

### 2.9 Druck und Druckeinheiten

Druck ( $p$ ) ist definiert als Kraft ( $F$ ) pro Fläche ( $A$ )

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \text{ bzw. } p = \frac{F}{A}$$

Damit ergibt sich die Einheit des Drucks als Quotient aus der Einheit der Kraft (N) und der Einheit der Fläche ( $\text{m}^2$ ) zu  $\text{N}/\text{m}^2$ . Diese Einheit wird Pascal (Einheitenzeichen: Pa) genannt zu Ehren des französischen Philosophen und Mathematikers Blaise Pascal (1623 – 1662).

**1 Pascal ist der Druck, den eine Kraft von 1 Newton senkrecht auf die Fläche 1 Quadratmeter ausübt.**

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

1 Newton ist die Gewichtskraft von etwa 100 g Masse. Diese Kraft auf  $1 \text{ m}^2$  verteilt ist ein Pascal. Das macht deutlich, dass 1 Pa eine sehr kleine Druckeinheit ist.

Häufig verwendete Vielfache sind:

$$\text{Hektopascal} \quad 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$$

$$\text{Kilopascal} \quad 1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}$$

$$\text{Megapascal} \quad 1 \text{ MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa} (= 10 \text{ bar})$$

Besonderer Name für den 10. Teil des Megapascal ( $\text{MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa}$ ) ist das Bar (Einheitenzeichen: bar).

**1 bar ist gleich 100 000 Pa ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ).**

Dadurch, dass 1 bar 100 000 Pa entspricht, ist ein Tausendstel bar so groß wie 100 Pa, also ein Hektopascal ist ein Millibar.

$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$$

**Beispiele:**

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,01 \text{ hPa (Millibar)}$$

$$1 \text{ Pa} = 10 \text{ } \mu\text{bar (Mikrobar)}$$

$$1 \text{ bar} = 1000 \text{ mbar}$$

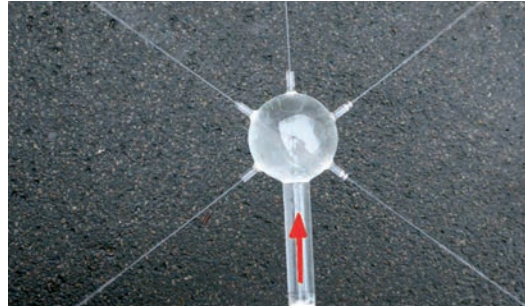
$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa (Hektopascal)}$$

### 2.9.1 Ausbreitung des Drucks

Jedes unter Druck stehende Gas übt durch sein Bestreben nach Ausdehnung (Entspannung) einen Druck auf seine Umgebung aus.

**Wird auf einen in einem geschlossenen Gefäß befindlichen tropfbaren oder gasförmigen Stoff (Fluid) ein Druck ausgeübt, etwa durch einen Kolben in einem Zylinder, breitet sich der Druck nach allen Seiten hin gleichmäßig aus.**

Dieser Druck herrscht dann an allen Begrenzungsflächen (Wände, Boden, Deckel) des Gefäßes. Es ist Druck gleich Kraft durch Fläche und entsprechend Kraft gleich Druck mal Fläche. Der Druck bzw. die Druckkraft ist eine gerichtete Größe (Vektor). Der Vektor ist, wenn die Flüssigkeit (Gas) ruht, senkrecht auf jeden Flächenteil gerichtet.



**Abb. 2.14** Druckausbreitungsversuch mit Wasser: Der Kolben erzeugt in Pfeilrichtung im Zylinder einen Überdruck, der sich in das Kugelgefäß fortpflanzt und dort in alle Richtungen gleichmäßig ausbreitet. Alle Wasserstrahlen sind gleich stark.

### 2.9.2 Druckdarstellung

Es ist zu unterscheiden:

a) *Äußerer Druck*

Die Flüssigkeit wird von außen gedrückt, z. B. durch einen Kolben in einem Zylinder.

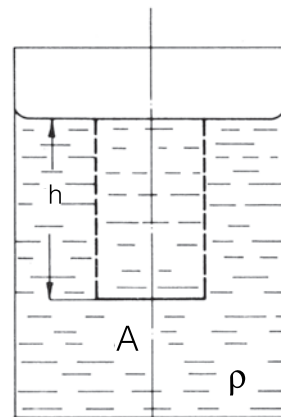
b) *Innerer oder hydrostatischer Druck*

Durch die Gewichtskraft einer ruhenden Flüssigkeit (auch Gas) wird ein Druck erzeugt; dieser sogenannte hydrostatische Druck nimmt mit der Tiefe, d. h. mit der Höhe der darüber liegenden Flüssigkeitssäule (Gassäule) zu.

