

Integration der Dichtheitsprüfung in den Produktionsprozess - Typprüfung versus Stückprüfung und praktische Ansätze zur Ableitung von Prüfparametern

Joachim DR. LAPSIEN¹

¹ CETA Testsysteme GmbH, Hilden

Kontakt E-Mail: joachim.lapsien@cetatest.com

Kurzfassung. Eine Vielzahl von Produkten wird unter den unterschiedlichsten Bedingungen eingesetzt. Entsprechende vielfältig sind die Anforderungen. Hierzu gehört auch die Dichtheit gegen Verschmutzung und Feuchtigkeit, deren Anforderungen in der Definition der IP-Schutzarten beschrieben sind.

Bei den IP-Schutzartenprüfungen handelt es sich um Typprüfungen. Baumuster werden strikt nach den Vorgaben der angestrebten IP-Schutzart im Labor auf die Dichtheit geprüft.

Die Stückprüfung hingegen dient dem Nachweis einer gleichbleibenden Fertigungsqualität. bei der Fertigung großer Stückzahlen. Hierbei wird jedes Produkt zu 100 % produktionsbegleitend auf Dichtheit gegen Feuchtigkeit geprüft wird. . Dieses ist um so wichtiger, je kritischer der Ausfall des Produktes ist.

Somit kommt der Integration der Dichtheitsprüfung in den Produktionsprozess eine hohe Bedeutung zu. Hierbei handelt es sich um eine 100 % Stückprüfung. Hierbei es insbesondere, die Prüfparameter Prüfdruck und Leckrate festzulegen.

1. Übersicht über industrielle Dichtheitsprüfverfahren

Im industriellen Bereich werden – je nach Leckrate – als Prüfmedien Wasser, Druckluft, Wasserstoff (Formiergas 5 % Wasserstoff, 95 % Stickstoff) und Helium eingesetzt. In Abhängigkeit von der zulässigen Leckrate ist vorab zu entscheiden, welches Prüfmedium eingesetzt wird (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über industrielle Dichtheitsprüfmethoden und die damit nachweisbaren Luftleckraten [1]

Prüfmedium	Luftleckrate (*)	Methode
Wasser	$> 10^{-2}$ mbar*s/l	Nachweis von Luftblasen
Druckluft	$> 10^{-3}$ mbar*s/l	Messung des Druckverlustes bzw. Druckanstiegs (Relativdrucksensor, Differenzdrucksensor)
Wasserstoff (Formiergas)	$> 10^{-6}$ mbar*s/l	Messung der H ₂ -Konzentration
Helium	$> 10^{-9}$ mbar*s/l	Messung der He-Konzentration

(*) Anmerkung: 1 mbar*s/l = 60 ml/min

Für die Dichtheitsprüfung im Produktionsprozess sind als Vorgaben der Prüfdruck und die zulässige Leckrate notwendig.



2. Methoden und Ansätze zur Festlegung der Prüfdruckes

Für die Wahl des Prüfdruckes gibt es verschiedene Ansätze, wenn es keine produktspezifischen Vorgaben für die Dichtheitsprüfung existieren.

Der Prüfdruck kann aus dem Betriebsdruck, Außendruckänderungen im Betrieb (barometrische Druckänderungen), anhand des spezifizierten Temperaturbereiches des Produktes (temperaturbedingte Druckänderungen) oder bisweilen auch anhand der Prüfbedingungen bei einer IP-Schutzartenprüfung (z. B. aus der Tauchtiefe) abgeleitet werden. Zudem ist die Richtung der Druckbelastung festzulegen, d.h. ob das Produkt mit positivem oder negativem Überdruck geprüft wird.

2.1 Betriebsdruck (plus Sicherheitszuschlag)

Wenn es eine Information dazu gibt, welcher maximale Druck in dem Produkt auftreten kann (z. B. Druckbehälter, Pumpen, Zylinder), dann kann dieser für weitere Entscheidungen herangezogen werden. Da es sich um Betriebsdrücke handelt, muss das Produkt auch für höhere Drücke ausgelegt sein. Hierzu gibt es in der Regel Vorgaben zum Sicherheitszuschlag. Der sich so ergebene Druck sollte auch der Prüfdruck bei der Dichtheitsprüfung sein.

