Libelle wird ermöglicht, daß das Gerät genau horizontal gestellt werden kann, so daß keine elliptischen Flüssigkeitsspiegel und dem zufolge keine Mißweisung eintritt.

2.36 Ringwaage

Die Ringwaage ist in der Betriebsmeßtechnik noch sehr häufig als Druck-, Differenzdruck- und Vakuummesser anzutreffen. Trotz ihrer Größe - der Ringdurchmesser liegt zwischen 300 und 900 mm - wird sie noch gern verwendet, weil es sich hierbei um sehr genau und empfindlich arbeitendes Gerät handelt, welches bei sachgemäßer Behandlung geringer Wartung und Pflege bedarf. Das Prinzip der Ringwaage ist in Abb. 15 a dargestellt. Ein Ringrohr ist in seinem Mittelpunkt durch eine Schneide oder

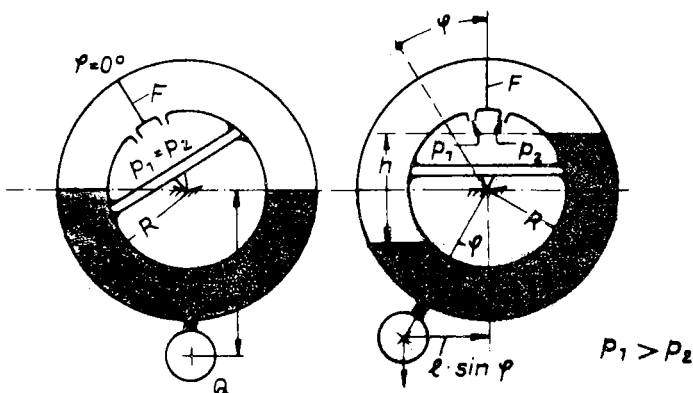


Abb. 15 a

mit einem Kreuzband drehbar gelagert. Als Ringrohrmaterial finden Stahl, Plaste und Glas Verwendung. Durch eine fest eingebaute Trennwand F und eingerüllte Sperrflüssigkeit wird das Ringrohr in zwei Druckräume aufgeteilt. Beiderseits der Trennfläche F sind die Anschlußstutzen für den Druck angebracht, die bei niederen Drücken durch zwei gegensinnig spiralartig gewickelte Metallkapillaren mit dem am Gehäuse angebrachten Ventilblock verbunden sind. Wichtig ist, daß die Druckzuführungen zum Ringrohr kein Moment auf das Ringrohr ausüben. Am Ringrohr selbst ist ein Gegengewicht Q angebracht, welches wie bei der Briefwaage das Rückstellmoment erzeugt. Zur Erklärung der Wirkungsweise des Gerätes benutzen wir wiederum Abb. 15 a. Das linke Bild zeigt die Ringwaage im unbelasteten Zustand. Die Drücke in den beiden Kammern sind hier gleichgroß; die beiden Flüssigkeitsspiegel befinden sich auf gleicher Höhe. Der Schwerpunkt des gesamten Systems befindet sich genau senkrecht unter dem Unterstützungspunkt. Dieser Stellung des Gerätes sei der Ausschlagswinkel $\varphi = 0^\circ$ zugeordnet.

Im rechten Bild der Abb. 15 a sind die beiden Kammern mit den Drücken p_1 bzw. p_2 beaufschlagt. p_1 ist der größere Druck von beiden.

$$p_1 > p_2$$

Wie beim U-Rohr-Manometer stellen sich die Flüssigkeitsspiegel auf die Druckhöhe h ein. Dadurch tritt im Waagesystem ein rechtsseitiges Übergewicht auf, der Gesamtschwerpunkt des Systems liegt rechts vom Unterstützungspunkt. Das so entstehende Moment dreht das Ringrohr im Uhrzeigersinn solange, bis das mit dem Drehwinkel φ anwachsende Gegenmoment das Gleichgewicht wieder herstellt. Der Schwerpunkt liegt dann wieder senkrecht unter dem Unterstützungspunkt. Die Sperrflüssigkeit behält ihre Lage bei der Drehung des Ringrohres bei. Zur Aufstellung der Gleichgewichtsbedingung, aus der wir dann die Anzeigegleichung der Ringwaage herleiten, erinnern wir uns eines Satzes aus der Mechanik: Ein bewegliches System ist dann im Gleichgewicht, wenn die Summe aller angreifenden äußeren Kräfte bzw. Momente gleich Null ist.

Die Drehrichtung der Momente wollen wir positiv annehmen, wenn sie das Ringrohr im Uhrzeigersinn drehen.

1. Moment: Der Druck p_1 wirkt auf die Trennfläche F . Diese Kraft $p_1 \cdot F$ ergibt mit dem Hebelarm R multipliziert das Moment

$$p_1 \cdot F \cdot R$$

2. Moment: Für den Druck p_2 gilt das gleiche wie für p_1 , nur daß das Moment im entgegengesetzten Sinne wirkt, was durch das Minuszeichen ausgedrückt wird.

$$- p_2 \cdot F \cdot R$$

3. Moment: Es wird erzeugt vom Gewicht Q . Q zieht senkrecht nach unten. Sein senkrechter Abstand vom Drehpunkt ist $l \cdot \sin \varphi$. Das Moment wirkt in der gleichen Richtung wie das von p_2 erzeugte:

$$- Q \cdot l \cdot \sin \varphi$$

Die Druckkräfte auf die Flüssigkeitsspiegel kompensieren sich durch die Druckhöhe h der Sperrflüssigkeit. Es sind innere Kräfte und werden nicht berücksichtigt.

Die Gleichgewichtsbedingung lautet somit

$$p_1 \cdot F \cdot R - p_2 \cdot F \cdot R - Q \cdot l \cdot \sin \varphi = 0$$

Lösen wir diese Gleichung nach $\sin \varphi$ auf, dann erhalten wir die Anzeige Gleichung

$$\sin \varphi = \frac{F \cdot R}{Q \cdot l} \cdot (p_1 - p_2)$$

=====

Der Ausschlag φ der Ringwaage erfolgt also proportional der anliegenden Druckdifferenz. Er ist nur von den Geräteabmessungen abhängig. Unabhängig von der Wichte der Sperrflüssigkeit werden bei gleichen Druckdifferenzen immer die gleichen Gewichtsmengen verschoben, die durch das Gegengewicht ausgewogen werden. Bei leichten Flüssigkeiten werden große Volumina, bei schwereren kleinere Volumina, immer aber mit gleichem Gewicht verschoben.

Ist die Wichte bei der Größe des Ausschlages nicht mitbestimmend, so nimmt sie doch Einfluß auf den Meßbereich ΔP der Ringwaage. Für die folgenden Betrachtungen benötigen wir Abb. 15 b. Nehmen wir an, das Ringrohr sei genau bis zur Hälfte mit Sperrflüssigkeit gefüllt. Der Füllwinkel 2α ist

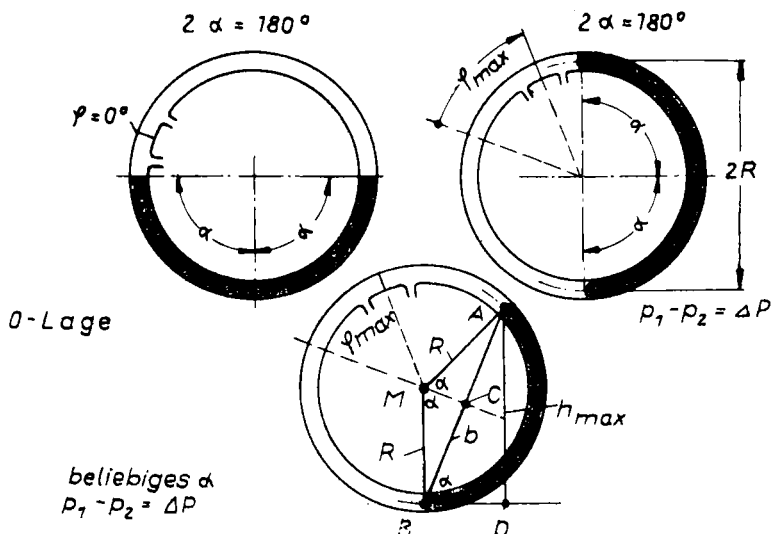


Abb. 15 b

180° groß. Die Größe der maximalen Druckdifferenz, mit der die Ringwaage beaufschlagt werden kann, also der Meßbereich ΔP , wird nach oben begrenzt durch die größtmögliche Druckhöhe h_{\max} , die die Sperrflüssigkeit einnehmen kann. Sie ist bei einem Füllwinkel von $2\alpha = 180^\circ$ gleich $2 R$:

$$\Delta P = 2 R \cdot \gamma \quad \text{für } 2\alpha = 180^\circ$$

Die Verdrehung der Trennwand F kann nach Größe und Lage so bestimmt werden, daß die Ausbildung der maximalen theoretischen Druckhöhe nicht beeinträchtigt wird.

Aus Sparsamkeitsgründen (z.B. bei Hg-Füllung) werden oft die Füllwinkel $2\alpha < 180^\circ$ genommen (siehe untere Skizze Abb.15b). Die maximale Druckhöhe wird dann ebenfalls kleiner. Im gleichschenkligen Dreieck M A B ist die Länge der Basis $\overline{A B} = b$:

$$b = 2 R \cdot \sin \alpha \quad (+)$$

Die Winkel A B D und C M B sind gleichgroß, d.h. $= \alpha$, weil ihre Schenkel paarweise aufeinander senkrecht stehen. Aus dem rechtwinkligen Dreieck B D A läßt sich die maximale Druckhöhe errechnen:

$$h_{\max} = b \cdot \sin \alpha$$

für b (+) eingesetzt:

$$h_{\max} = 2 R \cdot \sin^2 \alpha$$

Für den Meßbereich gilt dann

$$\underline{\Delta P = \gamma \cdot h_{\max} = \gamma \cdot 2 R \cdot \sin^2 \alpha}$$

Die Größe des Meßbereiches ist damit vom spezifischen Gewicht der Sperrflüssigkeit und vom Füllwinkel abhängig.

Die Empfindlichkeit der Ringwaage ist nicht konstant. Das geht sehen aus dem sinusförmigen Zusammenhang zwischen dem Ausschlagwinkel und der Druckdifferenz hervor.

$$\sin \varphi = \frac{P \cdot R}{Q \cdot l} \Delta p \quad \text{mit} \quad \Delta p = p_1 - p_2$$

Aus dieser Beziehung erhalten wir die Empfindlichkeit $\frac{d\varphi}{d(\Delta p)}$ indem wir auf beiden Seiten nach den Veränderlichen implizit differenzieren:

$$\cos \varphi \quad d\varphi = \frac{F \cdot R}{Q \cdot l} \cdot d(\Delta p) \quad \text{oder}$$

$$\frac{d\varphi}{d(\Delta p)} = \frac{F \cdot R}{Q \cdot l} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \quad \text{in} \quad \frac{\text{Bogeneinheiten}}{\text{Druckeinheit}}$$

Da der $\cos \varphi$ mit wachsendem φ ($0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$) kleiner wird, nimmt die Empfindlichkeit mit wachsendem Ausschlag zu. Sie hat ihren kleinsten Wert am Skalenanfang ($\varphi = 0^\circ$; $\cos 0^\circ = 1$) und wird durch die Faktoren $F \cdot R$ und $Q \cdot l$ bestimmt.

Mit der Ringwaage werden Meßbereiche zwischen 0 bis 5 mm WS und 0 bis 3600 mm WS beherrscht. Die Grenze für den größten Ausschlagwinkel liegt bei 30° , bedingt durch die Eigenschaften der Schneiden- und Kreuzbandlagerungen, die bei größeren Ausschlagwinkeln nicht mehr einwandfrei arbeiten. Bei festliegendem maximalen Ausschlag φ muß die Empfindlichkeit für große Meßbereiche kleiner werden als für kleine Meßbereiche.

Hochdruckringwaagen sind daher erkennbar am kleinen Ringrohr-radius R , kleinem Ringrohrquerschnitt F , großer Wichte der Sperrflüssigkeit und der Druckzuführung durch spiralförmige Metallkapillaren. Niederdruckringwaagen besitzen kleines γ , große Querschnitte und Radien. Die Druckzuführung erfolgt über flexible Schläuche.

Übungsaufgabe:

Eine Ringwaage soll für einen Meßbereich von 0 bis 100 mm WS bei einem maximalen Ausschlag von 30° ausgelegt werden. Es steht ein Ringrohr von 64 cm^2 Querschnitt und einem Radius von 11 cm zur Verfügung. Es sind zu ermitteln:

- a) Das notwendige Gewicht Q , wenn sein Abstand vom Drehpunkt mit 15 cm festgelegt ist.
- b) Das kleinste erforderliche spezifische Gewicht der Flüssigkeit bei $2\alpha = 180^\circ$.
- c) Die Empfindlichkeit bei $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 30^\circ$ in Winkelgrad pro mm WS.

Beantworten und begründen Sie die Fragen:

- 4) Ist eine Füllung mit größerem γ möglich?
- 5) Ist eine Füllung mit kleinerem als dem errechneten γ möglich?

Zur Kontrolle:

- 1) $Q = 935 \text{ p}$
- 2) $\gamma = 0,455$
- 3) $\varphi = 0^\circ: \frac{d}{d(\Delta p)} \varphi = 0,288 \frac{\text{grad}}{\text{mm WS}} ; \varphi = 30^\circ: \frac{d}{d(\Delta p)} \varphi = 0,333 \frac{\text{grad}}{\text{mm WS}}$
- 4) Ja! $2\alpha \leq 180^\circ$
- 5) Nein! Die Rechnung ergibt dann einen $\sin^2 \alpha > 1$! Das ist nicht möglich!

2.37 Tauchglockenmanometer

Zur Gruppe der empfindlichen Feindruckmesser gehört auch das Tauchglockenmanometer.

Die Prinzipskizze des Gerätes finden Sie in der Abb. 16. Meßelement ist eine Tauchglocke, die in einem mit Sperrflüssigkeit gefüllten Gefäß schwimmt. Das Innere der Tauchglocke wird über ein Zuleitungsrohr mit dem zu messenden Druck p_u beaufschlagt. Er wirkt auf die innere Ringfläche F_2 der Sperrflüssigkeit. Auf die äußere Ringfläche F_1 wirkt der Luftdruck.

Im unbelasteten Zustand liegen die beiden Flüssigkeitsspiegel F_1 und F_2 auf gleichem Niveau. Die Glocke tauche schwimmend um die Tiefe h_0 ein. Es stehen somit zwei Kräfte im Gleichgewicht:

1. Das Gewicht der Tauchglocke G .
2. Der Auftrieb A_0 , den die Tauchglocke erfährt.

Es gilt die Gleichung

$$G = A_0 \quad \text{oder}$$

$$G = F_B \cdot h_0 \cdot \gamma \quad (a)$$

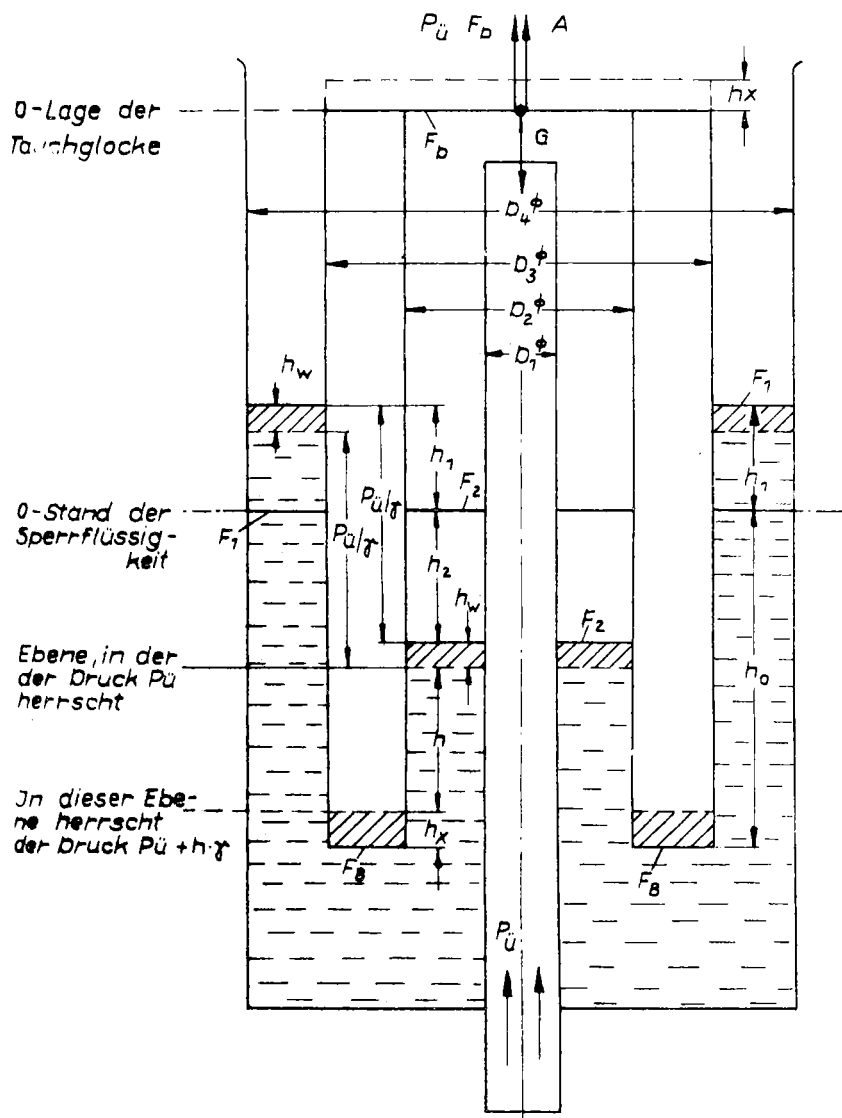


Abb. 16

γ = spezifisches Gewicht Sperrflüssigkeit

F_B = Bodenringfläche der Tauchglocke

$F_B \cdot h_0$ = von der Tauchglocke verdrängtes Flüssigkeitsvolumen

Wird nun der Innenraum der Tauchglocke mit dem Überdruck p_u beaufschlagt, dann nehmen wie in den Schenkeln des U-Rohrmanometers die beiden Flüssigkeitsspiegel F_1 und F_2 ein um

$$H = \frac{p_u}{\gamma} = h_1 + h_2 \quad (b)$$

unterschiedliches Niveau ein.

Gleichzeitig wird aber auch das Gleichgewicht zwischen Glockengewicht G und Auftrieb A gestört. In der Richtung des Auftriebes, also nach oben, wirkt jetzt zusätzlich die Kraft

$$p_u \cdot F_D$$

(F_D = Deckfläche der Tauchglocke)

welche die Tauchglocke um den Weg h_x aus der Sperrflüssigkeit heraushebt. Diese muß das von der Glocke freigegebene Volumen $F_B \cdot h_x$ ausfüllen und sinkt an beiden Flächen F_1 und F_2 um den gleichen Betrag h_w . h_w muß für beide Flächen gleich groß sein, da die Druckhöhe $H = \frac{p_u}{\gamma}$ erhalten bleiben muß! Es gilt für diesen Vorgang

$$F_B \cdot h_x = h_w (F_1 + F_2) \quad (c)$$

Wegen des Austauschens der Glocke wird die von ihr verdrängte Sperrflüssigkeitsmenge und damit der Auftrieb A kleiner.

$$A < A_0$$

Für die neue Ruhelage im belasteten Zustand gilt dann die Gleichgewichtsbedingung

$$G = A + p_u \cdot F_D \quad (d)$$

Der Auftrieb läßt sich als Druckkraft auf die Bodenfläche F_B der Tauchglocke schreiben:

$$A = (p_u + h \cdot \gamma) \cdot F_B \quad (e)$$

Das Gewicht G ist uns aus der Gleichung (a) bekannt. (a) und (e) in (d) eingesetzt:

$$F_B \cdot h_0 \cdot \gamma = (p_u + h \cdot \gamma) F_B + p_u \cdot F_D \quad \text{oder}$$

$$h_0 - h = \frac{p_u}{\gamma} \cdot \frac{F_B + F_D}{F_B} \quad (f)$$

Die Größen h_0 und h selbst können nicht gemessen werden, h_x dagegen sehr gut. Es muß $h_0 - h$ durch h_x ausgedrückt werden. Aus der Skizze lesen wir ab:

$$h_0 = h_x + h + h_w + h_2 \quad \text{oder} \quad h_0 - h = h_x + h_w + h_2 \quad (g)$$

Aus (c) läßt sich berechnen:

$$h_w = h_x \frac{F_B}{F_1 + F_2}$$

Damit wird

$$h_0 - h = h_x \left(\frac{F_1 + F_2 + F_B}{F_1 + F_2} \right) + h_2$$

Mittels der Gleichungen

$$h_1 + h_2 = \frac{p_u}{\gamma} \quad \text{und} \quad F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2$$

kann h_2 berechnet werden:

$$h_1 = h_2 \frac{F_2}{F_1} \quad h_2 \left(\frac{F_2}{F_1} + 1 \right) = \frac{p_u}{\gamma} \quad \text{oder} \quad h_2 \left(\frac{F_1 + F_2}{F_1} \right) = \frac{p_u}{\gamma}$$

$$\text{und} \quad h_2 = \frac{p_u}{\gamma} \cdot \frac{F_1}{F_1 + F_2}$$

Somit wird

$$h_0 - h = h_x \left(\frac{F_1 + F_2 + F_B}{F_1 + F_2} \right) + \frac{p_u}{\gamma} \cdot \frac{F_1}{F_1 + F_2}$$

Wird die letzte Gleichung in (f) eingesetzt, so stehen dort nur mehr p_u und h_x als Unbekannte.

$$h_x \left(\frac{F_1 + F_2 + F_B}{F_1 + F_2} \right) + \frac{p_u}{\gamma} \cdot \frac{F_1}{F_1 + F_2} = \frac{p_u}{\gamma} \cdot \frac{F_B + F_D}{F_B}$$

Löst man diese Gleichung nach h_x auf, dann ist:

$$h_x = \frac{p_u}{\gamma} \cdot \frac{(F_D + F_B) (F_1 + F_2) - F_1 \cdot F_B}{F_B (F_1 + F_2 + F_B)}$$

=====

Die Hubhöhe h_x der Tauchglocke ist dem zu messenden Druck p_u linear proportional!

Für numerische Berechnungen setzt man für die Flächen folgende Werte ein:

$$F_D + F_B = \frac{\pi}{4} D_3^2$$

$$F_B = \frac{\pi}{4} (D_3^2 - D_2^2)$$

$$F_1 + F_2 + F_B = \frac{\pi}{4} (D_4^2 - D_1^2)$$

$$F_1 = \frac{\pi}{4} (D_4^2 - D_3^2)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2)$$

Die Faktoren $\frac{\pi}{4}$ dürfen weggelassen werden. Sie kürzen sich beim Einsetzen in die Tauchglockenformel heraus.

Die Empfindlichkeit der Tauchglocke, d.h. die Änderung des Ausschlages h_x mit der Meßgröße p_u kann durch den Differentialquotienten (DIN 1319)

$$\frac{d h_x}{d p_u} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(F_D + F_B) (F_1 + F_2) - F_1 \cdot F_B}{F_B (F_1 + F_2 + F_B)}$$

dargestellt werden. Sie ist vom spezifischen Gewicht der Sperrflüssigkeit und von den Abmessungen des Gerätes abhängig. Die Abhängigkeit von γ läßt sich unschwer erkennen: je leichter die Sperrflüssigkeit, desto größer die Empfindlichkeit des Gerätes. Um den Einfluß der Geräteabmessungen zu erkennen,

müssen wir eine Vereinfachung annehmen: Die Wandstärke der Tauchglocke soll klein gegenüber dem Durchmesser D_2 sein. Alle Summanden F_B können vernachlässigt werden.

$$\frac{d h_x}{d p_u} \approx \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{F_D (F_1 + F_2)}{F_B (F_1 + F_2)} \quad \text{oder}$$

$$\frac{d h_x}{d p_u} \approx \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{F_D}{F_B}$$

Der Ausschlag $d h_x$ für eine beliebig kleine Druckänderung $d p_u$ wird umso größer, je kleiner die Wandstärke und je größer der Glockendurchmesser ist.

Tauchglockenmanometer werden für Meßbereiche bis zu 10 000 mm WS verwendet.

Übungsaufgabe:

Ein Tauchglockenmanometer habe die Abmessungen

$$D_1 = 7,5 \text{ mm} \quad D_2 = 76,5 \text{ mm} \quad D_3 = 110 \text{ mm} \quad D_4 = 127 \text{ mm}$$

und sei mit Dekolin $\gamma = 0,89 \frac{\text{P}}{\text{cm}^3}$ gefüllt.

Berechnen Sie h_x bei $p_u = 10 \text{ mm WS}$ und die Empfindlichkeit!

$$\text{Zur Kontrolle } h_x = 10 \text{ mm}; \quad \frac{d h_x}{d p_u} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{mm WS}}$$

2.38 Gleicharmige Hebelwaage als Mikromanometer

Mit einer gleicharmigen Hebelwaage, die als Neigungswaage arbeitet, können wie mit dem Mikromanometer sehr kleine Druckdifferenzen oder Drücke gemessen werden. Dieses Gerät besteht aus zwei Gefäßen, die durch eine Leitung miteinander verbunden sind und kommunizierend wirken. Durch entsprechende Zuleitungen können die Gefäße an die zu messenden Drücke angeschlossen werden. Die kommunizierenden Gefäße sind wie die Ringwaage mit Hilfe von Schneide und Pfanne in A drehbar gelagert. Ein Zeiger ist wie bei einer Waage am Gerät befestigt, der den

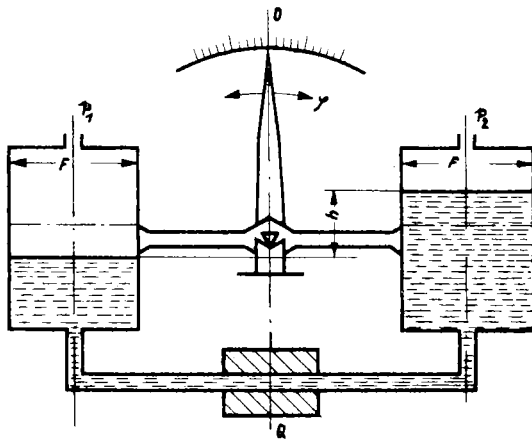


Abb. 17 Gleicharmige Hebelwaage als Mikromanometer

Ausschlag und somit die Druckdifferenz anzeigt. Wenn eine Druckdifferenz

$$p_1 - p_2 = \Delta p$$

auf die Flüssigkeitsspiegel in den Gefäßen wirkt, verschiebt sich die ganze Flüssigkeit um einen bestimmten Betrag h .

$$h = \frac{\Delta p}{\gamma}$$

Die verdrängte Flüssigkeitsmenge ist:

$$\Delta G = h F \gamma$$

Für h den obigen Wert eingesetzt ergibt sich:

$$\Delta G = \Delta p F$$

und daraus:

$$\Delta p = \frac{\Delta G}{F}$$

Unter der Einwirkung des Gewichtes ΔG schlägt die Waage um einen bestimmten Winkel φ aus, der dann für die Messung des Druckes gebraucht wird.

Um eine gute Empfindlichkeit des Gerätes zu erhalten, wählt

man einen großen Gefäßdurchmesser, weil die Empfindlichkeit dem Gefäßquerschnitt proportional ist.

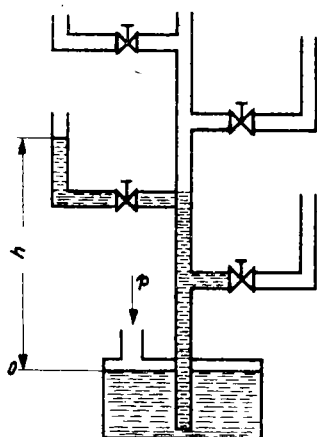
Das Hebelwaagenmanometer besitzt noch ein Gegengewicht Q , das durch seine Größe den Meßbereich des Gerätes bestimmt. Durch Veränderung des Gewichtes kann auch der Meßbereich geändert werden.

Als Füllung der Gefäße können beliebige Flüssigkeiten verwendet werden (Abb. 17).

2.4 Manometer für höhere Drücke

2.41 Quecksilbermanometer für höhere Drücke

Diese Manometer sind direkt oder unmittelbar anzeigende Geräte. In der Regel werden mit den einfachen Quecksilbermanometern nur mittlere Drücke gemessen. Man hat aber auch versucht, Manometer herzustellen, die mehr als 2 bis 3 at messen können. Für den ständigen Gebrauch konnte jedoch kein brauchbares Gerät hergestellt werden, weil das Glasrohr dem Druck des Quecksilbers nicht gewachsen ist. Außerdem würden die dafür benötigten Rohre über 3 m Länge annehmen. In der Phys.-Techn.-Reichsanstalt befindet sich ein Manometer mit einer Meßlänge von 10 m. Man hat jedoch kein Glasrohr als Standrohr verwendet, sondern ein Stahlrohr, das das Gewicht und den Druck vom Quecksilber aushält. Das Stahlrohr ist aber undurchsichtig und würde keine Meniskenbildung zulassen. Aus diesem Grunde sind dem Stahlrohr in Abständen von 1 m Glasröhren von 1 m Länge parallel angeschlossen, die absperrbar sind. Mit Hilfe dieser Glasröhren ist eine Ablesung im betreffenden Druckbereich möglich. Dieses Manometer hat aber einige Nachteile. Es ist kein Gerät für die Praxis. Schon allein durch seine Größe (10 m) wirkt es zu sperrig und wird dadurch unbrauchbar. Die Verschraubungen können nur sehr schwer abgedichtet werden, vor allem, weil auch noch einatomige Quecksilbermoleküle durch das Stahlrohr oft hindurchdringen können und dadurch Meßungenauigkeiten hervorrufen.



Ferner muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß bei dieser Höhe die Quecksilbersäule verschiedene Temperaturen einnimmt. Das bedeutet aber wiederum eine Meßungenauigkeit, weil die Wichte unterhalb der Quecksilbersäule verschieden ist und mit ihr die Ausdehnung des Quecksilbers. Um die Temperatur konstant zu halten, muß ein wasserdurchflossener Kühlmantel um das Stahlrohr gelegt werden.

Abb. 18 Quecksilbermanometer für hohe Drücke

2.42 Mehrkammer - Quecksilbermanometer

Der Nachteil des vorherbeschriebenen Gerätes wird durch die Bauart des in diesem Abschnitt erklärten Gerätes vermieden, allerdings unter Verzicht auf die große Empfindlichkeit.

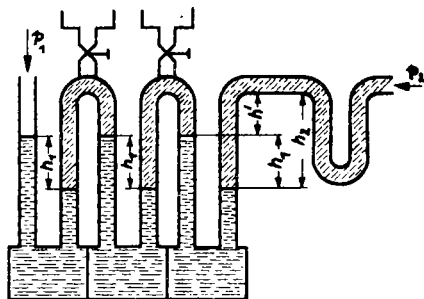


Abb. 19 Mehrkammermanometer
ist nicht vorgeschrieben.

Die Abb. 19 zeigt uns das Mehrkammermanometer. Man sieht, daß die U-Rohre umgekehrt in Behältern angebracht sind und je zwei benachbarte Kammern verbinden. Die U-Rohre sind etwa 0,5 m lang und sollen möglichst den gleichen lichten Durchmesser besitzen. Die Anzahl der U-Rohre

Da die Quecksilbersäule den oberen Bogen der Rohre nicht ausfüllen darf, so würde, wenn sich dort Luft befände, keine Druckübertragung von einer Kammer zur anderen erfolgen. Um aber die Übertragung doch vornehmen zu können, wird eine zweite Flüssigkeit - gewissermaßen eine Sperrflüssigkeit zwischen die benachbarten Quecksilbersäulen - in die Rohre gefüllt. Der Billigkeit halber nimmt man Wasser. Es ist aber darauf zu achten, daß das Wasser keine Luftblasen enthält. Man muß darum entsprechend vorsichtig die Verbindungsbögen der Rohrschenkel mit Wasser durch den Hahn anfüllen. Luftblasen beeinträchtigen die Meßgenauigkeit, weil die Übertragung durch das Zusammendrücken der Luftblasen oder durch die Auflösung der Luft im Wasser bei dem hohen Druck nicht ordentlich erfolgt. Als Sperrflüssigkeit kann nicht jede Flüssigkeit genommen werden, da sie sich mit der Meßflüssigkeit keinesfalls vermischen und verbinden darf (siehe auch Zweistoffmanometer).

Wenn ein Druck auf das Gerät beaufschlagt wird, so muß bei gleichem lichten Durchmesser die Meßflüssigkeit in den einzelnen Schenkeln gleich hoch sein. Das ist bedingt durch die Veränderung der gleichen Volumen in den Rohren und Kammern.

Man erhält die Gesamtquecksilberhöhe H , indem man die Höhe der einzelnen Säulen in den Rohrschenkeln summiert: $h_1 + h_2$. Sind die Querschnitte der Rohre gleich, so braucht man nur eine Einzelhöhe h zu nehmen, um den aufgetretenen Druck zu bestimmen. Es ist aber dabei zu beachten, daß in jedem Einzelmanometer eine gleich große Wassersäule der Quecksilbersäule entgegenwirkt, so daß der Druck sich wie folgt errechnet.

$$p = n \cdot h \cdot (\gamma_{Hg} - \gamma_w) - h' \cdot \gamma_w$$

oder
$$p = n \cdot h \cdot \gamma - h' \cdot \gamma_w$$

γ_{Hg} = Wichte von Quecksilber

γ_w = Wichte von Wasser

$h' \cdot \gamma_w$ ist eine Korrektur, die durch die freie Wassersäule über dem ersten Manometer erzeugt wird. Diese Wassersäule darf aber nicht veränderlich sein, damit die Höhe h' meßbar

ist. Um das zu erreichen, wird in der Anschlußleitung eine sogenannte Niveaurührschlange eingebaut, die eine größere Menge von Wasser besitzt und so keine beachtenswerte Veränderung zuläßt.

2.43 Gasmanometer

Neben den zwei behandelten Manometern zur Messung höherer Drücke gibt es noch eine dritte Bauart, die mit Gasmanometer bezeichnet wird, weil sich über der Meßflüssigkeit ein Gas befindet. Das Meßrohr ist an einem Ende zugeschmolzen, damit der Stickstoff oder auch Wasserstoff, den man zur Gasfüllung nimmt, nicht nach oben entweichen kann. Nach unten hin wird dem Gas der Austritt durch Quecksilber als Meßflüssigkeit versperrt.

Auch hier gilt die Forderung, daß sich Meßflüssigkeit und Gasfüllung miteinander nicht verbinden dürfen.

Von der Gasfüllung wird weiterhin verlangt, daß sie einen sehr tiefen Siedepunkt besitzt und innerhalb eines großen Meßbereiches dem Gasgesetz folgt. Bei Stickstoff und Wasserstoff sind diese Bedingungen vorhanden. Das Gas übt einen Druck auf die Flüssigkeit aus, den man nach der allgemeinen Zustandsformel für Gase wie folgt festlegt zu:

$$p' \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

p' = Druck der Gasfüllung

V = Volumen des Gases

n = Anzahl der Gasmole

R = allgemeine Gaskonstante

T = absolute Temperatur in $^{\circ}\text{K}$

Der Druck des Gases p' oberhalb der Quecksilbersäule ist um den Wert $(h + h_0) \cdot \gamma$ kleiner als der zu messende Druck p . Danach würde sich p errechnen lassen zu:

$$p = p' + (h + h_0) \cdot \gamma_0$$

Wenn das Manometerrohr einen gleichbleibenden Wert F des Querschnittes besitzt, so kann für das Gasvolumen folgendes geschrieben werden:

$$V = (H - h) \cdot F$$

bei dem oben genannten Gasdruck p' .

Damit würde aber der zu messende Druck sein:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{(H - h) \cdot F} + (h + h_0) \cdot \gamma_0$$

Gasmanometer, die dieser Gleichung gehorchen, d.h. die einen gleichmäßigen Querschnitt F besitzen, haben keine gleichbleibende Empfindlichkeit bei zunehmendem Druck. Aus der graphischen Darstellung (Abb. 20) kann man entnehmen, wie sich die

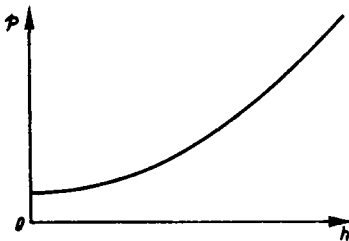


Abb. 20 Charakteristik des Gasmanometers

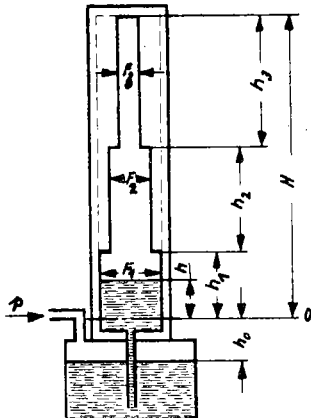


Abb. 21 Gasmanometer

Anzeigeempfindlichkeit zum Druck verhält. Man erkennt, daß die größte Empfindlichkeit, d.h. der größte Flüssigkeitsausschlag bei kleinen Drücken erfolgt. Je höher der Druck ist, um so kleiner wird die zunehmende Höhe und somit auch die Empfindlichkeit.

Dies ist ein Nachteil bei Gasmanometern mit gleichbleibendem Rohr. Um die Empfindlichkeit auch für höhere Drücke annähernd so groß zu gestalten wie in der Nähe des Nullpunktes, hat man das Manometerrohr mit mehreren Durchmessern versehen, wie die Abb. 21 zeigt. Hier wird das Volumen berechnet aus:

$$V = (H_1 F_1 + H_2 F_2 + H_3 F_3)$$

Das Diagramm (Abb. 22), das zu diesem Gasmanometer gehört, beweist, daß tatsächlich die Empfindlichkeit günstiger ist.

Wichtig ist aber hierbei, daß man das Gerät bei einer konstanten Temperatur arbeiten läßt, weil durch veränderliche Temperaturen der Gasdruck sich ändert

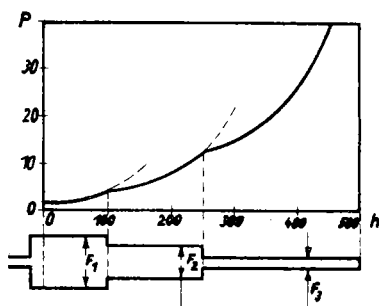


Abb. 22 Charakteristik des Gasmanometers mit abgesetztem Rohr

2.44 Kolbenmanometer

Bei den Kolbenmanometern wirkt der zu messende Druck auf einen Kolben, der in einen Zylinder druckdicht eingeschliffen oder eingedichtet ist. Durch auflegen von bekannten Gewichten auf den Kolben wird ein Gegendruck erzeugt (Abb. 23). Die aufgelegten Gewichte werden solange verändert, bis sie dem zu messenden Druck das Gleichgewicht halten. Danach ist der Druck

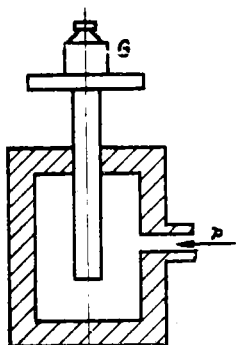


Abb. 23

$$p = \frac{G}{F}$$

Man kann also, da die Größe der Gewichte und der Querschnitt des Kolbens bekannt sind, den Druck errechnen.

Die Kolbenmanometer werden sowohl als Betriebsmeßgeräte als auch zur Eichung von Metallmanometern verwendet. Sie werden in verschiedenen Ausführungen mit verschiedenen großen Meßbereichen hergestellt. Mit Kolbenmanometern lassen

sich Drücke zwischen etwa 1 bis 30 000 at messen. Bestrebungen sind im Gange, mit ihnen sogar bis 100 000 at zu messen.

Die Meßbereiche werden erreicht durch die verschiedene Größe des Kolbens. Man wählt zum Messen von hohen Drücken Kolben mit kleinen Querschnitten und umgekehrt, will man niedere Drücke messen, so nimmt man Kolben mit größeren Querschnitten. Bei sehr hohen Drücken, wo die Kolben verhältnismäßig dünn werden, verwendet man einen Differentialkolben (Abb. 24), dessen Ringfläche die wirksame Kolbenfläche ergibt. Um einer

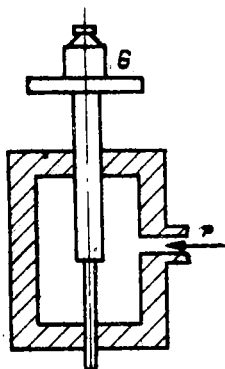


Abb. 24 Kolbenmanometer mit
Differentialkolben

Knickung des Kolbens entgegen zu wirken, braucht man die Gewichte - wie es allgemein üblich ist - nicht aufzustellen, sondern kann sie anhängen. Bereits erwähnt wurde das druckdichte Einschleifen des Kolbens. Es soll die Reibung zwischen Kolben- und Zylinderwand verringern, um ein entsprechend schnelles Ansprechen des Gerätes auf Druckänderungen zu bekommen. In der Regel führen die Kolben nicht nur eine vertikale

Verschiebung (hervorgerufen durch Druckänderung) durch, sondern werden während des Meßvorganges in Drehung versetzt, die die weitere Verminderung der Reibung zum Zwecke hat. Der Kolbenantrieb wird in vielen Geräten durch einen kleinen Motor vorgenommen, jedoch auch der Handantrieb ist in Anwendung.

Die aufgesetzten oder angehängten Gewichte dienen, wie bereits erwähnt, zum Ausgleichen des Druckes. Man verwendet aber nicht nur diese - offensichtlich von Hand regelbare - Ausgleiche. Pendelgewichte, Federkraft oder hydraulische Gegenkraft werden ebenfalls zum Ausgleich verwendet.

2.441 Spindelpresse, Eichwaage oder hydraulisches Kolbenmanometer

Bei der Spindelpresse (Abb. 25) wird der Ausgleich mit der Hand vorgenommen. Sie dient ausschließlich zur Eichung von Metallmanometern. Als Füllung wird Rizinusöl verwendet.

Arbeitsweise der Spindelpresse:

Auf den Anschlußstutzen wird ein Metallmanometer gesetzt. Es wird, nachdem der Hahn geöffnet worden ist, mit Hilfe der Öldruckpresse von Hand belastet. Der angezeigte Druck wird festgehalten. Man nimmt den Druck wieder weg, verschließt den Hahn und setzt auf den Kolben ein dem angezeigten Druck ent-

sprechendes Gewicht. Danach wieder den Hahn öffnen, sodaß das Gerät wieder belastet wird. Jetzt erfolgt der Vergleich zwischen der ersten und der zweiten Druckangabe und die eventuell notwendige Justage des Gerätes wird von solchen Vergleichen gesteuert.

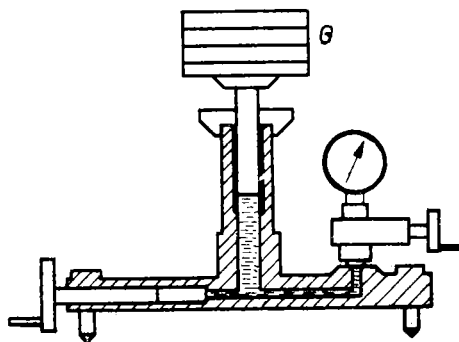


Abb. 25 Spindelpresse

2.442 Kolben - Differenzdruckschreiber (Abb. 26)

Der Druckausgleich wird hier durch ein Pendelgewicht vorgenommen, das durch ein Stahlband mit dem Kolben, der durch einen Motor angetrieben wird, verbunden ist.

Der Kolben wird von zwei Drücken (p_1 und p_2), deren Differenz gemessen werden soll, hydraulisch vertikal verschoben. Dadurch wird aber das Pendelgewicht angeregt und schlägt dann soweit aus, daß es der Druckdifferenz die Waage hält.

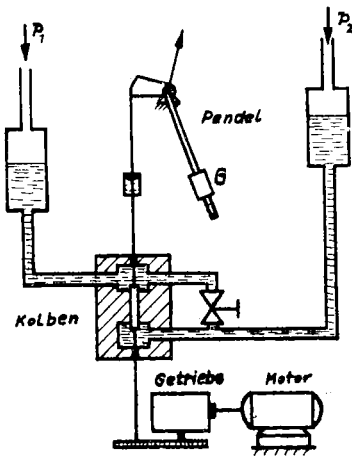


Abb. 26

Kolben - Differenzdruck-
schreiber

2.443 Kolbenmanometer mit Federausgleich

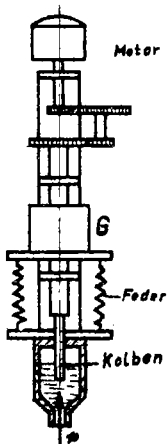


Abb. 27 Kolbenmanometer
mit Federausgleich

Bei dieser Art Kolbenmanometer hat man als Ausgleichsgewicht die Kraft einer Zug- oder Druckfeder verwendet. Abb. 27 zeigt ein Gerät, das mit zwei Zugfedern als Ausgleichsgewicht ausgestattet ist. Bei der vertikalen Verschiebung des Kolbens, die durch einen Druck p erzeugt wird, werden die Federn gespannt und verursachen eine Gegenkraft, die den Ausgleich schafft. Durch ein Zahnradgetriebe wird dann wieder eine Vergrößerung des Zeigerausschlages erzielt. Der Motor sorgt durch ständiges Drehen des Kolbens für kleine Reibung.

2.5 Vakuummeter

Oftmals machen sich in der Technik Druckmessungen gegen ein Vakuum notwendig und man ist gezwungen, entsprechende Meßgeräte für diese Druckmessung zu entwickeln. Es stehen eine ganze Anzahl von Manometern zur Verfügung, die man Vakuummeter nennt.

Fast jedes der besprochenen Manometer kann ein Vakuummeter durch geringfügige Änderung werden.

Bei den U - Rohrmanometern braucht nur ein Schenkel zugeschmolzen zu werden, um ein Vakuummeter zu erhalten. Der offene Schenkel wird an den zu messenden Druck angeschlossen.

Auf ähnliche Weise kann auch mit einigen anderen Manometern verfahren werden.

Außer diesen Möglichkeiten gibt es aber noch weitere Geräte, die von Haus aus zur Vakuummessung bestimmt sind.

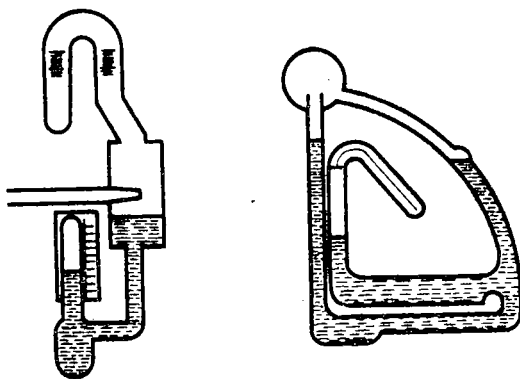


Abb. 28 Vakuummeter nach Meyeren und Moser

Folgende Vakuummeter sind gebräuchlich:

Mosersches Vakuum - Manometer

Mc Leodsches Vakuummeter

v. Meyersches Vokuskop

Glasfederrohr Vakuummeter (Abb. 28)

3. Mittelbar anzeigende Druckmesser

3.1 Metallmanometer

Bei den Metallmanometern wird zur Druckanzeige keine Flüssigkeit, sondern ein geeignet geformter dünnwandiger Hohlkörper oder ebene Körper angenommen. Durch entsprechenden Druckunterschied zwischen Innen- und Außendruck wird der Körper diesem Druck folgen und eine angepasste Formänderung erhalten. Diese Formänderung ist ein Maß für die zu messende Druckdifferenz. Der aufgebrachte Druck darf aber in keinem Fall die Elastizitätsgrenze des Körpers überschreiten, da sonst teilweise bis völlig bleibende Formänderungen des Meßkörpers entstehen, die entweder eine Verstellung der Nullpunktlage ergeben oder sogar das Meßgerät wegen Überbelastung unbrauchbar machen.

Die Metallmanometer haben, im Vergleich mit den Flüssigkeitsmanometern, einige Vorteile, wie aus dem Folgenden zu ersehen ist. Die Metallmanometer sind fast unabhängig von einer bestimmten Gebrauchslage. Sie sind nicht empfindlich gegen Kipungen.

Man verwendet sie hauptsächlich zur Messung von höheren Drücken. Oftmals ersetzen sie die Flüssigkeitsmanometer, vor allem, wenn größere Betriebswiderstandsfähigkeit erforderlich ist. Sie sind demnach nicht so empfindlich gegen mäßige mechanische Beanspruchung. Im Verhältnis zu den Flüssigkeitsmanometern sind die Metallmanometer kleiner und handlicher. Sie eignen sich gut für eine Fernanzeige und für eine Registrierung.

Man kennt grundsätzliche Gerätebezeichnungen bei den Metallmanometern.

Als Manometer werden Überdruckanzeiger angesehen, deren Meßglied (Hohlkörper) an den Überdruck angeschlossen wird. Eine andere Art der Druckmesser sind die Vakuummeter, deren Hohlraum an einen Unterdruck angeschlossen ist, der vom Gerät angezeigt wird.

Beide Geräte können in einem vereint werden, so daß sowohl Überdruck als auch Unterdruck von ihnen gemessen werden kann. Man nennt sie Manovakuummeter. Sie besitzen als äußeres Merkmal zwei Anschlußstutzen.

Die Hohlkörper, die die Anzeige ermöglichen, sind heute fast ausschließlich aus metallischen Werkstoffen hergestellt. Selten wird Ballonstoff genommen. Er ist nicht so widerstandsfähig wie das Metall. Die Metalle müssen sämtlich eine gute Elastizität besitzen (es sind zumeist Federwerkstoffe). Es ist darauf zu achten, daß sich der Federwerkstoff nicht mit den zu messenden Flüssigkeiten oder Gasen verbindet. Eine zu große Erwärmung des Werkstoffes soll wegen der Änderung des Elastizitätsmoduls mit der Temperatur vermieden werden. Falls höhere Betriebstemperaturen vorhanden sind, soll das Gerät entsprechend gekühlt werden. Die Ausdehnung des Meßkörpers durch die Temperatur bringt Ungenauigkeit bei der Anzeige. Allgemein wird man als Werkstoff für das Meßglied

Messing, Bronze, Neusilber, Nickel	für Drücke bis 100 at
Kupfer, Beryllium, Stahl	für Drücke von 100 - 300at
und Chrom-Nickel-Stähle	für Drücke über 300 at

nehmen.

Man unterscheidet folgende Geberarten, die auch gleichzeitig den jeweiligen Manometern ihre Bezeichnung geben:

Plattenfederanometer,
Kapselfederanometer,
Dosenfederanometer,
Röhrenfederanometer.

3.11 Plattenfederanometer

Bei den Plattenfederanometern (Abb. 29) hat der Geber die Gestalt einer Platte, auch Membrane genannt, die am Rand zwischen den Flanschen eines Gehäuses fest eingespannt ist. Durch die Elastizität der Metallmembrane entsteht durch die Druckeinwirkung eine Durchbiegung, die zur Anzeige verwendet wird.

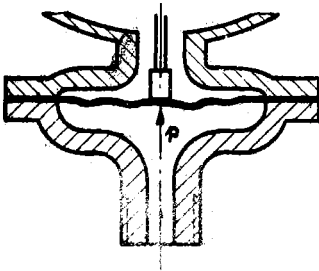


Abb. 29 Plattenfedermanometer

In einem bestimmten Druckbereich erhält man eine lineare Teilung der Skala, weil die Durchbiegung der Platte dem Druck fast proportional ist. Allerdings ist die Membrane nicht flach, sondern besitzt konzentrische, wellenförmige Wellen. Diese Wellen werden durch den Druck vergrößert und eine eindeutige

punktlage nicht gegeben. Auch würde ein Überlasten (Durchreißen) der Membrane möglich sein, das aber nicht zulässig ist. Von der Platte wird der Druck (Zeigerrichtung) aufgenommen und auf eine in der Membranenmitte angebrachte Stange übertragen. Von hier wird der entstandene Hub auf ein Zahnradgetriebe weitergeleitet, das die Aufgabe hat, den Hub vergrößert an einen Zeiger weiterzugeben. Man verwendet die Plattenfedermanometer je nach ihrer Bauart für kleine bis mittlere Drücke. Der kleinste Meßbereich ist 0 - 160 mm WS, der größte 0 - 16 at. Dabei muß aber beachtet werden, daß der Skalenendwert um etwa $\frac{1}{3}$ größer sein muß, weil die Federmanometer, um sie vor Überlastung zu schützen, nur bis etwa $\frac{2}{3}$ des Skalenendwertes belastet werden dürfen. Bei zeitlich schnell und mit großer Amplitude schwankenden Drücken sollten die Meßwerte nur etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ des Skalenumfanges betragen! Man schützt allerdings die Geräte bereits durch eine entsprechende Konstruktion vor Überlastung, indem man eine Grenzfläche im Gerät einbaut, an die sich die Membrane bei zu hohem Druck anschmiegt und vor Schaden geschützt wird. Die Grenzfläche nimmt dann den Druck auf. Die verschiedenen Meßbereiche erhält man durch Veränderung des Membranenddurchmessers und der Membranenddicke, d.h. Membranen mit großem Durchmesser sprechen bei wesentlich kleineren Drücken an als Membranen mit kleinem Durchmesser. Ähnlich verhält es sich mit der Dicke der Membrane. Eine dünne Membrane zeigt schneller eine Durchbiegung an als eine dicke. Man kann einen bestimmten Ausschlag sowohl mit einer

großen und dicken als auch mit einer kleinen, dünnen Membrane erreichen.

Plattenfedern haben zwei wichtige Vorteile. Einmal haben sie eine geringe Erschütterungsempfindlichkeit, da eine geringe Masse vorhanden ist, und zum anderen besitzen sie eine einfache Anpassung an korrodierende Medien (vor die Membrane wird eine dünne Schutzhaut gebracht). Ein Nachteil ist die erwähnenswerte größere Temperaturempfindlichkeit, die durch die feste Einspannung der Membrane begründet ist. Bei Temperaturschwankungen treten zusätzliche radiale Spannungen in der Membrane auf.

3.111 Druckmesser mit schlaffer Membrane

Membranen mit sehr kleiner Steifigkeit werden in Verbindung mit Zug- oder Druckfedern hauptsächlich dann eingesetzt, wenn es darauf ankommt, einen dem zu messenden Druck möglichst genau proportionalen Weg oder in Kraftkompensationssystemen (z.B. in Transmittern) ohne Stützfeder eine dem Druck genau proportionale Kraft zu erzeugen. Bei den Metallmembranen bereitet die Einhaltung dieser Forderungen stets Schwierigkeiten, wenn ihr Ausschlag nicht auf ein sehr geringes Maß (klei-

ner als die Wandstärke der Membran!) begrenzt wird. Den prinzipiellen Aufbau eines Druckmessers mit schlaffer Membran zeigt Abb. 29 a. Zwischen den Flanschen der Dose D ist eine schlaaffe Membran M frei eingespannt, so daß sie die Dose in zwei getrennte Räume einteilt. Der obere Hohlraum ist mit der Atmosphäre, der untere über dem Anschlußstutzen A mit dem zu mes-

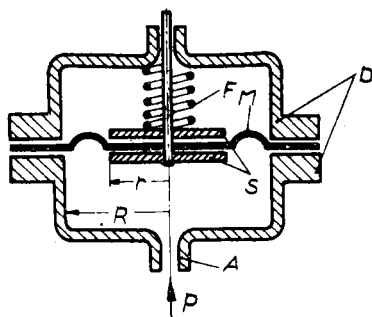


Abb. 29 a

senden Objekt verbunden. Die Membran ist aus Gummi, Leder oder Kunststoff hergestellt. Im mittleren Teil ist sie mit zwei Metallscheiben S dicht verbunden. Die obere Scheibe ist mit einem Stift versehen, der die Bewegung der Membran nach außen überträgt. Die auf die Membran wirkende Druckkraft P wird von der Druckfeder F aufgenommen, deren Weg S unter der Kraft F

$$S = \frac{P}{C} \quad \text{ist} \quad C = \text{Federkonstante.}$$

Die Membran hat hier nur eine abdichtende und die Druckkraft aufnehmende Funktion, während das eigentliche elastische Meßelement die Feder F ist (siehe Dubbel und Hütte, Federbrechungen). Es bleibt nun noch eine Frage offen: Wie groß ist die Kraft P, die von den Metallscheiben und der Membran auf die Feder übertragen wird? Offensichtlich ist sie das Produkt aus dem angelegten Druck p und einer wirksamen Fläche F_{eff} .

$$P = p \cdot F_{\text{eff}}$$

Von der wirksamen Fläche kann gesagt werden, daß sie in den Grenzen

$$\pi R^2 > F_{\text{eff}} > \pi r^2 \quad (\text{Abb. 29 a})$$

liegt. Der Druck auf die Metallscheibenfläche πr^2 wird voll auf die Feder übertragen. Nicht aber der Druck auf die Ringfläche der Membran, deren Kräfte am äußeren Rand vom Gehäuse, am inneren Rand von der starren Metallscheibe und somit von der Feder aufgenommen werden. Die relativ einfache Berechnung der effektiven Fläche nach den Grundgesetzen der Mechanik ergibt:

$$F_{\text{eff}} = \frac{\pi}{3} \cdot (R^2 + Rr + r^2)$$

Mit sehr guter Näherung darf gesetzt werden

$$F_{\text{eff}} \approx \frac{\pi}{4} (R^2 + 2 \cdot Rr + r^2) = \pi \cdot \left(\frac{R+r}{2}\right)^2 \quad \text{oder}$$

$$F_{\text{eff}} \approx \frac{\pi(D+d)^2}{16} \quad D = 2R; \quad d = 2r.$$

Der vom Meßsystem unter dem Druck p zurückgelegte Weg S ist dann:

$$S = \frac{p}{C} = \frac{p \cdot F_{\text{eff}}}{C} = p \frac{\pi(D+d)^2}{16C}$$

Meßwerke dieser Art werden vor allem in Druckreglern verwendet (Niederdrucksystem und Modellregelkreis von ARW Teltow), weil man die Federspannung von außen verändern kann, ferner in pneumatischen und elektrischen Druckwandlern, den sog. Transmittern, oft auch anstelle von Plattenfedermanometern. Dasselbe Prinzip finden wir auch an pneumatischen Stellmotoren für Regelventile angewendet. Üblich sind Meßbereiche zwischen 0 bis 5 mm WS und 0 bis 300 mm WS Druck, Zug oder Differenzdruck.

Übungsaufgabe:

Ein Druckmesser mit schlapper Membran soll bei einem Meßbereich von 0 ... 300 mm WS einen Ausschlag von 10 mm aufweisen. Der größte freie Membrandurchmesser sei 100 mm, der Durchmesser der starren Scheiben 80 mm.

- Wie groß muß die Federsteifigkeit C sein?
- Um wieviel mm muß die Feder vorgespannt werden, wenn das Gerät erst bei 100 mm WS Druck ansprechen soll?

Lösung:

- $C = 1,9 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$
- $S = 3,3 \text{ mm.}$

3.12 Dosenfedermanometer

Diese Art der Metallmanometer kann als Weiterentwicklung der Plattenfedermanometer angesehen werden. Zwei Metallplatten - genau so gestaltet wie die Platten beim Plattenfedermanometer (also auch mit konzentrischen, ringförmigen Wellen) - werden übereinandergelegt und am Rande verlötet, so daß man eine Dose erhält. Die eine Platte ist in ihrem Mittelpunkt durchbohrt (Abb. 30) und liefert so den Druckanschluß. Dosenfedermanometer sind für schnelle Druckänderungen geeignet und ihre Anzeige ist auch nicht so temperaturabhängig wie die der Platten-

federmanometer. Bei Temperaturänderungen können beide Membranen frei arbeiten, weil die Dose nur in den Mittelpunkt beider Membranen gehalten wird und dadurch keine zusätzlichen Radialspannungen auftreten können.

Ein Dosenfedermanometer hat bei gleichem Druck eine größere Durchbiegung als die Plattenfeder gleicher Dicke und gleichen Radius. Das Verlöten zweier Platten zu einer Dose bedeutet nichts anderes als das Hintereinanderschalten zweier Federn mit den Federkonstanten c_1 und c_2 zu einer neuen Feder mit der Federkonstanten c_D . Nach den Grundgesetzen der Mechanik gilt dann:

$$\frac{1}{c_D} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} .$$

In den meisten Fällen wird die Dose aus zwei gleichseitigen Membranen zusammengesetzt, so daß

$$c_1 = c_2 = c \text{ ist.}$$

Dann gilt

$$\frac{1}{c_D} = \frac{1}{c} + \frac{1}{c} = \frac{2}{c} \quad \text{oder} \quad c_D = \frac{c}{2} .$$

Der Weg S , den eine Plattenfeder oder eine Dosenfeder unter dem Druck p zurücklegt, beträgt:

$$S = \frac{p \cdot F}{c} \quad \text{bzw.} \quad S_D = \frac{p \cdot F}{c_D} = \frac{2 p \cdot F}{c}$$

F = Plattenfläche.

Also $S_D = 2 S$!

Eine Dose legt unter gleichem Druck den doppelten Weg einer Plattenfeder gleicher Fläche und gleicher Dicke zurück! Das hat zur Folge, daß man Geräte mit sehr kleinem Meßbereich (etwa 0 bis 10 mm WS) herstellen kann. Der maximale Meßbereich, der mit Dosenfedern erfaßt wird, hat eine Größe von 0 ... 1000 mm WS.

An der zweiten Platte ist wieder ein Stab befestigt, der genau wie beim Plattenfedermanometer die Bewegung der Dose auf

ein Zahnradgetriebe und von dort auf einen Zeiger überträgt. Das Zahnradgetriebe soll auch hier die Vergrößerung des Hubes der Dose ermöglichen. Im allgemeinen können die Dosenfedermanometer kleinere Überbelastungen aushalten. Man kann jedoch auch hier einen Überbelastungsschutz vorsehen, indem man eine Stützfeder (entweder innen oder außen) anbringt. Damit schafft man aber gleichzeitig die Möglichkeit, daß mit der gleichen Membrane höhere Drücke gemessen werden können.

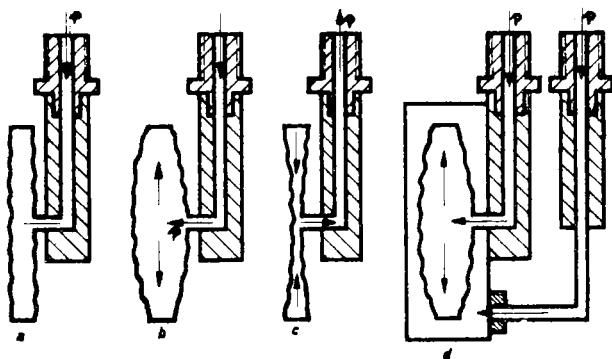


Abb. 30 Dosenfedermanometer

Abb. 30 zeigt das Gerät in zwei Ausführungsarten. Einmal als normales Überdruckmeßgerät (Abb. 30 b), Unterdruckmeßgerät (Abb. 30 c) und zum anderen als ausgesprochenes Differenzdruckmeßgerät (Abb. 30 d). Beim Differenzdruckmeßgerät befindet sich über der Dosenfeder ein druckfestes Gehäuse. Die Dosenfeder findet auch Anwendung im Barometerbau (siehe Abschnitt 4.2).

3.13 Kapselfedermanometer

In letzter Zeit verwendet man als elastisches Element für die Druckmessung die Kapselfeder, auch Metallbalg oder Wellrohr genannt.

Diese Metallbälge sind tiefgewellte, dünnwandige Metallrohre. Sie unterscheiden sich von den nahtlosen Metallschläuchen dadurch, daß die Wellen nicht die Form eines Schraubenganges besitzen, sondern in sich geschlossen verlaufen (Abb. 31 a). Ist eine solche Kapselfeder einem Überdruck von innen oder von außen ausgesetzt, so vergrößert oder verkleinert sie ihre axiale Länge derart, daß sich eine der beiden kreisförmigen Deckelflächen parallel verschiebt. Diesen Effekt nützt man zur Druckmessung aus. In der Abb. 31 a ist das Prinzip eines Kapselfederdruckmessers gezeichnet. Die Kapselfeder K ist mit einer Grundfläche fest mit der Platte P verbunden. An der

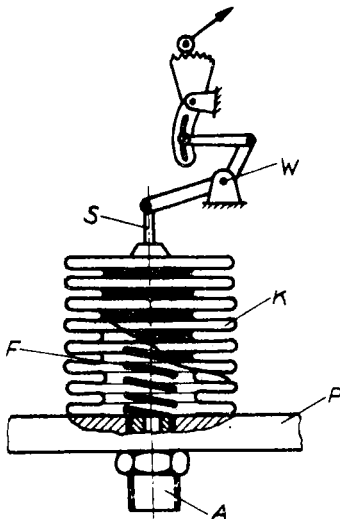


Abb. 31 a

oberen Kapselfläche ist der Übertragungsmechanismus angebracht. Über den fest mit der Kapsel verbundenen Stift S wird die Längenänderung des Balges auf den Hebelmechanismus und den Zeiger übersetzend fortgepflanzt. Wird der Innenraum des Wellrohres K über den Anschlußstutzen mit einem Überdruck beaufschlagt, so bewegt sich die obere Kapselfläche mit dem Stift S nach oben und bringt den Zeiger zum Ausschlag. Bei Beaufschlagung von Unterdruck erfolgt die Bewegung entgegengesetzt. Es ist möglich, die Kapsel-

feder auch von außen zu belasten. Eine Belastung von innen und von außen ist notwendig, wenn Differenzdrücke gemessen werden. In den beiden letzten Fällen muß das Gehäuse, in dem

die Kapselfeder untergebracht ist, druckdicht schließen, und die Welle W muß druckdicht nach außen durch die Gehäusewand geführt werden.

Die Herstellung der Wellrohre erfolgt einmal durch hydraulische Verformung, wobei eine Metallhülse durch hohen Innendruck in eine entsprechende Matrizie gepreßt wird oder mittels innen und außen an der Metallhülse angreifender Rollen. Die Verformung erfolgt meist im kalten Zustand mit mehreren Arbeitsgängen, zwischen denen das Stück zwischengeglüht wird. Diese Herstellungsverfahren verlangen einen verhältnismäßig weichen Werkstoff (Tombak, nichtrostender Stahl, Zinnbronze, Kupferberyllium und Monel) mit meist schlechten Federeigenschaften. Beim Einsatz des Wellrohres in Geräten, die nach der Ausschlagsmethode oder Wegkompensation arbeiten, sollte das Wellrohr nur einen möglichst geringen Teil der Meßkräfte aufbringen, den Hauptteil dagegen eine hochwertige Feder F übernehmen.

Der Weg S, den das System Wellrohr - Schraubenfeder unter dem Druck p zurücklegt, ist:

$$S = \frac{P}{c} = \frac{p \cdot F_{\text{eff}}}{c_F + c_W}$$

also der Quotient Druckkraft P durch Federkonstante c des Systems. Die Druckkraft P ist wie unter 3.111 das Produkt aus Druck und wirksamer Fläche F_{eff} , die hier wiederum nach

$$F_{\text{eff}} = \frac{(D + d)^2}{16}$$

berechnet werden kann. Es bedeuten

D = Außendurchmesser des Wellrohres

d = Innendurchmesser des Wellrohres.

Für die Federsteifigkeit c des Systems Wellrohr - Schraubenfeder gilt, da Wellrohr und Feder parallel geschaltet sind:

$$c = c_F + c_W$$

c_F = Federsteifigkeit der Feder

c_W = Federsteifigkeit des Wellrohres.

Während die Berechnung von c_F nach den in Formelsammlungen angegebenen Formeln erfolgen kann, soll auf die Berechnung der Federkonstanten c_W des Wellrohres näher eingegangen werden. Sie erfolgt nach einer von W.J. Feodosjew entwickelten Formel, die im Lehrbuch "Druck- und Vakuummeßgeräte" von Shochowski enthalten ist:

$$c_W = \frac{E \cdot h_o}{1 - \mu^2} \cdot \frac{1}{10n} (A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + B_0 \frac{h_o^2}{R_i^2})$$

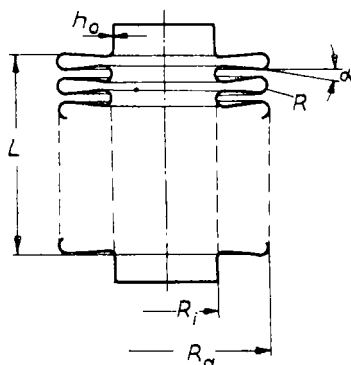


Abb. 31 b

Es bedeuten hierin:

E = Elastizitätsmodul des Rohrmaterials,

μ = Poissonsche Zahl des Rohrmaterials,

h_o = Wandstärke am inneren Durchmesser,

n = Zahl der vollen Wellen,

R_i = Innenradius des Wellrohres

A_0, A_1, A_2, B_0 = Koeffizienten, die von den Kenngrößen m und k des Wellrohres abhängen. Sie

sind den folgenden Diagrammen zu entnehmen.

$$k = \frac{R_a}{R_i} ; \quad m = \frac{R}{R_i}$$

R_a = Außenradius des Wellrohres,

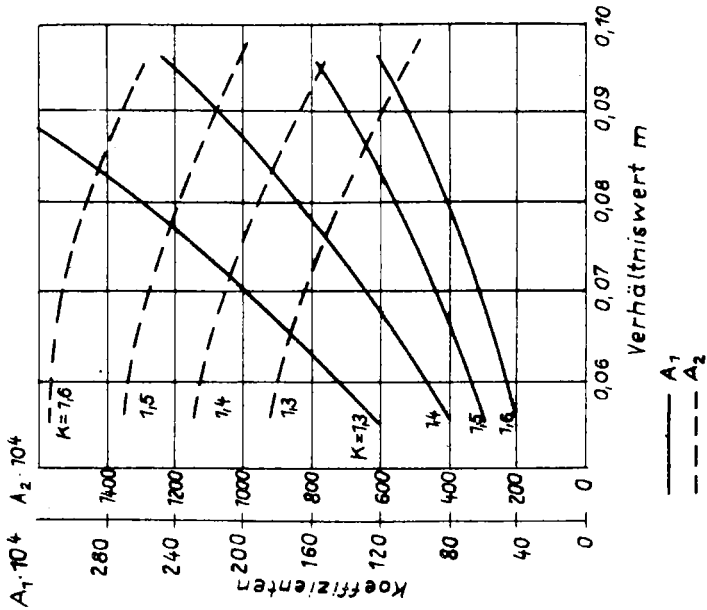
R = Abrundungsradius der Wellen,

α = Winkel der Ringfläche zu einer achsensenkrechten Ebene in radialer Richtung.

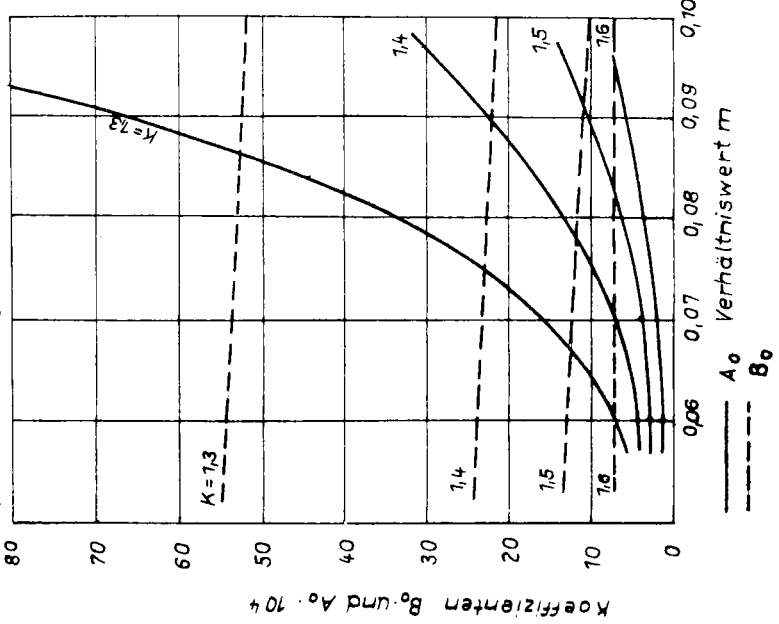
Die Größe des Winkels α kann nach der Formel

$$\alpha = \frac{R(2n_1 - 1) - \frac{L}{2}}{(R_a - R_i - 2R)(n_1 - 1)}$$

Darstellung der Abhängigkeit der Koeffizienten A_1 und A_2 von k und m



Darstellung der Abhängigkeit der Koeffizienten A_0 und B_0 von k und m



berechnet werden, wobei

L = Länge des Federkörpers

n_1 = Anzahl der äußeren Abrundungen der Wellen auf der Länge L

bedeuten.

Eine experimentelle Nachprüfung der berechneten Federsteifigkeiten an verschiedenen Wellrohren vom VEB Injekta Steinach ergab eine gute Übereinstimmung der beiden Werte. Die größten Abweichungen der errechneten Werte von den experimentell ermittelten betrugen etwa 10 %. Ein großer Vorteil der Kapselfederdruckmesser gegenüber anderen elastischen Druckmessern ist ihr großes Arbeitsvermögen. Ihr maximaler Hub liegt je nach Größe und Wandstärke zwischen 5 und 10 mm! Dabei verläuft das Kraft-Weg-Diagramm in weiten Grenzen linear (Abb. 31c). Wird das Wellrohr ohne Stützfeder verwendet, so macht sich eine elastische Nachwirkung insofern nachteilig bemerkbar,

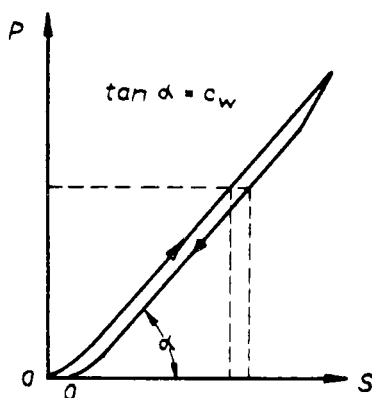


Abb. 31 c

daß bei steigendem Druck kleinere Hube S angezeigt werden als bei fallendem Druck. Das Wellrohr geht bei dem Druck Null bzw. bei der Kraft Null nicht mehr in seine Ausgangslage zurück (Abb. 31 c). Bei Einbau des Wellrohres als Rückführbalg in pneumatische Regler und Transmitter, die nach dem Kraftvergleich arbeiten, spielt diese elastische Nachwirkung keine Rolle, da hier nur Kräfte $P = p \cdot F_{\text{eff}}$, aber keine Wege verglichen

werden. Das Wellrohr kann hier ohne Stützfeder eingesetzt werden.

Praktische Versuche haben ergeben, daß die elastische Nachwirkung kleiner wird, wenn die Kapselfeder von außen belastet wird, d.h. wenn sie unter Last ihre Höhe L verkleinert.

Bei Innenbeaufschlagung sollte die Höhe L in Ruhelage nicht größer als der Außendurchmesser $D_a = 2 R_a$ sein, da mit größer werdender Höhe die Gefahr des seitlichen Ausknickens besteht. Mit den Kapselfedern werden Drücke von $0,5$ bis 5 kp/cm^2 gemessen.

Übungsaufgabe:

Es ist die Federsteifigkeit c_W eines Wellrohres aus MS 85 zu berechnen!

Der Elastizitätsmodul von MS 85 ist $E = 12,4 \cdot 10^3 \text{ kp/mm}^2$ und $\mu = 0,34$. Der Wellrohrkörper hat folgende Maße: $R_a = 21 \text{ mm}$; $R_i = 15 \text{ mm}$; $R = 1 \text{ mm}$; $L = 40 \text{ mm}$. Die Anzahl der vollen Wellen stimmt mit der Anzahl der äußeren Abrundungen überein und beträgt $n = n_1 = 16$.

Anleitung:

Errechnen Sie zuerst die Kenngrößen k und m !

$$k = 1,4; \quad m = 0,067$$

Anhand der Kenngrößen können die Koeffizienten A_0, A_1, A_2, B_0 aus den Diagrammen abgelesen werden. Beachten Sie, daß der 10^4 -fache Zahlenwert an den Ordinaten abgelesen wird!

$$A_0 = 5 \cdot 10^{-4}; \quad A_1 = 111 \cdot 10^{-4}; \quad A_2 = 1155 \cdot 10^{-4}; \quad B_0 = 23$$

Berechnen Sie nun den Winkel α nach der entsprechenden Formel!

$$\alpha = 0,184; \quad \alpha^2 = 0,034$$

Nach Einsetzen aller Werte in die Gleichung für c_W erhalten Sie:

$$c_W = 0,31 \frac{\text{kp}}{\text{mm}}$$

Die experimentelle Bestimmung der Federsteifigkeit ergab einen Wert von $0,35 \frac{\text{kp}}{\text{mm}}$!

5.14 Röhrenfedermanometer

Die bekannteste und auch verbreitetste Form der elastischen Druckmeßgeräte ist das Röhrenfedermanometer. Die Abbildung 32 a zeigt den prinzipiellen Aufbau des Gerätes. Elastisches Meßelement ist die zu einem Kreis gebogene Rohrfeder mit elliptischem oder ovalem Querschnitt. Das eine Ende der Rohrfeder

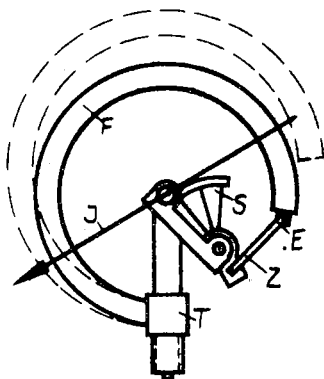


Abb. 32 a

der F ist fest in das Trägerstück T mit dem Druckanschluß eingelassen. Das freie Ende ist mit dem Federendstück E dicht verschlossen. Bei Anlegen eines Überdruckes an das Gerät vergrößert die Feder ihren Krümmungsradius. Der vom Federendstück zurückgelegte Weg wird durch die Zugstange Z auf das Segment S und von dort über ein Ritzel auf den Zeiger J übertragen. Der maximale Weg des Federendes beträgt etwa 5 bis 15 mm;

der vom Anzeigemechanismus in einen Drehwinkel des Zeigers von 270° umgesetzt wird. Bei Geräten älterer Bauart sind noch maximale Ausschlagwinkel von 90° zu finden. Durch eine entsprechende Wahl von Material, Wandstärke, Querschnittsform und Krümmungsradius beherrscht man Druckbereiche von 0 ... $0,6 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ bis 0 ... $10\,000 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ und Vakuum von -1 bis $0 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$.

Als Material verwendet man unterhalb von $100 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ gezogene Rohre aus Messing, Phosphorbronze, Neusilber und dem aushärtbaren Berylliumkupfer. Für kupferangreifende Medien verwendet man Stahl. Für höhere Drücke sind die Federn nur noch aus Stahl nach besonderen Verfahren gefertigt.

Die Meßbereiche wurden international festgelegt. Ihre Größen sind: 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; $10 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ sowie das 10-, 100- und 1000-fache dieser Werte bis zu $4000 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$. Die Gehäusedurchmesser sind ebenfalls genormt, desgleichen das Gewinde der Anschlußstutzen: M 20 x 1,5 und R 1/2" für Großmanometer und für Kleinmanometer M 12 x 1,5 bzw. R 1/4". Entsprechend der Klasseneinteilung der elektrischen Meßgeräte nach den Fehlergrenzen erfolgte auch eine Einteilung der Manometer in drei Güteklassen

Klasse 0,6 mit einem Fehler von 0,6 %

Klasse 1 mit einem Fehler von 1 %

Klasse 2 mit einem Fehler von 2 %

des Skalaumfangs an jeder Stelle der Skala. Die Umkehrspanne der Geräte darf nicht größer als 0,3; 0,5 und 1 % sein, nachdem das Gerät 20 min bis zum Skalenendwert belastet wurde. Die Umkehrspanne ist eine Folge der elastischen Nachwirkung, wie sie bereits beim Wellrohr beschrieben wurde. Sie läßt sich bei den Rohrfedern der extrem hohen Beanspruchung des Federmaterials nicht vermeiden. Aus diesem Grunde sollten die Geräte unter Dauerlast nur bis $\frac{2}{3}$ des Skalenendwertes gefahren werden, während bei stark wechselnder Belastung die obere Grenze des Ausschlages $\frac{1}{2}$ vom Endwert nicht übersteigen sollte.