Der hydrostatische Druck kann wie folgt berechnet werden (Abb. 2.15): Der gestrichelte Flüssigkeitszylinder hat die Höhe  $h$  und die Grundfläche  $A$ . Die Kraft  $F$ , welche auf die Fläche  $A$  ausgeübt wird, ist gleich der Gewichtskraft des Flüssigkeitszylinders  $F = F_G$ .

Druck auf die Fläche  $A$ :

$$p = \frac{F_G}{A}$$



**Abb. 2.15** Zur Berechnung des hydrostatischen Drucks

Gewichtskraft  $F_G$  gleich Masse  $\cdot$  Fallbeschleunigung:

$$F_G = m \cdot g$$

Die Masse des Flüssigkeitszylinders lässt sich mithilfe der Dichte und des Volumens berechnen:

$$m = \rho \cdot V$$

Damit wird die Gewichtskraft:

$$F_G = \rho \cdot V \cdot g$$

Das Volumen des Flüssigkeitszylinders berechnet sich aus Grundfläche mal Höhe:

$$V = A \cdot h$$

Damit wird die Gewichtskraft:

$$F_G = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$$

und der Druck, der ja als Kraft pro Fläche definiert ist:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g$$

Ergebnis: Der Druck einer Flüssigkeit ist proportional zur Höhe  $h$  der Flüssigkeitssäule. Er lässt sich deshalb durch eine sogenannte äquivalente (gleichwertige) Flüssigkeitssäule darstellen.

**Der hydrostatische Druck ist der Druck, den eine Flüssigkeit aufgrund ihrer Gewichtskraft ausübt. Er berechnet sich als Produkt aus Dichte der Flüssigkeit mal Höhe der Flüssigkeitssäule mal Fallbeschleunigung.**

Diese Erkenntnis ist die Grundlage für die Druckmessung mittels Flüssigkeitssäulen, z. B. mit dem U-Rohr-Manometer oder dem Schrägrührmanometer.

Der hydrostatische Druck in einer Flüssigkeit ist von der Form des Gefäßes und von der Stellung der beanspruchten Fläche unabhängig. Maßgebend ist nicht die Menge der Flüssigkeit, sondern sind nur die Höhe der Flüssigkeitssäule und die Dichte der Flüssigkeit.

### Beispiel:

Es ist die Höhe der Wassersäule zu berechnen, die dem Druck 1 bar entspricht. Dazu wird die Formel für den hydrostatischen Druck nach der Höhe  $h$  umgestellt. Alle Werte sind mit ihren Basiseinheiten einzusetzen: Die Dichte des Wassers beträgt  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ N/m}^2$ ,  $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$  und  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$p = \rho \cdot h \cdot g \quad \Rightarrow \quad h = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{100000 \text{ N}}{\text{m}^2 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \underline{\underline{10,1936 \text{ m} \approx 10,2 \text{ m}}}$$

Der Druck 1 bar entspricht einer Wassersäule mit einer Höhe von 10,2 m.

Wird als Flüssigkeit Quecksilber (Hg) verwendet, wird die Höhe der Quecksilbersäule mit einer Dichte von  $\rho_{\text{Hg}} = 13\,600 \text{ kg/m}^3$

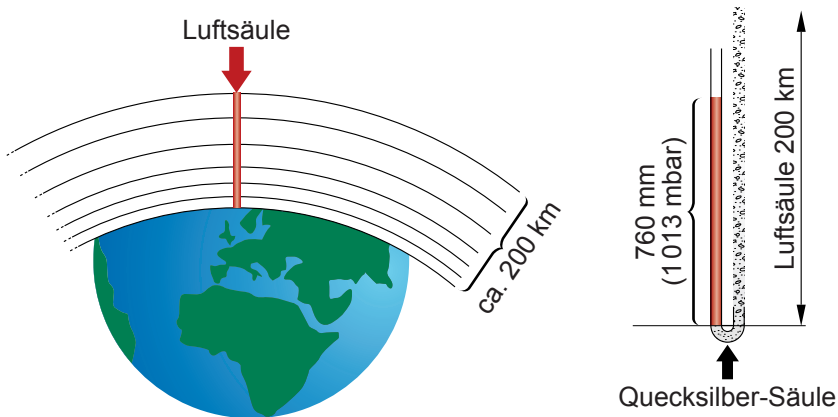
$$h = \frac{p}{\rho_{\text{Hg}} \cdot g} = 0,75 \text{ m} = 750 \text{ mm}$$

