

In der Praxis der Leckprüfung mit Luft werden vor allem zwei physikalisch unterschiedliche Verfahren zur Messung der Leckage eingesetzt:

## 1. Druckabfall- oder -anstiegsverfahren:

Es basiert auf der Druckabfallprüfung eines geschlossenen Prüfvolumens  $V$  mit Luft. Die Luft hat einen absoluten Innendruck  $P_1$  und eine absolute Innentemperatur  $T_1$ .

Es gilt in erster Näherung das ideale Gasgesetz:

$$P_1 \cdot V = m \cdot R_i \cdot T_1 \quad (1)$$

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

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

wobei für den Massenverlust 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 bei einem bestimmten absoluten Innendruck  $P_1$  ist dem aktuellen Leckvolumenstrom  $Q_{\text{Lact}}$  bei einem konstanten Volumen proportional:

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

In der Praxis der Leckageprüfung wird zur Erzielung einer besseren Auflösung des Druckabfalls meistens das Differenzdruckmessverfahren angewendet. Dabei wird ein zweites hochdichtes Referenzvolumen  $V_{\text{ref}}$  gleichzeitig mit dem Prüfvolumen gefüllt. Nach der Befüllung werden die beiden Volumen getrennt und der durch den Druckabfall entstehende Differenzdruck zwischen beiden Volumina gemessen.

Durch diesen Trick kann man bei kleinen Leckagen schnellere Messungen erzielen.

Allerdings sollte in der Auswahl des Messgerätes darauf geachtet werden, dass die beiden Volumina durch zwei separate Ventile getrennt werden, die auf der Ausgangsseite entlüftet werden, damit bei Leckage der Ventile eine Selbstüberwachung derselben stattfindet.

Eine Umkehrvariante ist das Druckanstiegsverfahren mit Messung nach dem Leckaustritt.

## 2. Nachströmverfahren mit LFE:

Es basiert auf der Durchflussmessung in einem offenen oder quasi-offenen System durch Nachströmung des Leckverlustes aus einer Druckquelle oder einem sehr grossen Reservoir ( $V_{\text{RES}} \gg V$ ) über ein Laminar Flow Element. Der an den Kapillaren des LFE auftretende Wirkdruck wird zur Durchflussmessung nach dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz ausgewertet:

$$Q_{\text{vact}} = K \cdot dP / \eta \quad (5)$$

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung (Gesetz der Massenerhaltung) lässt sich aus dem aktuellen Durchfluss eines Gases immer auf den Massenstrom umrechnen:

$$Q_{\text{mas}} = \rho_{\text{no}} \cdot Q_{\text{vno}} = \rho_{\text{act}} \cdot Q_{\text{vact}} \quad (6)$$

Ein gutes Leckagemengenmessgerät sollte über eine Differenzdruck, Absolutdruck und Temperaturmessung verfügen, damit durch eine Viskositäts- und Dichterechnung beide Messgrössen richtig zu ermittelt werden.

Da die durch die Leckage auftretenden Differenzdrücke zwischen Druckquelle der Nachströmung und Prüfvolumen sehr klein sind, sollte bei offenen Systemen auf die Druckregelung geachtet werden, da bei Schwankungen derselben sich Rückströmungen bilden. Oft ist es in der Praxis daher besser, ein sehr grosses Druckreservoir im Vergleich zum Prüfvolumen zu verwenden und den Regler während der Prüfung abzuschalten.

**3. Umgebungseinflüsse und Korrekturen:**

In den meisten Dichtheits-Prüfungen wird überkritisch geprüft ( $P_{rel} > P_{atm.}$ ,  $L < 120$  d), besonders bei Sitzdichtungen und kurzen Spalten. Dabei wird der aktuelle Leck-Volumenstrom  $Q_{Lact}$  auf der Druckseite nur noch von der Schallgeschwindigkeit abhängig sein. Damit ist der aktuelle Leck-Volumenstrom in der Hauptsache nur noch von der Temperatur und sehr gering von dem absoluten Prüfdruck abhängig:

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

Wegen des Zusammenhangs des aktuellen Volumenstroms mit der Dichte bleibt aber der Masse- und Normvolumenstrom des Lecks sehr wohl von der Dichte abhängig.

Findet eine Auswertung nach dem Normvolumenstrom statt, so ist diese von Temperatur und Druck abhängig. Während die Auswertung nach dem aktuellen Volumenstrom nur von der Temperatur abhängt. Da Druckänderungen und Messungen sehr schnell (1-10 Millisekunden) sind, während Temperaturänderungen und Messungen sehr langsame Vorgänge sind (1-10 Sekunden), ist während einer kurzen Messung von 10 –30 Sekunden hauptsächlich der Druckeinfluss messbar, abgesehen von der Messunsicherheit im Druck von +/- 5mbar. Kleine Temperaturerhöhungen wie sie durch die Luftkompression in der Füllphase zustande kommen von max. +/-2°C sind meist so schnell nicht messbar.

