

Alte Quecksilberbarometer

Eine ausführliche Darstellung der Bauformen und Abbildungen typischer Exemplare
Teil I

Als wir in den 60er Jahren unsere Berufsschulzeit absolvierten, lernten wir, daß die meteorologischen Instrumente kein Unterrichtsgegenstand mehr seien, weil der Augenoptiker damit praktisch nichts mehr zu tun hätte — für ein normales Augenoptikerfachgeschäft sicherlich auch zutreffend. Auf jeden Fall blieben wir auf diesem Gebiet unwissend. Vor 10 Jahren rächte sich diese Wissenslücke, als wir ein defektes Quecksilberbarometerrohr mit Holzgefäß und Lederboden zur Reparatur in die Hand bekamen. Der Kunde sagte lediglich, daß das Gerät nicht mehr funktioniere. Vorsichtig, fast wie zwei Feuerwerker, versuchten wir (damals waren wir im selben Betrieb tätig), das Holzgefäß

„Wenn wir gewußt hätten, was auf uns zukommt, hätten wir vermutlich nicht angefangen“

zu öffnen. Nach einigen Versuchen konnten wir das Rohr reparieren. Die Reparaturaufträge mehrten sich, und langsam begann die Sache Spaß zu machen. Das Interesse war geweckt, und wir eigneten uns viele Kenntnisse an. Einige Jahre später forderte uns ein Antiquitätenhändler aus Remels, Ostfriesland, auf, unser erworbenes Wissen niederzuschreiben. Wir teilten uns die Aufgabe, indem W. HABENICHT den historischen Teil übernahm und sein Schwager R. HOLLAND den technischen. 1977 brachten wir das Buch „Alte Quecksilberbarometer/Ihre Schönheit und Funktion“ heraus. Es waren stolze 200 Seiten geworden.

In dieser Artikelserie möchte R. HOLLAND noch einmal auf die Funktionsprinzipien der Quecksilberbarometer eingehen. Er wird fast alle uns bekannten Typen ansprechen und je nach Interessanztheitsgrad mehr oder weniger ausführlich beschreiben. Wo es möglich ist, verzichtet er auf komplizierte mathematische Abhandlungen. Es läßt sich aber nicht umgehen, einiges über den Druck, das Quecksilber und einige physikalische Grundzusammenhänge zu sagen.

Im einzelnen werden folgende Themen behandelt:

1. Torricellis Versuch
2. Der Luftdruck, eine physikalische Darstellung
3. Das Quecksilber
4. Das Funktionsprinzip der Quecksilberbarometer
5. Meßfehler und deren Ursachen
6. Die Sammelgefäße der Quecksilberbarometer
7. Zusatzeinrichtungen
8. Die Quecksilberbarometertypen
9. Die Flüssigkeitsbarometer ohne Quecksilber.

1. Torricellis Versuch

EVANGELISTA TORRICELLI weist den Luftdruck als physikalische Größe nach. Zusammen mit VIVIANI füllt er eine ca. 1 m lange, einseitig geschlossene Glasröhre mit Quecksilber, das rund 13,5mal schwerer als Wasser ist, verschließt die randvoll gefüllte Röhre mit dem Finger, stellt sie mit diesem Ende in eine Schüssel mit Quecksilber und löst den Finger von der Öffnung. Ein Teil des Quecksilbers läuft in die Schüssel ab, ein beträchtlicher Teil verbleibt aber in der Röhre.

Seine Vermutung wird bestätigt, daß die spezifische Höhe unterschiedlicher Flüssigkeiten, d. h. deren Gewicht, das Gegen-gewicht darstellt für eine Luftsäule gleichen Querschnitts. Bei der Umrechnung auf die entsprechende Höhe einer Wassersäule ermittelt er genau die Höhe der Wassersäule in der Saugpumpenanlage der florentiner Brunnenbaumeister (18 florentiner

Ellen \cong ca. 10 m). Als er die Glasröhre neigt, ändert sich zwar die Länge der Quecksilbersäule, aber nicht deren Höhe über dem Quecksilberpegel in der Schüssel (Hydrostatisches Paradoxon.)

Von der Auswirkung dieser Entdeckung wird bei der Spreizung (aus 7 cm Skalenslänge werden z. B. 14 cm) von Barometerskalen zur genauen Ablesung des Barometerstandes noch eingehend zu sprechen sein.

2. Der Luftdruck, eine physikalische Darstellung

Eine Kraft übt auf eine Fläche einen Druck aus.

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

Die Größe Druck wird in Pascal (Pa) bzw. Bar (bar) gemessen, wobei 1 bar = 100 000 Pa sind.

Die Kraft wird in Newton (N) und die Fläche in m^2 gemessen. Es ergeben sich die Formeln

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}$$

$$1 \text{ N} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Um die Sprache der Quecksilberbarometer zu verstehen, bedarf es einer Erweiterung in der Darstellung. Im Wetterbericht wird im Zusammenhang mit dem Luftdruck von Millimetern (mm), Torr (Torr) und Millibar (mbar) gesprochen.

Die folgende Berechnung veranschaulicht die Zusammenhänge.
760 mm Quecksilbersäulenhöhe auf 0°C bezogen sind 760 Torr = 1 atm

$$760 \text{ Torr} = 0,76 \text{ m}$$

Quecksilber-
säulenhöhe
bei 0°C

$$9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

mittlere
Erdbeschleunigung

$$13595 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichte des
Quecksilbers
bei 0°C

Die Werte eingesetzt ergeben

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} =$$

$$0,76 \text{ m} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 13595 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 101324,3 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Torr} = \frac{101324,3 \text{ Pa}}{760} =$$

$$133,32 \text{ Pa} = 1,3332 \text{ mbar}$$

Es wird deutlich, daß bei dem Punkt „Veränderlich“ entsprechend 760 Torr an modernen Barometern nicht 1000 mbar stehen kann, wie oft als vordergründig logisch erscheinen mag, sondern 750 Torr entsprechen 1000 (999,9) mbar.

Die nachfolgende Tabelle (A) enthält Vergleichswerte der verschiedenen Maßeinheiten des Drucks. Die stärker umrandeten Felder zu Beginn der Tabelle zeigen auf den ersten Blick die große Vereinfachung der seit 1. 1. 78 gültigen weltweit verbindlichen SI-Einheiten. Die alten Skalen tragen Längeneinteilungen in der jeweils gebräuchlichen Einheit des Landes.

Die Größe des mittleren Luftdrucks („Veränderlich“) wurde von Geräteherstellern offensichtlich oft willkürlich festgelegt, so daß es daher nahezu unmöglich wird, die Skalenbeschriftungen miteinander zu vergleichen.

Um zu zeigen, wie unterschiedlich die Skalen gestaltet waren, sind in Tabelle B einige Skalen dargestellt. Die Ursachen für die unterschiedlichen Höhen des Punktes „Veränderlich“ dürften folgende sein:

1. zu kleiner Zeitraum bei der statistischen Ermittlung
2. nicht berücksichtigte Ortshöhe, Temperatur, Nullpunktschwankung und schlechtes Vakuum in der Röhre
3. typische Wetterlagen (Seeklima/Landklima).

3. Das Quecksilber

Allgemeines

Quecksilber gehört zu den sieben schon im Altertum bekannten Metallen. Die Griechen nannten es „Wassersilber“ (hydrargyros), die Römer „lebendiges Silber“ (hydrargyrum — latinisierte Form des griechischen Wortes) oder mercurium. Das lebhafteste Metall wird dem Planeten zugeordnet, der den Namen des schnellen und lebhaften Götterboten und Gott des Handels trägt: Mercurius. Die Alchimisten führten den Namen „mercurium“ ein, der in mehrere Kultursprachen eingegangen ist. Ähnlich entstanden die Bezeichnungen Quecksilber oder quicksilver (eng. quick = schnell, lebhaft).

Die physikalischen Eigenschaften

In festem Zustand, bei weniger als - 38,9°C, ist Quecksilber ein weiches, mit dem Messer zu schneidendes Metall. Als einziges Metall hat es die Besonderheit, bei Normaltemperatur flüssig zu sein. Seine Farbe ist zinnweiß und hat einen metallischen Glanz.

Als Flüssigkeit mit einer abnorm hohen Dichte, es ist rund 13,5mal schwerer als Wasser, bietet es sich für die ersten Versuche und die spätere Herstellung von Barometern an. Zum Vergleich hier die Dichte von Quecksilber und anderen Metallen:

Eisen (Fe)	= 7,860 (bei 20°C)
Silber (Ag)	= 10,500 (bei 20°C)
Blei (Pb)	= 11,350 (bei 20°C)
Quecksilber (Hg)	= 13,546 (bei 20°C)
Gold (Au)	= 19,300 (bei 20°C)
Platin (Pt)	= 21,450 (bei 20°C)

Um einen erwachsenen Mann mit Quecksilber aufzuwiegen, werden nur etwa fünf Liter Hg benötigt. Einen Wassereimer voll Quecksilber (10—12 l) können vier Menschen gerade anheben.

Weitere physikalische Daten:

Siedepunkt	= + 357°C
Schmelzpunkt	= - 38,9°C
Dampfdruck	= 0,0012 Torr bei 20°C.

Die chemischen Eigenschaften

Chemisches Symbol: Hg

In trockener Luft oxydiert reines Quecksilber nicht. In feuchter Luft bildet es ein Oxidhäutchen. Das Metall löst sich in Salpetersäure (HNO₃) und Königswasser (HNO₃ + HCl, im Mischungsverhältnis 3:1), wird aber von verdünnter Schwefelsäure (H₂SO₄) und Salzsäure (HCl) nicht angegriffen. Reines Quecksilber ähnelt in seinem chemischen Verhalten den Edelmetallen, zu denen es früher auch gezählt wurde. Es tritt in seinen Verbindungen ein- und zweiwertig auf. Mit einer Reihe anderer Metalle legiert es zu Amalgamen, die je nach Zusammensetzung bei Zimmertemperatur flüssig, teigig oder fest sein können. Mit Eisen bildet Quecksilber kein Amalgam.

Das Vorkommen

In der Erdkruste ist Quecksilber mit einem durchschnittlichen Anteil von 0,00004% vorhanden und steht damit an 63. Stelle der Rohstoffvorkommen und ist viermal so häufig wie Silber. Im Gestein kommt es in gediegener Form nur selten vor.

Die häufigste Abbauverbindung ist das Zinnober. Seine größten Vorkommen liegen in:

Spanien — Provinz Ciudad Real
Jugoslawien — Gebiet Idria in Slowenien
Italien — Toskana am Monte Amiata
Türkei — Zentralanatolien

Weitere, an Reichtum aber weit geringere Fundorte liegen in USA, UdSSR, Mexico, China und Kanada.

Schon die Phönizier kannten die Vorkommen in Almadén in Spanien, und die Etrusker bauten die Vorkommen am Monte Amiata in Italien ab.

Die Gewinnung

Bei der pyrometallurgischen Destillation wird Zinnober in Schacht- oder Röstöfen auf 700—750°C erhitzt. Dabei entweichen Schwefeldioxyd und Quecksilberdampf, der in glasierten Keramikkühlern kondensiert. Aus dem „Strupp“ (Verunreinigungen aus Staub, Ruß und Teer) wird dann das Quecksilber mit Pressen herausgedrückt. Rückstände, die noch Quecksilber enthalten, werden in die Öfen zurückgefüllt.

Beim chemischen Ausfällen wird aus dem Gestein Zinnober durch Natriumsulfid ausgelaugt und Quecksilber durch metallisches Aluminium, als Katalysator, ausgefällt. Bei dieser Methode hat das Quecksilber einen Reinheitsgrad von fast 100%.

Umrechnungstabelle: SI-Einheiten und befristet zugelassene alte Einheiten

Es entsprechen	Pa	mb	bar	Torr (mm bei 0°C)	inch Hg	at	atm	mWS	inch WS
1 Pa	1	0,01	0,00001	0,0075	0,000295276	0,0000102	0,00000987	0,0001016	0,004000
1 mb	100	1	0,001	0,750	0,02952756	0,0010197	0,0009869	0,0101595	0,400013
1 bar	100 000	1000	1	750	29,527559	1,019716	0,9869232	10,1595	400013
1 Torr (mm bei 0°C)	133,32239	1,33322	0,001333	1	0,03937	0,0142	0,013157	0,13546	0,5333
1 inch Hg	3386,3887	33,863887	0,0338639	25,4	1	0,345	0,320	3,45	13,546
1 at	98066,5	980,665	0,980665	738,225	29,064	1	0,96784	10	393,701
1 atm	101325	1013,25	1,01325	760	29,92	1,033227	1	10,33227	405,296
1 mWS	9806,65	98,0665	0,0980665	73,8225	2,9064	0,1019716	0,098692	1	39,3701
1 inchWS	254	2,54	0,00254	1,8751	0,03937	1	0,0025067	0,0254	1
Formeln:	$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	10^2 Pa	10^5 Pa	$\frac{101325}{760} \text{ Pa}$		$\frac{98066}{\text{m}^2} \text{ N}$	$\frac{101325}{\text{m}^2} \text{ N}$		

Tabelle A

TEXTE ZUR TABELLE B

1 Heutige Millimeter-Skala auf Meereshöhe bezogen (NN)

2 Englische Skala

3 Französische Skala

4 36er Skala der holländischen Kontrabarometer

5 Eine alte deutsche Skala

6 Eine alte deutsche Skala, die Einteilung wäre bei einer Gebrauchshöhe von ca. 230 m normal

7 Eine Schweizer Skala (Bern 500—580 m über NN), die Einteilung wäre bei einer Gebrauchshöhe von ca. 470 m normal

Es ist zu erkennen, daß zwar die Maßeinteilungen, nicht aber die Beschriftungen (Wetterangaben) miteinander vergleichbar sind.

