

In der Praxis der Leckprüfung mit Luft wird sehr häufig das Druckabfall- /Druckanstieg-Messverfahren eingesetzt:

1. Druckabfall- oder -anstiegsverfahren, Basisdefinitionen:

Das Verfahren basiert auf der Druckabfall- oder -anstiegsmessung in einem geschlossenen Prüfvolumen V nach dem Gasgesetz. Die Luft oder das Gas im Volumen hat einen absoluten Druck P_1 und eine absolute Innentemperatur T_1 .

Es gilt in erster Näherung das **ideale Gasgesetz**:

$$P_1 \cdot V = m \cdot R_i \cdot T_1 \quad \text{bzw. Dichte } \rho = m / V = P_1 / (R_i \cdot T_1) \quad (1)$$

Bei V und $T_1 = \text{konstant}$ hängt der Druckabfall im Prüfvolumen V direkt mit dem Massenverlust durch die Leckage zusammen:

$$d/dt (P_1) = d/dt (m) \cdot R_i \cdot T_1 / V \quad (2)$$

wobei für den Massenfluss (Verlust oder Gewinn) durch die Leckage auch gilt

$$d/dt (m) = \rho_{\text{act}} \cdot Q_{\text{Lact}} = P_1 / (R_i \cdot T_1) \cdot Q_{\text{Lact}} \quad (3)$$

Der Druckabfall oder -anstieg bei einem gegebenen absoluten Innendruck P_1 ist damit dem (aktuellen) Leckvolumenstrom Q_{Lact} aus dem oder in das Prüf-Volumen proportional und entspricht:

$$d/dt (P_1) / P_1 = d/dt (m) / m = Q_{\text{Lact}} / V \quad (4)$$

Um die gegenseitigen Abhängigkeiten von Prüfvolumen, Prüfdruck, Eingangs-Leckvolumenstrom, Normvolumenstrom und Druckabfall in einer Größe zu fassen, wird nach DIN EN 1330-08 die **Leckrate** L_q bei konstant angenommener Temperatur als Koeffizient definiert:

$$L_q = d/dt (P_1) \cdot V = P_1 \cdot Q_{\text{Lact}} = P_{\text{norm}} \cdot Q_{\text{norm}} \quad (5)$$

Sie hat die Einheit [mbar · L / s].

Gasdichtheit wird z.B. ab einer Leckrate von kleiner oder gleich 10^{-7} [mbar · L / s] erreicht.

Dies bedeutet: Bei einem Prüfvolumen von 1 mL und einem Prüfdruck von 10^3 mbar = 1 bar Überdruck, der einem absoluten Prüfdruck von ca. 2 bar abs. = $2 \cdot 10^3$ mbar abs unter Addition des Atmosphärendruckes von 1 bar abs entspricht, wird ein Druckabfall von 10^{-4} [mbar/s] = 0,01 [Pa/s] gemessen, wenn die Leckmenge $5 \cdot 10^{-8}$ mL / s oder als Normvolumenstrom (=Massestrom) ausgedrückt ca. 10^{-7} NmL / s beträgt.

In den meisten Dichtheits-Prüfungen wird bei überkritischen Druckverhältnissen geprüft:

$$P_1 > 2 \cdot P_{\text{atm.}} \quad \text{oder} \quad P_{\text{atm.}} > 2 \cdot P_1 \quad (6)$$

Dies gilt besonders bei Sitzdichtungen und kurzen Spalten, wenn die Geometrie des Lecks in Länge und Durchmesser $L < 120 \cdot d$ erfüllt. In diesem Fall ist der aktuelle Leck-Volumenstrom Q_{Lact} auf der Druckseite von der Schallgeschwindigkeit als maximaler Fließgeschwindigkeit durch die Leckstelle begrenzt. Dadurch ist der aktuelle Leck-Volumenstrom in der Hauptsache von der Temperatur T und der Leckquerschnittsfläche A und kaum vom Prüfdruck abhängig:

$$Q_{\text{Lact}} = K \cdot A \cdot c_s; \quad c_s = \sqrt{R_i \cdot K \cdot T} \quad (7)$$