## Luftdruck

Der Luftdruck entsteht durch die Gewichtskraft der Lufthülle. Er wurde erstmals 1644 durch den italienischen Physiker Evangelista Torricelli (1608 – 1647) mit einer Quecksilbersäule gemessen. Der Normalluftdruck in Meereshöhe wurde früher mit 760 mm Quecksilbersäule (760 Torr) festgelegt. Die gesamte Luftsäule von der Erdoberfläche bis zum Ende der Lufthülle entwickelt demnach die gleiche Gewichtskraft wie eine 760 mm hohe Quecksilbersäule (Abb. 2.16). Im heutigen internationalen Einheitensystem (SI-System) beträgt der Normalluftdruck  $101\,325\text{ Pa} = 1013,25\text{ hPa} = 1,01325\text{ bar}$ .

Berühmt wurde der Versuch Otto von Guericke mit den „Magdeburger Halbkugeln“, die nach Evakuieren (= luftleer machen) auch durch 16 Pferde nicht auseinander gezogen werden konnten, weil der Luftdruck sie zusammenpresst.

Die Messung des Luftdrucks erfolgt mit einem **Barometer**. Relativ genaue Messung erlaubt ein Barometer mit evakuierter Druckdose aus einem Metall mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten, damit der Temperatureinfluss minimiert wird.



**Abb. 2.16** Die Luftsäule von der Erdoberfläche bis zum Ende der Lufthülle hat die gleiche Gewichtskraft wie eine 760 mm hohe Quecksilbersäule.

Die Druckangabe nach der Höhe einer Flüssigkeitssäule entfiel ab 1. Januar 1978. Die Skalen der Quecksilber- und Wassersäulen sind in Pa oder hPa (mbar) einzuteilen.

$$1\text{ mm WS} = 9,80665\text{ Pa} \approx 10\text{ Pa}$$

$$1\text{ mm QS} = 1\text{ Torr} = 133,32\text{ Pa} \approx 133\text{ Pa} \approx 1,33\text{ hPa}$$

### 2.9.3 Druckmessung

Alle in der Kältetechnik verwendeten Manometer zeigen den effektiven Überdruck  $p_e$  gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck  $p_a$  an, der sich nach den atmosphärischen Verhältnissen ändert. Diese Manometer messen also relativ zum Luftdruck, es sind Relativ-Manometer.

Der effektive Überdruck  $p_e$  wird im Vakuumbereich (Unterdruck, Druck in einem System geringer als Luftdruck) negativ. Um den wirklichen (absoluten) Druck  $p$  bzw.  $p_{\text{abs}}$ , der für die

thermodynamischen Zustandsberechnungen erforderlich ist, zu kennen, ist zur Manometerablesung  $p_e$  der herrschende atmosphärische (barometrische) Luftdruck  $p_a$  hinzuzuzählen. Der absolute Druck wird ausgehend vom absoluten Drucknullpunkt (völliges Vakuum) gemessen (Abb. 2.17).

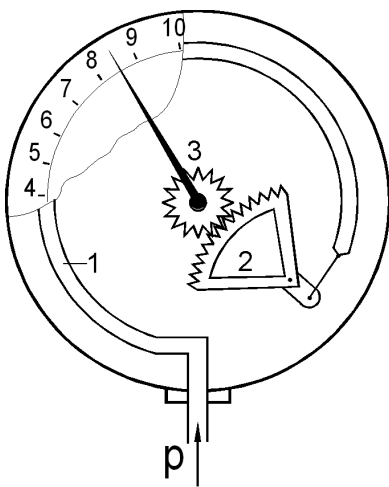
**Der wirkliche (absolute) Druck ist gleich barometrischer Luftdruck plus manometrischer Druck (Überdruck):  $p_{abs} = p_a + p_e$  (Abb. 2.17).**