Zum besseren Verständnis der oben gemachten allgemeinen Angaben wollen wir uns noch mit der Röhrenfeder selbst beschäftigen. Das zu einem Kreisbogen mit einem Windungswinkel γ (meist $\frac{3}{2} \pi$) gebogene Rohr hat elliptischen oder ovalen Querschnitt, welcher so gelegen ist, daß seine Hauptachse a parallel zur Rohrachse verläuft, die senkrecht zur Zeichenebene von Abb. 32 b durch M geht.

Wird nun das Rohr unter Druck gesetzt, so bläht es sich auf, es versucht Kreisform anzunehmen, das Halbachsenverhältnis b/a wird größer. Grund dafür ist, daß die Summe aller auf die Wandung wirkenden Kraftkomponenten in Richtung von b größer ist als in der a-Richtung. Gleichheit beider Komponenten tritt erst nach erreichter Kreisform des Querschnittes ein, d.h. wenn die in die a und b-Ebenen projizierten Flächen der Rohrwandung gleich sind. Wegen der beiderseitigen Vergrößerung der

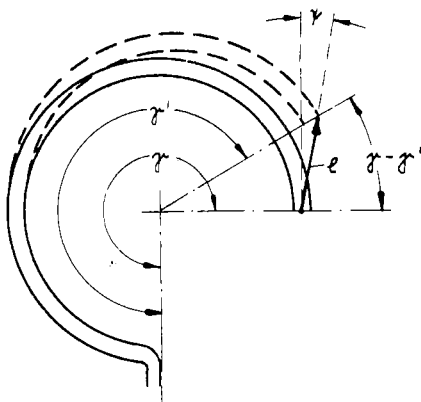


Abb. 32 c

Hierin bedeuten

p = Überdruck im Rohr

μ = Poissonsche Zahl des Rohrwerkstoffes

E = Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes

ρ = Krümmungsradius des Rohres

h = Wandstärke

b = kleine Halbachse (Abb. 32 b)

A = ein von der Querschnittsform und der Wandstärke abhängiger Koeffizient.

Für dünnwandige Rohre, die sind gekennzeichnet durch das Verhältnis $\frac{h}{b} < 0,7$ kann A nach der Formel

$$A = \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + k^2}$$

berechnet werden. Es sind

a die große Halbachse des Rohres,

b die kleine Halbachse,

$k = \frac{\rho h}{a^2}$ die Kenngröße des Rohres.

Die Koeffizienten α und β sind Abhängigkeit vom Achsenverhältnis $\frac{a}{b}$, aus den folgenden Tabellen zu entnehmen. Handelt es



sich um einen elliptischen Querschnitt , dann ist die erste Tabelle zu benutzen. Für flachovale Rohrquerschnitte  sind die Werte in der zweiten Tabelle enthalten.

Tabelle 1: Koeffizienten α , β für Rohre mit elliptischem Querschnitt in Abhängigkeit vom Achsenverhältnis des Querschnitts a/b .

$\frac{a}{b}$	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
α	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,406	0,400	0,395	0,390	0,388
β	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042

Tabelle 2: Koeffizienten α , β für Rohre mit flachovalem Querschnitt vom Achsenverhältnis des Querschnitts a/b .

$\frac{a}{b}$	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
α	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,372	0,360	0,350	0,343	0,267
β	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,120	0,119	0,119	0,118	0,114

Die dickwandigen Rohre, das sind diejenigen, bei denen $\frac{h}{b} > 0,7$ ist, müssen mit einem Koeffizienten

$$A = \frac{1 - x}{\frac{h^2}{12b^2} + x}$$

berechnet werden. Die Größe von x wird dem folgenden Diagramm in Abhängigkeit von der Kenngröße K entnommen.

Mit Hilfe des Aufwindungswinkels kann nun leicht der Weg l des Federendes berechnet werden:

$$l = \frac{x - x'}{\gamma} \cdot \varphi \cdot \sqrt{(\gamma - \sin \gamma)^2 + (1 - \cos \gamma)^2}$$

Für den häufig vorkommenden Windungswinkel $\gamma = 270^\circ = \frac{3}{2} \pi$ wird

$$1 = 5,8 \cdot \gamma \frac{\gamma - \gamma'}{\gamma}$$

Der günstigste Angriffswinkel ψ der Zugstange Z (Abb. 32 o und a) kann nach der Formel

$$\tan \psi = \frac{1 - \cos \gamma}{\gamma - \sin \gamma}$$

errechnet werden.

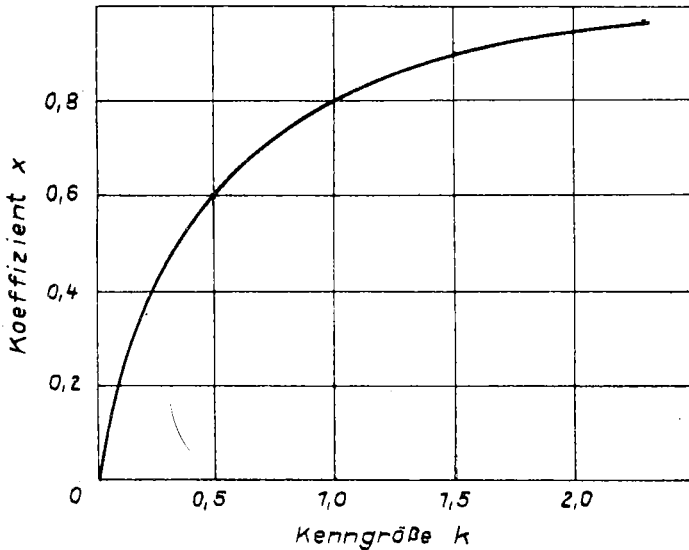


Diagramm der Abhängigkeit des Koeffizienten x von der Kenngröße k des Rohres

Diagramm

Die mit Hilfe der hier angegebenen Formeln berechneten Werte können bis zu 20 % von den tatsächlichen praktischen Werten abweichen, wobei der größte Anteil der Abweichung auf die Unsicherheit des Elastizitätsmoduls sowie auf Ungleichmäßigkeiten in der Wandstärke geht.

3.141 Röhrenfedermanometer mit Windungswinkel größer als 270°

Aus der Gleichung für den Aufwindungswinkel

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma^0 = p \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \frac{\rho^2}{b \cdot h} \cdot A \cdot \gamma$$

geht hervor, daß $\Delta\gamma$ umso größer wird, je größer der Windungswinkel γ wird. Die Meßempfindlichkeit der Feder, die Aufbiegung pro Druckeinheit

$$\frac{\Delta\gamma}{p} = \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \frac{\rho^2}{b \cdot h} \cdot A \cdot \gamma$$

bleibt erhalten, wenn der Krümmungsradius ρ verkleinert, die Wandstärke h vergrößert und dementsprechend der Windungswinkel γ vergrößert werden. Federn mit großem Windungswinkel sind bei gleicher Empfindlichkeit und gleicher Belastung wesentlich stabiler und sicherer gegen Brüche durch Ermüdung und Überbeanspruchung als die üblichen Rohrfedern mit $\gamma = 270^\circ$. Wegen des großen Federweges $\Delta\gamma$ fallen die zur Übersetzung notwendigen Zahnradgetriebe mit ihrem Totgang und Reibungsfehlern fort. Mit solchen Geräten können Fehlergrenzen bis zu 0,25 % herab eingehalten werden.

Für die Vergrößerung des Windungswinkels γ gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Die Feder wird in einer Ebene zu einer Spirale aufgewickelt. Solche Geräte sind unter dem Namen "Spiral" oder "Schneckenfedermanometer" bekannt (Abb. 34).
2. Die Feder wird bei gleichbleibender Krümmung zu einer Schraube oder einem Wendel aufgewickelt. Die Geräte werden Schraubenteder- oder Wendelfedermanometer genannt (Abb. 35).

Eingesetzt werden diese Geräte als sog. "Sicherheitsfedern" wegen ihrer großen Drucksicherheit in der chemischen Hochdrucksynthese für Drücke zwischen einigen 100 und 6000 $\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$.

Ihr großes Arbeitsvermögen macht sie auch als Geber für Registriergeräte im Bereich bis zu 40 at geeignet. Außerdem finden sie als Druckmesser in Temperaturmeßgeräten auf Flüssig-

keitsdruck- und Dampfdruckbasis Verwendung.

Übungsaufgabe:

Es sind die Verschiebung und der günstigste Angriffswinkel der Zugstange Z für eine Röhrenfeder aus Messing ($E = 9000 \text{ kp/mm}^2$; $\mu = 0,32$) und einem Windungswinkel $\gamma = 270$ zu berechnen, wenn die Rohrfeder unter einem Druck von 12 kp/cm^2 steht. Die Daten der Feder sind: $a = 12,3 \text{ mm}$, $b = 2,67 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$, $\varphi = 70 \text{ mm}$.

Ergebnis:

$l \approx 7,5 \text{ mm}$; $\psi = 11,5^\circ$.

Abb. 34

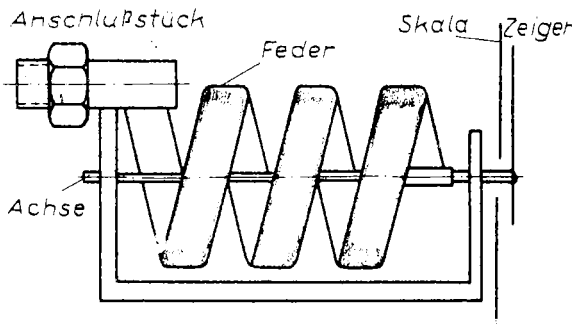
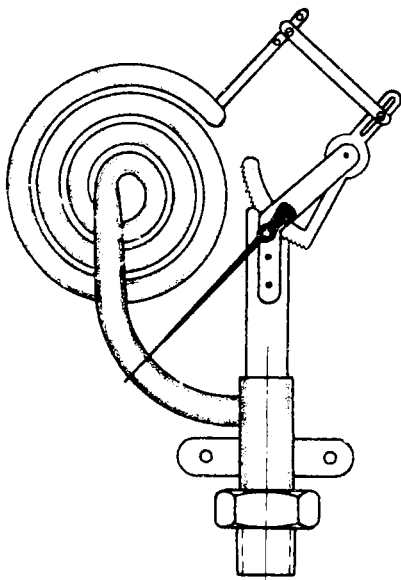
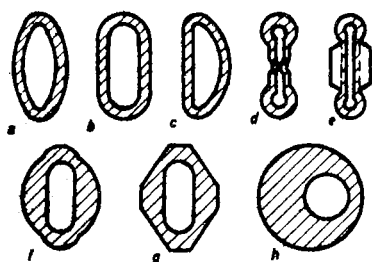


Abb. 55

3.142 Röhrenfederquerschnittsformen

Bei den Querschnitten der Röhrenfeder unterscheidet man verschiedene Arten, die sich im Laufe der Entwicklung herausgebildet haben und bestimmte Bedingungen erfüllen. In Abb. 36 sind einige Querschnittsformen dargestellt.

Abb. 36 Querschnittsformen



- a) Ellipse
- b) Flachbogen (flachoval)
- c) Halbbogen
- d) außendrucksicher
- e) gut atmungsfähig
- f) gleiche Festigkeit
- g) annähernd gleiche Festigkeit
- h) exzentrischer Kreisquerschnitt

Eine Feder, die die Form b besitzt, kann für verschiedene Druckbereiche Verwendung finden, wenn sie noch durch einen Stahlstreifen versteift wird. Auch bei der halbbogenförmigen Feder c kann eine Überdrucksicherung vorgenommen werden. Die Feder wird mit einem Stützkörper versehen, an den sie sich anlegt, wenn die Biegung zu groß wird. Eine weitere Verformung ist dann nicht mehr möglich, es sei denn, der ganze Stützkörper wird zerstört.

Eine sehr gute "Atmungsfähigkeit" - Dehnbarkeit - besitzen die Federformen d und e, die für Brücke zwischen 100 bis 300 at gebrauchsfähig sind.

Nach Abb. 32 ergibt sich, daß ovale Querschnitte die größte Beanspruchung an den Endpunkten der Ellipsenachsen auszuhalten haben. Man hat darum die Federformen f und g entwickelt, die den Belastungen gewachsen sind und zur Messung von Drücken zwischen 500 und 5000 at verwendet werden. Die letzte skizzierte Federform ist bestimmt zur Messung von Drücken bis 10 000 at. Sie wird aber nicht mit einem Krümmungswinkel von 270° versehen, sondern mit einem Winkel von 180° (aus kinematischen Gründen).

Über die gebrauchsfähigen Federwerkstoffe der Federmanometer ist bereits einiges erläutert worden. Es wurde angegeben, daß Stahl hauptsächlich für hohe Drücke in Frage kommt. Jedoch wird es auch für niedere Drücke gebraucht, wenn Kupferlegierungen von den zu messenden Druckmedien chemisch angegriffen werden. Oftmals wird es sich aber auch notwendig machen, daß dünne Kupferfolien hydraulisch oder galvanisch in die Stahlröhren gebracht werden müssen, um Oxydationen der Stahlfeder zu vermeiden. Daneben muß bei Röhrenfedern, wenn Messungen von Sauerstoffdrücken vorgenommen werden sollen, auf eine vollständige Entfettung geachtet werden, weil eine Explosionsgefahr bei Beeinflussung von Fett und Sauerstoff entsteht.

3.2 Elektrische Druckmesser

Neben der Druckmessung mit Hilfe von Flüssigkeiten oder elastischen Körpern wird auch die elektrische Druckmessung oder Kraftmessung angewendet.

Der zu messende Druck wird durch den Geber in eine elektrische Größe umgewandelt, die je nach Anforderung beliebig verstärkt werden kann, damit eine brauchbare Anzeige zustande kommt. Für die Anzeige können beliebige elektrische Anzeigeräte verwendet werden, die so geeicht sind, daß gleich der Druck abgelesen werden kann. Infolge der sehr geringen Massen des Gebers können auch sich schnell ändernde Druckschwankungen in äquivalente elektrische Schwingungen umgewandelt werden, die in Oszillographen sichtbar gemacht werden.

3.21 Messung von Druckänderungen durch Änderung des elektrischen Widerstandes

3.211 Widerstandsänderung eines gespannten Drahtes

Bei diesem Druckmeßverfahren wird als Geber ein beiderseits eingespannter elektrischer Leiter, der entsprechend der Meßkraft einer bestimmten Dehnung unterworfen wird, verwendet

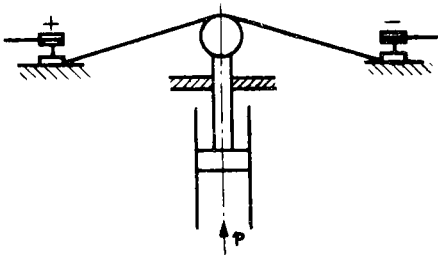


Abb. 37 Widerstandsänderung eines gespannten Drahtes

(Abb. 37). Wenn diese Dehnung noch innerhalb der Proportionalitätsgrenze des Hookeschen Gesetzes liegt, dann ändert sich die elektrische Leitfähigkeit und der elektrische Widerstand dieses Drahtes proportional der Dehnung.

Die Widerstandsänderung (0,0002 % je at) wird als Stromstärkeänderung aufgenommen und gemessen und dient zur Anzeige der Druckänderung.

3.212 Kohleldruckmesser

Eine andere Möglichkeit Widerstandsänderung durch Druck zu erzeugen, bietet der Kohleldruckmesser, der schon ein älteres Verfahren darstellt (nach Collum und Meurer). In diesem Kohleldruckmesser werden aufeinandergeschichtete Kohleplättchen verwendet, die vom Strom durchflossen werden. Die Plättchen haben einen konstanten kleinen Innenwiderstand. Der größere Übergangswiderstand ist einer Druckeinwirkung umgekehrt proportional. Die Kohleplättchen bestehen aus Hartkohle, wie sie bei Kohlebogenlampen Verwendung finden. Sie haben eine Dicke von 0,5 mm und einen Durchmesser zwischen 11 und 16 mm. Wenn 60 Stück von diesen Plättchen aufeinandergelegt werden, so haben sie einen Widerstandsbereich von 0,8 bis 1,2 Ohm. Man

kann mit diesem Gerät große Drücke bei sehr kleinem Geberweg messen, d.h. die druckabhängige Verschiebung des Gebers ist nur 1 mm bei gemessenen Drücken bis 600 at Überdruck. Der hohe Druck wird allerdings nicht von der Widerstandssäule aufgenommen, sondern von einer Feder oder Membrane.

Die aus den Kohleplättchen entstandene Säule wird aber fast ausschließlich geteilt verwendet, wie Abb. 38 angibt.

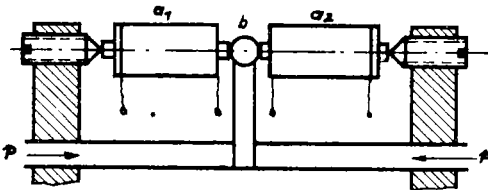


Abb. 38 Kohledruckmesser

a_1 ; a_2 = Säulen aus Kohle-
plattchen
 b = Zunge

Der Angriffspunkt des Druckes liegt zwischen den beiden Säulenhälften. Dadurch wird aber erreicht, daß eine genaue Proportionalität zwischen dem Meßstrom und der Druckänderung zustande kommt. Außerdem wird bei Belastung einer Säule die andere entlastet, und man

kann eine Druckdifferenzmessung vornehmen.

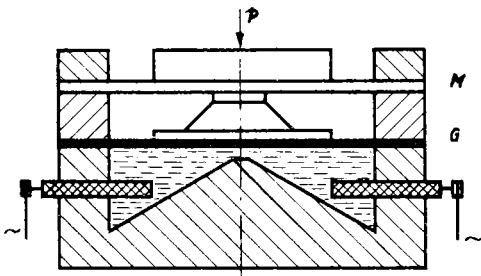
Die beiden Kohlesäulen haben je 2 Volt Spannung und einen Gesamtwiderstand von 5 Ohm.

Durch eine Erhöhung der Spannung erhält man eine größere Empfindlichkeit, nur tritt dann eine Erwärmung ein, die eine Begrenzung der Stromerhöhung darstellt, obzwar bis ungefähr 50°C die Empfindlichkeit gegen die Erwärmung der Kohleplättchen noch vernachlässigt werden kann. weit größer ist dagegen die Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit, so daß dagegen ein wirksamer Schutz vorgenommen werden muß.

Der Aufbau, die Schaltung und Wartung der Kohledruckmesser ist im Vergleich zu anderen elektrischen Druckmeßmethoden einfach. Es tritt aber ein erheblicher Nachteil auf. Man bekommt mitunter starke elastische Nachwirkungen bei Druckänderungen, die Unterschiede in der Widerstandsangabe bei steigendem und fallendem Druck ergeben. Darum macht sich öfters eine Nullpunktnacheichung erforderlich.

3.213 Elektrolytische Meßdose nach Schmaltz und Wallichs

Diese elektrolytische Meßdose ist gedacht zur Messung statischer oder mäßig veränderlicher Drücke. Diesmal wird nicht der elektrische Widerstand eines festen Leiters, sondern eines flüssigen als Druckgeber verwendet. Die Abb. 39 erläutert den prinzipmäßigen Aufbau der Meßdose. Es ist zu ersehen, daß in den flüssigen Leiter zwei Elektroden hineinreichen. Über der Flüssigkeit ist eine Gummimembrane befestigt. Als Dichtung wird eine Stahlmembrane gebraucht, die direkt mit dem zu messenden Druck in Berührung kommt. Bei Druckänderung wird sich



die Durchbiegung der Membrane ändern, das aber ruft eine Veränderung des Abstandes der Membrane von der in die Flüssigkeit hineinragenden Prismenkante hervor. Die Veränderung dieser Fläche bedeutet aber, daß im Elektrolyten ein geänderter Widerstand dem Stromdurchgang entgegensteht, welcher der einwirkenden Kraft proportional ist.

Abb. 39 Elektrolytische Meßdose

M = Metallmembrane

G = Gummimembrane

E = Elektrolyt

3.214 Dehnmeßstreifen

Ähnlich der widerstandsänderung gespannter Drähte beruht auch das Verfahren auf der Belastung und Widerstandsänderung von drahtförmigen elektrischen Leitern. Man kennt das Verfahren auch unter dem Namen repic - Geber oder Tensopickup.

Ein Dehnmeßstreifen oder auch Widerstandsstreifen besteht z.B. aus 4 oder 6 Widerstandsdrähten, die mit einer durchsichtigen Lackfolie umgeben sind. Man verbindet die Drähte zu Windungen

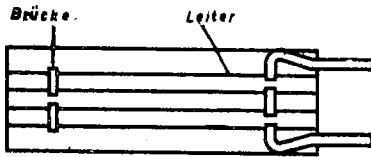


Abb. 40 Dehnmeßstreifen

Die Lackfolie mit den Drähten wird auf einem Prüfling einwandfrei aufgeklebt. Man ist dann mit einem geeigneten Anzeigegerät in der Lage, aus der Widerstandsänderung auf die entsprechenden Spannungen und Dehnungen zu schließen.

Große Beachtung ist der Aufklebung zu widmen, da davon eine einwandfreie Messung abhängt.

Druckgeber nach dem Dehnstreifenprinzip haben verschiedene Anwendung und Bauart bekommen. Es sollen hier noch zwei angegeben werden nach Dr. Nier, Dresden.

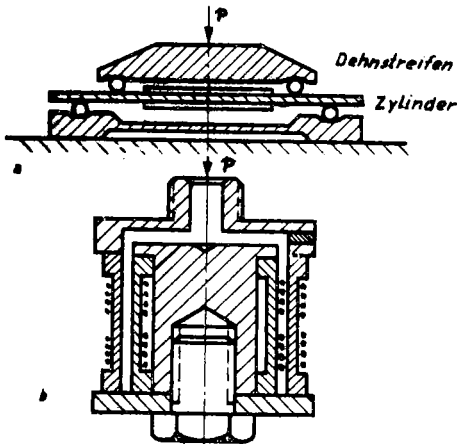


Abb. 41 Dehnmeßstreifen -
Kraftmeßdosen

durch starke Stege, wie es in Abb. 40 angegeben ist. Die kräftigen Stege sollen Querdrehungen entgegen treten und nur Längskräfte messen.

Die Lackfolie mit den Drähten wird auf einem Prüfling einwandfrei auf-

a) Eine elastische Platte liegt zwischen 4 Rollen und wird durch eine Kraft über eine Druckplatte belastet. Auf der beiden Deckflächen sind Dehnstreifen angebracht.

b) Auf feste Stützkörper sind zwei Zylinder von verschiedenem Durchmesser aufgezogen, der innere wird durch die Druckflüssigkeit gestaucht der äußere gedehnt. Beide haben Dehn-

streifen an den Außenwänden (Abb. 41 a und 41 b). Sie sind geeignet für hydraulische Druckmessung.

3.22 Kraftmeßdosen durch Permeabilitätsänderung

Als Grundlage dieser Druckmeßmethode dient ein Stahlstab, der durch eine Magnetspule längs magnetisiert wird. Wenn dieser Stahlstab nun in seiner Längsachse belastet wird, so erfährt die Permeabilität des Stahls eine Änderung. Diese Änderung beeinflusst wieder den induktiven Widerstand der Magnetspule, sodaß eine Messung des Druckes möglich ist. Eine magnetoelastische Druckmeßdose birgt in sich eine Magnetisierungswicklung, die von einem Stahlkörper umgeben ist. Die innere Wicklung wird an eine Meßbrücke gelegt und hat als Speisung einen Wechselstrom mit konstanter Spannung und Frequenz. Bei diesen Meßdosen macht sich eine Temperaturerhöhung unliebsam bemerkbar, deswegen muß eine konstante Bezugstemperatur eingehalten werden (Abb. 42).

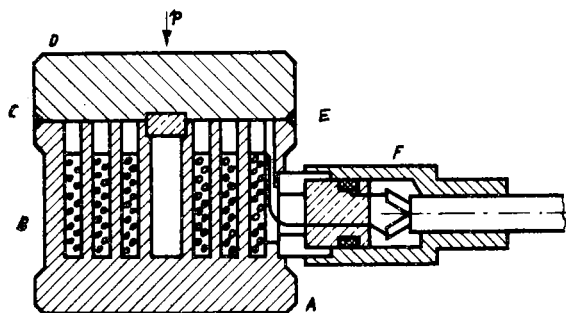


Abb. 42 Magnetoelastische Druckmeßdose

A = Druckkörper	E = Druckfläche
B = Nuten	F = Schweißnaht
C = Wicklungen	G = Kabelanschluss
D = Dosendeckel	

3.23 Kraftmeßdosen durch Kapazitätsänderung

Zwei Metallplatten werden parallel zueinander angeordnet. Eine davon stellt eine Membrane dar, die Drücken ausgesetzt wird und die verschieden starke Durchbiegung erfährt, während die andere fest ist, sich nicht durchbiegt. Dadurch wird aber der zwischen den Platten bestehende Luftspalt vergrößert oder verkleinert. Die beiden Platten bilden einen Kondensator. Man erhält durch die Veränderung des Luftspaltes verschiedene Kapazitäten des Kondensators, die in bestimmten Grenzen den Drücken proportional sind und dadurch zu Druckangaben verwendet werden können.

Die Ausführungsmöglichkeiten der kapazitiven Meßdosen sind verschieden. Es gibt verschiedene Bauausführungen dieser Geräte, zwei sind in den Abb. 43 und 44 zu sehen.

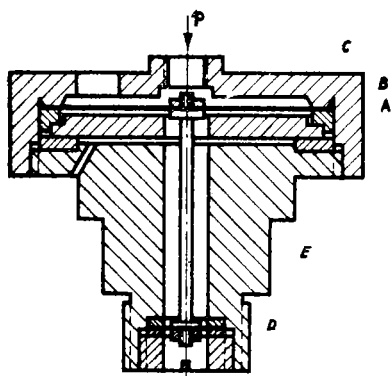


Abb. 43 Kondensatormeßdose

- A = Isolierte Kondensatorplatte
- B = Membranfeder
- C = Klemmring
- D = Abschlußmembrane
- E = Verbindungsstab

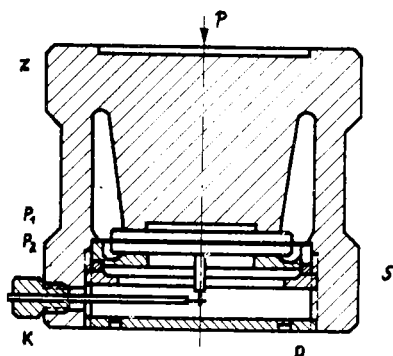


Abb. 44 Kondensatormeßdose

- Z = Stauchzylinder
- P_1, P_2 = feste und bewegliche Platte
- K = Kabelanschluß
- D = Anschlußplatte

§.24 Kraftmeßdosen mit Piezokristall

Als letzte Möglichkeit der elektrischen Druckmessung sei auf die Anwendung von Piezokristallen hingewiesen. Es ist bekannt, daß Kristalle Begrenzungsflächen und Achsen haben. Wenn bei einigen Kristallen ein Druck aufgegeben wird, so erhalten die Kristallflächen, die senkrecht zur elektrischen Achse liegen, eine elektrische Ladung. Die Druckwirkung kann senkrecht oder parallel zur elektrischen Achse sein. Diesem Druck sind die entstehenden elektrischen Ladungen proportional. Die entstehende Spannung wird zur Druckangabe verwendet. Man verwendet als Kristallarten am häufigsten Quarz, aber auch Turmalin und Seignettesalz ($\text{NaK C}_4\text{H}_4\text{O}_6 + 4\text{H}_2\text{O}$).

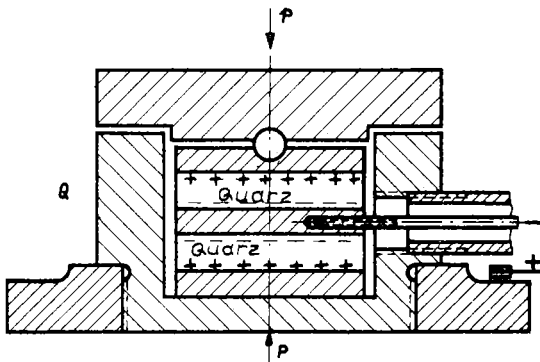


Abb. 45 Piezoelektrische Meßkammer

Der Gebrauch der Quarzkristalle bringt einen beachtlichen Vorteil mit sich. Quarzkristalle besitzen eine gute Druckfestigkeit und lassen sich demzufolge nicht zu schnell zusammendrücken. Bei einer Belastung von 800 kp/cm^2 wird ein Quarzkristall $0,0064 \text{ mm}$ zusammengedrückt. Darum ist diese Meßmethode der vorhergehenden überlegen (Abb. 45).

4. Atmosphärische Druckmessung

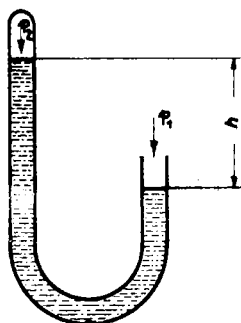
Die in den vorhergehenden Abschnitten behandelten Manometer messen im allgemeinen nicht den absoluten Druck, sondern den Differenzdruck gegenüber dem äußeren Luftdruck. Es werden demnach nur Über- (+) bzw. Unterdrücke (-) gemessen. Wenn man einen absoluten Druck messen will, muß neben der Manometerablesung noch eine Luftdruckmessung vorgenommen werden.

Zu thermodynamischen Berechnungen wird oftmals der Absolutdruck benötigt, so daß die oben angeführten zwei Messungen stattfinden müssen.

Die Messung des äußeren Luftdruckes wird mit einer besonderen Art von Druckmessern vorgenommen. Es sind dies die Barometer, deren Meßprinzip die gleiche Grundlage wie die der Manometer haben. Es werden die kommunizierenden Rohre (Flüssigkeitsbarometer) und die elastische Durchbiegung einer Membrane (Metallbarometer oder Aneroidbarometer) verwendet. Die Barometer werden hauptsächlich zur Luftdruckmessung gebraucht.

4.1 Flüssigkeitsbarometer

Als Grundform der Flüssigkeitsbarometer dient das Quecksilberbarometer. Die Geräteform ist ein U - Rohr, dessen eines Ende geschlossen ist. Nur das offene Schenkelende kann dem Luftdruck ausgesetzt werden. Mit Quecksilber ist das U - Rohr gefüllt. Über dem Quecksilber im geschlossenen Schenkel ist ein luftleerer Raum, der sich aber mit Quecksilberdampf füllt (Abb. 46). Das ist ein Nachteil des Quecksilberbarometers, denn der Quecksilberdampf übt einen Gegendruck aus, der das Meßergebnis etwas beeinträchtigt. Diese Beeinflussung ist aber gering und wird darum bei Messungen vernachlässigt. Im Gerät ist wiederum ein Gleichgewichtszustand vorhanden, der dadurch erzeugt wird, daß die Höhe der Quecksilbersäule dem Luftdruck die Waage hält. Die Quecksilberhöhe wird zur Ableseung des Barometerstandes gebraucht.



$$p_a = h \cdot \gamma$$

Das einseitig geschlossene U - Rohr ist nur eine Grundform der Barometer, die sich aber nicht als einzige Bauart behauptet hat. Es gibt noch 3 andere Bauausführungen, die aber auch letztes Endes das U - Rohrprinzip besitzen.

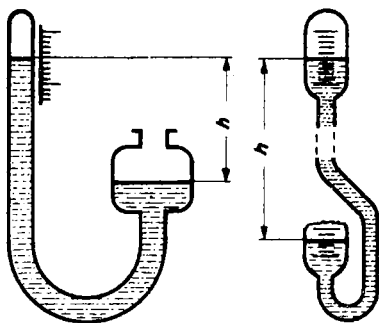
Man bezeichnet die drei verschiedenen Barometer mit:

Heberbarometer,
Gefäßbarometer,
Zweistoffbarometer,

Abb. 46 Quecksilber-
barometer

abgesehen von der Kombination von Heber- und Gefäßbarometer, dem Gefäßheberbarometer.

4.11 Heberbarometer



Bei den Heberbarometern (Abb. 47) kennt man die skizzierten Geräteausführungen. Um den herrschenden Luftdruck mit ihnen bestimmen zu können, muß nach der Gleichung:

$$p_a = h \cdot \gamma$$

h und γ bekannt sein. γ von Quecksilber liegt mit $13,595 \text{ p/cm}^3$ fest. Es muß also am Gerät die Ablesung von h erfolgen. Zur Bestimmung von h müssen zwei Ablesungen vorgenommen werden

Abb. 47 Heberbarometer

an den beiden Kuppen in den Schenkeln. Da Quecksilber eine scharfe konvexe Kuppe bei der großen Oberflächenspannung bildet, ist eine genaue Ablesung möglich. Man kann diese einfache Ablesung noch genauer gestalten, indem man einen Nonius und einen hinter das Gefäß gestellten Spiegel zur Ausschaltung der Parallaxe verwendet. Diese bewegliche Ablesemarke wird als Kreisring um das Barometer ausgeführt, so daß bei der Betrachtung der Ring einen Strich ergeben muß, wenn die Parallaxe ausgeschaltet sein soll. Der Nonius kann an beiden Schenkeln angebracht sein, damit beiderseitig die gleiche Ablesegenauigkeit gegeben ist. Die Heberbarometer besitzen drei Fehlerquellen, denen Beachtung geschenkt werden muß.

Ein Fehler ist die ungenaue Ablesemöglichkeit durch nicht scharfe Meniskenausbildung.

Die Ursache für den schlechten Meniskus kann an der Unsauberkeit der Kapillare liegen. Vor allem werden fettige und ölige Glaswandungen eine Meniskusbildung stark beeinträchtigen. Man muß mit geeigneten Flüssigkeiten (Alkohol - Äther) die einwandfreie Säuberung vornehmen.

Durch einen Luftgehalt im Quecksilber ist eine weitere Fehlerquelle vorhanden. Die feinverteilte Luft im Quecksilber beginnt langsam im geschlossenen Schenkel aufzusteigen und sammelt sich über dem Quecksilberspiegel. Dadurch wird aber das absolute (Torricellische) Vakuum vermindert, und durch die Luft entsteht ein Gegendruck, der eine Fehlanzeige verursacht. Man kann die Luft aus dem Quecksilber durch ein sorgfältiges Auskochen entfernen.

Als dritte Fehlermöglichkeit ist die Kapillarwirkung bei den engen Glasrohren zu nennen, was natürlich ein ungenaues Meßergebnis ergibt. Man kann diesen Fehler beheben, indem man die Kapillarröhrchen beträchtlich vergrößert. Die Vergrößerung braucht aber nur an den notwendigen Ablesebereichen eintreten bis auf 15 mm Rohrdurchmesser.

Die bereits erwähnte doppelte Ablesung wird bei schnell benötigten Ergebnissen als zeitraubend empfunden, so daß man ein anderes Barometer entwickelt hat, das nur eine Ablesung benötigt.

4.12 Gefäßbarometer

Bei den Gefäßbarometern ist der Luftdruck auf einen großen Querschnitt einwirkend und erzeugt hier nur eine kleine Niveausenkung. Sie kann aber sofort durch eine am Boden befindliche Mikrometerschraube ausgeglichen werden, so daß im Gefäß immer eine gleichbleibende Flüssigkeitshöhe erreicht wird. Die Schraube drückt den elastischen Boden des Gefäßes hoch und damit auch die Flüssigkeit. Um auch tatsächlich immer die Nullpunktstellung zu erreichen, wird die Nachstellung solange vorgenommen, bis eine Metall- oder Elfenbeinspitze im Gefäß den Quecksilberspiegel berührt. Mit Hilfe des Spiegelbildes ist die Einstellung bis auf 0,1 mm genau möglich. In das große Gefäß hinein ragt eine dünne Kapillare, deren oberes Ende geschlossen ist und die den Maßstab trägt. Der Maßstab kann aber auch gesondert angebracht sein.

Wenn das Gefäßbarometer keine Metallspitze zur Genaueinstellung besitzt, ist es günstig, wenn der Maßstab beweglich angeordnet ist, damit immer vom Quecksilberspiegel des großen Gefäßes aus die Steighöhe des Quecksilbers abgelesen werden kann. Die Skala wird somit mit ihrem Nullpunkt in die Spiegelhöhe gebracht (Abb. 48).

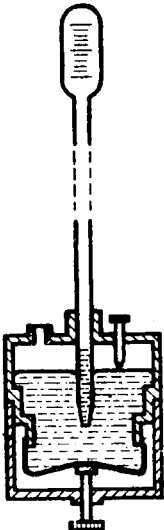
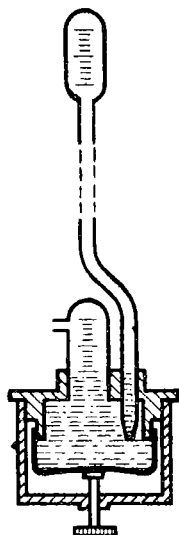


Abb. 48 Gefäßbarometer

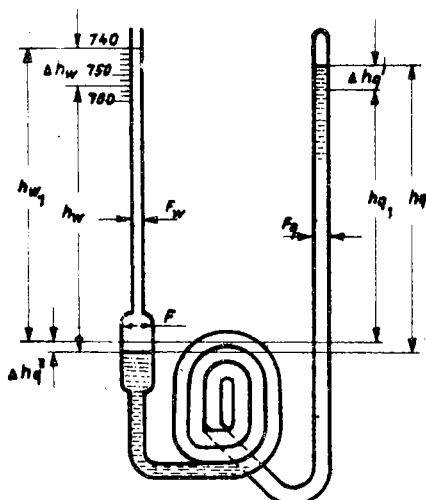
4.13 Gefäßheberbarometer



In diesen Geräten sind die beiden vorgenannten Barometertypen vereinigt, wie auch Abb. 49 darstellt. Es wird ein ungleichlanges U - Rohr verwendet, dessen Schenkelenden erweitert sind, um die Kapillarwirkung auszuschalten. Des weiteren hat der kurze Schenkel eine gefäßförmige Erweiterung erfahren und eine Nachstellvorrichtung. Damit sind die Vorteile des Gefäßbarometers beibehalten worden. Die Ablesung kann wie beim Gefäßbarometer erfolgen, weil man den Flüssigkeitsspiegel heben kann. Es ist aber auch die Ablesung nach Art der Heberbarometer möglich.

Abb. 49 Gefäßheberbarometer

4.14 Zweistoffbarometer



Bei den drei vorher genannten Barometern wird sich oftmals - besonders für genaue Messungen - eine Temperaturkorrektur erforderlich machen. Für das Zweistoffbarometer fällt sie nicht ins Gewicht, trotzdem erhält man eine einfache und genügend empfindliche Ablesung und Messung des Luftdruckes. Der Aufbau des Zweistoffbarometers hat wieder als Grundform das U-Rohr,

Zweistoff- oder Kon-
Abb. 50 trabarometer

das aber eine besondere (vgl. Abb. 50) Gestalt besitzt. Es ist wie bei den anderen Barometern ein Schenkel geschlossen. Dieser Schenkel ist in seiner ganzen Länge in der Regel gleichmäßig zylindrisch.

Der zweite, kürzere Schenkel mündet in einem Gefäß, das einen größeren Querschnitt besitzt. Das Gefäß ist auf der dem Schenkel gegenüberliegenden Seite nicht direkt offen, sondern es geht in eine dünnere Kapillare über. Die Kapillare ist kleiner in ihrem Querschnitt als die beiden Schenkel. Sie wird mit einer schwer verdampfenden Flüssigkeit, wie Petroleum oder Anilin gefüllt. An ihr befindet sich die Barometerskala. Die Verbindung zwischen den beiden senkrechten Schenkeln bildet ein verhältnismäßig langes Rohr, das zu einer Spirale gewunden ist. Es hat die Aufgabe die Temperatur auszugleichen.

Wie bereits angedeutet, ist die Empfindlichkeit der Zweistoffbarometer sehr gut. Das kommt durch die sehr dünne Kapillare zustande. Es findet praktisch eine Übersetzung vom Quecksilber zur leichteren Flüssigkeit im dünnen Rohr statt. Durch diese Übersetzung wird es möglich, ohne Nonius, mit bloßem Auge (ohne optische Vergrößerungseinrichtung), eine Ablesgenauigkeit von 0,1 Torr zu bekommen.

Der Differenzdruck errechnet sich wie folgt:

$$p_a = h_q \cdot \gamma_q - h_w \cdot \gamma_w$$

Ändert sich p_a , so werden sich analog auch die Flüssigkeitsspiegel im Gerät ändern. Wird der Luftdruck z.B. kleiner, so sinkt im geschlossenen Schenkel das Quecksilber um den Wert h'_q ab. Im offenen dagegen steigt es um den Wert h''_q an.

Es verschieben sich jedoch die gleichen Volumen in den beiden weiten Schenkeln und verdrängen zwangsläufig ein gleichgroßes Volumen auch in der dünnen Kapillare. Das verdrängte Volumen steigt um einen großen Betrag in der dünnen Kapillare, so daß sehr gut eine geringe Druckveränderung durch den langen Anzeigeweg beobachtet werden kann. Man kann nun feststellen: ein Steigen der Flüssigkeit bedeutet einen geringen Luftdruck, ein Fallen der Flüssigkeit dagegen einen großen Luftdruck. Für den geringeren Luftdruck gilt entsprechend:

$$p_{a_1} = h_{q_1} \cdot \gamma_q - h_{w_1} \cdot \gamma_w$$

$$h_{q_1} = h_q - \Delta h'_q - \Delta h''_q$$

$$h_{w_1} = h_w - \Delta h''_q + \Delta h_w$$

Demnach wird:

$$p_{a_1} = (h_q - h'_q - h''_q) \cdot \gamma_q - (h_w + h_w - h''_q) \cdot \gamma_w$$

Der Druckunterschied zwischen den beiden gemessenen Drücken läßt sich errechnen aus:

$$p_a - p_{a_1} = (h'_q + h''_q) \cdot \gamma_q + (h_w - h''_q) \cdot \gamma_w$$

Man kann nun $\Delta h'_q$ und $\Delta h''_q$ mit Hilfe der Gerätekostenanten und der Größe Δh_w auch anders schreiben, wenn

$$\Delta h'_q \cdot f_q = \Delta h''_q \cdot F = \Delta h_w \cdot f_w$$

Man setzt:

$$\Delta h'_q = \Delta h_w \cdot \frac{f_w}{f_q} \quad \text{und} \quad \Delta h''_q = \Delta h_w \cdot \frac{f_w}{F}$$

Damit wird die Gleichung für die Druckdifferenz:

$$\Delta p = (p_q - p_{a_1}) = \Delta h_w \left[\left(\frac{f_w}{f_q} + \frac{f_w}{F} \right) \cdot \gamma_q + \left(1 - \frac{f_w}{F} \right) \cdot \gamma_w \right]$$

4.2 Metallbarometer - Aneroidbarometer

Die Flüssigkeitsbarometer sind Druckmeßgeräte, die günstig für einen stationären Gebrauch sind und dann auch mit Stationsbarometer bezeichnet werden. Sie müssen sorgfältig behandelt werden, da sie leicht zerstörbar sind. Für das Aneroidbarometer trifft dies nicht zu. Es ist ein Gerät, das genügend Beweglichkeit zuläßt und nicht so an einen festen Standort gebunden ist. Die Standorte müssen aber alle die gleiche Höhe

über NN haben, da sonst eine Fehlanzeige durch den unterschiedlichen Luftdruck entsteht. Ist mit der Standortveränderung auch eine Höhenveränderung verbunden, muß das Barometer entsprechend dem neuen Luftdruck des neuen Standortes geeicht werden. Auch ist das Barometer gegen Schlag, Stoß usw. unempfindlicher. Noch ein Vorteil kommt hinzu: seine Meßlage beeinträchtigt nur ganz gering das Meßergebnis, so daß es lageunabhängig ist und sich gut transportieren läßt.

Die elastische Dosenbauart, die von den Metallmanometern her bekannt ist, wird als Geber für das Barometeranzeigewerk gebraucht. Die Dose ist aber allseitig geschlossen und besitzt in ihrem Inneren ein Vakuum oder mindestens eine starke Luftverdünnung. Luft in der Dose würde einen Gegendruck erzeugen, der das Meßergebnis ungenau gestalten würde.

Folgenden Aufbau hat man bei Dosenfederbarometern:

Die Dose steht mit einer Spannfeder (Abb. 51 - 3.) in Verbindung, die die Aufgabe hat, bei Unterdrücken die Dose zu spannen, auseinanderzuziehen. Die Kraft der Spannfeder muß der Kraft der Dose das Gleichgewicht halten, damit eine Normalstellung vom Gerät eingenommen werden kann.

Die maximale Belastbarkeit der Dose ist durch die Elastizitätsgrenze des verwendeten Materials gegeben.

Der Bewegungs- oder Arbeitsweg der Dose ist höchstens 1 mm. Für eine brauchbare Anzeige und Ablesung ist dieser Hub zu klein, so daß man ihn vergrößern muß. Mit dem Hebelwerk (Abb. 51 - 6. bis 14), das zwischen Dose und Zeigerwerk geschaltet ist, wird die Übersetzung erreicht, die dem Zeiger einen genügend großen Ausschlag auf einer kreisrunden Skala gibt. Die Teilung ist bei den heute noch im Gebrauch sich befindenden Geräten in mm QS geeicht.

Die Übersetzung kann bei größeren Skalen zwischen Geber und Zeiger bis 1 : 400 sein.

Von Zeit zu Zeit wird es notwendig sein, daß die Metallbarometer nachgeprüft werden müssen. Das geschieht unter einem Rezipienten. Außerdem wird als Normal- und Vergleichsgerät ein Quecksilberbarometer mit hineingestellt. Man vergleicht die

beiden angezeigten Werte und kann eventuelle Anzeigabweichungen feststellen, die man durch Justierung wieder beheben kann. Die Justierung bei dem skizzierten Barometer (Abb. 51) erfolgte durch Verstellen der Justierschraube (Abb. 51 - 10.). Es wird dadurch das Übersetzungsverhältnis etwas verändert, damit eine richtige Anzeige zustande kommt. Eine Eichung ohne Zuhilfenahme des Rezipienten nur durch den Luftdruck würde sehr viel Zeit in Anspruch nehmen und wird darum selten vorgenommen.

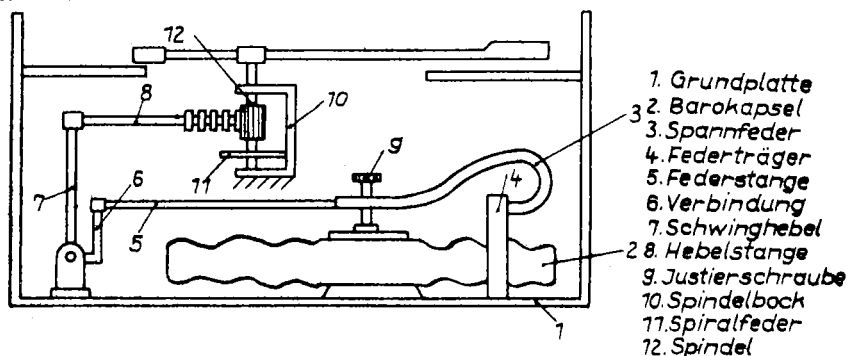


Abb. 51 Metallbarometer

Die Metallbarometer sind stark temperaturabhängig. Um diesen Einflüssen wirksam zu begegnen, werden die Hebel für die Übersetzung aus Bimetall, um Temperaturschwankungen zu kompensieren, angefertigt. Das Aneroidbarometer setzt einer notwendigen Anzeigeveränderung eine gewisse Trägheit entgegen, die durch die vorhandene Reibung der Übersetzungsglieder entsteht. Man kann diesen Nachteil durch kleine stoßartige Erschütterungen des Gerätes beheben.

Die Aneroidbarometer können zwei verschiedene Anzeigebereiche haben. Das richtet sich ganz nach ihrer Eichung.

Einmal kann das betreffende Barometer den am betreffenden Ort herrschenden Luftdruck messen, zum anderen kann das Barometer so eingestellt sein, daß es immer den Luftdruck auf NN bezogen angibt, auch wenn nicht direkt am Meer gemessen wird. Das Gerät gibt demnach den am Ort herrschenden Luftdruck umgerech-

net auf NN an.

Einfache Barometer haben nur eine Meßdose. Genauere Geräte haben mehrere Dosen hintereinandergeschaltet und ergeben dadurch einen größeren Ausschlag. Desgleichen kann zur Verstärkung der Dose innen oder außen eine Stützfeder angebracht werden, wie es bereits bei den Metallmanometern (siehe Abschnitt 4,13) angedeutet ist.

Geräte mit mehreren hintereinandergeschalteten Dosen werden viel in der Luftfahrt als schreibende Druckmesser unter der Bezeichnung Barograph (Abb. 52) angewendet.

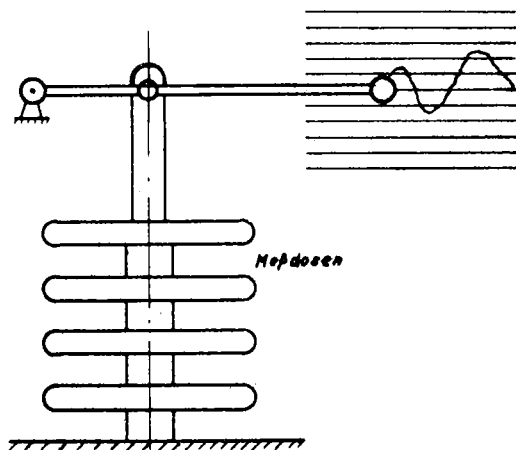


Abb. 52 Barograph

Wiederholungsfragen

1. Welche Maßeinheiten werden bei Druckmessungen verwendet?
2. Mit einem Manometer ist ein Druck von 740 Torr gemessen worden. Er soll in at und mm WS angegeben werden!
3. Was bedeuten die Begriffe Über- und Unterdruck?
4. Welcher Unterschied besteht zwischen unmittelbar und mittelbar anzeigenden Druckmeßgeräten?
5. Welche Forderungen müssen Meßflüssigkeiten bei Druckmeßgeräten erfüllen?
6. Wie arbeiten Flüssigkeitsmanometer?
7. Wie kann bei einem Flüssigkeitsmanometer eine große Empfindlichkeit erreicht werden?
8. Der Gefäßdurchmesser eines Standmanometers hat die Größe $d_1 = 75 \text{ mm}$; das Meßrohr hat eine lichte Weite von $d_2 = 3 \text{ mm}$. Durch einen aufgegebenen Druck steigt die Meßflüssigkeit um 300 mm. Wie groß ist die Nullpunktverschiebung h , die Gesamthöhe h' und der prozentuale Fehler?
9. Bei einer Druckmessung mit einem Mehrkammermanometer wurde folgendes ermittelt:
 $n = 6$; $h' = 150 \text{ mm}$; $h_1 = 325 \text{ mm}$; $\rho_H = 1 \text{ p/cm}^3$;
 $\gamma_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ p/cm}^3$.
Wie groß ist der herrschende Druck?
10. Weshalb wird im Mehrkammermanometer eine Sperrflüssigkeit neben einer Meßflüssigkeit verwendet?
11. Warum verwendet man beim Gasmanometer kein zylindrisches Rohr?
12. Wie groß muß der Kolbendurchmesser eines Kolbenmanometers sein, wenn das Kolbengewicht 3,6 kp ist und die Kolbenhöhe 100 mm sein soll?
Kolbenwerkstoff: Stahl mit $\gamma = 7,8 \text{ p/cm}^3$!
13. Welche Bedingungen müssen vorhanden sein, daß ein einwandfreies Arbeiten des Kolbenmanometers für längere Zeit mög-

lich ist?

14. Ein Mikromanometer nach Krell hat einen Gefäßdurchmesser von 120 mm. Durch einen Druck hat die Meßflüssigkeit einen Vorlauf von 200 mm erfahren. Der Kapillardurchmesser ist $d = 0,85$ mm. Um welche Höhe h senkt sich der Spiegel im Gefäß?
15. Wie groß ist der Neigungswinkel α bei einem Mikromanometer nach Krell, wenn das Verhältnis 1 : 25 und die Höhe $\Delta h = 1,5$ mm sind?
16. Welche Bauunterschiede kennt man bei den Metallmanometern?
17. Wie kann man den Arbeitsweg bei Röhrenfedermanometern vergrößern?
18. Welche Möglichkeiten hat man, auf elektrischem Wege Druckmessungen durchzuführen?
19. Mit welchen Druckmeßgeräten ist die Messung des absoluten Druckes möglich?

L ö s u n g e n

1. Als Maßeinheiten werden verwendet:

mm WS; at; Torr; bar; mb; N/m^2

In der bisherigen Fachliteratur tritt noch häufig die Maßeinheit mm QS auf, sie ist aber gesetzlich nicht mehr zulässig.

2. $740 \text{ Torr} = 1,006 \text{ kp/cm}^2 = 1,006 \text{ at}$

$740 \text{ Torr} = 10060 \text{ mm WS}$

3. Über- und Unterdruck werden auf den Normdruck 1 at oder auf einen angenommenen Bezugsdruck bezogen. Dabei ist der Überdruck stets die resultierende Größe, die bereits um die Größe des Norm- oder Bezugsdruckes verkleinert worden ist. Der Unterdruck muß immer kleiner als der Norm- oder Bezugsdruck sein.
4. Bei den unmittelbar anzeigenden Druckmessern wird die durch den Druck veränderliche Niveauhöhe der Meßflüssigkeit direkt zur Anzeige der Druckhöhe verwendet, während bei den unmittelbar anzeigenden Geräten der Druck eine andere Wirkung auslöst (z.B. Widerstandsänderung eines elektrischen Leiters), die erst zu einer Anzeige ausgenutzt wird.
5. Von einer guten Meßflüssigkeit wird verlangt:
- a) eine gute Meniskusbildung,
 - b) ein kleines Benetzbarkeitsvermögen, weil der Meniskus unscharf wird und Kapillarwirkung eintreten kann,
 - c) vollkommene Freiheit von Luft oder Wasserdampf,
 - d) ein passives Verhalten gegen Verbindungen mit Luft, Wasserdampf, den zu messenden Stoffen (Gase, Flüssigkeiten) und dem Gerätwerkstoff,
 - e) keine Verflüchtigung,
 - f) möglichst gleichbleibender, kleiner Temperaturexpansionskoeffizient (nur beschränkt möglich).
6. Man schließt einen Schenkel an den zu messenden Druckraum an. Der andere Schenkel bleibt offen, wenn nicht zwischen zwei verschiedenen Druckräumen die Druckdifferenz gemessen

werden soll. Durch den aufgegebenen Druck im angeschlossenen Schenkel wird der Flüssigkeitsspiegel bei Unterdruck hochsteigen, bei Überdruck absinken. An der angebrachten Skala wird die Fall- oder Steighöhe der Flüssigkeit abgelesen. Entsprechend der Skala erhält man ein Ergebnis, das in Torr, mm, WS oder einer anderen Eichung angegeben ist und die Maßeinheit, die man benötigt, umgerechnet werden kann.

7. Man erhält eine größere Empfindlichkeit, wenn man eine Meßflüssigkeit mit einem kleinen spezifischen Gewicht verwendet (da: $p = h \cdot \gamma$), und wenn man den Anzeigeschenkel nicht senkrecht anordnet, sondern ihn zur horizontalen Lage hin um einen angenommenen Winkel α neigt. Beide Bedingungen in einem Gerät vereinigt, ergeben gewünschte Empfindlichkeiten (siehe Kleindruckmesser).

8. $d_1 = 75 \text{ mm}$

$d_2 = 3 \text{ mm}$

$h = 300 \text{ mm}$

$h' = h + \Delta h$

$h' = 300 + 0,56$

$h' = 300,56 \text{ mm}$

=====

$$\Delta h = h \frac{F_2}{F_1} = h \frac{d_2^2 \frac{\pi}{4}}{d_1^2 \frac{\pi}{4}}$$

$$\Delta h = 300 \frac{3^2}{75^2}$$

$$\Delta h = 300 \frac{9}{5625}$$

$$\Delta h = 0,56 \text{ mm}$$

=====

$$\frac{h}{h'} 100 = \frac{0,56}{300,56} 100 = 0,186 \%$$

9. $p = n \cdot h_1 \cdot \gamma - h' \gamma_H$

$p = 6 \cdot 32,5 \cdot 0,0126 - 15 \cdot 0,001$

$p = 2,442 \text{ kp/cm}^2$

=====

$n = 6$

$h' = 150 \text{ mm}$

$h_1 = 325 \text{ mm}$

$\gamma_H = 1 \text{ p/cm}^3$

$\gamma_{Hg} = 13,6 \text{ p/cm}^3$

10. Durch die Sperrflüssigkeit wird eine Druckübertragung und damit eine Verschiebung des Spiegels der Meßflüssigkeit bewirkt. Luft oder andere Gase eignen sich nicht dazu, weil sie sich stark verdichten lassen und deshalb keine brauchbare Druckübertragung ermöglichen.

11. Es wurde festgestellt, daß bei Verwendung eines einfachen zylindrischen Rohres die Empfindlichkeit des Manometers nur bei kleinen Drücken genügend ist. Darum wurde das gestufte Rohr angewendet, das auch bei höheren Drücken noch eine ausreichende Empfindlichkeit ergibt.

$$12. G = 3,6 \text{ kp}$$

$$h = 100 \text{ mm}$$

$$\gamma = 7,8 \text{ p/cm}^3$$

$$V = \frac{G}{\gamma}$$

$$V = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$$

$$\frac{G}{\gamma} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$$

$$d = \sqrt{\frac{G \cdot 4}{\gamma \cdot \pi \cdot h}}$$

$$d = \sqrt{\frac{3,6 \cdot 4 \cdot 1000}{3,14 \cdot 10 \cdot 7,8}}$$

$$d = 20 \sqrt{\frac{3,6}{3,14 \cdot 7,8}}$$

$$d = 7,68 \text{ cm}$$

=====

13. Der Kolben muß sich sehr zügig, ohne große Reibung bewegen lassen. Deswegen macht sich ein Einschleifen notwendig. Das Spiel zwischen Kolben und Zylinderwand muß klein sein, damit die Meßflüssigkeit sich nicht hochziehen kann. Außerdem darf das hier angewendete Öl nicht verharzen und muß eine genügende Viskosität besitzen.

$$14. D = 120 \text{ mm}$$

$$d = 0,85 \text{ mm}$$

$$l = 200 \text{ mm}$$

$$\Delta h = \frac{1 \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}}{D^2 \cdot \frac{\pi}{4}}$$

$$\Delta h = \frac{200 \cdot 0,7225}{14400}$$

$$\Delta h = \underline{\underline{0,00103 \text{ mm}}}$$

Der auftretende Fehler ist praktisch nur von geringer Bedeutung.

$$\begin{aligned} 5. \quad \sin \alpha &= \frac{h}{l} & \frac{h}{l} &= \frac{1}{25} & h &= 1,5 \text{ mm} \\ & & & & l &= 25 h \\ \sin \alpha &= \frac{1,5}{37,5} & & & l &= 25 \quad 1,5 = \underline{\underline{37,5 \text{ mm}}} \\ \sin \alpha &= 0,04 \\ \alpha &= \underline{\underline{2^\circ 18'}} \end{aligned}$$

6. Metallmanometer werden in vier Ausführungsarten hergestellt. Es sind dies die:

Plattenfedermanometer,
Dosenfedermanometer,
Kapselfedermanometer und
Röhrenfedermanometer.

Die Unterschiede sind folgende:

Eine Metall- oder eine schlaffe Membran, meist als runde Scheibe ausgebildet, dient als Geber. Die zweite Ausführung benutzt eine Dose, deren Stirnflächen zur Garantie einer guten Nullpunktlage und zur Vermeidung des sog. "Knackens" gewellt sind, und in einer zweiten Dose ist zentrisch eine Bohrung zur Atmung der Dose angebracht. Die Kapselfeder stellt ein geschlossenes Wellrohr dar, während die letzte Geberform ein gebogenes, im Durchmesser viel kleineres, mit glatten Wänden versehenes entsprechend langes Rohr ist.

7. Die Vergrößerung erhält man durch eine längere Röhrenfeder, die man um mehr als 270° krümmt und dadurch praktisch eine Wendelfeder oder Spiralfeder bekommt.

18. Unter Druckeinwirkung bei bestimmten elektrischen Einrichtungen tritt eine Veränderung dieser elektrischen Größen ein, die man mit Meßgeräten feststellen kann. Zu diesen Geräten gehören die Änderung von elektrischen Widerständen, Permeabilitätsänderungen, Kapazitätsänderungen und Spannungsänderungen beim Piezokristall.
19. Die absolute oder atmosphärische Druckmessung wird mit dem Barometer durchgeführt. Man kann aber zur Absolutdruckmessung auch die Vakuummeter verwenden (hauptsächlich zur Gasdruckmessung im Vakuum).

Literaturquellen:

Faltin: Meßverfahren und Meßgeräte der Kraft- und Wärmewirtschaft

Kohlrausch: Praktische Physik

Hengstenberg, Sturm und Winkler:

Messen und Regeln in der chemischen Technik

DIN 1314

Shochoowski: Druck- und Vakuum - Meßgeräte

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

FRENZEL

BETRIEBS- MESSTECHNIK

5

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1004-05/63



1963

ZENTRALSTELLE FÜR FACHSCHULAUSBILDUNG · BEREICH MASCHINENBAU, ELEKTROTECHNIK, LEICHTINDUSTRIE · DRESDEN

Betriebsmeßtechnik

Lehrbrief 5

von

Klaus Frenzel

2. Auflage

Herausgeber:
Ingenieurschule für Feinwerktechnik Jena

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ag 616/ 220/63

Best-Nr.1004-05/63

Inhaltsverzeichnis

=====

Seite

3.315 Schutzrohre	70
3.316 Die Vergleichsstelle	71
3.32 Schaltung der Thermoelemente	82
3.33 Die Messung der Thermospannung	83
3.331 Die Ausschlagmethode	84
3.332 Die Kompensationsmethode	94
3.3321 Selbsttätige Kompensatoren	105
3.34 Widerstandsthermometer	113
3.341 Auswahl des Widerstandsmaterials	113
3.342 Form der Meßwiderstände	120
3.343 Messung des Widerstandes	123
3.3431 Widerstandsmessung mit der Wheatstone'schen Brücke	124
3.3432 Messung der Widerstandsänderung mit Quotientenmeßwerk	136
Zusammenfassung zum Kapitel 3.34	144

3.315 Schutzrohre

Zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen und angreifende Meßmedien werden die Thermoelemente in Schutzrohren untergebracht. Für Temperaturen bis zu 700°C werden einfache Schutzrohre aus unlegiertem Stahl (z.B. St 35.8) verwendet, in die das isolierte Thermoelement eingeführt wird (Bild 32 a). Dient das Schutzrohr nun dem mechanischen Schutz, so kann es an der Meßstelle offengelassen werden. Das Arbeitsende ist dann dem Meßmedium ausgesetzt und man erhält eine sehr geringe Anzeigeverzögerung. Bis 900°C sind kurzzeitig bis 1200°C werden Schutzrohre aus legiertem Stahl (X 10 CrSi 29 und X 15 CrNiSi 2419) benutzt. Da bei diesen hohen Temperaturen die Metalle gasdicht werden, muß im Inneren ein zweites Schutzrohr aus Keramik angebracht werden. Das Metallrohr übernimmt die Funktion des mechanischen Schutzes, während die Keramik die Gasdichtheit gewährleistet (Bild 32 b). Für Temperaturen bis 1300°C (kurzzeitig bis 1600°C) werden Schutzrohre aus Keramik (Porzellan, Steatit, Quarz, Sinterkorund) genommen. (Bild 32 c) Diese Keramikrohre sind sehr spröde und an der Einspannstelle besonders durch Biegung gefährdet. Diese Einspannkkräfte und -momente werden durch ein im Kopfstück befestigtes Halterohr H aufgenommen (Bild 32 c). In besonderen Fällen werden auch doppelte Keramik-Schutzrohre verwendet (Bild 32 d). Im Hinblick auf die Vielseitigkeit der Meßmedien und Einbaumöglichkeiten können die oben gemachten Angaben nur als grobe Richtlinien für die Auswahl der Schutzhüllen gelten.¹⁾

Die Anschlußknöpfe A sind in ihren Abmessungen in DIN 43729 genormt.

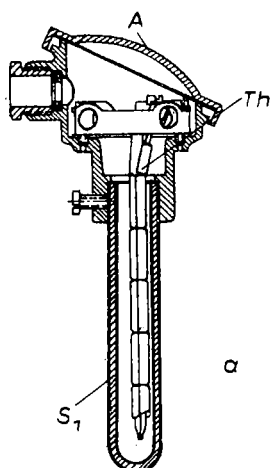
1) Mehr bei H. Faltin "Meßverfahren und Meßgeräte der Kraft- und Wärmewirtschaft", Knapp-Verlag, Halle

3.316 Die Vergleichsstelle

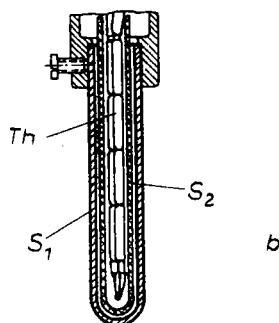
Die Temperaturmessung mit Thermoelementen hat einen Nachteil. Sie ist grundsätzlich betrachtet eine Messung von Temperaturdifferenzen, der Temperaturdifferenzen $(t-t_0)$ zwischen Meßstelle und Vergleichsstelle. In der Praxis interessiert nur eine Temperatur, und zwar die der Meßstelle. Um ein von der Temperatur der Vergleichsstelle t_0 unabhängiges Meßergebnis zu erhalten, muß die Temperatur der Vergleichsstelle für alle Messungen konstant gehalten werden. Ferner leuchtet uns die Betrachtung der Formel (28) ein, daß die vom Element erzeugte Spannung der Temperaturdifferenz $(t-t_0)$ proportional ist. Man wird also t_0 möglichst klein halten, weil dann bei größerer EMK die Messung empfindlicher und genauer wird.

Mit thermoelektrischen Pyrometern, darunter verstehen wir die Anordnung, bestehend aus Thermoelement, Millivoltmeter und Zuleitungsdrähten, kann die Temperatur auf zwei Arten ermittelt werden:

1. Man liest am Millivoltmeter die Spannung ab und bestimmt aus der Grundwertreihe (siehe Seite) oder aus der Spannungskurve (Bild 33) die zugehörige Temperatur. Dabei ist die Ermittlung nach der Spannungskurve schneller und einfacher, weil bei nicht in der Grundwertreihe enthaltenen Zwischenwerten - genau wie in der Logarithmentafel - rechnerisch interpoliert werden muß.
2. Die Skala des Millivoltmeters ist in Grad Celsius geeicht und die Temperatur kann direkt abgelesen werden. Dieser Fall trifft für alle Betriebsgeräte zu, während im Labor nur nach 1. verfahren wird. Beide Messungen sind aber nur richtig, wenn die Vergleichstemperatur im Betriebszustand t_{ob} dieselbe ist wie die bei der Eichung t_{oe} oder die in der Grundwertreihe angegebene Bezugstemperatur der Vergleichsstelle. Weicht die Temperatur der Vergleichsstelle t_{ob} bei der Messung von der bei der Eichung t_{oe} ab und verläuft die

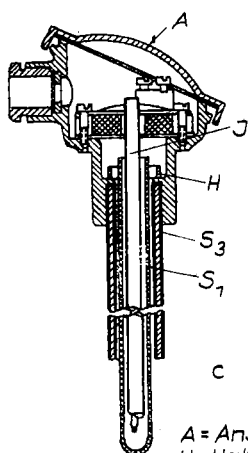


a

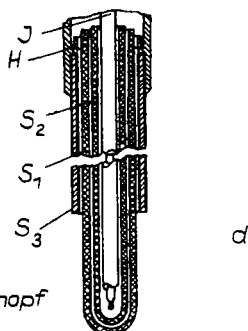


b

A = Anschlußknopf
Th = Thermopaar mit Isolierrohr
S₁ = metallenes Schutzrohr
S₂ = keramisches Innenrohr



c



d

A = Anschlußknopf
H = Haltering
J = Thermopaar mit Isolierstab
S₁ = keramisches Schutzrohr
S₂ = keramisches Innenrohr
S₃ = Halterrohr

Bild 32

Spannungskurve wie beim NiCr-Ni-Element geradlinig, so ist der angezeigten Temperatur t_a oder der entsprechend der angezeigten Spannung aus der Grundwertreihe ermittelten Temperatur t_a der Temperaturunterschied $t_{ob} - t_{oe}$, um den die Vergleichstemperatur im Betriebsfall von der im Nischfall abweicht, hinzuzuzählen:

$$t_w = t_a + (t_{ob} - t_{oe}) \quad (30)$$

t_w = wirkliche Temperatur an der Meßstelle

Beispiel: Das zu einem NiCr-Ni-Element gehörende Millivoltmeter zeigt eine Spannung von 19,5 mV an. Die Vergleichsstelle habe die Raumtemperatur von 20° C angenommen. Zunächst ermitteln wir die zur EMK gehörende Temperatur t_a ohne Rücksicht auf die Vergleichstemperaturen t_{ob} und t_{oe} aus der Grundwertreihe.

Die EMK 19,5 mV ist in der Grundwertreihe nicht enthalten. Wir finden dort nur die Werte 16,38 mV = 400° C und 20,64 mV = 500° C. Unsere gemessene Temperatur liegt also zwischen 400 und 500° C. Das "Interpolieren", d.h. das "Einschalten" von Zwischenwerten erfolgt genauso wie in der Logarithmentafel:

die kleine Differenz ist $d = 19,5 - 16,38 = 3,12$ mV

die Tafeldifferenz ist $D = 20,64 - 16,38 = 4,26$ mV

Die folgende Rechnung ist ein einfacher Dreisatz:

Einer Spannungszunahme von 4,26 mV entspricht eine Temperaturzunahme von 100° C.

Einer Spannungszunahme von 3,12 mV entspricht ein Temperaturzuwachs von t° C.

Also:

$$\frac{t}{100} = \frac{d}{D} = \frac{3,12}{4,26}$$

oder

$$t = \frac{3,12}{4,26} \cdot 100 = 0,732 \cdot 100 = 73,2^{\circ}\text{C}$$

Die gemessene Temperatur ist dann

$$t_a = 300 + 73,2^{\circ}\text{C} = \underline{473,2^{\circ}\text{C}}$$

Aus der Spannungskurve hätten Sie diesen Wert sofort ablesen können (Bild 33). Zeichnen Sie sich anhand der Grundwertreihe die Spannungskurve des NiCr-Ni-Elementes (bitte nicht an Platz sparen), und kontrollieren Sie das Ergebnis der Rechnung.

Nun haben wir noch zu beachten, daß die Vergleichstemperatur t_{oe} , für die die Grundwertreihe gilt, bei der Messung nicht eingehalten wurde. t_{ob} ist 20°C und die angezeigte Spannung um ΔE zu klein. Auch t_a ist dann kleiner als t_w . Wir korrigieren nach Formel (30):

$$\begin{aligned} t_w &= t_a + (t_{ob} - t_{oe}) \\ t_w &= 473,2^{\circ}\text{C} + (20 - 0)^{\circ}\text{C} \\ t_w &= 493,2^{\circ}\text{C} \\ &===== \end{aligned}$$

Bei Geräten mit direkter Temperaturanzeige fällt die Rechnung zur Bestimmung von t_a fort. t_a wird abgelesen.

Für Thermoelemente mit nichtlinearer Spannungskurve erfolgt die Vergleichsstellenkorrektur nach der Formel

$$t_w = t_a + C \cdot (t_{ob} - t_{oe}) \quad (31)$$

C ist ein von der angezeigten Temperatur t_a abhängiger Faktor, dessen Größe experimentell ermittelt werden muß und den Sie für die wichtigsten Thermopaare aus Bild 34 entnehmen können.

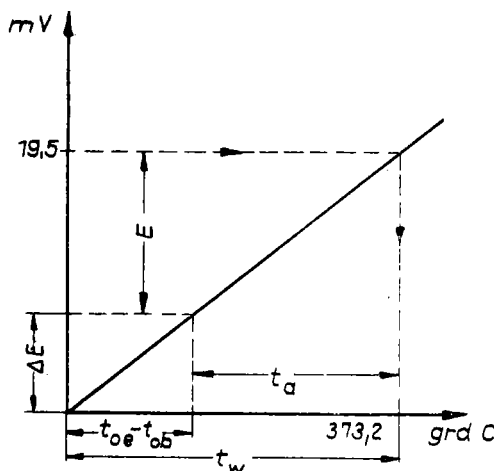


Bild 33

Rechnen Sie jetzt nach dem vorangegangenen Muster folgende Aufgabe:

Ein PtRh-Pt-Thermoelement gibt eine Spannung von 10 mV ab. Als Temperatur der Vergleichsstelle wurden 50 °C gemessen. Welche Temperatur t_a würde ein in Temperaturgraden geeichtes Millivoltmeter anzeigen, wenn die Vergleichstemperatur bei der Eichung 0 °C betragen hat?

Bestimmen Sie die wirkliche Temperatur der Meßstelle!

Bei richtiger Rechnung erhalten Sie: $t_a = 1034,2$ °C

und $t_w = 1060$ °C. Berechnen Sie ferner den absoluten und relativen Fehler, der ohne Korrektur entstehen würde!

Diese Korrekturrechnerei ist natürlich für Betriebsverhältnisse äußerst unbequem. Sie verschlingt Zeit und erfordert qualifiziertes Bedienungspersonal. Die Praxis vermeidet daher die Korrekturrechnung, indem

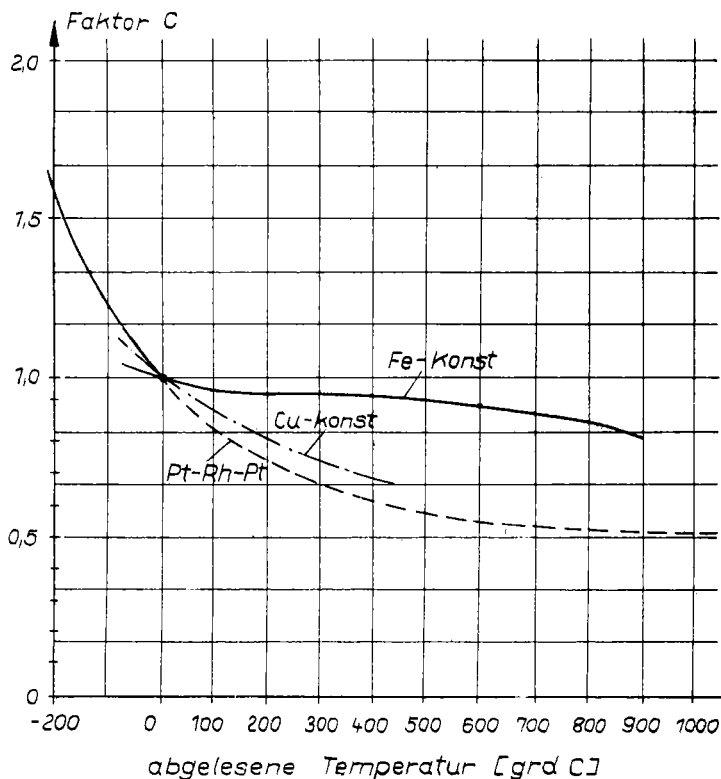
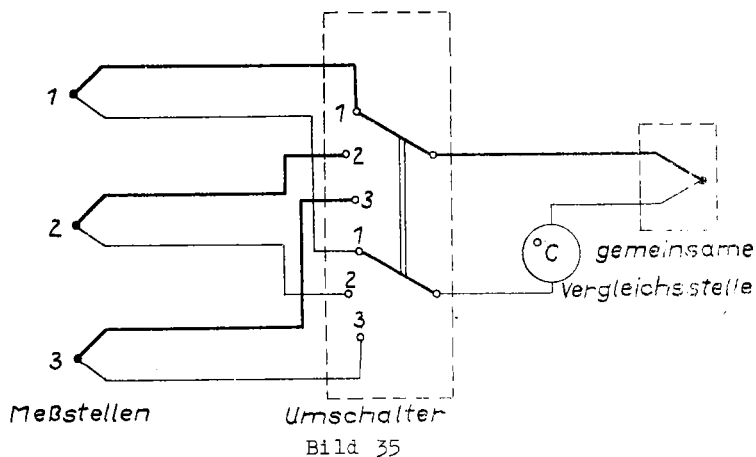


Bild 34

1. die Vergleichsstelle an einen Ort verlegt wird, dessen Temperatur von Natur aus genügend konstant bleibt;
2. die Vergleichsstelle mittels eines Thermostaten auf einer konstanten Temperatur gehalten wird;
3. die durch Temperaturschwankungen an der Vergleichsstelle bedingten Spannungsschwankungen auf geeignete Art kompensiert werden.

Während Punkt 1 den bequemsten und billigsten Fall darstellt, der jedoch nicht immer realisiert werden kann, erfordern 2 und 3 einen gerätetechnischen Mehraufwand, der sich aber besonders dann lohnt, wenn mehrere Thermoelemente der gleichen Art über einen Umschalter auf eine Vergleichsstelle arbeiten (Bild 35).



Zu 1.:

Hierzu sei noch bemerkt, daß die Vergleichsstellentemperatur, bei der diese Geräte geeicht werden, meist die mittlere Raumtemperatur ist, die mit 20°C angenommen wird. Selbstverständlich wird die Raumtemperatur Schwankungen unterworfen sein, die eine gewisse Grenze nicht überschreiten dürfen, damit die für die Messung geforderte Genauigkeit eingehalten wird. In der Regel wird man die Methode dort anwenden, wo geringe Genauigkeiten verlangt werden oder bei Messung hoher Temperaturen, wo die Schwankung der Vergleichstemperatur wenig ins Gewicht fällt.

Zu 2.:

Thermostaten sind Einrichtungen zum Konstanthalten von Temperaturen. Der einfachste Thermostat für unsere Zwecke wäre

ein mit schmelzendem Eis gefülltes Thermosgefäß, dessen Temperatur so lange auf 0°C bleibt, bis alles Eis geschmolzen ist. Der Nachteil liegt hierbei in der leichten Zerstörbarkeit des Thermosgefäßes und in der Notwendigkeit, die Eisfüllung in gewissen Zeitabständen erneuern zu müssen. Dieser einfache Thermostat findet daher nur im Labor oder für kurzzeitige Betriebsmessungen Verwendung. Meist werden die im Bild 36 im Prinzip gezeigten Thermostaten benutzt. Sie bestehen aus einem Metallblock mit großer Wärmeträgheit, in dessen Innerem die Vergleichsstelle des Thermoelementes und ein Kontaktthermometer untergebracht sind. Die elektrische Heizung des

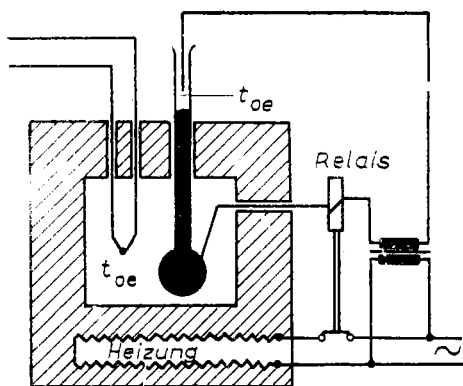


Bild 36

Blocks ist über ein Schütz geführt, welches bei Erreichen der an Kontaktthermostaten eingestellten Temperatur t_{oe} anspricht und den Heizstromkreis öffnet. Bei Abkühlung des Blocks unter t_{oe} fällt das Schütz ab, und die Heizung setzt wieder ein usw.. Durch die große Wärmeträgheit der Anlage wird erreicht, daß die Schwingungen der Temperatur im Block sehr

langsam und mit sehr kleiner Amplitude (ca. $0,1^{\circ}\text{C}$) erfolgen. Damit sich der Block abkühlen kann, muß die Temperatur t_{oe} höher als die Umgebungstemperatur sein. Man hat sich auf eine Thermostatentemperatur von 50°C geeinigt.