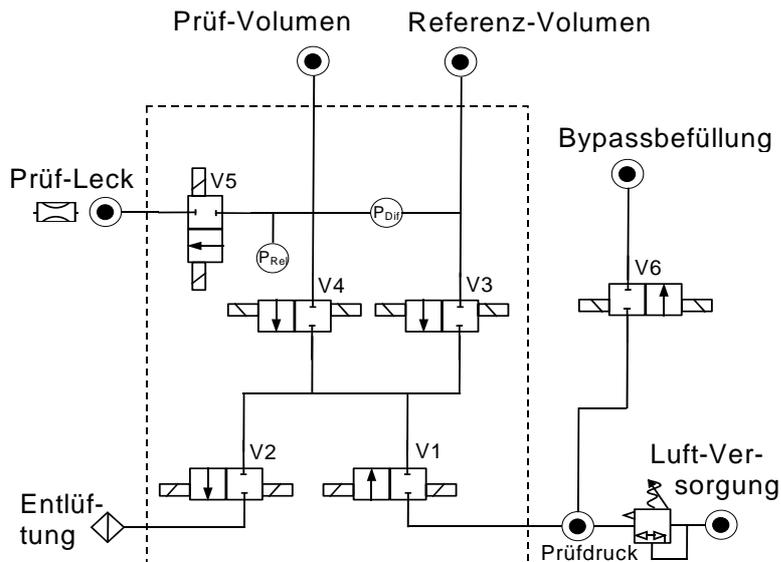
Wegen des Zusammenhangs des aktuellen Volumenstroms über die Gasdichte bleibt aber der Masse- und Normvolumenstrom des Lecks sehr wohl von der Dichte abhängig. Bei kleinen Druckabfällen und kurzen Messzeiten ergibt sich aber dennoch auch ein quasi konstanter Leckage-Massenstrom und damit nach (4) ein recht konstanter Druckabfall, der einen direkten Zusammenhang mit der Leckquerschnittsfläche A hat:

$$d/dt (P_1) = K \cdot A \cdot c_s \cdot P_1 / V \quad (8)$$

K ist der Durchflusskoeffizient (Profilmfaktor). Er ist bei einem kreisrunden Loch ca. $2/3 = 0,666$

2. Messaufbau und Einschränkungen:

In der Praxis der Leckageprüfung wird zur Erzielung einer besseren Auflösung des Druckabfalls oder -anstiegs meistens das **Differenzdruckmessverfahren** angewendet. Dabei wird ein zweites hochdichtes Referenzvolumen V_{ref} gleichzeitig mit dem Prüfvolumen gefüllt. Nach der Befüllung werden die beiden Volumina durch Schaltventile getrennt und der durch den Druckabfall oder -anstieg entstehende Differenzdruck zwischen beiden Volumina gemessen. Durch diese Technik kann man bei kleinen Leckagen schnellere und genauere Messergebnisse erzielen.



Wegen systemeigener Leckagen und Temperatureffekte sowie langen Stabilisierungszeiten kann man allerdings Leckagen im Bereich kleiner oder gleich 10^{-6} [mbar · L / s] mit der Druckabfall- oder -anstiegsmessung nur in absoluten Ausnahmefällen prüfen.

Die typische Eigendichtheit eines Dichtheits-Prüfblockes selbst liegt im Bereich kleiner oder gleich 10^{-5} bis 10^{-6} [mbar · L / s]. In der Anwendung sollte man daher eine Sicherheit von 1-2 Zehnerpotenzen Abstand von der System-Eigendichtheit halten. Die Anwendungsgrenze ist normalerweise bei Leckraten von 10^{-3} bis 10^{-4} [mbar · L / s] zu setzen.

Neben der Wichtigkeit eines kleinen Prüfvolumens und gleich grossen Referenzvolumens sollte darauf geachtet werden, dass die beiden Volumina durch zwei separate Ventile getrennt werden, die auf der Eingangsseite nach der Befüllung entlüftet werden. Bei eventueller Leckage der Ventile ist dadurch eine Selbstüberwachung der Eigendichtheit gewährleistet. Die Umkehrvariante des Druckabfall-Verfahrens am Eingang des Prüflings ist das Druckanstiegs-Verfahren am Ausgang. Es ist weniger abhängig von Temperatureffekten beim Füllvorgang und spricht, wenn das Ausgangsvolumen klein gehalten werden kann, sehr viel schneller an.

3. Messergebnisse und Wiederholbarkeit:

Die Dichtheitsprüfung wird normalerweise in 4 Prüfschritten durchgeführt:

Füllen, Beruhigen, Messen und Entlüften.

Das Messverfahren ist von Druck und Temperatur abhängig. Druckänderungen breiten sich sehr schnell aus und sind schnell messbar (1-10 Millisekunden). Dagegen sind Temperaturänderungen und Messungen sehr langsame Vorgänge (1-10 Sekunden). Kleine Temperaturänderungen durch die Luftkompression (-entspannung) in der Füllphase werden in einem Dichtheitsprüfablauf meist durch lange Füll- und Beruhigungszeiten (10-12s) abgefangen. In der anschließenden relativ kurzen Messphase für den Druckabfall (-anstieg) von 1 –3 Sekunden werden dann hauptsächlich die Auswirkungen der Leckage auf den Druck messbar.