### Beispiele:

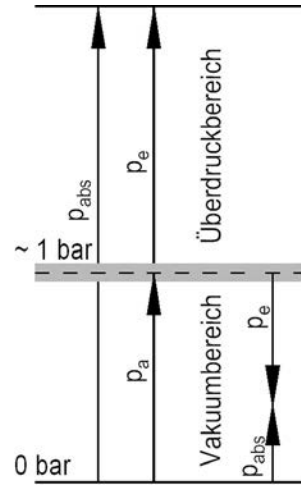
1. Zeigt das Manometer einen Überdruck  $p_e = 1,6$  bar bei einem Barometerstand  $p_a = 1010$  hPa = 1,01 bar an, ist der absolute Druck:  
 $p_{abs} = p_a + p_e = (1,01 + 1,69)$  bar = 2,61 bar
2. Der Druck in einer Saugleitung wird mit einem Manometer zu  
 $p_e = -0,2$  bar

gemessen. Der Barometerstand beträgt  $p_a = 1031$  hPa = 1,031 bar. Der absolute Druck ist  $p_{abs} = p_a + p_e = 1,031$  bar + (-0,2) bar = 0,831 bar = 831 mbar. Die Saugleitung befindet sich also im Unterdruckbereich. An einer undichten Stelle würde nicht Kältemittel entweichen, sondern Luft und Feuchtigkeit würden eindringen!

Dass Manometer den effektiven Überdruck  $p_e$  messen, liegt an ihrem Aufbau, der am Beispiel des Rohrfeder-Manometers in der folgenden Zeichnung prinzipiell dargestellt ist:



**Abb. 2.18** Aufbau eines Rohrfeder-Manometers



**Abb. 2.17** Absoluter Druck  $p_{abs}$  = barometrischer Luftdruck  $p_a$  + Manometerdruck  $p_e$  (Überdruck); im Vakuumbereich wird  $p_e$  negativ (Unterdruck).

Der Systemdruck  $p$  wird in ein flach gedrücktes, gekrümmtes Rohr (1) als Messelement geleitet, das dadurch gestreckt wird. Diese Streckung überträgt sich über ein Zahnradsegment (2) auf das Zahnrad mit dem Zeiger (3). Da von außen auf das Rohr (1) der Umgebungsluftdruck wirkt, messen solche Manometer nur den effektiven Überdruck  $p_e$ . Wenn der Systemdruck  $p$  genau so groß ist wie der Umgebungsdruck  $p_a$ , wird das Rohr weder gestreckt noch gekrümmt, der Zeiger steht auf Null, also kein Überdruck. Wenn der Systemdruck unter dem Umgebungsluftdruck liegt (Unterdruck, Vakuumbereich), wird das Rohr nicht gestreckt, sondern gekrümmt, die Anzeige wird negativ bis maximal -1 bar (vgl. Abb. 2.18).

Nach den Empfehlungen des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) und dem Deutschen Institut für Normung (DIN) darf der Überdruck nicht Druck genannt werden, wenn das Wort allein steht. Lediglich bei Wortzusammensetzungen darf der Wortteil „über“ entfallen, wenn die zugehörige Größe eindeutig als Überdruck definiert ist.

Die Bezeichnung „Druck“ ist (nach den o. a. Empfehlungen) eindeutig und bedarf eigentlich keiner weiteren Kennzeichnung durch das Wort „absolut“. Es hat sich aber gezeigt, dass in der Praxis häufig der Wunsch nach einer Ausdrucksweise besteht, die durch einen zusätzlichen Hinweis jedes Missverständnis ausschließt, zumal fast alle in Betrieben benutzten Manometer Überdrücke anzeigen. Gegen die Benennung „absoluter Druck“, die weitgehend gebräuchlich ist, wurden zwar starke Bedenken geäußert, es hat sich aber kein anderer kurzer, einprägsamer, unmissverständlicher Ausdruck finden lassen. So darf diese Benennung vorläufig weiter benutzt werden, um jede Verwechslung auszuschließen.

Im englischen Sprachraum wird statt in cm noch in Zoll (inch) gemessen. In der Kältetechnik wird in den USA die Druckeinheit „pound-force per square inch“, abgekürzt psi, verwendet.  
 $1 \text{ psi} = 6895 \text{ Pa} = 0,06895 \text{ bar}$

### 2.9.4 Druckmessung beim Evakuieren

Kälteanlagen müssen vor dem Befüllen evakuiert, d. h. luftleer gemacht werden. Luft und andere Fremdgase haben wegen ihrer schädlichen Auswirkungen auf das Kältesystem nichts darin zu suchen.