Eine Zwischenbemerkung: Aus den Punkten 1 und 2 geht hervor, daß die am meisten benutzten Vergleichstemperaturen 0°C , 20°C und 50°C sind.

Zu 3.:

Die Kompensation der Schwankung der Vergleichstemperatur ge-

schiebt durch die im Bild 37 gezeigte Widerstandsanordnung. Die Temperatur der Vergleichsstelle braucht hierbei nicht mehr konstant gehalten zu werden. (Eine Erklärung für das berechnete Aufschneiden des Thermokreises an der Vergleichsstelle sowie über die Aufgabe der Ausgleichsleitung folgt noch). Der Thermokreis, bestehend aus Thermoelement, Ausgleichsleitung und Anzeigegerät, liegt im Diagonalzweig einer Wheatstoneschen Brücke. Diese besteht aus drei temperaturunabhängigen Widerständen R_1 , R_2 , R_3 , während der vierte Widerstand R_t seine Größe mit der Temperatur verän-

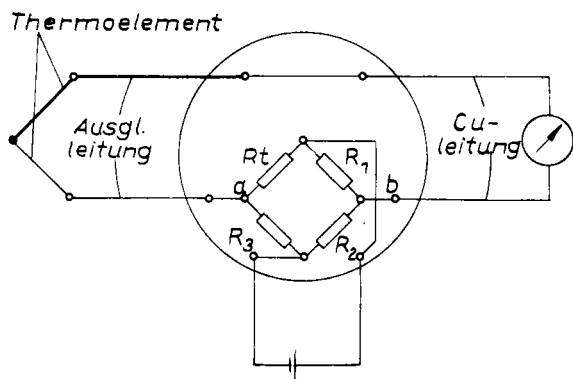


Bild 37

dert. Die aufgeschnittene Vergleichsstelle und die gesamte Brücke sind in einer Dose untergebracht, also derselben Temperatur ausgesetzt. Die vier Widerstände der Brücke sind nun so dimensioniert, daß sich die Brücke im Gleichgewicht befindet, wenn an der Vergleichsstelle die Temperatur t_{oe} herrscht, also die Vergleichstemperatur, für die das Gerät geeicht ist. Weicht die Temperatur von t_{oe} ab, so ändert sich R_t und das Gleichgewicht der Brücke wird gestört. Der Spannungsunterschied zwischen den Brückenpunkten a und b ist nicht mehr Null, sondern in seiner Größe und Richtung so bemessen, daß der Spannungsverlust ΔE von Bild 33 zur herrschenden Thermospannung addiert, bzw. wenn $t_{ob} < t_{oe}$,

subtrahiert wird. So wird immer ein Abgleich auf den Vergleichsstellenzustand t_{oe} besorgt. Der Gesamtwiderstand der Brücke (ca. 1 Ohm) muß selbstverständlich zum Gesamtwiderstand der Leitung (siehe folgendes Kapitel) hinzugerechnet werden.

Es besteht noch eine Möglichkeit, den Meßfehler durch Abweichung der Vergleichstemperatur mit mechanischen Mitteln zu kompensieren. Dazu wird die Vergleichsstelle in das Gehäuse des Anzeigegerätes verlegt. Sie nimmt damit die Gehäusetemperatur an. Das freie Ende der Rückholspirale vom Anzeigegerät wird über einen Bimetallstreifen oder eine Bimetallspirale (siehe S. 36) mit dem Gehäuse verbunden, die bei Temperaturänderung ihre Länge verändern und den Zeiger des Gerätes wie bei der Nullpunkteinstellung im stromlosen Zustand um den Betrag $\Delta t = t_{ob} - t_{oe}$ (Formel 30) oder $C \cdot (t_{ob} - t_{oe})$ (Formel 31) verstellen. Das Gerät zeigt dann immer die richtige Temperatur t_w an.

Das Ausschalten des Einflusses der Vergleichstemperatur auf das Meßergebnis bringt es mit sich, daß Meßstelle und Vergleichsstelle oft räumlich weit auseinander liegen. Die hohen Anforderungen an die Gleichmäßigkeit des Thermoschenkelmaterials und die damit verbundenen hohen Kosten lassen es verständlich erscheinen, daß man nach anderen, billigeren Werkstoffen zur Verbindung von Meß- und Vergleichsstelle gesucht hat. Diese Werkstoffe müssen folgende Forderungen erfüllen: Sie dürfen an den Verbindungsstellen mit den Thermoschenkeln keine zusätzlichen Thermospannungen abgeben, die das Meßergebnis verfälschen. Sie müssen an ihren Endpunkten, die oft als Vergleichsstelle dienen, miteinander dieselbe Thermospannung erzeugen wie das eigentliche Thermopaar. Diese Bedingungen müssen nicht im ganzen Meßbereich des Thermopaars erfüllt sein. Man hat sich auf ein Temperaturintervall von 0 bis 200 °C geeinigt. Drähte mit diesen Eigenschaften werden "Ausgleichsleitung" genannt. Die Materialzusammensetzung für die Ausgleichsleitungen finden Sie in der folgenden Tabelle:

Material für den Schenkel aus	DIN Bezeichnung	Zusammensetzung der Ausgleichsleitung
NiCr	SoNiCr	Fe technisch rein
Ni	SoNi	Cu 80 %, Ni 18 %, Mn
PtRh	SoPtRh	Cu 100 %, Ni 0,1 %
Pt	SoPt	Cu 99 %, Ni 1 %

Für Fe-Konst und Cu-Konst lohnt sich die Herstellung gesonderter Ausgleichsleitungen nicht. Hier werden die Thermopaare selbst als Ausgleichsleitungen verlegt.

Als Verbindungsleitung zwischen Vergleichsstelle und Anzeige-

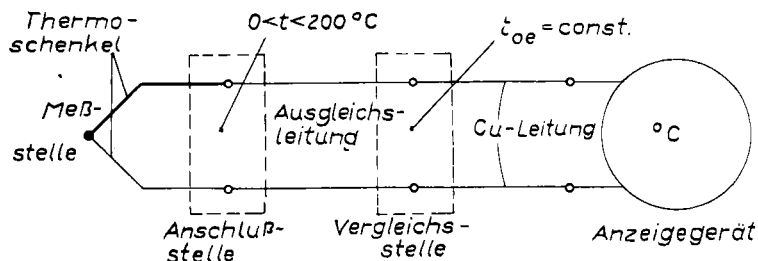


Bild 38

gerät werden normale Kupferleitungen verlegt.

Stellen wir jetzt zusammen, was zu einer Meßanordnung mit Thermoelementen gehört (Bild 38). Von der Meßstelle wird das Thermoelement bis zur Anschlußstelle geführt, deren Temperatur zwischen 0 und 200 °C liegt und in diesem Bereich schwanken kann. Die Weiterführung bis zur Vergleichsstelle übernimmt die Ausgleichsleitung. Dort ist die Temperatur entweder natürlich konstant oder wird mit einem Thermostaten konstant gehalten oder der Vergleichsstellenfehler wird kompensiert. Als Verbindung zwischen Vergleichsstelle und Anzeigegerät dient normale Kupferleitung. Die Kontakte an den Verbindungs-

stellen müssen so nahe zusammenliegen, daß die Temperaturgleichheit beider gewährleistet ist.

3.32 Schaltung der Thermoelemente

Die einfachste Schaltung ist im Bild 39 gezeigt. Die beiden Schenkel des Thermoelementes bzw. die Ausgleichsleitungen als deren Verlängerung sind direkt mit dem Anzeige-

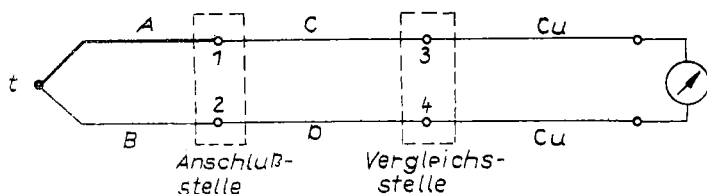


Bild 39

rät verbunden. Der Thermokreis ist direkt an der Vergleichsstelle aufgeschnitten. Diese Schaltung ist nicht ganz einwandfrei. An der Stelle 3 entsteht eine Berührungsspannung e_3 zwischen Ausgleichsleitung C und Kupfer, bei 4 eine Berührungsspannung e_4 zwischen Kupfer und Ausgleichsleitung D. Beide Spannungen sind gegeneinander gerichtet. Ihre Differenz ist aber - gleiche Temperatur von 3 und 4 vorausgesetzt - nicht gleich der Berührungsspannung zwischen C und D bei gleicher Temperatur. Der dadurch entstehende Fehler ist nicht allzu groß und kann bei weniger genauen Messungen vernachlässigt werden. Durch Einfügen einer Vergleichsstelle aus den Schenkelmaterialien A und B erhält man einwandfreie Messungen (Bild 40). Die Berührungsspannungen an den Kupferanschlußstellen sind jetzt bei gleicher Temperatur genau entgegengesetzt gleich und heben sich auf. Man kann auch mehrere Thermoelemente der gleichen Art in Reihe schalten (Bild 41). Die Meßstellen werden so ange-

ordnet, daß sie nebeneinanderliegend der zu messenden Temperatur ausgesetzt sind. Ihre Vergleichsstellen liegen in

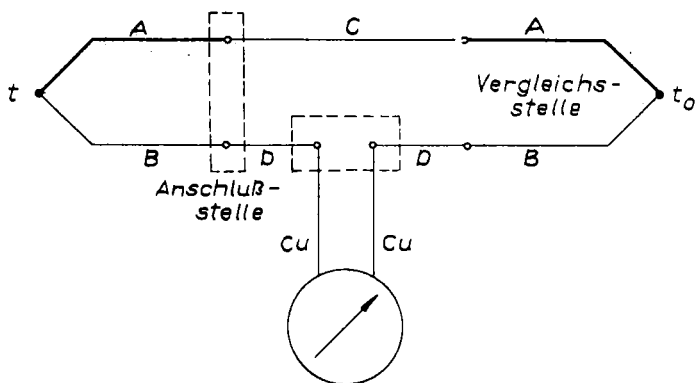


Bild 40

e i n e m Thermostaten. Bei dieser Schaltung addieren sich die Spannungen der einzelnen Elemente. Die Messung wird dadurch empfindlicher. Die Schaltung kann besonders bei der Messung kleiner Temperaturdifferenzen $t - t_0$ große Vorteile bringen. Sie kann aber auch dazu dienen, die mittleren Temperatur eines Querschnittes, über den die einzelnen Elemente verteilt sind, unmittelbar zu messen.

3.33 Die Messung der Thermospannung

Die Thermospannung kann nach zwei Meßmethoden ermittelt werden:

1. nach der Ausschlagmethode,
2. nach der Kompensationsmethode.

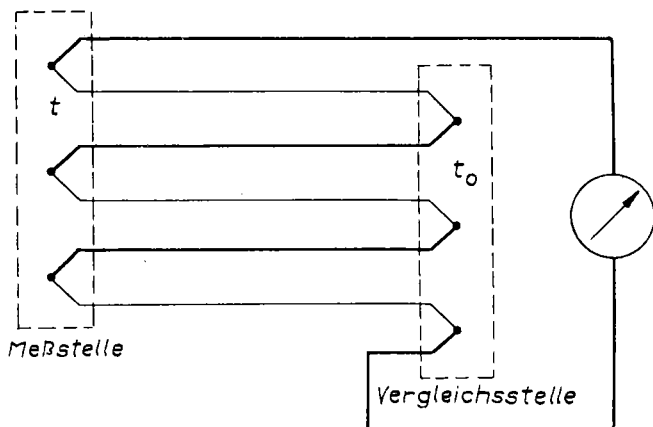


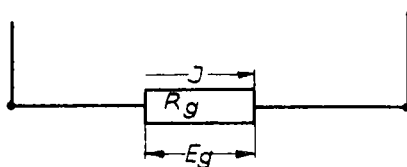
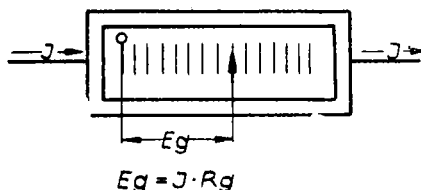
Bild 41

Bei der Ausschlagmethode liegt das Anzeigegerät im Thermokreis und zeigt die Spannung bzw. die Temperatur direkt an, während bei der Kompensationsmethode der Thermospannung eine gleichgroße, in einem Hilfskreis erzeugte Spannung entgegengeschaltet wird. Im Thermokreis befindet sich zur Kontrolle der Stromlosigkeit ein Nullgerät. Aus den elektrischen Größen des Hilfskreises kann die Thermospannung ermittelt werden. Die genauere von beiden Methoden ist die Kompensationsmethode, die einen größeren gerätetechnischen Aufwand erfordert als die Ausschlagmethode.

3.331 Die Ausschlagmethode

Die im Bild 39 und 40 gezeigten Schaltungen arbeiten nach der Ausschlagmethode. Im Prinzip werden mit diesen Schal-

tungen gar keine Spannungen gemessen, sondern die Ströme, die im Thermokreis fließen. Das Millivoltmeter mißt nur den Spannungsabfall E_g , den der Thermostrom I am Gerätewiderstand R_g erzeugt. Der Thermostrom I wird erzeugt durch die Thermospan-



Ersatzschaltbild

Bild 42

nung E und wird behindert durch den Gesamtwiderstand R_{ges} des Thermokreises. Nach dem Ohmschen Gesetz gilt für den Thermostrom:

$$I = \frac{E}{R_{ges}}$$

Diesen in (32) eingesetzt ergibt:

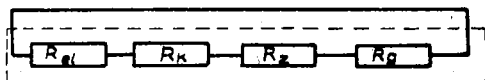
$$E_g = E \cdot \frac{R_g}{R_{ges}} \quad (33)$$

Der Gesamtwiderstand des Thermokreises setzt sich zusammen aus:

R_e dem Widerstand des Thermopaars,

R_k dem Widerstand der Ausgleichsleitung,

R_z dem Widerstand der Zuleitung (C_u),
 R_g dem Widerstand des Anzeigeelementes .



R_{ges}

Alle Widerstände liegen in Reihe. Den Gesamtwiderstand

$$R_{ges} = R_e + R_k + R_z + R_g$$

in Gleichung 33 eingesetzt:

$$E_g = E \frac{R_g}{R_e + R_k + R_z + R_g} \quad (34)$$

Weil das Widerstandsverhältnis $\frac{R_g}{R_{ges}}$ immer kleiner als 1 ist, zeigt das Galvanometer stets nur einen Bruchteil der wirklichen Thermospannung an, die angezeigte Temperatur ist zu niedrig. Die Messung ist mit einem Fehler behaftet, dessen Größe aus (34) ermittelt werden kann.

Es ist

$$E = E_g \frac{R_e + R_k + R_z + R_g}{R_g} = \frac{E_g \cdot R_g}{R_g} + E_g \frac{R_e + R_k + R_z}{R_g}$$

$$E = E_g + E_g \frac{R_e + R_k + R_z}{R_g}$$

Der entstehende absolute Meßfehler ist dann

$$\Delta E = E - E_g = E_g \frac{R_e + R_k + R_z}{R_g} \quad (35)$$

und der relative Fehler

$$\frac{\Delta E}{E_g} = \frac{R_e + R_k + R_z}{R_g} = \frac{R_a}{R_g} \quad (36)$$

Soll der Meßfehler vernachlässigbar klein werden, d.h., die Anzeige soll der Thermospannung angenähert gleich werden, dann muß die Widerstandssumme des Thermopaars, der Ausgleichsleitung und der Zuleitung vernachlässigbar klein gegen den Gerätewiderstand sein. Für genaue Messungen soll sich diese Widerstandssumme zum Gerätewiderstand wie 1 : 200 verhalten. Der über den gesamten Meßbereich konstante relative Fehler (vgl. Formel 36) beträgt dann - 0,5 %.

Für Betriebsmessungen ist nach DIN 43709 der Außenwiderstand auf 20,0 Ohm festgelegt worden. Das würde einen Gerätewiderstand von 4000 Ω bedeuten. Abgesehen davon, daß diese Forderung konstruktiv kaum zu verwirklichen ist, wäre ein solches Meßgerät außerordentlich störanfällig. Man verwendet daher in der Betriebspraxis Instrumente mit Innenwiderständen bis höchstens 800 Ω und eicht den größeren Fehler mit ein.

Beispiel:

Eine Meßanordnung arbeitet mit einem PtRh-Pt-Element, welches bei einer Meßstellentemperatur von 1200° C eine Spannung $E = 11,97$ mV erzeugt. Das Meßgerät habe einen Innenwiderstand von $R_g = 500 \Omega$, der Außenwiderstand betrage $R_e + R_k + R_l = 20,0 \Omega$. Das Millivoltmeter zeigt die Spannung

$$E_g = E \cdot \frac{R_g}{R_e + R_k + R_l + R_g} = 11,97 \cdot \frac{500}{520} = 11,5 \text{ mV an.}$$

Die zu 11,5 mV gehörende Temperatur ergibt sich durch Interpolation aus der Grundwertreihe zu 1161 °C. Dem Skalenstrich, auf den sich der Zeiger unter diesen Bedingungen einstellt, müssen also nicht die Werte 11,5 mV oder 1161 °C zugeordnet werden, sondern 11,97 mV oder 1200 °C.

Die praktische Eichung erfolgt nicht auf rechnerischem Wege, sondern experimentell, da noch andere systematische Fehler mit eingeeicht werden müssen.

Die Eichung der Millivoltmeter erfolgt auf dem Prüfstand des Herstellwerkes mit einem Außenwiderstand von $20\ \Omega$. Falls ein anderer Widerstand vorgesehen ist, muß das auf der Skala vermerkt sein. Bei der Montage der Anlage im Betrieb werden nur selten die Außenwiderstände gerade $20\ \Omega$ groß sein. Ist $R_a = R_e + R_k + R_z < 20\ \Omega$, so wird in die Leitung ein Ausgleichswiderstand $R_v = 20 - R_e + R_k + R_z$ eingebaut, so daß $R_a = R_e + R_k + R_z + R_v = 20\ \Omega$ ist. Ist der Außenwiderstand größer als $20\ \Omega$, dann sind die Leitungsquerschnitte zu klein gewählt und müssen vergrößert werden.

Nun bleiben die Widerstände keineswegs konstant. Durch Korrosion, Abbrand und Temperaturschwankungen kann sich der Widerstand des Außenkreises ändern. Auch aus diesem Grunde ist es ratsam, hochohmige Anzeigegeräte zu verwenden, damit dieser Fehler nur wenig ins Gewicht fällt.

Beispiel:

Die zu betrachtende Anlage besteht aus einem PtRh-Pt-Element von $1\ \text{m}$ Länge und $0,5\ \text{mm}$ Drahtdurchmesser, der Ausgleichsleitung von $2,5\ \text{m}$ Länge und dem gleichen Durchmesser sowie einer Kupferzuleitung von $292\ \text{m}$ Länge mit einem Querschnitt von $1\ \text{mm}^2$. Die Widerstände für das Thermopaar und die Ausgleichsleitung pro Meter Länge bei $20^\circ\ \text{C}$ Temperatur sind aus Bild 43 zu entnehmen und betragen:

$$R_e \text{ pro m} = 1,5 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$R_k \text{ pro m} = 0,18 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

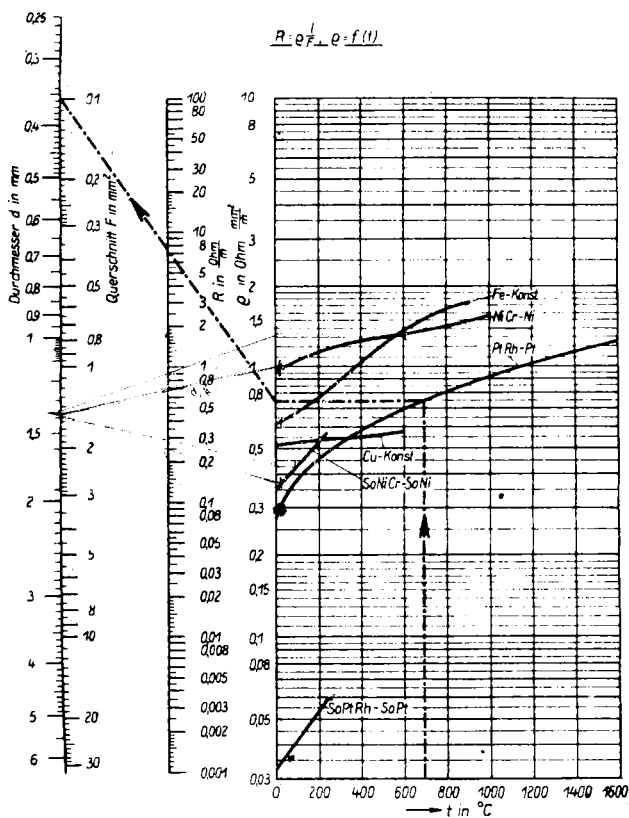


Bild 43

Für die Gesamtlängen:

$$R_e = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \Omega$$

$$R_k = 0,2 \cdot 2,5 = 0,45 \Omega$$

Der Widerstand für die Zuleitung (bei 20 °C) wird nach der aus der Elektrotechnik bekannten Formel berechnet.

$$R_z = \frac{\rho \cdot l}{q} \quad \text{mit} \quad \rho = 0,0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}; \quad l = 292 \text{ m}; \quad q = 1 \text{ mm}^2$$

$$R_z = \frac{0,0178 \cdot 292}{1} = 5,2 \Omega$$

Für den Abgleichswiderstand sind dann

$$R_v = 20 - (R_e + R_k + R_z) = 20 - (1,5 + 0,45 + 5,2) = 12,85 \Omega$$

erforderlich.

Zusätzlich zum kalten Widerstand kommen die Widerstandserhöhungen des Thermoelementes, der Ausgleichsleitung und der Zuleitung bei deren Betriebstemperatur.

Bei einer Meßstellentemperatur von 1200 °C nehmen wir als mittlere Temperatur des Thermopaars 900 °C an. Nach Bild 43 ist dann der Elementenwiderstand

$$R_e = 7,5 \Omega$$

Die mittlere Temperatur der Ausgleichsleitung sei 100 °C. Dann ist R_k pro Meter = 0,21 Ω /m und $R_k = 0,21 \cdot 2,5 = 0,52 \Omega$

Nehmen wir nun noch an, die Zuleitung zum Meßgerät habe eine mittlere Temperatur $t_2 = 50$ °C, so hat diese Temperaturabweichung $\Delta t = 30$ °C von der Normaltemperatur ebenfalls eine Widerstandsänderung der Leitung zur Folge, und zwar

$$R_z = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

$$\Delta t = (t_2 - 20) \text{ grad}; \quad \alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1} = \text{Widerstandstemperaturkoeffizient für } C_u.$$

$$R_z = 5,2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 0,61 \Omega$$

Der Leitungswiderstand im Betrieb ist

$$R_z = 5,2 + 0,61 = 5,81 \Omega$$

Für den Außenwiderstand bei den Betriebstemperaturen erhalten wir den Betrag von

$$R_a = R_e + R_k + R_z + R_v = 7,5 + 0,52 + 5,81 + 12,85 = 26,68 \Omega$$

$$\underline{R_a \approx 27 \Omega}$$

gegenüber einem Sollwert von 20Ω

Ein Millivoltmeter mit 500Ω Innenwiderstand würde bei 20Ω Leitungswiderstand nach Formel 34 die Spannung

$$E_{g_1} = E \frac{R_g}{R_g + R_a} = 11,97 \frac{500}{520} = 11,5 \text{ mV}$$

anzeigen. Unter Betriebsbedingungen mit $R_a = 27 \Omega$

$$E_{g_2} = 11,97 \frac{500}{527} = 11,35 \text{ mV}$$

Der Fehler beträgt $-0,15 \text{ mV}$ entsprechend $-12,5 \text{ grad}$. Bei 1200°C sind das rund -1% Fehler. Muß dagegen ein robusteres Gerät von nur 100Ω Innenwiderstand verwendet werden, so ergibt sich folgende Rechnung:

für 20Ω Außenwiderstand

$$E_{g_1} = E \frac{R_g}{R_a + R_g} = 11,97 \cdot \frac{100}{120} = 9,975 \text{ mV} \cong 1200^\circ \text{C}$$

Für den Betriebsfall mit $R_a = 27 \Omega$

$$E_{g_2} = 11,97 \frac{100}{127} = 9,425 \text{ mV}$$

Der Fehler beträgt jetzt

$$E_g = -0,55 \text{ mV} \quad \text{das entspricht}$$

$$\Delta t = - 45,8 \text{ grad}$$

oder

$$\begin{aligned} & - 3,8 \% \\ & ===== \end{aligned}$$

Dieser Fehler kann für beide Geräte behoben werden, wenn der Abgleichswiderstand R_v nicht mit 12,85 Ohm, sondern mit $12,85 - 6,68 = 6,17$ Ohm bemessen wird. Die Messung ist dann aber nur bei 1200° C an der Meßstelle richtig. Bei anderen Temperaturen treten wieder Fehler auf, da sich besonders der Widerstand des Thermoelementes mit der Meßtemperatur ändert.

Zusammenfassend stellen wir fest: Bei der Messung der Thermospannung nach der Ausschlagsmethode wird die zu messende Größe E mit einem Strom belastet, der an den Widerständen des gesamten Stromkreises Spannungsabfälle hervorruft, so daß nur ein Bruchteil der Spannung E zur Anzeige kommt. Der Zusammenhang zwischen Thermospannung und angezeigter Spannung ist linear (Gleichung 34, Bild 44), falls die Widerstände im Meßkreis unveränderlich sind. Die Steigung $\tan \alpha$ der Geraden und damit die Empfindlichkeit der Anlage werden durch die Größe des Verhältnisses $\frac{R_g}{R_g + R_a}$ bestimmt. Die theoretisch größtmögliche Steigung und damit die theoretisch größtmögliche Empfindlichkeit wird erreicht, wenn $R_a = 0$ ist. Es ist dann $\tan \alpha = 1$, $\alpha = 45^\circ$ und $E_a = E$. Praktisch ist R_a aber immer endlich groß. Er ist zu 20 Ohm genormt worden. Gelingt es, diesen Wert für den ganzen Meßbereich einzuhalten, dann arbeitet die Meßanordnung auf einer Geraden, deren Steigung $\tan \alpha$ nur noch vom Innenwiderstand R_g des Anzeigegerätes abhängt. Große Innenwiderstände ergeben steile Kurven und damit große Empfindlichkeiten. (Bild 45). Während wir in einer Meßanordnung den Widerstand des Anzeigegerätes R_g als hinreichend genau konstant annehmen können (das Millivoltmeter läßt sich fast immer an einem Ort konstanter Temperatur unterbringen), sind die Außenwiderstände, besonders der des Thermoelementes, Temperaturschwankungen unterworfen und

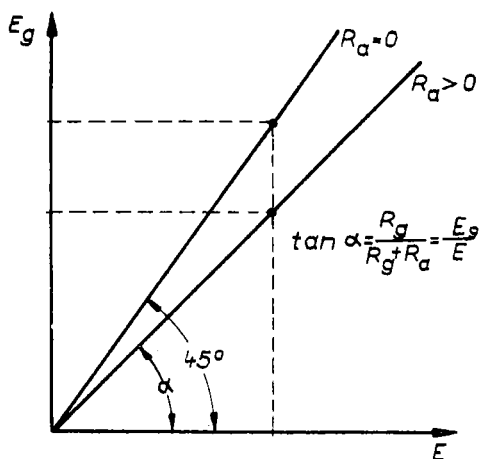


Bild 44

ändern ihre Größe. In unserem Rechenbeispiel ändert sich der Außenwiderstand von 20 Ohm bei 20 °C auf 27 Ω bei 1200 °C. Es leuchtet ein, daß unsere Anlage auf einer gekrümmten Linie, die zwischen den Geraden für $R_a = 20$ Ohm und $R_a = 27$ Ohm arbeiten muß (Bild 46, $R_v = 12,85 \Omega$). Zu höheren Temperaturen hin nimmt die Empfindlichkeit der Anlage ab, wird die Teilung der Ableseskala enger und werden die absoluten Meßfehler $\Delta E_g \sim \Delta t$ größer. Eine Verkleinerung des Abgleichswiderstandes R_v von 12,85 Ohm auf 6,17 Ohm beseitigt zwar den Fehler an dem Arbeitspunkt für den $R_a = 20$ Ohm wird, bringt aber keine Linearität, weil die Widerstände bei niederen Temperaturen kleiner, bei höheren Temperaturen größer als 20 Ohm werden. Die Genauigkeit der Ausschlagsmethode wird durch die Widerstände im Thermokreis beeinträchtigt.

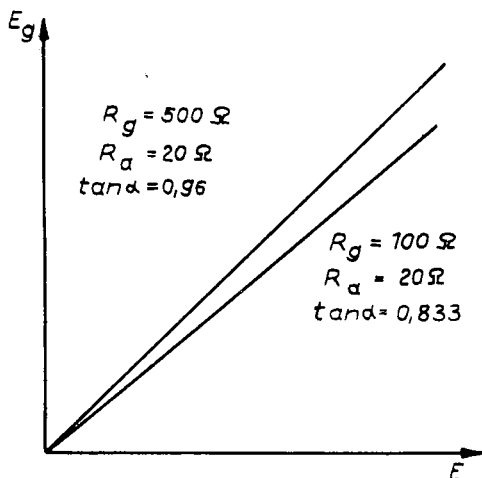


Bild 45

3.332 Die Kompensationsmethode

Wird von der Temperaturmessung mit Thermoelementen eine hohe Genauigkeit gefordert, so muß dafür gesorgt werden, daß die Spannungsabfälle ($U = I \cdot R$) an den Widerständen des Meßkreises verschwinden. Das ist aber nur dann der Fall, wenn kein Strom im Kreis fließt. Mittels einer geeigneten Hilfsschaltung erzeugt man eine Spannung U_x , die ihrem Betrage nach die Größe der Thermospannung E_x besitzt, dieser aber entgegengerichtet ist.

$$U_x = + E_x \quad \text{oder} \quad U_x - E_x = 0.$$

Am Meßkreis liegt keine resultierende Spannung an, der Strom I wird Null, es gibt keine Spannungsabfälle $I \cdot R$, die das Meßergebnis beeinflussen können. Eine solche Schaltung nennt man "Kompensationsschaltung", und ein Gerät zur Er-

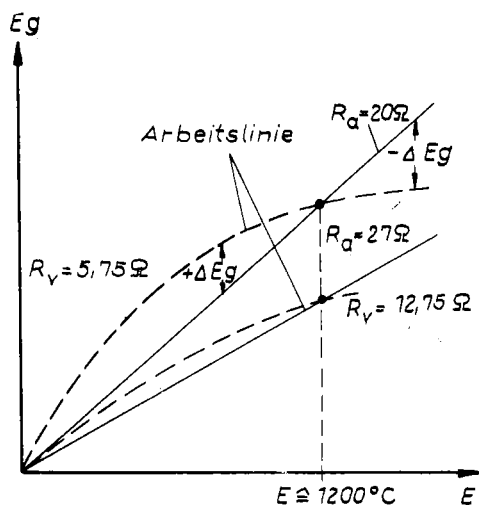


Bild 46

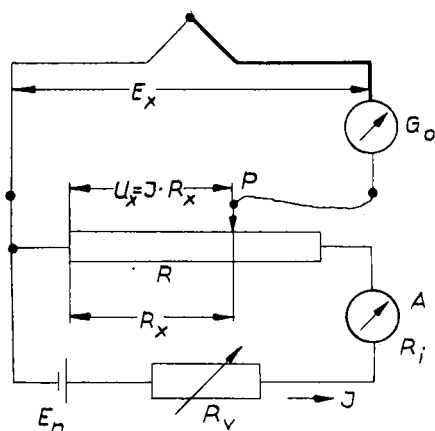


Bild 47

zeugung der gleichgro-
ßen Gegenspannung U_x
heißt "Kompensator".

Wir wollen nun die wich-
tigsten Kompensations-
schaltungen besprechen:

Die Kompensationsschal-
tung nach

P o g g e n d o r f
besteht aus zwei Kreisen
(Bild 47), dem Thermo-
kreis mit dem Nullgal-
vanometer G_0 , mit dem
die Stromlosigkeit des
Thermokreises kontrol-
liert wird und dem

Hilfskreis, der die Gegenspannung U_x erzeugt. Im Hilfskreis erzeugt die Batterie E_n einen Strom

$$I = \frac{E_n}{R_v + R_i + R}$$

dessen Größe von dem Amperemeter A kontrolliert und mittels veränderbarem Vorwiderstand R_v auf einen für jede Messung konstanten Wert eingestellt werden kann.

An dem Spannungsteiler oder Potentiometer P mit dem einstellbaren Widerstand R_x wird die Spannung

$$U_x = R_x \cdot I$$

abgegriffen, die bei Konstanz von I durch Verschieben des Potentiometerabgriffes eingestellt und auf die Größe von E_x gebracht werden kann. Das Nullgalvanometer zeigt dann Stromausgleich an und es gilt:

$$U_x = E_x = I \cdot R_x = \frac{E_n}{R_v + R_i + R} \cdot R_x \quad (37)$$

Die Stellung des Potentiometerabgriffes P ist also ein Maß für die Thermospannung E_x bzw. für die Temperatur. Es ist möglich, das Potentiometer mit einer Skala zu versehen, die in Temperaturgrade geteilt ist. Der Nachteil dieser Schaltung besteht darin, daß neben der Kompensationseinstellung der Strom I überwacht und an R_v auf eine vorgegebene Größe eingestellt und gehalten werden muß. Diese Notwendigkeit entfällt bei der Schaltung nach Lindeck-Rothe (Bild 48). Die erforderliche Gegenspannung U_x wird jetzt als Spannungsabfall am konstanten Widerstand R_n durch den veränderbaren Strom I_x erzeugt.

$$U_x = R_n \cdot I_x$$

Durch Verstellen des Widerstandes R_v wird der Strom I_x so groß eingestellt, daß

$$U_x = E_x = R_n \cdot I_x \quad (38)$$

wird.

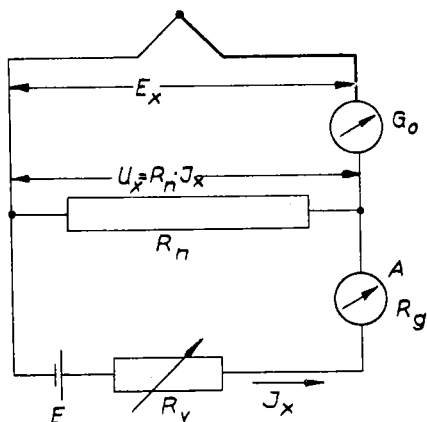


Bild 48

Das Galvanometer G_0 steht dann auf Null. Mit dem am Galvanometer G_x abgelesenen Strom I_x kann die Thermospannung errechnet werden (38). Über die Grundwertreihe kann die zugehörige Temperatur ermittelt werden. Selbstverständlich kann die Skala des Galvanometers in $^{\circ}\text{C}$ geteilt werden.

Da die Lindebeck-Rothe-Schaltung in der Praxis sehr oft angewendet wird, wollen wir noch kurz eine Empfindlichkeitsbetrachtung anschließen. Der Strom I_x ist die Größe, die in Abhängigkeit von E_x verändert wird und gemessen werden muß. E_x läßt sich um so genauer bestimmen, je stärker sich der Strom I_x mit E_x ändert, je steiler die " I_x - über $-E_x$ -Kurve" verläuft. Die Steigung dieser Kurve ist nichts anderes als der Differentialquotient

$$\frac{d I_x}{d E_x} = \frac{1}{R_n} \quad (39)$$

Als Empfindlichkeit E_a des Amperemeters A wollen wir die Änderung des Ausschlags $d\varphi$ (in Skalenteilen) mit der Änderung der zu messenden Größe dI_x auffassen:

$$\frac{d\varphi}{dI_x} = E_a \quad (40)$$

Daraus ergibt sich $dI_x = \frac{d\varphi}{E_a}$; in (39) eingesetzt;

$$\frac{d\varphi}{dE_x} = \frac{E_a}{R_n}$$

Man kann nun ohne weiteres zu endlich großen Differenzen übergehen, wenn E_a und R_n konstant sind. (E_a = konst. bei linearer Skala).

$$\Delta\varphi = \frac{E_a}{R_n} \cdot \Delta E_x \quad (41)$$

Der Ausschlag des Strommessers und damit die Empfindlichkeit der gesamten Anlage werden bei derselben Spannungsänderung

ΔE_x um so größer, je größer die Anzeigeempfindlichkeit des Amperemeters ist und je kleiner R_n gemacht wird! Ganz so einfach, wie in Formel (41) dargestellt, liegen die Verhältnisse in der Praxis nicht! Der Vollausschlag der elektrischen Meßgeräte ist begrenzt (meist 90°). Das bedeutet, daß mit wachsendem Meßbereich die Anzeigeempfindlichkeit kleiner wird (40). Andererseits aber wird nach

$$E_{x\max} = R_n \cdot I_{x\max}$$

durch Verkleinerung von R_n der notwendige Meßbereich I_{\max} des Amperemeters größer. Die Formel (41) enthält also zwei Forderungen mit gegenläufiger Tendenz.

Praktisch wird man einen Kompromiß finden müssen, indem aus den vorhandenen Geräten und Widerständen ein optimales Verhältnis

$$\frac{E_a}{R_n}$$

gebildet wird.

Beispiel:

Zur Messung der Thermospannung von 0 bis 21 mV eines Kupfer-Konstanten-Elementes stehen in Zehntelohm gestufte Widerstände und zwei Meßgeräte mit

1. 300 mA Meßbereich und $E_a = 0,5 \frac{\text{Skalenteile}}{\text{mA}}$

2. 150 mA Meßbereich und $E_a = 2 \frac{\text{Skalenteile}}{\text{mA}}$

zur Verfügung.

Um die Meßbereiche für beide Geräte voll auszunutzen, muß R_n folgende Größen haben:

für Gerät 1: $R_{n_1} = \frac{E_{x\max}}{I_{x\max}} = \frac{21 \text{ mV}}{300 \text{ mA}} = 0,07 \Omega$

für Gerät 2: $R_{n_2} = \frac{21 \text{ mV}}{150 \text{ mA}} = 0,14 \Omega$

Die Empfindlichkeit der Anordnung $\frac{\Delta \varphi}{\Delta E_x}$ wird dann:
für Anordnung 1.

$$\left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta E_x} \right)_1 = \frac{E_{a_1}}{R_{n_1}} = \frac{0,5}{0,07} \frac{\text{Skt}}{\Omega \text{ mA}} = 7,14 \frac{\text{Skt}}{\text{mV}}$$

für Anordnung 2.

$$\left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta E_x} \right)_2 = \frac{E_{a_2}}{R_{n_2}} = \frac{2}{0,14} \frac{\text{Skt}}{\Omega \text{ mA}} = 14,3 \frac{\text{Skt}}{\text{mV}}$$

Von den beiden möglichen Anordnungen ist die zweite die günstigere.

Selbstverständlich kann die Empfindlichkeit zu Ungunsten des Meßbereiches erhöht werden. Wird im 2. Fall R_n auf 0,1 verkleinert, dann beträgt die Empfindlichkeit

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta E_x} = \frac{2}{0,1} = 20 \frac{\text{Skt}}{\text{mV}}$$

D.h. wenn das Galvanometer G_x um 1 Skalenteil ausschlägt, dann hat sich E_x um 0,05 mV geändert. Allerdings kann mit dieser Anlage nur eine Höchstspannung $E_x = 0,1 \cdot 150 \text{ mA} = 15 \text{ mV}$ gemessen werden. Sollen größere Spannungen bei gleicher Empfindlichkeit gemessen werden, so muß ein Meßgerät mit unterdrücktem Anfangsbereich benutzt werden. Selbstverständlich muß das Nullgerät noch eine Ablesung von $\pm 0,05 \text{ mV}$ zulassen.

Eine weitere Möglichkeit der Kompensation der Thermospannung besteht darin, daß man die Spannung E_{ab} zwischen den Punkten a und b (Bild 49) einer nicht abgeglichenen Wheatstone-Brücke durch Verändern des Widerstandes R_2 entgegengesetzt gleich der Thermospannung E_x macht. Durch die Leitung im Thermokreis fließt dann ebenfalls kein Strom, was durch das Galvanometer G_0 kontrolliert wird. Die Stellung des Abgriffes von R_1 ist ein Maß für die kompensierte Thermospannung, bzw. für die Temperatur.

Es soll nun eine Beziehung entwickelt werden, die es uns gestattet, die Größe von R_1 zu berechnen, wenn die Spannung E_x durch die Spannung E_{ab} kompensiert werden soll. Berechnen wir zunächst die Größe der Spannung E_{ab} in Abhängigkeit von R_1 . Dabei denken wir uns das Thermoelement mit dem Galvanometer aus der Brücke herausgenommen. Diese Vereinfachung ist zulässig, da der Strom zwischen a und b Null werden soll. Wie aus Bild 49 ersichtlich, ist die Spannung E_{ab} gleich der Differenz aus den Spannungsabfällen U_1 und U_3 an den Widerständen R_1 und R_3 .

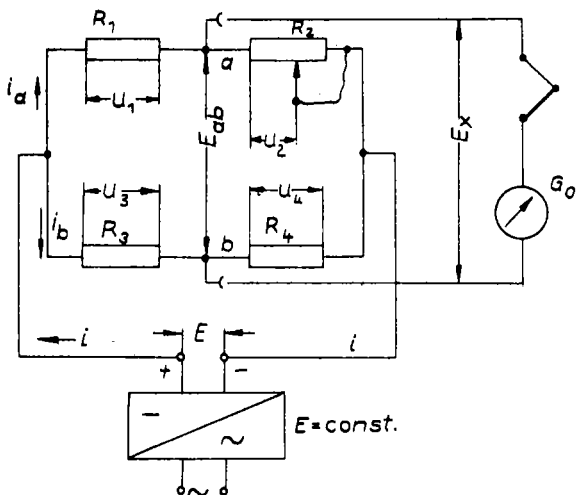


Bild 49

$$E_{ab} = U_1 - U_3 = i_a \cdot R_1 - i_b \cdot R_3$$

An den Zweigen der Brücke a und b liegt die Betriebsspannung E . Daher gilt:

$$E = i_a(R_1 + R_2) = i_b(R_3 + R_4)$$

oder

$$i_a = \frac{E}{R_1 + R_2} ; \quad i_b = \frac{E}{R_3 + R_4}$$

Damit wird

$$E_{ab} = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Führen wir nun für die gesamte Brücke den Ersatzwiderstand R_e ein, dann gilt nach dem Ohmschen Gesetz

$$E = i \cdot R_e$$

und nach Kirchhoff

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}$$

oder

$$R_e = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{\sum R_{1...4}}$$

Scmit

$$E = i \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{\sum R_{1...4}}$$

Hiermit erhalten wir nach kurzer Umrechnung, die Sie bitte selbst vornehmen wollen,

$$E_{ab} = i \frac{R_1(R_3 + R_4) - R_2(R_1 + R_2)}{\sum R_{1...4}} = i \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{\sum R_{1...4}} \quad (42)$$

Schließen wir nun Thermoelement und Nullgalvanometer an den Punkten a und b an, so ergibt sich nebenstehendes Ersatzschaltbild. Daraus geht hervor, daß

$$E_{ab} + E_x = i_g \cdot R_g \quad (43)$$

sein muß. Beachten wir, daß im Kompensationsfall $i_g = 0$ wird, dann ist

$$E_{ab} = - E_x$$

Wir haben somit

$$- E_x = i \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{\sum R_1 \dots 4} \quad (44)$$

die gesuchte Beziehung gefunden, mit der wir bei festen, gegebenen Werten für R_2 ; R_3 ; R_4 die zur Kompensation von E_x notwendige Größe von R_1 errechnen können.

Beispiel:

Ein Thermoelement erzeuge eine Spannung von 20 mV. Die Widerstände der Brücke seien $R_2 = R_3 = R_4 = 100$. Die Brücke werde mit einem Strom von $i = 20$ mA gespeist. Wie groß muß R_1 gemacht werden, damit die Thermospannung kompensiert wird?

$$- 20 = 20 \frac{R_1 \cdot 100 - 100 \cdot 100}{R_1 + 300}$$

$$- R_1 - 300 = 100 R_1 - 10000$$

$$9700 = 101 R_1$$

$$\underline{R_1 = 96 \text{ Ohm}}$$

Genauer wird die Rechnung, wenn die Widerstandsänderung von R_1 gegenüber einem Wert R_0 von R_1 bestimmt wird, bei dem $E_{ab} = 0$ wird.

$$R_1 = R_0 + \Delta R$$

Für unser Zahlenbeispiel müßte $R_0 = 100$ Ohm sein, was sich leicht an der Formel für E_{ab} nachprüfen läßt.

Setzen wir für $R_1 = 100 + \Delta R$:

$$- 20 = 20 \frac{(100 + \Delta R) 100 - 100 \cdot 100}{400 + \Delta R}$$

$$- 400 - \Delta R = 100 \cdot \Delta R$$

$$- 400 = 101 \cdot \Delta R$$

$$- \Delta R = 3,96 \text{ Ohm}$$

Der Widerstand R_1 muß von seinem Anfangswert $R_0 = 100 \text{ Ohm}$ um $\Delta R = 3,96 \text{ Ohm}$, also auf $96,04 \text{ Ohm}$ verkleinert werden! Zur angenäherten Berechnung kann auch die Formel:

$$\Delta R = \frac{E_x}{I} \cdot \frac{4 (R_0 + R_g)}{R_g}$$

benutzt werden.

Die Beispiele und Berechnungen zeigen, daß die Kompensationsmethoden eine Reihe Vorteile besitzen.

1. Die Widerstände im Thermokreis und deren Änderungen gehen nicht ins Meßergebnis ein.
2. Die Meßanordnung ist bei entsprechender Auswahl der Geräte sehr empfindlich und läßt sehr genaue Messungen zu.

Die Nachteile sollen aber nicht unerwähnt bleiben:

1. Die Meßanordnung zeigt nicht selbsttätig an! Zu ihrer Bedienung werden Arbeitskräfte benötigt.
2. Um die Kompensation einzustellen, wird eine gewisse Zeit benötigt, während der sich die zu messende Größe nicht ändern darf.

Die Kompensationsschaltung in dieser Form ist nur im Labor zu verwenden, kaum im Betrieb. Bei einem Betriebsmeßgerät müßten die Nachteile 1 und 2 beseitigt sein. Diese Forderung erfüllen die selbsttätigen Kompensatoren.

3.3321 Selbsttätige Kompensatoren

Bei den selbstabgleichenden Kompensatoren wird die Veränderung der zur Kompensation notwendigen Größen nicht mehr von Hand, sondern durch eine Automatik betätigt, die nur so lange eingreift, wie der Strom im Thermokreis ungleich Null ist

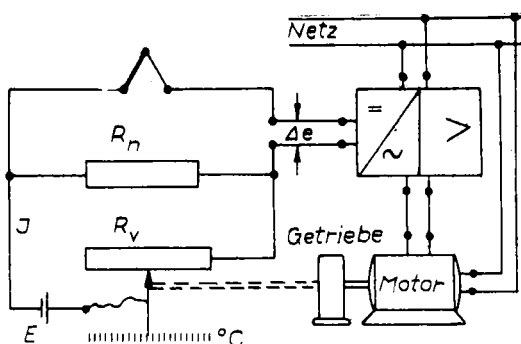


Bild 50

Im Bild 50 ist ein selbstabgleichender Kompensator gezeigt. Die Anlage ist aus Bild 46 entstanden. Anstelle des Nullgalvanometers ist ein Verstärker getreten, der die im nichtabgeglichenen Zustand auftretende Spannung

$$\Delta e = E_x - I_x \cdot R_n$$

verstärkt und eine Δe proportionale Leistung an den Umkehrmotor M abgibt. Dieser ist über ein Getriebe mit dem Schleifer des Widerstandes R_v mechanisch gekoppelt und stellt R_v so lange und in der Richtung, daß

$$\Delta e = E_x - I_x R_n = 0 \text{ wird.}$$

Ausgehend von einem Gleichgewichtszustand ($\Delta e = 0$), müßte bei Temperaturerhöhung der Motor M den Schleifer von R_V nach rechts, bei Temperaturerniedrigung nach links bewegen. Es ist leicht einzusehen, daß dieselbe Veränderung, wie sie mit Bild 48 geschehen ist, auch an Bild 47 und 49 vorgenommen werden kann. Anstelle des Nullgalvanometers liegt dann der Verstärkereingang. Der Motor verstellt R_x bzw. R_2 . Weil der Motor beim selbsttätigen Kompensator die Spannung selbst wegnimmt, gleichsam "Selbstmord" betreibt, ist diese Art zu kompensieren auch unter dem Namen "Nullmotorenmethode" bekannt. Diese Kompensatoren heißen "motorische Kompensatoren".

Die Wirkungsweise der Nullmotorenkette soll im folgenden beschrieben werden (Bild 51 und 52).

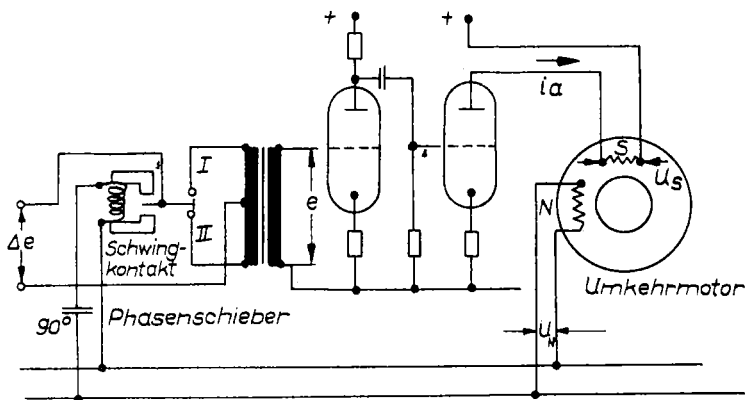


Bild 51

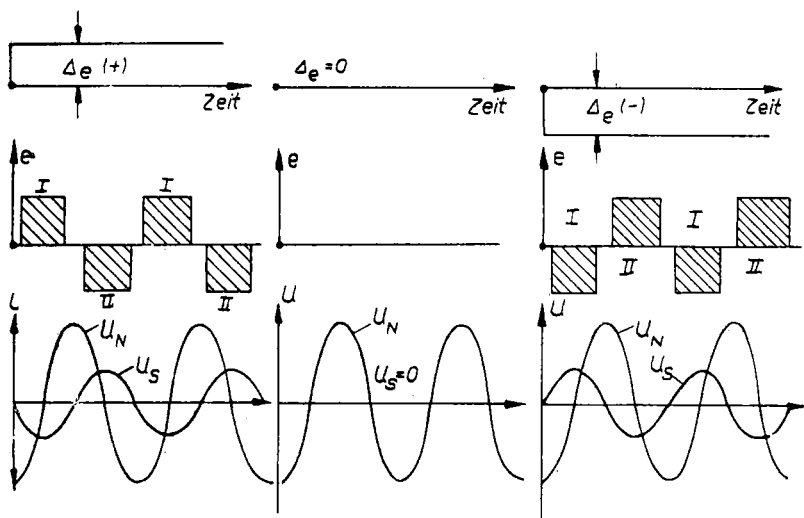


Bild 52

Die im nichtabgeglichenen Zustand auftretenden Spannungsdifferenzen Δe sind Gleichspannungen und können, wenn es sich um einen Röhrenverstärker handelt, nur schlecht verstärkt werden. Durch den Schwingkontakt, der die Schalterstellung mit der normalen Netzfrequenz von 50 Hz wechselt, wird Δe in eine rechteckige Wechselspannung e zerhackt, die am Ausgang des Übersetzungstrafos und damit am Steuergritter der ersten Röhre des Verstärkers liegt. In der Stellung I des Schwingkontaktes wird die obere Hälfte der Primärwicklung des Trafos vom Strom z.B. von oben nach unten durchsetzt. Ist dagegen Kontakt II geschlossen, so wird die

untere Hälfte der Primärwicklung von unten nach oben, also in der entgegengesetzten Richtung durchflossen. So wird sekundärseitig eine rechteckige Wechselspannung induziert (Bild 52 Zeile 2), deren Phasenlage davon abhängt, ob Δe positiv ($E_x > I \cdot R$) oder negativ ($E_x < I \cdot R$) ist. Ändert nämlich Δe die Richtung, so ändert auch der primärseitige Strom seine Richtung. In Schwingkontaktstellung I hat er genau die entgegengesetzte Richtung wie oben beschrieben. Daraus ergibt sich eine Phasenverschiebung um $\alpha = 180^\circ$ auf der Sekundärseite, wenn primärseitig die Richtung von Δe geändert wird. An der Steuerwicklung des Motors liegt die Steuerspannung U_s . Ihre Phasenlage zur Netzspannung U_N wird durch den Phasenschieber so eingestellt, daß U_s gegen U_N um $\alpha = 90^\circ$ vorseilt, wenn Δe positiv ist und um $\alpha = -90^\circ$ nachhilt, wenn Δe negativ wird (Bild 52 3. Zeile).

Im Motor entsteht durch diese Phasenverschiebung ein ver-
stümmeltes Drehfeld (ähnlich dem Drehstrommotor mit 120°
versetzten Wicklungen und einer Verschiebung der einzelnen
Phasen um 120° gegeneinander). Bei positivem Δe hat die
Spannung U_s in der Steuerwicklung zeitiger ihr Maximum als
die Netzspannung U_N in der Hauptwicklung. Das Feld dreht
sich im Uhrzeigersinn und nimmt den Läufer des Motors in
der entsprechenden Richtung mit. Der Motor läuft rechts
herum. Die umgekehrte Drehrichtung, also Linkslauf, tritt
bei negativen Δe auf. Ist Δe gleich Null, so kann durch
das Fehlen von U_s kein Drehfeld entstehen. Der Motor bleibt
stehen. Damit ist der Nullmotor in der Lage, die Widerstän-
de in der entsprechenden Richtung zu verstellen, so daß
ein selbsttätiger Abgleich des Kompensators erfolgt.

Ein Zerschneiden der Gleichspannung Δe ist unnötig, wenn ein
Magnetverstärker den Umkehrmotor antreibt. Am Magnetverstär-
ker können mit kleinen Gleichspannungen große Wechselspan-
nungen relativ empfindlich gesteuert werden.

Die motorischen Kompensatoren besitzen noch einen weiteren

Vorzug. Der Nullmotor kann so stark ausgelegt werden, daß er nicht nur das Potentiometer oder den Widerstand verstellt, sondern auch gleichzeitig eine Schreibfeder über einen Registrierstreifen führt, ohne daß sich die Reibung zwischen Feder und Papier in Meßfehlern bemerkbar macht. Diese "Kompensographen" sind äußerst genau arbeitende Linienschreiber (Bild 53).

Eine weitere Möglichkeit, den in Bild 48 gezeigten Kompensator nach Lindeck-Rothe zu automatisieren, besteht darin, den Widerstand R_v durch eine Elektronenröhre zu ersetzen. Der Anodenstrom I_a einer Triode kann durch die Gitterspannung U_g gesteuert werden. Anstelle des vom Widerstand R_v gesteuerten Stromes I_x fließt jetzt der gittergesteuerte Anodenstrom I_a , der am Widerstand R_n den Spannungsabfall $U_x = R_n \cdot I_a$ erzeugt. Dieser Spannungsabfall muß gleich der zu messenden Spannung E_x gemacht werden. Wie das geschieht, erarbeiten wir uns anhand des Bildes 54.

Wir nehmen an, es sei $E_x > U_x = R_n \cdot I_a$. Im Thermokreis fließt dann ein Strom i . Das Galvanometer G_o hat keine Rückstellfeder, Es dreht sich so lange, bis der Strom i gleich Null ist und bleibt dann in jeder beliebigen Stellung stehen.¹⁾ In unserem Falle, $E_x > U_x$, dreht es sich im Uhrzeigersinn. Die mitbewegte Steuerfahne deckt die von der Lampe L auf die Fotozelle FZ fallenden Lichtstrahlen in zunehmendem Maße ab. Dadurch erhöht sich der Widerstand der Fotozelle, was einen geringeren Stromfluß durch den Gittervorwiderstand R_G zur Folge hat.

Die negative Gitterspannung U_g , die am Widerstand R_G abfällt, wird somit kleiner und gibt einen größeren Anodenstrom I_a frei. Dieser Vorgang währt solange, bis $E_x = R_n \cdot I_a$ geworden ist. Im Thermokreis ist der Strom $i = 0$, das Galvanometer G_o bewegt sich nicht weiter. Vom Amperemeter A wird der Anodenstrom I_a gemessen, der E_x und damit der Tempe-

1) Regelungstechnisch gesehen ist das ein Glied mit "I-Verhalten" oder "ohne Ausgleich".

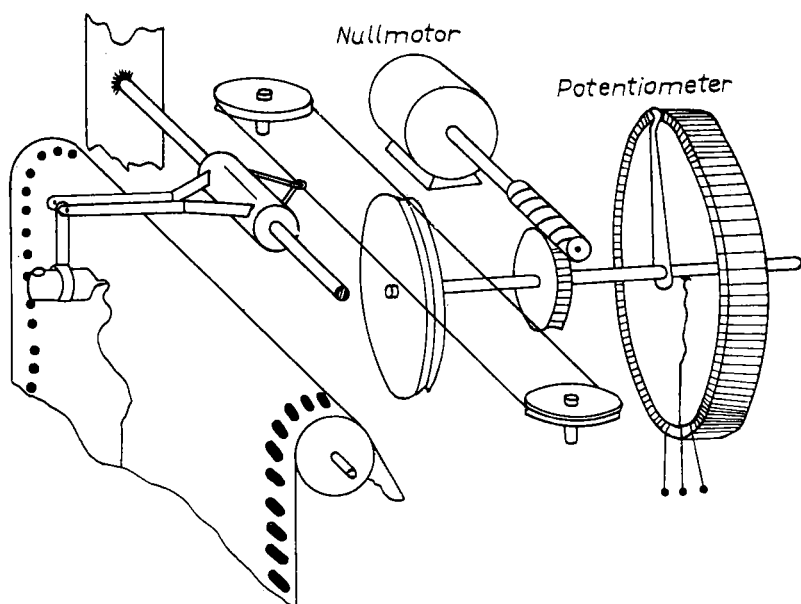


Bild 53

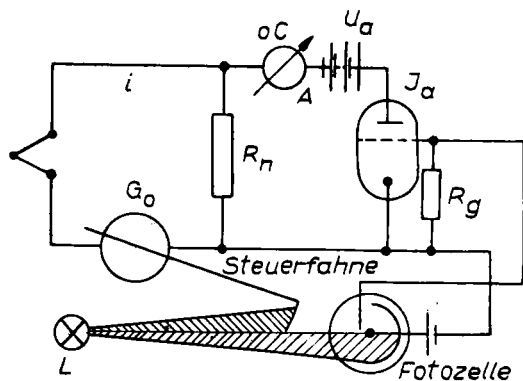


Bild 54

ratur proportional ist. Das Amperemeter A kann in $^{\circ}\text{C}$ geeicht werden. Änderungen von Spannungen im Kompensationskreis sowie Änderungen der charakteristischen Daten von Röhre und Photozelle gehen nicht in das Meßergebnis ein.

Diese "lichtelektrischen" Kompensatoren arbeiten zwar etwas ungenauer als die motorischen, sind dafür aber wesentlich einfacher im Aufbau und daher billiger. Neben der Methode der vollständigen Kompensation der Thermospannung gibt es noch die Methode der Teilkompensation, bei der nur ein Teil der Thermospannung kompensiert, der Rest nach der Ausschlagsmethode gemessen wird. Wegen des kleinen Meßbereiches des Ausschlagsgerätes sind solche Messungen sehr empfindlich und genau.

Die beschriebenen Kompensatoren-Typen sind die bekanntesten. Die Vielzahl der anderen zu beschreiben, würde den Rahmen des Lehrbriefes überschreiten.

Zusammenfassung:

Die Vorteile der Kompensationsmethode sind:

1. Wegen Stromlosigkeit im Thermokreis ergeben sich keine Spannungsabfälle.
2. Abgleichung auf genau festgelegte Außenwiderstände ist unnötig.
3. Der Temperatureinfluß auf die Leitungen macht sich nicht mehr bemerkbar.
4. Die Empfindlichkeit der Methode ist sehr hoch, besonders dort, wo die Thermoströme verstärkt werden. Als Rangordnung der Empfindlichkeit kann die Reihenfolge: Poggendorff'sche Schaltung, Brücken-Schaltung, Lindeck-Rothe-Schaltung gelten.
5. Im Kompensationskreis stehen große Verstellkräfte zur Verfügung. Die Anzeige und die Registrierung der Meßwerte erfolgt daher sehr genau.

Als Nachteile wären zu nennen:

1. Der relativ hohe gerätetechnische Aufwand und damit verbundene hohe Anschaffungskosten.
2. Die Notwendigkeit bei der Anwendung in explosionsgefährlichen Betrieben einen zusätzlichen "Ex-Schutz" anbringen zu müssen, weil die Grenzbedingungen (VDE 0171) von fast allen Geräten überschritten werden.

Das Kapitel über die Messung von Temperaturen mit Thermo-
elementen hat die Probleme dieser Meßmethode kurz angedeutet
und gezeigt, daß ihre einwandfreie Lösung ohne Aufwand nicht
möglich ist. Dieser Aufwand ist notwendig und vertretbar,
weil es zur Zeit keine anderen Meßelemente gibt, mit denen
Temperaturen über 600 °C bis 1600 °C einfacher und besser zu
erfassen sind.

3.34 Widerstandsthermometer

Der elektrische Widerstand von Metallen, elektrolytischen Flüssigkeiten und Halbleitern ist temperaturabhängig. Ist dieser Zusammenhang aus Versuchen bekannt, ist zu jedem Widerstand eindeutig eine Temperatur errechenbar oder aus einem Diagramm abzulesen, so kann die Widerstandsänderung als Maß für die Temperatur gelten. Die Temperaturmessung wäre somit auf die Messung von elektrischen Widerstandsänderungen zurückgeführt.

Die Widerstandsthermometer sind als Betriebsmeßgeräte sehr verbreitet. Man mißt mit ihnen Temperaturen zwischen -200°C und 750°C (in Sonderfällen bis 1000°C) mit einer sehr hohen Genauigkeit. Bei sorgfältigst ausgeführten Messungen kann man auf $0,001$ grd genau messen. In der Meßgenauigkeit übertreffen die Widerstandsthermometer die Thermoelemente bei weitem, haben aber den Nachteil gegenüber einfachen thermoelektrischen Schaltungen, daß stets eine besondere Stromquelle vorhanden sein muß und die obere Meßgrenze normalerweise schon bei 750°C liegt. Ebenso wie bei den Thermoelementen ist die Fernübertragung der Meßwerte mit elektrischen Leitungen bis zu 10 km Entfernung möglich. Desgleichen können auch nach Einbau von Meßstellenumschaltern die Temperaturen mehrerer Meßstellen an einem Gerät angezeigt oder registriert werden.

3.341 Auswahl des Widerstandsmaterials

Wie schon in der Einleitung erwähnt, stehen uns als Widerstandsmaterial die Metalle, elektrolytische Flüssigkeiten und die Halbleiter zur Verfügung. Stellen wir zunächst die Forderungen auf, die wir aus meßtechnischen, betriebspraktischen und fertigungstechnischen Gründen an das Widerstandsmaterial stellen müssen, und sehen dann nach, welche der drei Gruppen für unsere Zwecke günstige Eigenschaften besitzt.

Als Widerstandsmaterial kommen nur solche Stoffe in Frage, deren chemische und physikalische Eigenschaften sich im vorgesehenen Meßbereich nicht ändern. Das Material darf nicht korrodieren, sich nicht mit anderen Stoffen legieren und darf im betreffenden Temperaturintervall keine Umwandlungspunkte in eine andere Phase besitzen. Die Widerstandsänderung soll möglichst linear mit der Temperatur erfolgen, etwa nach der Beziehung

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (45)$$

oder

$$R_t - R_0 = \Delta R = R_0 \alpha \cdot \Delta t \quad (46)$$

Es sind: R_t der Widerstand bei einer Temperatur von t °C
 R_0 der Widerstand bei Null °C
 ΔR die Widerstandsänderung
 α der Temperaturkoeffizient des Widerstandsmaterials.

Der Temperaturkoeffizient α muß eine Konstante sein, oder er darf sich nur wenig mit der Temperatur ändern.

Hysteresiserscheinungen, die unterschiedliche Anzeigen bei steigender und fallender Temperatur bewirken, sind ebenso unerwünscht wie Alterungen, die sich in einer langsamen zeitlichen Veränderung von α bemerkbar machen.

Von großer Wichtigkeit ist die Frage der Austauschbarkeit von Widerständen, ohne die Anzeigeeinrichtung nacheichen zu müssen. Diese Austauschbarkeit ist aber nur gewährleistet, wenn sich das Widerstandsmaterial stets mit gleicher Güte und mit dem gleichen Temperaturkoeffizienten herstellen läßt. Verunreinigungen des Materials ändern den Temperaturkoeffizienten sehr stark. Es muß sich also mit hohem Reinheitsgrad bei niedrigen Kosten gewinnen lassen.

Um eine hohe Empfindlichkeit, d.h. eine große Widerstandsänderung je Grad Temperaturänderung zu erreichen, sollte nach Gleichung 46

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta t$$

ein Widerstandsmaterial mit großem Temperaturkoeffizienten ausgesucht werden, denn α gibt neben R_0 die Steigung der Widerstands-Temperatur-Kurve an.

Der Anfangswiderstand R_0 sollte ebenfalls genügend groß gewählt werden. Nur bei kleiner elektrischer Leitfähigkeit des Materials kann der Widerstand auf kleinstem Raum untergebracht werden. Damit werden Punktmessungen möglich, der Fühler hat eine kleine Wärmekapazität und damit eine kurze Übergangszeit oder eine kleine Anzeigeträgheit.

All diese Forderungen werden am besten von den Metallen erfüllt, unter denen Platin und Nickel die günstigsten Eigenschaften aufweisen. Ihr Temperaturkoeffizient α ist positiv, d.h. ihr Widerstand wächst mit steigender Temperatur. Nickel hat von beiden den größeren Temperaturbeiwert ($\alpha = 0,617 \cdot 10^{-2}$), ist aber nur in den Grenzen -60 bis $+180^\circ$ zu verwenden, während Platin ($\alpha = 0,385 \cdot 10^{-2} \text{grd}^{-1}$) zwischen -200°C und $+750^\circ\text{C}$ einwandfreie Messungen ergibt. Letzteres ist wohl auch der Grund dafür, daß sich Platin in der Praxis mehr durchgesetzt hat als Nickel. Um die Austauschbarkeit zu gewährleisten, wurden Grundwerte beider Metalle in DIN 43760 genormt, die folgende Tabelle zeigt:

Temp. grd C	Pt	Ni	Temp. grd C	Pt	Ni	Temp. grd C	Pt
- 22o	1o,41		5o	119,4o	129,1	38o	24o,15
- 2oo	18,53		6o	123,24	135,3	4oo	247,07
- 18o	27,05		8o	13o,91	148,2	42o	253,95
- 16o	35,46		1oo	138,5o	161,7	44o	26o,79
- 14o	43,8o		12o	146,07	175,9	46o	267,57
- 12o	52,04		14o	153,59	19o,9	48o	274,31
- 1oo	6o,2o		16o	161,06	2o6,7	5oo	28o,94
- 8o	68,28		18o	168,48	223,1	52o	287,51
- 6o	76,28	69,5	2oo	175,86	-	54o	294,06
- 4o	84,21	79,1	22o	183,2o	-	56o	3oo,78
- 3o	88,17	84,1	24o	19o,49	-	58o	3o7,33
- 2o	92,13	89,3	26o	197,75	-	6oo	313,85
0	1oo,oo	1oo,o	28o	2o4,94	-	62o	32o,35
1o	1o3,9o	1o5,6	3oo	212,08	-	64o	326,79
2o	1o7,8o	111,3	32o	219,16	-	66o	333,18
3o	111,68	117,1	34o	226,2o	-	7oo	345,8o
4o	115,54	123,o	36o	233,19	-	75o	361,4o

Aus der Tabelle geht hervor, daß die Widerstände bei Null Grad Celsius einen Widerstand $R_0 = 100$ Ohm haben. Trägt man die Widerstände über der Temperatur auf (was Sie bitte tun wollen), so erkennt man einen fast linearen Zusammenhang, der sehr genau durch die Gleichung

$$R_t = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$$

beschrieben wird. Berechnen Sie jetzt durch Einsetzen zweier Widerstandswerte R_t und der dazugehörigen Temperaturen die Beiwerte A und B! Das Resultat lautet für Platin:

$$R_0 = 100 \quad ; \quad A = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1}; \quad B = - 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ grad}^{-2}$$

Das Kupfer hat von den Metallen den höchsten Temperaturbeiwert, leider aber eine sichtbar unlineare Temperatur-

Widerstands-Kurve. Wegen der großen Oxydationsgefahr kann es nur bei Raumtemperatur eingesetzt werden. Es wird nur zur Temperaturkorrektur in Meßeinrichtungen und zur Temperaturmessung der Kupferwicklung elektrischer Maschinen benutzt, wobei diese Kupferwicklung selbst den Meßwiderstand darstellt.

Die elektrolytischen Flüssigkeiten eignen sich weniger als Thermometerwiderstände. Sie können nur mit Wechselstrom betrieben werden, da sie sich bei Gleichstrom elektrolytisch zersetzen. In der Betriebspraxis werden sie nicht verwendet. Oft ergeben sich in der Praxis Fälle, in denen es erforderlich ist, kleine Temperaturspannen sehr genau und sehr empfindlich zu messen, oder der Widerstandsfühler muß auf sehr kleinem Raum untergebracht werden, wie das bei der Messung von Lagertemperaturen in Maschinenlagern der Fall ist. Dann ist der Temperaturbeiwert der Metalle zu klein, d.h. die Temperaturwiderstandskurve verläuft zu flach, die kleinen Temperaturänderungen bewirken eine schlecht und ungenau meßbare Widerstandsänderung. Hinzu kommt noch, daß bei kleinen Fühlern nur kleine Anfangswiderstände R_0 realisiert werden können, was wiederum einen flachen Anstieg der Temperatur-Widerstandskurve zur Folge hat (Gleichung 46).

Für solche Zwecke sind Halbleiterwiderstände sehr gut geeignet. Halbleiter ändern ihren Widerstand sehr stark mit der Temperatur. Während der Temperaturbeiwert der Metalle ungefähr bei $0,5 \cdot 10^{-2}$ pro $^{\circ}\text{C}$ liegt, erreichen die Halbleiter Temperaturkoeffizienten von $-0,05$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ und mehr. Der Anstieg der Widerstands-Temperaturkurve der Halbleiter ist rund zehnmal so groß wie die der Metalle und damit auch ihre Meßempfindlichkeit. Der negative Temperaturbeiwert der Halbleiter besagt, daß der Widerstand mit wachsender Temperatur kleiner wird. Sie leiten bei hohen Temperaturen besser als bei tiefen. Daher rührt auch ihr Name Heißeleiter.

Als Heißeleitermaterial verwendet man die Oxyde der Schwermetalle wie Mn, Cr, Fe, Co, Ni, Zn. Mit diesen Heißeleitern

wird das Temperaturintervall von -20°C bis $+180^{\circ}\text{C}$ evtl. bis 300°C beherrscht. Mit keramischen Stoffen sind Temperaturen bis 1000°C gemessen worden. Das Volumen der Schwermetalloxyd-Meßfühler ist sehr klein. Der Widerstand von einigen 1000 Ohm (bei 20°C) kann in 1 mm^3 untergebracht werden! Die Wärmekapazität und damit die Anzeigeverzögerung solcher Meßfühler ist sehr klein.

Man fragt sich, nachdem man die Vorteile der Heißleiter kennt, warum von ihnen nicht schon alle anderen elektrischen Fühler verdrängt worden sind. Die Aufzählung der Nachteile begründet das.

Die Charakteristik der Heißleiter ist nicht linear. Sie gehorcht einem Exponentialgesetz der Form

$$R_t = R_0 e^{\frac{B}{T}}$$

wobei bedeuten:

R_t = Widerstand bei $t^{\circ}\text{C}$
 R_0 und B = Konstante
 T = abs. Temperatur

Der Verlauf einer solchen e-Funktion ist in Bild 55 dargestellt. Durch Parallel- und Reihenschaltung temperaturunabhängiger Widerstände oder mittels Wheatstonescher Brücken gelingt es, die Temperatur-Widerstandskurve angenähert zu linearisieren. Dies muß jedoch für jedes Heißleiterelement getrennt getan werden, weil sich Widerstand und Materialkonstante schlecht tolerieren lassen und fast bei jedem Element anders ausfallen. Dieses für jeden Heißleiter notwendige Abstimmen der Linearisierungs- und Anzeigevorrichtung macht die Geräte teuer. Die Austauschbarkeit der Fühler ist nicht gewährleistet, bzw. kann nur mit größerem Aufwand realisiert werden. Die hohe Empfindlichkeit besteht nur am Anfang der Kurve und umfaßt einen engen Temperaturbereich. Das sind die Gründe dafür, daß Heißleiter bisher nur für Spezialfälle eingesetzt werden, wo die Metallwider-

stände nicht genügen.

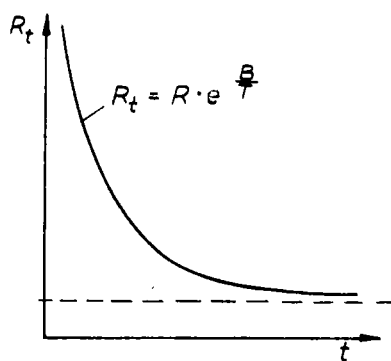


Bild 55

3.342 Form der Meßwiderstände

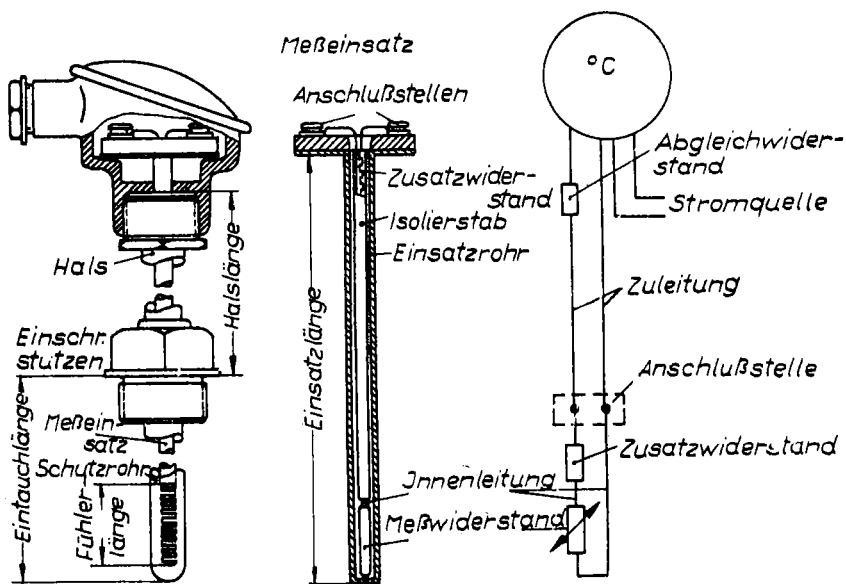


Bild 56

Den prinzipiellen Aufbau eines Widerstandsthermometers finden wir im Bild 56. Das Widerstandsmaterial wird auf einen Trägerkörper aufgebracht, und das so entstehende Gebilde wird als "Meßwiderstand" bezeichnet. Die "Innenleitung" verbindet den Meßwiderstand mit der "Anschlußstelle" für die "Zuleitung" zur "Anzeigeeinrichtung". Am "Anschlußsockel" ist das dünnwandige "Einsatzrohr" befestigt, welches die in einem Isolierstab eingezogene Innenleitung und den Meßwiderstand umschließt. Diese im Bild 56 b gezeigte Anordnung wird "Meßeinsatz" genannt. Dieser Meßeinsatz kann nun wie die Thermoelemente in ein Schutzrohr (Bild 56 a) eingeführt wer-

den, wobei der Anschlußsockel am Anschlußkopf befestigt wird. Die Meßwiderstände der handelsüblichen Pt-100-Fühler bestehen aus einem Röhrchen aus Hartglas, Quarz oder Keramik, auf die der Platindraht bifilar aufgewickelt ist (Bild 57 a). Über die Wicklung wird ein zweites Röhrchen aus gleichem Material

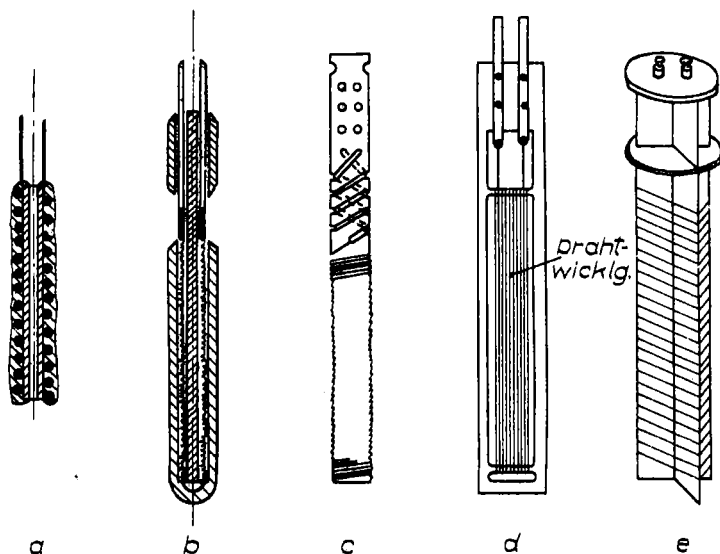


Bild 57

gezogen und durch Glühen fest mit dem Trägerröhrchen verschmolzen, so daß die Wicklung fest und unverrutschbar eingeschlossen ist. Daneben sind noch andere Bauarten im Gebrauch, die in Bild 57 b bis d gezeigt werden.

In Bild 57 b ist ein Meßwiderstand dargestellt, bei dem der Platindraht zu einem Wendel aufgewickelt und in einer Doppelkapillare aus Aluminiumoxyd eingelagert ist. Vielfach wird

auch der Widerstandsdraht auf einen klaren Glimmerstreifen aufgewickelt und mit Glimmerblättchen abgedeckt (Bild 57 c). Einen ähnlichen "Flach"-Meßwiderstand benutzt man für Lufttemperaturmessungen, wobei der Platindraht zickzackförmig zwischen zwei Glashaltern ausgespannt wird (Bild 57 d).

Für wissenschaftliche Zwecke wird der Platindraht auf ein Glimmerkreuz frei hängend aufgewickelt, so daß er trotz Temperaturänderung spannungsfrei bleibt (Bild 57 e). Mit diesen Meßfühlern werden Fehlergrenzen bis 0.01 grd erreicht!

Für die Auswahl der Form der Meßwiderstände sollen noch kurz einige Grundsätze aufgeführt werden:

1. Bei Messungen in feuchten Medien muß dafür gesorgt werden, daß kein Kurzschluß in der Wicklung entsteht. Bei den Formen 57 a und b ist das gewährleistet, während die übrigen Formen durch Schutzrohre davor bewahrt werden müssen.
2. Um die Größe des Widerstandes als Funktion der Temperatur messen zu können, wird ein Strom I durch den Widerstand R_t geschickt. Er erzeugt in der Sekunde die Stromwärme

$$a = 0,239 \cdot R_t \cdot I^2 \frac{\text{cal}}{\text{s}}$$

die an das umgebende Medium abgeführt werden muß, da sonst Meßfehler durch Eigenerwärmung eintreten. Bei den Typen 57 d und e tritt ein solcher Wärmestau nicht auf. Bei 57 a bis c treten Fehler durch Eigenerwärmung auf.