Alte Längenmaße im Vergleich

1 Amsterdamer Zoll	= 2,36 cm
1 Badischer (Schweizer) Zoll	= 3,00 cm
1 Bayerischer Zoll	= 2,92 cm
1 Englischer Zoll (inch)	= 2,54 cm
1 Hannoverscher Zoll	= 2,43 cm
1 Hessischer Zoll	= 2,50 cm
1 Leipziger (sächsischer) Zoll	= 2,36 cm
1 Pariser Zoll	= 2,71 cm
1 Rheinischer (preußischer) Z.	= 2,62 cm
1 Rußländischer Zoll	= 2,50 cm
1 Schleswig-Holsteinischer Z.	= 2,39 cm
1 Schwedischer Zoll	= 2,97 cm
1 Wiener Zoll	= 2,63 cm
1 Württembergischer Zoll	= 2,86 cm

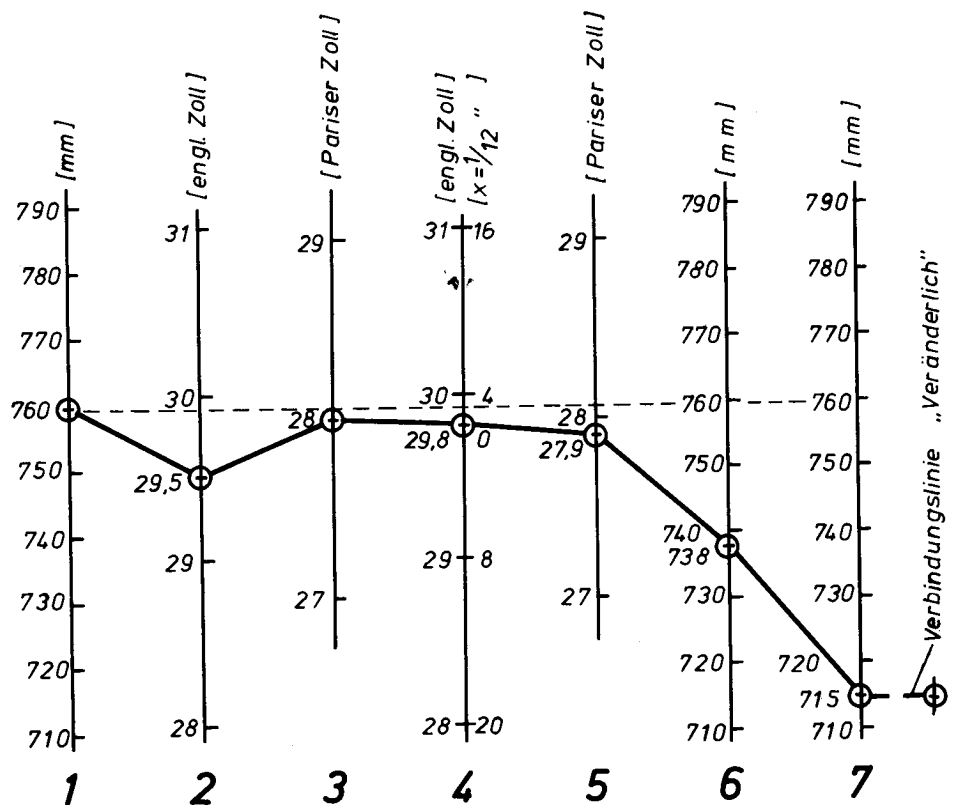


Tabelle B

Die Verwendung

Das Quecksilber hat eine besondere technische Bedeutung durch seinen flüssigen Zustand bei Normaltemperatur, seine hohe Dichte, seine gleichmäßige Volumenausdehnung, seine hohe Oberflächenspannung, seine chemische Beständigkeit und seine gute Legierbarkeit.

Im Altertum wird das Quecksilber hauptsächlich verwendet zur Gewinnung von gediegenen Edelmetallen aus führigem Gestein:

Nach den Versuchen von TORRICELLI bekam es seine große Bedeutung für die Herstellung von Barometern. Heute ist es fast unentbehrlich für vielseitige Anwendungsgebiete der modernen Technik, z. B. als Sperrflüssigkeit bei Gasapparaturen, Quecksilberschalter bei elektrischen Schaltapparaten, Gleichrichter, Quecksilberdampflampen, Hilfsmittel zur Erzeugung von Hochvakuum, etc.

Toxikologisches

Flüssiges Quecksilber ist unschädlich. Quecksilberdampf in größerer Konzentration, sowie lösliche Quecksilberverbindungen sind bereits in sehr geringen Mengen äußerst giftig.

4. Das Funktionsprinzip der Quecksilberbarometer

Das Wort Barometer ist aus dem Griechischen abgeleitet und bedeutet Schwere-messer. (baros = Schwere; metron = Maß)

Das Funktionsprinzip der Quecksilberbarometer beruht auf dem Vergleich des Gewichts einer Luftsäule mit einer Quecksilbersäule gleichen Querschnitts (Skizze 1).

Die Länge der Quecksilbersäule (und damit ihre Schwere) mißt die Schwere der darauf ruhenden Luftsäule durch Gleichgewichtszustand, wobei die Länge der Quecksilbersäule das direkt ablesbare Maß für das Gewicht der Luftsäule ist. Form und Querschnitt von Rohr und Sammelgefäß haben keinen Einfluß auf die Messung. Entscheidend ist lediglich die Höhe der Quecksilbersäule über einer bestimmten Grundfläche — „Hydrostatisches Paradoxon“ (Skizze 2).

Die physikalische Grundlage zur Erklärung dieses Paradoxons ist die Gesetzmäßigkeit des Drucks (vergl. 2).

$$P = \frac{K}{A}$$

P = Druck
 K = Kraft
 A = Fläche

Die Kraft K ergibt sich aus der Dichte ζ der Flüssigkeit mal der Erdbeschleunigung g mal der Höhe h der Flüssigkeit mal der

Fläche A , auf der sie steht.

$$K = \zeta \cdot g \cdot h \cdot A$$

Da diese Kraft jeweils auf dieselbe Fläche A wirkt

$$P_1 = \frac{K_1}{A_1} = \frac{\zeta \cdot g \cdot h \cdot A_1}{A_1} = \zeta \cdot g \cdot h$$

kürzt sich die Fläche aus der Formel heraus. Es ist zu sehen, daß der Druck nur von der Dichte der Flüssigkeit und deren Höhe abhängt bei gleichem Gebrauchsort.

Durch diesen Zusammenhang erklären sich die möglichen Unterschiede in den Bauformen der Barometerrohre und -gefäße.

5. Meßfehler und deren Ursachen

Die Entwicklung der verschiedenen Quecksilberbarometer verlief zum Teil spektakulär. Immer neue Typen wurden entwickelt. Nach unserem Wissen waren aber die Fehlerquellen nicht bekannt, sonst wären verschiedene Barometertypen vermutlich nicht entwickelt worden, weil sie keine Vorteile bringen.

Um die später folgende Abhandlung über die Barometertypen und deren Kritik verständlich zu machen, bedarf es einer Analyse der Fehlerquellen.

A. Systemfehler

Der Höhenfehler

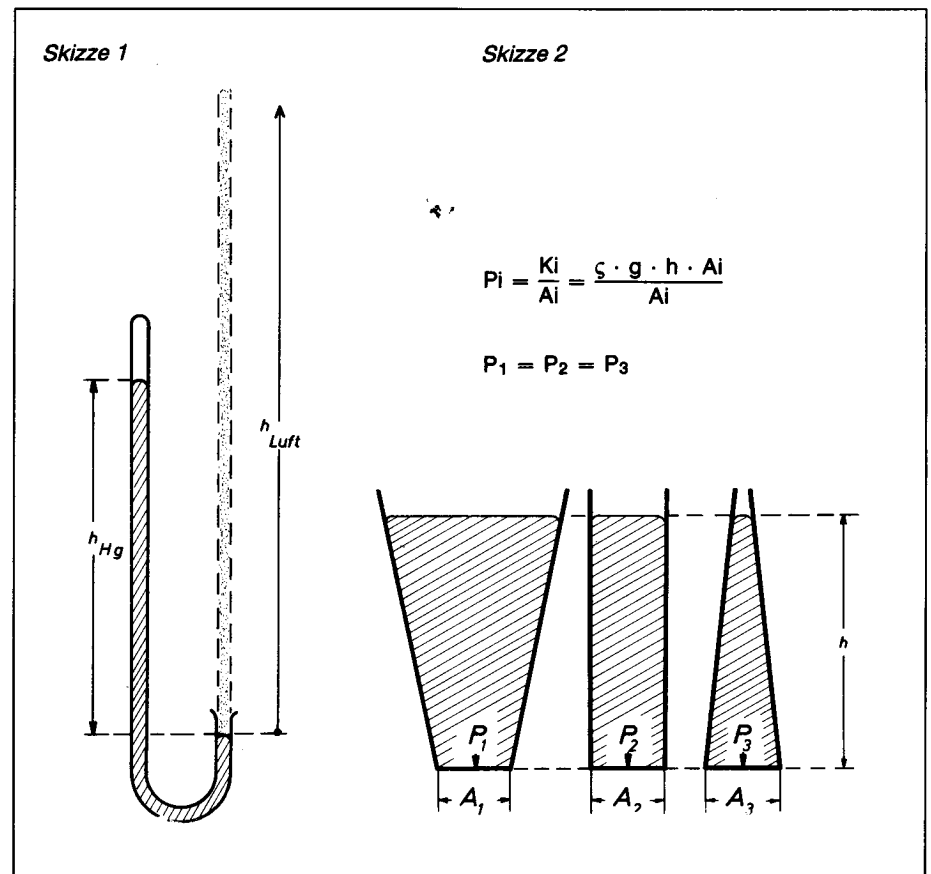
Ursprünglich sind die Skalen der Quecksilberbarometer für eine mittlere Gebrauchshöhe (Ortshöhe) am Gerät befestigt. Eine direkte Vergleichsmessung bei Orten mit unterschiedlichen Höhenlagen ist nicht möglich, da die Skalen nicht nachjustierbar sind.

Als die Notwendigkeit der Höhenkorrektur erkannt ist, wird der mittlere Tidenhub des Meeres (NN = Normal Null) als Bezugshöhe für die Ablesung gewählt.

In Erdnähe gilt die Faustregel: Mit je 10,5 m Höhenunterschied ändert sich die Höhe der Quecksilbersäule um 1 mm. Die Höhenlage eines Ortes im Mittelgebirge von ca. 400 m über NN ergibt z. B. eine Abweichung von ca. - 38 mm Länge der Quecksilbersäule.

Die Wärmeausdehnung

Alle Stoffe dehnen sich bei Wärmeeinwirkung aus, also auch der Rohrträger (Gehäuse), das Quecksilber und die Skala. Auf den Barometerstand wirkt sich die Wärmeausdehnung des Quecksilbers am stärksten aus. Die Quecksilbersäule verlängert sich, ohne daß der Luftdruck angestiegen ist. Die Masse des Quecksilbers bleibt dabei konstant.



Für eine einheitliche Angabe des Barometerstandes bei unterschiedlichen Temperaturen wird die Höhe der Quecksilbersäule auf 0°C umgerechnet (Torr).

Die Umrechnungsformel lautet:

$$P_0 = P_1 - 0,000181 \cdot P_1 \cdot t$$

Dabei bedeuten:

P_1 = Luftdruck auf 0°C bezogen
= Torr = mm Quecksilbersäule
bei 0°C

P_1 = abgelesener Luftdruck in mm bei
Temperatur t

0,0001819 = kubischer Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers bei 20°C

t = Temperatur des Quecksilbers in °C.

Beispiel:

Bei einer Temperatur von 21°C wird ein Barometerstand von 768 mm abgelesen. Wie groß ist der Barometerstand bezogen auf 0°C?

$$P_0 = 768 \text{ mm} - 0,000181 \cdot 768 \text{ mm} \cdot 21^\circ\text{C} = 765,06 \text{ Torr.}$$

Die Wärmeausdehnung der Skalen muß nur bei den langen Skalen der Heberbarometer berücksichtigt werden. Bei den üblichen, im Ablesebereich kurzen Skalen, kann die Ausdehnung vernachlässigt werden. Die Wärmeausdehnung des Rohres und des Rohrträgers wird wegen der Aufwendigkeit nur bei Präzisionsbarometern korrigiert.

Die Nullpunktschwankung

Die Nullpunktschwankung ist ein Barometerfehler, der sich, je nach Querschnittsdifferenz des Rohres zum Sammelgefäß, mehr oder weniger auswirkt. Sinkt in einem Barometerrohr der Quecksilberpegel, so steigt er im Sammelgefäß. Um den Betrag des Ansteigens im Sammelgefäß zeigt ein Barometer mit fester Skala falsch an.