Erstens würde sich die Luft, da sie nicht verflüssigt werden kann, überwiegend im Verflüssiger sammeln und dort den Verflüssigungsdruck erhöhen, weil das Kältemittel weniger Platz hat. Erhöhter Verflüssigungsdruck führt aber zu mehr Verschleiß und einer Erhöhung der Betriebskosten, im Extremfall zur Abschaltung der Anlage wegen Überschreitung eines aus Sicherheitsgründen eingestellten Überdrucks (Hochdruckstörung).

Zweitens enthält Luft immer auch Wasserdampf (als unsichtbares Gas), ihre relative Luftfeuchte ist nie null Prozent. Im Betrieb kann es zu schädlichen Reaktionen zwischen dem Wasser, dem Kältemittel und dem Kältemaschinenöl kommen, z. B. zur Bildung von Säuren, die die Wicklung des Elektromotors angreifen. Viele Anlagen werden nämlich mit einem hermetischen oder



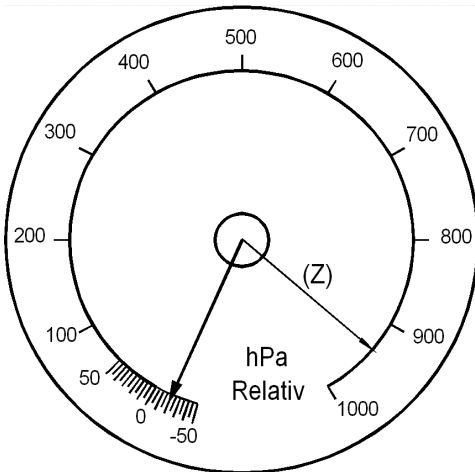
**Abb. 2.19** Manometerablesung:  $p_e = 8,5 \text{ bar}$ , Barometerstand  $p_a = 1 \text{ bar}$ , absoluter Druck  $p_{\text{abs}} = 1 \text{ bar} + 8,5 \text{ bar} = 9,5 \text{ bar}$ . Die Genauigkeitsklasse beträgt 1,0 (Kl. 1,0). Das bedeutet, dass die Messungenauigkeit des Manometers 1 % vom Endausschlag (hier 24 bar) beträgt, also 0,24 bar. Der angezeigte Druck liegt also im Bereich  $8,5 \pm 0,24 \text{ bar}$ , also zwischen 8,26 und 8,74 bar.

halbhermetischen Verdichter betrieben und das bedeutet, dass sich der Elektromotor innerhalb des Kältemittelkreislaufs befindet.

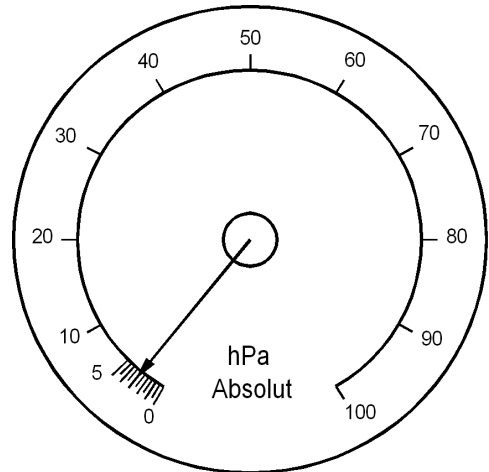
Hinzu kommt, dass eine Anlage je nach Sorgfalt bei der Montage auch etwas Wasser in flüssiger Form enthalten kann. Auch das kann in Grenzen durch das Evakuieren entfernt werden. Wie wir aus Abschnitt 2.6 wissen, ist der Siedepunkt eines Stoffes stark vom Druck abhängig. Wasser siedet z. B. gemäß Tabelle 2.8 bei einem Druck von 23,3 hPa schon bei 20 °C. Wenn die Anlage also z. B. 20 °C warm ist und der Druck auf diesen Wert durch die Vakuumpumpe gesenkt wird, beginnt eventuell vorhandenes freies Wasser zu verdampfen und kann gasförmig abgesaugt werden. Am Vakuummeter wäre das an einem Haltepunkt zu erkennen, denn so lange Wasserdampf entsteht und abgesaugt wird, sinkt der Druck nur sehr langsam. Beim Verdampfen kühlt sich das Wasser nämlich ab, sein Dampfdruck sinkt. Voraussetzung dafür ist allerdings auch, dass dem Wasser genügend Wärme zufließt, die es zum Verdampfen benötigt. Größere Wassermengen sind damit nicht sicher zu entfernen.