3. Es ist zu beachten, daß der Widerstand eines Drahtes nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der mechanischen Spannung des Drahtes abhängt. (Dehnungsmeßstreifen, Manganinmanometer). Besonders bei den Meßwiderständen der Form 57 a ruft diese Tatsache Meßfehler hervor, weil hier der Widerstandsdraht fest eingeschlossen ist und Trägerkörper sowie Drahtmaterial verschiedene Temperaturausdehnungskoeffizienten haben werden. Dadurch treten Spannungen auf, die die Fehlergrenzen dieser Typen we-

sentlich größer werden lassen als diejenigen der Typen 57 b und e.

Der Widerstand R_{oi} der "Innenleitung" muß klein gegenüber dem Meßwiderstand sein. Das Material der Innenleitung soll einen möglichst kleinen Temperaturbeiwert α ; haben. Die Begründung für beide Forderungen gibt uns die Gleichung

$$R_{it} = R_{oi} (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

Die Innenleitung ist den Temperaturschwankungen t des Meßwiderstandes mit ausgesetzt. Bei kleinem R_{oi} und kleinem α_i macht sich die Temperaturänderung der Innenleitung wenig bemerkbar und beeinflusst die Charakteristik des Meßwiderstandes entsprechend wenig. Bei genauen Messungen wird man also Manganin oder Konstantan für die Innenleitung nehmen. Ihr Widerstand ist nach DIN 43762 auf 3 Ohm festgelegt. Man achte ferner darauf, daß die beiden Anschlußstellen so dicht beieinander liegen, daß sie, um Thermospannungen zu vermeiden, gleiche Temperatur haben. Im allgemeinen werden die Meßwiderstände auf 100 Ohm bei 0° C abgeglichen. Höhere Widerstände ergeben größere Abmessungen und bedingen höhere Betriebsspannungen. Bei kleineren Widerstandswerten macht sich der Einfluß der Innenleitung auf die Messung stärker bemerkbar.

3.343 Messung des Widerstandes

Zur Messung der temperaturabhängigen Widerstände sind die bekanntesten Methoden:

1. Die Messung mit Wheatstone-Brücke
2. Die Messung mit Kreuzspulgerät

Beide sind auch in der Betriebsmeßtechnik sehr verbreitet.

3.3431 Widerstandsmessung mit der Wheatstone'schen Brücke

Da die Wheatstone-Brücke bei der Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern nicht nur als Kompensationsgerät, bei dem der Brückenstrom Null ist, sondern auch zur Ausschlagsmethode eingesetzt wird, wird es notwendig sein, eine allgemeinere Beziehung als die unter 3.332 entwickelte abzuleiten. Die Spannung E_{ab} wird jetzt gleich dem Spannungs-

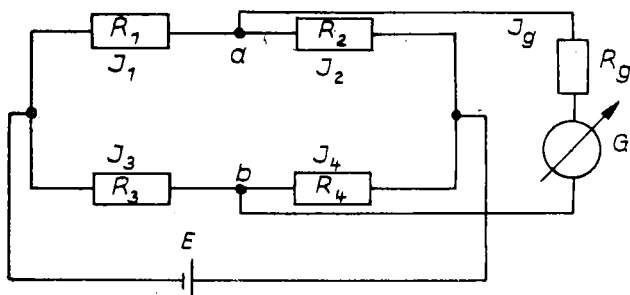


Bild 58

abfall, den der Diagonalstrom I_g am Galvanometerwiderstand R_g erzeugt:

$$E_{ab} = I_g \cdot R_g = U_3 - U_1 = U_2 - U_4$$

$$E_{ab} = I_g \cdot R_g = I_3 R_3 - I_1 R_1 = I_2 R_2 - I_4 R_4$$

Nun ist aber

$$I_3 = I - I_1 \text{ und } I_4 = I - I_2$$

(Kirchhoff'sche Stromverzweigungsregeln)

und damit

$$E_{ab} = (I - I_1) R_3 - I_1 R_1 = I_2 R_2 - (I - I_2) R_4$$

oder

$$I (R_3 + R_4) - I_1 (R_3 + R_1) - I_2 (R_2 + R_4) = 0$$

Unter Berücksichtigung, daß

$$I_2 = I_1 - I_g$$

ist, wird

$$I(R_3 + R_4) - I_1(R_3 + R_1) - (I_1 - I_g)(R_2 + R_4) = 0$$

$$I(R_3 + R_4) - I_1 \sum R_1 \dots 4 + I_g (R_2 + R_4) = 0 \quad (47)$$

Nun ist noch I_1 durch I und I_g zu ersetzen, damit in der Gleichung die allein interessierenden Diagonalströme I und I_g stehen. In der linken Masche der Brücke muß die Summe der Spannungsabfälle über R_1 und R_g gleich den Spannungsabfall über R_3 sein:

$$I_1 \cdot R_1 + I_g \cdot R_g = I_3 R_3 = (I - I_1) R_3,$$

weil ja $I_3 = I - I_1$ ist. Daraus errechnen wir

$$I_1 = \frac{I \cdot R_3 - I_g R_2}{R_1 + R_3}$$

I_1 in Gleichung 47 eingesetzt und diese nach I_g aufgelöst, ergibt nach kurzer Umrechnung:

$$I_g = I \frac{R_3 \cdot R_2 - R_4 \cdot R_1}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + R_g \sum R_1 \dots 4} \quad (48)$$

Damit ist der Brückenstrom I_g durch das Galvanometer G in Abhängigkeit vom Speisestrom I und den Widerständen $R_1 \dots R_4$ dargestellt.

Zur Messung der Widerstandsänderung des Meßwiderstandes mit der Temperatur dient die in Bild 59 gezeigte Anordnung. In der Brücke befinden sich zwei feste Widerstände R_1 und R_3 und ein einstellbarer Widerstand R_2 . Alle drei Widerstände sind aus temperaturunabhängigem Nickel- oder Manganindraht gefertigt. Der vierte Widerstand R_4 ist der Meßwiderstand, welcher der Temperatur des zu prüfenden Mediums ausgesetzt wird. R_6 dient zur Einstellung des Speisestromes I, während mit R_a der Zuleitungswiderstand zum Meßfühler auf die genormte Größe von 10 Ohm abgeglichen werden kann. Der Widerstand R_v kann anstelle des Temperaturfühlers zugeschaltet werden. Er ist temperaturunabhängig und besitzt einen festen Wert (z.B. 100 Ohm), dem durch die Grundwertreihe eine bestimmte Temperatur (0°C) zugeordnet wird, die meist auf dem Widerstandskörper angegeben ist. Er dient zur Prüfung und Nullpunkteinstellung der Meßanordnung.

Die Widerstands- bzw. Temperaturmessung kann nach zwei Methoden erfolgen:

1. nach der Kompensationsmethode
2. nach der Ausschlagsmethode

1.) Kompensationsmethode:

Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß der Brückenstrom i_g von Gleichung 48 für jeden Widerstandswert R_t gleich Null ist. Die Stromlosigkeit der Brücke wird durch das Nullgerät G festgestellt. Schließen wir den uninteressanten Fall $I = 0$ aus, dann wird $I_g = 0$, wenn

$$R_3 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_4 = 0$$

oder

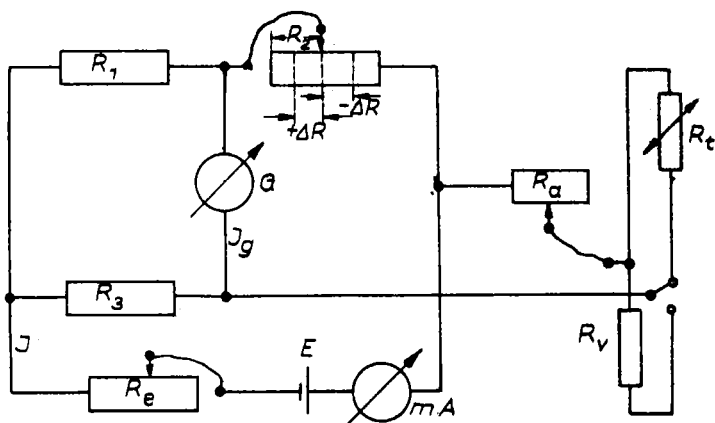


Bild 59

$$R_3 \cdot R_2 = R_1 \cdot R_4 \quad (49)$$

ist.

Der Widerstand R_4 von Bild 58 setzt sich zusammen aus dem Zuleitungswiderstand R_z , dem Widerstand der Innenleitung R_i (nach DIN 43709: $R_z + R_i = 10 \text{ Ohm}$) und dem Widerstand des Fühlers R_t

$$R_4 = R_z + R_i + R_t$$

Damit geht 47 über in:

$$R_3 \cdot R_2 = R_1 \cdot (R_z + R_i + R_t) \quad (50)$$

oder

$$R_t = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_1} - (R_z + R_i)$$

Mit dem in Bild 59 verstellbar eingezeichneten Widerstand R_2

kann die Änderung von R_t mit der Temperatur ausgeglichen werden. Die Stellung des Schleifers an R_2 ist damit ein Maß für die Temperatur.

Beispiel:

Mit einem genormten Platinfühler soll ein Temperaturbereich von 0 bis 200° C gemessen werden. Als Meßanordnung dient eine Brücke nach Bild 59 mit den Festwiderständen $R_1 = 100$ Ohm und $R_3 = 200$ Ohm. Es ist zu ermitteln, wie groß der Widerstand R_2 am Anfang und am Ende des Meßbereiches sein muß, damit die Brücke im Gleichgewicht ist?

Bei $t = 0^\circ$ C ist $R_t = 100$ Ohm,
bei $t = 200^\circ$ C ist $R_t = 175,86$ Ohm (siehe Grundwertreihe)

$$R_z = 7 \text{ Ohm}; \quad R_1 = 3 \text{ Ohm},$$

$$R_2 = \frac{R_1}{R_3} (R_t + R_z + R_1) = \frac{100}{200} (100 + 7 + 3) = 55 \text{ Ohm bei } 0^\circ \text{ C}$$

und

$$R_2 = \frac{100}{200} (175,86 + 7 + 3) = 92,8 \text{ Ohm bei } 200^\circ \text{ C.}$$

R_2 muß über den Meßbereich um

$$\Delta R_2 = 92,8 - 55 = 37,8 \text{ Ohm}$$

verstellt werden. Ändert sich der Widerstand von R_2 um 0,19 Ohm pro mm, dann muß der Schleifer über den gesamten Meßbereich einen Weg

$$l = \frac{37,8}{0,19} \approx 200 \text{ mm}$$

zurücklegen, dessen Anfang mit 0° C und dessen Endstellung mit 200° C markiert werden müßten.

Die Verstellung von R_2 kann im Laborbetrieb von Hand vorgenommen werden. Für den Betrieb muß, damit das Gerät selbsttätig anzeigt, ein selbsttätiger Abgleich vorgesehen werden,

der wie bei den selbstabgleichenden Kompensatoren aus einem Verstärker und einem Umkehrmotor besteht. Der Verstärkereingang liegt an der Stelle von G; der Motor verstellt R_2 in dem Sinne, daß I_g zu Null wird.

2.) Ausschlagmethode:

Bei dieser Methode wird die Brücke nur für einen beliebigen Wert von R_t abgeglichen, z.B. für $R_t = 100 \Omega$ entsprechend einer Temperatur von 0°C . Sind $R_1 = R_3 = 100 \text{ Ohm}$ und entsprechen R_z und R_i den vorgeschriebenen Werten, dann muß nach Gleichung (50) R_2 auf 110 Ohm eingestellt werden. Eine Nachrechnung des Brückenstromes I_g nach Gleichung (46) ergibt:

$$I_g = I \frac{100 \cdot 110 - (100 + 7 + 3) \cdot 100}{(100 + 100)(110 + 110) + R_g \cdot 420} = 0$$

Für jeden anderen Wert von R_t wird der Brückenstrom ungleich Null und damit ein Maß für die Temperatur.

Beispiel:

Die Meßbrücke sei mit den Widerständen $R_1 = R_3 = 100 \text{ Ohm}$ und $R_2 = 110 \Omega$ ausgerüstet. Als Brückengerät wird ein Milliampereometer mit einem Gerätewiderstand von $R_g = 100 \text{ Ohm}$ verwendet. Der Speisestrom I der Brücke betrage 20 mA . Wie groß wird der Brückenstrom I_g bei einer Fühlertemperatur von 200°C ?

Es werde wieder ein genormter Platinfühler von 100 Ohm bei 0°C verwendet. Nach der Grundwertreihe ist sein Widerstand bei 200°C $175,86 \text{ Ohm}$ groß. Der Innenleitungswiderstand betrage 3 Ohm , der Zuleitungswiderstand 10 Ohm . Es ergibt sich folgende Rechnung:

$$I_g = 20 \frac{100 \cdot 110 - 185,86 \cdot 100}{200 \cdot 295,86 + 100 \cdot 495,86} = - 1,4 \text{ mA}$$

Wird als Brückengerät ein Millivoltmeter mit gleichem Innenwiderstand ($R_g = 100 \text{ Ohm}$) verwendet, so würden

$$E_g = I_g \cdot R_g = 1,38 \cdot 100 = 140 \text{ mV}$$

angezeigt. Die Skala des Brückeninstruments kann ebenso in Temperaturgraden geteilt werden. Allerdings entsteht hierbei, wie aus Bild 60 ersichtlich ist, eine nichtlineare, sich verengende Skala.

Die Empfindlichkeit der Meßanordnung, darunter verstehen wir die Änderung des Brückenstromes mit dem Widerstand des Füh-

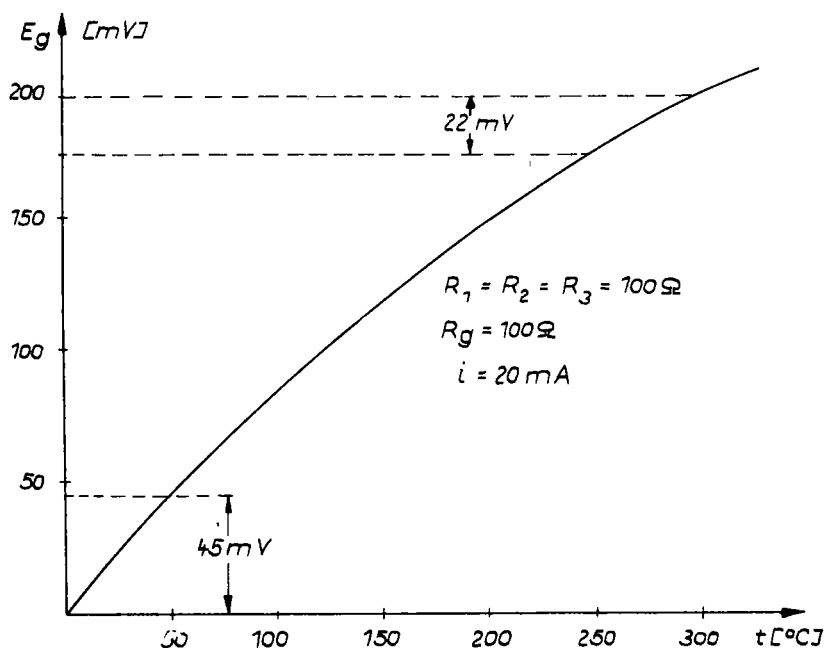


Bild 60

lers bzw. mit dessen Temperatur, ist nach Gleichung (48) dem Speisestrom I direkt proportional. So würde der Brückenstrom I_g in unserem Beispiel bei Erhöhung des Speisestromes I auf 40 mA den doppelten Wert, also 2,8 mA annehmen. Diese Steigerung der Empfindlichkeit kann nicht beliebig weit getrieben werden. Mit wachsendem Speisestrom I steigt auch der Strom I_4 durch den Fühler und damit der Meßfehler durch Eigenerwärmung des Meßwiderstandes. Für die abgegliche Brücke ($I_g = 0$) gilt:

$$I_1 = I_2 \quad \text{und} \quad I_3 = I_4$$

ferner

$$I = I_2 + I_4$$

Es verhalten sich

$$\frac{I_4}{I_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \quad \text{oder} \quad \frac{I_4}{I - I_4} = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4}$$

Daraus erhält man:

$$I = I_4 \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_1 + R_2}$$

Gleicht man nun die Brücke bei der tiefsten Temperatur des vorgesehenen Meßbereiches ab, was in den meisten Fällen gegeben sein wird, so hat dort der Meßwiderstand R_4 seinen kleinsten Wert R_0 und der Strom durch den Meßwiderstand I_{4x} bei festem Speisestrom I_x seinen größten im Meßbereich vorkommenden Wert. Dieser maximale Strom I_4 hat seine obere Grenze bei einem zulässigen Strom $I_{4 \text{ zul}}$, der den Meßfehler durch Eigenerwärmung in erträglichen Grenzen hält. Für genaue Messungen ist

$$I_{4 \text{ zul}} = 10 \text{ mA.}$$

für weniger genaue Betriebsmessungen

$$I_{4 \text{ zul}} = 20 \text{ mA}$$

zu wählen. Diese Werte beziehen sich auf die genormten Fühler. Damit erhalten wir den höchstzulässigen Speisestrom

$$I_{\text{zul}} = I_{4 \text{ zul}} \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_0}{R_1 + R_2} \quad (51)$$

Neben dem Speisestrom I hat aber auch die Dimensionierung der Widerstände $R_1 \dots R_4$ und R_g einen Einfluß auf die Größe der Empfindlichkeit, was in Gleichung (48) am Faktor

$$\frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 - R_t}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + R_g} R_{1 \dots 4}$$

zu erkennen ist.

Da der Brückenstrom I_g bzw. die Spannung E_g von 6 Veränderlichen abhängt, ist es schwer, eine allgemeine Bedingung für maximale Empfindlichkeit anzugeben. Die Gegenüberstellung der Forderungen von Gleichung (48) und (51) soll daher an einem Zahlenbeispiel demonstriert werden:

Für die Meßbrücke wählen wir uns zwei Anordnungen deren Widerstandswerte in der nachfolgenden Tabelle enthalten sind:

Anordnung	R_1	R_2	R_3	R_g
1	2500	500	500	100
2	100	100	100	100

Beide Anordnungen sind so dimensioniert, daß die Brücken bei einem Fühlerwert von 100 Ohm abgeglichen sind, was an-

hand von (49) nachgeprüft werden kann. Der Widerstand des Fühlers soll sich von 100 auf 150 Ohm erhöhen.
Beachten wir zunächst die Forderung von (51) nicht und setzen den Speisestrom für beide Anordnungen zu 20 mA an, dann erhalten wir als Brückenspannung

$$E_g = I \cdot R_g \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_3) \cdot (R_2 + R_4) + R_g \sum R_{1...4}}$$

für Anordnung 1:

$$E_g = 20 \cdot 100 \frac{250 \cdot 000 - 375 \cdot 000}{3000 \cdot 650 + 100 \cdot 3650} = 108 \text{ mV}$$

für Anordnung 2:

$$E_g = 20 \cdot 100 \frac{10 \cdot 000 - 15 \cdot 000}{200 \cdot 250 + 100 \cdot 450} = 105 \text{ mV}$$

Die Anordnung 1) erscheint unter diesen Bedingungen als die empfindlichere.

Beachten wir jedoch Gleichung (51)!

Es ergibt sich als zulässiger Speisestrom mit $I_{4 \text{ zul}} = 10 \text{ mA}$ für die Anordnung 1):

$$I_{\text{zul}} = 10 \frac{3600}{3000} = 12 \text{ mA}$$

also

$$E_g = 12 \text{ mA} \cdot 100 \Omega \cdot 54 \cdot 10^{-3} = 64,8 \text{ mV}$$

für die Anordnung 2):

$$I_{\text{zul}} = 10 \frac{400}{200} = 20 \text{ mA}$$

also

$$E_g = 105 \text{ mV}$$

Der Anordnung 2) ist also der Vorzug zu geben.

Die empfindlichste Brückenschaltung erhält man, wenn

$R_1 = R_0$, $R_2 = \frac{1}{5} R_0$; $R_3 = 5 R_0$ gemacht wird.

$R_0 = 100 \text{ Ohm}$. Der zulässige Speisestrom beträgt 60 mA , wenn I_4 zul mit 10 mA angenommen wird.

Als Abschluß der Dimensionierungsbetrachtungen wollen wir noch eine Übungsaufgabe rechnen:

In der Meßbrücke seien die Widerstände wie folgt dimensioniert:

$$R_1 = 100 \text{ Ohm}; R_2 = 20 \text{ Ohm}; R_3 = 500 \text{ Ohm}.$$

Als Anzeigegerät steht ein Millivoltmeter von 250 Ohm Innenwiderstand und einem Meßbereich von 0 bis 50 mV zur Verfügung. Die Geräteskala ist in Abständen von $0,2 \text{ mV}$ geteilt.

Mit der Anlage soll ein Meßbereich von 0 bis 500° C beherrscht werden. Als Meßwiderstand wird ein genormter Platinfühler benutzt.

- a) Auf welche Größe ist der Speisestrom einzustellen, wenn das Brückengerät voll ausgenutzt werden soll?
- b) Welche kleinste Temperatureinheit ist meßbar, wenn $1/2$ Skalenteil ablesbar ist?

Bei richtiger Rechnung erhalten Sie:

- a) $I = - 4,5 \text{ mA}$; b) 1° C auf $1/2$ Skalenteil.

Bestimmung der gemessenen Temperaturen:

Bei der Messung von Temperaturen mit der Wheatstone schen Brücke sind die Widerstände R_1 bis R_3 bekannt, ebenso der Widerstand des Brückeninstruments. Die gemessene Temperatur kann sofort abgelesen werden, wenn bei Messungen mit abge-

glichener Brücke am nachgestellten Widerstand eine Temperaturskala angebracht ist oder bei nichtabgeglicherer Brücke die Skala des Brückengerätes in Temperatureinheiten geteilt ist.

Ist keine Temperaturskala vorhanden, so muß aus den bekannten Widerständen und den abgelesenen Werten für Speisestrom und Brückenspannung E_g bzw. Brückenstrom I_g der Widerstand $R_4 = R_t$ des Fühlers errechnet werden und anhand der Grundwertreihe auf die Meßtemperatur geschlossen werden.

Die Gleichung (48) nach R_4 aufgelöst ergibt:

$$R_4 = \frac{I \cdot R_2 \cdot R_3 - I_g (R_g + R_2)(R_1 + R_3) + R_g \cdot R_2}{I R_1 + I_g (R_1 + R_3 + R_g)}$$

bzw.

$$\frac{I \cdot R_g \cdot R_2 \cdot R_3 - E_g (R_g + R_2)(R_1 + R_3) + R_g \cdot R_2}{I \cdot R_g \cdot R_1 + E_g (R_1 + R_3 + R_g)}$$

Für die abgegliche Brücke gilt stets

$$I_g = 0 \quad E_g = 0$$

und damit

$$R_4 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

Rechnen Sie hierzu folgende Aufgabe:

Als Meßanordnung diene dieselbe wie in der vorangegangenen Aufgabe.

$R_1 = 100$; $R_2 = 20$; $R_3 = 500$; $R_g = 250 \text{ Ohm}$; $I = - 45 \text{ mA}$

Fühler: Pt 100. Die Brücke sei für $t = 0^\circ \text{ C} \cong 100 \Omega \cdot 0 R_0$ abgeglichen.

Das Brückeninstrument zeigt 180 mV an.

Berechnen Sie $R_t = R_4$ und schließen Sie anhand der Grundwertreihe auf die Temperatur t !

Ergebnis: $R_t = R_4 = 145,4 \text{ Ohm}$; $t = 118,25^\circ \text{ C}$ (Zuleitungs- und Innenwiderstand wurden nicht berücksichtigt).

3.3432 Messung der Widerstandsänderung mit Quotientenmeßwerk

Das Quotientenmeßwerk:

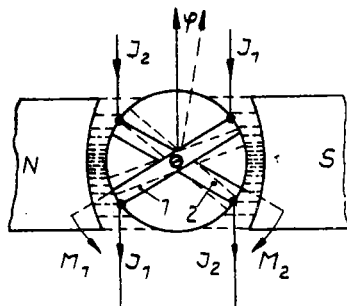


Bild 61

Meßelement des Quotientenmessers sind zwei gekreuzte, um eine durch die Kreuzungsspulen gehende Achse drehbar gelagerte Spulen. Sie bewegen sich in einem inhomogenen Magnetfeld, welches in der Mitte der Polschuhe stärker ist als am Rande. Das ist in Bild 61 durch unterschiedliche Feldliniendichte angedeutet. Im Gegensatz zum Drehspulmeßwerk sind an der Achse des Kreuzspulmeßwerkes keine Rückstellspiralen angebracht, lediglich richtkraftlose Stromzuführungen. Die Momente M_1 und M_2 , die die Ströme I_1 und I_2 in den Spulen 1 und 2, welche gerade an Stellen mit der Feldstärke \mathcal{G}_1 und \mathcal{G}_2 stehen, haben die Größen:

$$M_1 = C_1 \cdot g_1 \cdot I_1$$

$$M_2 = C_2 \cdot g_2 \cdot I_2$$

Der Wert der Konstanten C wird von der Windungszahl und der geometrischen Gestalt der Spule bestimmt. Beide Momente M_1 und M_2 drehen in entgegengesetzter Richtung. Bei Gleichheit bewegt sich das Meßwerk nicht. Wird aber z.B. I_1 vergrößert, dann überwiegt M_1 , das Kreuzspulpaar dreht sich in Richtung von M_1 . Bei dieser Drehung wird g_1 schwächer, Spule 2 dreht sich in den Bereich des stärkeren Feldes, g_2 wird größer.

$$\varphi \sim g_2; \varphi \sim \frac{1}{g_1}; \quad \varphi \sim \frac{g_2}{g_1}$$

Das Moment M_1 schwächt sich bei der Drehung, während M_2 stärker wird. Bei einem bestimmten Drehwinkel φ werden beide Momente gleiche Größe haben, es herrscht Gleichgewicht, der Zeiger bleibt in einer neuen Stellung φ stehen. Es gilt:

$$M_1 = M_2$$

$$C_1 \cdot g_1 \cdot I_1 = C_2 \cdot g_2 \cdot I_2$$

$$\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{I_1}{I_2} = \frac{g_2}{g_1} \sim \varphi$$

Der Ausschlag φ des Kreuzspulenmeßwertes ist dem Quotienten der Ströme durch seine Spule proportional.

Messung des Fühlerwiderstandes:

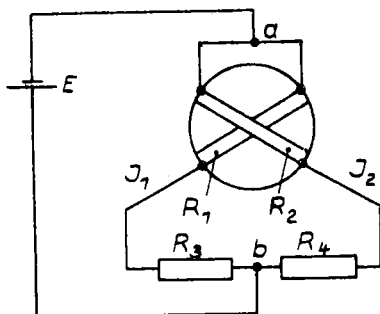


Bild 62

Ersetzt man in der Brückenschaltung von Bild 58 die Widerstände R_1 und R_2 durch die Spulen 1 und 2 des Quotientenmessers, dann erhält man die Schaltung von Bild 62. Durch Spule 1 fließt der Strom

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_3}$$

und durch Spule 2 der Strom

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + R_4}$$

Der Ausschlag φ des Kreuzspulmeßwerkes ist dann wie gezeigt

$$\varphi \sim \frac{I_1}{I_2} = \frac{E (R_2 + R_4)}{(R_1 + R_3) E}$$

$$\varphi \sim \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_3} \quad (51)$$

Ersetzt man nun den Widerstand R_4 durch den temperaturabhängigen Widerstand R_t , dann ist der Ausschlag ρ des Meßwerkes ein Maß für die Temperatur. Die Skala des Kreuzspulmessers ist in $^{\circ}\text{C}$ geteilt. Diese Ausschlagschaltung mit Kreuzspulmeßwerk besitzt große Vorteile:

Der Ausschlag ρ ist weitgehend unabhängig von der Versorgungsspannung E , die in Gleichung (51) herausgekürzt werden konnte. Praktisch kann sie bei den meist verwendeten Kreuzspulmeßwerken um $\pm 10\%$ schwanken. Bei größeren Schwankungen machen sich Lagerreibung und Momente der Stromzuführungen in Meßfehlern bemerkbar. Die zu messenden Stromstärken sind nach oben nur vom zulässigen Strom durch den Fühler ($10 \dots 20 \text{ mA}$) begrenzt, also relativ groß und erlauben die Verwendung robuster Anzeigergeräte.

Temperaturschwankungen im Meßwerk wirken sich auf beide Spulen gleichmäßig aus, beeinflussen also den Ausschlag sehr wenig.

Allerdings ist die mit diesen Meßanordnungen zu erzielende Meßgenauigkeit nicht besonders hoch. Die Verkehrsfehlergrenze liegen zwischen ± 1 bis $2,5\%$ vom Meßbereich.

Die Meßgerätewerke liefern diese Widerstandsthermometer in drei Baueinheiten (Bild 63).

1. Fühler
2. Anzeigergerät
3. Stromversorgung

Der Fühler ist ein genormter Pt-Fühler von 100 Ohm bei 0°C . Das Stromversorgungsgerät erzeugt eine Gleichspannung von 6 V . Fühler und Stromversorgungsgerät werden an den Klemmen 1 und 2 bzw. 1 und 3 des Anzeigergerätes angeklemmt. Mittels der Widerstände R_1 und R_2 kann Größe und Lage des Meßbereiches eingestellt werden. R_3 begrenzt den Strom durch die gesamte Anlage und damit durch den Fühler. Aus dem Widerstand von R_2 sind für die Außenleitung ($R_L = R_2 + R_1$) 10 Ohm herausgenommen, auf die bei Anschluß des Fühlers der Widerstand der Außenleitung abgeglichen werden muß. Andere Werte müssen auf der Gerateskala verzeichnet sein.

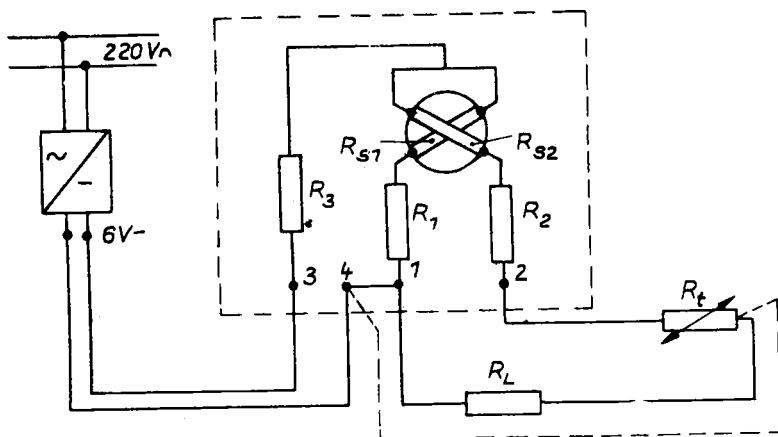


Bild 63

Die in Bild 63 gezeigte Schaltung wird mit "Zweileiterschaltung" bezeichnet, weil der Fühler durch zwei Leiter mit der Meßeinrichtung verbunden ist. Die Länge dieser Doppelleitung soll 300 m nicht überschreiten, weil sich durch Temperaturschwankungen bedingte Widerstandsänderungen der Außenleitung nur auf den Meßkreis auswirken und Meßfehler hervorrufen. Diese Fehler können in der "Dreileiterschaltung" vermieden werden. Die Verbindung 4 - 1 von Bild 63 muß gelöst werden. Die Stromzuführung erfolgt über einen dritten Leiter (gestrichelt gezeichnet) direkt hinter dem Fühler R_t . Änderungen des Leitungswiderstandes wirken sich nunmehr auf beide Spulen des Meßwerkes gleichmäßig aus und können demzufolge keine Fehlanzeigen verursachen. Die Dreileiterschaltung wird für Leitungslängen zwischen 300 m und 10 km verwendet.

Anpassung des Kreuzspulmeßwerkes an den Meßbereich durch Wahl der Widerstände R_1 , R_2 , R_3 :

Der Ausschlag des Kreuzspulmeßwerkes ist dem Quotienten Q der Ströme I_1 und I_2 proportional

$$\frac{I_1}{I_2} = Q$$

Nach Gleichung (51) gilt dann unter Verwendung der Symbole von Bild 63

$$Q = \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{s2} + R_2 + R_L + R_t}{R_{s1} + R_1} \quad (52)$$

In Gleichung (52) sind die Widerstände R_{s1} , R_{s2} und R_t als bekannt aufzufassen. Sie enthält die beiden Unbekannten R_1 und R_2 , die, wie schon erwähnt, den Meßbereich festlegen.

Der Widerstand des Fühlers R_t sei am Anfang des Meßbereiches R_0 und wachse bis zum Ende des Meßbereiches um ΔR , also auf $R_0 + \Delta R$.

In der Anfangsstellung des Meßwerkzeigers soll das Stromverhältnis Q_0 betragen, in der Endstellung dagegen Q_e .

Somit gilt:

$$Q_0 = \frac{R_{s2} + R_2 + R_L + R_0}{R_{s1} + R_1}$$

und

$$Q_e = \frac{R_{s2} + R_2 + R_L + R_0 + \Delta R}{R_{s1} + R_1}$$

Für die Berechnung der beiden Unbekannten R_1 und R_2 stehen uns nunmehr zwei Gleichungen zur Verfügung. Daraus ergeben sich

$$R_2 = \frac{Q_0}{Q_e - Q_0} \Delta R - (R_0 + R_{s2} + R_L) \quad (53)$$

$$R_1 = \frac{R_2 + R_{s2} + R_L + R_0}{Q_0} - R_{s1} = \frac{\Delta R}{Q_e - Q_0} - R_{s1} \quad (54)$$

oder

$$R_1 = \frac{R_2 + R_{s2} + R_L + R_0 + \Delta R}{Q_e} - R_{s1}$$

Den Strombegrenzungswiderstand R_3 berechnen wir nach der Formel

$$R_3 = \frac{E}{(1 + Q_0) \cdot I_{2zul}} - \frac{(R_1 + R_{s1})(R_2 + R_{s2} + R_L + R_0)}{R_1 + R_{s1} + R_2 + R_{s2} + R_L + R_0}$$

Für I_{2zul} ist der maximal zulässige Strom durch den Fühler einzusetzen.

Beispiel:

Ein Kreuzspulmeßwerk soll bei Vollausschlag den Temperaturbereich von 0 bis 100° C erfassen. Die Spulenwiderstände sind

$$R_{s1} = 36 \text{ Ohm}$$

$$R_{s2} = 76 \text{ Ohm}$$

groß.

Nullausschlag wird bei einem Stromverhältnis

$$Q_0 = 2,13$$

und Endausschlag bei

$$Q_e = 2,39$$

erreicht!

Der höchstzulässige Strom durch den Fühler soll 7,5 mA betragen, der Leitungswiderstand $R_L = 10 \text{ Ohm}$, $E = 6 \text{ Volt}$. Es sind die erforderlichen Widerstände R_1 , R_2 , R_3 zu bestimmen.

Nach der Grundwertreihe ist der Fühlerwiderstand am Anfang des Meßbereiches

$$R_0 = 100 \text{ Ohm}$$

und am Ende $R_0 + \Delta R = 138,5 \text{ Ohm}$ groß.

$$\Delta R = 38,5 \text{ Ohm!}$$

$$R_z = \frac{2,13}{0,26} \cdot 38,5 - 186 = 130 \text{ Ohm.}$$

$$R_1 = \frac{38,5}{0,26} \cdot -36 = 108 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = \frac{6000}{3,13 \cdot 7,5} - \frac{144 \cdot 316}{144 + 316} = 166 \text{ Ohm}$$

Zusammenfassung zum Kapitel 3.34

1. Als Meßfühler werden Platindrahtwiderstände von 100 Ohm bei 0°C verwendet. Der Widerstandsanstieg mit der Temperatur und die zulässigen Toleranzen sind in der Grundwertreihe (DIN 43 760) festgelegt. Gebräuchlich, aber wenig verbreitet sind Fühler aus Reinnickel, Kupfer und Heißleitern.
2. Die Messung der Widerstandsgröße erfolgt mittels Wheatstonescher Brücke in Kompensations- oder Ausschlagschaltung und mit Kreuzspulmeßwerken. Kombinationen von Brücken- und Kreuzspulschaltung werden ebenfalls verwendet.
3. Der Meßbereich der Widerstandsthermometer reicht von -200°C bis $+750^{\circ}\text{C}$. Mit Sonderausführungen können noch 1000°C gemessen werden. Halbleiter erreichen diese Grenze ebenfalls.
4. Die Meßgenauigkeit kann mit Widerstandsthermometern sehr hoch getrieben werden. Bei Präzisionsanordnungen kann der Fehler auf 0,01 % herabgedrückt werden. Verkehrsfehlergrenzen für Betriebsmessungen lassen sich ohne großen Aufwand einhalten.
5. Bei der Messung ist stets darauf zu achten, daß Zuleitungswiderstände in das Meßergebnis eingehen, auch, wenn nach der Kompensationsmethode gemessen wird! (Vgl. Thermo-elemente,).

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

KUNZMANN

BETRIEBS- MESSTECHNIK

6

MENGENMESSUNG

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1004-06/62

Herausgeber:
Ingenieurschule für Feinwerktechnik
Jena

Betriebsmeßtechnik

Lehrbrief 6

Mengenmessung

von

Dipl.-Phys. Kunzmann

1. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— **Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie** —
Dresden

Inhaltsverzeichnis

Mengenmessung

	Seite
<u>I. Waagen</u>	2
1. Gewicht und Gewichtstücke	
2. Bauelemente der Waagen	4
3. Physikalische Grundlagen	9
4. Einhebelwaagen	12
5. Zusammengesetzte Waagen	22
6. Automatische Waagen	29
7. Übungsaufgaben	34
 <u>II. Volumenzähler</u>	
1. Auslaufzähler	37
2. Verdrängungszähler	44
3. Turbinenzähler	63

Mengenmessung

=====

Wir haben uns angewöhnt, Strom und Menge zu trennen. Den kontinuierlichen Strom eines flüssigen oder gasförmigen Stoffes nennen wir den Durchfluß und die Methoden, diesen Stoffstrom zu messen, haben wir unter der Überschrift "Durchflußmessung" zusammengefaßt.

Unter einer Menge wollen wir den Umfang einer Warenlieferung, gemessen nach Stück, Gewicht oder Volumen, verstehen. Wir weichen dabei erheblich vom mathematischen Begriff der Menge ab. In der Mathematik versteht man unter einer Menge lediglich eine gewisse Anzahl von Dingen. Der mathematische Mengenbegriff ist also enger als der technische. Es ist klar, daß diese Erweiterung eine Gefahr in sich birgt, nämlich die, daß eine exakte Abgrenzung zum Begriff Durchfluß nicht mehr ohne weiteres möglich ist. Es gibt tatsächlich Meßverfahren, über deren Einordnung man sich streiten könnte. Wir wollen uns aber darüber nicht den Kopf zerbrechen. Alle dynamischen, im kontinuierlichen Strom begründeten Meßverfahren ordnen wir der Durchflußmeßtechnik zu, alle Verfahren, die auf Gewichts- oder Volumenbestimmung hinauslaufen, rechnen wir zur Mengenmessung.

Im öffentlichen Verkauf ist die Mengenmessung gesetzlich vorgeschrieben. Der Staat überwacht durch seine Eichbehörden die Maße und Gewichte. Aber nicht nur im Verkauf, sondern auch in der Produktion ist die Mengenmessung die Grundlage des Güteraustausches. Sie erlaubt die Ermittlung des Wirkungsgrades einer Anlage, die Bestimmung der Arbeitsproduktivität einer Abteilung oder gibt Aufschluß über andere technisch oder ökonomisch wichtige Kenngrößen.

I. Waagen

1. Gewicht und Gewichtsstücke

Mit einer Waage bestimmt man das unbekannte Gewicht einer Menge durch Vergleich mit einem bekannten Gewicht. Dabei hat man unter dem Gewicht die Kraft zu verstehen, mit der die betrachtete Masse von der Erde angezogen wird. Da das Gewicht eine Kraft darstellt, ist seine Maßeinheit das Kilopond. Man kann aber genauso gut das Wiegen als Vergleich einer unbekannten mit einer bekannten Masse auffassen. In diesem Falle müßte man die Einheit der Masse, das Kilogramm, verwenden. Da im Begriff Menge eher die Masse als eine Kraft enthalten ist, betrachten wir das Wiegen einfach als Massenbestimmung und verwenden als Einheit nur das Kilogramm. Gewicht und Masse betrachten wir als untrennbar zusammengehörig und durch die Maßeinheit der Masse genügend genau gekennzeichnet.

Das Kilogramm wird dargestellt durch das "Prototype International du Kilogramme", einem Zylinder aus Platin-Iridium, der im Bureau International des Poids et Mesures im Pavillon Breteuil zu Sèvres bei Paris aufbewahrt wird. Dieses Urkilogramm sollte ursprünglich der Masse eines Kubikdezimeters Wasser bei 4° C und 760 Torr entsprechen. Inzwischen konnte aber festgestellt werden, daß diese Wassermasse nur 0,999 972 kg beträgt. Die der Meterkonvention angeschlossenen Staaten besitzen alle ein nationales Urkilogramm, das dem Prototype bis auf eine Nummer gleicht und nach Bedarf mit ihm verglichen werden kann. Das deutsche Urkilogramm besitzt nach dem Vergleich von 1926 die Masse 0,999 999 98 kg. An das nationale Urnormal werden die Arbeitsnormale der technischen Oberbehörden angeschlossen und nach Bedarf mit ihm verglichen. Daran angeschlossen werden die Hauptnormale (Vergleich aller 10 Jahre) und an diese wiederum die Kontroll- (Vergleich aller 5 Jahre) und die Gebrauchsnormale (Vergleich jedes Jahr). Durch diese Ordnung wird die Erhal-

tung der wertvollsten Normale durch seltene Verwendung garantiert, und trotzdem jedes Eichamt mit genügend überwachten und zuverlässigen Normalen versorgt.

Bei der Vergleichung von Normalen verschiedener Dichte und bei sehr genauen Wägungen ist die Dichte der Luft zu berücksichtigen, da die Massenstücke (wir sagen auch Gewichte) und das Wägegut einen unterschiedlichen Auftrieb erfahren. Es werden zum Beispiel die Massen M_1 mit der Dichte ρ_1 und M_2 mit der Dichte ρ_2 bei der Luftdichte ρ miteinander verglichen. Nach dem Archimedischen Prinzip ist der Auftrieb (die Gewichtsverminderung) gerade so groß wie die verdrängte Materie wiegt. Die Waage befindet sich im Gleichgewicht, wenn auf beiden Seiten gleiche Kräfte wirken. Es gilt also folgende Gleichung:

$$M_1 - M_1 \cdot \frac{\rho}{\rho_1} = M_2 - M_2 \cdot \frac{\rho}{\rho_2}$$

Die Masse des Gewichtes M_2 beträgt also:

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_1}}{1 - \frac{\rho}{\rho_2}}$$

Da ρ/ρ_1 und ρ/ρ_2 wesentlich kleiner als 1 sind, kann man den Bruch in eine Reihe entwickeln und alle Glieder höherer als erster Ordnung weglassen. Man erhält damit folgende Korrekturgleichung:

$$M_2 = M_1 \cdot \left(1 + \frac{\rho}{\rho_2} - \frac{\rho}{\rho_1} \right)$$

Bei gleicher Dichte verschwindet die Korrektur. Bei sehr unterschiedlichen Dichten kann sie bis zu 0,1% betragen.

Für das praktische Wiegen verwendet man neben dem Kilogramm die abgeleiteten Einheiten: das Gramm ($1g=10^{-3}kg$), das Milligramm ($1mg=10^{-3}g$), die Tonne ($1t=10^3kg$). Ferner benötigt man einen Satz von Massenstücken (oder Gewichten), die so zusammengesetzt sind, daß man jedes Gewicht damit ausdrücken kann. Der Gewichtssatz enthält von einer Einheit

(mg, g, kg) je die Werte 1,1,2,5 oder 1,2,2,5 sowie die zehnfachen und hundertfachen Werte. Der Umfang eines Gewichts-satzes richtet sich nach der Waage.

Gewichte unter 1 g werden meist aus Aluminiumblech hergestellt. Seltener verwendet man Platin- oder Neusilberblech. Nach DIN 1924 ist als Form vorgeschrieben: ein regelmäßiges Dreieck für die Einer, ein regelmäßiges Viereck für die Zweier und ein regelmäßiges Sechseck für die Fünfer einer jeden Dekade.

Gewichte von 1 g bis 10 kg haben im allgemeinen die Form eines geraden Zylinders mit einem Knopf zum Anfassen. Die kleineren bestehen meist aus Messing und sind vernickelt oder vergoldet. Die größeren werden im allgemeinen aus Gußeisen hergestellt und besitzen eine Justierhöhlung. Gewichte über 10 kg haben zylindrische Form und besitzen einen Tragegriff.

2. Bauelemente der Waagen

2.1 Hebel

Das wichtigste Bauelement der Waagen sind die Hebel. Sie sollen möglichst leicht, aber trotzdem starr und bruchfest sein. Hier geraten drei einander widersprechende Forderungen zusammen, die mit den Mitteln der Festigkeitslehre in einem den jeweiligen Bedingungen angepaßten Kompromiß vereinigt werden müssen.

Die Hebellängen werden durch Schneiden begrenzt. Man nennt die Schneide, mit welcher der Hebel auf der Unterlage ruht, die Stützschneide, und die beiden Endschnitten, auf die die Last und die Gewichte wirken, die Last- und die Gewichtsschneide.

2.2 Drehgelenke

Von ausschlaggebender Bedeutung für die Genauigkeit einer Waage ist die Reibung in den Gelenken. Diese soll im Idealfall ganz verschwinden. Diese Forderung wird am besten durch das aus Schneide und Pfanne bestehende Gelenk erfüllt.

Man unterscheidet zwei Pfannen: 1. die ebene Pfanne, die ausschließlich bei Analysenwaagen verwendet wird. 2. die dachförmigen Pfannen, die bei allen technischen Waagen verwendet werden. Bei einem Schneidewinkel von 60° wählt man etwa 120°

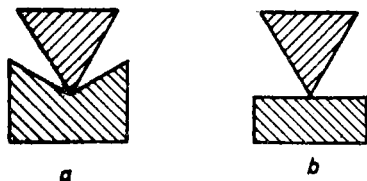


Bild 1

als Pfannenwinkel. Damit die Schneide in der Pfanne eine Wälzbewegung ausführen kann, rundet man den Pfannenwinkel leicht ab. Die Dachform hat den Vorteil, daß nach einer Erschütterung, die bei technischen Waagen nicht ausgeschlossen ist, das Gelenk seine Normalstellung selbst wieder einnimmt.

Schneiden und Pfannen werden bei empfindlichen Waagen aus Achat, bei den meisten technischen Waagen aus Stahl, hergestellt. Die Belastung der Schneiden ist sehr groß. Sie beträgt bis zu 300 kg je Millimeter Schneidenlänge. Deshalb müssen Schneiden und Pfannen sehr hart sein (mindestens 61 Einheiten nach der Härteprüfung von Rockwell gemäß DIN 50103).

Besonderes Augenmerk muß der Befestigung der Schneiden geschenkt werden, da sie ja die Hebellängen genau bestimmen. Die Schneiden müssen auch genau parallel verlaufen und in genau definierten Ebenen liegen. Bei Analysenwaagen sind diese Forderungen am schärfsten, deshalb werden die Schneiden so eingebaut, daß sie in der Höhen- und Seitenlage verstellbar sind. Bei technischen Waagen werden sie eingeklemmt.

2.3 Koppeln und Gehänge

Ein weiteres Bauelement ist erforderlich, um die Kräfte von einem Hebel auf einen anderen und vom Last- oder Gewichtsträger auf den Hebel zu übertragen. Besitzt ein solches Bauelement zwei Pfannen, so wird es eine Koppel genannt, besitzt es nur eine Pfanne, so nennt man es ein Gehänge.

Eine Koppel mit festen Pfannen kann nur der Kraftübertragung

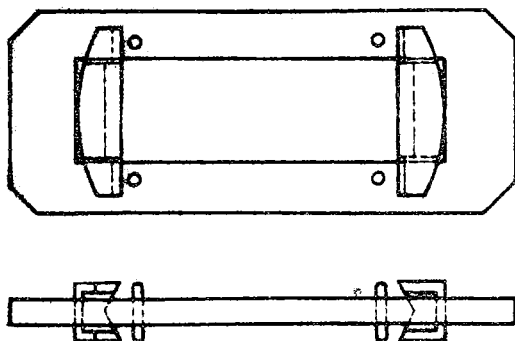


Bild 2a

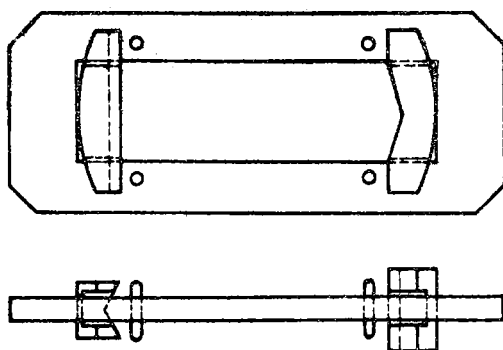
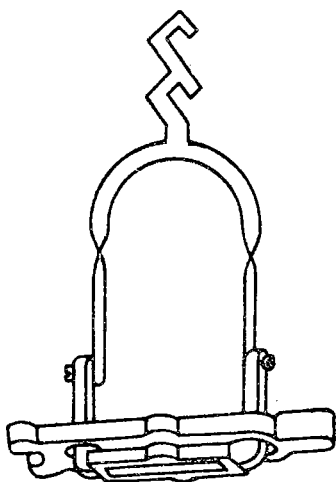


Bild 2b

zwischen zwei in derselben Ebene schwingenden Hebel dienen. Erschütterungen führen dabei häufig zu kleinen Verschiebungen, wobei jedesmal die Schneide in der Pfanne einen seitlichen Zwang erleidet und rutscht. Da das zur Beschädigung der Schneide führen kann, verwendet man lieber Koppeln mit spielenden Pfannen (Bild 2a). Die Pfannen sind klappernd eingebaut und können sich daher im Notfall etwas verschieben. Mit der parallelen Koppel (Bild 2a) überträgt man Kräfte zwischen Hebeln, die in einer Ebene schwingen. Mit Kreuzkoppeln (Bild 2b) überträgt man Kräfte zwischen zwei Hebeln, die senkrecht zueinander schwingen.

Gehänge dienen der Kraftübertragung von Last- oder Gewichtsträgern auf einen Hebel. Auch sie werden häufig mit spielender Pfanne versehen. Bei der Analysenwaage hängen die Schalen

an einem in zwei Richtungen verdrehbaren Kreuzgehänge, damit die empfindlichen Schneiden weitgehend geschont werden.



Kreuzgehänge der
Analysenwaage

Bild 3

2.4 Dämpfungsglieder

Bei den meisten Waagen beobachtet man die Einschwinglage und möchte daher nicht erst etliche Schwingungen abwarten, bis die Waage zur Ruhe gekommen ist. Man möchte eine möglichst rasche Einstellung der Ruhelage ohne Überspringen erreichen. Der hierfür günstigste Schwingungsfall ist der Aperiodische Grenzfall. Bei diesem ist die Dämpfung gerade so groß, daß noch kein Überspringen eintritt. Wäre die Dämpfung nur um eine Kleinigkeit geringer, so würde die Waage bereits überspringen. Dieser Grenzfall wird durch verschiedene Dämpfungsglieder angenähert.

Bei empfindlichen Waagen sind die rückstellenden Kräfte nur gering. Daher genügt es, einen Kolben in einem weiteren Zylinder zu bewegen und den Luftwiderstand zur Dämpfung zu benutzen. Bei größeren Waagen wird die gleiche Vorrichtung unter Öl gesetzt. Die Luftdämpfung hat den Nachteil, daß der Spalt zwischen Kolben und Zylinder recht klein sein muß. Er liegt bei technischen Waagen in der Größenordnung 0,02 bis 0,1 mm. Dieser feine Spalt kann leicht durch Staubteilchen verunreinigt werden. Dadurch tritt eine mechanische Reibung auf, welche die Genauigkeit der Waage verringert. Die Öldämpfung ist zwar frei von diesem Mangel, hat aber dafür den Nachteil, daß sie von der Temperatur abhängig ist, weil sich die Viskosität der Öle mit der Temperatur ändert.

Den Dämpfungsgrad kann man bei Luftdämpfung dadurch verändern, daß der Boden des Zylinders ein feines, durch eine Nadel verstellbares Loch enthält, durch das die Luft, die der Kolben vor sich herschiebt, entweichen kann. Bei der Öldämpfung besteht der Kolben meist aus zwei gegeneinander verschiebbaren, durchlöcherten Blechen, mit deren Hilfe man je nach Stellung zueinander die Löcher mehr oder weniger verdecken kann.

Auch das Prinzip der Wirbelstrombremse wird zur Dämpfung der Waagen ausgenutzt. In einem konstanten Magnetfeld bewegt sich eine Aluminiumfahne. In dieser entsteht der Wirbelstrom,

sobald sie sich bewegt. Seine Wirkung ist nach der Lenzschen Regel der antreibenden Kraft genau entgegengerichtet. Das Verfahren ist sehr elegant. Allerdings muß das Aluminium völlig frei von Eisen sein, damit keine magnetischen Kräfte auftreten können.

2.5 Zusammenfassung

Mit einer Balkenwaage wird die Masse einer Menge bestimmt, während eine Federwaage grundsätzlich eine Kraftmessung ermöglicht, also der Bestimmung des Gewichts der Menge dient.

Die Einheit der Masse ist das Kilogramm (kg). Sie wird durch das Urkilogramm dargestellt.

Die Waagen bestehen im wesentlichen aus folgenden Bauelementen:

1. Hebel. Die Hebellängen werden durch die Stütz-, Last- und Gewichtsschneide garantiert.
2. Gelenke. Als das reibungsärmste Gelenk findet bei Waagen nur die Pfanne mit Schneide Verwendung.
3. Koppeln und Gehänge. Sie dienen der Kraftübertragung zwischen den Hebeln und zwischen Last- oder Gewichtsträger und den Hebeln.
4. Dämpfungsglieder. Damit der Schwingungszustand der Waage in der Nähe des Aperiodischen Grenzfalles liegt, verwendet man Luft-, Öl- oder Wirbelstromdämpfung.

3. Physikalische Grundlagen

Eine starre, massenlose Stange, die in einem Punkt drehbar befestigt ist, nennt man einen Dreharm. Greift an den Dreharm eine Kraft an, so verursacht sie ein Drehmoment. Die Größe des Drehmomentes ist gegeben durch das Produkt aus der Länge des Dreharmes und der senkrecht auf dem Dreharm stehenden Komponente der Kraft. Sind mehrere Dreharme starr miteinander verbunden, und greift an jeden eine Kraft an, so addieren sich die einzelnen Drehmomente. Dabei muß aber berücksichtigt werden, daß verschiedene Kräfte Drehrichtungen hervorrufen können. An einen Hebel, der aus zwei starr miteinander ver-

bundenen Dreharmen besteht, mögen zu beiden Seiten des Drehpunktes gleichgerichtete Kräfte angreifen. Die beiden Drehmomente wirken einander entgegen, so daß das resultierende Gesamtdrehmoment die Differenz der beiden Einzeldrehmomente wird. Der für die Berechnung der Waagen sehr wichtige Hebelsatz bezieht sich gerade auf diesen Fall. Er sagt aus, daß ein Hebel dann im Gleichgewicht ist, wenn das resultierende Drehmoment verschwindet.

Wir wollen den Hebelsatz an einem Beispiel betrachten. Ein

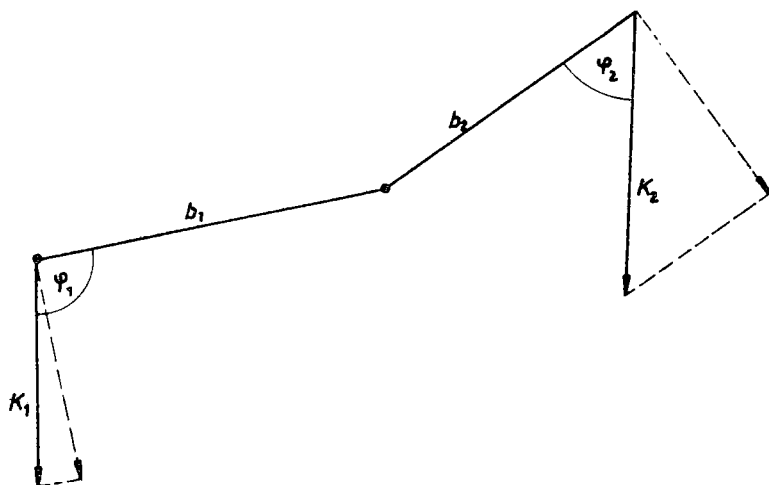


Bild 4

Hebel bestehe aus den beiden Dreharmen b_1 und b_2 . An diese greifen unter den Winkeln φ_1 und φ_2 die Kräfte K_1 und K_2 an. Die Kräfte wirken einander entgegen, so daß der Hebel sich im Gleichgewicht befindet, wenn die beiden Drehmomente gleich sind. Die Komponente der Kraft K_1 , die senkrecht auf b_1 steht, hat die Größe $K_1 \cdot \sin \varphi_1$, und die wirksame Kompo-

nente von K_2 hat entsprechend die Größe $K_2 \cdot \sin \varphi_2$. Der Hebel befindet sich im Gleichgewicht, wenn

$$K_1 \cdot b_1 \cdot \sin \varphi_1 = K_2 \cdot b_2 \cdot \sin \varphi_2$$

ist.

Betrachten wir nun die Rotation eines Dreharmes um einen Drehpunkt, so müssen wir der Beschreibung den Winkel φ zwischen Dreharm und einer Normalrichtung zugrunde legen. Die Änderung dieses Winkels in der Zeiteinheit nennt man die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}$, und die Änderung der Winkelgeschwindigkeit in der Zeiteinheit beschreibt die tangentielle Beschleunigung und heißt Winkelbeschleunigung $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \ddot{\varphi}$. Ein Punkt auf dem Dreharm im Abstand r vom Drehpunkt hat die

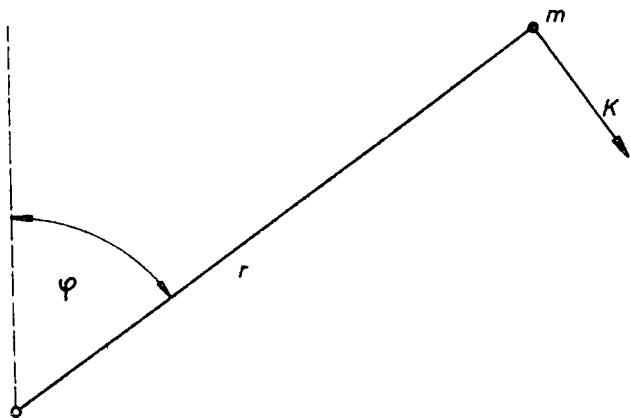


Bild 5

Bahngeschwindigkeit $v = r \cdot \omega$ und wird tangential mit $b = r \cdot \ddot{\varphi}$ beschleunigt. Ist in dem betrachteten Punkt die Masse m vereinigt, und wirkt senkrecht zum Dreharm die Kraft K auf sie, so wird sie beschleunigt, und es gilt:

$$K = m \cdot r \cdot \ddot{\varphi}$$

Multipliziert man diese Gleichung mit r , so erhält man:

$$K \cdot r = m \cdot r^2 \cdot \ddot{\varphi}$$

Auf der linken Seite steht das Drehmoment und auf der rechten Seite das Produkt aus Winkelbeschleunigung und einer Größe mr^2 , die man das Trägheitsmoment Θ nennt. Sind mehrere Massenpunkte starr miteinander verbunden und um einen Punkt drehbar, so ist das Trägheitsmoment die Summe der Trägheitsmomente der einzelnen Punkte. Einen festen Körper kann man schließlich aus lauter Massenpunkten zusammengesetzt denken und durch Integration sein Trägheitsmoment bestimmen. Die Grundgleichung der Drehbewegung eines festen Körpers lautet damit:

$$\text{Drehmoment} = \text{Trägheitsmoment} \cdot \text{Winkelbeschleunigung}$$

Ist das Drehmoment vom Winkel φ abhängig, z.B. nach der Gleichung $M = -A \cdot \varphi$, so lautet die Grundgleichung

$$-A \cdot \varphi = \Theta \cdot \ddot{\varphi}$$

Das ist eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, deren Lösung

$$\varphi = \sin\left(\sqrt{\frac{A}{\Theta}} \cdot t\right)$$

lautet, wie man durch Differentiation leicht nachprüfen kann. Der drehbare Körper führt also Schwingungen mit der Schwingungsdauer

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\Theta}{A}}$$

um seine Ruhelage aus. (Es handelt sich um das Drehpendel).

4. Einhebelwaagen

4.1 Die gleicharmige Balkenwaage

Die einfachste Waage besteht aus zwei gleichlangen Dreharmen, die starr miteinander verbunden sind und den Balken bilden. Die gesamte Balkenmasse kann man sich im Schwerpunkt S vereinigt denken. Der Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt sei s . Das Gewicht K des Balkens verursacht das Drehmoment

$$M = s \cdot K \cdot \sin \varphi$$

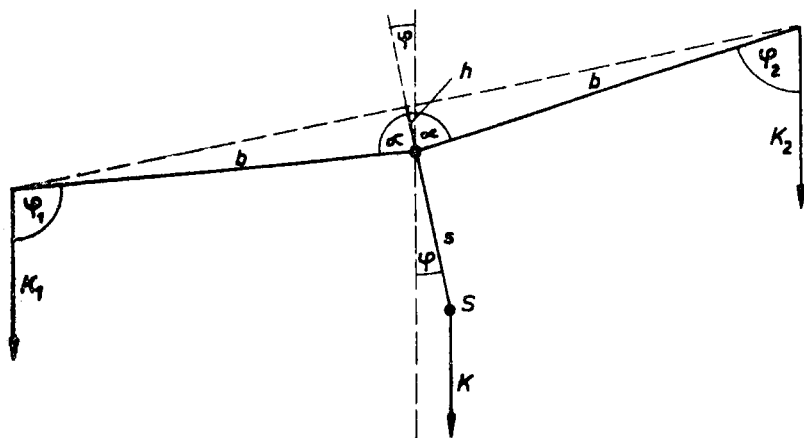


Bild 6

Am Balken sind im Abstand b auf beiden Seiten vom Drehpunkt frei beweglich die belasteten Schalen angehängt. Sie üben die Kräfte K_1 und K_2 aus und bewirken die Drehmomente

$$M_1 = K_1 \cdot b \cdot \sin \varphi_1$$

$$M_2 = K_2 \cdot b \cdot \sin \varphi_2$$

Die Gleichgewichtsbedingung lautet:

$$M_1 = M_2$$

Da die Aufhängepunkte für die Schalen um die Strecke h oberhalb des Drehpunktes liegen, bilden die beiden Dreharme, aus denen der Balken besteht, den Winkel 2α . Dem Bild 6 entnehmen wir, daß der Winkel $\alpha + \varphi$ der Stufenwinkel zu φ_1 und $\alpha - \varphi$ der Stufenwinkel zu φ_2 ist. Wir finden also:

$$\varphi_1 = \alpha + \varphi$$

$$\varphi_2 = \alpha - \varphi$$

Nun müssen wir das Additionstheorem der Winkelfunktion anwenden:

$$\sin(\alpha \pm \varphi) = \sin \alpha \cdot \cos \varphi \pm \cos \alpha \cdot \sin \varphi$$

Da die Ausschläge der Waage nur gering sind, ist φ ein sehr kleiner Winkel, und man kann angenähert $\sin \varphi = \varphi$ und $\cos \varphi = 1$ setzen. Eine ähnliche Vereinfachung läßt die Tatsache zu, daß α fast 90° ist. Man kann $\sin \alpha = 1$ setzen. Dem Bild 2 entnimmt man schließlich $\cos \alpha = h/b$. Damit wird

$$\sin(\alpha \pm \varphi) = 1 \pm \frac{h}{b} \cdot \varphi$$

Die Gleichgewichtsbedingung nimmt damit folgende Gestalt an:

$$K_1 b \cdot (1 + \frac{h}{b} \cdot \varphi) = K_2 b \cdot (1 - \frac{h}{b} \cdot \varphi) + K \cdot s \cdot \varphi$$

Diese Gleichung lösen wir nach φ auf und finden:

$$\varphi = \frac{b \cdot (K_1 - K_2)}{K \cdot s - h(K_1 + K_2)}$$

Die Differenz der Gewichte $K_2 - K_1$ nennt man das Übergewicht oder die Laständerung, und ihre Summe $K_1 + K_2$ heißt die Belastung. Unter der Empfindlichkeit einer Waage versteht jeder Autor etwas anderes. Wir schließen uns der Mehrheit an und definieren als Empfindlichkeit das Verhältnis von Ausschlag (gemessen als Winkel im Bogenmaß) zu Übergewicht. Für die gleicharmige Balkenwaage finden wir dann aus der obigen Rechnung:

$$E = \frac{b}{K \cdot s - h(K_1 + K_2)}$$

Man sieht, daß die Empfindlichkeit von der Belastung unabhängig wird, wenn $h = 0$ ist. Dieser Fall wird von den Waagenherstellern weitgehend angenähert. Er ist aber exakt nur für eine einzige Belastung realisierbar, da der Balken nicht vollständig starr ist, wie wir angenommen haben, sondern infolge der Belastung leicht durchgebogen wird. Bei vielen Waagen kann die Durchbiegung vernachlässigt werden, bei Präzisionswaagen spielt sie eine Rolle. In diesem Fall richtet der Hersteller die Größe h so ein, daß sie für die häufigste Belastung gerade verschwindet. Dort hat dann die Empfindlichkeit ein Maximum.

Wir können diese Überlegung ohne weiteres rechnerisch verfolgen. Die Durchbiegung ist in erster Näherung proportional der Belastung, so daß h vom Maximalwert h_0 im unbelasteten Zustand mit zunehmender Belastung abnimmt:

$$h = h_0 - k(K_1 + K_2)$$

Damit wird aus der Empfindlichkeit:

$$E = \frac{b}{K \cdot s - h_0(K_1 + K_2) + k(K_1 + K_2)^2}$$

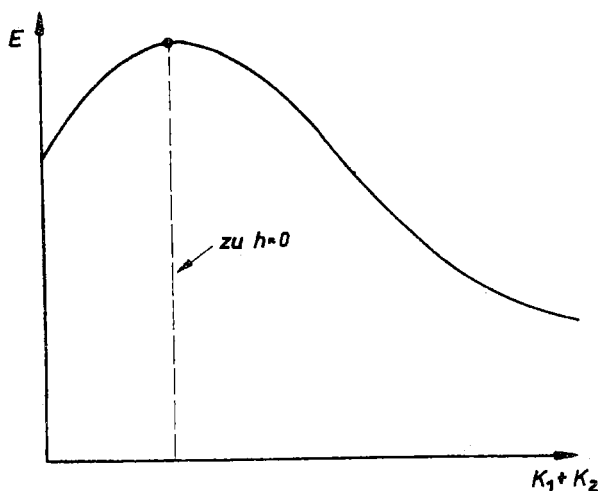


Bild 7

Auf Bild 7 ist die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Belastung graphisch dargestellt.

Um das Schwingungsverhalten einer Waage zu überblicken, müssen wir uns an das Drehpendel erinnern. Der Waagebalken mit den Schalen und der Last habe das Trägheitsmoment O . Der Ausschlag sei in der Gleichgewichtsstellung $\varphi = 0$. Das bedeutet, daß die Waage gleichmäßig belastet ist ($K_1 = K_2$).

Wird der Balken um den Winkel φ aus der Ruhelage ausgelenkt, so wirkt auf ihn das Drehmoment

$$M_r = M_1 - M_2 - M = - (K \cdot s - h (K_1 + K_2)) \cdot \theta$$

Es liegt also genau der Fall eines Drehpendels vor. Der Balken führt demnach mit der Schwingungsdauer

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\theta}{K \cdot s - h(K_1 + K_2)}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{0}{b}} \cdot E$$

Schwingungen um seine Ruhelage aus. Wir können dieser Gleichung eine wichtige Erkenntnis entnehmen: Je größer die Empfindlichkeit einer Waage ist, um so größer ist auch ihre Schwingungsdauer.

Die gleicharmige Balkenwaage besitzt eine Gewichts- und eine Lastschale. Mit dem Gewichtssatz stellt man auf den Null-Ausschlag ein und führt so einen direkten Massenvergleich durch. Die Gewichtsschale kann ersetzt sein durch eine Schaltgewichtsschale. In diesem Falle hängt an der Gewichtsschneide des Balkens eine als Schaltgewichtsschale bezeichnete Leiter, auf deren Sprossen durch einen Schaltmechanismus die hakenförmigen Gewichte aufgesetzt werden. Auf diese Weise werden die Gewichte geschont und die Bedienung der Waage vereinfacht. Bei Analysenwaagen mit Schaltgewichten gleicht man nicht auf den Null-Ausschlag ab, weil man Gewichte unter 1 mg kaum herstellen kann, sondern liest die Milligramm und deren Bruchteile an der Neigung des Balkens ab. Der lange Zeiger trägt zu diesem Zweck im allgemeinen eine feine Glasskala, die durch ein optisches System auf eine Mattscheibe projiziert wird. Die Mattscheibe besitzt eine Ablesemarke und gestattet ein völlig parallaxenfreies Ablesen. Dieses Verfahren ist aber nur bei genügend starrem Balken, dessen Durchbiegung vernachlässigt werden kann, brauchbar.

4.2 Die Laufgewichtswaage

Bei technischen Waagen sehr verbreitet ist das Prinzip der Abgleichung mittels Laufgewicht. Das von der Last hervorgerufene Drehmoment wird durch Verschiebung des Laufgewichtes kompensiert. Jetzt sind nicht mehr die Gewichte veränderlich,

sondern der Gewichtsarm. Auf diesem ist eine Teilung angebracht, die man die Laufgewichtsskala nennt. Das Laufgewicht besitzt eine Einstellmarke, die das Ablesen des eingestellten Gewichtes an der Laufgewichtsskala ermöglicht.

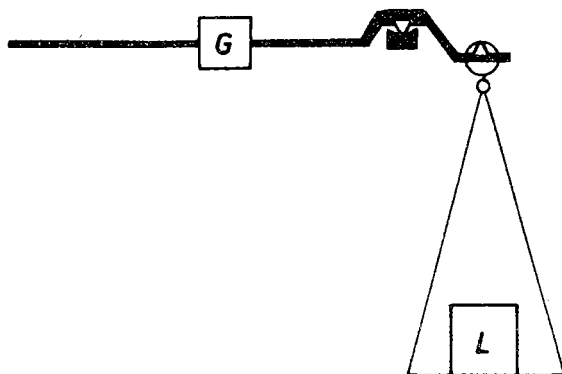


Bild 8

Da mit nur einem Laufgewicht die Ablesegenauigkeit recht gering ist, wird der Gewichtsarm im allgemeinen mit mehreren (meist zwei) Laufschiene ausgerüstet. Auf der einen Laufschiene bewegt sich ein größeres Laufgewicht, das z.B. die Kilogrammwerte einzustellen gestattet, während die zweite Laufschiene ein kleines Laufgewicht zur Einstellung der Grammwerte trägt. Damit durch Einstellunsicherheiten keine groben Fehler entstehen, besitzt mindestens die Laufschiene der Kilogrammteilung Kerben, in die das Laufgewicht mit einer Zunge einrastet. Empfindliche Waagen mit großem Wägebereich besitzen mehr als zwei Laufschiene, von denen höchstens die Schiene für die kleinste Gewichtseinheit ohne Kerben ist. Man bezeichnet die Waagen mit gekerbten Laufschiene auch als Rollgewichtswaagen.

4.3 Neigungswaagen

Bei allen bisher behandelten Waagen mußten für den Ausgleich Verstellungen von Hand vorgenommen werden. Das ist bei den Neigungswaagen nicht mehr der Fall. Sie arbeiten selbstausgleichend und sind daher im Gebrauch äußerst bequem und zeitsparend.

Der Hebel ist stark abgewinkelt, so daß der Schwerpunkt weit unter dem Drehpunkt liegt. Der Gewichtsarm trägt ein unverstellbares Hubgewicht, welches den Ausgleich besorgt.

Bild 9a zeigt den Kräfteplan der Neigungswaage mit Stütz-

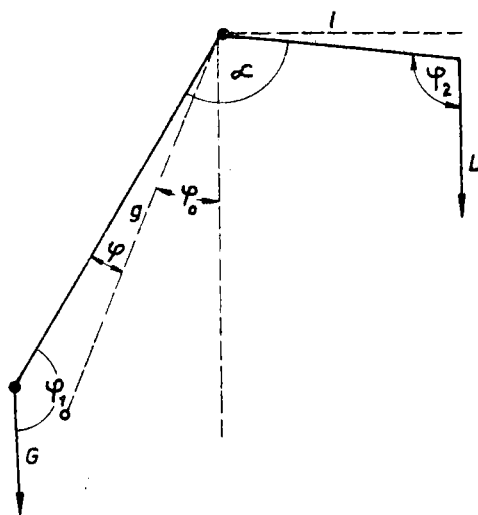


Bild 9a

und Lastschneide. Lastarm l und Gewichtsarm g sind konstant und bilden miteinander den Winkel α . Der mathematische Gewichtsarm kann durchaus außerhalb des materiellen Armes liegen, denn er ist lediglich die Strecke vom Drehpunkt zum Schwerpunkt. Ohne Belastung bildet

der Gewichtsarm mit der Vertikalen bereits den Winkel φ_0 , hervorgerufen durch die Last L_0 der Schalen und Übertragungsglieder. Durch die zu wiegende Last L entsteht der Ausschlag

φ , so daß jetzt der Gewichtsarm mit der Vertikalen den Winkel $\varphi + \varphi_0$ bildet. Dem Bild 9a entnehmen wir $\varphi_1 = 180^\circ - (\varphi + \varphi_0)$ und $\varphi_2 = 180^\circ - (\alpha - \varphi - \varphi_0)$. Wenn man berücksichtigt, daß $\sin(180^\circ - \beta) = \sin \beta$ ist, so lautet die

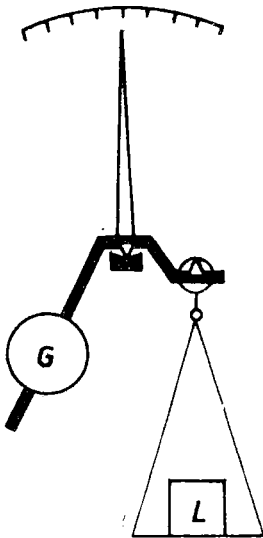


Bild 9b

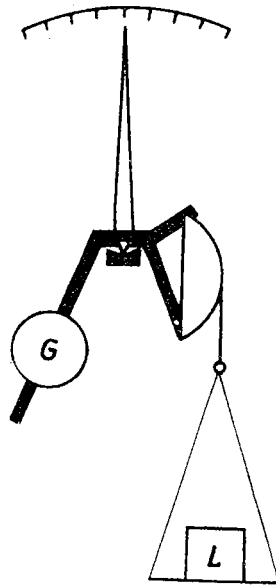


Bild 9c

Gleichgewichtsbedingung:

$$G \cdot g \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) = (L + L_0) \cdot l \cdot \sin(\alpha - \varphi - \varphi_0)$$

Betrachten wir als Nullstellung diejenige, bei der der Lastarm waagerecht steht, so ist $(\alpha - \varphi_0) = 90^\circ$, und die Gleichgewichtsbedingung vereinfacht sich zu:

$$L = \frac{G \cdot g \cdot \sin(\varphi + \varphi_0)}{l \cdot \cos \varphi} - L_0$$

Gleichzeitig ergibt sich für das Gleichgewicht ohne zu wiegende Last:

$$L_0 = \frac{G \cdot g}{l} \cdot \sin \varphi_0$$

Damit kann man die Gleichgewichtsbedingung weiter verein-

fachen. Man wendet das Additionstheorem an und führt den Tangens ein. Dann ergibt sich:

$$L = \frac{C \cdot G}{1} \cdot \cos \varphi_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Zwischen Ausschlag φ und der Last besteht also keine lineare Beziehung. Die Last ändert sich mit dem Tangens des Ausschlages, und die Skala trägt eine Teilung gemäß dieser Funktion.

Damit ist natürlich auch die Empfindlichkeit nicht konstant. Unter der Empfindlichkeit verstehen wir das Verhältnis von Änderung des Ausschlages zu Änderung der Last. Wenn wir nur sehr geringe Änderungen betrachten, können wir den Differentialquotienten verwenden und schreiben:

$$E = \frac{d\varphi}{dL}$$

Wir können leicht ausrechnen

$$\frac{dL}{d\varphi} = \frac{G \cdot G}{1} \cdot \cos \varphi_0 \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

und finden damit für die Empfindlichkeit:

$$E = \frac{1}{G \cdot G} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \varphi_0}$$

Das Maximum der Empfindlichkeit liegt bei $\varphi = 0$. Man kann nun diese Stelle leicht als Symmetrielage einrichten und den Meßbereich von $-\varphi_1$ bis $+\varphi_1$ legen. Es darf nur φ_1 nicht größer als φ_0 sein. Dann nimmt die Empfindlichkeit zu beiden Seiten der Symmetrielage ab.

Da die Gelenke nur für Drehwinkel bis zu 60° brauchbar sind, ist der Zeigerausschlag auf den sechsten Teil eines Kreises beschränkt, wenn der Zeiger unmittelbar mit dem Hebel verbunden ist. In vielen Fällen ist die dadurch erreichbare Ablesegenauigkeit zu gering. Deshalb wird der Zeiger bei vielen Neigungswaagen über ein mechanisches Getriebe angetrieben und überstreicht dadurch einen vollen Kreis. Es gibt auch Waagen, deren Zeiger mehrmals umläuft. In diesem Fall entspricht o.B. ein Umlauf dem Gewicht 1 kg. Die Anzahl der

Umläufe, also die ganzen Kilogramm, werden durch eine Zahl angezeigt. Bei verschiedenen Waagen verwendet man auch eine Optische Anzeige. In diesem Fall ist mit dem Hebel eine Glasskala verbunden, die über ein optisches System auf eine Mattscheibe projiziert wird. Die optische Anzeige hat den Vorteil, daß das Auge dem Zeiger nicht folgen muß und daß die Ablesung parallaxenfrei ist.

Um die Anzeigeskala zu linearisieren, ersetzt man die Lastschneide durch eine Lastkurve, auf der ein Stahlband aufliegt. An diesem hängt die Last (Bild 9c). Der Lastarm ist jetzt die Verbindung vom Drehpunkt zu dem Punkt, an dem das Stahlband die Lastkurve gerade berührt. Die Lastkurven müssen natürlich einfach und genau herstellbar sein. Daher wählt man den Kreis, legt aber seinen Mittelpunkt nicht in den Drehpunkt. Durch geeignete Wahl des Verhältnisses Radius zu Abstand des Mittelpunktes vom Drehpunkt kann man eine weitgehend lineare Anzeigeskala erreichen. Liegt der Mittelpunkt des Kreises im Drehpunkt, so tritt zwar eine Verbesserung im Vergleich zur Lastschneide ein, eine gute Linearisierung ist aber nicht möglich.

In einer dritten Ausführung werden schließlich auch Neigungswaagen ganz ohne Schneiden gebaut. Sie besitzen eine Stütz- und eine Lastkurve. Auch in diesem Fall ist eine gut angenäherte Linearisierung der Anzeigeskala möglich.

Um unabhängig von der Schrägstellung der Waage zu werden, verwendet man gelegentlich zwei in entgegengesetzte Richtungen schwingende Gewichtsarme. Wird für das eine Neigungsgewicht der Winkel gegen die Vertikale infolge der Schrägstellung verkleinert, so wird er für das zweite Hubgewicht um den gleichen Betrag vergrößert. Da die Summe beider Drehmomente wirksam ist, verschwindet der Fehler in gewissen Grenzen.

Die Neigungswaagen haben eine geringe absolute Empfindlichkeit, weil der Schwerpunkt weit unter dem Drehpunkt liegt.

Daher ist ihre Schwingungsdauer sehr klein, und man kann die Einschwinglage nicht aus Schwingungsbeobachtungen feststellen. Daher ist in jedem Fall eine wirksame Dämpfung erforderlich.