Da die effektive Höhe der Quecksilbersäule vom Meniskus im Rohr zum Meniskus im Sammelgefäß gemessen wird, müssen die Höhenänderungen im Rohr und im Sammelgefäß addiert werden (Meniskus = griech. kleiner Mond, Oberflächenkrümmung einer Flüssigkeit).

Beispiel:

Die Skala eines Barometers soll linear in mm geteilt sein. Die Höhe der Quecksilbersäule soll 780 mm betragen und um 10 mm fallen. Bei der Ablesung an der Barometerskala werden 772 mm Quecksilberhöhe angezeigt, also eine Senkung um 8 mm. Der Meniskus im Sammelgefäß ist jedoch um 2 mm gestiegen, so daß sich die Höhe der Quecksilbersäule tatsächlich um $8 + 2 = 10$ mm verkürzt hat. Dieser Anzeigefehler kann durch große Querschnitte der Sammelgefäße zwar reduziert, aber nicht korrigiert werden.

Die Korrektur der Nullpunktschwankung

wird bei der Beschreibung der verschiedenen Barometertypen weiter ausgeführt.

Der Schwerkraftfehler

Bei der Angabe des Luftdrucks muß der Breitengrad des Meßortes berücksichtigt werden. Ein Barometer zeigt z. B. an den Erdpolen einen ca. 4 mm geringeren Quecksilberstand an als am Äquator, weil das Quecksilber an den Polen schwerer ist (größere Schwerkraft).

Die Gewichtszunahme wird durch die geringere Höhe der Quecksilbersäule kompensiert. Um aber den Luftdruck in verschiedenen Breiten vergleichen zu können, wird der Barometerstand auf eine mittlere Breite von 45° bezogen.

(Schwerkraft $g = 9,80665$)

Der Dampfdruck

Wird eine Flüssigkeit einem Vakuum ausgesetzt, so verdunstet ein Teil der Flüssigkeit. Das Vakuum sättigt sich in einem für die Flüssigkeit spezifischen Maß. Durch die Sättigung entsteht in dem Vakuum ein geringer Druck, der Sättigungs- oder Dampfdruck, der stark temperaturabhängig ist.

Bei Wasser beträgt der Dampfdruck 17,5 Torr bei 20°C, bei Quecksilber jedoch nur 0,0012 Torr bei 20°C. Der Dampfdruck ist unabhängig von der Größe des Raumes über der Flüssigkeit. Steigt die Flüssigkeit in diesen Raum hinein, so erhöht sich der Druck nicht, da ein Teil des Dampfes kondensiert und sich der Flüssigkeit wieder zuschlägt. Der Dampfdruck des Quecksilbers ist so klein, daß er nur bei modernen Präzisionsgeräten berücksichtigt wird.

Die Kapillarität

Flüssigkeiten haben unterschiedliche Fähigkeiten, andere Stoffe zu benetzen. Beispiel: 1 Tropfen Quecksilber bildet auf einer Glasplatte nahezu eine Kugel, ein gleich großer Tropfen Alkohol zerfließt völlig. Das führt zu unterschiedlichem Verhalten in Kapillaren (Rohre mit sehr geringem Querschnitt, Haarröhrchen).

Eine benetzende Flüssigkeit steigt in einer Kapillare, eine nicht benetzende sinkt (Skizze 3).

Quecksilber gehört zu den nicht benetzenden Flüssigkeiten. Wegen der höchsten Oberflächenspannung hat es die geringste Benetzungsfähigkeit und damit die größte kapillarische Senkung.

Durch die große Oberflächenspannung ist die Oberfläche der Quecksilbersäule nicht gerade, sie bildet einen konvexen Meniskus (nach oben gekrümmte Oberfläche), der bei zunehmendem Rohrdurchmesser einen zunehmenden Krümmungsradius zeigt.

Die Kapillarkorrektur wird nur an Präzisionsgeräten vorgenommen, und entfällt bei Heberbarometerrohren.

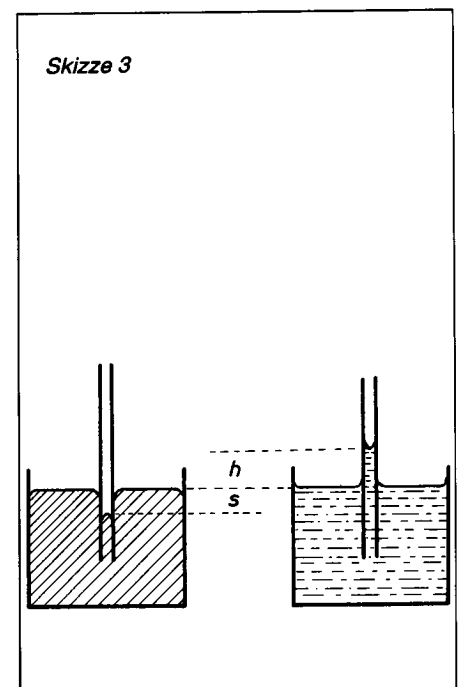
Die Reibung

Durch die Schwankungen des Luftdrucks bewegt sich das Quecksilber in Rohr und Gefäß und unterliegt den Gesetzmäßigkeiten der Reibung.

Die Verzögerung im Bewegungsablauf durch die Reibung wirkt sich kaum in einer zeitlich verzögerten Anzeige aus, da die Luftdruckänderungen ohnehin sehr langsam erfolgen. Sie beeinflusst aber die effektive Höhe der Quecksilbersäule. Bei den Quecksilberbarometern mit schrägen Skalen und bei denen mit Dämpfung (Kap. 7) ist die Wirkung der Reibung so groß, daß sie zum Abreißen der Quecksilbersäule führen kann. Je stärker das Rohr abgewinkelt ist, desto größer ist die Gefahr des Abreißen. Die größte Gefahr besteht beim rechtwinkligen Barometer (Skizze 11, Teil II), wo der abgewinkelte Schenkel waagrecht liegt. Vorsichtiges Klopfen am Gerät hilft, den Reibungswiderstand zu überwinden.

Die Aufhängung

Eine exakt lotrechte Aufhängung der Barometer ist notwendig, um keine zu hohe Anzeige zu bekommen, wie sie durch eine schräge Position des Gerätes verursacht wird. Schon der Torricellische Versuch zeigte, daß Abweichungen aus der Lotrechten zu einer geänderten Anzeige führen (Kap. 1). Diese Tatsache wird bei verschiedenen Barometertypen (Kap. 8) zur Spreizung der Skala ausgenutzt.



B. Entstehende Gebrauchsfehler

Die unterbrochene Säule

Beim Transport der Geräte kommt es vor, daß die Quecksilbersäule im Rohr abreißt. Es entsteht ein kleiner Zwischenraum. Durch die Reibung und die Kapillarität bleibt diese Lücke oft hartnäckig bestehen. Der Fehlbetrag der Anzeige entspricht der Länge der Unterbrechung der Säule. Es wird immer ein zu hoher Luftdruck angezeigt.

Die Luftblasen

Es kann auch dazu kommen, daß Luftblasen im Quecksilber aufsteigen. Erreichen die Blasen das Vakuum oben im Rohr, wird es aufgehoben. Es herrscht dann über dem Quecksilber ein geringer Druck, der zu einer zu niedrigen Anzeige führt.

Finden sich die Blasen innerhalb der Quecksilbersäule, ohne diese zu unterbrechen, entsteht kein Anzeigefehler. Ist die Säule unterbrochen, ist der Fehler dem zuvor Beschriebenen ähnlich.

Die Verunreinigung

Bei sehr alten Geräten spielt die Verunreinigung des Quecksilbers oft eine wesentliche Rolle. Es kommt zu Ablagerungen in den Glasrohren. Dadurch vergrößert sich die Reibung zum Teil erheblich. Die Kapillarität verändert sich bis ins Gegenteil, da die Oberflächenspannungen abhängig vom Grad der Verunreinigung stark schwanken. Die Dichte des Quecksilbers verringert sich mit zunehmender Verschmutzung und führt zu zu hohen Anzeigen. Alle drei Faktoren treten in Addition auf, so daß eine Kalkulation der Fehlanzeige unmöglich wird.

Der Verlust von Quecksilber

Durch Verdunstung oder anderen Verlust von Quecksilber wird ein zu niedriger Luftdruck angezeigt, da sich der untere Pegel nach unten verschiebt. Dieser Verschiebung muß der obere Pegel folgen, damit die effektive Länge der Quecksilbersäule erhalten bleibt.

Der Standortwechsel

Durch Wohnungswechsel, sei es Ortswechsel oder Etagenwechsel, können Höhenfehler entstehen, wie sie in diesem Kapitel unter A. beschrieben sind.

Anschrift der Verfasser:

Wilfried Habenicht
Richard-Strauß-Platz 8, 2800 Bremen 1
Rainer Holland
Breslauer Str. 45, 2000 Norderstedt 3
Anschrift für Barometerversand:
W. Habenicht/R. Holland
Richard-Strauß-Platz 8, 2800 Bremen 1

(Wird fortgesetzt)

Alte Quecksilberbarometer

Eine ausführliche Darstellung der Bauformen und Abbildungen typischer Exemplare

Teil II

6. Die Sammelgefäße der Quecksilberbarometer

Die Form der Sammelgefäße ist für die Funktion und Genauigkeit der Barometer von Bedeutung, da diese z. T. die Funktionsgrundlage darstellen und sich verschiedene Meßfehler in ihnen auswirken.

Toricellis Gefäß

Ein einfaches Gefäß in Form einer Schale, in die das Quecksilber nach dem Aufrichten des gefüllten Rohres abfließt. Das Sammelgefäß ist nicht mit dem Rohr verbunden (s. rechts oben).

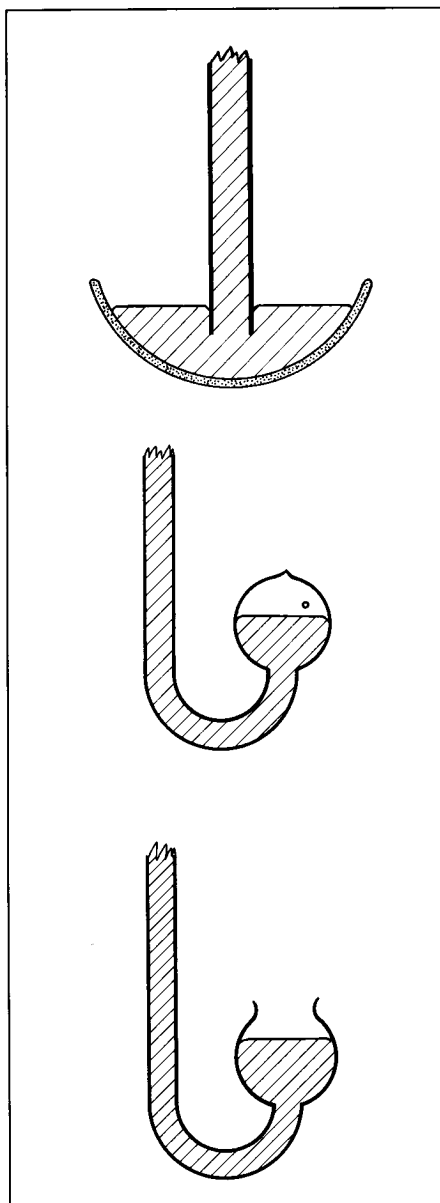
Diese Bauform ist ausschließlich stationär zu verwenden, da das Rohr an Ort und Stelle gefüllt und die Skala justiert werden muß. Im Science Museum in London befindet sich ein Barometer mit einem solchen Gefäß aus Holz.

Das Sammelgefäß in Kugelform

Bei dieser Bauform wird das Gefäß mit dem Rohr verschmolzen. Im oberen Teil des kugelförmigen Gefäßes befindet sich seitlich ein kleines Loch, durch das das Rohr gefüllt wird. Der Luftdruck wirkt ausschließlich durch dieses kleine Loch auf die Quecksilbersäule (s. rechts Mitte).

Das Sammelgefäß in offener Kugelform

Diese Gefäße sind in der Mehrzahl gebaut worden. Ihr Vorteil liegt in der einfachen Füllmöglichkeit (s. rechts unten).



Auch heute wird dieses Gefäß für Neuanfertigungen von Quecksilberbarometern verwendet, allerdings oft in zylindrischer Form mit einer Verschlusskappe gegen Verunreinigungen und Auslaufen des Quecksilbers.

Das rohrförmige Sammelgefäß

Dieses einfache Gefäß existiert in drei Formen. Am gebräuchlichsten ist die am Heberrohr und Zeigerbarometerrohr. Es handelt sich um eine zylindrische Erweiterung des umgebogenen Rohres.

Die zweite Form ist die des rechtwinkligen Barometers nach Bernoulli (Kap. 8).

Die dritte Form ist das konische Barometer (Skizze 22, Teil III).

Beide Formen dienen der Skalenspreizung.