Der Langzeit-Druckeinfluss kommt vor allem durch die in Dichtheitsprüfungen übliche Relativdruckeinstellung zustande. Der Prüfdruck wird als Überdruck zum atmosphärischen Druck eingestellt. Durch Hoch-/Tiefdruckwetterlagen können Drücke um max. +/- 50 mbar schwanken. Der Langzeit-Temperatureinfluss dagegen macht sich in der Hauptsache über tages- und jahreszeitlich bedingte langsamere Mittelwertsänderungen (max. +/- 20°C) bemerkbar. Im Vergleich dazu sind die kleinere Änderungen während der Prüfung sehr klein: Druck +/- 5mbar, Temperatur +/-2°C.

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

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

	Dichteänderung	Schallgeschwindigkeitsänderung
Temperatur +/-2°C	+/-0,6%	+/-0,3%
Temperatur +/-20°C	+/-6,0%	+/-3,0%
Druck +/- 5mbar	+/-0,4%	+/-0,0%
Druck +/- 50mbar	+/-4,0%	+/-0,1%
Gesamt	+/-1,0 bis 10%	+/-0,4 bis 3,1%

Diese Tatsache gewinnt vor allem auch bei der Kalibrierung und Überwachung der Prüfeinrichtung sowie bei Einsatz von Korrekturrechnungen an Bedeutung.

Bei den Dichtheitsprüfungen werden Kalibrierlecks zur Überwachung und Einstellung der Geräte verwendet. Es ist normalerweise aus Unkenntnis der exakten Volumens beim Druckabfallverfahren nicht möglich, aus dem Druckabfall den Leckagevolumenstrom zu bestimmen. Daher ist diese Einstellung eine notwendige Voraussetzung, um eine Zuordnung von Leckmenge und Druckabfall festzulegen. Diese Kalibrierlecks sind meistens auf Basis von Normvolumen- oder Massestrom kalibriert. Durch den Abgleich mit einem dichteabhängigen Normvolumenstrom wird ein bestimmter Druckabfallgrenzwert eingestellt. Über die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen kann dabei das Verhalten des realen schallgeschwindigkeitsabhängigen Lecks sich unter der obigen Abschätzung bis zu +/-7% anders verhalten, wie das Kalibrierteil.

Beim Nachströmverfahren als direktes Durchflussmessverfahren findet mit Kalibrierlecks lediglich eine Überwachung statt. Wird nach Normvolumenstromwerten ausgewertet, hat man dieselben Probleme zu erwarten. Mit Volumenstromwerten jedoch und einer leicht möglichen Schallgeschwindigkeits-Korrekturrechnung kann man deutliche Vorteile erzielen.

**4. Optimale Prüfbedingungen:**

In allen Dichtheits-Prüfungen sind gleichbleibende, gute Messbedingungen für beide Verfahren Voraussetzung für wiederholbare Messungen:

- Die Prüfluft muss trocken, nicht kondensierend, ölfrei und feingefiltert mit  $5\mu$  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 zu Temperaturänderungen führen. Da wegen der viel grösseren Masse des Prüflings im Verhältnis zur Prüfluft und des sehr langsamen Wärmeübergangs normalerweise das Prüfvolumen sich während der Prüfung nicht ändert, führen aber gerade deshalb Wärmeaustauscheffekte zu Druckerhöhung /-erniedrigung und zur Temperaturerhöhung /-erniedrigung wegen des adiabatischen Prozessablaufes. Deswegen können in beiden Verfahren zusätzliche Druckerhöhungen / Druckabfälle bzw. Ausgleichs- / Rückströmung auftreten.

Instabile Zustände im Prüfvolumen als Koppelmedium zwischen Leckstelle und Messgerät, genauso wie Leckagen an der Adaption und elektrische Magnetventile als „Heizgeräte“ verschlechtern die Wiederholbarkeit und machen oft sogar eine Leckprüfung überhaupt unmöglich.

**5. Gegenüberstellung:**

In den meisten Dichtheits-Prüfungen wird überkritisch geprüft ( $P_{rel} > P_{atm.}$ ), vorallem bei Sitzdichtungen und kurzen Spalten. Dabei wird der aktuelle Leck-Volumenstrom  $Q_{Lact}$  auf der Druckseite nur noch von der Schallgeschwindigkeit abhängig. Beide Verfahren liefern ein Ergebnis, das dem Leck-Volumenstrom  $Q_{Lact}$  proportional ist.

	<b>Druckabfallverfahren</b>	<b>Nachströmverfahren</b>
<b>Druck-/ Temperaturabhängigkeit:</b>	Auch bei $Q_{vact} = const.$ ist $dP/dt$ von P und T abhängig. Zudem ist bei Kalibrierlecks $Q_{vno}$ von P und T abhängig.	$Q_{vact}$ nur von T $Q_{vno}$ von P und T
<b>P/T-Korrekturen:</b>	Oft nicht integriert.	P, T-Korrektur möglich
<b>Prüfzeit t:</b>	$t \sim V$	Abhg. von Drosselwirkung LFE
<b>Rückführbarkeit / Kalibrierung:</b>	Volumen u. Prüflingsverhalten nicht bekannt, (permanenter) Abgleich über Eichlecks	Volumen des Prüflings unwichtig, nur Überwachung mit Eichlecks
<b>Wartung:</b>	Schaltventile sind Verschleissteile, beeinträchtigen u.U. das Prüfergebnis	Trennventil hat keinen Einfluss auf Prüfergebnis, Druckregler bei offenem System kann Messung negativ beeinflussen.