4.4 Zusammenfassung

Man kennt folgende Einhebelwaagen: Die gleicharmige Balkenwaage, die Laufgewichtswaage und die Neigungswaage. Die Empfindlichkeit der gleicharmigen Balkenwaage ist gegeben durch die Gleichung

$$E = \frac{b}{K_s - h(K_1 + K_2)}$$

Sie wächst bis zu einer gewissen Last an und fällt dann allmählich ab. Die Abhängigkeit von der Belastung ist die Folge der Balkendurchbiegung. Die gleicharmige Balkenwaage besitzt eine Gewichts- und eine Lastschale. Letztere kann durch eine Schaltgewichtsschale ersetzt sein. Der Abgleich erfolgt durch Massenstücke (sog. Gewichte). Die 3 Einhebelwaagen unterscheiden sich in der Art des Abgleiches. Bei der Laufgewichtswaage wird durch die Bewegung von Laufgewichten der Gewichtsarm verändert. Bei der Neigungswaage erfolgt der Abgleich durch Anheben des relativ weit unter dem Drehpunkt liegenden Schwerpunktes des schweren Balkens. Die Empfindlichkeit ist stark lastabhängig und erreicht dort ihr Maximum, wo der Lastarm waagerecht steht. Zur Linearisierung der Anzeigeskala wird häufig die Lastschneide durch eine Lastkurve ersetzt. Man kennt auch Neigungswaagen ohne jede Schneide mit Last- und Stützkurve. Balken und Last hängen dann an einem Stahlband, das auf der Kurve aufliegt.

5. Zusammengesetzte Waagen

Beim Wiegen größerer Lasten wird es schwierig, die Last auf die freihängende Schale einer Einhebelwaage zu bringen. Bequemer ist anstelle der Lastschale eine feststehende Platte, die keine seitlichen Bewegungen ausführen kann. Dafür sind

allerdings Maßnahmen zur Führung erforderlich, und es genügt nicht mehr, daß die Last nur an einer Schneide hängt, wie es bei den Balkenwaagen der Fall ist. Um die Platte vor seitlichen Auslenkungen zu schützen, muß sie mindestens auf zwei Schneiden ruhen. Man nennt diese Waagen, wenn sie gleicharmig sind, Tafelwaagen, wenn sie ungleicharmig sind, Brückenwaagen.

5.1 Tafelwaagen

Tafelwaagen werden für Höchstlasten bis zu 20 kg verwendet. Entsprechend den verschiedenen Hebelanordnungen unterscheidet man drei Bauarten, deren Prinzip auf den Bildern 10, 11 und 12 dargestellt wird (siehe S.24). Last und Gewicht ruhen jeweils auf zwei Schneiden, die sich immer gleichsinnig und um gleiche Beträge bewegen. Dadurch erhält die Tafel ihre stabile Lage, und es ist gleichgültig, an welcher Stelle der Tafel das Gewicht oder die Last sich befindet.

Betrachten wir z.B. die Bauart B etwas näher: Auf der linken Tafel möge ein Gewicht genau auf der Tafelmitte stehen. Es lastet demnach je zur Hälfte auf der Schneide 1 und der Schneide 3. Die auf Schneide 3 lastende Hälfte des Gewichtes wird durch die Untersetzung des Gewichtes über die Schneide 4 zur Hälfte auf die Schneide 2 übertragen. Es lastet also auf 1 die Hälfte und auf 2 ein Viertel des Gewichtes. Nun ist aber der Dreharm vom Drehpunkt zur Schneide 2 nur halb so lang wie der bis zur Schneide 1 reichende Dreharm, so daß sich das Viertel des Gewichtes auf 2 genauso auswirkt wie die Hälfte auf 1. Durch das Hebelsystem wird also erreicht, daß die Tafel durch zwei Schneiden so geführt wird, als hinge die ganze Last an der Schneide 1. Empfindlichkeit und Genauigkeit der Tafelwaagen sind geringer als die der gleicharmigen Balkenwaage, der sie im Prinzip entsprechen.

5.2 Brückenwaagen

Bei größeren Höchstlasten als 20 kg kann man mit gleicharmigen Waagen wegen der Unhandlichkeit der Gewichte nicht

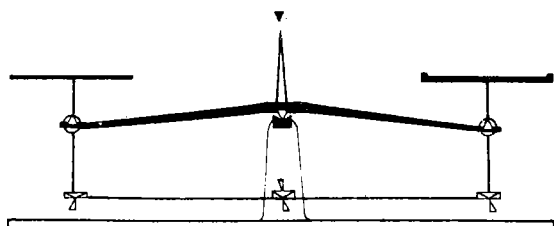


Bild 10

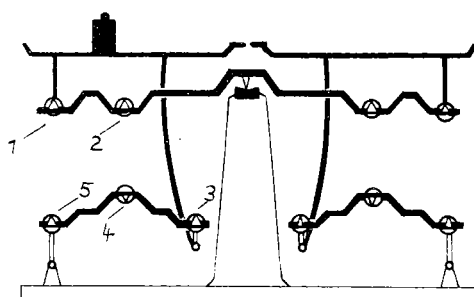


Bild 11

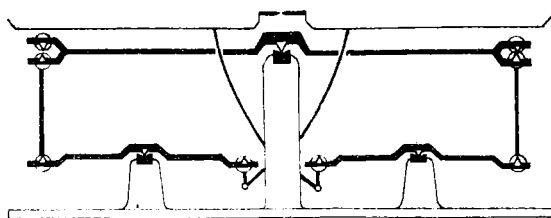


Bild 12

arbeiten. Man muß die Last durch ungleiche Hebelarme so weit untersetzen, daß man mit handlichen Gewichten wiegen kann. Das Untersetzungsverhältnis beträgt im allgemeinen 1:10, 1:100 oder 1:1000. Häufig wird der Ausgleich auch durch Laufgewichte bewirkt.

Zwei wesentliche Hebelanordnungen für Brückenwaagen geben die Bilder 13 und 14 wieder. Die Anordnung auf Bild 13 ist

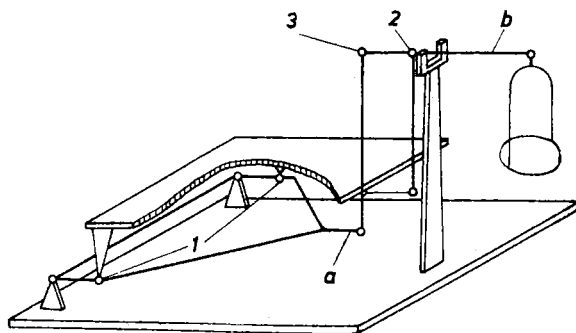


Bild 13

unter der Bezeichnung "Dezimalwaage" allgemein bekannt. Die Last ruht auf den Schneiden 1 und 2. Der Hebel a, den man auch Lasthebel nennt, wird durch die Schneide 1 im Verhältnis 1:x geteilt. Beträgt der auf der Schneide ruhende Teil der Last L_1 , so wird über die Koppel auf die Schneide 3 nur der Anteil $L_1/(x+1)$ übertragen. Der linke Dreharm des Hebels b wird durch die Schneide 2 ebenfalls im Verhältnis 1:x geteilt. Dadurch wirkt der Teil der Last (L_2), der auf der Schneide 2 ruht, so auf den Hebel b als würde der Anteil $L_2/(1+x)$ an der Schneide 3 hängen. Die Last wirkt je nach ihrer Stellung auf der Brücke in irgend einem Verhältnis auf die beiden Schneiden 1 und 2. Es ist aber immer $L_1 + L_2 = L$, so daß durch das Hebelsystem erreicht wird, daß an der

Schneide 3 die Last $L/(1+x)$ hängt. Diese Last wird durch den Balken b im Verhältnis 1:y über- oder untersetzt. Das Gewicht G hat demnach im Gleichgewicht die Größe

$$G = L \cdot \frac{y}{1+x}$$

Die Größe $y / (1+x)$ heißt die Übersetzung. Sie hat bei der Dezimalwaage den Wert 0,1 oder 0,01.

Das Prinzip einer Brückenwaage auf Bild 14 ist für sehr große Höchstlasten geeignet. Hier wird in drei Stufen unter-

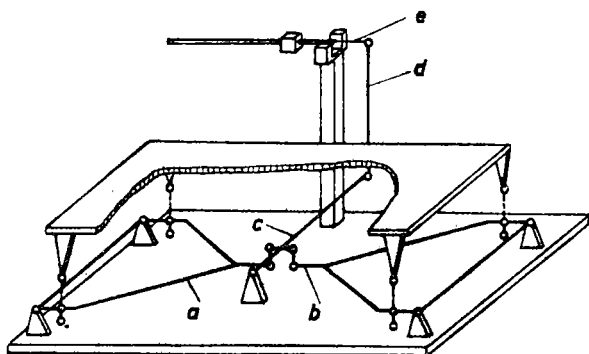


Bild 14

setzt. (Das Laufgewicht bringt eine Untersetzung!) Die Last verteilt sich auf 4 Schneiden und wird durch die beiden Hebel a und b, welche die Lasthebel darstellen, auf den Übertragungshebel c übertragen. Diese Waage wird auch in Fundamente eingelassen und zum Wiegen von Fahrzeugen verwendet.

5.3 Zusammengesetzte Neigungswaagen

Die zusammengesetzten Neigungswaagen enthalten entweder das Prinzip der Tafelwaagen oder Kombinationen aus Tafel- und Brückenwaage. Bild 15 zeigt ein sehr verbreitetes Prinzip. Der Neigungsbereich entspricht im allgemeinen einem Teil

der Höchstlast, z.B. 1 kg. Die Waage auf Bild 15 ist zum Einstellen der Kilogrammwerte mit einer Schaltgewichtseinrichtung versehen. Bei anderen Waagen werden Kilogrammgewichte auf die Gewichtstafel gestellt und die Grammwerte ebenfalls auf der Skala abgelesen.

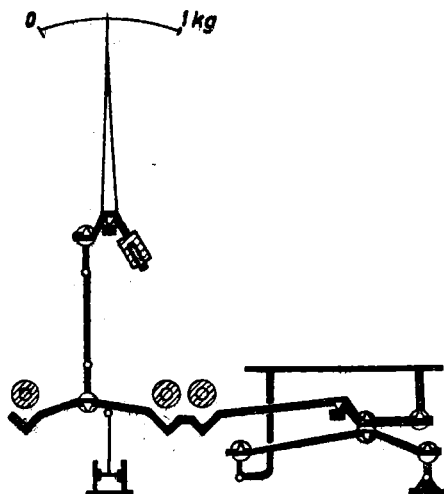


Bild 15

5.4 Kranwaagen

Bei der Bewegung von größeren Massen mit Kränen besteht oft das Bedürfnis, die beförderten Mengen zu messen. Mit den bisher besprochenen Waagen ist das nicht möglich. Man müßte den Kran auf eine Waage stellen und hätte dabei den Nachteil, daß die Tara viel größer als die zu wiegende Last ist. Die Kranwaagen messen die Zugspannung des Seiles durch Vorrichtungen, die in den Kran eingebaut sind. Die Seilspannung wird über eine Rolle auf ein Hebelsystem übertragen, welches über verschiedene Koppeln auf einen Laufgewichtsbalken wirkt

(Bild 16). Durch das Hebelsystem wird natürlich eine entsprechende Untersetzung erzielt.

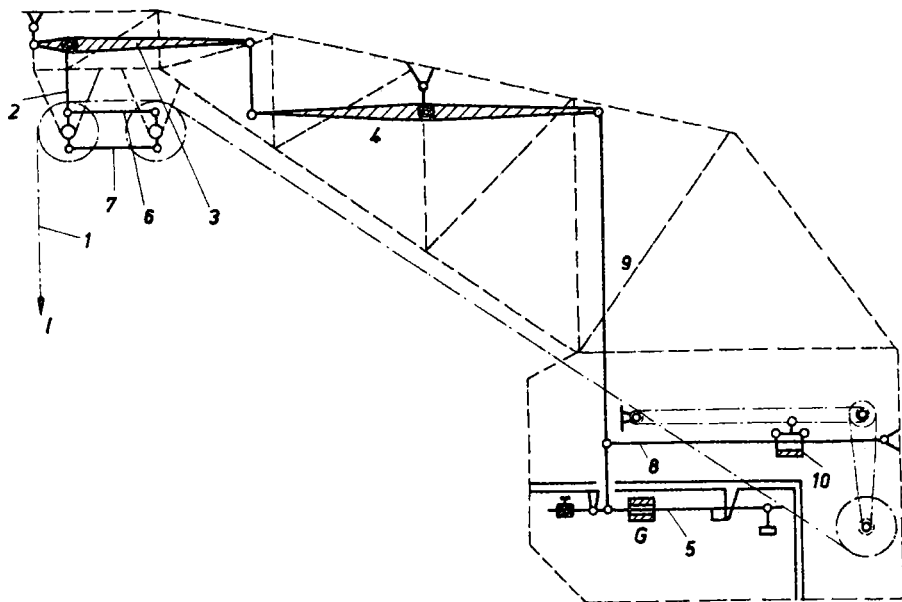


Bild 16

Bild 16 zeigt eine Kranwaage, die in einem Kran mit festem Ausleger eingebaut ist. Der Zug L des Seiles 1 wird über eine Rolle auf den Hebel 3 übertragen. Dieser wirkt auf den Hebel 4 und dieser wiederum auf den Laufgewichtsbalken, der sich im Führerhaus befindet.

Das Laufgewicht wird bei manchen Waagen automatisch verstellt und das Gewicht durch eine besondere Druckvorrichtung registriert.

5.5 Zusammenfassung

Bei Einhebelwaagen ist die Lastschale nur an einem Punkt aufgehängt und kann sich daher seitlich bewegen, was das Wiegen größerer Lasten sehr erschwert. Daher tritt bei den zusammengesetzten Waagen an die Stelle der Lastschale eine Platte, die auf mindestens zwei Schneiden ruht und dadurch so geführt ist, daß sie keine seitlichen Bewegungen ausführen kann. Man nennt eine gleicharmige zusammengesetzte Waage eine Tafelwaage und eine ungleicharmige eine Brückenwaage. Der Abgleich kann wieder durch Gewichte, Laufgewichte oder nach dem Prinzip der Neigungswaage erfolgen.

Man kann für sehr große Lasten auch mehrere ungleiche Hebelarme hintereinanderschalten und so eine große Untersetzung erreichen. Das wird bei Kranwaagen angewendet.

6. Automatische Waagen

Man verwendet die Waage grundsätzlich für drei verschiedene Aufgaben und hat beim Wiegen eine ganze Reihe immer wiederkehrender Handgriffe auszuführen. Die erste Aufgabe besteht darin, z.B. Zucker in Packungen zu je ein Kilogramm abzufüllen. Man spricht in diesem Falle vom Abwiegen. Die zweite Aufgabe besteht darin, das unbekannte Gewicht einer Menge zu ermitteln. Man spricht hierbei vom Wiegen. Schließlich ist häufig nur festzustellen, zu welcher Gewichtsklasse der betreffende Gegenstand gehört. Man spricht von einer Grenzwägung.

Bei der ersten Aufgabe sind folgende Handgriffe auszuführen: Ein Vorratsgefäß ist zu öffnen, so daß das Wägegut in die Lastschale fließt. Zeigt die Waage an, daß die gewünschte Menge erreicht ist, so muß der Mengenstrom gestoppt werden. Nun wird die Lastschale entleert und in die Ausgangsstellung zurückgebracht. Die Anzahl der Wägungen muß meist registriert werden.

Bei der zweiten Aufgabe ist folgendes zu tun: Die Last muß auf die Lastschale gebracht werden. Verwendet man eine Nei-

gungswaage, so kann das Gewicht direkt abgelesen werden, und man kann auch sofort feststellen, zu welcher Gewichtsklasse der Gegenstand gehört. Die Neigungswaage ist also von Haus aus eine automatische Waage. Sie braucht nur mit einigen Zusatzvorrichtungen ausgerüstet zu werden, welche die Bewegung der Last und die Meßwertaufzeichnung übernehmen. Bei jeder anderen Waage hat man aber manuelle Eingriffe vorzunehmen, um zu einem Meßergebnis zu gelangen. Das Wiegen mit einer Balkenwaage erfordert die Zugabe von Gewichten auf die Gewichtsschale oder die Verschiebung des Laufgewichtes bis zur Einstellung der Gleichgewichtslage. Diese Handgriffe muß eine automatische Waage selbsttätig ausführen. Sie stellt dann eine Maschine dar und wird deshalb häufig als Wägemaschine bezeichnet.

Man kennt Wägemaschinen, bei denen Laufgewichte durch kompensierte Mechanismen mittels Elektromotor oder einer Fallgewichtseinrichtung selbsttätig bewegt werden und das Gleichgewicht einstellen. Diese Waagen führen tatsächlich alle sonst von Hand auszuführenden Tätigkeiten selbst aus. Sie haben aber nur in Krananlagen und zum Wiegen von Fahrzeugen eine gewisse Bedeutung erlangt. Wichtiger ist, daß die automatischen Waagen schließlich zu einer Aufgabe herangezogen werden können, die ein Mensch gar nicht mehr ausführen kann, nämlich die Messung eines kontinuierlichen Mengenstromes.

Die automatischen Waagen sind ein wesentliches Glied in der Kette der Mechanisierungsmaßnahmen und können überall, wo nach dem Gewicht abgefüllt, gemischt oder sortiert wird, menschliche Arbeitskraft ersetzen. Sie sind damit ein wichtiges Mittel zur Steigerung der Arbeitsproduktivität.

6.1 Automatisches Abwiegen

Die erste Aufgabe, nämlich das Abwiegen, wird entweder mit Neigungswaagen ausgeführt, deren Zeiger elektrische Kontakte schließt und dadurch eine Folge von Bewegungen auslöst, oder es wird die Balkenwaage verwendet. In beiden Fällen ist eine Füllvorrichtung erforderlich, die einen möglichst gleich-

mäßigen Mengenstrom gewährleistet, und eine zweite Vorrichtung, die die Entleerung der Lastschale oder die Beförderung der gefüllten Behälter (z.B. Tüten oder Säcke) übernimmt. Diese Zusatzvorrichtungen sind so vielgestaltig und dem jeweiligen Tatbestand angepaßt, daß man auf Einzelheiten gar nicht eingehen kann. Als Füllvorrichtung findet man häufig die Rüttelrinne oder einen durch eine Klappe verschließbaren Trichter. Der Entleerung dienen Bodenklappen in den topfförmigen Lastschalen, kippbare Lastschalen oder elektrisch angetriebene Mechanismen, welche Behälter auf die Lastschalen setzen und wieder herunternehmen. Der Phantasie sind nahezu keine Grenzen gesetzt.

Einige allgemeine Gesichtspunkte müssen aber bei der Konstruktion einer Füllvorrichtung grundsätzlich beachtet werden. Die automatische Mengenzugabe geschieht immer so, daß der Mengenstrom aus einer gewissen Höhe auf die Lastschale herunterfällt. Da die auffallende Menge einen Impuls auf die Lastschale überträgt, zeigt die Waage infolgedessen stets ein größeres Gewicht an als die auf der Lastschale befindliche Menge besitzt. Ist nun das Sollgewicht erreicht, so wird der Mengenstrom durch eine Klappe oder durch den Stillstand der Rüttelrinne unterbrochen. Es befindet sich aber noch eine gewisse Menge des Wägegutes fallend in der Luft und belastet die Waage noch nicht. Die Füllung wird also zu groß, d.h. die Waage hat zu wenig angezeigt. Der automatische Füllvorgang bringt also grundsätzlich zwei Fehler mit sich, die einander entgegenwirken. Es ist zwar nicht möglich, den Mengenstrom exakt konstant zu halten, er schwankt allerdings auch nur in gewissen zulässigen Grenzen. Daher kann man die letzte Phase der Füllung durch die Stärke des Mengenstromes entweder so einrichten, daß sich die beiden Fehler gerade kompensieren, oder man kann den resultierenden Fehler als konstante Abweichung betrachten und die Waage danach einrichten. Allerdings muß der Mengenstrom in beiden Fällen recht klein sein. Würde der ganze Füllvorgang mit diesem kleinen Strom erfolgen, so wäre die Fülldauer zu groß.

Daher wird durch einen starken Hauptstrom im ersten Drittel der Abfülldauer 80% der Füllung zudosiert und durch einen nachfolgenden Schwachstrom die genaue Einstellung des Gewichtes erreicht. Die Umstellung von Haupt- auf Schwachstrom wird genau wie das Abschalten des Schwachstromes von der Waage gesteuert. Durch das Abschalten des Schwachstromes wird gleichzeitig der Impuls zur Entleerung der Lastschale ausgelöst, die nach Ablauf einer gewissen Zeit wieder in ihre Ausgangsstellung zurückkehrt und dabei den nächsten Abfüllvorgang einschaltet. Die Folge der Abfüllungen kann auch durch einen Zeitplan oder durch andere Impulse automatisch gesteuert werden. Die Anzahl der Abfüllungen wird durch ein mechanisches oder elektrisches Zählwerk gezählt.

Es gibt auch Waagen, die nacheinander aus verschiedenen Vorratsbehältern bestimmte vorgegebene Mengen abwiegen und auf diese Weise eine gewünschte Mischung herstellen. Sie werden durch besondere Steuergeräte gesteuert und können auch nacheinander verschiedene Programme bearbeiten, ohne daß Eingriffe durch den Menschen erforderlich sind.

6.2 Automatisches Wiegen eines Mengenstromes

Häufig besteht das Bedürfnis, die durch ein Förderband bewegte Menge kontinuierlich zu messen. Man bestimmt dabei eigentlich nicht das Gewicht, sondern das pro Zeiteinheit bewegte Gewicht, also den Mengenstrom.

Eine Brückenwaage eignet sich für den Zweck der Mengenstrommessung, wenn die Brücke eine Anzahl Laufrollen trägt, über die das Förderband läuft. Die Brücke wird dann mit der Menge belastet, die sich gerade auf dem Stück des Förderbandes befindet, das von der Brücke getragen wird. Diese Menge wird laufend gewogen. Man verwendet nun keine automatische Laufgewichtseinrichtung, sondern einen Neigungsbalken. Damit fallen alle Vorrichtungen zur zeitraubenden Verstellung der Laufgewichte weg, und es ist eine unmittelbare Gewichtsanzeige möglich. Im allgemeinen wird die Waage registrierend verwendet. Der Zeiger des Neigungssystems wird in gewissen

Zeitabständen durch einen Druckbügel auf ein Farbband und dieses auf das Papier gedruckt. Das Registrierverfahren ist das gleiche wie bei den elektrischen Punktschreibern.

6.3 Sortierwaagen

Zum Sortieren werden Waagen mit Hubgewichtseinrichtung verwendet. Der Gewichtsarm des Balkens hebt je nach der Belastung verschiedene Hubgewichte hoch (Bild 17) und öffnet dabei Kontakte, die durch die Hubgewichte geschlossen waren. Dadurch werden die zu sortierenden Gegenstände durch Greifarme oder andere Vorrichtungen in gewünschter Weise (z.B. auf verschiedene Förderbänder) verteilt. Die Schwankungen innerhalb

**Das Gewicht
der Sendung
liegt zwischen**

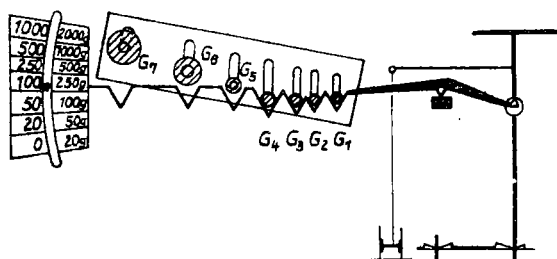


Bild 17

der Gewichtsklasse spielen dabei keine Rolle. Es ist klar, daß die elektrischen und mechanischen Zusatzeinrichtungen zur Bewegung der Gegenstände weit komplizierter sind als das Prinzip der Sortierwaagen selbst.

6.4 Zusammenfassung

Die Waagen können der reinen Massenbestimmung dienen (Wiegen), für die Abfüllung einer vorgegebenen Menge verwendet werden (Abwiegen) oder schließlich laufend einen kontinuierlichen

Mengenstrom messen. In automatisierten Anlagen sollen alle diese Aufgaben selbsttätig ausgeführt werden.

Beim selbsttätigen Wiegen wird durch eine Be- und Entladevorrichtung die Menge auf die Schale gebracht und die Wägung durch ein Neigungssystem ausgeführt, das den Meßwert auf einen Papierstreifen druckt. Bei der Mengenstromwägung läuft die Menge auf einem Förderband über die mit Laufrollen versehene Waage, deren Neigungssystem im allgemeinen über einen Zeiger den Meßwert auf einem Schreibstreifen registriert.

Beim automatischen Abwiegen erfolgt durch eine Füllvorrichtung, die erst einen großen und nach Überschreiten der 80%-Grenze einen schwachen Mengenstrom zudosiert, die Beladung der Lastschale. Durch das Neigungssystem der Waage werden bei 80% der Füllung und bei deren Ende Kontakte geschlossen, welche die erforderlichen Vorgänge auslösen.

Zum Sortieren verwendet man Hubgewichtswaagen mit Kontakteinrichtung, die die Gegenstände nach Gewichtsklassen zu trennen gestattet.

7. Übungsaufgaben

- 1.) Auf einer Analysenwaage soll die Masse eines Platindrahtes bestimmt werden. Die Wägung soll in Luft (Dichte = $0,00120 \text{ g/cm}^3$) ausgeführt werden. Die Waage zeigt Gleichgewicht bei $3,7650 \text{ g}$ an. Auf der Gewichtsschale liegen dabei drei Messinggewichte von je 1 g und 765 mg in Aluminiumstücken. Dichte des Platins: $21,4 \text{ g/cm}^3$, Dichte vom Messing: $8,4 \text{ g/cm}^3$, Dichte vom Aluminium: $2,72 \text{ g/cm}^3$. Wie groß ist die Masse des Platindrahtes?

Lösung: $3,7644 \text{ g}$.

- 2.) Auf der Analysenwaage wird ein Diamant (Dichte = $3,5 \text{ g/cm}^3$) mit Platingewichten gewogen. Die Waage steht im Gleichgewicht bei $0,8650 \text{ g}$. Wie groß ist die Masse des Diamanten?

Lösung: $0,8652 \text{ g}$.

3.) Ein Balken ist so justiert, daß bei der Belastung 100 g alle drei Schneiden in einer Ebene liegen. Sein Gewicht beträgt 200 g. Last- und Gewichtssarm haben die Länge 8 cm. Die Empfindlichkeit der Waage beträgt 0,2 Bogengrad/mg.

- a) wie groß ist der Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt?
- b) Last- und Gewichtsschneide werden um 0,1 mm höher gesetzt. Wie groß ist nun die Empfindlichkeit der Waage?
- c) Um wieviel müssen Last- und Gewichtsschneide gegenüber der Ausgangsstellung höher gesetzt werden, damit bei der Belastung 100 g die Waage gerade an der Grenze zwischen stabilem und labilem Gleichgewicht steht?
- d) Der Balken möge sich nicht durchbiegen. Bei welcher Belastung kommt dann die Waage in ein indifferentes Gleichgewicht, wenn Last- und Gewichtsschneide um 0,1 mm über dem Ausgangszustand liegen?

Lösung: a) Der Schwerpunktabstand beträgt $s = 0,115 \text{ mm}$.

b) Die Empfindlichkeit beträgt $E = 0,353 \frac{\text{rad}}{\text{mm}}$

c) Die Schneiden müssen um $h = 0,23 \text{ mm}$ gehoben werden.

d) Das Gleichgewicht wird bei der Belastung 230 g labil.

4.) Die Waage der Aufgabe 3.) schwingt im Ausgangszustand mit der Schwingungsdauer 6 sec. Wie groß ist die Schwingungsdauer, nachdem die Schneiden um 0,1 mm gehoben wurden?

Lösung: $T = 7,96 \text{ sec}$.

5.) Eine Neigungswaage hat die maximale Empfindlichkeit $E = 0,5 \frac{\text{rad}}{\text{g}}$. Der Lastarm hat die Länge 10 cm. Der gesamte Balken wiegt 50 g. $\varphi_0 = 45^\circ$.

- a) Wie groß ist der Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt?
- b) Wie groß ist die Grundlast L_0 ?

c) Wie groß ist die Empfindlichkeit bei $\varphi = 20^\circ$?

Lösung: a) Der Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt beträgt $g = 29,2 \text{ mm}$.

b) Die Grundlast beträgt $L_0 = 10,3 \text{ g}$.

c) Die Empfindlichkeit bei $\varphi = 20^\circ$ beträgt
 $E = 0,47 \text{ Bogengrad/g}$.

6.) Eine Neigungswaage besitzt eine Stützschnede und eine Lastkurve. Die Lastkurve ist ein Kreis mit dem Radius l , dessen Mittelpunkt im Drehpunkt liegt. Wie ändert sich die Empfindlichkeit mit dem Ausschlag?

Lösung:

$$E = \frac{1}{g \cdot G} \cdot \frac{1}{\cos(\varphi + \varphi_0)}$$

Zeichnen Sie für $\varphi_0 = 30^\circ$ von $\varphi = -30^\circ$ bis $\varphi = +30^\circ$ die beiden Kurven:

$$E_1 = \frac{1}{g \cdot G} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \varphi_0} \text{ und } E_2 = \frac{1}{g \cdot G} \cdot \frac{1}{\cos(\varphi + \varphi_0)}$$

II. Volumenzähler

Das zweite wesentliche Verfahren der Mengenmessung ist die Bestimmung des Volumens. Während die Bedeutung der Wägeverfahren auf dem Gebiet der Mengenmessung fester Stoffe liegt, eignet sich die Volumenbestimmung besonders für flüssige Mengen. Dabei wird gezählt, wie oft ein Meßbehälter gefüllt wurde. Man nennt daher die Meßgeräte, die laufend das Volumen einer Menge bestimmen, Volumenzähler.

Unterscheiden und in Gruppen zusammenfassen kann man die Volumenzähler nach den Eigenschaften der Meßbehälter oder Meßkammern. Eine Gruppe von Geräten besitzt Meßkammern mit starren Wänden. Die Meßkammern werden durch den Flüssigkeitsdruck gefüllt und entleeren sich auf Grund der Schwere des Meßgutes nach dem Öffnen eines Ablassventiles von selbst; man sagt, sie laufen aus. Daher nennt man diese Gruppen von Geräten Auslaufzähler. Eine zweite, sehr große Gruppe von Volumenzählern besitzt Meßkammern mit bewegten Wänden (z.B. Kolben). Die einlaufende Menge verdrängt infolge ihres größeren Druckes die bereits gefüllte Meßkammer und verändert dabei deren Größe. Man nennt diese Geräte Verdrängungszähler. Eine dritte Gruppe von Volumenzählern besitzt keine eigentlichen Meßkammern, sondern Flügelräder oder ähnliche Gebilde. Durch die Strömung werden die Flügel wie eine Turbine bewegt. Man nennt diese Geräte Turbinenzähler. Sie nehmen eine Grenzstellung zur Durchflußmessung ein.

1. Auslaufzähler

1.1 Zähler mit feststehenden Meßbehältern

Die einfachste Art der fortlaufenden Volumenmessung besteht darin, daß ein Behälter nacheinander fortwährend gefüllt und wieder entleert wird. Dabei sind laufend zwei Ventile zu betätigen. Ist der Behälter voll, so wird das Einlaufventil geschlossen und danach das Auslaufventil geöffnet. Im einfachsten Fall geschieht die Betätigung der Ventile von Hand. Diese Arbeit kann aber auch leicht automatisiert werden.

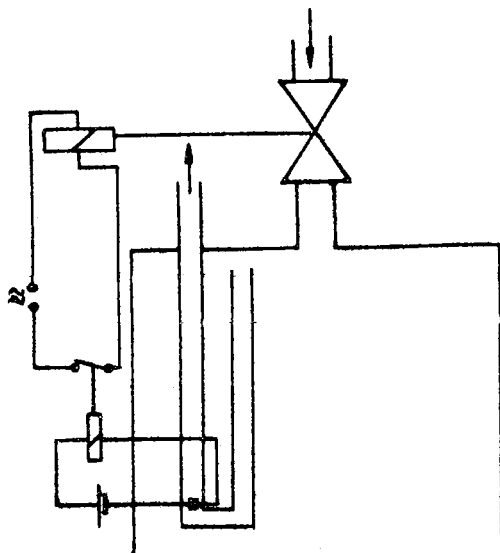


Bild 18

Verwendet man beispielsweise für den Auslauf ein Rohr, das im Behälterinneren als Heber ausgebildet ist, so erübrigt sich das Auslaufventil. Bei geöffnetem Einlauf steigt die Flüssigkeit im Behälter und im Steigrohr des Hebers bis der Heber überläuft.

Die überlaufende Flüssigkeit möge zwei isoliert durch die Rohrwand hindurchgeführte Elektroden elektrisch miteinander verbinden, so daß ein Stromkreis geschlossen wird, der über ein Leistungsrelais ein Magnetventil im Einlauf schließt. Da der Heber einmal übergelaufen ist, wird der Behälter vollständig entleert. Nun besteht keine leitende Verbindung mehr zwischen den Elektroden, so daß das Magnetventil im Einlauf wieder geöffnet wird und der Vorgang von neuem beginnt. Ein elektromechanisches Zählwerk übernimmt die Zählung der Füllungen.

Häufig kann man die bei der eben geschilderten Messung erforderliche Unterbrechung des Flüssigkeitsstromes nicht in Kauf nehmen. In diesem Fall benötigt man mindestens zwei

Meßbehälter, die abwechselnd entleert und gefüllt werden. Dabei muß aber eine Verriegelung so vorgesehen werden, daß nicht gleichzeitig beide Einlaufventile geöffnet sein können, obwohl sie beide gleichzeitig geschlossen sein dürfen (nämlich dann, wenn der eine Behälter bereits voll ist und mit der Entleerung beginnt, während der andere noch nicht ganz entleert ist). Diese Verriegelung ist leicht möglich, wenn man Relais mit zwei Steuerwicklungen verwendet (Bild 19).

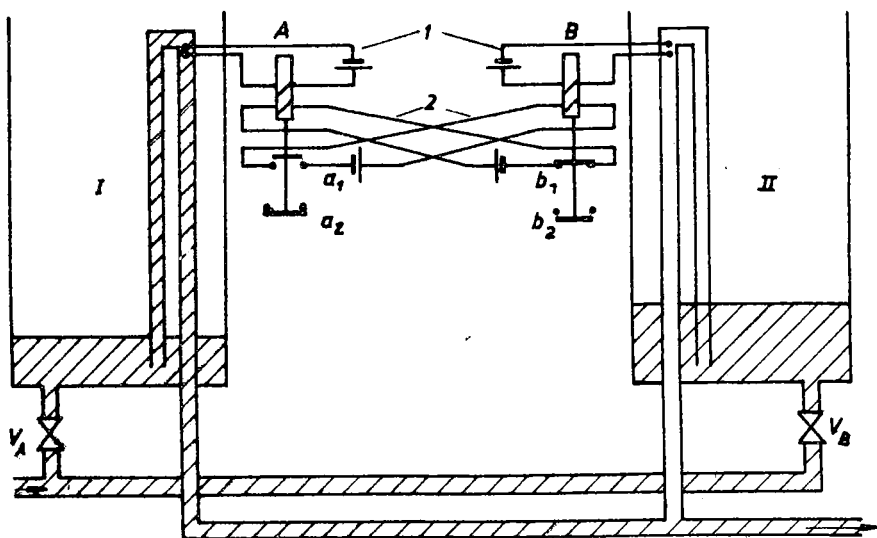


Bild 19

Der erste Steuerkreis (1) schließt das Einlaufventil immer, wenn der Behälter gefüllt ist. Der zweite Steuerkreis des Relais A wird vom Relais B mit dem Kontakt b_1 eingeschaltet, wenn der Kontakt b_2 und damit das Ventil V_B offen ist. Dadurch bleibt das Relais A angezogen, auch wenn die Entleerung bereits beendet ist. Erst wenn der Behälter II voll ist und das Relais B anzieht, fällt das Relais A ab und öffnet das

Ventil V_A . Es ist nicht möglich, daß beide Ventile gleichzeitig geöffnet sind. Sie können aber gleichzeitig geschlossen sein. Ist z.B. der Behälter II voll, während I noch nicht völlig entleert ist, so wird zwar die Steuerwicklung 2 von A stromlos, aber die Steuerwicklung 1 hält das Relais noch, bis die Entleerung beendet ist. Ein Zählwerk übernimmt wieder die Zählung der Füllungen.

Diese elektrische Schaltung funktioniert natürlich nur bei leitenden Flüssigkeiten und hat daher eine begrenzte Anwendung. Sie ist aber leicht zu übersehen. Daher haben wir uns an ihr die Wirkung einer Verriegelung klar gemacht. Für universelle Anwendung wird von Schneider & Helmecke, Offenbach am Main, eine Anlage mit hydraulischer Betätigung der Ventile gebaut, deren Verriegelung ein kompliziertes System von Rohrleitungen, Rückschlag- und Steuerventilen ist, aber genau das gleiche bewirkt, wie die eben beschriebene elektrische Verriegelung.

Volumenzähler dieser Art messen unterhalb einer maximalen Menge mit einer Genauigkeit von 1 % und weniger unabhängig vom Durchsatz. Ihre Genauigkeit verschlechtert sich insbesondere auch bei sehr geringem Durchsatz nicht. Die obere Grenze ist dadurch gegeben, daß der Flüssigkeitsspiegel in der Zeit zwischen Kontaktgabe und Schließen des Ventiles noch etwas ansteigt und dadurch ein Fehler entsteht, der die zulässige Toleranz überschreitet.

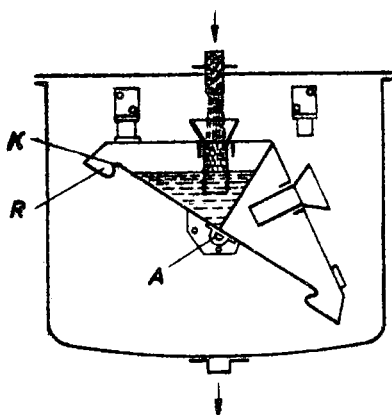
1.2 Zähler mit bewegten Meßbehältern

Die Ventile fallen weg, wenn man die Meßbehälter so anlegt, daß sie infolge des Gewichts der Flüssigkeit, die sie enthalten, bewegt werden und sich dadurch von allein entleeren. Die einfachste Konstruktion, die das leistet, ist der

a) Kippzähler

Er stellt eine Waage dar, die sich im indifferenten Gleichgewicht befindet und daher entweder nach der einen oder nach der anderen Seite kippt. Der Waagebalken ist als eine Schale

ausgebildet, die aus zwei Meßräumen besteht. Der Schwerpunkt liegt oberhalb des Drehpunktes. Durch die zulaufende Flüssigkeit wird ein Meßraum so lange gefüllt, bis die Flüssigkeit über die Kante K in die Rinne R läuft. Dadurch verschiebt



sich plötzlich der Schwerpunkt auf die andere Seite, so daß die Schale kippt. Dadurch entleert sich die volle Kammer und die leere wird gefüllt. Mit der Achse ist ein Zählwerk verbunden, welches die Anzahl der Kippbewegungen zählt.

Bild 20

Während des Kippvorganges bleibt aber der Zulauf offen, und es strömt eine gewisse Menge am Einlaufstutzen vorbei, die nicht gemessen wird. Diese blinde Menge ist um so größer, je größer der Mengenstrom ist. Der Kippzähler zeigt also mit steigendem Durchsatz relativ immer weniger an. Er hat einen negativen Fehler. Man eicht nun das Gerät so, daß es für

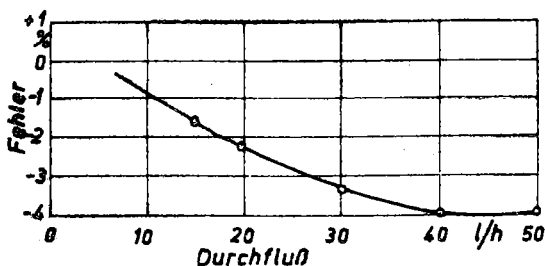


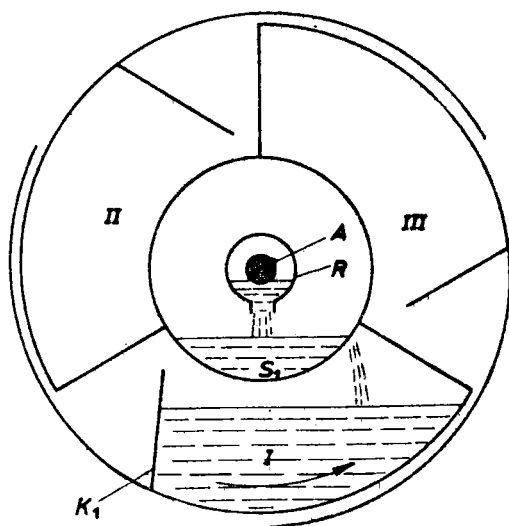
Bild 21

einen mittleren Durchsatz gerade stimmt. Bei kleineren Mengen zeigt es dann zuviel an (positiver Fehler), bei größeren Mengen zeigt es zu wenig an (negativer Fehler)

Auf Bild 21 ist die Fehlerkurve eines Kippzählers wiedergegeben. Wegen seiner geringen Genauigkeit wird der Kippzähler heute nur noch selten verwendet. Er hat aber den großen Vorteil, daß er nicht schmutzempfindlich ist und sich auch für die Messung zäher Flüssigkeiten eignet.

b) Trommelzähler

Weitere Verbreitung hat der Trommelzähler gefunden. Bei ihm werden die Meßkammern durch das Gewicht der Füllung in Rotation versetzt und entleeren sich dadurch. Die Flüssigkeit tritt durch ein konzentrisch um die Achse A gelegtes Rohr R in den Zähler ein (Bild 22). Sie fließt zunächst in die



Schale S_1 und von da in die Meßkammer I, die durch die Scheidewand K_1 in zwei Teile zerlegt wird. Zunächst füllt sich der rechte Teil der Meßkammer auf. Während dieses Vorganges befindet sich der Schwerpunkt der Flüssigkeitsmasse unter der Drehachse. Ist der rechte Teil der Meßkammer gefüllt, so tritt die Flüssigkeit

Bild 22

über die Trennwand in den linken Teil ein und füllt diesen langsam auf. Dabei verlagert sich der Schwerpunkt immer mehr nach links, so daß ein Drehmoment entsteht, das die Trommel entgegen dem Uhrzeigersinn bewegt. Wenn die Schale S_1 so weit gefüllt ist, daß nun auch über ihren linken Rand die Flüssigkeit in die Meßkammer II gelangt, so wird das Dreh-

moment stark vergrößert, so daß die Trommel rasch in die Stellung gebracht wird, bei der die Entleerung der Meßkammer I beginnt. Der Schwerpunkt bleibt nun so lange links von der Gleichgewichtslage, bis die Meßkammer 1 völlig entleert ist, denn das linke Flüssigkeitsvolumen ist um den Auslaufspalt größer als das rechte.

Die Reibung wird im allgemeinen durch selbstschmierende Lagerung der Achse sehr klein gehalten. Das ist besonders bei der Messung spezifisch leichter Flüssigkeiten notwendig, die ein geringes Drehmoment verursachen. Die kinematische Zähigkeit des Meßgutes darf eine gewisse Größe nicht überschreiten, da sonst der Strömungswiderstand beim Ausfließen durch das Drehmoment nicht mehr überwunden wird. Als maximale Zähigkeiten werden 0,3 bis 0,6 Stoke angegeben. Die Genauigkeit der Trommelzähler ist sehr gut. Bei einem Meßbereich 1:100 beträgt die Fehlergrenze 0,5 %, bei einem Meßbereich 1:10 liegt sie bei 0,2 %.

Die Trommelzähler werden in drucklose Leitungen eingebaut. Der Auslauf muß in jedem Falle frei sein.

1.3 Zusammenfassung

Die Volumenzähler dienen in erster Linie der Bestimmung flüssiger Mengen. Die einfachsten Volumenzähler sind die Auslaufzähler. Man kann mit einem oder mehreren reststehenden Meßbehältern, die von Hand oder automatisch nacheinander gefüllt werden, eine fortlaufende Volumenbestimmung vornehmen. Bei mehreren Meßbehältern ist dabei eine Verriegelung erforderlich, die gewährleisten muß, daß zwar alle Behälter gleichzeitig auslaufen, aber immer nur einer nach der vollständigen Entleerung gefüllt werden kann.

Ohne Ventile arbeiten die Zähler mit Meßbehältern, die durch das Gewicht der Füllung bewegt und dadurch entleert werden. Der Kippzähler stellt eine aus zwei Behältern bestehende Waage im indifferenten Gleichgewicht dar, die nach beendeter Füllung eines Behälters in die andere stabile Lage umkippt,

dabei den vollen Behälter in die Entleerungsstellung und den leeren in die Füllstellung bringt. - Beim Trommelzähler werden schalenförmige Meßbehälter durch das Gewicht der Füllung in Rotation versetzt, wodurch die vollen Schalen entleert und die leeren gefüllt werden. Der Auslauf muß bei allen Auslaufzählern frei sein.

2. Verdrängungszähler

Bei den bisher behandelten Zählern erfolgt die Entleerung der gefüllten Meßkammer durch das Gewicht des Meßgutes. Deshalb muß ein freier Auslauf gefordert werden. Bei den Verdrängungszählern erfolgen Füllung und Entleerung durch den Druck, der das Meßgut in einer geschlossenen Rohrleitung bewegt. Dabei werden entweder Kolben hin- und hergeschoben (Hubkolbenzähler) oder gedreht (Drehkolbenzähler). In beiden Fällen gleitet ein beweglicher Teil der Meßkammer auf einem feststehenden. Die damit verbundene Reibung verursacht einen bleibenden Druckverlust, der im allgemeinen mit dem Durchfluß zunimmt und für manche Typen beträchtliche Werte annehmen kann. Zum Zweiten liegen die Gleitflächen nie völlig dicht aneinander, so daß eine gewisse Menge ungemessen durch die Spalte gelangt (Spaltverluste oder Schlupf). Ein Verdrängungszähler zeigt also immer zu wenig an. Man muß den angezeigten Wert mit einem Berichtigungsfaktor multiplizieren, um auf die tatsächliche Menge zu kommen. Dabei gilt folgende Definition: Berichtigungsfaktor = Sollanzeige/Istanzeige.

Da der Schlupf die Folge der laminaren Spaltströmung ist, wächst er mit dem bleibenden Druckverlust und nimmt mit zunehmender Viskosität ab. Nehmen wir der Einfachheit halber an, der Druckverlust und damit der Schlupf seien konstant. Dann ist die angezeigte Menge Q - Schlupf q . Daraus folgt die Gleichung

$$\text{Berichtigungsfaktor} = \frac{1}{1 - \frac{q}{Q}}$$

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß Q immer größer oder bestenfalls gleich q ist; denn es kann ja keine größere Menge durch die Spalte strömen als durch den Zähler fließt. Trägt man die Berichtigungsanzahl über dem Durchfluß Q auf, so erhält man eine Hyperbel (Bild 23). Wird nun noch berücksichtigt,

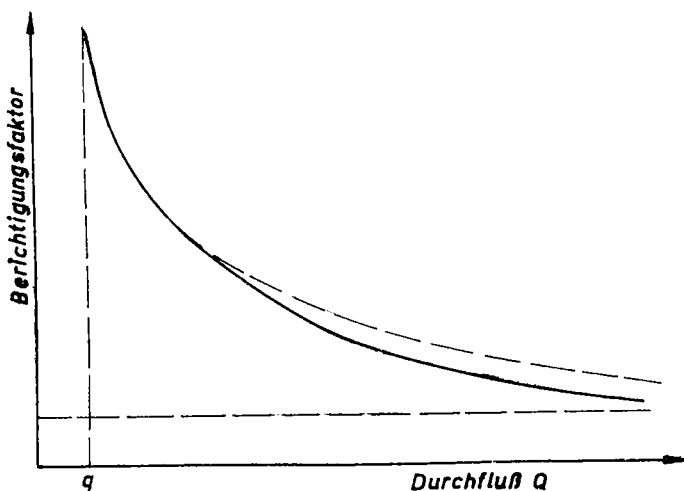


Bild 23

daß der Schlupf q mit dem Durchfluß zunimmt, so ergibt sich die gestrichelte Kurve; der Berichtigungsfaktor erreicht nicht ganz den Wert 1. Der Hersteller berücksichtigt aber durch Verkleinerung des Meßkammervolumens oder durch entsprechende Zahnradübersetzung im Zählwerk diesen systematischen Fehler und verschiebt die Berichtigungskurve, so daß die angezeigte Menge innerhalb einer gewissen Toleranz ohne Berichtigung der tatsächlichen entspricht.

Unterhalb eines gewissen Durchflusses sind tatsächlich Schlupf und Durchfluß gleich, weil die Druckdifferenz am Zähler erst einen bestimmten Wert überschritten haben muß, um die Haft-

reibung zu überwinden. Man nennt diesen Wert den Anlaufwert. Die Tatsache, daß in den Verdrängungszählern aneinandergleitende Teile vorhanden sind, bringt ihre große Schmutzanfälligkeit mit sich. Fasrige Verunreinigungen klemmen sich zwischen die Gleitflächen und verringern den Schlupf. Dadurch wird die Eichkurve leicht verschoben. Die Reibung erhöht sich aber beträchtlich und vergrößert damit den Druckverlust. Scharfkantige Schmutzteilchen schleifen die Flächen aus. Dadurch wird der Schlupf vergrößert und vor allem am Anfang des Meßbereiches die Genauigkeit stark verringert. Während man faserige Verschmutzungen durch den erhöhten Druckverlust erkennen und durch eine Reinigung auch wieder beseitigen kann, bringt die zweite Art des Schmutzes schleichend einen nicht wahrnehmbaren Fehler mit sich. Technische Flüssigkeiten müssen daher vor dem Zähler eine Filterbatterie passieren.

Die Verdrängungszähler messen das Volumen der hindurchgeschleusten Menge. Sie messen dabei auch insbesondere Gaseinflüsse unbehindert mit. Daher müssen im Bedarfsfalle vor dem Zähler Gasabscheider vorgesehen werden. Das Meßergebnis ist natürlich von Druck, Temperatur und Dichte unabhängig. Besondere Einbauvorschriften und Bedingungen an die Rohrleitung bestehen nicht. Der Meßbereich ist wesentlich größer als der der Normdrosseln. Das sind große Vorteile gegenüber den genormten Drosselgeräten. Nachteilig ist, daß man nicht auf billige Weise den Meßbereich ändern kann und daß die Meßbedingungen hinsichtlich Druck, Temperatur und Verschmutzung recht beschränkt sind.

2.1 Hubkolbenzähler

a) Einkolbenzähler

Die einfachsten Hubkolbenzähler besitzen nur einen einzigen Kolben, der durch den Flüssigkeitsdruck bewegt wird. Das Arbeitsprinzip ist auf Bild 24 dargestellt. Die Flüssigkeit tritt durch einen Vierwegehahn in den Zylinder ein und schiebt den Kolben in die eine Endlage. Nun muß der Vierwegehahn um-

A diagram of a mechanical device. It features a vertical pipe at the top center, which connects to a horizontal pipe. The horizontal pipe has a large, rectangular block attached to its left side. The block is shaded with vertical lines. The horizontal pipe extends to the right, ending in a small, curved hook-like structure. A small, dark, diamond-shaped object is positioned below the end of the horizontal pipe.

zweiten Arbeitsphase zur anderen Endlage drückt. Die Umsteuerung geschieht durch eine mechanische Einrichtung. Diese ist auf Bild 25 schematisch dargestellt. Die Bewegung des Kolbens wird mittels einer Stange, die mit dem Kolben

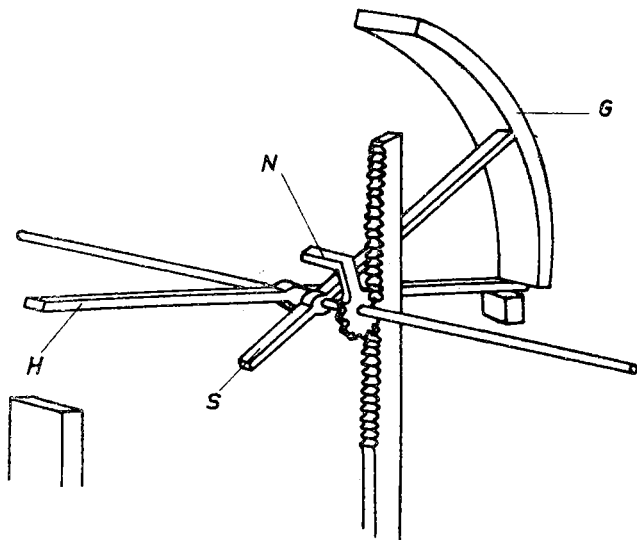


Bild 25

verbunden und durch eine Stopfbüchse aus dem Meßzylinder herausgeführt ist, auf eine Zahnstange übertragen. Diese treibt ein Nockenrad N an. Auf der gleichen Welle, die das Nockenrad trägt, ist frei beweglich ein Schwenkgewicht gelagert. Bewegt sich der Kolben nach oben, so drückt der Nocken auf den Schwanz S des Schwenkgewichtes G und hebt dieses hoch bis es überkippt. Nun fällt es frei herunter und schlägt auf den Doppelhebel H, der dadurch in eine andere Endlage gebracht wird. Der Doppelhebel ist mit dem Vierwegehahn verbunden und steuert diesen in die andere Arbeitslage. Bewegt sich nun der Kolben wieder nach unten, so wird der Nocken nach oben gedreht, hebt dadurch das Schwenkgewicht wieder an und bewirkt schließlich, daß es nach der anderen Seite kippt. Es schlägt dabei auf den zweiten Arm des Doppelhebels, verstellt ihn in die zweite Endlage und steuert somit den Vierwegehahn in die ursprüngliche Arbeitsstellung um.

Der Umsteuervorgang benötigt eine gewisse Zeit, die immer gleich ist. In dieser Zeit bewegt sich der Kolben noch ein Stück in die alte Richtung. Je größer der Durchfluß durch den Zähler ist, um so schneller bewegt sich der Kolben und um so weiter bewegt er sich während der Umsteuerung über die Endlage hinaus. Daher ist es nicht sinnvoll, die Anzahl der Hübe zu bestimmen. Man treibt vielmehr durch die Zahnstange ein Wechselgetriebe an, das die Kolbenwege addiert. In die beidseitig gezahnte Stange greifen auf beiden Seiten Zahnräder ein, die nur in eine Richtung ihre Drehbewegung übertragen und bei Drehung in die andere Richtung rutschen. Die nun als Drehung vorliegende Summe der Kolbenwege wirkt auf das Zählwerk.

Für die Präzision des Zählers ist die leichte Beweglichkeit und Dichtigkeit des Vierwegehahnkükens von ausschlaggebender Bedeutung. Der Steg des Kükens ist etwas schmaler als die Zulaufschlitze, damit bei der Umsteuerung ein weicher Übergang entsteht und keine Stöße auftreten.

Wegen der unvermeidlichen Umsteuerzeit ist die Hubzahl sehr klein. Man kann mit maximal 10 Hube pro Minute rechnen. Dieser langsame Lauf setzt die Schmutzempfindlichkeit stark herab. Man kann mit Einkolbenzählern ohne vorgeschaltete Filter technische Öle mit 30 % Schmutz bei befriedigender Lebensdauer des Gerätes messen.

b) Mehrkolbenzähler

Die Mehrkolbenzähler unterscheiden sich in ihrer prinzipiellen Arbeitsweise nur sehr unwesentlich von den Einkolbenzählern. Beim Einkolbenzähler läuft die Flüssigkeit abwechselnd auf der einen und auf der anderen Seite des Kolbens in den Zylinder. Während sich die eine Zylinderseite entleert, wird die andere gefüllt. Bei den Mehrkolbenzählern befindet sich das Meßgut immer auf ein und derselben Seite des Kolbens. Daher müssen mindestens zwei Zylinder vorhanden sein. Während der eine Zylinder gefüllt wird, entleert sich der andere. Auch hier ist wieder ein Steuerorgan erforderlich, das Zu- und Ablauf fortwährend umsteuert. Die Kolben treiben über Kurbeln eine Welle an, mit der ein Drehschieber verbunden ist. Der Drehschieber steuert Zu- und Ablauf der Zylinder.

Die Zähler besitzen im allgemeinen mehr als zwei Zylinder, damit der Durchfluß gleichmäßiger wird und keine Totpunkte auftreten. Die Drehzahl der Welle gibt genau die Anzahl der Füllungen an. Sie steht mit dem Zählwerk in Verbindung. Die verschiedenen Typen von Mehrkolbenzählern unterscheiden sich durch die Anordnung der Zylinder und durch die Art der Umsteuerung.

Zähler von Bowser

Bild 26 gibt schematisch den Aufbau des Zählers von Bowser wieder. Eine Taumelscheibe T ist in einem Kugelgelenk K gelagert. Die Taumelscheibe kann sich nicht drehen, denn sie wird durch den Führungsstab S daran gehindert. Sie wälzt sich über auf der Grundplatte G ab und führt dabei eine taumelnde

Bewegung aus, der sie ihren Namen verdankt. Ihr Achsstumpf steht über der Kurbel H mit der Welle W in Verbindung und treibt diese an. Auf der Peripherie der Taumelscheibe sind in gleichmäßigen Abständen die Kolbenstangen gelagert (Auf unserem Bild sind nur zwei gegenüberliegende Kolben dargestellt).

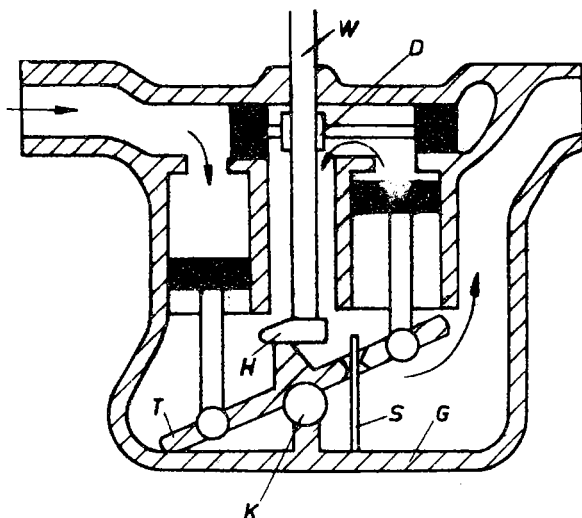


Bild 26

Während sich der linke Zylinder füllt, wälzt sich die Scheibe bis in die gezeichnete Stellung herum und dreht dabei die Welle. Der Drehschieber D, der mit der Welle verbunden ist, gibt dabei für den linken Zylinder den Einlauf und für den rechten den Auslauf frei. Ist der linke Zylinder gefüllt, so hat sich der Drehschieber so weit gedreht, daß er nun den linken Zylinder mit dem Auslauf und den rechten mit dem Einlauf verbindet. Zur Erreichung einer hohen Genauigkeit besitzen die Kolben nur sehr wenig Spiel. Daher ist das Gerät sehr schmutzempfindlich.

Zähler von Bachmann

Der Zähler von Bachmann (Schema auf Bild 27) besitzt 4 Kolben. Je zwei liegen einander gegenüber und sind durch eine Stange miteinander verbunden. Die beiden Stangen überkreuzen sich in der Mitte des Zählers, wo sie mit Nocken in eine gemeinsame Kulisse eingreifen. Die Kulisse wirkt über eine Kurbel K auf die Welle W, mit der ein Verteilungsschieber D verbunden ist. Der Übersicht halber sind auf Bild 27 nur zwei gegenüberliegende Kolben dargestellt. In der gezeichneten

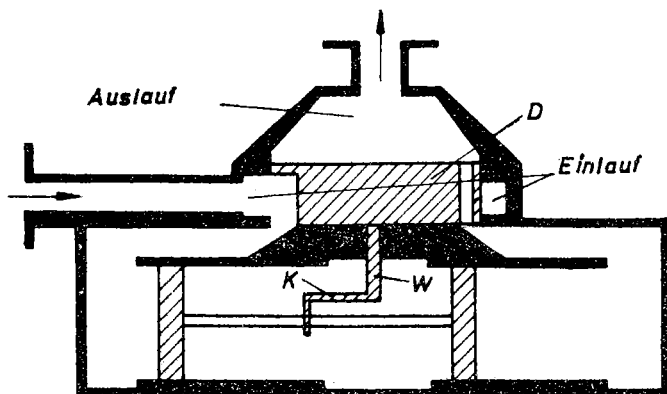
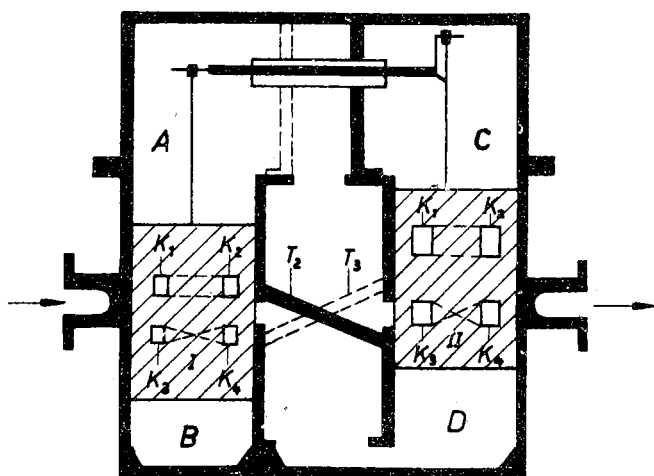
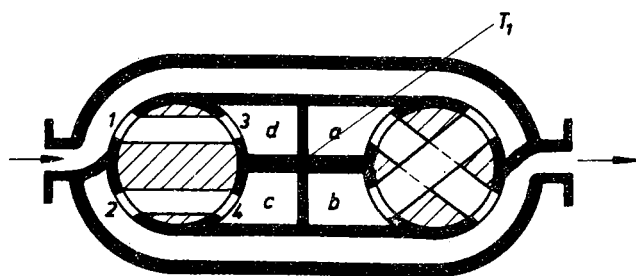


Bild 27

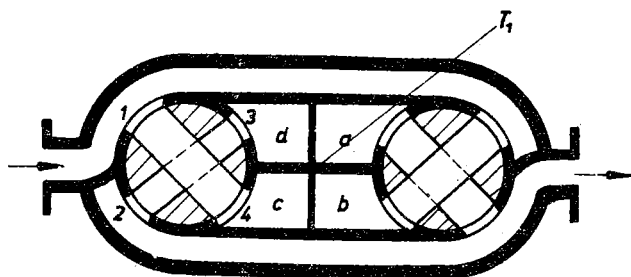
Stellung ist eben der linke Zylinder mit dem Einlauf verbunden worden. Die Kolben bewegen sich nach rechts und drehen dabei über die nicht gezeichnete Kulisse und die angedeutete Kurbel K die Welle W, mit der das Zählwerk verbunden ist. Bei Beendigung des Hubes ist der Schieber so weit gedreht, daß er nun den linken Zylinder mit dem Auslauf und den rechten mit dem Einlauf verbindet. Jeweils in den Endlagen treten Totpunkte auf, die aber durch das senkrecht dazu wirkende zweite Kolbenpaar, das dann gerade in der Mitte des Hubes steht, überwunden werden.



a



b



c

Bild 28

Zähler von Schmidt

Der Zähler von Schmidt (Bild 28a,b,c) arbeitet ohne Schieber. Die Umsteuerung wird durch die Kolben selbst besorgt. Jeder der beiden Kolben besitzt oben zwei parallele Kanäle (K_1 und K_2) und unten zwei gekreuzte (K_3 und K_4). Die Zylinder besitzen in gleicher Höhe je 4 Schlitz (1, 2, 3 und 4). Der Raum zwischen den Kolben wird durch eine senkrechte Trennwand T_1 und zwei schräge Stege (T_2 und T_3) in vier Kanäle (a, b, c, d) zerlegt. Über die vier Öffnungen ϕ existieren folgende Verbindungen: a-A, b-B, c-C und d-D. Die Kolben treiben eine Kurbelwelle an, deren Kurbeln um 90° gegeneinander versetzt sind. In der auf Bild 28 a und b gezeichneten Kolbenstellung verdeckt der Steg zwischen den Kanälen des Kolbens I die Zylinderschlitz. Der Kolben II befindet sich im oberen Umkehrpunkt und leitet vom Einlauf durch die Schlitz 3 und 2 und durch den Kanal b das Meßgut in den Raum B, so daß sich der Kolben I nach oben bewegt und im nächsten Moment bereits mit seinen unteren Kanälen über die Schlitz 1 und 4 den Einlauf mit dem Kanal c verbindet. Dadurch gelangt nun das Meßgut auch in den Raum C und drückt den Kolben II nach unten. Der Raum A ist dabei durch Kolben II über die Schlitz 1 und 4 und der Raum B durch Kolben I über die Schlitz 3 und 2 mit dem Auslauf verbunden. Nach einer Vierteldrehung der Kurbelwelle befindet sich Kolben I in seiner höchsten Lage und Kolben II in der Mittelstellung. Die durch die Kanäle des Kolbens I geschlossenen Verbindungen bleiben bestehen. Dadurch ändert sich für Kolben II am Zu- und Ablauf nichts. Kolben II steuert aber um. Jetzt stehen seine oberen parallelen Kanäle mit den Zylinderschlitz in Verbindung und leiten über 3, 1 und a das Meßgut in den Raum A und über b, 2, 4 aus dem Raum B in den Auslauf. Der Kolben I wird nun nach unten gedrückt. Die Umsteuerung muß jeweils genau an den Totpunkten erfolgen. Daher sind hohe Anforderungen an die Präzision der Fertigung zu stellen.

Da im Moment des Umsteuerns die Schlitz nur sehr wenig geöffnet sind, ist in dieser Zeit der Druckverlust sehr hoch

und vergrößert den durchschnittlichen Druckverlust des Zählers beträchtlich. Er beträgt bei maximalem Durchfluß bis zu 6 m WS. Die Geräte werden für maximale Mengen von 1 bis 120 m³/h gebaut.

c) Zähler mit flüssigem Kolben

Alle bisher besprochenen Geräte eignen sich nicht für die Mengenmessung von Gasen. Diese Lücke wird durch den Zähler von Hofer geschlossen, der mit flüssigem Kolben arbeitet (Bild 29). Das eintretende Gas drückt die Sperrflüssigkeit

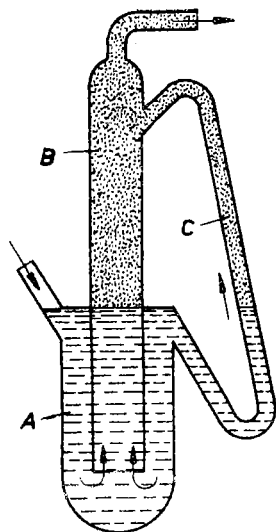


Bild 29

aus dem Raum A in die Räume B und C, bis der Flüssigkeitsspiegel in A auf das Niveau des unteren Bogens von C gesunken ist. Nun gleicht sich der Druck über das inzwischen leer gewordene Rohr C aus. Die Sperrflüssigkeit fällt aus dem Raum B in A zurück und drückt das Gasvolumen durch C zum Auslauf. Während dessen ist kurzzeitig der Eingang mit dem Ausgang verbunden, so daß eine kleine, von der Belastung abhängige Menge ungemessen den Zähler passiert. Aus diesem Grunde ist die Genauigkeit nicht sehr hoch

(3 %). Die Zählung der Füllungen erfolgt nicht elektrisch. Der Zähler ist auch bei sehr hohem Druck (bis zu 1000 atü) noch brauchbar. Er wird für maximale Leistungen von 6 bis 300 Liter pro Stunde hergestellt.

2.2 Drehkolbenzähler

Die Drehkolbenzähler sind einfach aufgebaut und leicht zu warten. Ihre Genauigkeit reicht nicht ganz an die der Hub-

kolbenzähler heran. Dafür verschlechtert sie sich aber mit der Zeit nur gering. Die Schmutzempfindlichkeit muß besonders beachtet werden.

a) Ringkolbenzähler

In einem durch zwei konzentrische Zylinder Z_a und Z_i begrenzten Meßraum befindet sich ein ringförmiger Kolben R, der durch eine Wand W und seine Achse A so geführt wird, daß er immer den inneren und äußeren Zylinder der Meßkammer berührt. Die Meßkammer zerfällt dadurch in zwei sichelförmige Räume V_1 und V_2 , von denen einer innerhalb und einer außerhalb des Ringkolbens liegt. Die Wand W teilt je nach Stellung des Ringkolbens diese Räume in zwei nicht miteinander in Verbindung stehende Teile. Zu beiden Seiten der Trennwand befindet sich entweder in ein und derselben oder in den gegenüberliegenden Stirnflächen der Meßkammer die Einlauf- und die Auslauföffnung (E und A).

Der Druckunterschied zwischen Einlauf und Auslauf verursacht ein Drehmoment und bewegt den Ringkolben in Pfeilrichtung. In der Stellung a sind Ein- und Auslauf mit dem Inneren des Ringkolbens verbunden. In dem über dem Einlauf stehenden Volumen herrscht ein größerer Druck als in dem mit dem Auslauf verbundenen Teil. Dieser Druck bewegt den Kolben in der angezeigten Richtung bis zur Stellung b. Nun ist der außerhalb des Kolbens liegende Teil der Meßkammer mit den beiden Öffnungen E und A verbunden. Wieder ist der Druck über E größer als über A, so daß der Kolben weiter in Pfeilrichtung bewegt wird. Bei einem vollen Umlauf wird zunächst V_1 und dann V_2 gefüllt und wieder ausgestoßen. Insgesamt wird also gerade einmal das ganze Volumen der Meßkammer (vermindert um das Volumen des Ringkolbens) bei einer Umdrehung bewegt. Hat man Teilmengen zu messen, die kleiner als eine Meßkammerfüllung sind, also keinen vollen Umlauf ausmachen, so ist zu berücksichtigen, daß das bewegte Volumen etwas von der Stellung des Ringkolbens abhängt. Die Abweichung vom linearen Verlauf ist aber kleiner als 5 %.

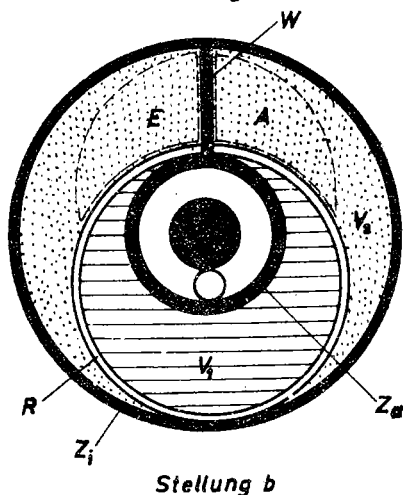
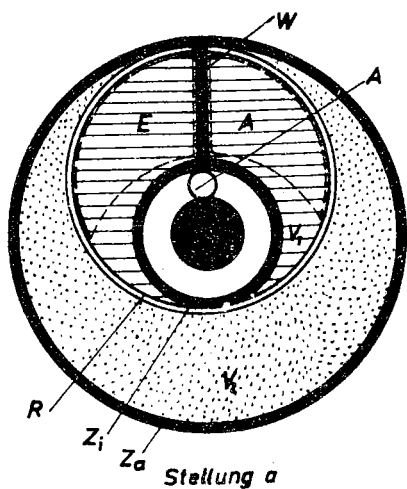


Bild 30

In die Achse des Ringkolbens ist meistens ein Magnet eingelassen, der einen außerhalb des Zählers befindlichen zweiten Magneten mitnimmt. Dieser steht mit dem Zählwerk in Verbindung. Man kennt aber neben der magnetischen Kupplung auch rein mechanische Übertragungen.

Der Ringkolbenzähler hat besonders als Hauswasserzähler weite Verbreitung gefunden. Als solcher soll er laut DIN 3260 bei 0,15% der Nennlast anlaufen und bei 0,4 % der Nennlast die untere Genauigkeitsgrenze von -5 % Fehler erreichen. Oberhalb 5% der Nennlast soll sein Fehler kleiner als 2 % sein. Diese Toleranzen werden über Jahre hinweg gehalten.

Bild 31 (s. Seite 57) zeigt die Fehlerkurve eines Ringkolbenzählers. Sie wird bei zählen Flüssigkeiten etwas nach oben verschoben.

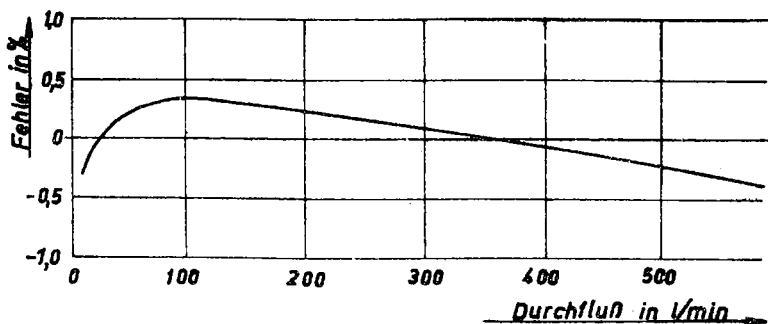


Bild 31

b) Ovalradzähler

In der Industrie haben besonders die Ovalradzähler weite Verbreitung gefunden. Das Meßprinzip ist denkbar einfach. In der Stellung 1 (Bild 32) tritt am Ovalrad a ein Drehmoment in Pfeilrichtung auf, weil auf die linke Zahnradhälfte ein größerer Druck als auf die rechte wirkt. Das Ovalrad stellt

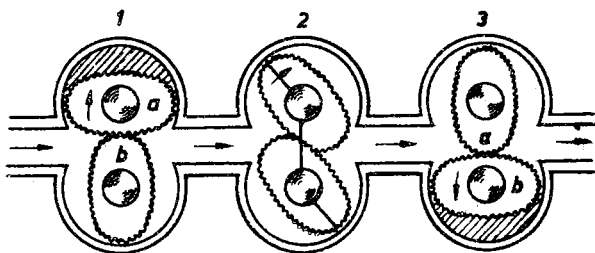


Bild 32

dadurch einen ungleich belasteten Hebel dar und dreht sich. In der Stellung 2 treten an beiden Ovalrädern Drehmomente in Pfeilrichtung auf. Man kann die Ovalräder als ungleicharmige Winkelhebel auffassen, wobei auf jeden Hebelarm senkrecht die gleiche Kraft wirkt. In der Stellung 3 tritt schließlich

nur am Ovalrad ein Drehmoment auf. Insgesamt ist das Drehmoment zwar nicht für jeden Winkel das gleiche, wird aber nie 0, so daß keine Totpunkte auftreten.

Mit jeder halben Umdrehung bewegt jedes Ovalrad einmal das schraffierte Volumen. Bei einer ganzen Umdrehung wird also 4 mal das schraffierte Volumen durch den Zähler bewegt. Da das Drehmoment von der Stellung der Ovalräder abhängt, ist deren Drehgeschwindigkeit nicht konstant, so daß ein pulsierender Durchfluß zustande kommt.

Die Genauigkeit der Ovalradzähler ist erstaunlich; sie liegt bei 0,2 bis 0,5 %. Allerdings kann diese Toleranz für schlechtschmierende Flüssigkeiten (z.B. Ammoniak oder Formalin) nur bei einem Meßumfang von 1:2 eingehalten werden, während für gut schmierende Flüssigkeiten (Öle z.B.) bei einem Meßumfang von 1:16 die Toleranz durchaus noch nicht überschritten wird. Die Zähigkeit der Meßflüssigkeit beeinflusst die Genauigkeit nur gering. Allerdings ist bei Zähigkeiten unter 10^{-2} Stoke mit einer erheblichen Zunahme der Meßfehler besonders am Anfang des Meßbereiches zu rechnen. Der Druckverlust ist nicht groß, hängt aber naturgemäß stark von der Zähigkeit des Meßgutes ab. Er steigt etwa quadratisch mit dem Durchfluß an und erreicht bei dünnflüssigen Medien selbst am Ende des Meßbereiches kaum 1 m WS.

Von der Achse eines Ovalrades wird entweder über Stopfbuchsendurchführung oder magnetische Kupplung die Drehung auf das Zählwerk übertragen.

Die Ovalradzähler sind sehr empfindlich gegen staubförmige und fasrige Verunreinigung. Daher sieht man im allgemeinen Filter und Umgehungsleitungen vor und baut die Zähler in gewissen regelmäßigen Zeitabständen zum Zwecke der Reinigung aus. Verschmutzte Zähler können klemmen und die Leitung blockieren.

c) Drehkolbengaszähler

Große Ähnlichkeit mit den Ovalradzählern haben die Drehkol-

bengaszähler (Bild 33). Die aus Metall gefertigten Drehkolben berühren einander nicht, sondern sind durch ein Zahnradgetriebe, das in Öl läuft und nur sehr wenig Spiel haben darf, miteinander gekoppelt. Es ist klar, daß zwischen den beiden

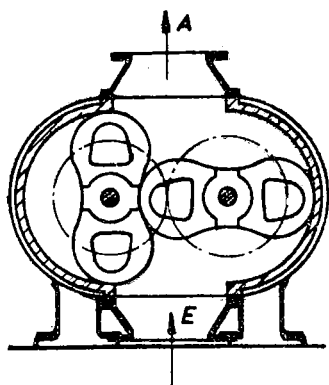


Bild 33

Kolben und zwischen Kolben und Wand nur äußerst schmale Spalte auftreten dürfen, damit der Schlupf nicht zu groß wird.

Bewegt werden die Kolben durch die Druckdifferenz zwischen Einlauf und Auslauf genau wie die Ovalräder. Auch hier tritt eine Pulsation des Durchflusses ein, die aber wesentlich stärker als bei den Ovalradzählern ist. Die Drehzahlen sind sehr hoch. Kleine Zähler laufen mit maximal 1500 U/Min, große Zähler mit maximal 150 U/Min.

Nun wird auch klar, daß bei diesen Touren die Kolben sich nicht berühren dürfen.

Der Druckverlust ist extrem niedrig. Er beträgt nur wenige mmWS und steigt nicht ganz linear mit dem Durchfluß an. Das ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den Normdrosseln. Dieses geringen Druckverlustes wegen kann man den Zähler in Stadtgasnetzen von nur 50 mmWS Überdruck durchaus noch einsetzen. Der Meßbereich beträgt 1:20 und mehr bei einer Genauigkeit von 2 %. Die Zähler werden in verschiedenen Größen für Nenndurchflüsse von 100 bis 25000 m³/h hergestellt und besonders in Ferngasleitungen eingebaut.

2.3 Membrangaszähler

Speziell für die Messung von Gasmengen sind Zähler entwickelt worden, deren Wirkungsweise sich nicht unter die bisher behandelten Prinzipie gruppieren läßt. Im wesentlichen sind das

Balgenmesser und die Trommelzähler mit Sperrflüssigkeit, die man auch nasse Gaszähler nennt.

Das Prinzip eines Membrangaszählers (auch als trockener Gaszähler bezeichnet) ist auf Bild 34 dargestellt. Auf einer starren Mittelwand ist auf jeder Seite ein Balg angebracht, der eine starre metallische Stirnfläche besitzt. Der Balg wird aus feinem Ziegenleder hergestellt. Er teilt jede der beiden unterhalb der waagerechten Trennwand liegenden Kammern in zwei Meßräume. Der eine Meßraum wird durch das innerhalb des Balges liegende Volumen dargestellt, der andere Meßraum liegt außerhalb des Balges. Die metallische Stirnfläche ist über ein Gestänge, welches entweder durch eine Stopfbüchse oder mittels Membrandurchführung durch die Meßkammerwand ragt, mit einer Kurbel verbunden. Beide Membrane wirken auf diese Weise auf eine gemeinsame Kurbelwelle, durch die auch die Steuerschieber bewegt werden. Diese verbinden in der gezeichneten Weise Einlauf und Auslauf jeweils mit einer Meßkammer.