Das schwimmende Sammelgefäß

Dieses Sammelgefäß schwimmt am unteren Teil des Barometerrohres und dient der Skalenspreizung. (Skizze 18, Teil III) Das Gefäß hat eine rohrförmige, sich umstülpende Gestalt, so daß es in das sehr weite Barometerrohr eintauchen kann. Bei Luftdruckänderungen bewegt es sich in der Höhe, wodurch die Spreizung der Skala erfolgt (vergl. Kap. 8).

Der Lederbeutel als Sammelgefäß

Das Sammelgefäß besteht aus einem weichen Lederbeutel, der an das Rohr gebunden ist. Dieses Gefäß verhindert zwar das Auslaufen des Quecksilbers, kann aber nicht das Eindringen von Luft in

das Rohr während des Transports unterbinden.

Die bisher beschriebenen Gefäße erlauben keinen beliebigen Transport der Barometer. Die nachfolgend beschriebenen Gefäße haben eine Transportsicherung.

Der Lederbeutel mit Transportsicherung

Die Sicherung für den Transport besteht aus einer Metallplatte, die durch eine Rändelschraube bewegt wird. Zum Transport des Barometers wird die Rändelschraube so weit hochgedreht, daß die Metallplatte den Lederbeutel gegen das Rohrende drückt. Dabei ist das Rohr ganz mit Quecksilber gefüllt, so daß weder Luft in das Rohr eindringen noch Quecksilber aus dem Rohr auslaufen kann.

Der Holzbehälter mit Lederboden (Skizze 7)

Funktion wie vorher beschrieben. Diese Bauform ist stabiler und leichter zu füllen. Das Rohr mit dem angebrachten Gefäß A wird zum Füllen auf den Kopf gestellt, der Gefäßboden B abgeschraubt und Rohr und Gefäß so weit mit Quecksilber gefüllt, daß der Pegel etwas höher steht, als das Rohr in das Gefäß ragt. Gefäß und Boden werden wieder verschraubt und abdichtend verklebt. Vor dem Umdrehen wird der Lederboden mit dem Finger gegen das Rohrende gedrückt und in senkrechter Stellung wieder freigegeben. Die Quecksilbersäule stellt sich auf die Höhe des herrschenden Luftdrucks ein, und das Rohr ist betriebsbereit. Zum Transport wird die Schraube hochgedreht. Das Quecksilber steigt dabei bis zum Rohrende hoch, und die Ledermembran verschließt das Rohr unten.

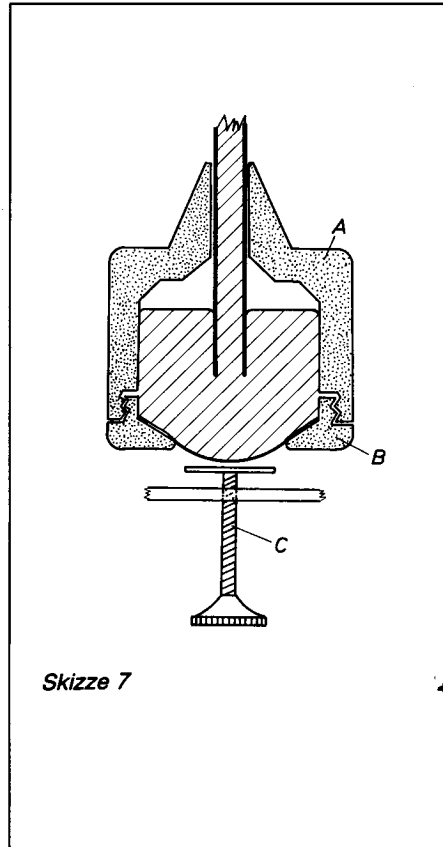
Das Fortinsche Gefäß (Nicolas Fortin 1750—1831) (Skizze 8)

Das Gefäß besteht aus einem zweiteiligen, verschraubbaren Metallgehäuse A, in das im oberen Teil ein Schauglas eingelassen ist. Durch das Schauglas B kann der Index E beobachtet werden. In den unteren Teil des Metallgehäuses ist ein Lederboden eingelassen, der durch eine Rändelschraube mit Metallplatte bewegt werden kann. Der Luftdruck wirkt entweder durch ein Loch im Gehäuseboden oder durch das Gewinde der Rändelschraube. Zum Ablesen des Barometerstandes wird der Quecksilberpegel durch die Rändelschraube D bis zum Index E gebracht. Damit wird die Nullpunktschwankung ausgeglichen. Die Transportsicherung entspricht der des Holzbehälters mit Lederboden.

7. Zusatzeinrichtungen

Die Buntensche Luftfalle

Im unteren Teil des Rohres ist eine Rohrerweiterung angebracht, in die das in eine Spitze auslaufende obere Rohrteil hineinragt. Diese Anordnung verhindert ein Aufsteigen von Luft während des Gebrauchs (vergl. Kap. 5). Steigt im Rohr eine Luftblase auf, so wird sie auf Grund der großen Oberflächenspannung und der engen Spitze nicht in den oberen Rohrteil eindringen, sondern seitlich davon aufsteigen. An dieser Stelle stört die Luft nicht, da sie keinen Einfluß auf die Quecksilbersäule hat.



Skizze 7

Die Dämpfung

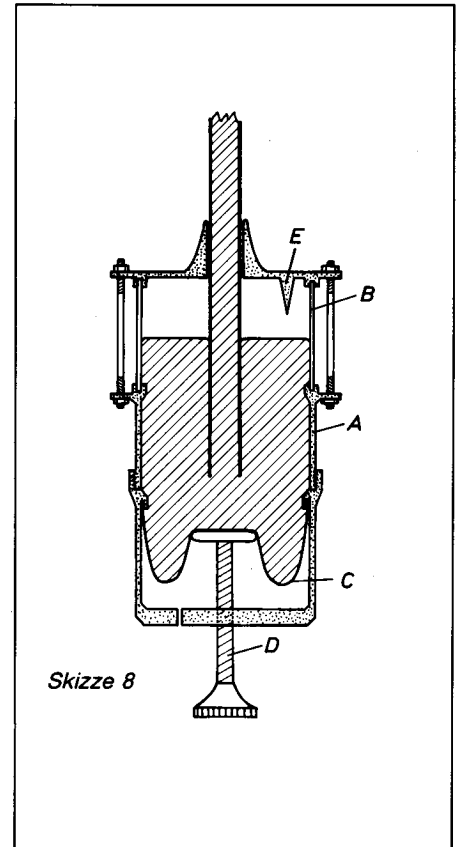
Bei Barometern, die viel in Bewegung sind wie Schiffs- und Ballonbarometer, kann es zum Bruch der Rohre kommen, da die Quecksilbersäule heftig nach oben schlagen kann. Um eine Bewegungsdämpfung des Quecksilbers zu erreichen, werden solche Rohre im unteren Teil verengt, so daß dort eine vergrößerte Reibung entsteht, die ein verlangsamtes Fließen zur Folge hat.

Ist die verengte Stelle zu lang oder zu eng, kann eine Bewegung des Quecksilbers ganz verhindert werden. An den verengten Stellen reißt die Säule leicht ab, da die Reibung dort sehr groß ist (vergl. Kap.

5) Beide Zusatzeinrichtungen werden im „Kew-Marinebarometer“ (engl. Marinebarometer) direkt miteinander kombiniert, wobei die Spitze der Luftfalle dabei lang und dünn ist.

Die kardanische Aufhängung

Durch diese Art der Aufhängung ist eine stets lotrechte Position von z. B. Schiffsbarometern gewährleistet. In der Kardanik ist ein Barometer in alle Richtungen frei schwenkbar, aber nicht um seine Achse herum drehbar. Um ein stabiles Gleichgewichtsverhalten zu erreichen, ist die kardanische Aufhängung weit oben angebracht und das Barometer unten sehr schwer gehalten. Die Gewichtsvergröße-

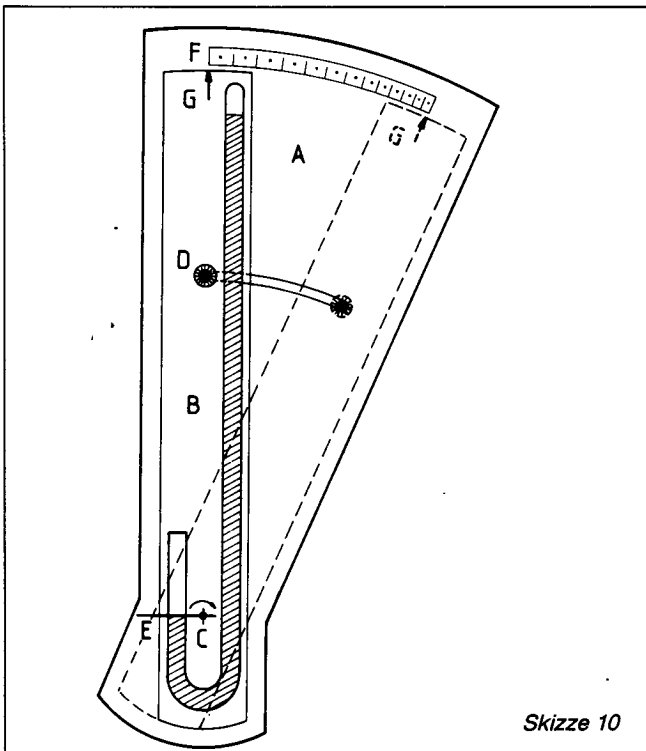


Skizze 8

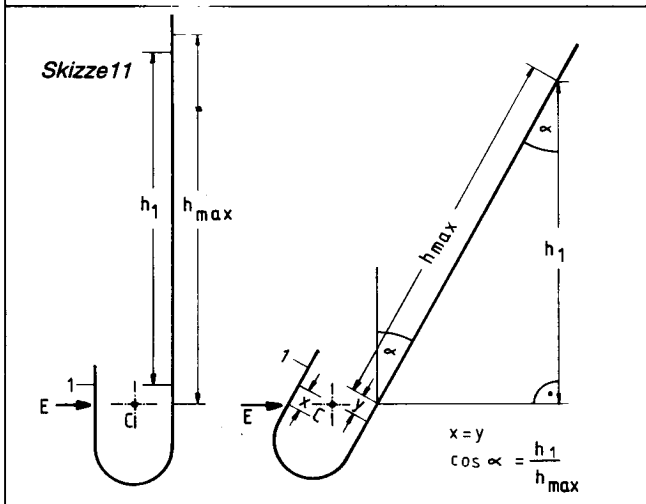
rung wird durch viel Quecksilber im Sammelgefäß und durch eine massive metallene Verkleidung des Gefäßes erreicht

Die Wasserwaage/Das Lot

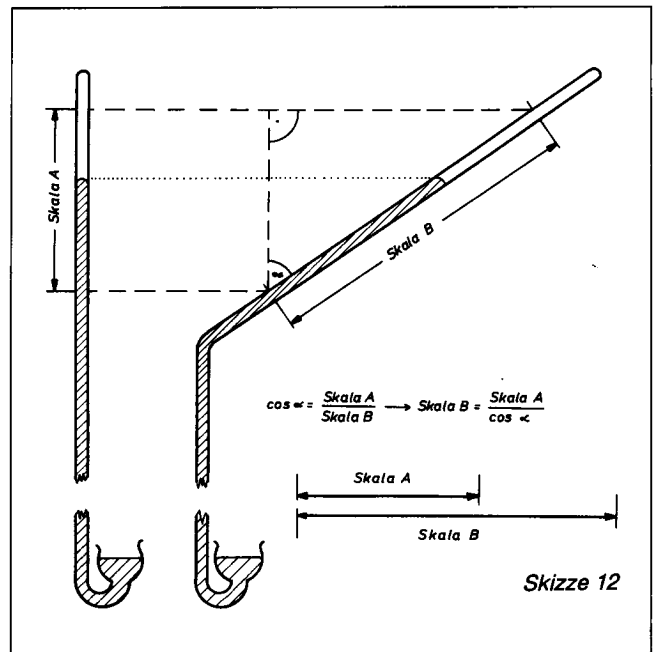
Wasserwaagen findet man nur in alten englischen Zeigerbarometern, damit die Instrumente lotrecht aufgehängt werden können. An modernen Präzisionsgeräten ist oft ein kleines Lot angebracht, um eine exakte Positionierung zu erreichen. Bei vielen einfachen Geräten ist keins von beiden Zusatzgeräten vorhanden, so daß das Augenmaß zur Ausrichtung reichen muß.



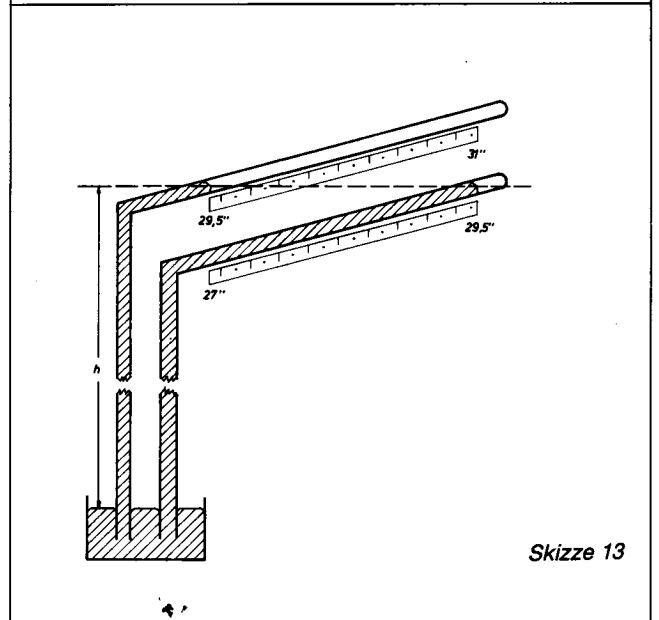
Skizze 10



Skizze 11



Skizze 12



Skizze 13

werden, und durch die extrem große Reibung in dem langen, stark geneigten Rohr reißt die Quecksilbersäule sehr häufig ab.