2.2 Barometrische Druckänderungen

Einige Produkte sind im Betrieb aufgrund von unterschiedlichen Höhen (z. B. bei Höhenfahrten, Luftfahrt) unterschiedlichen Luftdrücken ausgesetzt. Quantitativ wird der höhenabhängige Luftdruck durch die sogenannte „barometrische Höhenformel“ (Gleichung 1) beschrieben. Für Höhen bis ca. 100 km gilt:

$$p(h) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h(m)}{7.990 \text{ m}}\right) \quad \text{GL. 1}$$

wobei

$p_0 = 101.325 \text{ Pa}$ (Luftdruck in Meereshöhe bei 0°C)

$h =$ Höhe in m über Normal-Null

In Tabelle 2 sind die Luftdrücke in unterschiedlichen Höhen und die Differenz zum Normaldruckniveau aufgeführt.

Tabelle 2: Anwendung der barometrischen Höhenformel und Berechnung des Druckunterschiedes zum Normaldruckniveau bei verschiedenen Höhen [1]

Höhe h	Druck p(h)	Druckdifferenz p(h) – p ₀
0 m	101.325 Pa	0 Pa = 0 mbar
500 m	95.178 Pa	-6.146 Pa = -61,5 mbar
1.000 m	89.405 Pa	-11.920 Pa = -119,2 mbar
5.000 m	54.193 Pa	-47.132 Pa = -471,3 mbar
10.000 m	28.574 Pa	-72.750 Pa = -727,5 mbar

In der Nähe der Erdoberfläche gilt näherungsweise: Pro 8 m Höhenunterschied ändert sich der Luftdruck um je 100 Pa, entsprechend 1 mbar. Bei sehr genauen Luftdruckberechnungen muss beachtet werden, dass die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt.

Auch bei Dichtheitsprüfungen mit negativem Überdruck ist der höhenabhängige Luftdruck bei der Parametrierung der Prüfaufgabe zu beachten. In Meereshöhe ist es in der Regel problemlos möglich den gewünschten negativen Überdruck im Prüfteil zu erreichen. Anders stellt es sich dar, wenn sich die Produktionslinie und der Prüfstand in höheren Lagen (z. B. in Mexiko) befinden. Aufgrund der Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe

kann dann der Fall eintreten, dass die Evakuierung des Prüfteils auf den Zieldruck nicht mehr möglich ist.

2.3 Temperaturbedingte Druckänderungen

Wenn das Produkt für einen Temperaturbereich spezifiziert ist, so kann daraus ein entsprechender Druckbereich abgeleitet werden, dem das Produkt in der Praxis ausgesetzt ist.

Wenn das Prüfteil zudem gekapselt ist, so ist dieses auch die im Prüfteilinneren auftretende Druckbelastung. Die Berechnung dieser temperaturbedingten Druckänderungen ist mit Hilfe der idealen Gasgleichung für den Fall eines konstanten Volumens, der isochoren Zustandsgleichung (Gleichung 2), möglich.

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Gl. 2}$$

Umgeformt ergibt sich Gleichung 3, wobei $T_2 = T_1 + \Delta T$:

$$\Delta p = p_2 - p_1 \rightarrow \Delta p = p_1 \cdot \frac{T_1 + \Delta T}{T_1} - p_1 \leftrightarrow \Delta p = p_1 \cdot \left(\frac{T_1 + \Delta T}{T_1} - 1 \right) \leftrightarrow \Delta p = p_1 \cdot \frac{\Delta T}{T_1} \quad \text{Gl. 3}$$

In diese Formel sind die Absolutdrücke und die absoluten Temperaturen einzusetzen.

Ist das Produkt für einen Temperaturbereich von -40°C bis $+120^\circ\text{C}$ spezifiziert, so ergeben sich ausgehend von dem Ausgangszustand (Atmosphärenluftdruck 1013 mbar und $+20^\circ\text{C}$) die folgenden temperaturbedingten Druckänderungen:

Abkühlung: $+20^\circ\text{C}$ (= 293,15 K) auf -40°C , d.h. $\Delta T = -60$ K $\rightarrow \Delta p = -207,33$ mbar

Erwärmung: $+20^\circ\text{C}$ (= 293,15 K) auf $+120^\circ\text{C}$, d.h. $\Delta T = +100$ K $\rightarrow \Delta p = +345,56$ mbar

Falls sich das Produkt bei Atmosphärendruck auf der Minimal- bzw. Maximaltemperatur befindet und schockartig erwärmt oder abgekühlt wird, so ergeben sich die folgenden temperaturbedingten Druckänderungen.