Jedenfalls muss eine Anlage vor Inbetriebnahme oder nach Reparaturen, bei denen der Kreislauf geöffnet wurde, sorgfältig evakuiert werden. Dazu ist es nötig, den Druck exakt zu messen, und das ist mit dem normalen Manometer (Abb. 19) nicht möglich. Der Zeiger steht ungefähr auf -1 bar und man weiß nicht, ob 40 hPa oder 20 hPa oder 5 hPa erreicht wurden. Der Druck sollte aber sicher unter 1 hPa gesenkt werden. Deswegen gibt es spezielle Vakuum-Manometer oder Vakuummeter.

Wenn Vakuummeter nach dem gleichen Prinzip messen wie die oben beschriebenen Relativ-Manometer, messen sie relativ zum Umgebungsdruck, sind also Relativ-Vakuummeter (Abb. 2.20).



**Abb. 2.20** Skala eines Relativ-Vakuummeters. Der Zusatzzeiger (Z) ist von Hand einstellbar. Das Manometer zeigt  $p_e = -1015$  hPa. Bei einem Luftdruck von 1040 hPa bedeutet das, dass in der Anlage immer noch 25 hPa Druck herrscht:  $p_{abs} = p_a + p_e = (1040 + (-1015))$  hPa = 25 hPa. Wasser könnte nicht sicher entfernt werden.



**Abb. 2.21** Skala eines Absolut-Vakuummeters. Der Druck in der Anlage liegt bei 3 hPa. Diese Messung ist unabhängig vom Umgebungsdruck. Ein Barometer ist nicht erforderlich.



Angenommen, die beiden Vakuummeter seien am gleichen System angeschlossen, beträgt der Luftdruck:  $p_a = p_{\text{abs}} - p_e = 3 \text{ hPa} - (-1015 \text{ hPa}) = 3 \text{ hPa} + 1015 \text{ hPa} = 1018 \text{ hPa}$ .

Ihre Anzeige ist linksdrehend von 1000 hPa bis -50 hPa. Damit wird berücksichtigt, dass der Umgebungsluftdruck durchaus z. B. 1040 hPa betragen kann, nämlich bei einer Hochdruckwetterlage. Da der Zeiger des Relativ-Vakuummeters zunächst auf 0 steht (außen am Rohr als Messelement und innen herrscht der gleiche Druck), muss er relativ zu diesem hohen Luftdruck von 1040 hPa z. B. einen (absoluten) Druck von nur noch 1 hPa in der Anlage anzeigen können. Die Anzeige wäre dann -1039 hPa. Mit einem Zusatzzeiger, der von Hand verstellbar ist, kann man z. B. das von der Pumpe erreichbare Endvakuum (ohne dass die Anlage angeschlossen ist, also bei geschlossenem Absperrventil) markieren. Dann kann man beim Evakuieren kontrollieren, ob auch in der Anlage dieses Endvakuum erreicht wird. Wenn das nicht der Fall ist und sich ein Haltepunkt ergibt, ist z. B. Wasser in der Anlage, das verdampft und dabei diesen Haltepunkt hervorruft.

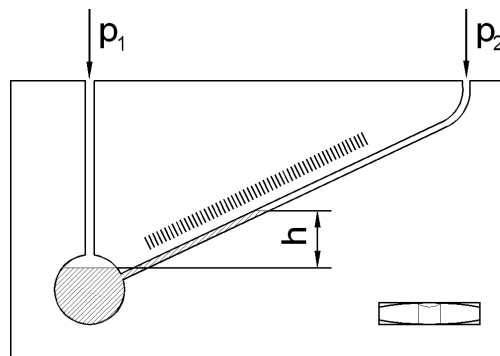
Eine genaue Messung des (absoluten) Drucks in der evakuierten Anlage ist mit einem Relativ-Vakuummeter jedoch nur möglich, wenn man den aktuellen Luftdruck kennt. Dazu benötigt man ein Barometer. Wenn man das nicht hat, den wirklichen Luftdruck also nicht kennt, ist die Messung und damit die Qualität des Evakuierens mit Unwägbarkeiten behaftet.