Das Winkelbarometer mit zwei Rohren

In der Funktion entspricht es dem normalen Winkelbarometer. Das lange, abgewinkelte Rohr wird hier durch zwei kürzere, übereinander angeordnete Rohre ersetzt. Das Gerät wird dadurch kompakter. Die Skala ist in zwei Teile geteilt und unter dem zugehörigen Rohr angebracht. Der untere Skalenteil reicht z. B. von 27 bis 29,5 Zoll und der obere von 29,5 bis 31 Zoll. Entspricht der Luftdruck einer Höhe der Quecksilbersäule bis zu 29,5 Zoll, so ist lediglich an der unteren Skala abzulesen. Bei einem Barometerstand von mehr als 29,5 Zoll wird an der oberen Skala abgelesen (Skizze 13).

Diese Geräte haben die gleichen Probleme wie einfache Winkelbarometer. Es ergibt sich jedoch eine zusätzliche Meßungengenauigkeit. Die Nullpunktschwankung ändert sich, wenn das untere Rohr vollständig mit Quecksilber gefüllt ist. Über diesen Punkt hinaus verändert sich nur das halbe Quecksilbervolumen in Rohr und Gefäß. Dadurch ergeben sich zwei unterschiedliche Nullpunktschwankungen im Ablesebereich. Diese Bauart ist auch mit drei Rohren hergestellt worden. Dabei verkürzen sich die abgewinkelten Rohre noch weiter, eine zusätzliche Nullpunktschwankung muß jedoch berücksichtigt werden.

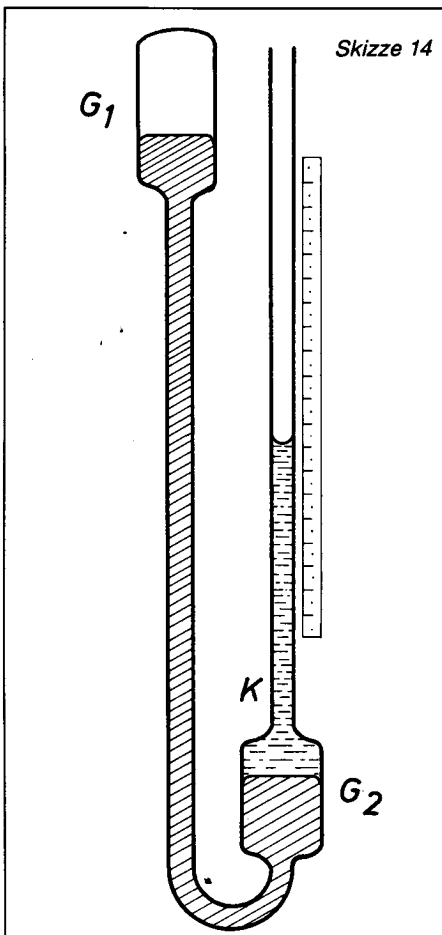
Die Zweiflüssigkeitsbarometer oder Kontrabarometer (Controleure)

CARTESIUS/DESCARTES (1596—1650) hat zuerst den Einfall, zwei Flüssigkeiten für

Barometer zu verwenden. Der obere Teil des Barometers ist mit Wasser gefüllt, der untere mit Quecksilber. Bei dieser Anordnung stellen sich erhebliche Nachteile heraus:

Der große Dampfdruck des Wassers, die unterschiedliche Wärmeausdehnung der beiden Flüssigkeiten und die thermometrische Wirkung im oberen Teil (großes Gefäß und enges Rohr) führen zu großen Anzeigeungenauigkeiten.

HUYGENS (1629—1695) geht einen anderen Weg (Skizze 14). Wenn Quecksilber an das Vakuum grenzt, kann dessen sehr geringer Dampfdruck vernachlässigt werden. Als Fehlerquellen bleiben jedoch die sich addierenden unterschiedlichen Wärmeausdehnungen und die thermometrische Wirkung der zweiten Flüssigkeit. Die Quecksilbersäule im Huygensschen Kontrabarometer hat ungefähr den halben Hub wie in einem einfachen Gefäßbarometer



Kontrabarometer zeigen auch geringe Luftdruckschwankungen durch den großen Hub im Kontrarohr K an. Abgesehen von der mangelnden Präzision der Geräte, ist die Tendenz des Luftdrucks sehr gut zu beobachten.

Große Nachteile zeigen sich bei der unterschiedlich großen Reibung im unterschiedlich hoch gefüllten Kontrarohr und der Verdunstung der Kontraflüssigkeit (geringe Oberflächenspannung). Die Verdunstung führt auch zu einer Konzentration der Farbstoffe, die sich an den Rohrwänden ablagern und den Reibungswiderstand erhöhen.

Eine andere Ungenauigkeit entsteht durch die Addition des Gewichts der Kontraflüssigkeit zum Gewicht der Luft. Das müßte in der Skala berücksichtigt werden und würde zu einer unlinearen Teilung führen. Die aber ist nicht vorhanden, da die Genauigkeit durch die anderen Fehler sowieso stark beeinträchtigt ist.

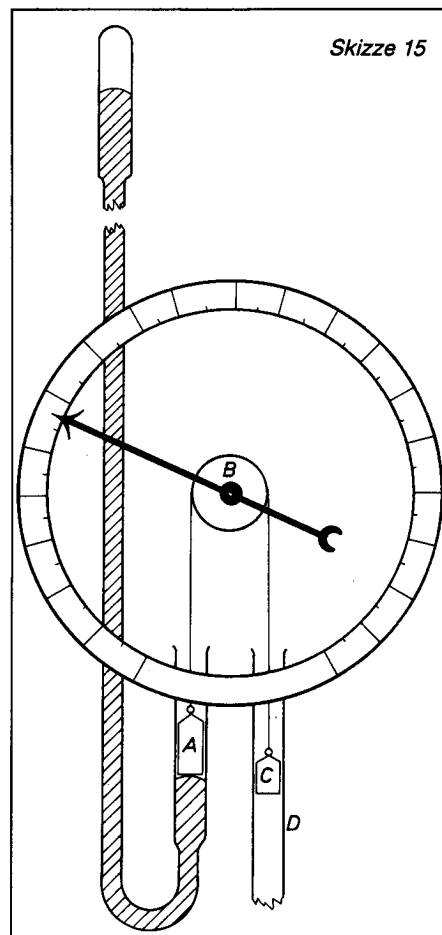
Das Dreiflüssigkeitsbarometer nach HOOKE (1635—1703)

Die Nachteile der Verdunstung im Kontrabarometer waren HUYGENS und HOOKE bekannt. HOOKE fand eine Lösung im Dreiflüssigkeitsbarometer.

Über die Kontraflüssigkeit füllt er eine dritte, nicht gefärbte Flüssigkeit. Die Grenze zwischen diesen, sich nicht vermischenden Flüssigkeiten, gibt den Barometerstand an. Die dritte Flüssigkeit muß sehr rein sein, damit es zu keiner Konzentration von gelösten Bestandteilen beim notwendigen Nachfüllen kommt. Sie verhindert das Verdunsten der gefärbten Flüssigkeit und gewährleistet ein sauberes Arbeiten des Geräts. Das Gewicht der dritten Flüssigkeit muß zusätzlich in der Skala berücksichtigt werden. Die Reibung im Kontrarohr braucht nicht beachtet zu werden, da das Rohr ständig ganz gefüllt und die Reibung damit nahezu gleich bleibt.

Das rechtwinklige Barometer nach BERNOULLI (1667—1768)

Dieses Gerät besitzt kein normales Sammelgefäß. Das Sammelgefäß ist unten als langes waagerechtes Rohr ausgebildet und dient der Ablesung des Barometerstandes. Das Gerät hat keine Nullpunktschwankung, da sich das Quecksilber im abgewinkelten Rohr immer auf dem gleichen Niveau befindet. Am oberen Gefäß befindet sich eine normale Skala und eine gespreizte Skala am waagerechten Rohr. Die Spreizung der Skala ergibt sich aus dem Querschnittsverhältnis des oberen Gefäßes zum waagerechten Rohr. Mathematischer Zusammenhang der Skalenspreizung siehe Kontrabarometer; Nachteile wie beim Winkelbarometer. Die sehr



große Reibung läßt das Gerät fast nicht mehr arbeiten, da die Quecksilbersäule im waagerechten Rohr sehr leicht abreißt.

Das Zeigerbarometer (Banjoform) nach HOOKE (1635—1703)

Die Spreizung der Skala wird durch eine mechanische Übertragung des Quecksilberhubes auf einen Zeiger erreicht. Der Barometerstand wird am Zeiger auf einer runden, dahinterliegenden Skala abgelesen (Skizze 15).

Das Rohr ist wie beim Heberbarometer gestaltet. Im unteren Schenkel schwimmt auf dem Quecksilber ein Glasstab A. Der Schwimmer ist an einem Faden aufgehängt, der in Windungen über ein Rad zu einem Gegengewicht C läuft.

Der Schwimmer A ist nur wenig schwerer als das Gegengewicht C, so daß er bei steigendem Luftdruck dem fallenden Quecksilberpegel im unteren Schenkel folgt. Bei fallendem Luftdruck hebt der steigende Quecksilberpegel den Schwimmer hoch. Die Bewegung des Schwimmers mit Gegengewicht wird durch den Faden auf das Rad übertragen. Das Rad und der ausbalancierte Zeiger sind auf einer leichtgängigen Welle befestigt.

Die Spreizung der Skala ist von dem Durchmesser Verhältnis des Rades zur Skala abhängig: Je kleiner der Durchmesser des Rades und je größer der Durch-

und den gleichen Hub wie im Heberbarometer. Die Volumenänderung in G_1 ist gleich der Änderung in G_2 . Über dem Quecksilber in G_2 befindet sich eine leichte Flüssigkeit, meistens gefärbtes Toluol oder Petroleum. Sinkt der Luftdruck, so steigt der Quecksilberpegel in G_2 . Dadurch wird die zweite Flüssigkeit in G_2 um das gleiche Volumen verdrängt. Da das Rohr K, in das sie hineingedrängt wird, viel enger als G_2 ist, ergibt sich in dem Kontrarohr ein viel größerer Hub als in G_2 . Der Hub in K ist abhängig von dem Verhältnis G_2 zu K.

Beispiel:

Der Hub im Kontrarohr K soll siebenmal größer sein, als ein Hub in einem Gefäßbarometer mit sehr großem Sammelgefäß (geringe Nullpunktschwankung), also 14mal größer als der Hub des Quecksilbers im Heberbarometer ($1 h_1 = 14 h_2$).

$$\begin{aligned} \pi r_1^2 &= \text{Querschnitt Gefäß } G_2 \\ \pi r_2^2 &= \text{Querschnitt Kontrarohr K} \\ V_1 &= \pi r_1^2 \cdot h_1 / h_1 = \text{Hub im oben-} \\ &\quad \text{genannten} \\ &\quad \text{Gefäßbarometer} \\ V_2 &= \pi r_2^2 \cdot h_2 / h_2 = \text{Kontrabarometer — Hub} \\ &\quad \text{im Anzeige-} \\ &\quad \text{rohr K} \\ V_1 &= V_2 \text{ (gleiche Voluminabeweg-} \\ &\quad \text{ung)} \\ \pi r_1^2 \cdot h_1 &= \pi r_2^2 \cdot h_2 \\ \pi r_1^2 \cdot 1 &= \pi r_2^2 \cdot 14 \\ 1 h_1 &= 14 h_2 \text{ (siehe Voraussetzung)} \end{aligned}$$

messer der Skala, desto größer ist die Spreizung der Skala.

Gegenüber den üblichen Kontrabarometern ist die Spreizung der Banjoskalen etwa doppelt so groß. Neben den im Kapitel 5 (Meßfehler) beschriebenen Ungenauigkeiten unterliegt das Zeigerbarometer einer weiteren Ungenauigkeit: Der Reibung in der Mechanik. Vorsichtiges Klopfen am Gerät hilft, die Reibung zu überwinden. Das Gerät ist etwa so genau wie das Kontrabarometer. Eine Tendenz der Luftdruckänderungen ist durch einen Nachstellzeiger gut ablesbar.

Das Waagebarometer nach S. MORELAND (1625—1695)

Bei diesem Gerät wird das Prinzip des Wiegens der Luft durch den technischen Aufbau einer Waage deutlich erkennbar. Wie bei einer Apothekerwaage können auch mit diesem Gerät kleine Mengen (Luftdruckschwankungen) genau abgewogen werden. Die Spreizung der Skala ist abhängig von der Länge des Zeigers (Skizze 16).