Erwärmung: -40°C (= 233,13 K) auf $+120^\circ\text{C}$, d.h. $\Delta T = +160$ K $\rightarrow \Delta p = +695,35$ mbar

Abkühlung: $+120^\circ\text{C}$ (= 393,15 K) auf -40°C , d.h. $\Delta T = -160$ K $\rightarrow \Delta p = -412,26$ mbar

Je nach dem, welches Szenario in der Praxis am häufigsten auftritt bzw. das größte Risiko darstellt, sind die Prüfdrücke entsprechend zu wählen. Inwiefern hier noch ein Sicherheitsaufschlag zu berücksichtigen ist, ist seitens des Herstellers zu entscheiden. Zudem ist zu beachten, für welche Drücke die verbauten Komponenten ausgelegt sind.

Wenn in dem Produkt ein Druckausgleichselement integriert ist, welches wasserdicht aber luftdurchlässig ist, so gleicht sich der im Inneren auftretende Druck aus und der berechnete Maximaldruck tritt in der Praxis nicht auf. Der zeitliche Druckausgleich hängt vom spezifischen Luftleitwert des Druckausgleichselements, von der durchflussaktiven Öffnung und von der Druckdifferenz ab.

2.4 Ableitung aus der Tauchtiefe bei einer IP-Schutzartenprüfung

Einige Produkte werden gemäß DIN EN / IEC 60529 nach IP-Schutzarten für Gehäuse (International Protection) spezifiziert, z. B. IP 67.

Die erste Ziffer beschreibt den Schutz gegen Fremdkörper und gegen Berührung und die zweite Ziffer den Schutz gegen Wasser. IP-Schutzarten legen fest, in welchem Umfang ein Produkt Umwelteinflüssen ausgesetzt werden kann ohne beschädigt zu werden oder ein Sicherheitsrisiko darzustellen. Bei der industriellen Dichtheitsprüfung geht es sehr häufig darum, dass das Produkt dicht gegen Feuchtigkeit und Flüssigkeit ist.

Bei den IP-Schutzartenprüfungen handelt es sich um Typprüfungen. Hierbei werden Prototypen und Baumuster strikt nach den Vorgaben der angestrebten IP-Schutzart im

Labor auf Dichtheit geprüft. Das Ergebnis der Prüfung wird in einem Prüfzertifikat zusammengefasst.

Die Durchführung einer Typprüfung ist mit hohem experimentellem Aufwand verbunden. Diese Prüfungen werden von besonders ausgestatteten Laboren und Instituten durchgeführt. Hierbei werden spezielle Prüfvorrichtungen eingesetzt, und das Prüfteil wird je nach IP-Schutzart Wasser mit unterschiedlicher Intensität und Einwirkzeit ausgesetzt.

Es ist offensichtlich, dass sich derartige Prüfvorrichtungen nicht als produktionsbegleitende Prüfung integrieren lassen. So kann weder mit Feuchtigkeit oder mit Flüssigkeiten gearbeitet werden, und die Prüfdauer (Einwirkzeiten der Feuchtigkeit oder Flüssigkeit) entspricht in keinsten Weise den in der Industrie üblichen Produktionstaktzeiten.

Für die produktionsbegleitende Dichtheitsprüfung liefert die IP-Schutzartprüfung keine direkten Vorgaben. Anhand der Prüfbedingungen einiger IP-Schutzartprüfung (Tabelle 3) kann zumindest der Prüfdruck abgeleitet werden. So handelt es sich bei der IP 67 und IP 68 um Tauchprüfungen, bei der sich das Produkt in einer definierten Tiefe in einem Tauchbecken befindet.

Tabelle 3: Auszug aus der Prüfspezifikation der IP-Schutzarten [2], [3]

IP-Schutzart	Testvorrichtung	Testvorschrift	Testdauer
IP X7 Zeitweilige Flutung	Tauchbecken Tiefe 1 m	150 mm Wassersäule über dem höchsten Punkt des Gehäuses. Niedrigster Punkt des Gehäuses 1 m unter Wasser	30 min
IP X8 Dauerflutung	Tauchbecken Tiefe > 1 m	Wassersäule > 150 mm über dem Prüfling Tauchtiefe wählbar	t = ∞

Der in der Tauchtiefe auf das Produkt einwirkende hydrostatische Druck lässt sich gemäß folgender Formel (Gleichung 4) berechnen:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad \text{Gl. 4}$$

Für $\Delta h = 1$ m Wassertiefe (Wasserdichte $\rho = 998,2$ kg/m³ bei 20°C, Erdbeschleunigung $g = 9.81$ m/s²) ergibt sich $\Delta p = 9792,3$ Pa = 97,9 mbar. In der Praxis wird bei 1 m Wassertiefe der Einfachheit halber mit einem Druck von 100 mbar gerechnet.