Ermittelte Messwerte sind auch von Langzeit-Effekten in Druck und Temperatur der Umgebung abhängig. Der Prüfdruck wird meist als Überdruck zum atmosphärischen Druck gemessen. Durch Hoch-/Tiefdruckwetterlagen können atmosphärische Drücke um bis zu ± 50 mbar schwanken. Die Temperatur schwankt je nach Tages- und Jahreszeit um bis zu $\pm 20^\circ\text{C}$. Hinzukommen Schwankungen in der Regelstabilität der Druckversorgung von z.B. ± 5 mbar und nicht ausgeglichene Temperatureffekte von z.B. $\pm 2^\circ\text{C}$.

Macht man eine Abschätzung der Wiederholbarkeit anhand der Abhängigkeiten der Dichte und der Schallgeschwindigkeit von Temperatur und Druck, so kann man erwarten:

	Dichteänderung	Schallgeschwindigkeitsänderung
Temperatur $\pm 2^\circ\text{C}$	$\pm 0,6\%$	$\pm 0,3\%$
Temperatur $\pm 20^\circ\text{C}$	$\pm 6,0\%$	$\pm 3,0\%$
Druck ± 5 mbar	$\pm 0,4\%$	$\pm 0,0\%$
Druck ± 50 mbar	$\pm 4,0\%$	$\pm 0,1\%$
Gesamt	$\pm 1,0$ bis 10%	$\pm 0,3$ bis $3,1\%$

Bei der Dichte bewirkt 1°C gleich wie 4 mbar eine Dichte-Änderung von 0,3%, bei der Schallgeschwindigkeit bewirkt 1°C eine Änderung von 0,15%, der Druck fast keine.

Zur Einstellung, Kalibrierung und Überwachung der Dichtheits-Prüfeinrichtung werden **Kalibrierlecks** verwendet. Es ist normalerweise aus Unkenntnis des exakten Prüfvolumens bei diesem Verfahren nicht möglich, aus der Druckänderung auf den Leckagevolumenstrom zu schliessen. Daher ist diese Einstellung eine notwendige Voraussetzung, um eine Zuordnung von Leckmenge und Druckänderung festzulegen. Die Kalibrierlecks sind meistens auf Basis von Normvolumen- oder Massestrom bei einem festgelegten Prüfdruck kalibriert. Durch einen täglichen Abgleich der Prüfvorrichtung mit dem Kalibrierleck kann der sich einstellende Druckabfall aufgezeichnet und eventuelle Probleme in der Vorrichtung können rechtzeitig erkannt werden. Darüber hinaus erhält man ein gutes Abbild der auftretenden tages- und jahreszeitlichen Schwankungen und kann Zusammenhänge der gemessenen Leckmenge mit den Umgebungsgrössen erkennen und ggf. korrigieren.

4. Optimale Prüfbedingungen:

In allen Dichtheits-Prüfungen sind gleich bleibende, gute Messbedingungen Voraussetzung für wiederholbare Messungen:

Die Prüfluft muss trocken, nicht kondensierend, ölfrei und fein gefiltert mit $5\mu\text{m}$ sein.

Die Prüfvorrichtung muss vom (Zusatz-)Volumen her absolut klein gehalten werden.

Die Prüflinge müssen mindestens 1-2 Stunden vor der Prüfung im Prüfraum akklimatisiert werden, damit keine grossen Temperaturunterschiede zwischen Prüfling und Prüfluft sowie Prüfvorrichtung auftreten können.

Kondensat und Schmutz zerstört Teile der Messtechnik.

Zu grosse Volumen bei kleinen Leckmengen vergrössern die Prüfzeit.

Temperatureffekte zwischen Prüfling und Prüfluft verschlechtern die Wiederholbarkeit.

Zu warme und zu kalte Prüflinge können durch Wärmeaustausch mit der Prüfluft und der Umgebung vorallem bei grosser Oberfläche des Prüflings zu Temperaturänderungen des Prüfmediums führen. Wegen der grösseren Masse und dem geringeren Temperatureausdehnungskoeffizienten im Verhältnis zur Prüfluft ändert normalerweise das Prüfvolumen sich während der Prüfung nicht. Bedingt durch den langsamen Wärmeübergang führen aber Wärmeauschweffekte zwischen Umgebung, Prüfling und Prüfmedium in einem adiabatisch ablaufenden Prozess zu einer temperaturbedingten Druckerhöhung /-erniedrigung. Dies überlagert sich dem durch die Leckage verursachten Druckerhöhung / Druckabfall. Instabile Zustände im Prüfvolumen, genauso wie Leckagen an der Adaption und elektrische Magnetventile als „Heizgeräte“ verschlechtern die Wiederholbarkeit und machen oft sogar eine Leckprüfung überhaupt unmöglich.