An einem Ende des Waagebalkens hängt das Barometerrohr, an dem anderen Ende ein Gegengewicht, das dem Gewicht des Rohres bei normalem Luftdruck (Luftgewicht) entspricht. Die bogenförmigen Enden des Waagebalkens bewirken eine

gleichbleibende Länge der Hebelarme zum Drehpunkt des Waagebalkens sowie eine Zentrierung des Barometerrohrs zum Sammelgefäß, zur Vermeidung von Reibungswiderstand durch Berührung.

Bei Luftdruckschwankungen wird nur das sich verändernde Volumen im oben erweiterten Teil des Quecksilberrohrs gewogen (Skizze 17). Das Volumen B wirkt gegen den Luftdruck. Um selbst kleine Luftdruckschwankungen sicher wiegen zu können, wird der obere Teil des Quecksilberrohrs stark erweitert, so daß auch bei geringer Höhenänderung der Quecksilbersäule ein großes Volumen gewogen wird.

Den mathematischen Zusammenhang veranschaulichen die folgenden Gleichungen:

Formel allgemein:

$$\begin{aligned}
 V_G &= V_A + V_B \\
 V_A &= V_G - V_B \\
 V &= h \cdot F \\
 &= h \cdot (F_G - F_B) \\
 &= h \cdot [\pi \cdot (\frac{d_G}{2})^2 - \pi \cdot (\frac{d_B}{2})^2] \\
 &= h \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_G^2 - d_B^2)
 \end{aligned}$$

Gewichtsänderung:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Vol. A} \cdot \text{Dichte Q} \cdot \text{Erdbeschleunigung} \\
 &= V_A \cdot \zeta Q g \cdot g
 \end{aligned}$$

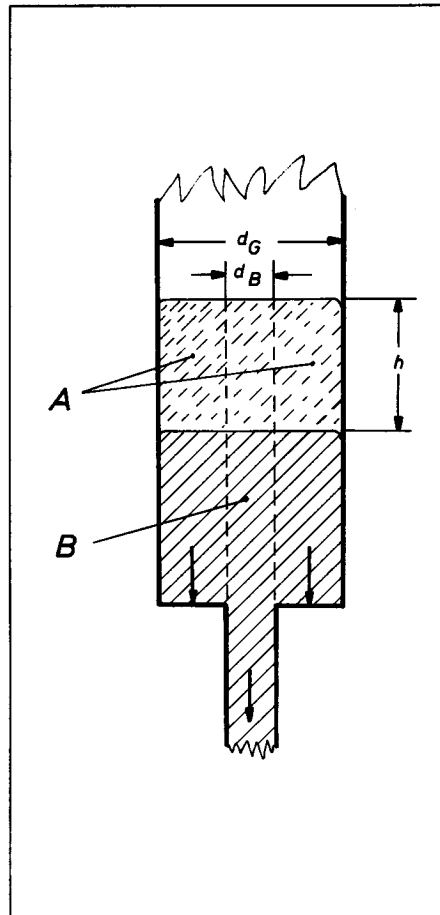
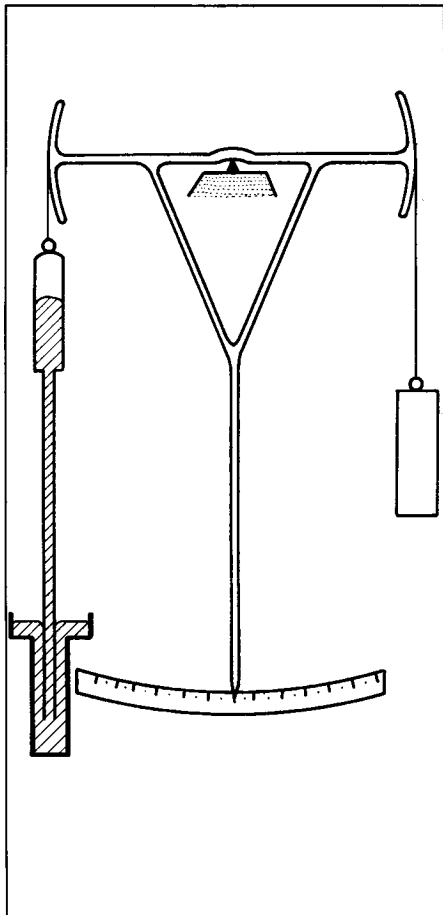
Es bedeuten:

- V_G = Gesamtvolumen des erweiterten Quecksilberrohrs
- V_A = Volumen der zu wiegenden Änderung der Quecksilbermenge bei Luftdruckschwankungen
- V_B = Volumen der gegen den Luftdruck wirkenden Quecksilbersäule
- F = Fläche
- d = Durchmesser
- h = Höhenänderung des Q-Pegels
- ζ = Dichte der Meßflüssigkeit (bei 0 °C)
- $(\zeta Q g = \frac{13,595 \text{ kg}}{\text{dm}^3})$
- g = Erdbeschleunigung (bei geogr. Breite 45°)
- $= 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Außer den bereits bekannten Ungenauigkeitsproblemen ergibt sich beim Waagebarometer ein weiteres: Das in das Quecksilber des Sammelgefäßes eintauchende Barometerrohr erfährt einen Auftrieb, der je nach Eintauchtiefe unterschiedlich groß ist. Der Auftrieb wird gering gehalten durch eine große und damit schwere Rohrerweiterung oben, sowie durch ein Rohrende, das unten dünnrandig und eng und somit leicht ist. Durch eine Eichung kann der Fehler korrigiert werden.

Die Technologie des Waagebarometers wird, obwohl die Idee alt ist, erst viel später und wenn, dann bei Barographen, verwendet.

(Wird fortgesetzt)



Links: Skizze 16

Rechts: Skizze 17

Anschrift der Verfasser:
 Wilfried Habenicht
 Richard-Strauß-Platz 8, 2800 Bremen 1
 Rainer Holland
 Breslauer Str. 45, 2000 Norderstedt 3
 Anschrift für Barometerversand:
 W. Habenicht/R. Holland
 Richard-Strauß-Platz 8, 2800 Bremen 1

Alte Quecksilberbarometer

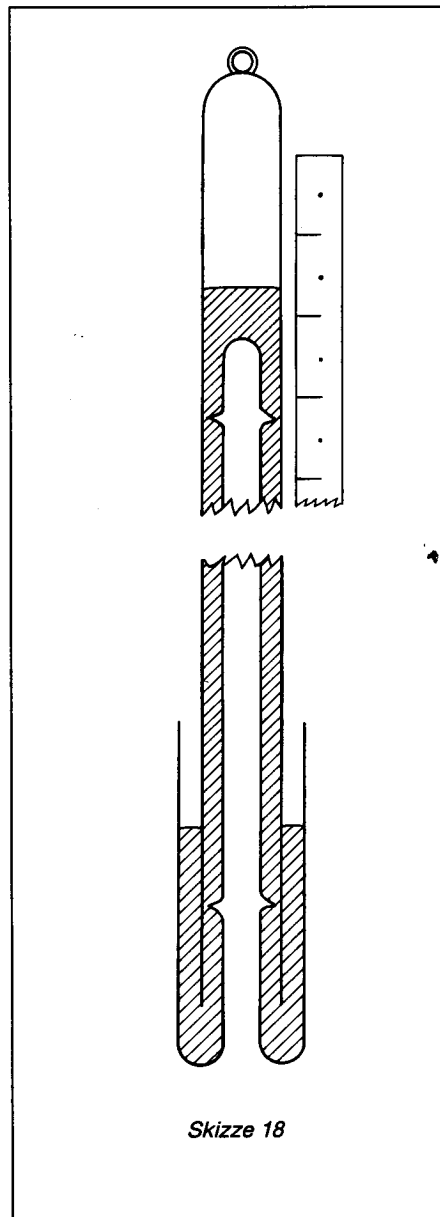
Eine ausführliche Darstellung der Bauformen und Abbildungen typischer Exemplare
Teil III

Das Schwimmgefäßbarometer

Dieses von RICHARD HOWSON konstruierte Barometer wird 1862 erstmals erwähnt und „Long Range Barometer“ genannt. Wie der Name sagt, hat es eine gespreizte Skala. Die Spreizung erfolgt durch eine Verschiebung des Nullpunkts weit über das sonstige Maß hinaus. Eine ausgesprochen einfallsreiche Konstruktion ermöglicht diese starke Nullpunktschwankung (Skizze 18). Das Barometerrohr hat einen Durchmesser von ca. 20 bis 30 mm und wird an seinem oberen Ende aufgehängt. Das Sammelgefäß ist ein langes, oben geschlossenes und unten umgestülptes, erweitertes Rohr. Da die Dichte des Quecksilbers viel größer als die mittlere Dichte des Gefäßes ist, hat das Gefäß im Quecksilber einen so großen Auftrieb, daß es zusammen mit dem Quecksilber im Sammelgefäß einen Schwebezustand erreicht. Damit das Schwimmsammelgefäß im Rohr nicht verkantet, sind am langen, mittigen Teil kleine Zentrierstifte angeschmolzen.

Steigt der Luftdruck, so fließt Quecksilber aus dem Gefäß in das Rohr hoch. Dadurch wird das Gewicht des Schwimmgefäßes geringer, und es schwimmt weiter nach oben. Damit verschiebt sich der Nullpunkt nach oben und der obere Pegel des Quecksilbers steigt noch weiter an, da die Höhe der Säule erhalten bleibt.

Die Skalenspreizung erfolgt also durch den wechselnden Auftrieb des Schwimmgefäßes im Barometerrohr. Die Größe der



Skalenspreizung hängt vom Verhältnis des Querschnitts des Barometerrohres zum Querschnitt des Schwimmgefäßes ab (abzüglich der Rohrwandstärke und des zentralen Gefäßteils). Je größer das Gefäß, desto geringer ist die Spreizung.

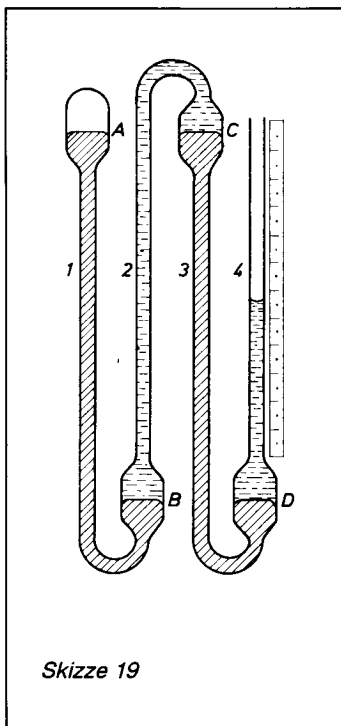
Als zusätzliche Meßfehlerquellen sind die Reibung der Zentrierstifte und die Verschmutzung des Quecksilbers (Änderung der Dichtenverhältnisse) zu nennen. Temperaturschwankungen wirken sich weniger aus, da bei Erwärmung die Dichte des Quecksilbers abnimmt, was ein scheinbares Ansteigen des Luftdrucks anzeigt, da die Quecksilbersäule länger wird. Bei geringerer Dichte des Quecksilbers ist der Auftrieb des Schwimmgefäßes auch geringer, so daß hier eine gewisse Kompensation erreicht wird.

Das verkürzte Barometer

nach AMONTONS (1663—1705)

Dieses Barometer ist nur etwa halb so hoch wie die üblichen Geräte. Die erforderliche Höhe der Quecksilbersäule wird durch folgende Anordnung erreicht (Skizze 19/Abb. 3):

Das Gerät besteht aus vier Rohren, wobei die Rohre 1 und 3 mit Quecksilber gefüllt sind. Rohr 2 ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, die als „Schubstange“ zwischen Rohr 1 und 3 fungiert. Beide Quecksilbersäulen verhalten sich dadurch so, als ob sie in einem Rohr übereinander stünden. Das Rohr 4 hat die Aufgabe der Skalen-



Skizze 19

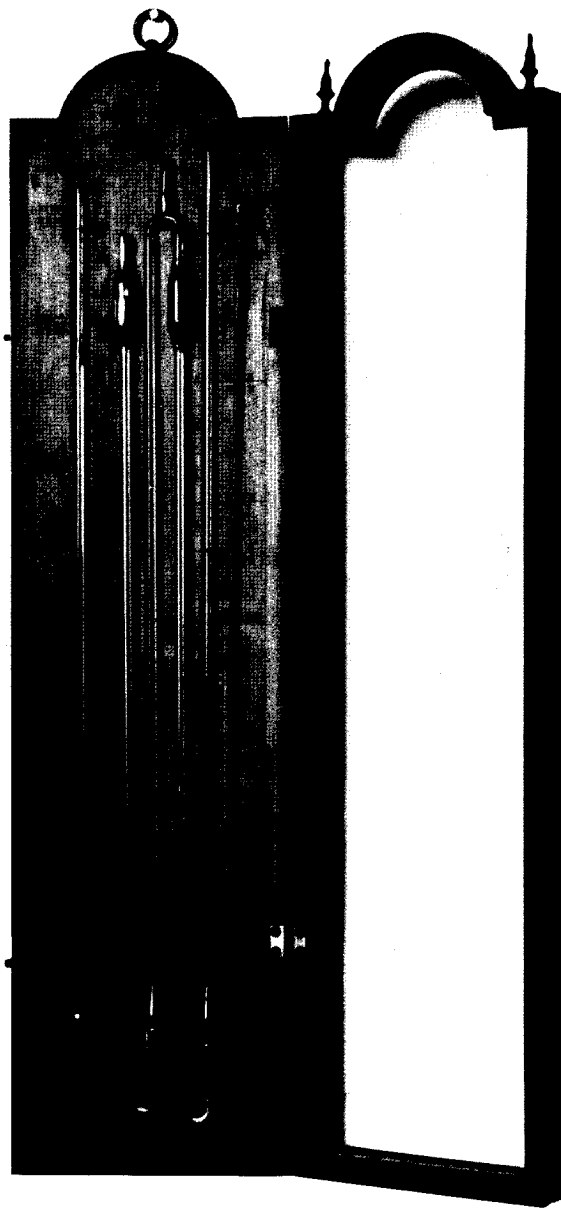
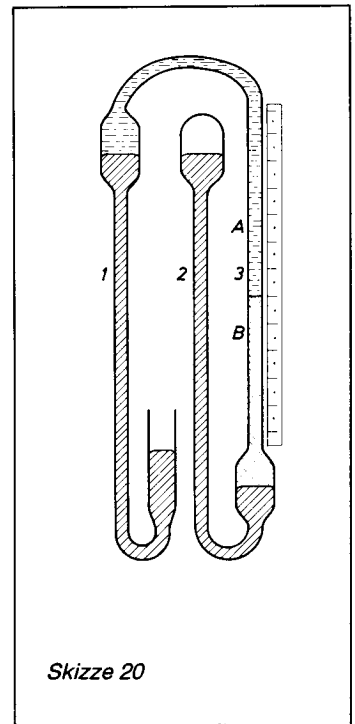


Abb. 2



Skizze 20

spreizung, wie beim Kontrabarometer beschrieben. Die Spreizung beträgt bei diesem Gerät etwa 1:5 gegenüber einem Gefäßbarometer mit großem Sammelgefäß.