2,5 Richtung der Druckbelastung

Neben dem Prüfdruck ist auch die Richtung der Druckbelastung festzulegen, d.h. ob mit positivem oder negativem Überdruck geprüft wird. Hier gibt es einige Aspekte zu beachten:

Bisweilen ist es schwierig die Druckbelastung gemäß IP-Schutzart konform zu erzeugen. Dies würde bedeuten, dass man das Prüfteil komplett mit dem Prüfdruck von außen beaufschlagen muss. Dieses ist möglich, erfordert aber eine Haubenprüfung. Da die Haube für die Aufnahme des Prüfteils ausgelegt werden muss, kann es bei vielen Produktvarianten sehr schnell komplex werden.

Alternativ zur Druckbeaufschlagung von außen, kann negativer Überdruck im Inneren des Produktes angelegt werden. Dann entspricht die Richtung der Druckbelastung der der IP-Schutzartprüfung.

Korrelationsuntersuchungen zur Beurteilung, ob die Druckrichtung kritisch ist oder nicht, sind deutlich aufwändiger. Denn es wird zumindest eine Haube benötigt, um die Druckbeaufschlagung von außen auf das Prüfteil nachzustellen.

Wenn die Gefahr besteht, dass der negative Überdruck im Inneren des Prüfteils dazu führen könnte, dass Mikroleckagen zugeedrückt werden, so sollte mit positivem Überdruck geprüft werden. Da dieses dann sogar die "schärfere" Prüfung ist, bei der

Leckagen sogar deutlicher erkannt werden, ist dies vor dem Hintergrund der Reduzierung von Risiken durchaus sinnvoll.

Der Einsatz von negativem Überdruck kann unter Umständen sogar zur Montageunterstützung eingesetzt werden. Wenn im Inneren eines Produktes, das durch Klebung gefügt wird, ein negativer Unterdruck angelegt wird, so werden die zu verklebenden Komponenten besser ins Klebbett gedrückt und unter Umständen – und je nach Klebertyp – kann eine bessere Vernetzung erreicht werden.

Grundsätzlich machen sich externe temperaturbedingte Einflüsse bei negativem Überdruck aufgrund der reduzierten Anzahl von Molekülen nicht so stark bemerkbar. Allerdings stellen sich diese Vorteile erst bei nennenswertem negativem Überdruck ein.

3. Methoden und Ansätze zur Festlegung der Leckrate

Für die Wahl der Leckrate gibt es diverse Ansätze, wenn keine produktspezifische zulässige Leckrate vorgeschrieben ist.

So kann die Leckrate durch Messung der aus den Lecks austretenden Gasmenge, durch Umrechnung einer Flüssigkeitsleckrate in eine Gasleckrate, durch eine Viskositätsbetrachtung, durch Vererbung von Leckraten ähnlicher Produkte, durch Zugrundelegung industriell üblicher Orientierungswerte, anhand von Korrelationsversuchen, durch die Vermessung realer Produktionsfehler, durch die Analyse von Feldrückläufern festgelegt werden oder alternativ welche Leckrate bei Festlegung einer Prüftechnik noch prozesssicher erkennbar ist. Und in diesem Zusammenhang ist es unter Umständen notwendig, den Volumenstrom der Leckage auf andere Prüfdrücke umzurechnen bzw. die mit einem Prüfmedium ermittelte Leckrate auf ein anderes Prüfmedium umzurechnen.