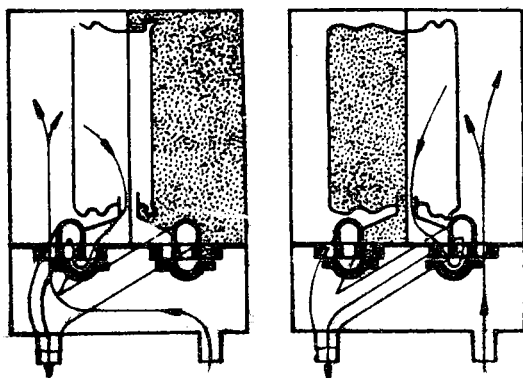


Bild 34

Der Zähler arbeitet bei einem Gasüberdruck von etwa 300 mmWS. Der Druckverlust ist sehr klein. Er beträgt bei Luft 10 mmWS und weniger. Die Genauigkeit ist bei einem Meßbereich von 1:100 über viele Jahre hinweg besser als 2 %. Die

Wartung des Zählers ist außerordentlich gering. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß sich keine Flüssigkeiten kondensieren können. Die handelsüblichen Meßbereiche überstreichen das Gebiet von 2 bis 600 m³/h Nennleistung. Die Umdrehungs-

zahlen der Welle liegen in der Größenordnung 30 bis 40 U/min. Der Haupteinsatz ist die Gaszählung im Haushalt. Hierfür sind die Meßeigenschaften und Prüfmethoden nach DIN 3375 vorgeschrieben.

2.4 Nasse Gaszähler

Die nassen Gaszähler haben eine Ähnlichkeit mit den Trommelzählern. Das Gas tritt durch ein Rohr, welches die Welle des Zählers umgibt, in das Meßgerät ein und füllt nacheinander die durch eine mehrteilige Trommel gebildeten Volumina. Voneinander getrennt werden die einzelnen Meßkammern durch eine Sperrflüssigkeit, meist Wasser. Das Drehmoment wird wieder durch den Überdruck der mit dem Einlauf verbundenen Meßkammer gegenüber der mit dem Auslauf verbundenen verursacht. Die Drehzahlen sind sehr klein. Daher besitzen die Meßkammern

bei großem Nenndurchfluß eine erhebliche Größe. Die Zähler arbeiten praktisch ohne Schlupf und erreichen deshalb eine beachtliche Genauigkeit, die in der Größenordnung 0,1 bis 0,2 % liegt. Eine genaue Messung setzt allerdings voraus, daß der Flüssigkeitsstand die vorgeschriebene Höhe hat. Der Flüssigkeitsstand ist an einem Schauglas ablesbar und kann durch Nachfüllen korrigiert werden. Es ist klar, daß der Zähler genau waagerecht stehen muß.

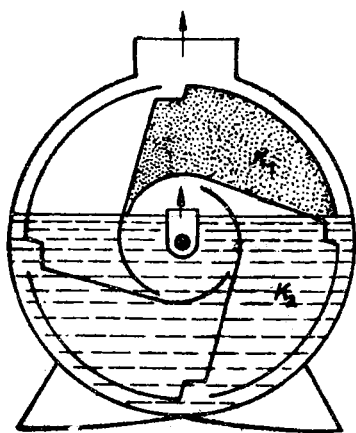


Bild 35

2.5 Zusammenfassung

Bei den Verdrängungszählern erfolgt die Bewegung der Meßkammerwände durch den Druck, der die Flüssigkeit in einer geschlossenen Rohrleitung bewegt. Sowohl bei den Hubkolben- als

auch bei den Drehkolbenzählern gleiten bewegte Teile der Meßkammern auf feststehenden, wodurch ein Schlupf entsteht, der bewirkt, daß der Berichtigungsfaktor vom Durchfluß abhängt und sich bei großem Durchfluß dem Wert 1 und bei kleinem Durchfluß dem Wert auf einer Hyperbel nähert. Wegen der gegenseitigen Bewegung sind diese Zähler sehr schmutzempfindlich.

Im einzelnen kennt man folgende Verdrängungszähler:

1. Hubkolbenzähler mit einem oder mehreren Kolben. Bei den Einkolbenzählern wird durch eine Vierwegehahnsteuerung die Flüssigkeit nacheinander auf beiden Seiten des Kolbens in den Zylinder geleitet und die Bewegung des Kolbens über eine Zahnstange auf ein nur in eine Richtung drehbares Zahnrad übertragen, das mit dem Zählwerk in Verbindung steht. Bei den Mehrkolbenzählern wird durch die Steuerung die Flüssigkeit nacheinander in die verschiedenen Zylinder geleitet, die in der ersten Arbeitsphase gefüllt und in der zweiten entleert werden. Dadurch befindet sich die Flüssigkeit immer auf ein und derselben Seite des Kolbens. Die Mehrkolbenzähler unterscheiden sich durch die Art der Steuerung. Für die Messung von Gasen verwendet man Zähler mit flüssigem Kolben.

2. Drehkolbenzähler. Die Rotationsbewegung des Drehkolbens wird durch das vom Strömungsdruck erzeugte Drehmoment verursacht. Bei jeder Umdrehung wird ein ganz bestimmtes Volumen durch den Zähler geschleust. Die wichtigsten Vertreter sind der Ringkolbenzähler, bei dem durch die Bewegung eines exzentrisch zwischen zwei Zylindern gelegenen ringförmigen Kolbens mit jeder Umdrehung einmal das zwischen den beiden Zylinderwänden befindliche Volumen bewegt wird, und die Ovalradzähler. Für die Gasmessung verwendet man den Ovalradzählern ähnliche Drehkolbengaszähler, bei denen aber der Gleichlauf der beiden Kolben nicht durch das Ineinandergreifen der Kolben selbst, sondern durch ein Getriebe erfolgt.

Die dritte Gruppe der Verdrängungszähler sind die Membran-zähler, die für die Gasmessung verwendet werden und einen sehr kleinen Druckverlust verursachen. Für die Gasmessung werden schließlich auch die den Trommelzählern ähnlichen "nassen Gaszähler" verwendet, bei denen die Meßkammern durch eine Sperrflüssigkeit voneinander getrennt sind.

3. Turbinenzähler

Die Turbinenzähler besitzen keine ordentlichen Meßkammern mehr und nehmen daher eine Zwischenstellung zwischen den reinen Volumenzählern, die wohldefinierte Meßvolumina besitzen, und den dynamischen Verfahren der Durchflußmeßtechnik ein. Da sie aber durchweg als Zähler (nämlich mit einem Zählwerk als Anzeigeglied) ausgebildet werden, kann man sie mit gutem Gewissen zu den Volumenzählern rechnen.

3.1 Anemometer

Das Anemometer wird zwar selten in eine Rohrleitung zum Zwecke der fortlaufenden Volumenmessung eingebaut, es stellt aber die Urform aller Turbinenzähler dar und soll daher an erster Stelle behandelt werden.

An einer parallel zur Strömungsrichtung liegenden Achse sind Schaufeln befestigt, die schräg zur Strömung stehen. Der Winkel zwischen der Schaufelebene und der Achse sei α . Nehmen wir an, die Achse sei reibungsfrei gelagert, so wird die Strömung durch die Flügel nicht gestört. Das Medium, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, schiebt den Flügel zur Seite und strömt ungehindert weiter. Es verschiebt den Flügel um die Strecke:

$$s = \sin \alpha \cdot b,$$

wobei b die Breite des Flügels ist. Das Medium bewegt sich dabei um die Strecke

$$S = b \cdot \cos \alpha = s \cdot \cot \alpha$$

In der letzten Schreibweise können wir auch einen größeren Zeitabschnitt betrachten, in dem ein Flügel mehrmals zur Seite geschoben wird. Die Gesamtverschiebung des Flügels

ist s , die vom strömenden Medium zurückgelegte Strecke ist S und die Umdrehungen der Achse U . Bewegt sich bei einer Umdrehung der Achse das Medium um die Strecke H , so gilt nach dem obigen folgende Beziehung:

$$S = s \cdot \operatorname{tg} \alpha = N \cdot H$$

Dabei sind aber sämtliche Reibungskräfte vernachlässigt worden. In Wirklichkeit tritt in den Lagern und im Zählwerk mechanische und an den Flügeln Zähigkeitsreibung auf. Dadurch bleiben die Flügel hinter der eben berechneten Strecke zurück. Da die Reibung proportional der Geschwindigkeit ist, ist auch das Zurückbleiben proportional der Geschwindigkeit. Man kann diesen Sachverhalt durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$v = n \cdot H + a = n \cdot 2 \pi r \cdot \operatorname{tg} \alpha + a$$

In dieser Gleichung bedeutet n die Zahl der Umdrehungen in der Zeiteinheit, r den Radius der Bahn des Flügels und a den vom Anemometer ungemessen hindurchgelassenen Geschwindigkeitsbetrag, den sogenannten Schlupf.

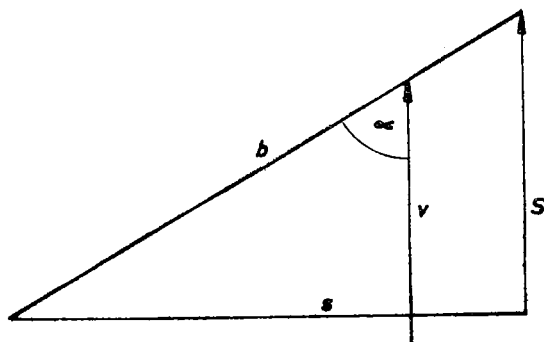


Bild 36

Nach obiger Gleichung ist die Eichkurve eines Anemometers eine gerade Linie, was mit der Praxis sehr gut übereinstimmt. Zum Anlaufen des Anemometers ist eine gewisse Anlaufgeschwindigkeit erforderlich, die größer ist als der im Lauf unge-

messen hindurchgehende Geschwindigkeitsbetrag. Dadurch weicht die Eichkurve am Anfang stark von der Geraden ab und zeigt auch eine Hysterese, das heißt, die Eichkurve bei steigender Geschwindigkeit unterscheidet sich von der bei fallender Geschwindigkeit. Bei steigender Geschwindigkeit ist am Anfang die Abweichung von der Geraden größer als bei fallender Geschwindigkeit. In diesem Bereich ist eine Messung nicht sinnvoll.

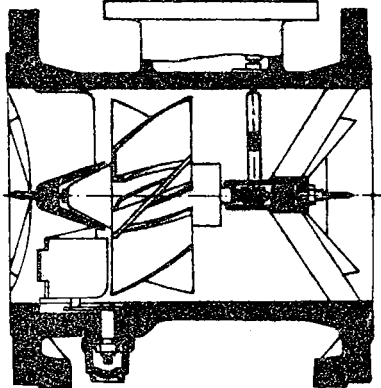
Das Anemometer wird weniger zur Mengenzählung als vielmehr zur Ausmessung von Geschwindigkeitsprofilen weiter Gas- oder Flüssigkeitsströmungen verwendet. Bei ruhiger Strömung ist mit gut gepflegten Geräten eine Genauigkeit besser als 1 % zu erreichen.

3.2 Woltmannzähler

Der Woltmannzähler ähnelt dem Anemometer nur sehr wenig, beruht aber auf dem gleichen Prinzip. Die Achse des Flügelrades ist als dicker stromlinienförmiger Körper ausgebildet, der die ebenen, schräg zur Strömungsrichtung angesetzten Flügel trägt. Die Flügel ragen nicht ganz bis zur Rohrwand. Durch die dicke Achse wird das Strömungsprofil stark verändert und der Querschnitt verkleinert. Dadurch wird zwar der Meßeffect (die Strömungsgeschwindigkeit am Flügel) vergrößert, aber durch die Veränderung der ursprünglichen Strömungsform wird der Meßwert von Störungen der Einlaufströmung abhängig. Man verwendet daher im Einlauf häufig sogenannte Strömungsgleichrichter, die insbesondere durch Krümmer hervorgerufene Rotationen einigermaßen beseitigen. Trotzdem ist hinter einem Krümmer eine störungsfreie Einlaufstrecke von 10 D und hinter Schiebern eine solche von 5 D erforderlich. Diese Forderung zeigt wieder die enge Verwandtschaft zu den Durchflußmeßgeräten.

Die Eichkurve ist keine Gerade mehr (Bild 38). Besonders im unteren Teil des Meßbereiches sind die Abweichungen recht groß. In diesem Gebiet ist auch die Genauigkeit gering.

Der Fehler kann bis zu 10 % betragen. In dem brauchbaren Meßbereich von 1:10 wird aber eine Genauigkeit von 2 % erreicht.



Die Woltmannzähler werden zur Flüssigkeitsmessung, hauptsächlich für Wasser, eingesetzt. Der Druckverlust ist sehr gering. Er beträgt bei maximaler Belastung nur 150 bis 200 mmWS. Die Empfindlichkeit gegen Schmutzteilchen ist gering.

Bild 37

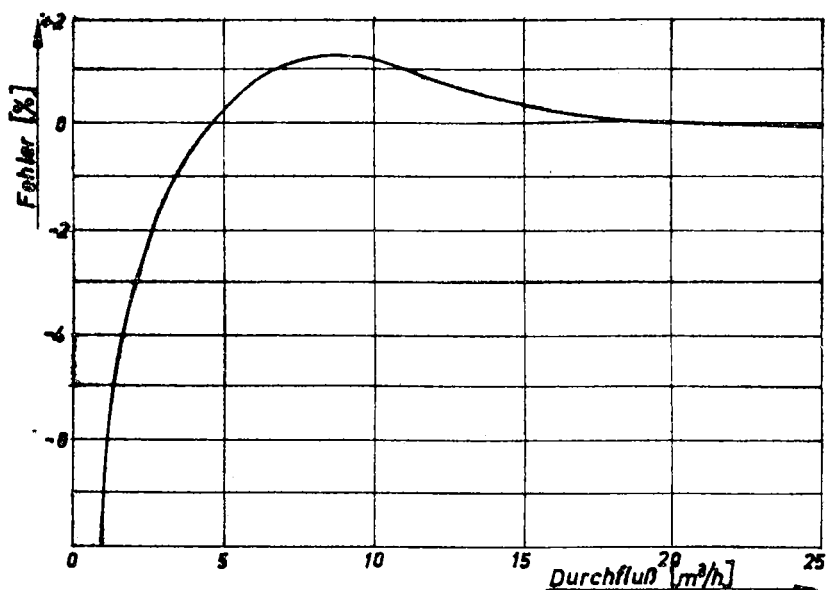


Bild 38

3.3 Schraubenradzähler

Größere Ähnlichkeit mit dem Anemometer hat der Schraubenradzähler, der für die Gasmessung verwendet wird. Der Strömungsquerschnitt wird ebenfalls durch einen stromlinienförmigen

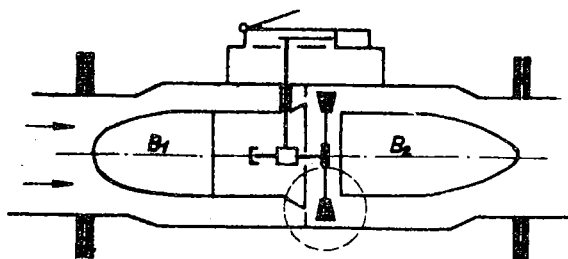


Bild 39

Einbau verkleinert, damit in dem Ring, in dem die Meßflügel laufen, eine große Strömungsgeschwindigkeit herrscht. Der stromlinienförmige Einbau besteht aus zwei getrennten Teilen, zwischen denen das Flügelrad läuft. Die Genauigkeit liegt in der Größenordnung 2 %. Das Gerät ist für die Ferngasmessung eichbehördlich zugelassen.

3.4 Flügelradzähler

Das Prinzip des Flügelradzählers unterscheidet sich wesentlich von den eben geschilderten Geräten. Er wird aber trotzdem allgemein zu den Turbinenzählern gerechnet. Durch ein

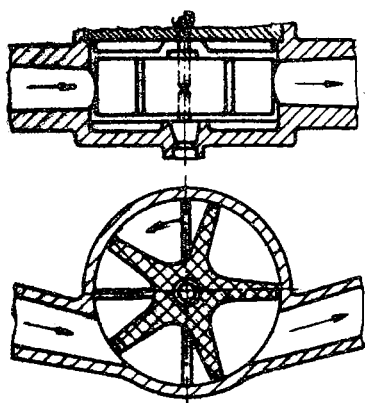


Bild 40

Flügelrad wird ein zylindrischer Raum in eine Reihe von Meßkammern geteilt, die durch den Flüssigkeitsstrom bewegt werden. Man kann die Flügel als Stauscheiben auffassen und versteht dann sofort die Einordnung des Gerätes unter die Turbinenzähler.

Da zwischen Flügel und Wand ein recht breiter Spalt besteht, hängt die Eichkurve stark von der Belastung ab.

Im unteren Bereich ist auch die Genauigkeit sehr schlecht,

die im Gebiet des Nenndurchflusses etwa 2 % beträgt. Der Zähler ist gegen eine zwei- bis dreifache Überlastung kaum empfindlich und eignet sich daher sehr gut als Hauswasserzähler.

3.5 Zusammenfassung

Eine Zwischenstellung zwischen Volumenzählung und Durchflußmeßtechnik nehmen die Turbinenzähler ein, die keine Meßkammern, sondern schräg oder senkrecht angeströmte Flügel besitzen. Die Rotation der Meßflügel wird durch das bewegte

Medium erzeugt, in dem es die störende Fläche zur Seite schiebt. Das Anemometer ist der Urtyp der Turbinenzähler. Besondere Verbreitung haben der Woltmannzähler und der Schraubenzähler gefunden. Der ebenfalls weit verbreitete Flügelradzähler besitzt stauscheibenartige Flügel, die einen zylindrischen Raum in eine Reihe von Meßkammern einteilen und durch den Flüssigkeitsstrom bewegt werden.

4. Kontrollfragen

- 4.1 Worin unterscheiden sich prinzipiell die drei großen Gruppen von Volumenzählern?
- 4.2 Wo würde man feststehende Meßbehälter den anderen Auslaufzählern vorziehen?
- 4.3 Welche Vor- und Nachteile hat der Kippzähler gegenüber dem Trommelzähler?
- 4.4 Nennen Sie die genauesten Volumenzähler! Welche Nachteile haben sie?
- 4.5 Warum kann man eine Zahnradpumpe nicht als Volumenzähler verwenden, aber einen Ovalradzähler als Pumpe?
- 4.6 Nennen Sie die wichtigsten Gasvolumenzähler! Wie arbeiten sie?
- 4.7 Auf welchem Prinzip beruhen die Turbinenzähler?

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ag 616/ 40 /62

Best.-Nr. 1004-06/62

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

KUNZMANN

BETRIEBS- MESSTECHNIK

7

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1004-07/62

Herausgeber:
Ingenieurschule für Feinwerktechnik
Jena

Betriebsmeßtechnik

Lehrbrief 7

von

Dipl. - Phys. Kunzmann

1. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 1,50

Ag 616/ 271 /62

Best.-Nr. 1004-07/62

III, 9/278

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Aufgabe der Füllstandsmessung	1
1. Meßplatte und Schauglas	2
2. Standmessung mittels Schwimmer	3
2.1 Übertragung mit Widerstandsfernsender	4
2.2 Induktive Fernübertragung	6
2.3 Stellungsanzeige durch magnetische Kupplung	17
2.4 Zusammenfassung	18
3. Hydrostatische Füllstandsmessungen	19
3.1 Standmessung mit Plattenfedermanometer	22
3.2 Standmessung mit der Ringwaage	22
3.3 Standmessung mit speziellen Differenzdruckmessern	24
3.4 Zusammenfassung	26
4. Pneumatische Füllstandsmessung	27
5. Elektrische Füllstandsmessung	30
5.1 Kapazitive Füllstandsmessung	30
5.2 Ohmsche Füllstandsmessung	32
5.3 Zusammenfassung	34
6. Radioaktive Füllstandsmessung	35
6.1 Einige Begriffe der Radioaktivität	35
6.2 Durchstrahlungsmethode	37
6.3 Nachlaufmethode	39
6.4 Strahlenschäden und Strahlenschutz	41
6.5 Zusammenfassung	44
Kontrollfragen	44

Füllstandsmessung

Während in der Durchflußmeßtechnik und mit den Volumenzählern fortlaufend strömende Gase und Flüssigkeiten gemessen werden und die Mengenmessung mit Waagen ebenfalls eine Bewegung des Meßgutes zum Meßgerät erfordert, befaßt sich die Füllstandsmessung mit der Bestimmung des Inhaltes feststehender Lager- und Vorratsbehälter. Damit ist die Füllstandsmessung ein besonderes Kapitel der Volumenmessung, und es ist im allgemeinen erwünscht, die Beziehung zwischen Volumeninhalt und Füllstand zu kennen. Diese Beziehung wird im Falle einfach geformter Meßbehälter, wie Zylinder, Kegel, Kugel oder ähnliche einfache geometrische Körper durch Rechnung ermittelt. Bei unübersichtlich geformten Meßbehältern gewinnt man die Beziehung zwischen Füllstand und Inhalt durch "Auslitern". Man füllt den Behälter im allgemeinen mit Wasser, dessen Volumen durch einen Volumenzähler gemessen wurde.

Eine besondere Rolle spielt die Füllstandsmessung bei der Mengendosierung aus Vorratsbehältern. Das Niveaumeßgerät ist dabei häufig mit einer Steuerautomatik gekoppelt, so daß der Dosiervorgang nach einem Zeitplan oder nach anderen Befehlen automatisch abläuft.

Ein weiterer wichtiger Einsatz liegt bei Kesseln vor, in denen eine Flüssigkeit verdampft wird. Hier kommt es darauf an, daß der Füllstand einen gewissen Mindestwert nicht unterschreitet und einen gewissen Maximalwert nicht überschreitet. Der Füllstandsmesser ist daher häufig der Geber für einen automatischen Niveauregler.

Das zu verwendende Verfahren muß nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewählt werden. Zunächst ist zu beachten, ob der Behälter unter Über- oder Unterdruck steht. Ferner spielen die physikalischen Eigenschaften des Meßmediums, wie Dichte, Zähigkeit und andere eine Rolle. Schließlich ist zu beachten, inwieweit das Meßmedium durch Temperaturschwankungen oder

andere Einflüsse eine Veränderung seiner physikalischen Eigenschaften erleidet, da besonders bei Temperaturschwankungen häufig eine Kompensation des Störeinflusses erforderlich ist.

1. Meßlatte und Schauglas

Die einfachste Füllstandsmessung geschieht mit einem Stab, auf dem eine Ableseskala angebracht ist. Man senkt den Stab bis auf den Grund des Behälters und kann entweder gleich den Füllstand ablesen oder sieht an der Benetzung nach dem Herausnehmen, wie hoch die Flüssigkeit gestanden hat. Man nennt diese Art der Messung "das Abstechen mit der Meßlatte". Es ist nur in offenen Behältern möglich und wird im allgemeinen nur zur stichprobenmäßigen Kontrolle eines selbsttätig arbeitenden Meßgerätes durchgeführt.

In abgeschlossenen Druckbehältern ist diese einfache Niveaumessung mit der Meßlatte nicht mehr möglich. Hier verbindet man mit dem Behälter ein durchsichtiges Standrohr, in dem nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren die Flüssigkeit genau so hoch steht, wie im Behälter selbst. Hinter dem Standglas ist eine Skala angebracht, die die Ablesung des Füllstandes gestattet. Diese einfache Messung wird ebenfalls für Kontrollzwecke verwendet. Sie ist aber nur dann exakt, wenn die Flüssigkeit im Standglas die gleiche Temperatur hat, wie die im Behälter. Ist beispielsweise die Flüssigkeit im Standglas kälter, so ist ihre Dichte größer, und die Flüssigkeitssäule im Standglas ist bei gleichem Druck kleiner als die im Behälter. Man liest also einen zu geringen Füllstand ab. Dieser Fehler wird vermieden, wenn unmittelbar in die Behälterwand ein durchsichtiges Material eingesetzt wird, durch das man die Flüssigkeit direkt sieht. Man spricht in diesem Falle vom Schauglas.

Bei zähen, undurchsichtigen Medien, die in weiten Behältern aufbewahrt werden, ist eine Niveaubestimmung mit Schau- oder

Standglas sehr unsicher, weil die Flüssigkeit an der Wand haftet, auch wenn das Niveau schon viel tiefer liegt. In solchen Fällen kann man andere Meßgeräte entweder mit der Meßplatte überprüfen oder muß sich auf das selbsttätige Meßgerät verlassen.

2. Standmessung mittels Schwimmer

Die verbreitetste Methode der Füllstandsmessung ist die mittels Schwimmer. Ein spezifisch leichter Schwimmer schwimmt auf der Flüssigkeit und ist über Gestänge, Seiltriebe oder Ketten mit einem Anzeigegerät verbunden. Der besondere Vorteil der Schwimmethode liegt darin, daß man recht große Verstellkräfte zur Verfügung hat. Steigt die Flüssigkeit um die Strecke h und ist der Querschnitt des Schwimmers in der Höhe des Flüssigkeitsspiegels q , so wird er von einer Flüssigkeit der Dichte ρ mit der Kraft $A = g \cdot \rho \cdot hq$ gehoben. Man kann also leicht ausrechnen, wie groß die Verstellkraft ist, wenn die Anzeige eine Genauigkeit von $\pm 1\text{cm}$ erreichen soll. Bei Wasser und einem kreisrunden Schwimmer von 20cm Durchmesser macht das 314 Pond aus. Die große Verstellkraft ermöglicht es, das Schwimmergestänge durch eine Stopfbüchse aus dem Behälter herauszuführen. Dabei muß allerdings der Überdruck im Behälter konstant sein oder bei der Messung berücksichtigt werden. Denn der Druckunterschied erzeugt am Gestänge ebenfalls eine Kraft, die die Messung störend beeinflusst. Man kann allerdings durch einen kleinen Querschnitt der Stopfbüchsendurchführung diesen Einfluß sehr gering halten.

Die einzelnen Verfahren der Schwimmerstandmessung unterscheiden sich in der Art der Meßwertanzeige oder Registrierung. Das einfachste Verfahren besteht darin, mit dem Schwimmergestänge einen Zeiger zu koppeln. Dieses Verfahren gestattet auch eine Registrierung des Meßwertes. Es wird dort angewendet, wo eine Fernübertragung nicht erforderlich ist. Wichtiger und daher auch weiter verbreitet sind die Methoden der

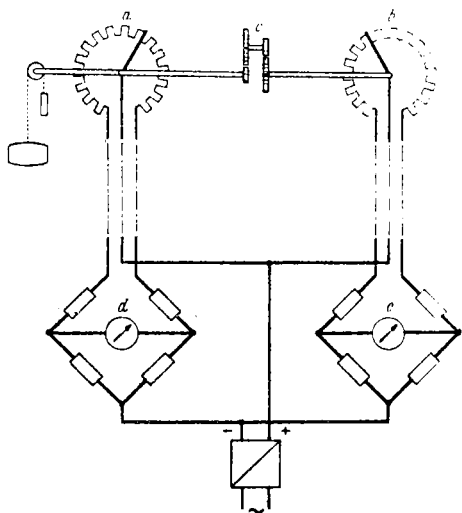
elektrischen Fernübertragung.

2.1 Übertragung mit Widerstandsfernsender

Überall dort, wo die Schwimmerstellung über ein Gestänge oder einen Ketten- bzw. Seiltrieb aus dem Behälter herausgeführt werden kann, ist die Fernübertragung des Meßwertes mit einem Potentiometer die eleganteste Methode. Die Übertragungselemente übertragen die Stellung des Schwimmers auf die Drehung eines Potentiometers. Das Potentiometer ist mit dem unter Umständen recht weit entfernten Meßgerät verbunden. Dieses hat den Widerstand zu messen und anzuzeigen. Hierfür kennt man prinzipiell zwei Verfahren: 1. die Wheatstonesche Brücke mit einem Drehspulinstrument zur Anzeige und 2. die Messung mittels Kreuzspulinstrument.

Messung mit Drehspulinstrument

Das Fernsenderpotentiometer bildet mit zwei weiteren Wider-



ständen eine Wheatstonesche Brücke. Die Querspannung wird mit einem Drehspulinstrument gemessen. Gespeist wird die Brücke aus einem Netzgerät, das eine niedrige Gleichspannung in der Größenordnung von 2 bis 12 V abgibt. Da die Spannungsschwankungen als Fehler in den Meßwert eingehen, muß das Netzgerät entweder hinter einem Spannungs-

Bild 1 Fernsender mit Feineinstellung

konstanthalter liegen oder selbst eine Stabilisierung enthalten. Das ist in gewisser Hinsicht ein Nachteil.

Messung mit Kreuzspulinstrument

Der Nachteil der Spannungsabhängigkeit verschwindet bei der Widerstandsmessung mit dem Kreuzspulinstrument, da dieses das Verhältnis der beiden durch die Spulen fließenden Ströme

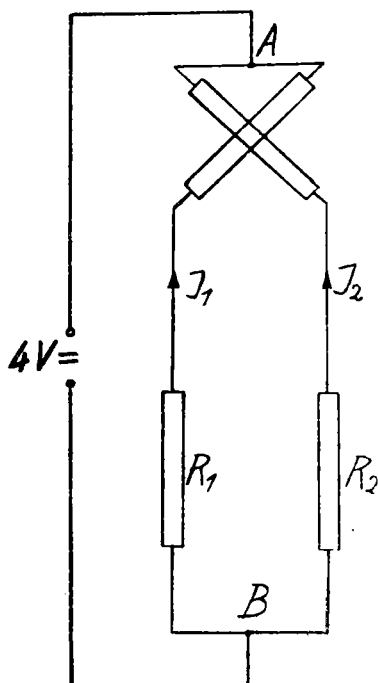


Bild 2

Fernsender mit Kreuzspulinstrument

mißt. Das Fernsenderpotentiometer wird so in den Stromkreis eingeschaltet wie die Widerstandsthermometer bei der Temperaturmessung. Im Strompfad der einen Spule liegt als Widerstand R_1 das Potentiometer, und im Strompfad der anderen Spule liegt der Vergleichswiderstand R_2 . Gespeist wird diese Stromverzweigung in den Punkten A und B aus einem Netzgerät, das eine Gleichspannung von 4 V abgibt. Die Stabilität dieser Spannung muß nicht mehr gefordert werden, da das Verhältnis der Ströme $I_1:I_2$ genau gleich dem Verhältnis der Widerstände $R_2:R_1$ ist. Die Spannung spielt dabei gar keine Rolle. Das ist ein

großer Vorteil gegenüber der Messung mit einem Drehspulinstrument. Es muß allerdings bemerkt werden, daß ein Kreuzspulmeßgerät teurer als ein Drehspulinstrument ist.

2.2 Induktive Fernübertragung

Die induktiven Verfahren der Fernübertragung gliedern sich in zwei Gruppen. Die eine Gruppe verwendet induktive Stellungsgeber, sog. Drehmelder, die zweite Gruppe beruht darauf, daß die Induktivität einer Spule in dem Maße zunimmt, in dem ein Eisenkern in sie hineinragt. Für die erste Gruppe ist es wie bei den Widerstandsfernsendern erforderlich, daß die Stellung des Schwimmers aus dem Behälter herausgeführt und auf die Drehung einer Welle übertragen wird. Diese Forderung muß bei der zweiten Gruppe nicht mehr gestellt werden. Darin liegt der besondere Vorteil, der den Nachteil der teilweise recht erheblichen Größe des Meßorgans wieder aufhebt. Diese Verfahren kommen daher überall dort zur Anwendung, wo der Behälter geschlossen sein muß und eine Durchführung nur schwer möglich ist. Wir können dabei hauptsächlich an Hochdruck- oder Hochvakuumbehälter denken.

Drehmelder

Geber und Empfänger sind gleich aufgebaut und bestehen aus einem drehbaren Anker, der zwei über Kreuz liegende Wicklungen trägt und sich in einem elektromagnetischen Wechselfeld bewegt. Durch das Wechselfeld werden in den Spulen Spannungen induziert, deren Größe von der Feldstärke und der Stellung der Spule abhängt. Befinden sich zwei Spulen in der gleichen Stellung, so sind die induzierten Spannungen gleich. Betrachten wir nun einmal die Schaltung der Drehmelder auf Bild 3. Das Wechselfeld wird durch die Feldspulen f erzeugt. Die Feldspulen des Empfängers und des Gebers sind parallel geschaltet, so daß die Felder völlig gleich sind. Die beiden Kreuzspulen des Gebers sind denen des Empfängers entgegenschaltet. Befindet sich der Geber in der gleichen Stellung

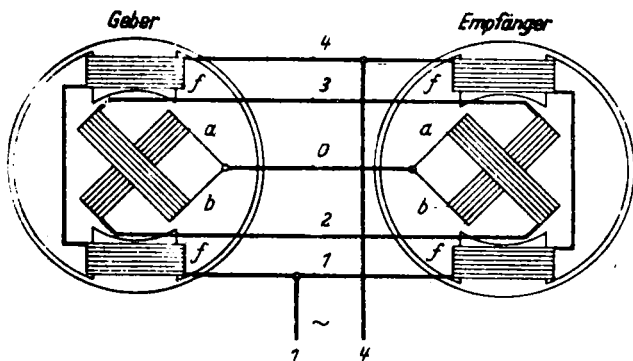


Bild 3
Drehmelder

wie der Empfänger, so sind jeweils gleiche Spannungen entgegengeschaltet, so daß durch die Leitung 0, 2, 3 kein Strom fließt. Unterscheidet sich aber die Stellung des Gebers von der des Empfängers, so sind die einander entgegengeschalteten Spannungen nicht gleich und es fließt durch die genannte Leitung ein Strom, der im Empfänger ein Drehmoment erzeugt. Dieses verstellt den frei drehbaren Empfängeranker so lange, bis er sich in derselben Stellung wie der Geberanker befindet. Der Geberanker wird durch die Verbindung mit dem Schwimmer entsprechend dem Füllstand verstellt. Der Empfänger bewegt einen Zeiger, der auch die Registrierung übernehmen kann.

Dieses Verfahren kann als eine selbsttätige Kompensation angesehen werden. Da immer auf gleiche Stellung abgeglichen wird, spielen Schwankungen der Erregerspannung keine Rolle. Wie bei der Fernübertragung mit Potentiometer können auch hier mehrere Geber durch einen Schwimmer betätigt werden. Das ist immer dann vorteilhaft, wenn der Meßwert für verschiedene Aufgaben verwendet wird, z.B. Regeln, Schreiben und Grenzkontakt.

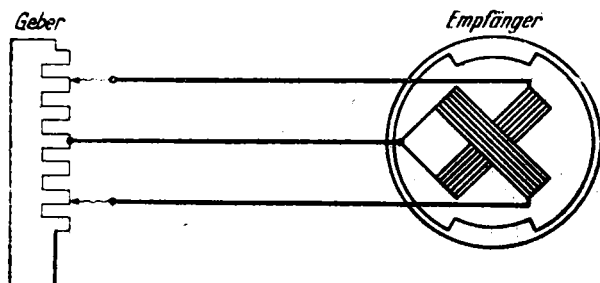


Bild 4
Fernsender und Drehmelder

Man kann auch eine Fernübertragung mit nur einem Drehmelder als Empfänger und einem Potentiometer als Geber aufbauen. Damit auch hier die Anzeige von Spannungsschwankungen unabhängig wird, werden Geberpotentiometer und Erregerspulen entweder in Reihe oder parallel geschaltet, so daß jede Spannungsschwankung in beiden gleich ist. Das Geberpotentiometer muß insbesondere auch deshalb mit Wechselstrom gespeist werden, weil in den Kreuzspulen des Drehmelders auch eine Wechselspannung erzeugt wird. Der Drehmelder stellt sich immer so ein, daß das Verhältnis der in den beiden Kreuzspulen erzeugten Spannungen gleich dem Verhältnis der an den beiden Teilwiderständen des Potentiometers abfallenden Spannungen ist. Die an den Teilwiderständen des Potentiometers abfallenden Spannungen verhalten sich aber genau so wie die Teilwiderstände selbst.

Induktionsspule mit Eisenkern

Die nun zu behandelnden Verfahren werden vor allem dort angewandt, wo eine mechanische Übertragung des Schwimmerstandes durch die Behälterwand nicht möglich ist oder große Schwierigkeiten bereitet. Die Stellung des Schwimmers wird jetzt induktiv abgetastet. Dabei kann man grundsätzlich so

vorgehen, daß der Schwimmer selbst den Eisenkern enthält und in der Spule, die sich außerhalb des Behälters befindet, bewegt. Da man die Induktionsspule nicht um den ganzen Behälter wickeln kann, muß sich der Schwimmer in einem mit dem Behälter verbundenen Rohr befinden, in dem die Flüssigkeit genau so hoch steht wie im Behälter. Auch hier ist zu beachten, daß die Temperatur des Meßmediums im Steigrohr die gleiche wie im Hauptgefäß ist, da sonst Fehlanzeigen entstehen. Man kann diese Schwierigkeit vermeiden, wenn man den Eisenkern nicht direkt in den Schwimmer baut, sondern ihn über eine Stange mit dem Schwimmer verbindet, so daß er in ein oberhalb oder unterhalb an den Behälter angesetztes Rohr, das die Spule trägt, hineinragt. In diesem Falle ist eine Führung des Schwimmers erforderlich, damit nicht durch seitliche Verschiebungen der Eisenkern im Spulenansatz verklemmt. Man kann schließlich die Schwimmerstellung auch durch einen Seiltrieb über eine Seilrolle auf den Eisenkern übertragen, der sich in einem seitlich neben dem Behälter angebrachten, mit dem Behälterinnenraum verbundenen Rohr befindet.

In den geschilderten Fällen führt der Eisenkern den gleichen Hub wie der Füllstand aus. Das kann in besonderen Fällen eine beachtliche Strecke sein. Um den Hub des Eisenkernes zu verringern, schaltet man zwischen Schwimmer und Eisenkern gelegentlich ein Getriebe. Dieses muß sich aber in dem Behälter befinden, dessen Inhalt keine Zerstörung durch Korrosion verursachen darf. Damit ist diese Möglichkeit sehr begrenzt anwendbar. Ein zweites Verfahren der Hubbegrenzung besteht darin, daß der Schwimmerhub kleiner gemacht wird als den Schwankungen des Füllstandes entspricht. Der Schwimmer kann nicht mehr frei mit dem Flüssigkeitsspiegel steigen, sondern steigt gegen eine Feder. Die Kraft, die zum Zusammendrücken der Feder erforderlich ist, muß durch den Auftrieb geliefert werden, das heißt, der Auftrieb muß um diesen Anteil zunehmen. Das geht aber nur, wenn der Schwimmer weiter eintaucht. Auf diese Weise kann man es erreichen,

daß der Schwimmerhub beispielsweise nur halb so groß ist wie die Schwankung des Füllstandes. Jetzt kann der Eisenkern wieder starr mit dem Schwimmer verbunden werden, weil die Hübe ein erträgliches Maß angenommen haben. Zu beachten ist allerdings, daß durch Änderungen der Dichte des Meßgutes der Auftrieb und damit bei gleichem Füllstand auch die Eintauchtiefe des Schwimmers geändert wird. Eine Dichteänderung führt also zu Meßfehlern.

Durch Einbauten im Behälter haben wir also erreicht, daß sich in einem Rohr aus nicht magnetischem Material (z.B. V4A-Stahl) ein Eisenkern entsprechend dem Füllstand bewegt. Nun besteht die Aufgabe darin, die Stellung dieses Kerns induktiv abzutasten und einem Anzeige- oder Schreibgerät zuzuführen. Der Lösung dieser Aufgabe bieten sich verschiedene Wege an. Einmal kann man auf eine stetige Anzeige verzichten und eine ganze Anzahl von Spulen um das Rohr wickeln, die jedesmal signalisieren, wenn sich der Kern in ihnen befindet. Zum anderen kann man eine stetige Anzeige fordern und eine einzige Spule um das Rohr legen, deren Induktivität die Stellung des Eisenkernes angibt. Wir wollen uns im folgenden mit den Schaltungen dieser verschiedenen Möglichkeiten befassen.

Die unstetige Anzeige ist bei sehr großen Hübten die brauchbarste Art der Meßwerterfassung. Um das Rohr sind eine Anzahl von Spulen gelegt, die durch Distanzstücke einen bestimmten Abstand voneinander haben. Parallel zu jeder Spule liegt ein Kondensator, so daß ein Schwingkreis entsteht, der bei Netzfrequenz in Resonanz ist, wenn der Kern in die Spule eintaucht. Die im Resonanzfall an der Spule auftretende Spannungserhöhung bringt eine Glühlampe zum Aufleuchten, die das Ergebnis anzeigt. Um eine genügend genaue Messung zu erhalten, sind viele Anzeigestufen, also viele Spulen nötig. Das Verfahren ist besonders dort vorteilhaft einsetzbar, wo nur zwei Meßwerte interessieren, nämlich der obere und der untere Grenzwert.

Für kleine Hübe des Eisenkerns von der Größenordnung 10 bis

50 cm sind die folgenden kontinuierlichen Übertragungssysteme entwickelt worden.

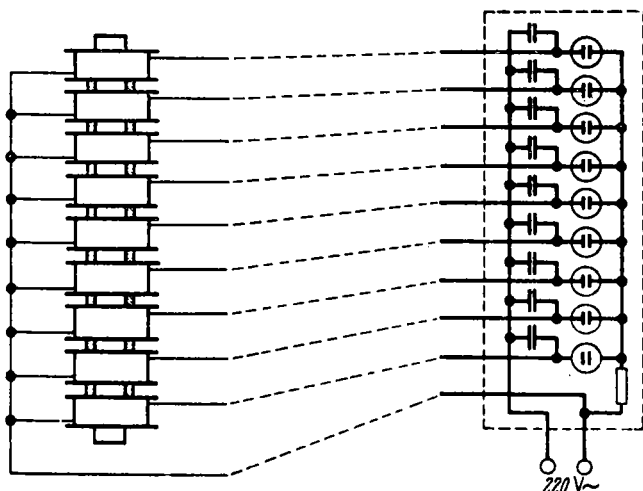


Bild 5
Stufenweise induktive Fernübertragung

Bild 6 gibt eine Schaltung wieder, bei der eine induktive Übertragung mit zwei Induktionsspulen erfolgt. Der Eisenkern kann in der gezeichneten Weise in beide Spulen eintauchen. Der Kern ist dann so lang wie die Spule, und der maximale Hub soll die gleiche Länge haben. Es ist klar, daß damit das Rohr, das die Spulen trägt, doppelt so lang ist wie der Hub. Wenn dieser Aufbau zu groß wird, kann man auch den Eisenkern nur in eine Spule eintauchen lassen und die andere Spule als unveränderliche in das Gebergerät verlegen. Auch hier ist der Eisenkern genau so lang wie die Spule und entspricht dem maximalen Hub. In der einen extremen Lage befindet sich der Kern innerhalb der Spule, in der anderen befindet er sich

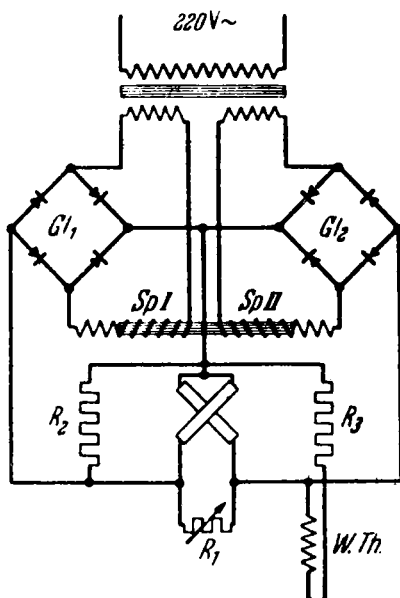


Bild 6

Die Widerstände R_2 , R_3 u. $W.Th.$ dienen der Temperaturkompensation.

außerhalb. Ein netzbetriebener Transformator gibt in beiden Fällen zwei gleiche Spannungen ab. Die beiden Spulen SpI und $SpII$ liegen in Reihe mit je einer Sekundärwicklung. Die durch die Spulen fließenden Ströme werden durch die beiden Grätzgleichrichter $G1_1$ und $G1_2$ gleichgerichtet und fließen durch die Spulen eines Kreuzspulmeßwerkes. Da der induktive Widerstand einer Spule um so größer ist, je weiter der

Eisenkern in sie hineinragt, verringert sich in demselben Maße der Strom. Das Kreuzspulmeßwerk mißt das Verhältnis der beiden Ströme und damit (bei vernachlässigbarem Ohmschen Spulenwiderstand) das Verhältnis der induktiven Widerstände. Es wird also eindeutig die Stellung des Eisenkerns angezeigt. Der Vorteil dieser Schaltung liegt darin, daß Schwankungen der Netzspannung keinen Einfluß auf die Meßgenauigkeit haben.

Mit Drehspulinstrumenten arbeitet man in folgender Schaltung: Das Rohr, in dem sich der Eisenkern bewegt, trägt eine Primär- und eine Sekundärwicklung. Die Primärwicklung besteht

aus zwei Teilen, die gegeneinander gewickelt sind. Jeder Teil nimmt eine Hälfte des Rohres ein. Steht der Eisenkern in der Mitte, so werden von jedem Teil der Primärwicklung gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Spannungen in der Sekundärwicklung induziert, so daß diese die Spannung 0 abgibt. Bei unsymmetrischer Stellung des Eisenkerns sind die beiden übertragenen Spannungen nicht mehr gleich, so daß an der Sekundärwicklung eine Spannung abgenommen werden kann, die proportional der Abweichung von der Mittellage ist. Man kann durch entsprechende Wicklung der Primärspule erreichen, daß die Symmetrielage am Ende der gesamten Spulenordnung liegt. Der Eisenkern hat wieder die Länge des Hubes, und die Spulenordnung ist etwa doppelt so lang. Die Primärspule wird über einen Transformator aus dem Netz gespeist. Zur Stabilisierung liegt im Primärkreis ein Eisenwasserstoffwiderstand.

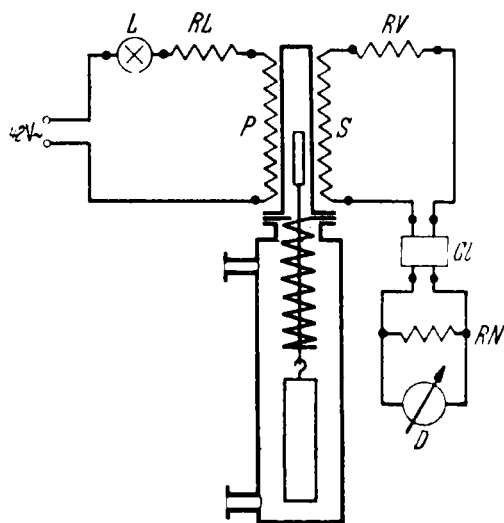


Bild 7
Induktive Meßwertübertragung

Man kennt auch Transformatoranordnungen mit Kreuzspulmeßwerk. In diesem Falle trägt das Rohr, in dem sich der Eisenkern bewegt, eine Primärspule und zwei nebeneinander liegende Sekundärspulen. In der Symmetrielage überträgt die Primärwicklung auf jede Sekundärwicklung die

gleiche Spannung. Bei einer unsymmetrischen Stellung sind die übertragenen Spannungen nicht gleich. Die Sekundärspannungen werden gleichgerichtet und an die Spulen eines Kreuzspulmeßwerkes gelegt. Dieses mißt das Verhältnis der beiden Sekundärspannungen und liefert damit ein eindeutiges Maß für die

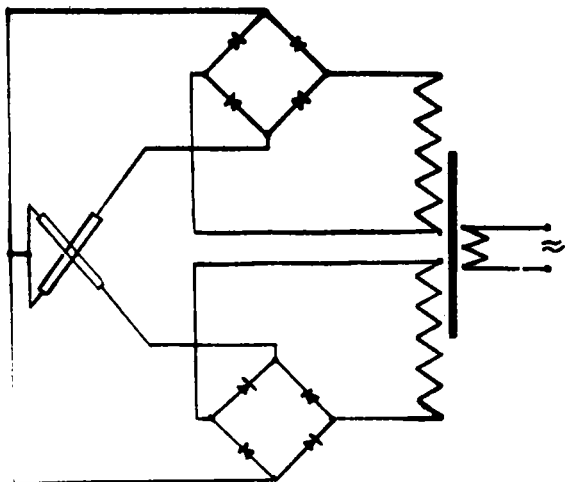


Bild 8
Differentialtransformator

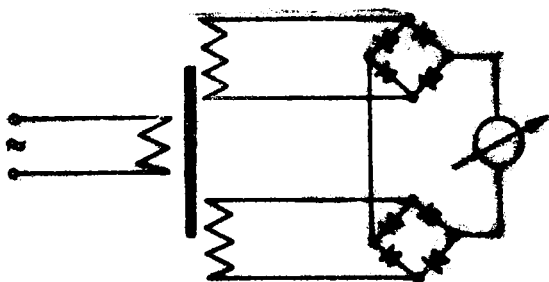


Bild 9
Messung der Differenz der Sekundärspannungen
mit Drehspulinstrument

Schwimmerstellung. Auch hier hat der Eisenkern die Länge des Hubes und die Spulen-anordnung ist doppelt so lang. Der Vorteil dieser Transformatoranordnung (Differentialtransformator) liegt wieder in der Unabhängigkeit der Messung von Schwankungen der Netzspannung. Es sind auch Differentialtransformator-

schaltungen bekannt, die auf diesen Vorteil verzichten, um ein Drehspulmeßwerk verwenden zu können. In diesem Falle wird die Differenz der Sekundärspannungen mit einem Drehspulinstrument gemessen (Bild 9). Es ist klar, daß hier eine Stabilisierung der Primärspannung erfolgen muß. Im allgemeinen geschieht dies durch einen Eisenwasserstoffwiderstand. Wo dessen Genauigkeit nicht mehr ausreicht, verwendet man in neuerer Zeit eine Brückenstabilisierung mit einem Glimmstabilisator (Bild 10).

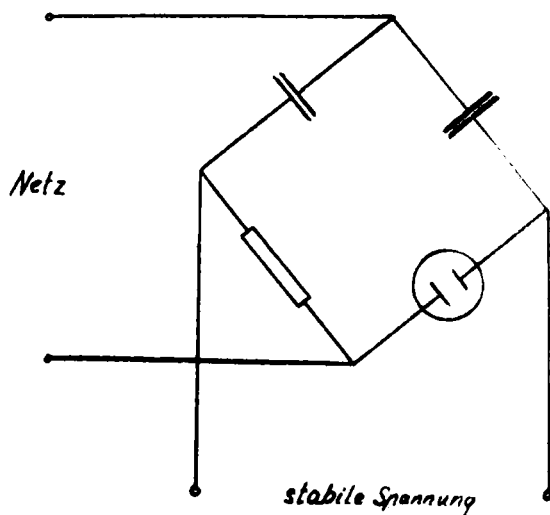


Bild 10
Brückenstabilisierung

Es ist auch eine Transformatorschaltung mit einheitlicher Primärwicklung bekannt (Bild 11). Die Primärseite wird über einen Transformator mit einer niedrigen Wechselspannung gespeist und enthält zur Stabilisierung einen Eisenwasserstoffwiderstand EWL, eine veränderliche Selbstinduktion L und einen parallel zur Wicklung S_1 liegenden Widerstand zur Ein-

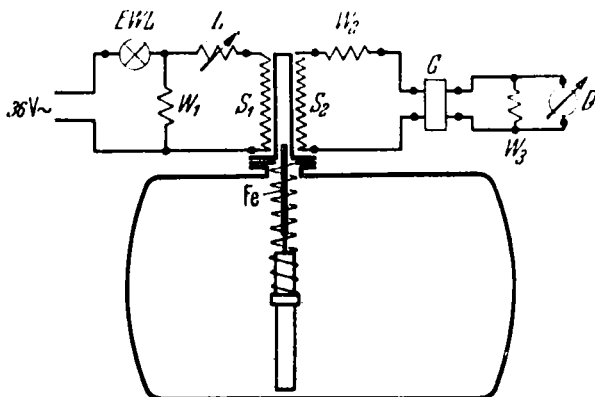


Bild 11
Transformatorschaltung mit
einheitlicher Primärwicklung.

stellung der Empfindlichkeit. Der Sekundärkreis enthält in Reihe mit der Wicklung S_2 einen größeren Widerstand W_2 . Die Sekundärspannung wird durch den Gleichrichter G gleichgerichtet und mit dem Drehspulinstrument D gemessen. Parallel zum Instrument liegt ein sehr kleiner Widerstand W_3 , der die Meßanordnung sehr niederohmig macht und es ermöglicht, daß man mehrere Anzeigeinstrumente parallel schalten kann, ohne die Messung zu beeinträchtigen. Die Funktion beruht darauf, daß die Übertragung der Primärspannung auf die Sekundärwicklung in dem Maße zunimmt, wie der Eisenkern in die Spulen eintaucht. Bei ausgetauchtem Kern ist der durch das Drehspulinstrument fließende Strom infolge des durch den kleinen Widerstand W_3 hervorgerufenen Kurzschlusses praktisch 0.

2.3 Stellungsanzeige durch magnetische Kupplung

Neben der induktiven Abtastung der Schwimmerstellung, die mit mehr oder weniger großen Aufbauten für das Übertragungssystem verbunden ist, kennt man Methoden der magnetischen Abtastung. Ihr Wert besteht darin, daß die großen Aufbauten für die Spulen vermieden werden können und man mit kleinen Einbauten auskommt. Das Prinzip der magnetischen Kupplung ist auf Bild 12 dargestellt. Der Schwimmer umgibt ein eingebautes

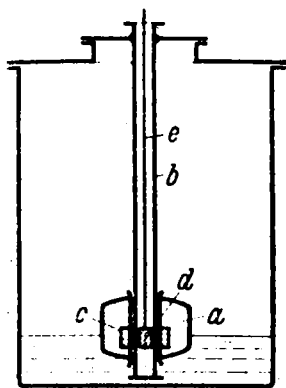


Bild 12
Magnetische Abtastung

Rohr aus nichtmagnetischem Material (z.B. V4A-Stahl) als Ring und enthält einen ringförmigen Dauermagneten. Das Rohr, das vom Behälter-Innenraum getrennt ist, enthält einen Führungsmagneten, der über Gestänge oder Seiltrieb mit einem äußeren Übertragungssystem, z.B. einem Widerstandsfernsender, verbunden ist. Der Führungsmagnet folgt durch die magnetische Kupplung jeder Bewegung des Schwimmers.

Interessant ist ein Übertragungssystem der Ota-Apparate-Werke (Frankfurt/Main), das auf Bild 13 schematisch dargestellt ist. Der Führungsmagnet schleift auf zwei Widerstandsdrähten und

schließt diese kurz. Damit erhält man einen veränderlichen Widerstand, der genau die Stellung des Schwimmers wiedergibt. Der Maximalwiderstand der Drähte beträgt 50 bis 100 Ohm. Die Messung erfolgt mit einem Kreuzspulinstrument. Als Meßgenauigkeit wird 1 % angegeben.

Bei der magnetischen Kupplung kommt es in jedem Falle darauf an, daß die Kupplung stark genug ist, damit auch kurzzeitige Schwimmerschwankungen vertragen werden, ohne die Verbindung

abreißen zu lassen. Dabei müssen Schwimmer und insbesondere der Führungsmagnet so ausgebildet oder geführt werden, daß sie nicht an die Wand gezogen und große Reibungswiderstände verursachen.

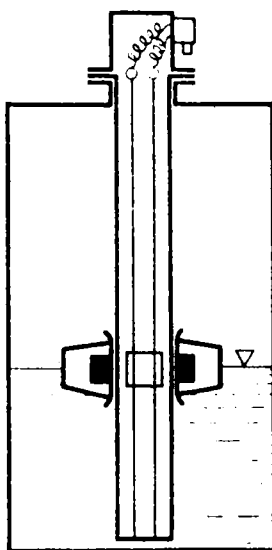


Bild 13
Magnetische Abtastung

2.4 Zusammenfassung

Die Füllstandsmessung dient der Bestimmung des Inhaltes von Behältern. Dabei wird die Beziehung zwischen Füllstand und Behälterinhalt bei einfachen Behälterformen durch Rechnung und bei komplizierteren durch Auslitern gewonnen. Einfache Kontrollmessungen werden mit der Meßlatte oder an Hand eines Schauglases vorgenommen.

Bei der Füllstandsmessung mit einem Schwimmer wird die Schwimmerstellung über Gestänge oder Seiltrieb aus dem offe-

nen Behälter und durch Stopfbüchse oder magnetische Kupplung aus dem geschlossenen Behälter herausgeführt und entweder auf ein direktes Anzeigesystem oder auf ein Fernübertragungsglied übertragen. Die Fernübertragung geschieht nach der Widerstandsmethode mit Fernsenderpotentiometer und entweder Drehspul- oder Kreuzspulinstrument. Daneben ist die Übertragung mit induktiven Drehmeldern von Bedeutung. Insbesondere für geschlossene Behälter finden die induktiven Übertragungssysteme Anwendung, die man in diskontinuierliche und kontinuierliche Verfahren unterscheiden kann. Dabei spielt die Umsetzungs des Schwimmerhubes durch Federbelastung eine besondere Rolle, um die Aufbauten klein halten zu können. Die kontinuierlichen Induktionsverfahren arbeiten entweder mit einfachen Induktionsspulen, deren Selbstinduktion durch einen Eisenkern verändert wird, oder stellen Transformatorschaltungen dar und nutzen die von der Stellung des Eisenkernes abhängende Übertragung aus.

3. Hydrostatische Füllstandsmessungen

Das Prinzip der hydrostatischen Füllstandsmessung beruht darauf, daß der Druck einer Flüssigkeitssäule auf den Gefäßboden proportional der Dichte der Meßflüssigkeit und der Höhe der Säule ist. Durch den Einfluß der Dichte wird die hydrostatische Methode insbesondere für Flüssigkeiten anwendbar, deren Dichte konstant bleibt. Sind Schwankungen der Dichte unvermeidlich, so muß durch automatische Kompensation dafür gesorgt werden, daß keine Meßfehler entstehen. Da Dichteänderungen im allgemeinen durch Temperaturänderungen hervorgerufen werden, läuft die Kompensation meistens auf eine Temperaturkompensation hinaus.

Da bei der hydrostatischen Methode der Druck der Flüssigkeitssäule gemessen wird, kommen als Meßgeräte grundsätzlich alle bekannten Manometer und Differenzmanometer in Frage. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Druckmeßgeräte und, was wesentlicher ist, danach, ob es sich

um einen offenen oder geschlossenen Behälter handelt.

Am einfachsten ist die Messung an einem offenen Behälter. Hier wird am Boden des Behälters irgendein Manometer angeschlossen. Es muß nur beachtet werden, daß das Meßsystem sich in der Höhe des Behälterbodens befindet. (14 a) Liegt es beispielsweise darunter, so wird durch die zusätzliche Flüssigkeitssäule ein höherer Druck erzeugt und dadurch ein größerer Flüssigkeitsdruck vorgetäuscht. Der umgekehrte Fehler tritt selbstverständlich auf, wenn sich das Meßgerät oberhalb des Behälterbodens befindet. (14 b)

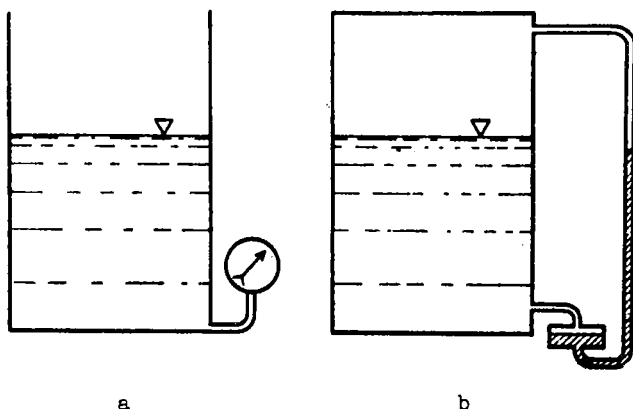


Bild 14

Bei geschlossenen Behältern, die unter Über- oder Unterdruck stehen, ist die einfache Messung mit einem Manometer nicht mehr möglich. Hier muß ein Differenzmanometer verwendet werden. Als Plusdruck liegt die Flüssigkeitssäule und als Minusdruck der über der Flüssigkeit herrschende Druck am Gerät. Diese beiden prinzipiellen Anschlußarten sind auf dem Bild 14 skizziert. Bei geschlossenen Behältern sind noch zwei weitere Fälle zu unterscheiden. Befinden sich Meßgerät und Flüssigkeit im Behälter auf gleicher Temperatur, so kann am Meßgerät keine Kondensation eintreten und es ist die auf

Bild 14 dargestellte Schaltung ausreichend. Befindet sich aber das Meßgerät auf einer wesentlich niedrigeren Temperatur als die Behälterflüssigkeit, wie es z.B. in Dampfkesseln der Fall ist, so tritt auf der Minusseite Kondensation auf. Dadurch bildet sich allmählich eine Flüssigkeitssäule, die zu groben Fehlern führen kann. Aus diesem Grunde muß der Minusdruck dem Meßgerät über eine Flüssigkeitsvorlage konstanten Niveaus zugeführt werden (Bild 15).

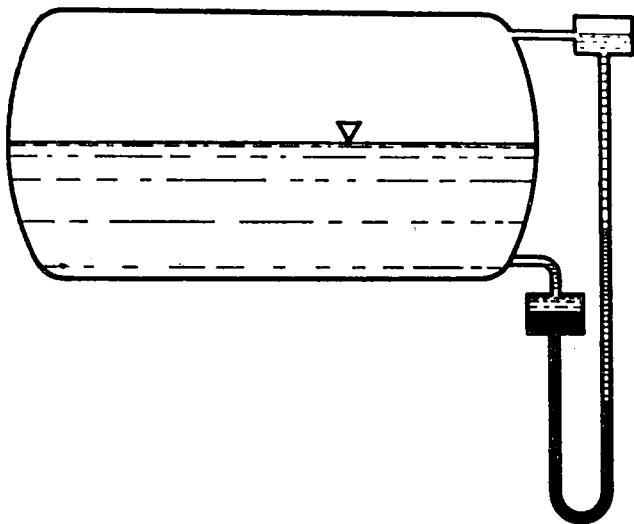


Bild 15
Flüssigkeitsvorlage mit konstantem Niveau

Die Flüssigkeitsvorlage stellt ein Kondensationsgefäß dar, das durch eine waagerechte oder zum Kessel hin fallende Leitung mit dem Kessel verbunden ist. Durch den kondensierenden Dampf wird das Niveau in der Vorlage immer konstant gehalten. Der Minusdruck ist jetzt allerdings größer als der Plusdruck. Auch hierbei ist zu beachten, daß sich Meßgerät

und Behälterboden auf gleichem Niveau befinden.

Es kann allerdings auch vorkommen, daß sich die Meßflüssigkeit auf einer wesentlich tieferen Temperatur befindet als das Meßgerät. Es besteht dann die Möglichkeit, daß die Flüssigkeit in der Verbindungsleitung verdampft und so die Flüssigkeitssäule verkleinert, was ebenfalls zu groben Fehlern führen würde. In diesem Falle müssen die Anschlußleitungen für den Plus- und den Minusdruck zum Behälter hin Gefälle haben, damit auf das Meßgerät von beiden Seiten nur der Gasdruck wirkt. Jetzt ist es gleichgültig, in welcher Höhe sich das Meßgerät befindet. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß die Grenze zwischen flüssiger und gasförmiger Phase auf dem Niveau des Behälterbodens liegt.

Im folgenden wollen wir uns einige technische Ausführungen der hydrostatischen Füllstandsmessungen betrachten.

3.1 Standmessung mit Plattenfedermanometer

Besonders in Dampfkesseln wird der Wasserstand gern mit Plattenfedermanometern gemessen. Die Meßanlage sieht dann etwa so aus, wie auf Bild 16 skizziert. Mit dem Kessel ist ein steigrohrartiger Ansatz verbunden, der sich auf niedriger Temperatur befindet und die Kondensation des Dampfes fördert. Dadurch ist das Niveau im Überlaufgefäß konstant. Im Steigrohr steht allerdings die Flüssigkeit infolge ihrer niedrigen Temperatur nicht ganz so hoch wie im Kessel. Dieser nahezu gleichbleibende Fehler wird aber von vornherein mit berücksichtigt. Auf die Membran des Manometers wirkt die Differenz der Wassersäulen im Steigrohr und im Überlaufgefäß.

3.2 Standmessung mit der Ringwaage

In gleicher Weise wie beim Plattenfedermanometer wird vor allen Dingen in Dampfkesseln der Wasserstand mit der Ringwaage gemessen. Der einen Seite der Ringwaage wird wieder

der durch das Kondensationsgefäß konstante Druck und der anderen Seite der durch den Wasserstand gegebene zu messende Druck zugeführt. (Bild 17)

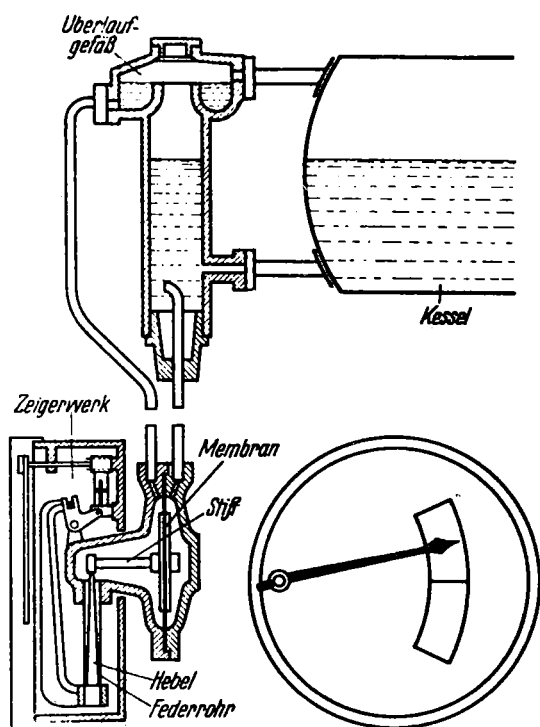


Bild 16

Messung des Wasserstandes mit Plattenfedermanometer

Es muß aber mindestens über dem Meßschenkel eine elektrisch nicht leitende Flüssigkeit stehen.

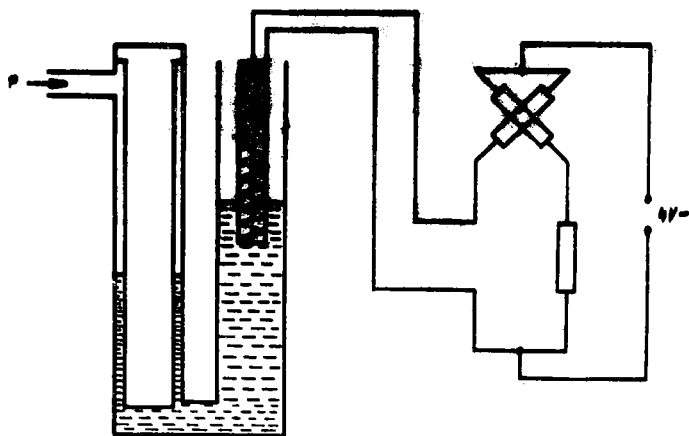


Bild 19

Füllstandsmesser nach Brand und Meyer

3.4 Zusammenfassung

Bei Flüssigkeiten bekannter Dichte ist der Druck der hydrostatischen Säule ein Maß für den Füllstand. An offenen Behältern kann der Bodendruck durch ein einfaches Manometer gemessen werden, das sich in der Höhe des Behälterbodens befinden muß. Bei geschlossenen Behältern, deren Inhalt sich auf der Temperatur des Meßgerätes befindet, erfolgt die Messung mit einem Differenzmanometer, auf das von der einen Seite die Flüssigkeitssäule und von der anderen Seite der über der Flüssigkeit herrschende Druck wirkt. Auch hier muß sich das Meßgerät in der Höhe des Behälterbodens befinden. Ist der Temperaturunterschied zwischen Meßmedium und Meßgerät so groß, daß Kondensation oder Verdampfung in der Meßleitung erfolgen kann, so muß durch Kondensations- oder

Verdampfungsgefäße dafür gesorgt werden, daß die Flüssigkeitssäulen, die der Übertragung des über der Flüssigkeit herrschenden Druckes dienen, einen konstanten Wert haben.

4. Pneumatische Füllstandsmessung

Auf dem gleichen Prinzip wie die hydrostatische Methode ist die pneumatische Füllstandsmessung aufgebaut. Auch sie bestimmt den Druck der Flüssigkeitssäule, die über der Öffnung eines Einblasrohres steht. Sie unterscheidet sich von der hydrostatischen Methode prinzipiell dadurch, daß das Druckmeßgerät mit der Meßflüssigkeit nicht in Berührung kommt. Das ist unter Umständen, vor allem bei aggressiven Flüssigkeiten, ein großer Vorteil.

Man hat im wesentlichen zwei Fälle zu unterscheiden:

1. die pneumatische Standmessung an offenen und 2. an geschlossenen Behältern. Die Messung an offenen Behältern erfolgt wie bei der hydrostatischen Methode durch ein Manometer, die Messung an geschlossenen Behältern erfolgt auch hier mit einem Differenzmanometer. Es ist in beiden Fällen gleichgültig, in welcher Höhe sich das Meßgerät befindet. Der prinzipielle Aufbau der pneumatischen Standmeßanlage für offene und geschlossene Behälter geht aus den Bildern 20 und 21 hervor. Ein Hilfgas, meistens Stickstoff, wird durch das Tauchrohr gedrückt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Hilfgases muß einigermaßen konstant sein. Der Konstanthaltung dienen mengengeregelte Perldrosseln. Die Tauchrohre haben einen Durchmesser von 10 bis 20 mm. Da die Strömungsgeschwindigkeit des Hilfgases sehr gering ist, wirken sich die geringsten Undichtigkeiten stark aus. Es kann leicht vorkommen, daß das Gas oberhalb der Taucherrohröffnung ausströmt und dadurch die Flüssigkeit ein Stück ins Tauchrohr eindringt. Dadurch entstehen grobe Fehler, die nur schwer erkannt werden.

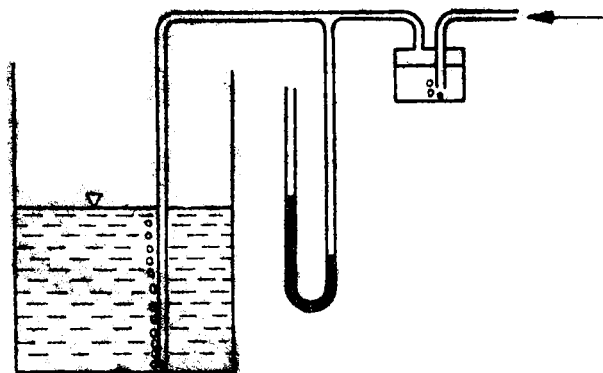


Bild 20
Pneumatische Standmeßanlage
für offenen Behälter

Die Druckmessung erfolgt im allgemeinen mit quecksilbergefüllten U-Rohren oder bei geringen Füllständen mit der Ringwaage. Meßflüssigkeit und Temperatur müssen eine Kondensation in der Minusleitung, die von keinem Perlgas durchströmt wird, ausschließen.

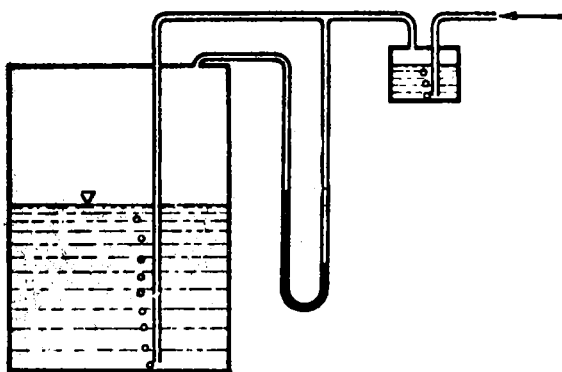


Bild 21
Pneumatische Standmeßanlage
für geschlossenen Behälter

In neuerer Zeit ist ein pneumatisches Verfahren bekannt geworden, das vor allen Dingen bei sehr zähen Flüssigkeiten verwendet wird und die Messung eines einzi-

gen Niveaus ermöglicht. Diese zwar meßtechnisch etwas magere Methode ist für Regelungszwecke recht gut brauchbar, wo es darauf ankommt, durch eine Zweipunktregelung ein Niveau konstant zu halten. Das Prinzip des Verfahrens geht aus Bild 22 hervor.

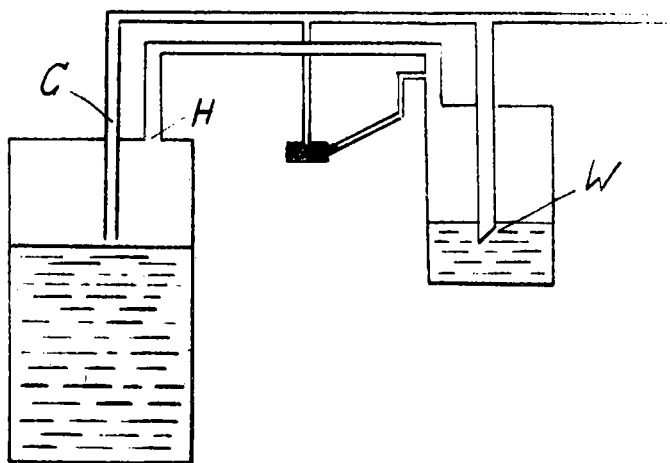


Bild 22
Zweipunktregelung

Einem Tauchrohr wird wieder über eine mengengeregelte Perldrossel ein Hilfsgas zugeführt und strömt durch dessen Öffnung im Behälter frei aus, solange der Flüssigkeitsspiegel unterhalb der Öffnung liegt. Ist die Flüssigkeit bis an das Tauchrohr gestiegen und verschließt dieses, so strömt das Hilfsgas über den geringen Widerstand W durch das zweite in den Behälter führende Rohr H. Dadurch entsteht zwischen dem Tauchrohr C eine geringe Druckdifferenz, die mit einem Schrägrohrmanometer zum Schließen eines Kontaktes ausgenützt wird. Durch diesen Kontakt kann ein Regler entsprechend eingreifen.

Zusammenfassung

Die pneumatische Methode mißt den Druck einer Flüssigkeitssäule als den Druck eines Hilfsgases, das durch ein Tauchrohr strömt und am Behälterboden austritt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Hilfsgases wird durch Perldrosseln konstant gehalten. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, daß das Druckmeßgerät mit dem Behälterinhalt nicht in Berührung kommt.

5. Elektrische Füllstandsmessung

Neben den mechanischen Methoden der Füllstandsmessung kennt man im wesentlichen zwei elektrische, nämlich die kapazitive und die Ohmsche Standmessung. Beide Verfahren sind besonders dort vorteilhaft anwendbar, wo der Füllstand nur geringen Schwankungen unterworfen ist. Man legt dann die Meßgeräte so aus, daß ihr Meßumfang nur die maximal möglichen Schwankungen umfaßt.

5.1 Kapazitive Füllstandsmessung

Die kapazitive Füllstandsmessung beruht darauf, daß die Kapazität eines Kondensators in dem Maße wie das Dielektrikum zwischen den Kondensatorplatten zunimmt. Ein Kondensator, der in eine Flüssigkeit taucht, hat demnach eine um so größere Kapazität, je höher das Dielektrikum zwischen den Platten steht. Man baut in den Behälter, der als eine Kondensatorplatte dient, eine stabförmige Elektrode ein, die die zweite Kondensatorplatte darstellt (Bild 23). Die Kapazität des Kondensators ist ein eindeutiges Maß für den Füllstand. Ihre Messung erfolgt in einer mit Hochfrequenz gespeisten Wheatstoneschen Brücke, die drei bekannte Kapazitäten und im vierten Brückenzweig als unbekannte Kapazität die Füllstandsanzahl enthält. Die Frequenz der Speisespannung liegt in der Größenordnung von einigen hundert kHz. Der Frequenzgenerator muß mit konstanter Spannung betrieben werden und liegt

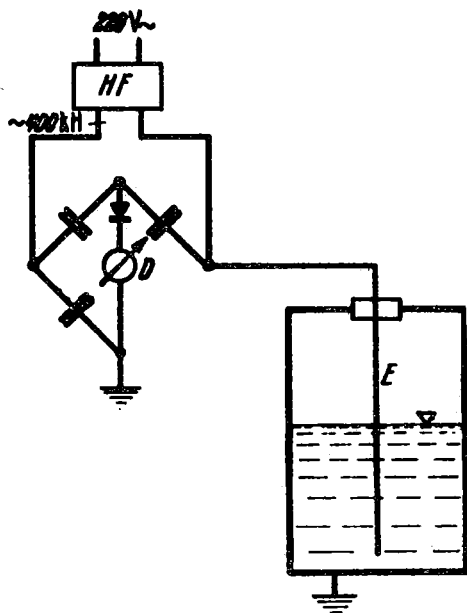


Bild 23
Stabförmige Elektrode
als 2. Kondensatorplatte

daher meistens hinter einem Konstanthalter. Die Anzeige erfolgt mit einem Drehspulinstrument. Im allgemeinen können mehrere Anzeige- oder Schreibgeräte und ein Regler angeschlossen werden. Damit durch das Meßgut die elektrische Meßeinrichtung nicht zu sehr bedämpft wird, ist die Stabelektrode mit einem nicht leitenden Überzug aus Hartgummi, Glas oder PVC versehen. Bei gut isolierenden Flüssigkeiten kann dieser Überzug wegfallen.

Die kapazitive Füllstandsmessung ist sehr empfindlich und eignet sich daher zur Bestimmung kleiner Füllstandsschwankungen. Es ist ohne weiteres möglich, einen Meßumfang von wenigen Millimetern zu erreichen. Die Genauigkeit liegt in der Größenordnung 2 bis 5 % des Meßumfanges.

Eine zweite Art der kapazitiven Standmessung verwendet andere Elektroden. Als spannungsführende Elektrode wird ein isolierter Metallstreifen verwendet, der auf einen nichtleitenden

den Teil der Gefäßwand aufgeklebt wird. Als nichtleitender Teil der Gefäßwand käme etwa ein Schauglas in Frage. Die zweite Elektrode wird durch die Flüssigkeit selbst gebildet. Es ist klar, daß dieses Verfahren nur bei leitenden Flüssigkeiten angewandt werden kann. Die Kapazität dieser Anordnung steigt mit dem Füllstand, weil mit diesem die Plattengröße wächst. (Die Kapazität eines Plattenkondensators ist proportional der Plattengröße.) Als Meßgerät wird die gleiche Meßbrücke wie bei Stabelektroden verwendet.

5.2 Ohmsche Füllstandsmessung

Die Ohmsche Füllstandsmessung ist bei allen Flüssigkeiten anwendbar, die eine nicht zu geringe Leitfähigkeit haben. Als untere Grenze der Leitfähigkeit kann man etwa $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ angeben. Leitungswasser ist also noch meßbar.

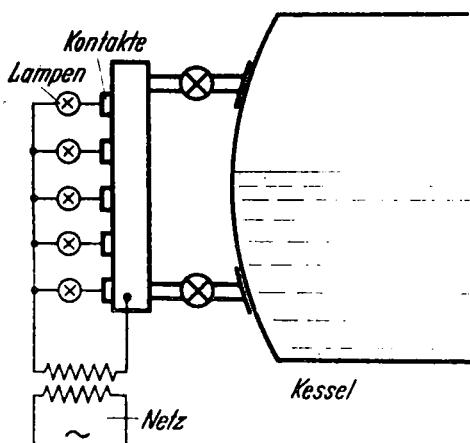


Bild 24
Ohmsches Meßverfahren

Die einfachste Methode besteht darin, daß in verschiedenen Höhen Elektroden angebracht werden, zwischen denen eine gewisse Spannung liegt. Durch die Flüssigkeit werden die einzelnen Elektroden miteinander verbunden, und es fließt ein Strom. Mit diesem kann man eine Anzahl von Lämpchen zum Aufleuchten bringen. An der Anzahl der leuchtenden Lämp-

chen kann man den Füllstand ablesen. Je genauer die Messung sein soll, um so dichter müssen die Elektroden angeordnet werden. Diese diskontinuierliche Messung ist recht billig in der Anlage und in der Unterhaltung.