Die Vorteile liegen in der Handlichkeit des um die Hälfte kleineren Geräts mit Skalenspreizung. Die Nachteile sind die gleichen wie beim Kontrabarometer. Hinzu kommt die Ausdehnung der Zwischenflüssigkeit bei Temperaturschwankungen.

Schwierigkeiten in der Herstellung dieses Geräts liegen in den benötigten, exakt gleichen Querschnitten der Gefäße A, B, C und D, sowie in der problematischen Füllung mit exakt definierten Flüssigkeitsmengen.

Dieser Barometertyp ist in verschiedenen Varianten hergestellt, z. B. mit nur drei Rohren (Skizze 20). Die Skala ist hier am Rohr der Zwischenflüssigkeiten angebracht, die unterschiedlich gefärbt sind und sich nicht vermischen. Die Grenze zwischen beiden Flüssigkeiten zeigt den Barometerstand an, der an der gespreizten Skala abgelesen wird.

Das holländische Marinebarometer nach BROUWER

Für die Ermittlung des Luftdrucks muß bei diesem Gerät nach der Ablesung eine Tabelle benutzt werden.

Das von Prof. BROUWER, Groningen, entwickelte Gerät vergleicht den Luftdruck mit dem temperaturabhängigen Druck eines eingeschlossenen Gases in Addition mit dem Gewicht einer sehr kurzen Quecksilbersäule (Skizze 21).

Das waagerechte, rohrförmige Grundgefäß ist an einem Ende zu einem Zylinder erweitert, in dem ein Kolben F durch eine Rändelschraube verstellt werden kann. Aus dem anderen Ende des Grundgefäßes führt ein kurzes Rohr mit dem Index C rechtwinklig nach oben und mündet in einen erweiterten Gasbehälter A, in den ein Thermometer B eingeführt ist. Ein weiteres Rohr D führt rechtwinklig aus dem Grundgefäß nach oben, in das das Quecksilber aus dem Grundgefäß mit einer kurzen Säule hineinragt und an der Skala E eine Höhe anzeigt. Das oben offene Rohr D ist mit einer Schutzkappe G gegen Verschmutzung des Quecksilbers abgedeckt.

Zur Ermittlung des Luftdrucks wird der Kolben F durch die Rändelschraube so bewegt, daß das Quecksilber des Grundgefäßes auf den Index C eingestellt ist.

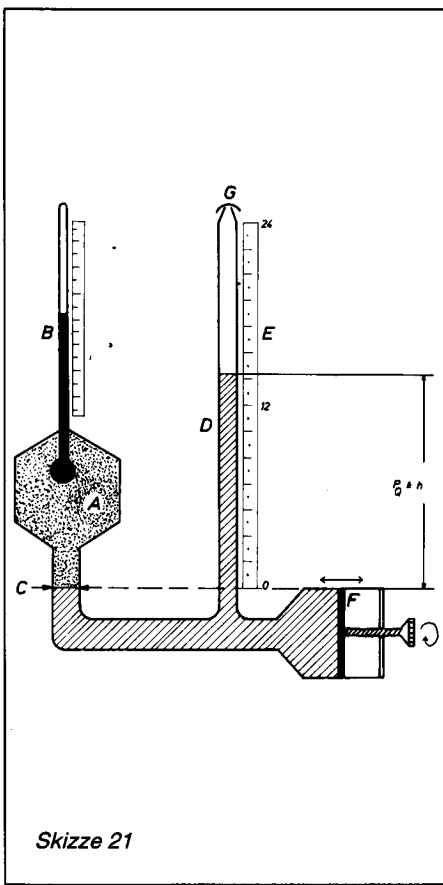
Damit ist das Volumen des Gases im Behälter A, dessen Druck stark temperaturabhängig ist, immer gleich. Die bei Temperaturschwankungen auftretende Volumenänderung des Gases wirkt sich beim Einstellen des Quecksilbers auf den Index C als Druck auf die Quecksilbersäule im Rohr D aus. Auf die Quecksilbersäule wirken sich aber auch Veränderungen im Luftdruck aus, so daß für jede Messung eine erneute Einstellung auf den Index C erforderlich ist. Die abgelesenen Werte am Thermometer B und an der Skala

E ergeben in der Tabelle C den Koordinatenschnittpunkt für den Luftdruck. Da der Quecksilberpegel im Zylinder des Grundgefäßes, der Nullpunkt der Skala E und der Index C auf einer horizontalen Linie liegen, tritt bei diesem Gerät keine Nullpunktschwankung auf. Die sehr geringe Höhe der Quecksilbersäule im Rohr D erlaubt die Vernachlässigung der Temperaturkorrektion des Quecksilbers. Eine Skalenspreizung ist nicht vorhanden.

Das Gerät ist bedingt transportabel, zur Verwendung bei der Marine aber gut einzusetzen, da es trotz Stampfen des Schiffes gebrauchstüchtig bleibt. Zur Ablesung muß das Gerät horizontal stehen.

Der zusätzlich notwendige Gebrauch der Tabelle dient nicht gerade der Vereinfachung zur Ermittlung des Luftdrucks. Der Gasdruck im Behälter A muß geeicht werden, und das Füllen des Geräts ist nicht ohne Probleme.

Es ist bisher nicht festzustellen, wie die Originaltabellen ausgesehen haben. Wahrscheinlich waren sie mit den Maßeinheiten Fahrenheit und Zoll errechnet. Die Neube-



°C	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	mmQ
28,5	787	786	785	784	783	782	781	780	779	778	777	776	776
28	786	785	784	783	782	781	780	779	778	777	776	775	775
27,5	785	784	783	782	781	780	779	778	777	776	775	774	774
27	783	782	781	780	779	778	777	776	775	774	773	772	772
26,5	782	781	780	779	778	777	776	775	774	773	772	771	771
26	781	780	779	778	777	776	775	774	773	772	771	770	770
25,5	779	778	777	776	775	774	773	772	771	770	769	768	768
25	778	777	776	775	774	773	772	771	770	769	768	767	767
24,5	777	776	775	774	773	772	771	770	769	768	767	766	766
24	776	775	774	773	772	771	770	769	768	767	766	765	765
23,5	774	773	772	771	770	769	768	767	766	765	764	763	763
23	773	772	771	770	769	768	767	766	765	764	763	762	762
22,5	771	770	769	768	767	766	765	764	763	762	761	760	760
22	770	769	768	767	766	765	764	763	762	761	760	759	759
21,5	769	768	767	766	765	764	763	762	761	760	759	758	758
21	767	766	765	764	763	762	761	760	759	758	757	756	756
20,5	766	765	764	763	762	761	760	759	758	757	756	755	755
20	765	764	763	762	761	760	759	758	757	756	755	754	754
19,5	763	762	761	760	759	758	757	756	755	754	753	752	752
19	762	761	760	759	758	757	756	755	754	753	752	751	751
18,5	761	760	759	758	757	756	755	754	753	752	751	750	750
18	760	759	758	757	756	755	754	753	752	751	750	749	749
17,5	758	757	756	755	754	753	752	751	750	749	748	747	747
17	757	756	755	754	753	752	751	750	749	748	747	746	746
16,5	756	755	754	753	752	751	750	749	748	747	746	745	745
16	754	753	752	751	750	749	748	747	746	745	744	743	743
15,5	753	752	751	750	749	748	747	746	745	744	743	742	742
15	752	751	750	749	748	747	746	745	744	743	742	741	741
14,5	750	749	748	747	746	745	744	743	742	741	740	739	739

rechnung mit °C und mm verändert nicht das Prinzip (Tabelle C).

Für den physikalisch und mathematisch interessierten Leser sollen hier die gesetzmäßigen Zusammenhänge erläutert werden:

Es bedeuten:

- P_A = Gasdruck im Gefäß A bei $x^\circ\text{C}$
- P_O = Gasdruck im Gefäß A bei 0°C
- P_Q = Druck der Quecksilber-Säule D auf Niveau Index C
- P_L = Luftdruck
- t = Gastemperatur in $^\circ\text{C}$
- α = Druckkoeffizient des Gases

$$\text{(ideales Gas = } \frac{1}{273,15})$$

Somit gilt:

$$P_A = P_O \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

(Druckänderung d. Gases bei Temperaturänderung)

$$P_A = P_Q + P_L$$

$$P_L = P_A - P_Q$$

$$= P_O \cdot (1 + \alpha \cdot t) - P_Q$$

(P_O ist durch Eichung zu ermitteln)

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge kann die Formel auch lauten:

$$P_L = \underbrace{P_O - P_Q}_{\text{Druckabhängiges Glied an Skala E ablesen}} + \underbrace{P_O \cdot \alpha \cdot t}_{\text{Temperaturabhängiges Korrektions-Glied}}$$

Aus der Gleichung ist zu ersehen, daß bei konstanter Temperatur des Gases das Steigen der Quecksilbersäule (in D) ein

Fallen des Luftdrucks bedeutet und umgekehrt. Werden in diese Formel die variablen Werte in einer gleichmäßig stufenförmigen Reihenfolge eingesetzt, ergeben sich die aufgelisteten Tabellenwerte.

Beispiel:

$$P_L = 719,5 - 12 + \frac{719,5 \cdot 1 \cdot 20}{273}$$

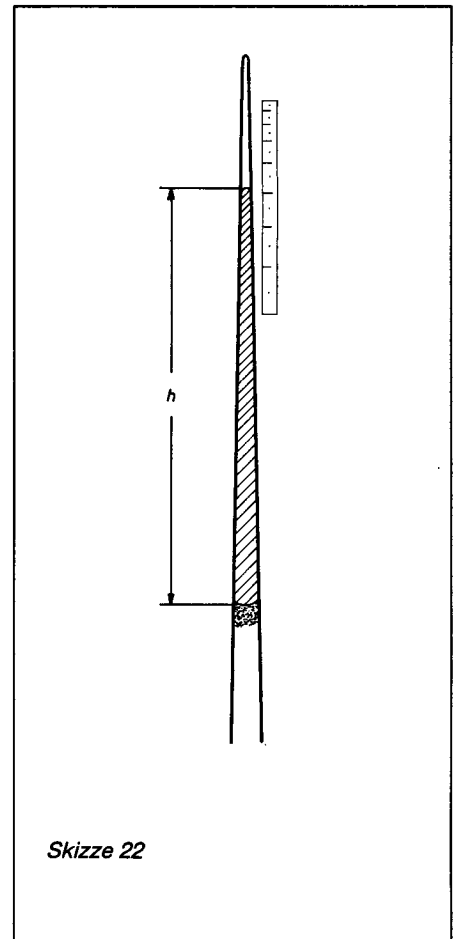
$$= 760 \text{ mm Q}$$

Die Tabelle ist so erstellt, daß die mittlere Höhe der Skala $= 12 \text{ mm Q}$ und

die Gastemperatur in $A = 20^\circ\text{C}$ einem Luftdruck von 760 mm Q an einem üblichen Quecksilberbarometer entsprechen. Zur Vereinfachung sind die Dezimalstellen des Druckkoeffizienten vernachlässigt und bei den Tabellenwerten auf ganze mm gerundet.