Sicherer sind in diesem Fall Absolut-Manometer. Sie zeigen, wie der Name schon sagt, nicht relativ zum Umgebungsluftdruck an, sondern den tatsächlichen (absoluten) Druck, den die Vakuumpumpe in der Anlage erzeugt. Auch ihre Anzeige ist linksdrehend, beginnt aber erst bei z. B. 100 oder 150 hPa. Dadurch haben sie eine feinere Skaleneinteilung und auch das ermöglicht ein präzises Arbeiten (Abb. 2.21).

Zu all dem ist hinzuzufügen, dass eine sichere Messung des Vakuums innerhalb der Anlage nur gewährleistet ist, wenn das Vakuummeter möglichst weit von der Pumpe entfernt in der Anlage misst. Außerdem sollte der Saugschlauch kurz und dick sein, um den Strömungswiderstand zu minimieren.

### 2.9.5 Druckmessung mit dem Schrägrohrmanometer

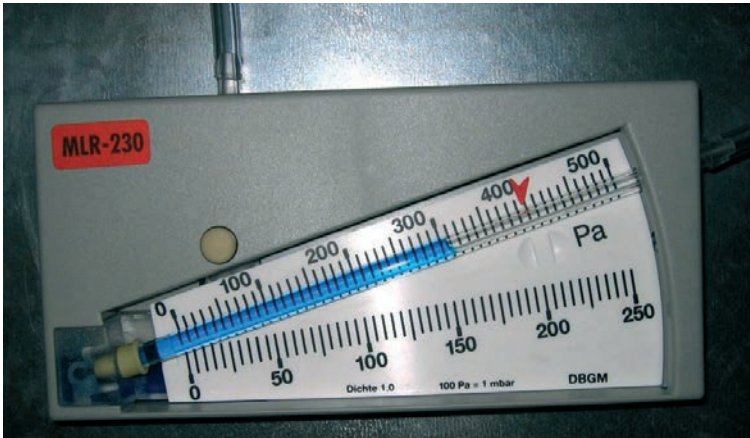
Wie schon in Abschnitt 2.9.2 erwähnt, lässt sich Druck als eine gleichwertige Flüssigkeitssäule darstellen. Zwar sind die Einheiten Millimeter Wassersäule (mm WS) oder Millimeter Quecksilbersäule (mm Hg, Torr) nicht mehr zu verwenden, aber eine Wassersäule zur Druckmessung ist immer noch zweckmäßig und auch statthaft, wenn sie in Pascal geeicht ist. Das ist beim Schrägrohrmanometer der Fall. Dabei handelt es sich im Prinzip um ein geneigtes Rohr, in dem eine Flüssigkeitssäule (meist aus Wasser) der Höhe  $h$  durch einen Druck aufgebaut wird (Abb. 2.22).



**Abb. 2.22** Prinzip des Schrägrohrmanometers,  $p_1 > p_2$ .  $L$  = Libelle zur Überprüfung der waagerechten Aufhängung



Schrägrohrmanometer dienen zur Überwachung von Luftfiltern. Deren Druckdifferenz ist abhängig von ihrer Beladung. Je mehr ein Filter mit Staub und Schwebstoffen beladen ist, desto größer wird der Druckabfall am Filter. Ein Schrägrohrmanometer wird mit seinen beiden Druckaufnehmerröhrchen vor (höherer Druck  $p_1$ ) und hinter dem zu überwachenden Luftfilter (geringerer Druck  $p_2$ ) angeschlossen und misst so die auftretende Druckdifferenz. Bei einer bestimmten Druckdifferenz ist der Filter zu wechseln.



**Abb. 2.23** Schrägrohrmanometer, Filterwechsel bei 400 Pa

Zu beachten ist, dass Schrägrohrmanometer genau waagrecht eingebaut werden, damit die Anzeige stimmt. Darüber hinaus muss man sich darüber im Klaren sein, wie sie geeicht werden können. Bei den meisten Schrägrohrmanometern wird nämlich gefärbtes Wasser als Messflüssigkeit verwendet, das mit der Zeit verdunsten kann. Wie kontrolliere ich, ob die Füllmenge stimmt? Selbst ein frisch eingewechselter Filter hat eine gewisse Anfangsdruckdifferenz. Aber wenn man die beiden Schläuche, die den Druck von vor und hinter dem Filter zuführen, abnimmt, muss die Anzeige auf Null stehen, denn auf beide Druckaufnehmerröhrchen wirkt jetzt der Umgebungsluftdruck, die Druckdifferenz ist Null. Falls das nicht der Fall ist, muss man Messflüssigkeit nachfüllen (oder ablassen).