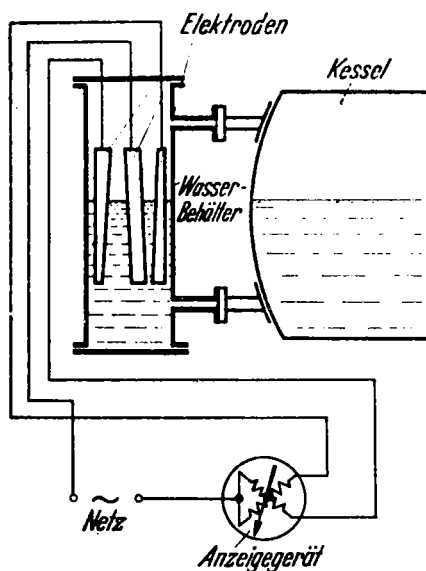


Bild 25
Ohmsches Meßverfahren

Wo das diskontinuierliche Verfahren nicht mehr ausreicht, muß das zweite Ohmsche Meßverfahren angewandt werden. Der prinzipielle Aufbau geht aus dem Bild 25 hervor. In die Flüssigkeit tauchen drei Elektroden, die so geformt sind, daß die Abstände zwischen je zwei von ihnen abhängig von der Höhe sind. Man nimmt entweder gleich dicke Streifen und ordnet sie schräg zueinander an, oder man benutzt keilförmige Außenelektroden. Die eine

von ihnen zeigt dann mit der Spitze nach unten und die andere mit der Spitze nach oben. Durch die drei Elektroden werden zwei Leitfähigkeitsstrecken gebildet. Die Widerstände der beiden Leitfähigkeitsstrecken werden mit einem Kreuzspulmeßgerät miteinander verglichen. Steigt der Füllstand, so nimmt der Widerstand der einen Leitfähigkeitsstrecke rascher zu als der der anderen. Das Widerstandsverhältnis ist

damit eindeutig abhängig vom Füllstand.

Bei dieser Messung ist besonders günstig, daß ein Kreuzspul-instrument nur den Quotienten der beiden Ströme unabhängig von deren Größe mißt. Der Strom nimmt nämlich für beide Spulen mit dem Füllstand zu. Nur ist die Zunahme infolge der mit der Höhe veränderlichen Elektrodenabstände verschieden.

Änderungen der Leitfähigkeit spielen keine Rolle, weil sie in jeder Leitfähigkeitsstrecke gleich zur Auswirkung kommen. Damit störende Polarisationserscheinungen und Gasabscheidung an den Elektroden vermieden werden, muß die Messung mit Wechselspannung erfolgen. Es ist klar, daß die Ströme gleichgerichtet werden müssen, bevor sie dem Kreuzspulmeßwerk zugeführt werden. Auf Bild 25 ist der Gleichrichter durch das mit G bezeichnete Kästchen dargestellt. Er ist in der Praxis ein in jeder der beiden Spulenanschlüsse liegender Zweiweggleichrichter.

5.3 Zusammenfassung

Bei der kapazitiven Füllstandsmessung wird die Tatsache ausgenutzt, daß die Kapazität eines Kondensators proportional der Plattengröße und proportional der Dielektrizitätskonstanten des zwischen den Platten liegenden Mediums ist. Der Behälter wird als masseführende Kondensatorplatte und ein in ihn hineinragender Stab als spannungsführende Kondensatorplatte verwendet. Die Kapazität dieser Anordnung ist abhängig vom Füllstand und wird mit einer Hochfrequenzmeßbrücke gemessen. Die zweite Elektrode benutzt die leitende Flüssigkeit im Behälter als die Masseelektrode und verwendet als spannungsführende Elektrode einen isolierten Metallstreifen, der auf einen nichtleitenden Teil der Gefäßwand aufgeklebt ist.

Die Ohmsche Füllstandsmessung nutzt die Leitfähigkeit des Meßgutes aus. Man kennt eine nichtkontinuierliche Meßanlage, bei der in dem Behälter in verschiedenen Höhen Elektroden eingebaut sind, und eine kontinuierliche Anlage. Diese ver-

wendet drei Elektroden, deren Abstandsverhältnis sich mit der Höhe ändert. Das vom Füllstand abhängige Verhältnis der Widerstände zwischen je zwei Elektroden wird mit einem Kreuzspulmeßgerät gemessen. Dadurch werden Leitfähigkeitsänderungen des Meßgutes bedeutungslos.

6. Radioaktive Füllstandsmessung

In neuerer Zeit haben in immer stärkerem Maße radioaktive Isotope Eingang in die Betriebsmeßtechnik gefunden und auch das Gebiet der Füllstandsmessung um einige wichtige Verfahren bereichert. Grundlage dieser Meßverfahren ist die Absorption von γ Strahlen durch das Meßmedium. Als Strahler werden die radioaktiven Isotope Kobalt 60 (mit einer Halbwertszeit von 5 Jahren) und Caesium 137 (mit einer Halbwertszeit von 33 Jahren) verwendet. Das Radium kommt wegen seines hohen Preises nicht in Frage.

Die radioaktive Füllstandsmessung wird vor allem dort angewandt, wo die übrigen Methoden entweder nicht brauchbar sind oder einen zu hohen Kostenaufwand verursachen würden. Man verwendet sie daher bei der Messung an Hochdruckbehältern oder Gefäßen, die sehr explosible oder sehr aggressive Stoffe enthalten. Auch bei hochviskosen Medien ist die radioaktive Füllstandsmessung den übrigen Verfahren vorzuziehen. Aus Gründen des Strahlenschutzes, auf den wir noch kurz hinweisen müssen, sollte man nur dort radioaktive Isotope einsetzen, wo es wirklich erforderlich ist. Außerdem ist eine radioaktive Füllstandsmesseinrichtung ziemlich teuer.

6.1 Einige Begriffe der Radioaktivität

Die Kerne der radioaktiven Elemente zerfallen spontan, ohne daß ihnen von außen Energie zugeführt wird. In der Natur kommen nur wenige derartige Stoffe vor. Durch Atomumwandlung im Kernreaktor kann man aber heute bei allen chemischen Elementen künstliche Radioaktivität hervorrufen.

Die natürliche Radioaktivität besteht in einer Ausstrahlung von Heliumionen (α -Strahlen) oder Elektronen (β -Strahlen). Diese Ausstrahlung ist im allgemeinen mit der Aussendung einer Wellenstrahlung (γ -Strahlen) verbunden. Die Gammastrahlen sind also eine elektromagnetische Wellenstrahlung von der Art einer durchdringenden Röntgenstrahlung. Die Zahl dn der in der Zeit dt zerfallenden Atome ist der Zahl der vorhandenen Atome n und der Zeit dt proportional:

$$dn = - \lambda \cdot n \cdot dt$$

Die Integration dieser einfachen Differentialgleichung liefert

$$n = n_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Dabei bedeutet n_0 die Zahl der zur Zeit $t=0$ vorhandenen radioaktiven Atome, n die Zahl der zur Zeit t noch vorhandenen und λ die sogenannte Zerfallskonstante. Die Zahl der aktiven Atome nimmt also nach einer Exponentialfunktion ab. In der Regel verwendet man zur Charakterisierung dieser Abnahme nicht die Zerfallskonstante, sondern die Halbwertszeit T_H , nach der die Zahl der anfangs vorhandenen Atome auf die Hälfte abgesunken ist. Für die Halbwertszeit gilt also die Beziehung

$$\frac{n_0}{2} = n_0 \cdot e^{-\lambda T_H}$$

oder

$$\lambda \cdot T_H = \ln 2 = 0,693$$

Die Strahlung eines radioaktiven Präparats ist um so stärker, je mehr Atome pro Zeiteinheit zerfallen. Man nennt die Zerfallshäufigkeit die Aktivität einer Strahlenquelle. Als Maß für die Aktivität verwendet man das Curie. Die Aktivität 1 Curie liegt dann vor, wenn $3,7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle in der Sekunde stattfinden. 1 Curie entspricht ungefähr der Aktivität von 1g Radium.

Für die Messung der radioaktiven Strahlung wird die Tatsache ausgenutzt, daß durch sie Gase ionisiert werden. Ein zylindrisches Rohr, dessen Durchmesser einige Zentimeter beträgt,

wird mit geringen Mengen Luft oder Argon gefüllt. In der Achse dieses Rohres ist ein dünner Stahldraht gespannt, der gegen das Rohr gut isoliert und über einen hohen Widerstand von 10^6 bis 10^9 Ohm mit der Erde verbunden ist. Die Rohrwand besteht aus leitendem Material und wird mit dem negativen Pol einer Hochspannungsbatterie verbunden.

Diese Meßanordnung heißt das Geigersche Zählrohr. Tritt im Zählrohr ein ionisiertes Teilchen auf, so wird es durch das zwischen der Rohrwand und dem Draht bestehende elektrische Feld beschleunigt, ionisiert noch einige Teilchen und verursacht so einen kurzen Stromstoß, der am Ableitwiderstand einen Spannungsimpuls hervorruft. Die Zahl der Spannungsimpulse wird durch eine elektrische Zählleinrichtung gezählt und ist ein Maß für die gebildeten Ionen. Je intensiver die einfallende Strahlung ist, um so größer ist auch die Zahl der entstandenen Ionen. Damit sind die pro Zeiteinheit gezählten Spannungsimpulse ein Maß für die Intensität der Strahlung. Bei geringerer Spannung zwischen den Elektroden mißt man auch direkt den Strom, den die gebildeten Ionen hervorrufen. Man spricht in diesem Falle von einer Ionisationskammer.

6.2 Durchstrahlungsmethode

Die radioaktiven Strahlen werden beim Durchgang durch Materie gebremst, absorbiert oder gestreut. Daher verliert die durch eine Materieschicht hindurchgetretene Strahlung an Intensität. Diese Schwächung ist um so größer, je dicker die durchstrahlte Schicht und je größer die Dichte der durchstrahlten Materie ist. Diese Methode ist also ohne Hilfsmittel nicht unabhängig von der Art des Füllguts.

Der prinzipielle Aufbau einer radioaktiven Füllstandsmeßanlage nach der Durchstrahlungsmethode ist folgender: Am Boden des Behälters befindet sich die Strahlungsquelle (meistens Kobalt 60 oder Caesium 137). Die Strahlung durchsetzt das Füllgut, wird dabei geschwächt und trifft oberhalb des Be-

hälters auf einen Empfänger.

Da die Genauigkeit der radioaktiven Füllstandsmessung vor allem von der Genauigkeit und Stabilität der eingesetzten Meßgeräte abhängt, verwendet man als Empfänger meistens eine Ionisationskammer. Diese ist gegenüber dem Zählrohr wesentlich stabiler. Der Ionisationsstrom bzw. die am Ableitwiderstand anstehende Spannung muß verstärkt werden. Im allgemeinen verstärkt man jedoch nicht diese Spannung selbst, sondern man vergleicht sie mit einer konstanten, als Spannungsabfall an einem Potentiometer erzeugten Vergleichsspannung und gibt die Differenz zwischen dieser und der Meßspannung auf den Verstärkereingang. Dieses Verfahren ist vor allem dort sehr vorteilhaft, wo ein bestimmter Füllstand eingehalten werden soll und demnach nur die Abweichung von diesem interessiert. Als Vergleichsspannung verwendet man häufig auch eine von einer zweiten Ionisationskammer herrührende Meßspannung. Diese Vergleichsionisationskammer wird von derselben Strahlenquelle wie die Meßkammer bestrahlt. Die sie treffende Strahlung durchdringt aber entweder eine konstant dicke Schicht des Meßgutes (damit Dichteschwankungen ausgeglichen werden) oder wird durch eine Blende in bestimmter Weise geschwächt. Durch die Vergleichsionisationskammer wird bis zu einem gewissen Grad die Intensitätsabnahme der Strahlenquelle ausgeglichen. Eine sehr gute Ausgleichung ist bei vollständiger Kompensation der Meßspannung durch die Vergleichsspannung möglich. In diesem Falle ist die Blende vor der Vergleichsionisationskammer durch einen Servomotor verstellbar und wird immer gerade so eingestellt, daß Meß- und Vergleichsspannung gleich sind. Mit der Blende ist das Anzeigesystem verbunden.

Die Verstärkung der am Ableitwiderstand einer Ionisationskammer anstehenden Spannung ist recht schwierig. Da die Ionisationsströme sehr klein sind, muß der Ableitwiderstand sehr groß sein, damit die Meßspannung genügend weit über dem Störpegel des Verstärkers herausragt. Dadurch muß aber der Verstärker einen sehr hohen Eingangswiderstand haben, sonst

bricht die Meßspannung am Verstärker zusammen. Diese Schwierigkeit wird durch sog. Elektrometerröhren im Verstärkereingang und durch straffe Kopplung vom Ausgang auf den Eingang überwunden. Um eine günstige Wechselspannungsverstärkung vornehmen zu können, unterbricht man den radioaktiven Strahl durch eine rotierende Blende, wodurch dann die Meßspannung gleich als Wechselspannung anfällt, oder man legt die als Gleichspannung anfallende Meßspannung auf einen sog. Schwingkondensator. Dies ist ein Kondensator, dessen Plattenabstand mechanisch im Rhythmus einer bestimmten Frequenz geändert wird. Dadurch be- und entlädt er sich ständig und formt auf diese Weise die angelegte Gleichspannung in eine Wechselspannung um, die auf den Eingang eines Elektrometerverstärkers gegeben wird.

Man kann mit der Durchstrahlungsmethode eine Genauigkeit von 1 % erreichen. Durch besonderen Aufwand, der die Anlage allerdings sehr verteuert, wurden auch schon Genauigkeiten von 0,5 % erreicht.

Für die Füllstandsmessung in sehr hohen Behältern, in denen der Füllstand nicht wesentlich schwanken darf, ist diese Genauigkeit gelegentlich nicht ausreichend, zumal eine Betriebsmeßanlage ohnehin auf die Dauer nicht die angegebenen optimalen Werte beibehält. Um diesen Mißstand zu überwinden, wurde eine sinnvolle Abwandlung des Durchstrahlungsprinzips vorgenommen, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden soll.

6.3 Nachlaufmethode

Das Prinzip der Nachlaufmethode ist auf Bild 26 dargestellt. Zu beiden Seiten des Behälters befindet sich je eine Spindel. Die beiden Spindeln werden durch ein Getriebe oder einen Kettenantrieb von einem einzigen Motor angetrieben. Der Motor muß zwei Drehrichtungen haben, muß also ein kräftiger Servomotor sein. Die auf der einen Spindel laufende Mutter trägt

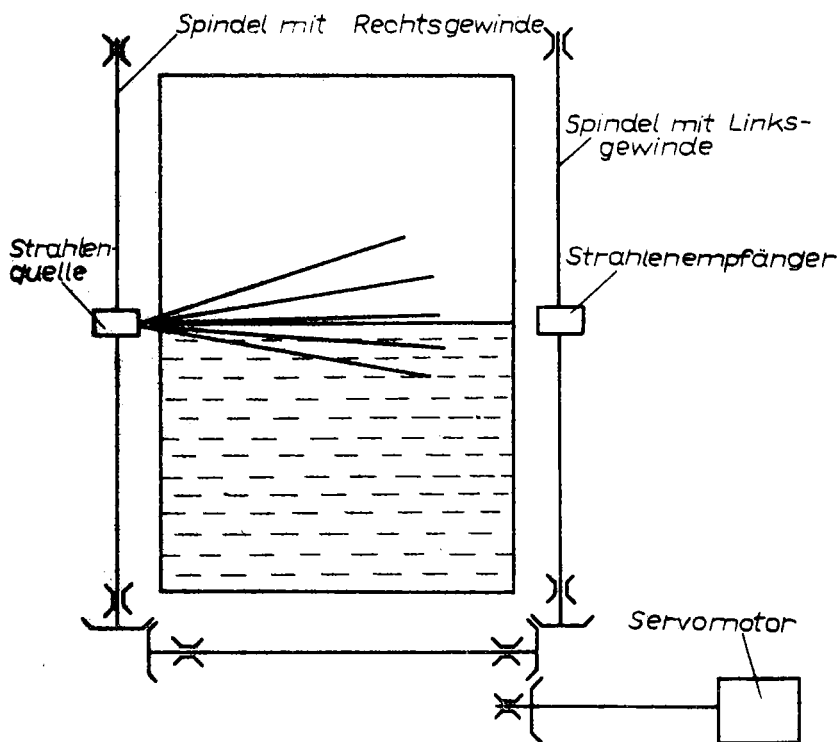


Bild 26
Prinzip der Nachlaufmethode

die radioaktive Strahlenquelle, die auf der anderen laufende trägt den Strahlenempfänger. Durch die Verkopplung der beiden Spindeln wird erreicht, daß Strahlenquelle und Strahlenempfänger immer in gleicher Höhe einander gegenüberstehen. Werden sie über die Trennlinie, z.B. zwischen Flüssigkeit und Gas, hinwegbewegt, so registriert der Empfänger eine

plötzliche Änderung der Strahlungsintensität. Diese über wenige Millimeter eintretende Änderung ist natürlich ein sehr genauer Indikator für den Füllstand.

Eine kontinuierlich arbeitende Füllstandsmeßanlage darf selbstverständlich nicht ununterbrochen über die Trennlinie hinwegstreichen. Man möchte ja eine pendelfreie Anzeige haben. Diese erreicht man durch folgende elektrische Schaltung: Die vom Empfänger abgegebene Spannung wird mit einer Festspannung verglichen, deren Größe gerade zwischen der bei Durchstrahlung des Meßgutes und bei Durchstrahlung der Luft vom Empfänger abgegebenen Spannung liegt. Die Differenz zwischen Meß- und Vergleichsspannung steuert einen Verstärker aus, der wiederum den Servomotor in Bewegung setzt. Dieser dreht die Spindeln immer so, daß Meß- und Vergleichsspannung gleich sind. Dann befinden sich Strahlenquelle und Empfänger genau in der Höhe des Flüssigkeitsspiegels. Mit den Spindeln ist ein Potentiometer gekoppelt, dessen Stellung mit einem Kreuzspulinstrument in bekannter Weise angezeigt wird. Empfindlichkeit und Genauigkeit dieser Methode liegen in der Größenordnung von wenigen Millimetern. Die Dichte des Meßgutes ist ohne Bedeutung. Die zeitliche Intensitätsabnahme der Strahlenquelle kann durch Veränderung der Vergleichsspannung korrigiert werden. Dadurch kann ein Präparat sehr lange verwendet werden.

6.4 Strahlenschäden und Strahlenschutz

Zahlreiche Forscher, die sich mit radioaktiven Strahlen beschäftigt haben, bevor deren biologische Wirksamkeit erkannt war, haben ernste Schäden erlitten oder sind gar an der Wirkung der Strahlen gestorben.

Besonders empfindlich gegen die Einwirkung radioaktiver Strahlen sind die Zellen, die einer regen Teilung unterliegen. Das sind bei Kindern, die sich im Wachstum befinden, beinahe alle. Deshalb müssen Kinder ganz besonders vor radioaktiver Bestrahlung geschützt werden. Das trifft auch auf

noch Ungeborene zu, so daß schwangeren Frauen eine mit radioaktiver Bestrahlung verbundene Arbeit grundsätzlich verboten ist. Beim Erwachsenen sind besonders empfindlich die Keimzellen, deren Schädigung erst an den Kindern beobachtet wird. Sehr empfindlich ist ferner das Knochenmark, in dem die Blutkörperchen gebildet werden. Das erste Anzeichen einer Strahlenschädigung ist daher im allgemeinen ein verändertes Blutbild. Stärkere Schädigungen führen nach längerer Zeit zu Leukämie und Krebs. Die Gefahr der radioaktiven Strahlen ist, daß man ihre Einwirkung nicht wahrnehmen kann und daher durch den Körper nicht gewarnt wird.

Man darf aber aus dem Gesagten nicht schließen, daß der Umgang mit radioaktiven Substanzen gefährlicher wäre als irgendeine andere Sache. Da wir heute ihre Wirkung kennen, können wir uns auch wirksam dagegen schützen. Man hat auch Mittel gefunden, die radioaktive Bestrahlung der Menschen zu messen, um rechtzeitig feststellen zu können, wann sie aus der gefährdeten Zone entfernt werden müssen.

Die Wirkung einer Strahlung ist proportional der absorbierten Energiemenge. Ein Maß für die Wirkung oder die „Dosis“, wie man sagt, ist das Röntgen (r). Ein Röntgen ist jene Strahlendosis, die bei der Einwirkung auf Luft von 0°C und 760 Torr je Kubikzentimeter Ionen beiderlei Vorzeichens im Betrag von je einer elektrostatischen Ladungseinheit erzeugt. Das entspricht einer absorbierten Energie von 83 erg/g Luft. Um Irrtümern vorzubeugen, sei darauf hingewiesen, daß das Röntgen kein Maß für die Intensität einer Strahlung, sondern ein Maß für die aus einer Strahlung absorbierte Energiemenge ist.

Durch eine große Anzahl von statistischen Untersuchungen und Tierversuchen hat man eine Vorstellung darüber erlangt, welche Dosis ein Mensch ständig aufnehmen kann, ohne daß selbst nach Jahrzehnten eine Schädigung festzustellen ist. Man nennt dies die Toleranzdosis. Man neigt heute dazu, die wöchentliche Toleranzdosis mit 0,3 r anzusetzen. Allerdings

gilt diese Größe nur für eine ständige und gleichmäßige Bestrahlung. Ist die Bestrahlung unterschiedlich, insbesondere zeitweilig recht stark, so ist die wöchentliche Toleranzdosis wesentlich kleiner.

Die Dosis der unter Strahleneinwirkung lebenden und arbeitenden Menschen wird überwacht. Jeder Mitarbeiter trägt ein Taschendosimeter bei sich. Das ist z.B. eine Filmplakette, in der lichtdicht ein Filmstreifen verpackt ist. Die radioaktive Strahlung schwärzt den Film. Die wöchentliche Entwicklung des Filmes läßt am Schwärzungsgrad die aufgenommene Dosis erkennen. Schöner, wenn auch nicht genauer, sind die Elektroskope. Diese Dosimeter haben die Gestalt eines Füllfederhalters, der ein Goldplattenelektrometer enthält. Das Elektrometer wird auf eine bestimmte Spannung aufgeladen, so daß die Goldplättchen den der Dosis 0 entsprechenden Abstand voneinander haben. Durch die Bestrahlung werden im Elektrometer Ionen gebildet, welche das Elektrometer entladen, so daß die Goldplättchen sich einander nähern. An einer eingebauten Skala kann man jederzeit die aufgenommene Dosis ablesen.

Um festzustellen ob an einem Arbeitsplatz ständig gearbeitet werden kann, mißt man mit Dosisleistungsmessern die dort herrschende Bestrahlungsstärke in Röntgen/Stunde. Die Dosisleistung oder Dosisrate muß kleiner als $0,006$ r/h sein, wenn an dem betreffenden Arbeitsplatz ständig gearbeitet werden soll. Ist die Dosisrate größer, so ist eine Einschränkung der Arbeitszeit erforderlich.

Viel größer als die äußere Strahlenschädigung ist die Schädigung durch radioaktive Stoffe, die in den Körper gebracht wurden. Die radioaktiven Atome werden im Gewebe fest eingebaut und entfalten lange Zeit ihre zerstörende Wirkung. Daher muß die direkte Berührung mit der ungeschützten Hand vermieden werden (Gummihandschuhe). Ferner ist das Mitnehmen von Esswaren, Kosmetika und Tabakwaren in aktive Räume, in denen mit offenen radioaktiven Präparaten gearbeitet wird, verboten.

Die Strahlenquellen von Füllstandsmeßanlagen sind nach der von der Meßstrecke abgewandten Richtung durch dicke Blei- oder Betonschichten gut abgeschirmt. Dennoch muß eine radioaktive Füllstandsmeßanlage deutlich gekennzeichnet sein. An der Anlage darf keine Arbeit ohne Genehmigung des Strahlenschutzbeauftragten vorgenommen werden.

6.5 Zusammenfassung

Bei der Füllstandsmessung mit radioaktiven Isotopen kennt man zwei wesentliche Verfahren: Die Durchstrahlungsmethode und die Nachlaufmethode. Die Durchstrahlungsmethode beruht darauf, daß radioaktive Strahlung beim Durchgang durch die Materie geschwächt wird. In der Füllstandsmeßanlage wird das Meßgut in seiner ganzen Höhe durchstrahlt und die Intensitätsabnahme mit einer Ionisationskammer gemessen. Bei der Nachlaufmethode werden Strahlenquelle und Strahlenempfänger durch zwei gleichlaufende Spindeln zu beiden Seiten des Behälters immer in der Höhe des Flüssigkeitsspiegels gehalten. Das wird durch einen Servomotor erreicht. Die Genauigkeit der letzten Methode ist sehr hoch.

Wegen der sich unbemerkt einstellenden Schäden, besonders in den Geweben, die eine rasche Zellteilung erleiden, darf die Toleranzdosis von 0,3 r/Woche nicht überschritten werden.

Kontrollfragen:

1. Welche Methoden der elektrischen Fernübertragung kennen Sie? Schätzen Sie den Aufwand beim Eigenbau ab.
2. Nennen Sie einige Verfahren zur Füllstandsmessung in unzugänglichen Hochdruckbehältern und schätzen Sie für verschiedene Betriebsbedingungen deren Vor- und Nachteile ab.
3. Vergleichen Sie die hydrostatische mit der kapazitiven Füllstandsmessung hinsichtlich der Genauigkeit und der Kosten.

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

KUNZMANN

BETRIEBSMESS- TECHNIK

8

DURCHFLUSSMESSTECHNIK I

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1004-08/61

Herausgeber:
Ingenieurschule für Feinwerktechnik
Jena

Betriebsmeßtechnik

Lehrbrief 8
Durchflußmeßtechnik I

von

Dipl. - Phys. Kunzmann

1. Auflage

1961

Zentralstelle für Fachschulausbildung
– Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie –
Dresden

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Ag 616/ 222/61

Best.-Nr.1004-08/61

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

Seite

Einleitung	3
1. Grundbegriffe der Strömungslehre	4
1.1 Viskosität	4
1.2 Laminare Strömung	6
1.3 Die Grenzschicht	10
1.4 Reynoldssche Zahl und Turbulenz	12
1.5 Ideale Strömung	15
1.6 Zusammenfassung	21
2. Durchflußmessung mit dem Staurohr	23
2.1 Theorie des Meßverfahrens	23
2.2 Das Prandtlsche Staurohr	26
2.3 Bestimmung des Durchflusses	28
2.4 Zusammenfassung	31
3. Durchflußmessung mit genormten Drosselgeräten	32
3.1 Die Normblende	32
3.2 Die Normdüse	35
3.3 Die Normventuridüse	37
3.4 Durchflußgleichung	39
3.5 Die Größen der Durchflußgleichung	42
3.6 Voraussetzungen für die Gültigkeit der Durchfluß- gleichung	54
3.7 Auswahl der Drossel	56
3.8 Zusammenfassung	57
4. Nichtgenormte Drosselgeräte	59
4.1 Segmentblende	59
4.2 Spezialdrosseln für kleine Reynoldssche Zahlen	62
4.3 Zusammenfassung	66

Einleitung

Die Durchflußmeßtechnik umfaßt eine Reihe industrieller Verfahren zur Bestimmung der in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt strömenden Stoffmenge. Sie wird überall dort angewendet, wo in einem kontinuierlichen technologischen Prozeß eine ständige Kenntnis des Stoffflusses notwendig ist. Das ist besonders in der Chemieindustrie der Fall, wo die Reaktionspartner häufig in flüssiger Form immer in ganz bestimmten Verhältnissen kontinuierlich dem Reaktionsgefäß zugeführt werden. Eine weitere sehr wichtige Anwendung findet die Durchflußmeßtechnik in der betrieblichen Energiekontrolle. Dort wird der Verbrauch an Dampf, Heißwasser und Sole (Salzlösung von -20°C) gemessen. Diese zwei Beispiele sind aus einer großen Anzahl herausgegriffen. In dem Maße, wie die Automatisierung in der Industrie fortschreitet, werden der Durchflußmeßtechnik laufend neue Anwendungen erschlossen.

Bei der Durchflußmessung interessiert man sich entweder für das pro Zeiteinheit durch einen bestimmten Querschnitt strömende Stoffvolumen Q und spricht in diesem Falle vom Volumendurchfluß, oder man möchte die pro Zeiteinheit durchströmende Masse des Stoffes wissen, dann spricht man vom Massendurchfluß G . Es ist klar, daß die Dichte der Umrechnungsfaktor zwischen den beiden Durchflüssen ist: $G = \rho \cdot Q$. Weder G noch Q sind unmittelbar meßbar. Daher müssen diese Größen mittels gewisser Äußerungen der Strömung erfaßt werden. Daraus folgt, daß wir zum Verständnis der industriellen Meßverfahren einige Kenntnisse aus der Strömungslehre brauchen. Diese wollen wir uns zunächst verschaffen.

1. Grundbegriffe der Strömungslehre

Die Strömungslehre befaßt sich mit der Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen. Dabei ergeben sich für die Geschwindigkeiten, die wesentlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit in Gasen sind, sowohl für Gase als auch für Flüssigkeiten die gleichen Gesetze. Das rührt daher, daß in diesem Geschwindigkeitsbereich die Kompressibilität der Gase kaum in Erscheinung tritt und man nicht nur die Flüssigkeiten, sondern auch die Gase als inkompressibel betrachten kann. Im Abschnitt 2.1 werden wir an einem Beispiel sehen, bis zu welchen Geschwindigkeiten diese vereinfachte Darstellung brauchbar ist. Bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Schallgeschwindigkeit muß die Kompressibilität der Gase berücksichtigt werden. Bei der Kompression erwärmt sich das Gas. Daher sind zur Beschreibung der Strömung im oberen Geschwindigkeitsbereich die Gesetze der Wärmelehre erforderlich, und es besteht ein merklicher Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas. In der Durchflußtechnik der Gase treten so hohe Geschwindigkeiten tatsächlich auf, so daß wir uns gelegentlich auch mit diesem Fall zu beschäftigen haben.

Im folgenden betrachten wir allerdings nur Strömungen geringerer Geschwindigkeit und meinen dabei mit dem Wort "Flüssigkeit" auch jedes Gas, das sich wie eine Flüssigkeit verhält.

1.1 Viskosität

Eine ruhende Flüssigkeit übt nur Kräfte senkrecht zur Wand aus, während eine bewegte auch tangentiale Kräfte in Bewegungsrichtung überträgt. Wie beim Aneinandergleiten fester Körper werden die tangentialen Kräfte durch die Reibung verursacht.

Will man z.B. in einer Flüssigkeit parallel zu einer ebenen Wand im Abstand z eine ebene Platte mit der konstanten Geschwindigkeit v bewegen, so ist dazu eine antreibende Kraft K erforderlich. Diese Kraft muß umso größer sein, je größer

die Fläche F und die Geschwindigkeit v ist. Sie ist aber umso kleiner, je größer der Abstand z ist. Dieser Sachverhalt in eine Formel gekleidet lautet:

$$K = \eta \cdot F \cdot \frac{v}{z}.$$

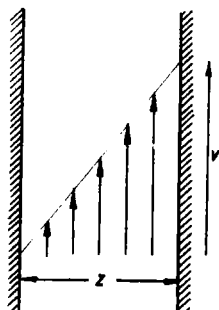


Abb. 1 Zur Definition der Viskosität

Die Größe η stellt einen Proportionalitätsfaktor dar, der bei jeder Flüssigkeit einen anderen Wert hat. Man nennt η den Koeffizienten der inneren Reibung oder die dynamische Zähigkeit oder die Viskosität. Die Dimension dieser Größe ist

$$(\eta) = \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}.$$

Die Einheit der Viskosität ist das Poise. Es ist folgendermaßen definiert:

$$1 \text{ Poise} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{sec}}.$$

Damit Sie eine Vorstellung von dieser Einheit bekommen, sei gesagt, daß die Viskosität von Äthyläther etwa 0,0025, von Wasser etwa 0,01 und von Olivenöl etwa 1 Poise ist. Die Schmelzen hochpolymerer Stoffe haben 100 - 1000 Poise.

Die einfache Gleichung $k = \eta \cdot F \cdot \frac{v}{z}$ ist allerdings in ihrer Anwendung auf ebene Strömungen beschränkt. Man könnte mit ihr schon den einfachen Fall, daß sich zwei konzentrische Zylinder gegeneinander verschieben, nicht mehr beschreiben. Wir müssen also eine allgemeingültige Form finden. Wir nehmen an, eine beliebig geformte Fläche F werde mit einer Geschwindigkeit v gegen eine wiederum beliebige Wand verschoben. Ein bestimmter Punkt der Fläche habe von einem bestimmten Punkt der Wand den Abstand z . Um die Bewegung aufrecht zu erhalten, bedarf es der Kraft K . Nun vergrößern wir den Abstand der Fläche von der Wand um das sehr kleine Stück dz , verändern aber

die antreibende Kraft nicht. Die Reibung ist jetzt geringer, und die Geschwindigkeit nimmt um den winzigen Betrag dv zu. Da die Änderung sehr klein war, hat sich an den geometrischen Verhältnissen nichts merklich geändert. Ferner ist die Abstandsänderung so klein, daß auf die Größenordnung dieser Änderung die Fläche an jeder Stelle als eben angesehen werden kann. Damit ist für diese kleine Änderung unsere alte Gleichung gültig. Sie lautet jetzt:

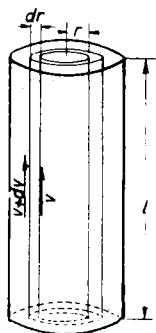
$$K = \eta \cdot F \cdot \frac{dv}{dz}$$

Das ist die allgemeine Definitionsgleichung für die Viskosität. Mit ihrer Hilfe kann man durch Integration auch gekrümmte Strömungen berechnen. Wir werden sie im folgenden Abschnitt zur Berechnung der Strömung durch ein enges Rohr heranziehen.

1.2 Laminare Strömung

Eine Strömung, in der sich alle Flüssigkeitsteilchen parallel zu einander bewegen und ihren Abstand von der Wand beibehalten, nennt man eine schlichte oder laminare Strömung. Eine solche Strömung wird im wesentlichen durch die innere Reibung bestimmt. Wir werden später sehen, daß es auch Strömungen gibt, in denen die innere Reibung praktisch gar keine Rolle spielt. Die Bewegung zäher Flüssigkeiten wird aber hauptsächlich durch die Viskosität bestimmt. Auch die Strömung weniger zäher Flüssigkeiten durch enge Spalte oder Kapillaren hängt hauptsächlich von der Zähigkeit ab. Wir betrachten den wichtigen Fall der Kapillarströmung etwas näher und üben an diesem Beispiel gleichzeitig die mathematische Anwendung der allgemeinen Definitionsgleichung für die Viskosität. Unser Rohr habe die Länge l und den Radius R . Die Strömung werde durch einen Druckunterschied Δp an den Rohrenden aufrechterhalten. Die Flüssigkeit benetzt das Rohr und haftet daher an der Rohrwand. Die Geschwindigkeit ist dort $v = 0$. Jede Flüssigkeitsschicht reibt sich an der benachbarten. Also nimmt die Geschwindigkeit nach der Rohrachse hin zu. Sie hat demnach in

der Rohrachse ihren größten Wert. Vor uns steht nun die Aufgabe, die Geschwindigkeitsverteilung zu berechnen. Zu diesem Zweck betrachten wir eine Flüssigkeitsschicht, die sich zwischen zwei gedachten Zylindern mit den Radien r und $r + dr$ befindet. Der Zylinder mit dem Radius r hat die Geschwindigkeit $v + dv$, derjenige mit dem Radius $r + dr$ hat die Geschwindigkeit v . Als antreibende Kraft wirkt die Druckdifferenz an den Rohrenden multipliziert mit der Fläche. Die Fläche des Zylinders hat die Größe $r^2 \pi$. Damit folgt für die antreibende Kraft der Wert:



$$K = r^2 \pi \Delta p \quad (1)$$

Abb. 2 Zur Herleitung der Hagen-Poiseuilleschen Gleichung

Die antreibende Kraft und die Reibungskraft sind dem Betrage nach gleich groß. Sie sind aber entgegengesetzt gerichtet. Die Reibungskraft kennen wir aus dem letzten Abschnitt. Sie ist:

$$K = \eta F \cdot \frac{dv}{dz} \quad (2)$$

Als Abstandsänderung dz steht mit unserer jetzigen Bezeichnung dr in der Gleichung. Die Fläche F ist gerade die Zylinderfläche:

$$F = 2r \pi l \quad (3)$$

Wir setzen nun (3) in (2) ein und bedenken, daß die Reibungskraft gleich der negativen Antriebskraft ist:

$$-r^2 \pi \Delta p = \eta 2r \pi l \cdot \frac{dv}{dr}$$

Daraus wird nach einer einfachen Vereinfachung:

$$-r \Delta p = \eta 2 l \cdot \frac{dv}{dr} \quad (4)$$

Aus (4) läßt sich die Geschwindigkeit als Funktion des Radius, also $v(r)$ bequem ausrechnen. Man braucht (4) nur mit dr zu multiplizieren und durch 2 η zu teilen. Dann erhält man die Gleichung:

$$dv = - \frac{\Delta p}{4 \eta} \cdot r dr$$

Diese Gleichung wird integriert:

$$\begin{aligned} v(r) &= - \frac{\Delta p}{4 \eta} \cdot \int r dr + C \\ &= - \frac{\Delta p}{8 \eta} \cdot r^2 + C \end{aligned}$$

C ist die noch zu bestimmende Integrationskonstante. Sie muß so eingerichtet werden, daß die Haftbedingung erfüllt wird, also die Geschwindigkeit an der Rohrwand verschwindet ($v(R) = 0$). Dieser Sachverhalt lautet:

$$v(R) = - \frac{\Delta p}{8 \eta} \cdot R^2 + C = 0$$

Daraus rechnet man C aus:

$$C = \frac{\Delta p}{8 \eta} \cdot R^2$$

Jetzt können wir den vollständigen Ausdruck für die Geschwindigkeitsverteilung angeben:

$$v(r) = \frac{\Delta p}{4 \eta} \cdot (R^2 - r^2) \quad (5)$$

Auf Bild 3 ist diese Geschwindigkeitsverteilung schematisch dargestellt. Die Geschwindigkeiten erscheinen als Vektoren, deren Spitzen auf einem Paraboloid liegen.

Wir interessieren uns aber nicht nur für die Geschwindigkeitsverteilung, sondern auch für den Durchfluß. Die Flüssigkeitsschicht zwischen

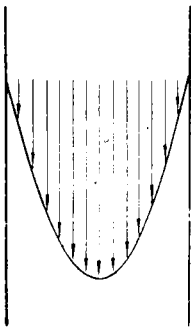


Abb. 3 Geschwindigkeitsverteilung bei laminarer Strömung

den beiden gedachten Zylindern mit den Radien r und $r + dr$ bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v(r)$. Der Querschnitt dieser Schicht ist $2r \pi dr$. Sie bewegt sich in der Zeit t um die Strecke $v(r) \cdot t$ und befördert in dieser Zeit den Volumenanteil:

$$dV = 2r \pi dr \cdot v(r) \cdot t = 2r \pi dr \cdot \frac{\Delta p}{4l\eta} \cdot (R^2 - r^2) \cdot t$$

Diese Gleichung wird integriert:

$$V = \frac{\pi \Delta p \cdot t}{2l\eta} \cdot \int_0^R (rR^2 - r^3) dr = \frac{\pi \Delta p t}{2l\eta} \cdot \left(\frac{R^2}{2} \cdot R^2 - \frac{R^4}{4} \right) = \frac{\pi \cdot \Delta p R^4}{8 \cdot l \eta} \cdot t$$

Das durch das Rohr pro Zeiteinheit fließende Volumen (der Volumendurchfluß) ist demnach:

$$Q = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\Delta p \cdot R^4}{l \eta} \quad (6)$$

Die Gleichung (6) heißt die "Hagen-Poiseuillesche Gleichung". Sie stellt die erste Durchflußgleichung dar, die wir gefunden haben. Sie gilt allerdings nur dann, wenn ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt von einer Flüssigkeit laminar durchströmt wird. Im nächsten Abschnitt werden wir sehen, wann eine Strömung laminar sein kann.

Trotzdem wollen wir uns jetzt schon merken, wann die Hagen-Poiseuillesche Gleichung verwendet werden kann: Bei sehr engen Kapillaren und bei sehr zähen Flüssigkeiten, bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Zur Durchflußmessung kann man die Hagen-Poiseuillesche Gleichung ausnutzen, wenn man den Druckabfall an einer Kapillaren messen kann. In Sonderfällen kann das einmal erforderlich sein; eine übliche Durchflußmessung stellt dieses Verfahren allerdings nicht dar.

1.3 Die Grenzschicht

Die bisher behandelten Strömungsformen wurden allein durch die innere Reibung bestimmt. Als wesentliche Voraussetzung für die Herleitung der Hagen-Poiseuilleschen Gleichung haben wir ferner das Bestreben der Flüssigkeit, an einer Wand haften zu bleiben, gebraucht. Eine interessante Überlegung zum Abschnitt 1.1 wird uns jedoch zeigen, daß damit unmöglich alle Strömungsformen erfaßt sein können.

Wir betrachten noch einmal Bild 1 und fragen einmal nach der Arbeit, die man leisten muß, um die Platte, die die Länge 1 haben möge, gerade um die Strecke 1 parallel zur Wand zu verschieben. Die Arbeit ist offensichtlich Kraft mal Weg, also:

$$A = K \cdot l = \eta F \cdot \frac{v}{z} \cdot l$$

Mit dieser Arbeit führen wir der Strömung Energie zu. Nun steht die Frage offen, wo diese Energie bleibt. Verschwinden kann sie ja nach dem Satz über die Erhaltung der Energie nicht. Durch die Bewegung der Platte bewegen wir allerdings auch die ganze zwischen Platte und Wand existierende Flüssigkeitsschicht. Ohne Zweifel müssen wir die kinetische Energie zur Bewegung dieser Schicht durch die zugeführte Arbeit aufbringen. Die Strömungsgeschwindigkeit in dieser Schicht nimmt vom Wert 0 an der Wand bis zum Wert v an der Platte linear zu. Um rechnen zu können, teilen wir diese Schicht in lauter hauchdünne Teilschichten parallel zur Wand ein. Eine Teilschicht im Abstand x von der Wand hat dann die Geschwindigkeit $v_x = \frac{v}{z} \cdot x$. Ihre Dicke ist dx , und ihre Masse ist $\rho \, dx F$ (ρ = Dichte der Flüssigkeit). Diese dünne Teilschicht liefert einen kleinen Beitrag zur kinetischen Energie der Gesamtschicht. Die kinetische Energie ist ja $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot (\text{Masse}) \cdot (\text{Geschwindigkeit})^2$. Damit wird der Beitrag der Teilschicht:

$$dE_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \, dx F v_x^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \, dx F v^2 \cdot \frac{x^2}{z^2}$$

Wenn wir die Beiträge aller Teilschichten addieren, also über alle x von 0 bis z integrieren, erhalten wir die kinetische

Energie der ganzen zwischen Wand und Platte liegenden Flüssigkeitsschicht:

$$E_{\text{kin}} = \int_0^z \frac{\rho F v^2}{2z^2} \cdot x^2 dx = \frac{\rho F v^2}{2z^2} \cdot \frac{z^3}{3} = \frac{1}{6} \cdot F z v^2 \rho$$

Neben der Bewegung der Flüssigkeitsschicht wird durch Reibung noch Wärme erzeugt. Auch die Wärmeenergie kann nur aus der von uns durch die Bewegung der Platte zugeführten Arbeit stammen. Die zugeführte Arbeit ist demnach auf jeden Fall größer als die kinetische Energie. Diesen Sachverhalt drücken wir in der Ungleichung aus:

$$\eta F l \cdot \frac{v}{z} > \frac{1}{6} \cdot F z v^2 \rho$$

In diesem Ausdruck kürzen wir F und v , stellen ein wenig um und ziehen schließlich die Wurzel. Dann erhalten wir:

$$z < \frac{1 \cdot \sqrt{6}}{\sqrt{\frac{\rho l v}{\eta}}} \quad (7)$$

Dieses Ergebnis muß man sich ein wenig genauer anschauen, wenn man überhaupt etwas an ihm verstehen will. Der Abstand zwischen Platte und Wand darf eine gewisse Größe nicht überschreiten. Das ist recht eigenartig, zumal man experimentell jeden beliebig großen Abstand herstellen kann. Interessant ist die Größe des maximalen Abstandes von (7). Nehmen wir an, wir möchten eine Platte von 5 cm Länge im Wasser ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $\eta = 0,01 \text{ g/cm sec}$) mit einer Geschwindigkeit von 2 cm/sec parallel zu einer Wand bewegen. Dann finden wir aus der Ungleichung (7) als grössten Abstand $z_{\text{max}} = 0,38 \text{ cm}$. Bis zu diesem grössten Abstand ist die Strömung zwischen Platte und Wand laminar. Für größere Abstände kann die Strömung nicht mehr laminar sein, weil die Ungleichung (7), die eine unmittelbare Folgerung aus der Laminarität einer Strömung darstellt, nicht erfüllt ist. Wie man sieht, ist z_{max} eine recht kleine Größe. Hätten wir mit einer größeren Geschwindigkeit gerechnet, so

wäre z_{\max} noch kleiner ausgefallen.

Man kann also sagen, daß nur in unmittelbarer Nähe der Oberfläche eines sich in der Strömung befindenden Körpers die Strömung durch die innere Reibung bestimmt wird. In dieser Flüssigkeitsschicht werden die Reibungskräfte wirksam und entstehen die Strömungsverluste. Man nennt diese dünne Flüssigkeitsschicht an der Oberfläche eines umströmten Körpers die Grenzschicht. Ihre Dicke liegt nach obiger Abschätzung in der Größenordnung $1,16 \sqrt{\frac{\eta l v \rho}{\rho}}$. Außerhalb der Grenzschicht ist die Strömung offensichtlich anders geartet und muß von der inneren Reibung im wesentlichen unabhängig sein. Die Dicke der Grenzschicht hängt von der Geschwindigkeit und von der Viskosität der strömenden Flüssigkeit ab. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist, umso dünner ist die Grenzschicht. Je größer die Viskosität der strömenden Flüssigkeit ist, umso größer ist die Dicke der Grenzschicht.

1.4 Reynoldssche Zahl und Turbulenz

Die Dicke der Grenzschicht enthält unter der Wurzel eine merkwürdige Größe, die nach ihrem Entdecker Reynolds die Reynoldssche Zahl genannt wird:

$$Re = \frac{\rho l v}{\eta}.$$

Zunächst wollen wir uns davon überzeugen, daß diese Größe tatsächlich eine Zahl, also dimensionslos ist. Wir messen die Dichte in g/cm^3 , die Länge in cm, die Geschwindigkeit in cm/sec und schließlich die Viskosität in g/cm sec . Setzen wir diese Einheiten ein, so kürzen sie sich tatsächlich alle heraus und wir behalten eine reine dimensionäre Zahl übrig.

Zunächst möchte man glauben, die Reynoldssche Zahl sei entsprechend der Art, wie wir sie gewonnen haben, nur für ebene Platten der Länge l in einer Strömung der Geschwindigkeit v sinnvoll definiert. Das ist aber gar nicht der Fall. Man braucht in Re für die Länge l nur irgendeine charakteristi-

sche Länge einzusetzen. Schreibt man dazu, was man als charakteristische Länge betrachtet hat, so ist die erhaltene Reynoldssche Zahl jederzeit verwendbar und sinnvoll definiert. Betrachtet man die Strömung durch ein Rohr, so wird man den Rohrdurchmesser als charakteristische Länge einführen. Betrachtet man die Umströmung eines Schiffsrumpfes, so erscheint die Länge des Schiffes als brauchbare charakteristische Länge. Die Wahl wird ganz durch das Problem bestimmt. Das gleiche trifft für die Geschwindigkeit zu. Man wählt eine für die Strömung charakteristische Geschwindigkeit. Auf Grund dieser etwas willkürlichen Verwendung der Reynoldsschen Zahl, kann man natürlich für eine Strömung zwei Reynoldssche Zahlen nur dann vergleichen, wenn für beide die gleichen charakteristischen Größen verwendet werden.

Es leuchtet sofort ein, daß man an geometrisch ähnlichen Strömungen gleicher Reynoldsscher Zahl auch gleiche Beobachtungsergebnisse gewinnen wird (Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz). Darin liegt die besondere Bedeutung der Reynoldsschen Zahl. Man kann an einem kleinen Modell feststellen, wie sich das große Original verhalten wird. Man muß nur durch geeignete Wahl der Dichte und Viskosität der Versuchssflüssigkeit und durch passende Wahl der Strömungsgeschwindigkeit erreichen, daß die Reynoldssche Zahl im Versuch die gleiche wie im Originalfall ist. Auf diese Weise kann man an kleinen Schiffsmodellen erkennen, wie sich das fertige Schiff einmal verhalten wird und kann die Konstruktion nach diesen Erkenntnissen verbessern. In der Durchflußmeßtechnik kann man die mit einem Meßgerät bei einem Rohrdurchmesser gewonnenen Ergebnisse mit Hilfe der Reynoldsschen Zahl sofort auf andere Durchmesser übertragen.

Die Reynoldssche Zahl gestattet uns aber noch eine theoretisch wichtige Aussage über eine gegebene Strömung. Um diese Aussage zu erhalten, führen wir eine Dimensional Betrachtung durch. Dabei legen wir keinen Wert auf zahlenmäßige Richtigkeit, sondern setzen für jede Länge gleich die charakteristische ein. Eine Fläche wird einfach das Quadrat der charakteristischen Länge, ein Volumen deren 3. Potenz. In dieser

Schreibweise wird aus der Reibungsarbeit, die wir aus Abschnitt 1.3 in der Form $A_r = \eta \text{Flv}/l$ kennen, der einfache Ausdruck $A_r = \eta l^2 lv/l = \eta l^2 v$. Die kinetische Energie der Flüssigkeit oder, wie man auch sagen kann, die Beschleunigungsarbeit ist $A_b = \frac{m}{2} v^2$. Die Masse schreiben wir als Volumen mal Dichte und den Zahlenfaktor 1/2 lassen wir weg. Dann bleibt übrig $A_b = \rho l^3 v^2$. Wenn wir nun A_b durch A_r teilen, so ergibt sich:

$$\frac{A_b}{A_r} = \frac{\text{Beschleunigungsarbeit}}{\text{Reibungsarbeit}} = \frac{\rho l^3 v^2}{\eta l^2 v} = \frac{\rho l v}{\eta} = \text{Re}$$

Die Reynoldssche Zahl ist also gerade das Verhältnis von Beschleunigungsarbeit zu Reibungsarbeit. Wenn also die Reynoldssche Zahl einer Strömung ⁸⁴⁶¹⁴ klein sein soll, so muß die Beschleunigungsarbeit überwiegen. Das heißt mit anderen Worten, daß ein Strömungsvorgang mit kleiner Reynoldsscher Zahl im wesentlichen durch die innere Reibung bestimmt wird, während ein Strömungsvorgang mit großer Reynoldsscher Zahl im wesentlichen durch das Lewtonsche Trägheitsprinzip "Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung" bestimmt wird und von der inneren Reibung so gut wie unabhängig ist. In das Gebiet der laminaren Strömung fallen demnach nur Strömungsvorgänge mit kleiner Reynoldsscher Zahl. Bei großen Reynoldsschen Zahlen, d.h. bei großen Strömungsgeschwindigkeiten wird die ruhige Strömung der Grenzschicht gestört. Die Grenzschicht wird sehr dünn (ihre Dicke ist ja $1/\sqrt{\text{Re}}$), und damit steigt das Geschwindigkeitsgefälle in ihr stark an. Daher kommt es auf Grund der Trägheit der Flüssigkeitsteilchen vor, daß aus dem Inneren der Grenzschicht Teilchen mit geringer Geschwindigkeit sich lösen und mit fortgerissen werden. Dabei geraten sie in Rotation und bewegen sich in unkontrollierbarer Weise. Schnelle Teilchen dringen in die Grenzschicht ein und verstärken die Zerstörung. Infolge der Rotation der losgerissenen Teilchen, zu deren Erzeugung der Strömung Energie entzogen wird, verringert sich plötzlich die Strömungsgeschwindigkeit. Es sieht so aus, als würde ein zusätzlicher Strömungswiderstand einge-

schaltet. Man sagt, die Strömung ist turbulent geworden. Dieser Umschlag der laminaren in die turbulente Strömung erfolgt bei einer bestimmten Reynoldsschen Zahl, die man die kritische Reynoldssche Zahl nennt. Natürlich hängt diese kritische Zahl von der Strömungsform ab. In einem glatten Rohr ist mit dem Durchmesser als charakteristische Länge $Re_{krit} = 1200$. Je rauher die Rohrwand ist, umso kleiner ist Re_{krit} . Es gibt zwar verzwickte Näherungsverfahren, mit Hilfe derer man aus den Grunddifferentialgleichungen der Strömungslehre die kritische Reynoldssche Zahl annähernd berechnen kann. Diese mühsam gewonnenen Ergebnisse sind aber immer noch unzuverlässiger als das Experiment. Deshalb wird die kritische Reynoldssche Zahl für die einzelnen Strömungsformen experimentell bestimmt.

1.5 Ideale Strömung

Flüssigkeiten, deren innere Reibung vernachlässigt werden kann, nennt man ideale Flüssigkeiten. Diese Bezeichnung ist natürlich an eine bestimmte Strömungsform gebunden. Bei der Durchströmung einer dünnen Kapillare spielt die innere Reibung des Wassers die ausschlaggebende Rolle. In diesem Falle ist also das Wasser alles andere als eine ideale Flüssigkeit. Bei der Umströmung einer großen Kugel spielt in einem größeren Abstand von der Kugel (weit außerhalb der Grenzschicht) die innere Reibung gar keine Rolle mehr. In diesem Falle ist das Wasser als ideale Flüssigkeit anzusehen. Die Strömungsform einer idealen Flüssigkeit nennt man ideale Strömung.

Zur Beschreibung einer solchen Strömung hat man eine anschauliche Darstellung erfunden. Man beschreibt sie durch ein System von Linien, längs derer die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen erfolgt. Diese Linien nennt man Stromlinien, und das Liniensystem, das die ganze Strömung kennzeichnet, heißt das Strömungsfeld. In einer "stationären Strömung", in der an jeder Stelle die Flüssigkeit sich mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt, kann man die Stromlinien gut durch kleine Schwei-

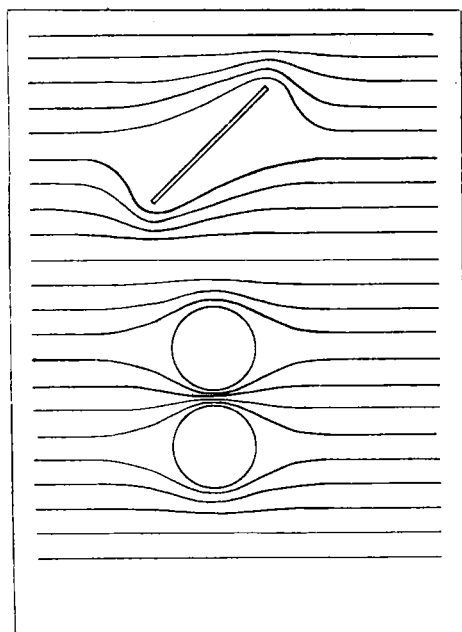


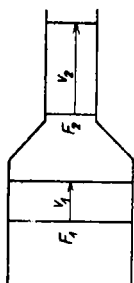
Abb. 4 Strömungsfeld einer schräg
angeströmten Platte und
zweier benachbarter Kugeln

beteilchen, etwa Aluminiumflitterchen, sichtbar machen. An den Stellen, an denen sich die Flüssigkeit schnell bewegt, sind die Stromlinien dicht gedrängt und in Gebieten langsamer Bewegung liegen sie weit auseinander. Da längs einer Stromlinie eine ganz bestimmte Flüssigkeitsmenge bewegt wird, und diese weder aus dem Nichts entstehen kann noch ins Nichts verschwindet, beginnt eine Stromlinie immer an einer Quelle (das ist ein Ort, an dem Flüssigkeit in das Strömungsfeld gelangt) und endet immer an einer Senke (das ist ein Ort,

an dem Flüssigkeit aus dem Strömungsfeld wegfließt). Stromlinien können sich nicht schneiden, da sonst im Schnittpunkt gleichzeitig zwei verschiedene Flüssigkeitsmengen in einem Raum enthalten sein müßten, der nur eine von beiden fassen kann. Auf Bild 4 sind die Strömungsfelder einer schräg umströmten Platte und zweier benachbarter Kugeln dargestellt. Aus der Dichte der Stromlinien (oder wenn Sie wollen aus deren Abstand) kann man die Strömungsgeschwindigkeit entnehmen. Sie ist genau proportional der Stromliniendichte.

Die Kontinuitätsgleichung

Wenn wir die strömenden Medien als inkompressibel betrachten, können wir leicht eine Aussage über das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten beim Durchgang eines Stromes durch verschiedene Querschnitte machen. Bewegt sich durch die Fläche



Fläche F_1 die Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit v_1 , so wird pro Zeiteinheit das Volumen $F_1 v_1$ bewegt. Das gleiche Volumen muß in dieser Zeit auch durch die Fläche F_2 strömen. Die Geschwindigkeit ist dort v_2 und das pro Zeiteinheit bewegte Volumen $F_2 v_2$. Somit muß folgende Beziehung gültig sein:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2$$

Diese Gleichung heißt die Kontinuitätsgleichung. Im Falle kompressibler Medien kann man nicht mehr die Konstanz des Volumens voraussetzen. Mit der Dichte ändert sich auch das Volumen.

Abb. 5

Zur Herleitung der Kontinuitätsgleichung

Konstant bleibt aber die Masse. Durch den Querschnitt F_1 wird in der Zeiteinheit die Masse $F_1 v_1 \rho_1$ bewegt. In dieser Zeit fließt durch die Fläche F_2 die Masse $F_2 v_2 \rho_2$. Wenn diese beiden Massen gleich sein sollen, muß also folgende Gleichung gelten:

$$F_1 v_1 \rho_1 = F_2 v_2 \rho_2$$

Das ist die Kontinuitätsgleichung für kompressible Medien.

Die Bernoullische Gleichung

Nach der Kontinuitätsgleichung verhalten sich die Strömungsgeschwindigkeiten umgekehrt wie die durchströmten Querschnitte. Wenn eine Flüssigkeit eine Rohrverengung passiert, wächst mithin ihre Geschwindigkeit. Sie wird also auf dem Wege vom weiten in den engen Rohrabschnitt beschleunigt. Diese Beschleunigung kann nur die Folge einer Kraft sein, die auf

diesem Wege Arbeit geleistet hat. Die kinetische Energie der Flüssigkeit wird vergrößert. Woher kommt diese Energiezufuhr? Welche Kraft hat Arbeit geleistet? Außer der Bewegungsenergie enthält die Flüssigkeit durch ihren statischen Druck potentielle Energie. Der Druck p verleiht einem Flüssigkeitsvolumen V die potentielle Energie pV . Es kann also nur der Druck die Beschleunigung verursacht haben. Er muß demnach in der schneller strömenden Flüssigkeit geringer sein.

Wir wollen nun diese Überlegung exakt mathematisch formulieren. In einem konischen Rohr ströme die Flüssigkeit in Richtung der Verjüngung. Wir betrachten ein so schmales Flüssigkeitsvolumen, daß an ihm die Verjüngung gar nicht mehr wahrgenommen werden kann. Der Querschnitt dieses Volumens sei F und die Dicke dx . Die Größe des Volumens ist dann Fdx . Die-

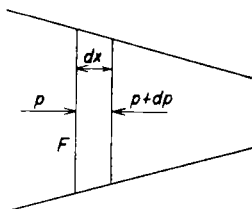


Abb. 6

Zur Herleitung der Bernoullischen Gleichung

ser schmale Flüssigkeitsstreifen bewegt sich mit der Geschwindigkeit v und legt in der Zeit dt gerade die Strecke dx zurück, so daß $dx = vdt$ wird. Auf der einen Seite des Flüssigkeitsstreifens herrsche der Druck p und auf der anderen der Druck $p + dp$. Der eine Druck überträgt die Kraft pF , der andere überträgt die Kraft $(p + dp)F$ auf das Volumen. Da diese beiden Kräfte entgegengesetzt gerichtet sind, wirkt als Resultierende ihre Differenz $pF - (p + dp)F = -dpF$ in Strömungsrichtung. Ob

der Druck ab- oder zunimmt, brauchen wir dabei gar nicht zu wissen. Wir müssen nur im Gebrauch der mathematischen Symbole konsequent sein. An der Stelle x herrscht eben der Druck p , und an der Stelle $x + dx$ herrscht der Druck $p + dp$. Dabei wirkt p in Strömungsrichtung und $p + dp$ entgegengesetzt. Wollen wir die Resultierende in Strömungsrichtung haben, so müs-

sen wir von der Größe, die diese Richtung hat, die entgegengesetzt gerichtete abziehen. Das Resultat bezieht sich dann auf die Strömungsrichtung. Wenn der Druck $p + dp$ tatsächlich kleiner als der Druck p ist, wie wir nach unserer ersten Überlegung annehmen möchten, so wird eben dp eine negative Größe. Das muß die richtige Rechnung automatisch bringen.

Auf das kleine Volumen wirkt also die Kraft $-dpF$ in Strömungsrichtung. Diese Kraft beschleunigt die Masse, die das Volumen enthält. Das Prinzip "Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung" lautet somit in unserem Fall:

$$-dp \cdot F = \rho F v dt \cdot \frac{dv}{dt}$$

Die Fläche und dt kann man kürzen, so daß bleibt:

$$-dp = \rho v dv$$

Diese Gleichung integrieren wir:

$$-\int_{p_1}^{p_2} dp = \int_{v_1}^{v_2} \rho v dv$$

$$-(p_2 - p_1) = \rho \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right)$$

Bei der Integration haben wir ρ als eine Konstante betrachtet. Die Umstellung liefert:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2$$

Diese Gleichung heißt die Bernoullische Gleichung. In dieser Form ist sie für inkompressible Medien gültig und sagt aus, daß an jeder beliebigen Stelle einer Strömung, sofern nur alle diese Stellen von denselben Stromlinien begrenzt werden, die Summe $p + \frac{\rho}{2} v^2$ denselben Wert hat. Man nennt den Wert dieser Summe den Gesamtdruck, p den statischen Druck und die Größe $\frac{\rho}{2} v^2$, die natürlich ebenfalls die Dimension Kraft/Fläche hat, den dynamischen oder Staudruck. Damit kann man den

Inhalt der Bernoullischen Gleichung folgendermaßen formulieren:

In einem von Stromlinien begrenzten Ausschnitt aus einer idealen Strömung ist die Summe aus statischem und dynamischem Druck eine vom Ort unabhängige Konstante.

Wenn Sie sich die Bernoullische Gleichung mit dem Volumen multipliziert denken, so steht genau der mechanische Energiesatz für deformierbare Medien dort: Die Summe aus kinetischer Energie und potentieller Energie ist eine Konstante. Dieser Formulierung sieht man sofort an, daß die Bernoullische Gleichung nur für reibungsfreie Strömungen gültig ist.

Bei der Anwendung der Bernoullischen Gleichung ist auf die Einheiten zu achten. Setzt man die Dichte in g/cm^3 und die Geschwindigkeit in cm/sec ein, so muß als Einheit des Druckes dyn/cm^2 gewählt werden. Für die Einheiten des Druckes bestehen folgende Umrechnungsgleichungen: $1 \text{ dyn/cm}^2 = 1,0197 \cdot 10^{-6} \text{ kp/cm}^2 = 0,75006 \cdot 10^{-3} \text{ Torr} = 1,0197 \cdot 10^{-2} \text{ mm WS} = 10^{-6} \text{ Bar}$.

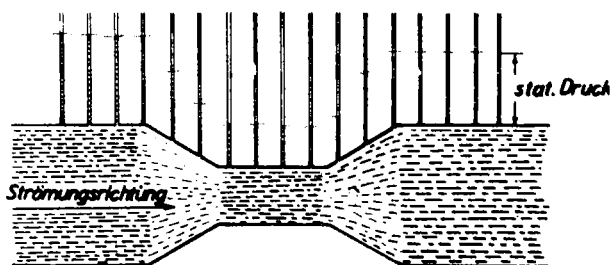


Abb. 7

Veranschaulichung der Bernoullischen Gleichung

Wir müssen uns nun noch eine Gleichung verschaffen, die das Newtonsche Prinzip "Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung" auch für kompressible Medien ausdrückt.

Bei der Herleitung der Bernoullischen Gleichung wandten wir das Newtonsche Prinzip auf ein Volumenelement an und fanden:

$$- dp = \rho v dv$$

In dieser Gleichung ist die Voraussetzung der Inkompressibilität noch nicht enthalten. Betrachten wir die Dichte nicht als eine Konstante, sondern als eine druckabhängige Größe (ρ) und integrieren nun, so gewinnen wir eine Gleichung für kompressible Medien:

$$-\frac{dp}{\rho(p)} = v dv$$

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho(p)} = \int_{v_1}^{v_2} v dv$$

Natürlich kann man das linke Integral nicht ausrechnen, wenn die Druckabhängigkeit der Dichte unbekannt ist. Da diese Abhängigkeit von Fall zu Fall verschieden sein kann, lassen wir das Integral vorläufig stehen und finden somit:

$$\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho(p)}$$

Das ist die Bernoullische Gleichung für kompressible Medien. In den meisten Fällen ist die Funktion $\rho(p)$ durch die Gleichungen für eine adiabatische Zustandsänderung gegeben.

1.6 Zusammenfassung

Unter einem Volumendurchfluß versteht man das pro Zeiteinheit durch einen bestimmten Querschnitt hindurchtretende Volumen einer flüssigen oder gasförmigen Substanz. Unter einem Gewichtsdurchfluß versteht man entsprechend die Masse der pro Zeiteinheit durchströmenden Stoffmenge. Mit der Dichte ρ gilt die Beziehung $G = \rho \cdot Q$. Da diese Größen nicht unmittelbar meßbar sind, müssen mittelbare Verfahren auf Grund der Strömungsgesetze erarbeitet werden.

Es gibt zwei extreme Strömungsformen:

1. Die laminare Strömung

Sie wird im wesentlichen durch die innere Reibung bestimmt. Das Maß der inneren Reibung ist die Viskosität, die durch die Gleichung $K = \eta F dv/dz$ definiert ist. Die Einheit der Viskosität ist das Poise. 1 Poise = 1 g/cm sec. Ein wichtiges Beispiel für eine laminare Strömung ist die Durchströmung einer Kapillaren. Hier ist der Volumendurchfluß proportional der 4-ten Potenz des Radius und der Druckdifferenz an den Rohrenden und umgekehrt proportional der Rohrlänge und der Viskosität. In weiten Rohren wird nur die Strömung in der wandnahen Grenzschicht durch die innere Reibung bestimmt. Die Dicke der Grenzschicht liegt in der Größenordnung $1/\sqrt{Re}$. Dabei nennt man $Re = \rho lv/\eta$ die Reynoldssche Zahl. Strömungen gleicher Reynoldsscher Zahlen verhalten sich gleich. Die Reynoldssche Zahl stellt den Quotienten aus Beschleunigungsarbeit und Reibungsarbeit dar. Deshalb überwiegen oberhalb der kritischen Reynoldsschen Zahl die Beschleunigungskräfte, die laminare Strömung wird gestört und geht in eine turbulente über. Dabei steigt der Strömungswiderstand an. Die kritische Reynoldssche Zahl ist umso kleiner, je rauher die Wände sind, die die Strömung begrenzen. Sie ist für kreisrunde Rohre etwa 1200.

2. Ideale Strömung

Eine reibungsfreie Flüssigkeit nennt man eine ideale Flüssigkeit. Deren Strömungsform heißt ideale Strömung. Diese wird durch Stromlinien, deren Gesamtheit das Strömungsfeld bilden, beschrieben. Sie wird im wesentlichen bestimmt durch das Newtonsche Prinzip "Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung". In einer idealen Flüssigkeit gelten für zwei verschiedene Querschnitte zwischen denselben Stromlinien die Kontinuitätsgleichung $F_1 v_1 = F_2 v_2$ und die Bernoullische Gleichung $p_1 + (\rho/2)v_1^2 = p_2 + (\rho/2)v_2^2$. Man nennt p den statischen und $(\rho/2)v^2$ den dynamischen oder Stau-Druck.

Neben der Reibung hat die Kompressibilität einen wesentlichen Einfluß auf die Strömung. Unter einer Flüssigkeit versteht man in der Strömungslehre jeden Stoff, dessen Kompressibili-

tät zu vernachlässigen ist. Das ist für flüssige und gasförmige Stoffe bei Geschwindigkeiten der Fall, die weit unter der Schallgeschwindigkeit in diesem Stoff liegen. Für kompressible Medien lautet die Kontinuitätsgleichung

$$\rho_1 F_1 v_1 = \rho_2 F_2 v_2 \text{ und die Bernoullische Gleichung}$$

$$v_1^2/2 - v_2^2/2 = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho(p)} .$$

2. Durchflußmessung mit dem Staurohr

2.1 Theorie des Meßverfahrens

Wir bringen in die Strömung einen kleinen, schlanken Körper, dessen Schmalseite senkrecht gegen die Strömung gerichtet ist. Im Mittelpunkt dieser Schmalseite ist die Strömungsgeschwindigkeit $v = 0$. Dieser Punkt heißt Staupunkt. Für einen Stromfaden, der den Staupunkt enthält, lautet die Bernoullische Gleichung für inkompressible Medien mit dem Staupunkt als den einen Bezugspunkt:

$$\frac{\rho}{2} \cdot v^2 + p_0 = p_1 \quad \text{1. gl. 2. gl. 3. gl.}$$

Daraus läßt sich v leicht ausrechnen. Mit $p_1 - p_0 = \Delta p$ wird:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad (5)$$

Für kompressible Medien lautet die Bernoullische Gleichung mit denselben Bezugspunkten:

$$\frac{v^2}{2} = \int_{p_0}^{p_1} \frac{dp}{\rho(p)}$$

Nun brauchen wir die Druckabhängigkeit der Dichte, um das Integral ausrechnen zu können.

Da die Gase schlechte Wärmeleiter sind und die Gasteilchen nur kurze Zeit in der Nähe des Staupunktes verweilen, kann man annehmen, daß die bei der Kompression entwickelte Wärme nicht aus dem komprimierten Gasvolumen wegfließt. Die Druckerhöhung am Staupunkt ist demnach ein adiabatischer Vorgang und erfolgt nach der Poissonschen Gleichung:

$$p \cdot V^K = p_0 \cdot V_0^K$$

Drückt man das Volumen V durch die Dichte aus, so ergibt sich für ρ :

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{K}}$$

Dabei ist K das Verhältnis der spezifischen Wärmen des Gases ($K = c_p/c_v$). Nun können wir das Integral ausrechnen:

$$\begin{aligned} \frac{v^2}{2} &= \int_{p_0}^{p_1} \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{1}{p^{\frac{1}{K}}} \cdot dp = \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \frac{K}{K-1} \cdot \left(p_1^{\frac{K-1}{K}} - p_0^{\frac{K-1}{K}} \right) \\ &= \frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left(\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \end{aligned}$$

Wir können leicht p_0 und $\Delta p = p_1 - p_0$ messen. Deshalb wollen wir das Ergebnis nur durch diese Größen ausdrücken und setzen daher $p_1 = \Delta p + p_0$. Damit finden wir nach einigen einfachen Umstellungen:

$$\frac{v^2}{2} = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left(\left[1 + \frac{\Delta p}{p_0} \right]^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right)$$

Nun können wir die Geschwindigkeit hinschreiben:

$$v = \epsilon \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad (6)$$

Hierbei ist

$$\epsilon^2 = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left(\left[1 + \frac{\Delta p}{p_0} \right]^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \quad (7)$$

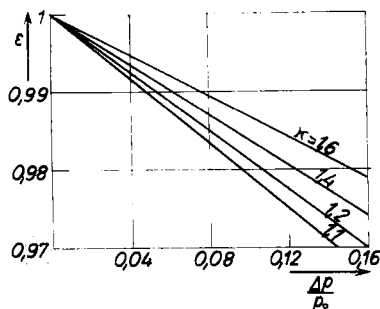


Abb. 8 Expansionszahl

Mit dem Korrekturfaktor ϵ , den man die Expansionszahl nennt, nimmt der Ausdruck für die Geschwindigkeit eine Gestalt an, die wir ohne ϵ auch schon für den Fall inkompressibler Flüssigkeiten gefunden hatten. ϵ ist eine Zahl, die nur wenig kleiner als 1 ist. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist, umso größer ist die Abweichung von 1. Auf Bild 8 ist ϵ

über dem Verhältnis $\Delta p/p_0$ für verschiedene K aufgetragen. Man möchte nun noch wissen, bei welchen Strömungsgeschwindigkeiten der Korrekturfaktor berücksichtigt werden muß. Eine kurze Rechnung wird uns das zeigen.

Die Schallgeschwindigkeit in einem Gas ist:

$$c = \sqrt{\frac{K \cdot p_0}{\rho}}$$

Nun können wir in Gleichung (7) p_0 nach obiger Gleichung durch die Schallgeschwindigkeit c und Δp nach Gleichung (6) durch die Strömungsgeschwindigkeit v ausdrücken. Damit erhalten wir:

$$\epsilon^2 = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{\rho c^2 \epsilon^2}{K v^2 \rho} \cdot \left(\left[1 + \frac{v^2 \rho K}{2 \epsilon^2 \rho c^2} \right]^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right)$$

Zunächst kürzen wir. Dann bleibt ϵ^2 nur noch in der eckigen Klammer auf der rechten Seite stehen. Jetzt lösen wir nach ϵ^2 auf und erhalten

$$\epsilon^2 = \frac{\frac{v^2}{c^2}}{\frac{2}{K} \cdot \left[\left(\frac{v^2}{c^2} \cdot \frac{K-1}{2} + 1 \right)^{\frac{K}{K-1}} - 1 \right]}$$

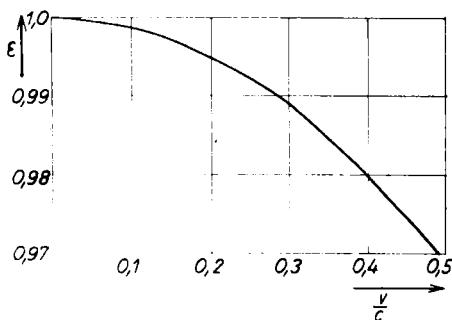


Abb. 9 Expansionszahl

Hier können wir auch den Einfluß der Schallgeschwindigkeit auf die Verwendbarkeit aller für inkompressible Medien hergeleiteter Formeln sehen. Solange v/c klein ist, kann man ϵ von 1 kaum unterscheiden (s. Bild 9). Wenn die Strömungsgeschwindigkeit 50 % der Schallgeschwindigkeit beträgt, ist die Abwei-

chung des Korrekturfaktors ϵ von 1 nur etwa 3 %. Fordert man eine Meßgenauigkeit von 0,5 %, so kann man bei Gasen mit der einfachen Formel (5) rechnen, solange die Strömungsgeschwindigkeit unter 20 % Schallgeschwindigkeit bleibt. Für die meisten technischen Strömungen ist diese Bedingung erfüllt.

2.2 Das Prandtl'sche Staurohr

Das Prandtl'sche Staurohr besteht aus einem Zylinder vom Durchmesser D . Das vordere, gegen die Strömung gerichtete

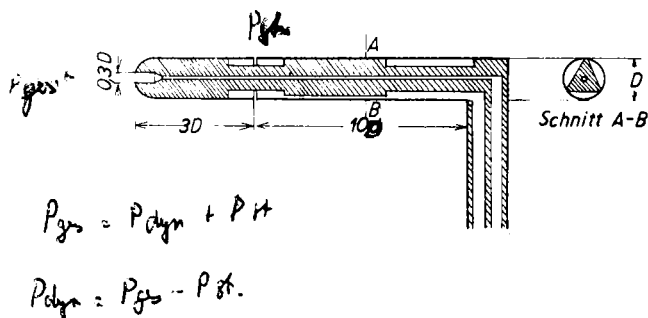


Abb. 10 Prandtl'sches Staurohr

Ende hat die Gestalt einer Kugelkappe. Am hinteren Ende ist ein Stiel befestigt, der die Druckleitungen enthält und als Haltevorrichtung dient. Der Stiel kann einen kreisrunden oder länglichen Querschnitt haben. Es kommt nur auf seinen senkrecht auf der Strömungsrichtung stehenden Durchmesser d an, da dieser maßgebend für den Strömungswiderstand des Stieles ist. Die Kugelkappe besitzt in der Mitte eine Öffnung von etwa $0,3D$ Durchmesser und mindestens $2D$ Tiefe. An dieser Öffnung wird der Gesamtdruck p_1 abgenommen. Im Abstand $3D$ vom vorderen Ende besitzt das Staurohr einen Ringspalt, der der Abnahme des statischen Druckes p_0 dient und eine Breite von $0,1D$ hat. Der Abstand des Ringspaltes vom Stiel ist $8 - 10D$.

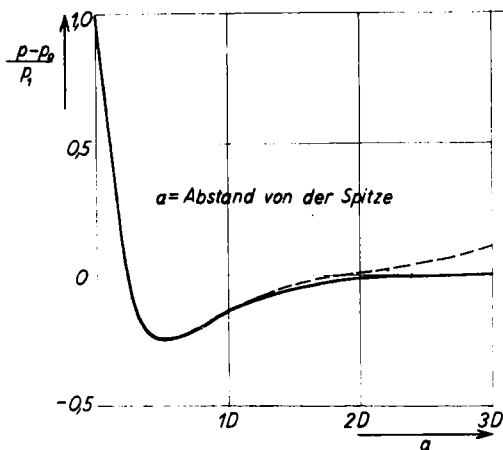


Abb. 11 Druckverteilung auf der Staurohroberfläche

Die Maße sind bestimmt durch die Druckverteilung auf der Oberfläche des Staurohres, die auf Bild 11 dargestellt ist. Die gestrichelte Linie stellt den Druckverlauf auf der dem Stiel zugekehrten Seite dar. Die ausgezogene Linie zeigt den Druckverlauf auf der dem Stiel abgekehrten Seite.

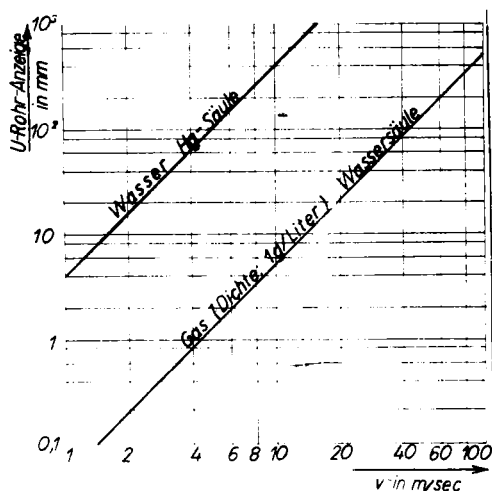
Auf der Spitze herrscht der Gesamtdruck p_1 . Auf der

vorderen Rundung wird schon einmal auf einer scharf begrenzten Linie der statische Druck erreicht. Diese Stelle ist aber für die Druckabnahme zu kritisch. Nach hinten zu nähert sich der Druck asymptotisch wieder dem statischen. Nur auf der dem Stiel zugekehrten Seite steigt er noch einmal an und erreicht

auf der Stirnfläche des Stieles wieder den Wert p_1 . Die sicherste Abnahmestelle für den Druck p_0 ist der Ort des Ringspaltes. Damit die Messung für kleine Winkel zwischen Strömungsrichtung und Staurohrachse richtungsunabhängig wird, muß die Öffnung zur Abnahme von p_1 den vorgeschriebenen Wert haben. Die Richtungsunabhängigkeit ist dann für Winkel bis zu 15° gewährleistet. Ist der Durchmesser der Öffnung kleiner, etwa nur $0,1D$, so wird die Messung stark richtungsabhängig. Man kann damit für Winkel von $0 - 20^\circ$ genau die Komponente der Strömungsgeschwindigkeit in Staurohrrichtung messen.