Das konische Barometer nach AMONTONS (1663—1705)

Dieses kuriose Barometer ist uns nur aus zeitgenössischen Stichen und zwei modernen Skizzen mit Beschreibung bekannt. Eine Erläuterung der Funktion existiert nicht. Intensive Überlegungen haben schließlich die Zusammenhänge erkennen lassen. Das konische Barometer (Skizze 22) besteht aus einem ca. 1,8 m langen, konisch verlaufenden Rohr und einer nicht linear gespreizten Skala. Es besitzt kein Sammelgefäß.



Zur Vorbereitung für die Ermittlung des Luftdrucks muß das Rohr mit der geschlossenen Spitze nach unten gedreht und mit einer definierten Quecksilbermenge gefüllt werden. Ein kleiner Pfropfen aus Baumwolle wird bis an das Quecksilber geschoben, um das Abfließen beim Umdrehen des Rohres zu verhindern. Beim Umdrehen verschiebt er sich mit der Quecksilbersäule in den erweiterten konischen Teil des Rohres. Der Luftdruck kann sich durch die Baumwolle auf die Quecksilbersäule auswirken. Für die Ablesung wird das Rohr an das Gehäuse mit der Skala angehängt.

Beim Umdrehen des Rohres sinkt die Quecksilbersäule auf die dem Luftdruck entsprechende Höhe. Die Länge der Quecksilbersäule verkürzt sich dabei, weil im erweiterten, unteren Rohrende (durch die konische Form) in der Längeneinheit ein größeres Volumen Platz findet. Steigt nun der Luftdruck an, so muß die Quecksilbersäule länger werden. Durch die konische Form des Rohres fließt das für das Ansteigen nötige Volumen aus dem breiteren Teil des Rohres nach oben. Der untere Meniskus verschiebt sich dabei ebenfalls aufwärts. Ein Beispiel soll die Vorgänge erläutern:

Der obere Meniskus steht an der Marke 760 mm. Bei steigendem Luftdruck soll sich die Quecksilbersäule um 8 mm verlängern. Tatsächlich steigt der obere Meniskus jedoch um 11 mm, wobei sich der untere Meniskus ebenfalls um 3 mm aufwärts verschiebt, so daß sich die Quecksilbersäule effektiv um $11 - 3 = 8$ mm verlängert hat. Bezogen auf die 8 mm Längenänderung der Quecksilbersäule ergeben die 3 mm Mehranstieg eine Skalenspreizung von 38%. Je mehr der Luftdruck sinkt, desto mehr wird die Skala gespreizt, da sich der untere Meniskus in das zunehmend breiter werdende Ende des Rohres verschiebt. In dem Maß, wie das Volumen im unteren Teil des Rohres größer wird, wird auch die Nullpunktschwankung und damit die Skalenspreizung größer. Das Maß der Spreizung ist abhängig vom Konus: Je kleiner der Konus, desto größer die Spreizung und desto länger das Rohr.

Der Zusammenhang ist rechnerisch belegt, würde hier aber den Rahmen des Sammlerinteresses übersteigen. Das konische Barometer kann nicht stationär für den laufenden Gebrauch aufgestellt werden. Es muß auf dem Kopf stehend, liegend oder entleert aufbewahrt und für jede Messung neu hergerichtet werden. In den Baumwollpfropfen dringt immer etwas Quecksilber ein, so daß die definierte Menge ständig überprüft und ergänzt werden muß, damit sich die Anzeige nicht verändert.

Beim Umdrehen des Rohrs reißt die Quecksilbersäule im engen Konus durch die große Reibung häufig ab (enges Rohr gleich große Reibung). Durch einen eingeführten Draht kann der abgerissene Teil

wieder mit der Menge des Quecksilbers vereinigt werden, es besteht dabei aber die erhöhte Gefahr des völligen Auslaufens. Alle beschriebenen Barometerfehler wirken sich hier ebenfalls aus.

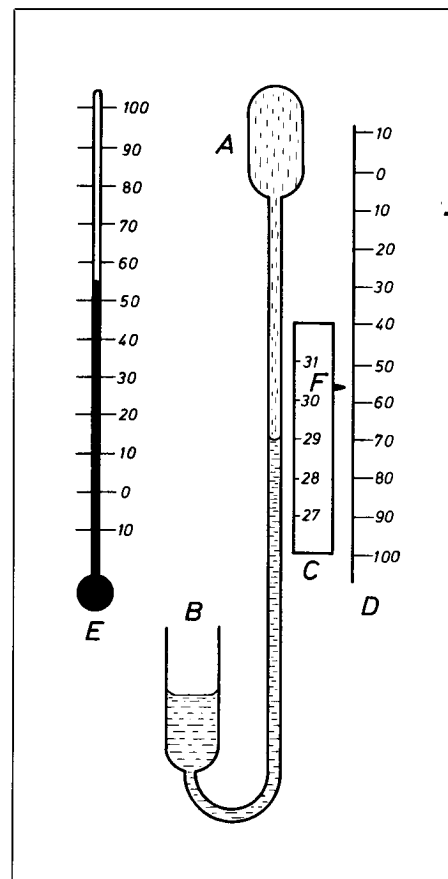
Es ist nicht überliefert, ob das konische Barometer zur praktischen Benutzung gelangt ist, oder ob es sich um ein Experimentierstück handelt.

9. Die Flüssigkeitsbarometer ohne Quecksilber

Das Wasserbarometer

Dieses Barometer wurde nur zu experimentellen Zwecken gebaut. Es funktioniert wie ein Gefäßbarometer einfachster Art. Auf Grund der geringen Dichte des Wassers hat es eine Höhe von über 10 Metern. Der Anzeigehub ist durch die geringe Dichte stark vergrößert. Verändert sich der Luftdruck um 1 mm Quecksilbersäulenhöhe, so ändert sich die Wassersäule um 13,6 mm. Die Herstellung solcher Geräte war das größte Problem, da es fast unmöglich war, so lange luftdichte Rohre herzustellen. Der hohe Dampfdruck des Wassers machte eine genaue Anzeige unmöglich. Durch die Länge der Wassersäule wirkte sich die Wärmeausdehnung sehr stark aus.

Skizze 23



Das Improved Sympiesometer nach ADIE (1774—1858)

(aus dem Griechischen: Sympiezein = zusammendrücken, metron = Maß)

Dem Optiker ALEXANDER ADIE wird am 23. 12. 1818 in Edinburgh das Patent für seine Erfindung zuerkannt. Dieses Barometer arbeitet mit einem Gas und einem fettigen Öl. ADIE benutzt Wasserstoff und Mandelöl mit Zusatz von Radix Alkannae, einem organischen Farbstoff, der Öle purpurrot färbt.

Das Rohr ist oben als ein geschlossenes, erweitertes Gasgefäß gebaut, unten aufwärts gebogen und mündet in ein erweitertes, offenes Sammelgefäß. Länge und Querschnitt des Rohres sind beliebig, da das Gerät geeicht werden muß. ADIE benutzt Rohre von ca. 45 cm Länge und einem inneren Querschnitt von ca. 2 mm (Skizze 23/Abb. 3).

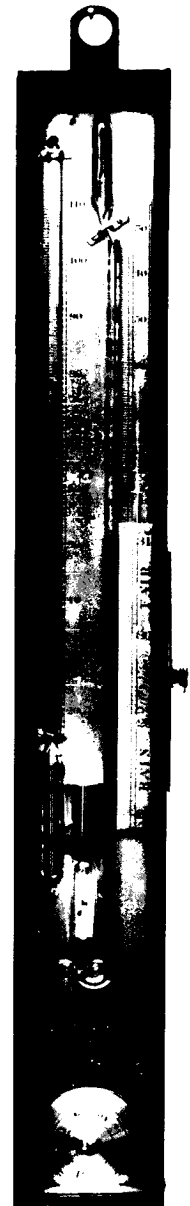


Abb. 3

Das Gasgefäß A ist in seinem Volumen direkt abhängig von dem gewünschten Meßbereich, der die Dimensionierung des Sammelgefäßes B bedingt. Das Gas im Gefäß A besitzt bei mittlerem Barometerstand den gleichen Druck wie die atmosphärische Luft. Die Meßpunkte der Skala C werden experimentell ermittelt und nach Vergleich mit einem Präzisionsquecksilberbarometer markiert.

Bei Temperaturschwankungen ändert sich das Gasvolumen und beeinflusst den Stand des Öls. Zur Ausschaltung des Temperaturfaktors wird die bewegliche Barometerskala C mit dem Zeiger F auf die vom Thermometer E angezeigte Temperatur auf der Temperaturskala D eingestellt. Jetzt kann der Barometerstand auf der Skala C abgelesen werden.

Das Gerät ist durch seine geringe Größe sehr handlich und auch für die Seefahrt tauglich. Es ist voll temperaturkorrigiert. Eine nicht mögliche Höhenkorrektur am Gerät ist für die Seefahrt ohne Bedeutung. Bei längerem Gebrauch verdunstet das Öl im Sammelgefäß, wodurch sich eine Nullpunktschwankung ergibt, und das Gas löst sich im Öl. Reparaturen des Geräts sind nicht möglich, weil dadurch die Eichung unwirksam wird.

Das Sturmglass (Abb. 4)

Fast jedes „Fitzroy“-Barometer ist mit einem weiteren Zusatzinstrument, einem Sturmglass, ausgerüstet. Es ist vor einem Diagramm befestigt, das die Höhen verschiedener Berge und die Schichten der Atmosphäre darstellt.

Das Instrument besteht aus einem sich oben verjüngenden Glaszylinder (Höhe ca. 25 cm, Ø ca. 1,5 cm), der mit einem Korken verschlossen und zusätzlich mit Siegelack abgedichtet ist.

Das Gefäß ist mit einer Lösung gefüllt, deren Zusammensetzung in der einschlägigen Literatur so angegeben ist:

Kampfer	(C ₁₀ H ₆ O)	— 50,2%
Ammoniumchlorid	(NH ₄ Cl)	— 12,7%
Kaliumnitrat	(KNO ₃)	— 11,0%
Alkohol (90%)	(C ₂ H ₅ OH)	— 14,4%
Wasser	(H ₂ O)	— 11,7%

Angeblich sollen die unterschiedlichen Trübungsgrade und Kristallisationserscheinungen mit dem Wetter zusammenhängen.

Die Legende an den Barometern definiert:

Klare Lösung	— Gutes Wetter
Kristalle am Boden	— Dicke Luft, Frost im Winter
Trübe Lösung	— Regen
Trübe Lösung m. kl. Sternen	— Gewitter

Große Flocken
Fäden im unteren Bereich

— Schwere Luft, bewölkter Himmel, Schnee im Winter
— Windiges Wetter



Abb. 4

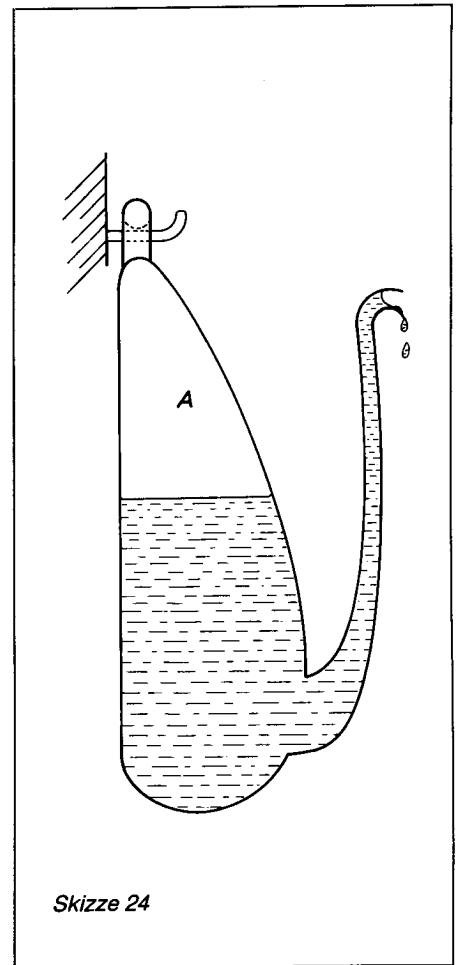
Kleine Punkte
Aufsteigende Flocken
Kleine Sterne

— Feuchtes Wetter, Nebel
— Wind in den unteren Luftschichten
— Im Winter schönes Wetter mit Schneefall in einigen Tagen.

Anmerkung des Verfassers
Nachvollzogene Experimente deuten darauf hin, daß nicht der Luftdruck, sondern vor allem die temperaturabhängige Kristallisationsneigung der gelösten Substanzen die angegebenen Erscheinungen auslöst. Die empirischen Angaben von Admiral FITZROY erscheinen für eine vorher-sagende Wetterbestimmung zumindest zweifelhaft.

Das Wetterglas

Dieses Gerät gehört nicht in die Reihe der Barometer, da es unmöglich ist, mit ihm den Luftdruck zu messen. Trotz aller groben Mängel zeigt es zuweilen den aufkommenden Regen richtig an. Vielleicht als gedanklicher Vorfahr der Barometer, gilt es heute in seiner schönen Form mehr einer



Skizze 24

ästhetischen Spielerei.

Die Form des Geräts erinnert an einen abgeplatteten Tropfen mit einer Kannentülle (Skizze 24/Abb. 5).

Bei normalem Luftdruck wird das Gerät gut zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Der Druck der Luft über dem Wasser im Raum A ist damit gleich dem herrschenden Luftdruck