2.3 Bestimmung des Durchflusses

Der Vorteil des Prandtl'schen Staurohres liegt in dem sehr geringen bleibenden Druckverlust, den es verursacht. Sein Nachteil ist der kleine Differenzdruck $p_1 - p_0$, der bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten (in Wasser bis etwa 2 m/sec, in



Gasen bis etwa 15 m/sec)

nur mit Feindruckmessern (z.B. Minimeter) genügend genau erfaßt werden kann. Die Messung wird dadurch umständlich und zeitraubend. Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten reichen U-Rohr- oder Schrägrohrmanometer hin. Da als Druckübertrager das strömende Medium selbst dient, ist bei der Druckmessung dessen Dichte zu berücksichtigen. Bild 12 zeigt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Differenz-

Abb. 12 Zusammenhang zwischen Wirkdruck und Strömungsgeschwindigkeit beim Staurohr

druck für Wasser und ein Gas. Im Falle des Wassers wird mit einem Quecksilber-U-Rohr gemessen und die Dichte des Wassers berücksichtigt. Die Dichte des Gases wird vernachlässigt.

Das Staurohr liefert nur die Geschwindigkeit in einem Punkt des durchströmten Querschnittes. Die Strömungsgeschwindigkeit

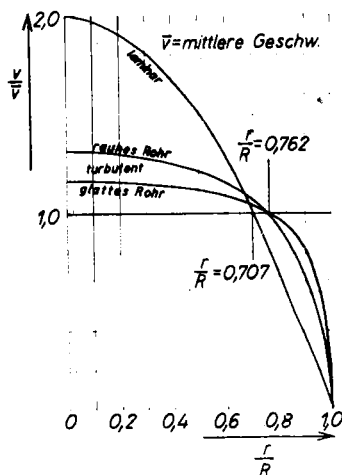
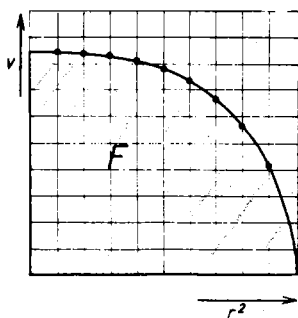


Abb. 13 Strömungsprofile



ist aber nicht über den ganzen Querschnitt konstant. Bild 13 zeigt z.B. Geschwindigkeitsprofile einer Rohrströmung. In unsymmetrischen Querschnitten ist die Geschwindigkeitsverteilung natürlich noch wesentlich ungleichmäßiger. Man muß demnach die ganze durchströmte Fläche in viele kleine Flächenelemente einteilen und die Geschwindigkeit in jedem Flächenelement messen. Die Summe der Teildurchflüsse ist dann der Gesamtdurchfluß:

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta F_i$$

In vielen Fällen genügen einige systematisch verteilte Meßpunkte zur Bestimmung des Gesamtdurchflusses. Der einfachste Fall ist die ungestörte Strömung durch kreisrunde Rohre. Man mißt auf einigen, mindestens auf zwei zueinander senkrechten Durchmes-

Abb. 14 Graphische Bestimmung des Gesamtdurchflusses aus Einzelmessungen in kreisrunden Rohren

sern in den Abständen $R \cdot \sqrt{1/n}$, $R \cdot \sqrt{2/n}$, ..., $R \cdot \sqrt{n/n}$ vom Mittelpunkt. Für jeden Abstand wird aus den einzelnen Meßwerten die mittlere Geschwindigkeit errechnet und in ein Diagramm gezeichnet, wie es auf Bild 14 geschehen ist. Nun kann man durch die Punkte eine glatte Kurve legen und die schraffierte Fläche ausplanimetrieren. Die planimetrierte Fläche hat die Größe:

$$F = \int_0^R v \cdot d(r^2) = \int_0^R v \cdot 2r dr$$

Der Durchfluß ist aber als Summe (besser Integral) aller $v \cdot 2r \cdot dr$ bestimmt, hat also die Größe:

$$Q = \int_0^R v \cdot 2r \pi dr = \pi \cdot \int_0^R v \cdot 2r dr$$

Es besteht demnach die Beziehung:

$$\underline{Q = \pi \cdot F}$$

Ist vor der Meßstelle das Rohr auf eine Länge von mindestens 30 Rohrdurchmesser gerade und ohne Querschnittsverengung, so hat sich bis zur Meßstelle eine so gleichmäßige Strömung ausgebildet, wie auf Bild 13 dargestellt ist. Im Falle turbulenter Strömung ist dann sowohl für glatte als auch für rauhe Rohre die mittlere Geschwindigkeit im Abstand $0,762 \cdot R$ von der Rohrachse erreicht. Hier genügt also ein einziger Meßpunkt. Der Durchfluß ist dann Querschnitt mal mittlere Geschwindigkeit.

Ein wichtiger Fall ist auch die Strömung in rechteckigen Kanälen. Hier teilt man den Querschnitt in rechteckige Flächenelemente ein und legt die Meßpunkte etwa wie in Bild 15 fest. Nun zeichnet man sich für jeden waagerechten Streifen das Geschwindigkeitsprofil und planimetriert. Die planimetrierte Fläche entspricht dem Teildurchfluß durch diesen Streifen. Jetzt werden die Teildurchflüsse in Abhängigkeit von der Kanaltiefe in einem weiteren Diagramm festgehalten. Die nun zu planimetrierende Fläche entspricht dem Gesamtdurchfluß.

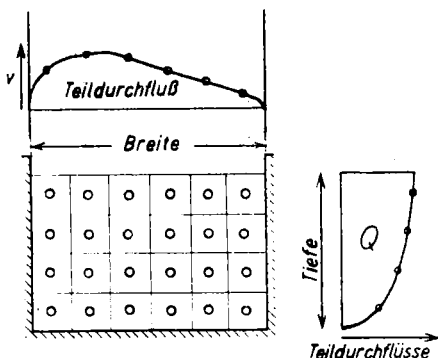


Abb. 15 Bestimmung des Gesamtdurchflusses aus Einzelmessungen im Kanal

2.4 Zusammenfassung

Das Staurohr ist ein länglicher Rotationskörper, der mit einer senkrecht angeströmten Öffnung den Gesamtdruck und mit einer parallel zur Strömung liegenden Öffnung den statischen Druck aufnimmt. Die Differenz der beiden Drucke wird bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten mit Feindruckmessern, sonst mit U-Rohr- oder Schrägrohrmanometern gemessen. Zwischen Differenzdruck und Strömungsgeschwindigkeit besteht der Zusammenhang $v = \epsilon \cdot \sqrt{2 \Delta p / \rho}$, wobei ϵ für Flüssigkeiten den Wert 1 und für Gase bei Geschwindigkeiten oberhalb 20 % der Schallgeschwindigkeit einen Wert wenig kleiner als 1 hat. Da mit dem Staurohr nur die Strömungsgeschwindigkeit in einem Punkt gemessen werden kann, muß man den durchströmten Querschnitt in kleine Flächenelemente ΔF_i mit den Geschwindigkeiten v_i einteilen und den Durchfluß entweder als $Q = \sum v_i \cdot \Delta F_i$ oder durch zeichnerische Integration erfassen.

Die hier beschriebenen Meßverfahren setzen eine stationäre Strömung und eine einigermaßen gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung voraus. Die Messung darf also in keinem Fall hinter Krümmungen, Ventilen, Wehren oder ähnlichen störenden Bauteilen erfolgen, hinter welchen die Strömung von der Wand abgerissen und mit groben Wirbeln durchsetzt ist.

3. Durchflußmessung mit genormten Drosselgeräten

In der Industrie werden Durchflüsse hauptsächlich mit genormten Drosselgeräten gemessen, weil diese billig, zuverlässig und robust sind und sich einfach berechnen lassen.

Das Meßprinzip beruht auf der Bernoullischen Gleichung. Durch den Einbau einer Drossel in eine Rohrleitung zwingt man das strömende Medium in der Verengung schneller zu fließen als im übrigen Rohr, so daß der statische Druck in der Einschnürung sinkt. Die Differenz der statischen Drücke vor und in der Einschnürung nennt man den Wirkdruck. Da dieser eindeutig von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, stellt er ein zuverlässiges Maß für den Durchfluß dar.

3.1 Die Normblende

Die einfachste Drossel ist die Normblende. Sie stellt im Prinzip nichts anderes als eine zentral durchbohrte Scheibe dar. Bezeichnet man den Durchmesser der zentralen Bohrung mit d und den Rohrdurchmesser mit D , so ergibt die Zahl $m = d^2/D^2$ das Verhältnis des freien Querschnittes zum Rohrquerschnitt. Man nennt m das Öffnungsverhältnis.

Für die Strömung bedeutet diese ohne Übergang eintretende Querschnittsverengung natürlich ein sehr großes Hindernis. Beim Umströmen der Blende treten an der Kante der freien Öffnung so große Trägheitskräfte auf, daß die Grenzschicht nicht mehr an der Blendenoberfläche haften bleibt, sondern in Richtung der Trägheitskräfte weitergeführt wird. Man sagt, die Strömung reißt ab. Die Richtung der Trägheitskräfte ist dabei noch immer zur Rohrachse geneigt und hängt stark von der Stelle des Abreißens ab. Infolge dieser Neigung zur Rohrachse verengt sich der Strömungsquerschnitt noch ein wenig, so daß der kleinste Strömungsquerschnitt kleiner als die Blendenöffnung wird. Bezeichnet man die Blendenöffnung mit F und den kleinsten Strömungsquerschnitt mit F' , so nennt man das Verhältnis $\mu = F'/F$ die Einschnürungszahl.

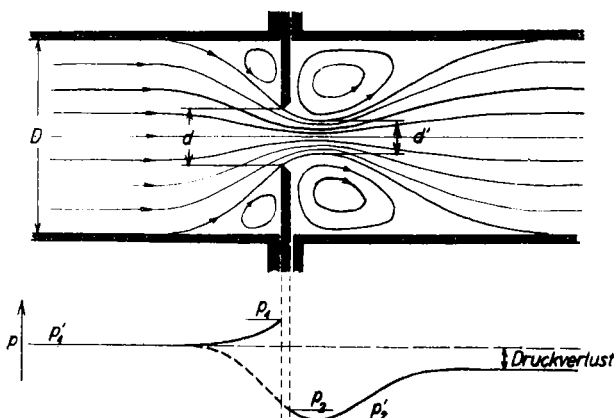


Abb. 16 Umströmung einer Blende

Da die Strömung abreißt und nur die Flüssigkeit im Strömungsfeld (also innerhalb des Strömungsquerschnittes) bewegt wird, entsteht hinter der Blende ein Raum, in dem die Flüssigkeit nahezu ruht. Diesen Raum nennt man das Totwassergebiet. An der Grenze zwischen Totwassergebiet und Strömung besteht somit ein starkes Geschwindigkeitsgefälle, in dem die Reibungskräfte wirksam sind. Diese versetzten Teile der Grenzzone in Rotation und reißen sie als Wirbel mit fort. Die hierzu nötige Rotationsenergie wird der Strömung entzogen, so daß der statische Druck auch dann seinen ursprünglichen Wert nicht mehr erreicht, wenn das Strömungsfeld wieder den ganzen Rohrquerschnitt einnimmt. Den Unterschied zwischen den statischen Drücken in der ungestörten Strömung vor und hinter der Blende nennt man Druckverlust.

Der Druckverlauf innerhalb des Strömungsfeldes wird auf Bild 16 durch die gestrichelte Druckkurve wiedergegeben. In dem Maße, wie sich der Strömungsquerschnitt verengt und die Strömungsgeschwindigkeit wächst, sinkt der Druck, um schließlich mit größer werdendem Strömungsquerschnitt wieder zu wachsen. An der Rohrwand tritt vor der Blende eine Stauwirkung auf,

so daß dort der Druck bis zur Blende steigt. Da das Totwassergebiet ruht, steht es unter demselben Druck wie die Strömung. Daher sind hinter der Blende der Druck in der Strömung und der Druck an der Rohrwand gleich. Die Druckabnahme erfolgt unmittelbar vor und hinter der Blende entweder durch Einzelanbohrungen oder durch Ringkanäle. Um eine zuverlässige

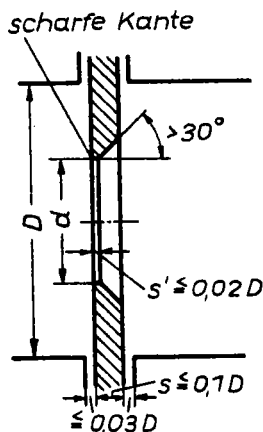


Abb. 17 Normblende

Druckentnahme zu gewährleisten, dürfen die Durchmesser der Bohrungen und die Ringkanalbreiten nicht größer als $0,03D$ sein. Bild 17 gibt die Konstruktion einer Normblende mit den vorgeschriebenen Maßen wieder. Besonders wichtig ist die Gestalt der zentralen Bohrung. Sie muß auf der gegen die Strömung gerichteten Seite eine scharfe Einlaufkante haben, an der die Strömung abreißt. Eine unscharfe Kante würde den Abreißpunkt nach hinten verschieben und damit die Einschnürungszahl vergrößern. Dadurch würde, wie wir später sehen werden, ein zu geringer

Durchfluß vorgetäuscht. In den VDI-Durchflußmeßregeln wird empfohlen, nach dem Bohren der Blende einen letzten haarfeinen Span der Vorderfläche von der Bohrung aus radial nach außen abzdrehen. Je größer der Blendendurchmesser ist, um so eher ist eine mit dem bloßen Auge wahrnehmbare Brechung der Kante zulässig. Nach DIN 1952 muß eine Kante als unscharf gelten, wenn sie bei $d < 150$ mm einen darauffallenden Lichtstrahl deutlich sichtbar reflektiert oder bei $d > 150$ mm deutlich abgebrochen ist.

Die scharfe Kante begrenzt die zylindrische Einlaufbohrung, deren Länge nicht größer als $0,02D$ sein darf, damit die Neubildung einer stabilen Grenzschicht mit Sicherheit verhindert wird. Daran schließt sich ein konischer Auslauf an, dessen Abschrägung mehr als 30° betragen soll. Diese großen Winkel sind nötig, um ein Ansaugen des Strahles durch die Wand

unmöglich zu machen. Aus diesem Grunde soll die Blende nicht dicker als $0,1D$ sein. Für große Nennweiten baut man die Blende ohnehin viel dünner. Gelegentlich ist dann ihre Dicke kleiner als $0,02D$. In solchen Fällen kann der konische Auslauf wegfallen.

Die normgerechte Verwendung von Blenden ist für alle Rohrdurchmesser $> 50 \text{ mm}$ möglich.

3.2 Die Normdüse

Im Gegensatz zur Blende, die durch eine scharfe Einlaufkante gekennzeichnet ist, besitzt die Düse einen abgerundeten Ein-

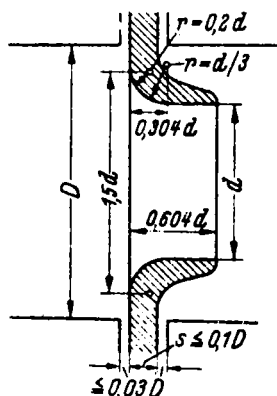


Abb. 18 Normdüse

lauf, der aus zwei Kreisbögen zusammengesetzt ist. Die ebene Stirnfläche der Normdüse geht tangential in einen Kreisbogen mit dem Radius $r_1 = 0,2 d$ über, an den sich praktisch ohne Knick ein Kreisbogen mit dem Radius $r_2 = d/3$ anschließt. Dieser geht tangential in den zylindrischen Teil der Düse über, der in einer scharfen Auslaufkante endet. Die Länge des zylindrischen Teiles ist $0,3d$.

Die Druckentnahme erfolgt genau wie bei der Blende entweder durch Einzelbohrungen oder durch Ringkanäle unmittelbar vor und hinter der Düse,

wobei die Bohrungsdurchmesser bzw. Kanalbreiten kleiner als $0,03D$ sein sollen.

Das Strömungsfeld der Düse unterscheidet sich natürlich wesentlich von dem der Blende. Durch den abgerundeten Einlauf reißt die Strömung nicht von der Düsenoberfläche ab und folgt dem Düsenprofil. Dadurch ist der kleinste Strömungsquerschnitt die Düsenöffnung. An der scharfen Auslaufkante reißt die Strömung ab, wodurch wieder im Schatten der Düse ein Totwas-

sergebiet entsteht, in dem der statische Druck genau so groß wie in dem austretenden Flüssigkeitsstrahl ist. Eine Abrundung

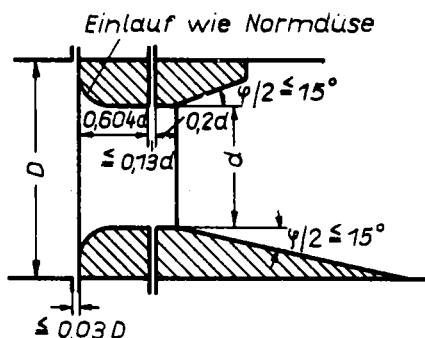


Abb. 19 Normventuridüse

der Auslaufkante führt dazu, daß die Strömung auf der Rundung abreißt, wo der Strömungsquerschnitt bereits wieder größer als die Düsenöffnung ist. Damit wird hinter der Düse ein zu großer Druck gemessen und, da infolgedessen der Wirkdruck zu klein ist, ein zu kleiner Durchfluß vorgetäuscht.

Die Forderungen an die Schärfe der Auslaufkante gehen aber nicht ganz so weit wie bei der Einlaufkante der Blenden.

Im Einlauf erfolgt allerdings die Strömung nicht in jedem Falle so glatt dem Düsenprofil, wie eben geschildert wurde. An der ebenen Stirnfläche tritt ein Stau ein. Daher legt sich die Strömung erst in der Rundung tangential an die Düsenoberfläche an und muß im weiteren Verlauf von dieser umgelenkt werden. Dabei treten von der Oberfläche weggerichtete Trägheitskräfte auf, die in der haftenden Grenzschicht abgefangen werden müssen. Wenn die Trägheitskräfte zu groß werden, kann an dieser Stelle der Einlaufrundung die Strömung von der Wand abreißen und sich einschnüren. Das tritt dann auf, wenn die Grenzschicht sehr dünn bleibt, so daß ein großes Geschwindigkeitsgefälle existiert. Werden aber aus der Mitte der Strömung immer wieder schnelle Flüssigkeitsteilchen bis in die Grenzschicht transportiert, so wächst ihre Dicke und das Geschwindigkeitsgefälle nimmt ab. In diesem Fall ist also ein Abreißen der Strömung nicht möglich. Dieser Fall tritt allerdings nur bei intensiver Turbulenz, also bei großen Reynoldsschen Zahlen ein. Aus diesem Grunde sind die Düsen für Reynoldssche Zahlen unter 10^4 nicht brauchbar, da die Strömung

schon im Einlauf abreißt. (In der Durchflußmeßtechnik betrachtet man immer den Rohrdurchmesser als die charakteristische Länge der Reynoldsschen Zahl.)

In der Grenzschrift zwischen Auslaufstrahl und Totwassergebiet werden auch hier wieder Flüssigkeitsteilchen in Rotation versetzt und als Wirbel mit fortgeführt, so daß der Strömung Energie entzogen wird und ein bleibender Druckverlust entsteht.

3.3 Die Normventuridüse

Die Normenventuridüse ist die der Strömung am besten angepaßte Normdrossel. Ihr Einlauf hat die gleiche Gestalt wie der der Normdüse, besteht also aus der Einlaufrundung und dem zylinderförmigen Teil der Länge $0,3d$, an dessen Ende die Druckentnahme erfolgt. Daran schließt sich ein Zylinderstück der Länge $0,2d$ bis $0,4d$ an, worauf eine kegelförmige Erweiterung erfolgt, die man den Diffusor nennt. Der Diffusorwinkel soll kleiner als 15° sein, damit die Strömung am Übergang vom Zylinder in die Erweiterung nicht abreißt.

Wenn der Ausgangsdurchmesser des Diffusors gleich dem Rohrdurchmesser ist, spricht man von einer Normventuridüse langer Bauart. Da diese infolge ihrer beachtlichen Länge erhebliche Baukosten verursacht, wird in der Praxis nicht gern der ganze Diffusor verwendet, sondern ein gekürzter. Man spricht dann von der Normventuridüse kurzer Bauart (auch Venturieinsatz genannt), bei der der Ausgangsdurchmesser des Diffusors kleiner als der Rohrdurchmesser ist.

Die Entnahme des Druckes unmittelbar vor der Venturidüse (Plusdruck) erfolgt entweder durch Einzelanbohrungen, die durch eine Ringkammer miteinander verbunden sind, oder durch einen Ringkanal, dessen Breite nicht größer als $0,03d$ sein darf. Die Entnahme des Druckes im engsten Strömungsquerschnitt (Minusdruck) erfolgt immer durch Einzelanbohrungen, die durch eine Ringkammer untereinander verbunden sind. Ein Ringspalt könnte zur Ablösung der Strömung von der Wand führen.

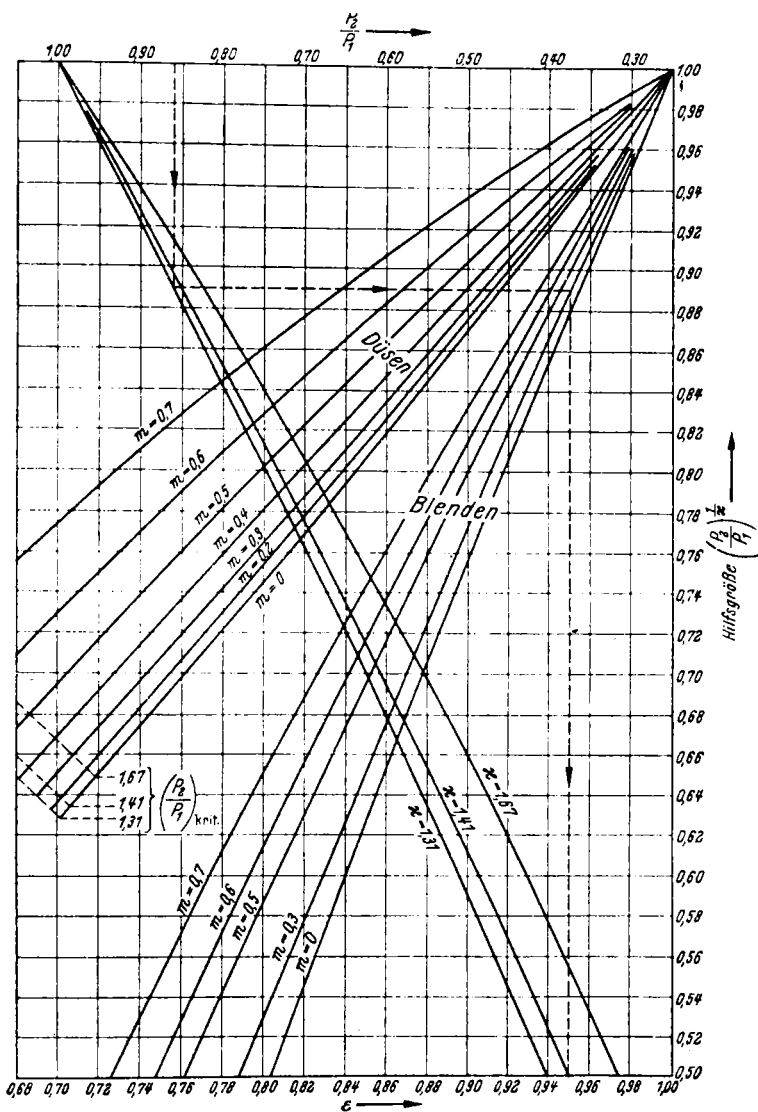


Abb. 20

Bei der Normventuridüse kann für kleine Reynoldssche Zahlen ebenso wie bei der Normdüse ein Abreißen der Strömung von der Einlaufrundung eintreten, weswegen ebenfalls für $Re \cdot 10^4$ keine einwandfreie Messung mehr möglich ist.

Der bleibende Druckverlust ist bei der Normventuridüse am kleinsten.

3.4 Durchflußgleichung

Wir müssen uns nun eine Gleichung verschaffen, die es gestattet, aus den Kenngrößen der Drosseln und dem Wirkdruck auf den Durchfluß zu schließen. Wir legen unseren Überlegungen das Bild 16 zugrunde. Im Falle inkompressibler Medien lautet die Bernoullische Gleichung für den größten und kleinsten Strömungsquerschnitt:

$$p_1' + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 = p_2' + \frac{\rho}{2} \cdot v_2'^2$$

Das Verhältnis von kleinstem Strömungsquerschnitt zu Blendenöffnung ist für alle geometrisch ähnlichen Strömungen gleicher Reynoldsscher Zahl gleich. Es wird durch die Einschnürungszahl μ ausgedrückt, so daß gilt:

$$F_2' = \mu \cdot F_0$$

Die Kontinuitätsgleichung lautet:

$$F_1 \cdot v_1 = F_2' \cdot v_2'$$

Führen wir die Einschnürungszahl μ ein, so wird daraus:

$$F_1 \cdot v_1 = \mu \cdot F_0 \cdot v_2'$$

Die Flächen F_1 und F_0 sind nun wieder durch das Öffnungsverhältnis miteinander verknüpft, denn es ist $m = F_0/F_1$. Das führen wir in die Kontinuitätsgleichung ein und erhalten:

$$v_1 = v_2' \cdot m \cdot \mu$$

Nun können wir in der Bernoullischen Gleichung v_1 durch v_2' ersetzen und die Gleichung nach v_2' auflösen, so daß wir für die Geschwindigkeit im engsten Strömungsquerschnitt erhalten:

$$v_2' = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1' - p_2')}$$

Wir messen allerdings nicht den Differenzdruck $p_1' - p_2'$, sondern den Wirkdruck $p_1 - p_2$. Unmittelbar vor der Blende herrscht der Druck p_1 . Dieser ist durch die Stauwirkung größer als p_1' . Der Druck p_2 unmittelbar hinter der Blende ist auch etwas größer als p_2' . Es sieht so aus, als sei die Differenz $p_1' - p_2'$ gerade so groß wie der Wirkdruck. Das stimmt aber nicht ganz. Tatsächlich ist $p_1 - p_2 > p_1' - p_2'$. Durch einen Beiwert $Z^2 = (p_1' - p_2') / (p_1 - p_2)$, der nur von der Geometrie der Strömung und von der Reynoldsschen Zahl abhängt, können wir in der Gleichung für v_2' den unmeßbaren Differenzdruck durch den Wirkdruck ersetzen. Nun besitzen wir die Geschwindigkeit im engsten Strömungsquerschnitt. Um den Durchfluß zu erhalten, brauchen wir nur die Geschwindigkeit mit der Fläche zu multiplizieren: $Q = F_2' v_2' = F_0 v_2'$. Wir erhalten also für den Volumendurchfluß:

$$Q = \frac{Z \cdot \mu F_0}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}$$

Um die Ausrechnung einfach zu gestalten, faßt man alle Konstanten zu einer einzigen zusammen:

$$\alpha = \frac{\mu \cdot Z}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}$$

Man nennt die Durchflußzahl. Sie hängt nur ab vom Öffnungsverhältnis der Drossel und von der Reynoldsschen Zahl.

Die Durchflußgleichung für inkompressible Medien lautet also:

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

Im Falle kompressibler Medien haben wir in der Verengung wieder mit einer adiabatischen Zustandsänderung zu rechnen, weil in der kurzen Zeit, während der sich ein Gasteilchen in der Verengung aufhält, infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit der Gase kein Wärmetransport erfolgen kann. Für den größten und kleinsten Strömungsquerschnitt lautet demnach die Bernoullische Gleichung:

$$\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{(\rho)} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{p_1^{\frac{1}{K}}}{\rho_1} \cdot \frac{1}{p^{\frac{1}{K}}} dp = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]$$

Die Kontinuitätsgleichung lautet:

$$F_1 v_1 \rho_1 = F_2 v_2 \rho_2$$

Wir lösen nach v_1 auf und beachten, daß $m = F_0/F_1$ und $\mu = F_2/F_0$ ist. Dann erhalten wir:

$$v_1 = v_2 \cdot \mu m \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Der Adiabatengleichung entnehmen wir $\rho_2/\rho_1 = (p_2/p_1)^{\frac{1}{K}}$. Das setzen wir in v_1 ein und verwenden dieses v_1 in der Bernoullischen Gleichung. Diese lösen wir nach v_2 auf und gehen durch Einführung des Beiwertes Z von p_1 und p_2 zu p_1 und p_2 über. Dann erhalten wir für den Volumendurchfluß:

$$Q = \frac{Z \cdot \mu \cdot F_0 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{K}}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{K}}}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_1} p_1 \cdot \frac{K}{K-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}$$

Diese Gleichung ist natürlich sehr unbequem. Durch eine gewaltsame Umformung kann man aber für den Volumendurchfluß einen Ausdruck erhalten, der der Durchflußgleichung für inkompressible Medien bis auf einen Faktor gleicht. Ich schreibe Ihnen das Ergebnis der Umformung hin. Sie werden dann sofort sehen, welche Erweiterungen ich durchgeführt habe.

$$Q = \frac{Z \mu \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}{Z \mu} \cdot \sqrt{\frac{2}{p} (p_1 - p_2)} \sqrt{\frac{p_1}{p_1 - p_2} \frac{K}{K-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]}$$

$$\cdot \frac{1 \cdot F_0}{\sqrt{1 - 2 m^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{K}}}}$$

In diesem auch noch sehr langen Ausdruck können wir folgende Zusammenfassung vornehmen:

$$\alpha = \frac{Z \mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{1 - (p_2/p_1)} \cdot \left[1 - (p_2/p_1)^{\frac{K-1}{K}} \frac{K}{K-1} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}}\right]}}{1 - \mu^2 m^2 (p_2/p_1)^{\frac{2}{K}}}$$

Damit erhalten wir als Durchflußgleichung für kompressible Medien:

$$Q = \varepsilon \cdot \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{p} \Delta p}$$

Dabei ist α die Durchflußzahl. Sie ist abhängig vom Öffnungsverhältnis und von der Reynoldsschen Zahl. ε nennt man die Expansionszahl. Sie ist abhängig von der spezifischen Wärme des Gases und vom Verhältnis des Wirkdruckes zum Absolutdruck in der Rohrleitung ($p_2/p_1 = 1 - \Delta p/p_1$).

3.5 Die Größen der Durchflußgleichung

Zunächst wollen wir die allgemeine Durchflußgleichung für die in der Technik üblichen Einheiten einrichten. Ich gebe Ihnen wieder nur die Ergebnisse an. Zur Übung werden Sie die leichte Überprüfung selbst vornehmen.

$$Q = 0,01252 \cdot \xi \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{4p}{\rho}}$$

$Q(m^3/h)$ = Volumendurchfluß

$\rho(kg/m^3)$ = Dichte des strömenden Stoffes

$\Delta p(mm \text{ WS})$ = Wirkdruck

ξ = Expansionszahl

α = Durchflußzahl

Die Durchflußzahl

Bei der Herleitung der Durchflußgleichung haben wir einige Einflußgrößen in der Durchflußzahl zusammengefaßt. Die Durchflußzahl enthält das Öffnungsverhältnis m der Drossel, welches ausschlaggebend das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten vor und in der Verengung bestimmt. Ferner enthält sie durch den Beiwert Z den Einfluß der Reibung, also die Viskosität des strömenden Mediums, die in der Reynoldsschen Zahl enthalten ist, und die Rauigkeit der Rohrwand. Schließlich enthält die Durchflußzahl den Einfluß der Strömungsform (Kontraktionszahl).

Man kann Z berechnen. Das ist aber eine so mühsame Arbeit, die nur numerisch mit geschickten Näherungen möglich ist, so daß der Aufwand nicht lohnt. Außerdem ist die Genauigkeit dieser Rechnung geringer als die eines entsprechenden Experimentes. Etwas einfacher ist die Kontraktionszahl der Rechnung zugänglich. Aber auch diese Rechnung ist langwierig und nicht merklich genauer als das Experiment. Aus diesem Grunde werden für die Blendenberechnung die in DIN 1952 experimentell gefundenen Durchflußzahlen zugrunde gelegt.

Die Durchflußzahl ist für alle geometrisch ähnlichen Drosseln nur von der Reynoldsschen Zahl abhängig. Als geometrisch ähnlich gelten dabei zwei Drosseln gleichen Öffnungsverhältnisses und gleicher relativer Oberflächenrauigkeit, wenn ihre Konstruktion in den durch die Norm vorgeschriebenen

Punkten gleich ist. Ferner muß die Rohrrauigkeit vor der Drossel in beiden Fällen die gleiche sein.

Die Durchflußzahlen sind in den VDI-Durchflußmeßregeln mit einer Grundtoleranz angegeben, die durch die allgemeine Meßgenauigkeit bei den Eichversuchen bestimmt ist. Diese beträgt bei Normdüsen und Normblenden für Öffnungsverhältnisse unter 0,3 etwa 0,5 % und nimmt mit steigendem Öffnungsverhältnis langsam zu. Bei $m = 0,6$ ist sie 1 %. Die Grundtoleranz für die Durchflußzahlen der Normventuridüse ist etwas höher. Für m kleiner als 0,4 ist sie 1 % und steigt allmählich bis auf 1,5 % bei $m = 0,6$. Zu diesen für völlig glatte Rohrwände gültigen Grundtoleranzen kommen bei rauen Rohren noch gewisse Zuschläge hinzu, die man Zusatztoleranzen nennt. Diese müssen aber nur für Rohrweiten unter 400 und für große Öffnungsverhältnisse beachtet werden. Die Zusatztoleranz für Normdüse und Normventuridüse beträgt bei $D = 100$ und $m = 0,6$ etwa 1 %, während sie bei gleichem D und m für die Normblende etwa 1,8 % beträgt. Bild 21 zeigt in zwei graphischen Darstellungen die Durchflußzahlen für Normblenden. Zunächst interessieren wir uns für die Darstellung a, in der auf der Abszisse im logarithmischen Maßstab die Reynoldssche Zahl und auf der Ordinate die Durchflußzahl aufgetragen ist. Das Öffnungsverhältnis erscheint dabei als Parameter. Man sieht, daß für jedes Öffnungsverhältnis eine Reynoldssche Zahl existiert, oberhalb derer die Durchflußzahl innerhalb der Grundtoleranz konstant bleibt, also von R_e und damit von der Geschwindigkeit der Strömung unabhängig wird. Die Verbindungslinie aller kleinsten R_e , für die α gerade noch den zu dem entsprechenden Öffnungsverhältnis gehörenden konstanten Wert hat, nennt man die Konstantgrenze. Man sagt: Oberhalb der Konstantgrenze ist die Durchflußzahl unabhängig von der Reynoldsschen Zahl. Nur in diesem Bereich ist eigentlich eine vernünftige Durchflußmessung möglich. In der Praxis ist auch fast immer die Messung in diesem Bereich möglich. Muß man doch einmal unter der Konstantgrenze messen, so muß die Abhängigkeit der Durchflußzahl von der Strömungsgeschwindigkeit eingeeicht werden.

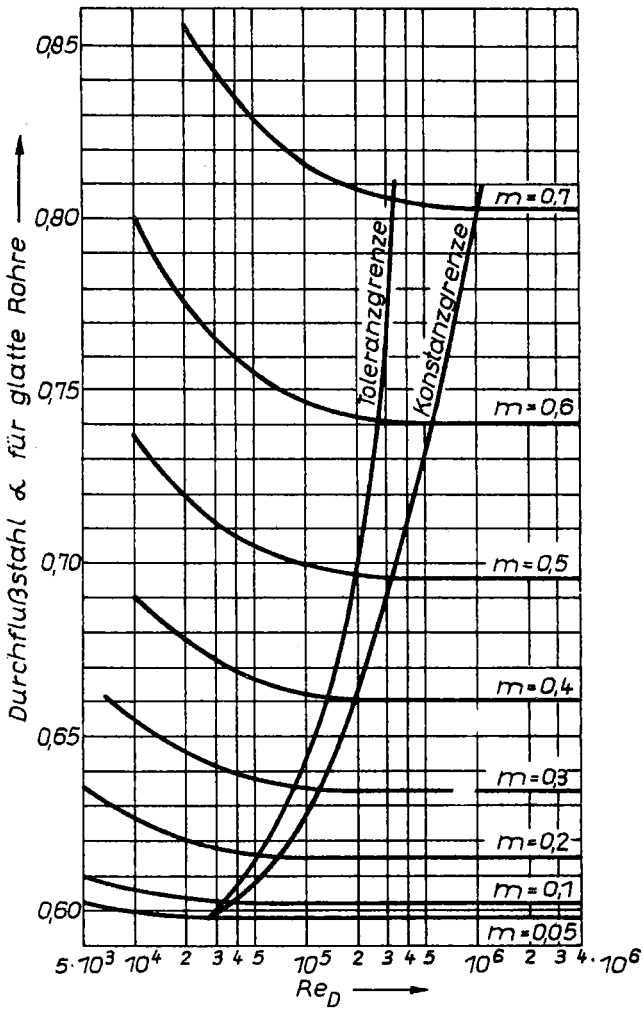


Abb. 21a

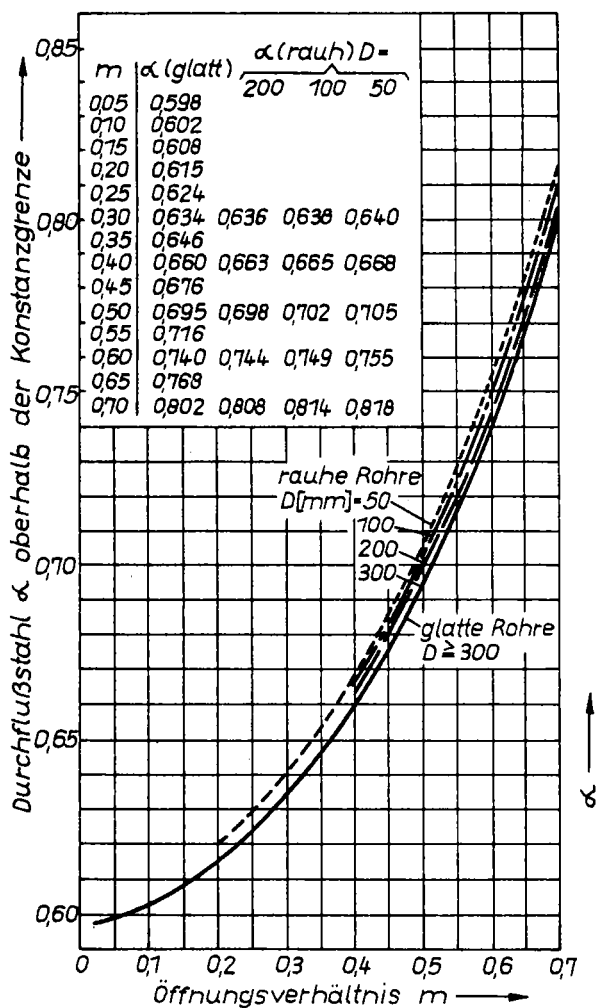


Abb. 21b

Sehr weit unter der Konstantgrenze kann man aber schon deshalb nicht messen, weil es auch zu jedem m eine Reynoldssche Zahl gibt, unterhalb derer die Grundtoleranz überschritten ist. Die Verbindungslinie dieser Punkte nennt man Toleranzgrenze. Unter der Toleranzgrenze ist eine Messung aus Gründen der ungenügenden Genauigkeit überhaupt sinnlos.

Bild 22 zeigt die gleichen Zusammenhänge für die Normdüse. Hier fallen Konstantgrenze und Toleranzgrenze zusammen. Das gleiche ist auch bei der Normventuridüse der Fall und liegt an der unstabilen Stelle auf der Einlaufrundung, an der ein Abreißen der Strömung möglich ist.

Die Darstellung b der Bilder 21 und 22 zeigt den Zusammenhang zwischen Durchflußzahl und Öffnungsverhältnis für Reynoldssche Zahlen oberhalb der Konstantgrenze. Dieser Zusammenhang ist für die Blendenberechnung sehr wichtig.

Die Expansionszahl

Den Einfluß der Kompressibilität der Gase haben wir bei der Herleitung der Durchflußgleichung durch die Expansionszahl ausgedrückt. Zum besseren Verständnis dieser Zahl müssen wir eine Darstellung finden, die möglichst allgemein und übersichtlich ist. Zu diesem Zweck formen wir den bei der Herleitung der Durchflußgleichung gefundenen Wert ein bißchen um. Wir fanden:

$$\epsilon = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\frac{1}{1-(p_2/p_1)} \cdot \left[1 \cdot (p_2/p_1)^{\frac{K-1}{K}} \right] \cdot \frac{K}{K-1}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2 (p_2/p_1)^{2/K}}} \cdot (p_2/p_1)^{1/K}$$

Nun entwickeln wir folgendermaßen:

$$\begin{aligned} 1 - (p_2/p_1)^{\frac{K-1}{K}} &= 1 - (1 - \Delta p/p_1)^{\frac{K-1}{K}} = 1 - \left(1 - \frac{K-1}{K} \Delta p/p_1 + \dots \right) \\ &= \frac{K-1}{K} p/p_1 = (1 - (p_2/p_1)) \cdot \frac{K-1}{K} \end{aligned}$$

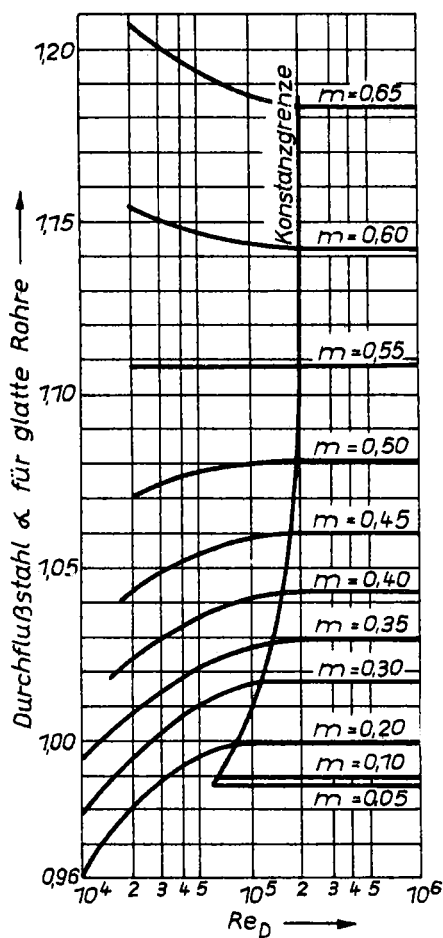


Abb. 22a

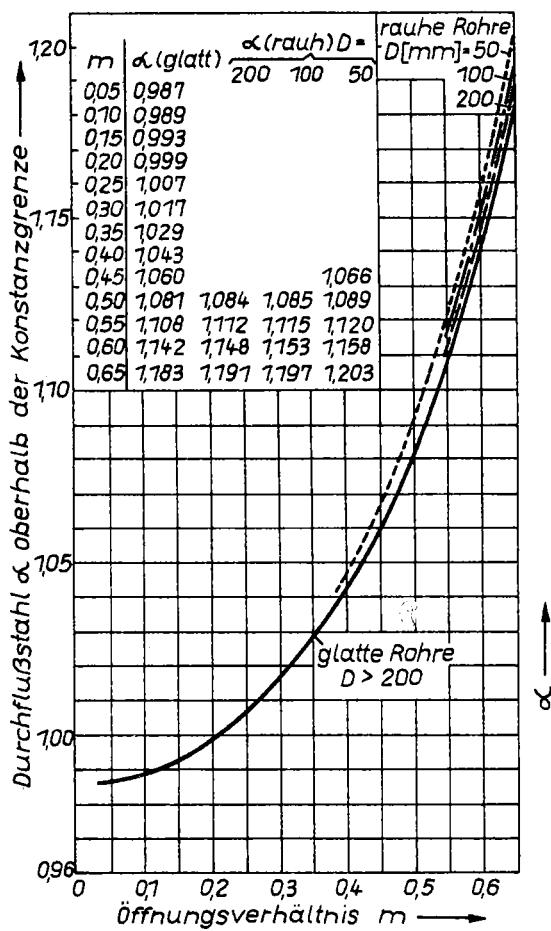


Abb. 22b

Das setzen wir in ξ ein und finden:

$$\xi = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{(p_2/p_1)^{1/K}}{\sqrt{1 - \mu_m^2 (p_2/p_1)^{2/K}}}$$

Nun setzen wir $(p_2/p_1)^{1/K} = y$ und erhalten:

$$\xi = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{y}{\sqrt{1 - \mu_m^2 y^2}}$$

Das ist eine brauchbare Gleichung. Sie ist zwar nicht ganz exakt, weil wir in der obigen Entwicklung nur das erste Glied berücksichtigt haben, stimmt aber für die Bedürfnisse der Praxis vollständig. Möge unser vereinfachtes ξ um 10 % vom wahren abweichen, so spielt dieser Fehler noch nicht die geringste Rolle, weil ja ξ selbst nur eine Korrekturzahl ist, die nur um wenige % von 1 abweicht. Ob die durch ξ gelieferte Korrektur des Durchflusses 2 % oder 2,2 % beträgt, ist bei einer allgemeinen Meßgenauigkeit von 0,5 % völlig belanglos. Unsere vereinfachte Darstellung genügt also vollständig und gilt praktisch genau. Das bemerkenswerte an ihr ist, daß sie von K unabhängig ist, da ξ über dem Maßstab $(p_2/p_1)^{1/K}$ aufgetragen ist. Sie gilt demnach für alle Stoffe. Mit überhitztem Wasserdampf und Naturgas wurden experimentelle Überprüfungen vorgenommen, die eine vollständige Übereinstimmung von Theorie und Experiment ergaben. Es ist nun allgemein üblich, die Expansionszahl auf der Abszisse und die Hilfsgröße $(p_2/p_1)^{1/K}$ auf der Ordinate aufzutragen. Dadurch entsteht für Blenden und Düsen je eine von rechts oben nach links unten verlaufende Linienschar. Zu jedem m gehört eine Linie. Nun müßte man sich zu jedem (p_2/p_1) das zugehörige $(p_2/p_1)^{1/K}$ ausrechnen und die zu diesem Wert gehörende Expansionszahl aus dem Diagramm aufsuchen. Diese Rechenarbeit kann man durch ein weiteres Diagramm ersparen. Man braucht nur $(p_2/p_1)^{1/K}$

über (p_2/p_1) aufzutragen. Es ist üblich, dieses Diagramm in die Darstellung für ε hineinzuzichnen. Dann erhalten wir

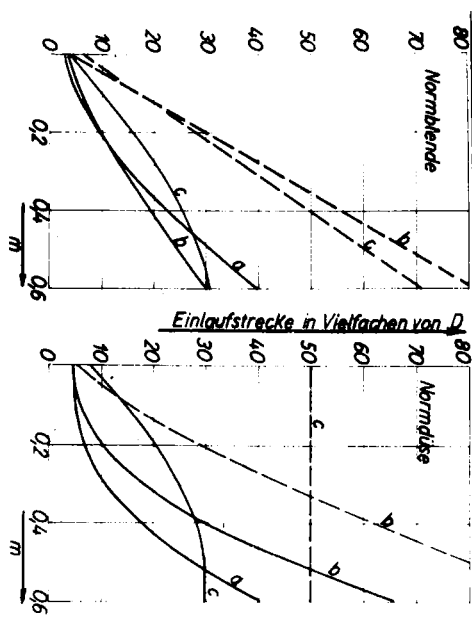


Abb. 23 Einlaufstrecken:

- a) Drossel hinter Krümmer
- b) Drossel hinter Ventil
- c) Drossel hinter 10 - 30 %
geöffnetem Schieber

----- Einzelanbohrung
 ————— Ringkanal

das Bild 20. Auf der Abszisse sind zwei verschiedene Größen aufgetragen: nämlich die Expansionszahl, deren Betrag unter dem Diagramm an die Abszisse geschrieben ist, und das Verhältnis von Minus- und Plusdruck (p_2/p_1) , dessen Betrag über dem Diagramm an die Abszisse geschrieben ist. Rechts neben dem Diagramm trägt die Ordinate die Beträge der Hilfsgröße $(p_2/p_1)^{1/K}$. Das Auffinden der Expansionszahl ist jetzt denkbar einfach geworden. Man geht vom gewünschten p_2/p_1 aus senkrecht nach unten bis zur betreffenden K-Linie, dann geht man waage- recht bis zur entsprechenden ε -Linie weiter, um von dort aus

senkrecht nach unten bis zur ε -Skala zu gelangen, wo man das gefundene ε ablesen kann. Diese Vorschrift der Benutzung des Diagramms ist auf Bild 23 durch eine gestrichelte Linie eingezeichnet.

Dem Diagramm können keine Werte für die Normventuridüse entnommen werden. Damit soll aber nicht gesagt sein, daß es für

die Normventuridüse nicht auch gültig sei. Es liegen zwar keine Eichmessungen vor. Man kann aber nicht daran zweifeln, daß der durch unsere kurze Rechnung gefundene Zusammenhang zwischen ξ und $(p_2/p_1)^{1/K}$ auch für die Normventuridüse gültig ist. Deshalb kann man unter Verwendung der für die Venturidüse zuständigen Durchflußzahlen aus den Linien für die Düsen sicher ohne Fehler auch die Linien für die Venturidüse ~~zuständigen Durchflußzahlen aus den Linien für die Düsen~~ ~~sicher ohne Fehler auch die Linien für die Venturidüsen~~ gewinnen.

Die von uns bisher gegebene Darstellung der Verhältnisse ist allerdings nur für den sogenannten "unterkritischen Expansionsbereich" vollständig. Als kritische Expansion bezeichnet man den Fall, daß die Strömung in der Verengung mit Schallgeschwindigkeit erfolgt. Größere Geschwindigkeiten sind aber bei Blende und Düse auch gar nicht möglich. Nur bei der Venturidüse kann im konischen Auslauf die Geschwindigkeit über die Schallgeschwindigkeit steigen. Die Verhältnisse bei Überkritischer Expansion wollen wir aber außer Acht lassen. Bei kritischer Expansion wird die überschüssige Bewegungsenergie durch intensive Schallwellen, die sich durch mächtiges Getöse bemerkbar machen, verzehrt. Dadurch steigt die Geschwindigkeit bei Blenden und Düsen nicht weiter.

Bei gegebener Blende kann nun mit Hilfe der Durchflußgleichung aus dem Wirkdruck der Durchfluß berechnet werden. In der Praxis ist aber häufig eine andere Aufgabe zu lösen. Es ist nämlich zu einem gegebenen Wirkdruckmeßgerät bei bekanntem mittleren Durchfluß für eine vorhandene Rohrleitung der Blendendurchmesser zu berechnen. Hier ist nicht nur α , sondern mit d auch m unbekannt. Man kennt aber den lichten Rohrdurchmesser D und kann damit nach der Gleichung $d^2 = m D^2$ den Durchmesser der Blendenöffnung ausdrücken. Damit geht man in die Durchflußgleichung und löst diese nach $\xi m \alpha$ auf.

$$\xi m \alpha = \frac{Q}{0,01252 D^2 \sqrt{\frac{d p}{p}}}$$

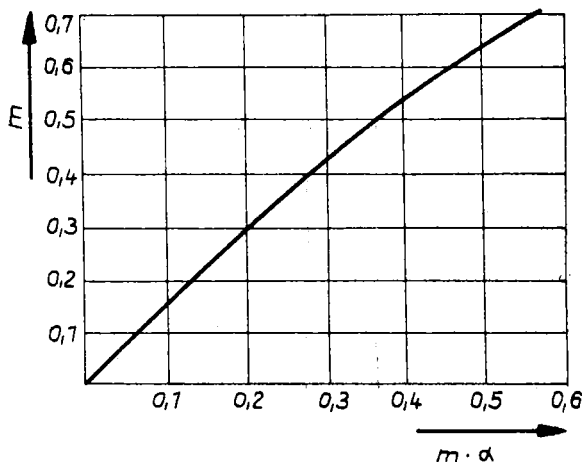


Abb. 23 a

Da man den mittleren Durchfluß Q und den durch das Wirkdruckmeßgerät gegebenen mittleren Wirkdruck Δp kennt, ist durch diese Gleichung E $m \alpha$ bekannt.

Im Falle eines inkompressiblen Mediums kann dem Diagramm auf Bild 23 a das Öffnungsverhältnis entnommen werden. Liegt ein kompressibles Medium vor, so wird die Kompressibilität zunächst vernachlässigt und dem Bild 23 a ein ungefähres Öffnungsverhältnis entnommen. Mit diesem entnehmen wir dem Bild 20 eine vorläufige Expansionszahl. Mit dieser wird das Produkt noch korrigiert und dem Bild 23 a ein verbessertes m entnommen. Diese Operation wird mehrfach ausgeführt, wodurch man sich dem genauen Wert beliebig nähern kann.

3.6 Voraussetzungen für die Gültigkeit der Durchflußgleichung

Die VDI-Durchflußmeßregeln schreiben eine Reihe von Bedingungen vor, die bei einer einwandfreien Durchflußmessung eingehalten werden müssen. Der geübte Leser kann sie alle aus der Ableitung der Durchflußgleichung entnehmen.

Forderungen an Strömung und Medium

Die Strömung muß quasi-stationär sein, d.h. sie darf sich nur so langsam verändern, daß die Meßwerterfassung verzögerungsfrei folgen kann. Es dürfen also vor allen Dingen keine Schwingungen der Strömung überlagert sein; die Strömung darf nicht pulsieren.

Das strömende Medium muß alle Querschnitte voll ausfüllen. Die Dichte des strömenden Mediums im Zustand vor der Drossel muß genau bekannt sein. Die Hälfte des relativen Fehlers der Dichte geht in den Fehler des Durchflusses ein.

Man muß angenähert die Viskosität des strömenden Mediums kennen, um abschätzen zu können, ob die Reynoldssche Zahl oberhalb oder unterhalb der Konstantgrenze liegt.

Der strömende Stoff muß sich in reiner Phase befinden. In Flüssigkeiten dürfen sich keine schwebenden Festkörper befinden, ebenso in Gasen keine groben Staubteilchen. Kolloidale Lösungen müssen so feindispers sein, daß sich ihre physikalischen Eigenschaften von einer reinen Lösung nur wenig unterscheiden. Besonders zu beachten ist dieser Punkt bei Gasen in der Nähe des Kondensationspunktes und bei Flüssigkeiten in der Nähe des Siedepunktes. Vor allem ist darauf zu achten, daß durch die Druckerniedrigung nicht der Siedepunkt der Flüssigkeit erreicht wird.

Normgerechter Einbau

Selbstverständlich muß die Drossel den Konstruktionsvorschriften entsprechen. Das allein genügt aber für eine genaue Messung noch nicht. Es müssen auch einige Einbauvorschriften erfüllt sein. Das Rohr soll im Einlauf zylindrisch sein. Die größte Änderung des Rohrdurchmessers auf eine Länge von $2D$ vor dem Drosselgerät infolge Unrundheit darf für m $0,3 \pm 0,5 \%$

$0,6 \pm 2\%$

und für $m > 0,3 \pm 2\%$ nicht überschreiten.

Das Rohr soll glatt oder betriebsrauh sein. Dabei kommt es auf die relative Rauheit an. Je größer also der Rohrdurchmesser ist, umso besser kann man die Wand als glatt ansehen. Als glatt darf ein neues, gußeisernes, innen geteertes Rohr von 200 mm lichter Weite angesehen werden. Als betriebsrauh darf ein gußeisernes innen verrostetes Rohr ohne grobe Verkrustungen angesehen werden.

Vor und hinter dem Drosselgerät muß die Rohrleitung auf eine längere Strecke geradlinig und ohne Querschnittsänderung sein. Man spricht von der Einlauf- und Auslaufstrecke. Einlauf- und Auslaufstrecke müssen so groß sein, daß sich keine Störung auf die Messung des Drosselgerätes auswirken kann. Bild 23 enthält einige Diagramme, auf denen in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis die Einlauf- und Auslaufstrecken als ganze Vielfache von D dargestellt sind. In der Praxis hat man aber oft die gewünschten störungsfreien Rohrlängen nicht zur Verfügung. Nimmt man die Hälfte der geforderten Längen, dann sind die Toleranzen um 0,5 % zu erhöhen.

Eine Störung nach der Drossel wirkt sich immer geringer aus als eine solche ~~vor~~ dem Gerät. Für alle Störungen genügt eine Auslaufstrecke von 5D.

Im Einlauf wirken sich besonders störend halb geöffnete Schieber und Ventile aus. Sie erzeugen eine wilde Turbulenz und verursachen beträchtliche Meßfehler. Große Einlaufstrecken sind auch hinter Raumkrümmern erforderlich. Diese verleihen der Strömung einen Drall, der nur allmählich abklingt. Hinter einer Rohrerweiterung bildet sich ein Strahl aus, wie er hinter einer Blende entsteht. Erst nachdem die Strömung wieder den ganzen Querschnitt ausfüllt, kann eine Drossel eingebaut werden. Die Einlaufstrecke beträgt bei einer Verengung auf den halben Querschnitt 10D für $m > 0,2$ und 20D für $m = 0,25-0,50$. Für $m > 0,5$ liegen keine Messungen vor. Man sollte aber die Einlaufstrecke größer als 30D wählen. Eine Rohrverengung stört die Messung weniger. Man soll aber trotzdem eine Einlaufstrecke von 10 - 15D einhalten. Sie muß umso größer sein, je größer m ist. Wird der Übergang düsenförmig gestaltet, so genügt eine Einlaufstrecke von 2D.

3.7 Auswahl der Drossel

Bei der Auswahl der Drossel für eine bestimmte Durchflußmessung spielen Preis und bleibender Druckverlust die Hauptrollen. Die billigste Drossel ist die Blende. Sie ist auch am leichtesten auswechselbar. Im allgemeinen werden die Blenden in der eigenen Werkstatt hergestellt. Wesentlich größere Anschaffungskosten verursachen Normdüse und Normventuridüse. Der Einlauf muß nach einer Schablone hergestellt werden und verursacht viel Arbeitsaufwand. Der Materialeinsatz ist wesentlich größer.

Die Wartungskosten stehen allerdings genau im umgekehrten Verhältnis. Die Blenden verschmutzen leicht und verlieren allmählich ihre Kantenschärfe. Sie müssen daher gelegentlich gereinigt und abgedreht werden. Die Verschmutzung der Düsen und Venturidüsen erfolgt wesentlich langsamer. Eine Abnutzung

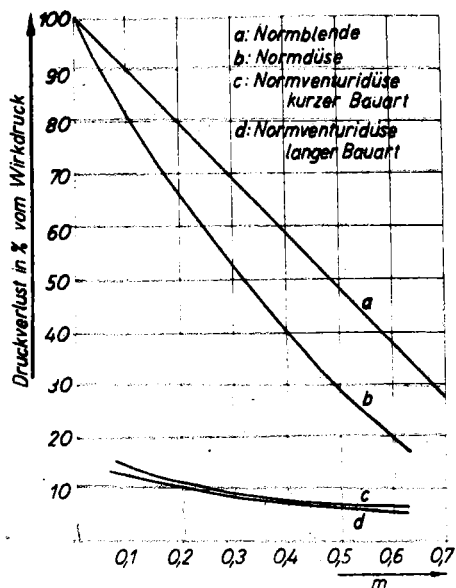


Abb. 24 Druckverlust in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis

tritt fast gar nicht ein. Der zweite, sehr wesentliche Gesichtspunkt bei der Auswahl einer Drossel ist der bleibende Druckverlust. Da nach der Einschnürung der statische Druck in jedem Falle wieder steigt, ist der Druckverlust immer kleiner als der Wirkdruck. Man gibt ihn daher auch gewöhnlich in Prozenten vom Wirkdruck an. Auf Bild 24 ist der Druckverlust in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis dargestellt. Er ist am größten für die Blende. Als Faustformel wird häufig folgender Ausdruck verwendet:

$p' \approx (1-m) \Delta p$. Er ist nicht ganz richtig. Da er immer zu große Werte liefert, kann er in der Praxis ohne Bedenken verwendet werden.

Bezogen auf den Wirkdruck sind die Verluste bei Normblende und Normdüse etwa gleich. Für die Normdüse gilt aber bei gleichem Durchfluß ein größeres α . Daher ist der Druckverlust, bezogen auf den Durchfluß etwas kleiner als bei der Normblende. Die kleinsten Druckverluste treten bei der Normventuridüse auf, weil im konischen Auslauf die Strömung nicht abreißt und daher keine Wirbel entstehen können. Als Faustregel könnte man verwenden $p' = (1-m) \cdot 0,15 \cdot \Delta p$. Die Verluste der Normblende sind also etwa 6 mal so groß wie bei der Normventuridüse.

3.8 Zusammenfassung

Die wichtigsten Durchflußmeßgeräte sind die Normdrosseln:

1. Normblende

Sie stellt eine zentral durchbohrte Scheibe mit scharfer Einlaufkante, zylindrischer Einlaufbohrung von weniger als $0,02D$ und konischem Auslauf mit mehr als 30° Abschrägung dar. Ihre Dicke ist kleiner als $0,1D$. Die Strömung reißt an der Einlaufkante ab und schnürt sich daher in definierter Weise ein. Die Wirkdruckentnahme erfolgt unmittelbar vor und hinter der Blende durch Ringkanäle oder Einzelanbohrungen von weniger als $0,03D$ Durchmesser.

2. Normdüse

Die Normdüse hat einen abgerundeten Einlauf, der aus einer ebenen Stirnfläche und zwei ineinander übergehende Kreisbogen ($r_1 = 0,2D$; $r_2 = d/3$) besteht. Die Einlaufrundung geht in den Einlaufzylinder von $0,3D$ Länge über. Dieser endet in einer scharfen Auslaufkante, an der die Strömung abreißt. Die Wirkdruckentnahme erfolgt unmittelbar vor der Düse durch Ringkanäle oder Einzelanbohrungen und im Einlaufzylinder immer durch Einzelanbohrungen.

3. Normventuridüse

Sie hat den gleichen Einlauf wie die Normdüse. An den Einlaufzylinder schließt sich der keglige Diffusor mit weniger als 15° Öffnungswinkel an. Die Strömung folgt der Oberfläche und reißt nicht ab. Die Wirkdruckentnahme erfolgt genau wie bei der Normdüse.

Die Normdrosseln stellen alle eine Rohrverengung dar, in der nach der Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit steigt und nach der Bernoullischen Gleichung der statische Druck sinkt, so daß zwischen größtem und kleinstem Strömungsquerschnitt eine Druckdifferenz, der Wirkdruck auftritt. Aus dem Wirkdruck berechnet man den Durchfluß nach der Durchflußgleichung aus:

$$Q = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

Man nennt α die Durchflußzahl. Sie ist oberhalb der Konstantgrenze von der Reynoldsschen Zahl unabhängig. Die Reynoldssche Zahl, unterhalb derer die Messung mit mehr als 0,5 % Unsicherheit behaftet ist, nennt man die Toleranzgrenze. Sie fällt bei der Normdüse und Normventuridüse mit der Konstantgrenze zusammen und liegt bei der Normblende ein wenig unterhalb der Konstantgrenze.

Die Zahl ϵ heißt Expansionszahl, ist abhängig von K und hat für Flüssigkeiten den Wert 1 und für Gase einen Wert, der umso kleiner als 1 ist, je mehr sich die Strömungsgeschwindigkeit der Schallgeschwindigkeit nähert. Der Druckverlust ist immer kleiner als der Wirkdruck. Er ist bei der Normventuridüse am kleinsten, bei der Normdüse ein wenig größer und bei der Normblende mit $100 \cdot (1-m) \%$ des Wirkdruckes am größten.

Eine normgerechte und genaue Durchflußmessung setzt eine quasi-stationäre Strömung voraus, die alle Querschnitte ausfüllt. Der strömende Stoff muß in reiner Phase vorliegen. Das Rohr muß zylindrisch und glatt sein und darf in der Einlauf- und Auslaufstrecke sich nicht erweitern oder verengen, noch darf es Einbauten enthalten. Die Auslaufstrecke ist 5D; die Einlaufstrecke ist größer.

4. Nichtgenormte Drosselgeräte

4.1 Segmentblende

Mit den Normdrosseln können Durchflüsse stark verschmutzter Flüssigkeiten nicht gemessen werden. Grobe Schmutzteilchen setzen sich in den Totwassergebieten ab und verändern die Form der Einlauf- und Auslaufströmung. Dadurch ändert sich die Durchflußzahl beträchtlich. Feinere Schmutzteilchen setzen sich an der scharfen Einlaufkante der Blenden und an der Auslaufkante der Düsen ab und bewirken damit eine Abrundung der Kante. Dadurch wird mit der Blende ein zu geringer und mit der Düse ein zu großer Durchfluß gemessen. Um den Verschmutzungsgrad der Drosseln überblicken zu können, baut man daher gelegentlich eine Düse und eine Blende hintereinander in ein und dieselbe Rohrleitung und erkennt am Auseinanderstreben der beiden Anzeigen den Zeitpunkt, an dem eine Reinigung der Drosseln notwendig wird. Diese Methode ist aber nicht nur kostspielig und verlangt lange Rohrleitungen, sie ist auch nur bei feinen Verunreinigungen sinnvoll anwendbar.

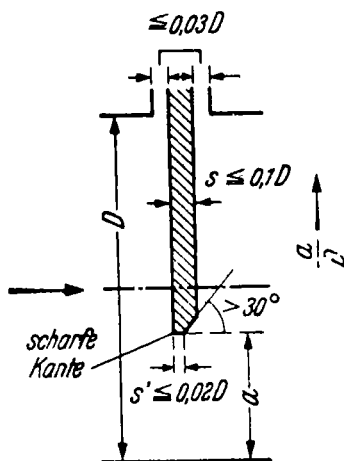


Abb. 25 Segmentblende

Für die Messung des Durchflusses von Flüssigkeiten, die grobe Verunreinigungen enthalten, und von Gasen, die Flüssigkeitsteilchen mitführen, eignet sich die Segmentblende wesentlich besser als die Normdrosseln. Die Segmentblende deckt in Form eines Kreisabschnittes den oberen Teil des Rohrquerschnittes ab. Grobe Verunreinigungen, die unten im Rohr mitgeschleift werden, können ungehindert bewegen. Leichte Schwebeteilchen stoßen gegen die Blende, fallen herunter und werden von der Strömung mitgerissen. Natürlich bleiben auch

Teilchen an der Kante der Blende haften und führen zu Meßungenauigkeiten. Eine Segmentblende bleibt aber wesentlich länger brauchbar als eine Normblende.

Die Konstruktionsmaße der Segmentblende können Bild 25 entnommen werden. Sie entsprechen durchaus den Maßen der Normblende. Der Wirkdruck wird oben abgenommen. Wir bezeichnen mit F_0 den freien Querschnitt, dessen Höhe a ist, und mit D den Rohrdurchmesser. Der gesamte Rohrquerschnitt ist F . Unter dem Öffnungsverhältnis m versteht man auch hier $m = F_0/F$.

Wir möchten nun m mit den bekannten Größen D und a ausrechnen. Dem Bild entnehmen wir:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{r - a}{r}$$

$$\text{und } x = \sqrt{2ar - a^2}$$

Der Kreisausschnitt mit dem Winkel α hat die Größe

$$F' = \frac{r^2 \alpha}{2} = r^2 \arccos(1 - 2 \frac{a}{D})$$

Davon ist das Dreieck

$$F'' = (r - a)x = (\frac{D}{2} - a) \sqrt{2ar - a^2}$$

abzuziehen und wir erhalten:

$$m = \frac{F_0}{F} = \frac{F' - F''}{r^2 \pi} = \frac{1}{\pi} \left[\arccos(1 - 2 \frac{a}{D}) - 2(1 - 2 \frac{a}{D}) \sqrt{\frac{a}{D}(1 - \frac{a}{D})} \right]$$

Diese Formel ist für den praktischen Gebrauch nicht sehr bequem. Deshalb entnimmt man m bei gegebenem a/D lieber der Darstellung auf Bild 26.

Das Strömungsfeld der Segmentblende unterscheidet sich natürlich von dem der Normblende. Es handelt sich aber auch hier um eine Einschnürung der Strömung, so daß die gleiche Durchflußgleichung gültig sein muß:

$$Q = \alpha \cdot F_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

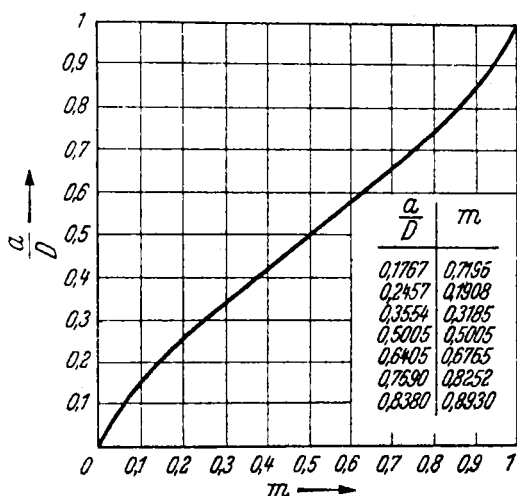
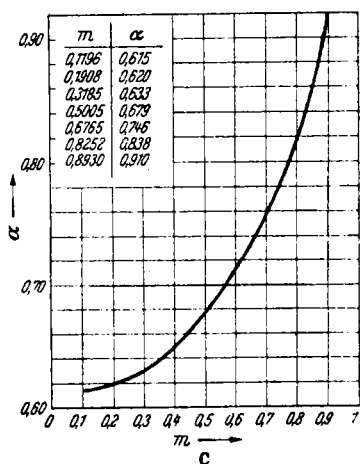


Abb. 26 Zur Berechnung der Segmentblende



Allerdings gelten für die Segmentblende eigene Durchflußzahlen. Auf Bild 27 ist die Durchflußzahl oberhalb der Konstantgrenze über dem Öffnungsverhältnis dargestellt. Die Konstantgrenze ist die gleiche wie bei der Normblende.

Der Wirkdruck wird oben unmittelbar vor und hinter der Blende durch Einzelanbohrungen abgenommen. Der Druckverlust ist nur wenig größer als bei der Normblende.

Abb. 27 Durchflußzahl der Segmentblende

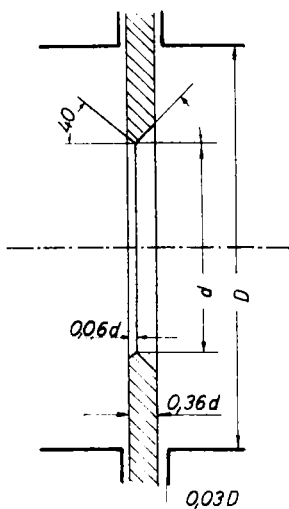
4.2 Spezialdrosseln für kleine Reynoldssche Zahlen

Die Normdrosseln sind für kleine Reynoldssche Zahlen, also für langsam strömende und zähe Medien, nicht brauchbar. Unterhalb der Konstantgrenze ist eine Messung sehr unbequem, weil die Durchflußzahl vom Durchfluß abhängt. Die Durchflußzahl der Normblende wächst mit kleiner werdendem Durchfluß, da die Einschnürung geringer wird. Die Durchflußzahl der Normdüse und Normventuridüse sinkt (für kleine Öffnungsverhältnisse) mit kleiner werdendem Durchfluß, da die Strömung an der Einlaufrundung abreißt und dadurch sowohl der Stau vor der Drossel als auch die Einschnürung im Einlaufzylinder zunimmt. Die Durchflußabhängigkeit der Durchflußzahl rührt also von einer Änderung der Strömungsform her. Diese Änderung erfolgt aber nicht zuverlässig, so daß die Durchflußzahlen in dem betrachteten Bereich unsicher sind.

Man kann nun Drosseln bauen, für die gerade die neue Strömungsform im Gebiet kleiner Reynoldsscher Zahlen stabil ist und außerdem eine konstante Durchflußzahl existiert. Es ist klar, daß für diese Durchflußzahlen eine obere und eine untere Konstantgrenze gilt.

Doppelt abgeschrägte Blende

Das Verhalten von Blende und Düse für Reynoldssche Zahlen unterhalb der Konstantgrenze legt eine Kombination beider Typen nahe und führte zur Entwicklung der doppelt abgeschrägten Blende. Man kennt zwei Formen. Sie sind auf Bild 28 skizziert. Die Form a erinnert noch etwas an eine Düse. Die ebene Stirnfläche geht tangential in einen Kreisbogen mit dem Radius $r = 1d$ über (d ist der Durchmesser der freien Öffnung). Auf diesen Kreisbogen folgt der gerade abgeschrägte Einlauf, der gegen die Rohrachse geneigt ist. Die Dicke der Blende ist $0,6d$. Für große Rohrweiten ist diese Drossel also recht dick. Deshalb wird sie nur selten verwendet. Die Form a ist im Bereich der Reynoldsschen Zahlen von 3000 bis 100 000 mit Öffnungsverhältnissen zwischen 0,16 und 0,25 brauchbar.



Die Form b hat einen sehr kurzen, geraden Einlauf, der um 40° gegen die Rohrachse geneigt ist. Der Auslauf ist ebenfalls gerade und um 45° gegen die Rohrachse geneigt. Einlauf und Auslauf berühren einander in der scharfen Kante. Die Länge des Einlaufes ist $0,06d$; die Länge des Auslaufes ist $0,3d$. Diese Form ist also wesentlich dünner als die Form a. Sie kann außerdem wesentlich leichter hergestellt werden und hat daher eine größere Verbreitung gefunden. Ihre Verwendung wird allerdings insofern wieder stark eingeschränkt, als sie nur für das Öffnungsverhältnis $0,121$ gut brauchbar ist. Für andere Öffnungsverhältnisse ist die Strömungsform zu instabil, so daß

Abb. 28

Doppelt abgeschrägte Blende man mit großen Meßfehlern rechnen muß. Für das eine Öffnungsverhältnis reicht ihr Meßbereich aber bis in das Gebiet der laminaren Strömung hinein. Die Durchflußzahl hat den konstanten Wert von $0,75$, für Reynoldssche Zahlen zwischen 50 und $30\,000$. Es empfiehlt sich aber, diese Blenden vor dem Einbau möglichst unter Betriebsbedingungen zu eichen.

Viertelkreisdüse

Die zweite Möglichkeit, bei kleinen Reynoldsschen Zahlen mit Drosseln zu messen, bieten Düsen, an deren Einlaufrundung die Strömung abreißt. Damit durch ein nachfolgendes Ansaugen des abgelösten Strahles keine Unsicherheiten an der Strömungsform geschaffen werden, muß hier natürlich der Einlaufzylinder wegbleiben. Läßt man bei der Normdüse einfach den zylindrischen Einlauf weg, so hat man bereits eine Drossel, die für

Reynoldssche Zahlen zwischen 4000 und 100 000 mit Öffnungsverhältnissen von 0,37 bis 0,45 brauchbar ist. Da aber ihre Herstellungskosten recht hoch sind und der Meßbereich ziemlich eng ist, wird sie kaum benutzt. Viel allgemeiner verwendbar und auch billiger ist die von Koennecke genauer untersuchte Viertelkreisdüse. Ihr Einlauf wird von einem Kreisbogen gebildet und endet in einer scharfen Kante genau dort, wo die Tangente an den Kreis die Richtung der Rohrachse hat. Der Anfang des Einlaufes kann verschieden gestaltet sein. Ist der Krümmungsradius $r < a$ ($a = \frac{D-d}{2}$), so geht die ebene Stirnfläche tangential in die Einlaufrundung über. Ist $r \geq a$,

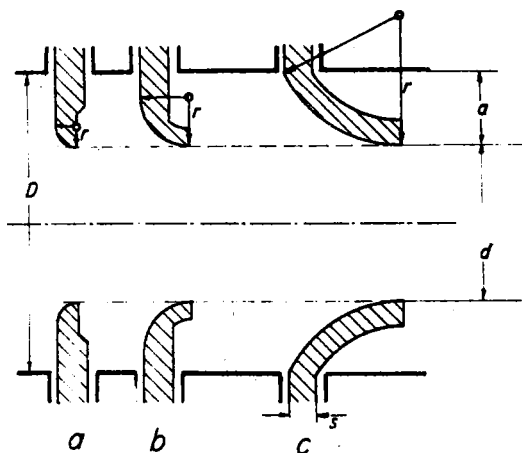
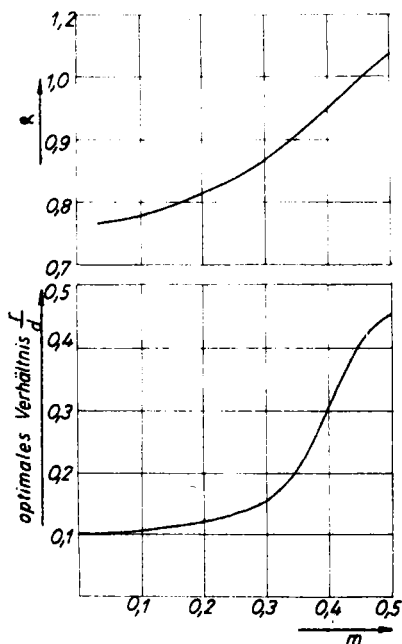


Abb. 29 Viertelkreisdüse

so existiert keine ebene Stirnfläche und die Einlaufrundung ist entweder genau ein Viertelkreis oder weniger. Eine weitere Variationsmöglichkeit liefert die Einspannstärke, die auf Bild 29 mit s bezeichnet ist. Ist der Krümmungsradius größer als die Einspannstärke, so entsteht die Form b und c, ist er

kleiner, so liegt die Form a vor. Man sieht, es bestehen eine ganze Reihe Gestaltungsmöglichkeiten, und damit eine Anzahl verschiedener Strömungsformen. Diese Vielfalt konnte bis heute noch nicht durch allgemeine Konstruktionsvorschriften so weit vereinfacht werden, daß eine Normung möglich gewesen wäre. Durchflußzahl und Konstanzbereich hängen von mehreren Variablen ab. Eine umfassende Darstellung ist daher nur durch ein gewaltiges System von Kurven und Tabellen möglich. Wählt man nach dem Gesichtspunkt der größten Meßgenauigkeit, also der stabilsten Strömungsform, bei möglichst großem Meßumfang



für jedes Öffnungsverhältnis das günstigste Verhältnis r/d aus, so gewinnen die Zusammenhänge wesentlich an Übersichtlichkeit. Zu jedem Öffnungsverhältnis gehört dann ein Verhältnis r/d und eine Durchflußzahl α . Der Konstanzbereich ist dann nur noch von m abhängig. Diese Zusammenhänge sind auf Bild 30 dargestellt. Die Viertelkreisdüse ist für Öffnungsverhältnisse zwischen 0,05 und 0,5 im Bereich der Reynoldsschen Zahlen von 500 bis 200 000 brauchbar. Sie stellt die bisher zuverlässigste Drossel im Gebiet der kleinen Reynoldsschen Zahlen dar.

Abb. 30 Optimal Daten der Viertelkreisdüse

4.3 Zusammenfassung

Durchflüsse von Medien, die grobe Verunreinigungen enthalten, können mit den Normdrosseln nicht gemessen werden. Die Segmentblende deckt in Form eines Kreisabschnittes nur den oberen Teil des Rohrquerschnittes ab, weshalb auf dem Boden mitgeführte Verunreinigungen sich ungehindert bewegen können und auch zweiphasige Medien gemessen werden können. Der Wirkdruck wird durch Einzelanbohrungen unmittelbar vor und hinter der Blende an der höchsten Stelle abgenommen.

Im Gebiet kleiner Reynoldsscher Zahlen ist die Strömungsform der Normdrosseln instabil und die Messung ungenau. Ferner ist die Durchfließzahl nicht mehr konstant. Für dieses Gebiet wurden Drosseln mit stabiler Strömungsform und konstanter Durchfließzahl entwickelt: 1. die doppelt abgeschrägte Blende,

2. die Viertelkreisdüse.

Die doppelt abgeschrägte Blende ist nur für das Öffnungsverhältnis 0,12 optimal brauchbar, gestattet aber Messungen bis herab in das Gebiet der laminaren Strömung. Die Viertelkreisdüse ist für einen weiteren Bereich von Öffnungsverhältnissen brauchbar ($m = 0,05$ bis $0,5$; $Re = 500$ bis $200\,000$), reicht aber nicht bis zu so kleinen Reynoldsschen Zahlen herab.