3.1 Leckratenermittlung über die aus der Leckage austretende Luft

Eine Luftleckrate kann experimentell wie folgt ermittelt werden: Ein grenzwertiges Prüfteil wird in einem Wasserbad mit dem Prüfdruck beaufschlagt. Die aus dem Leck austretende Luft wird in einem umgestülpten, mit Wasser gefüllten, Reagenzglas (bzw. in einem geeigneten Gefäß) über einen Zeitraum aufgefangen (Abb. 1). Die aufsteigenden Luftblasen verdrängen das Wasser im Reagenzglas. Nach Ablauf der Messzeit wird das Luftvolumen im Reagenzglas abgelesen und die daraus resultierende Luftleckrate berechnet.

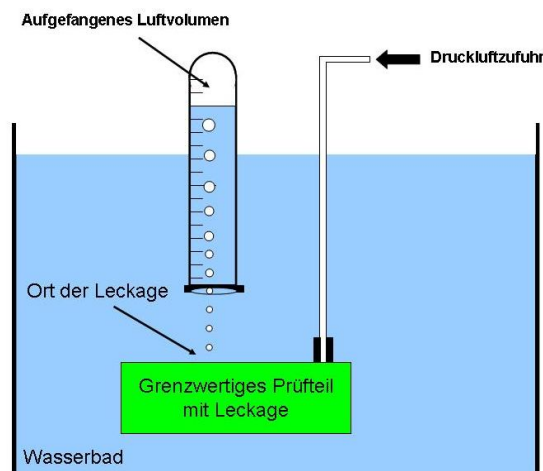


Abb.1: Ermittlung der Leckrate über das aus dem Leck austretende Luftvolumen [1]

Bei sehr geringen Prüfdrücken ist der hydrostatische Gegendruck des Wassers in der Tiefe der Leckage zu berücksichtigen und der Prüfdruck entsprechend zu korrigieren.

3.2 Ableitung einer Gasleckrate aus einer Flüssigkeitsleckrate

Falls eine Flüssigkeitsleckrate vorgegeben ist, so kann diese zugrunde gelegt werden und zur Abschätzung der Luftleckrate dienen.

Das Strömungsverhalten von Gasen und Flüssigkeiten wird durch die dynamische Viskosität η bestimmt (Einheit $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$).

Zur Abschätzung einer Gasleckrate $\Delta V/\Delta t_{\text{Gas}}$ (in $\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$) ausgehend von einer Flüssigkeitsleckrate $Q_{\text{Flüssigkeit}}$ (in ml/min) kann die folgende Formel (Gleichung 5) verwendet werden:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t_{\text{Gas}}} = Q_{\text{Flüssigkeit}} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2} \cdot \frac{\eta_{\text{Flüssigkeit}}}{\eta_{\text{Gas}}} \quad \text{Gl. 5}$$

Beispiel: Ein Ventil wird mit Wasser und 2 bar positivem Überdruck ($p_{1,\text{absolut}} = 3013 \text{ mbar}$) beaufschlagt. Alle 10 Minuten tritt ein Wassertropfen ($\varnothing: 5 \text{ mm}$) gegen Atmosphäre ($p_{2,\text{absolut}} = 1013 \text{ mbar}$) aus. Dies entspricht einer Wasserleckrate von $q_{\text{Wasser}} = 1,09 \cdot 10^{-7} \text{ l/s}$ oder 3,4 l Wasser pro Jahr. Mit den dynamischen Viskositäten von Wasser und Luft (bei 20°C : $\eta_{\text{Wasser}} = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, $\eta_{\text{Luft}} = 1,815 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) ergibt sich eine Luftleckrate von $\Delta V/\Delta t = 0,0121 \text{ mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$ (entsprechend $0,727 \text{ cm}^3/\text{min}$ Luft unter Normaldruck).

Bei diesen Betrachtungen ist zu beachten, dass diese für ideale Verhältnisse gelten (laminare Strömung, unveränderliches kapillares Leck). In der Praxis liegen meist gänzlich andere Verhältnisse vor. Handelt es sich bei dem Leck um Mikroporositäten, Haarrisse oder weitet sich das Leck bei Druckbeaufschlagung auf, so lassen sich diese Effekte nicht mehr in geschlossener Form quantitativ beschreiben.

Zu beachten ist, dass die Viskosität von Gasen mit steigender Temperatur zunimmt. Dieses hängt mit der zunehmenden thermischen Bewegung der Gasmoleküle zusammen.

Bei Flüssigkeiten hingegen nimmt die Viskosität mit steigender Temperatur ab. Somit ist die Temperatur ein Einflussfaktor und sollte beachtet werden.

3.3 Viskositätsbetrachtung

Wenn gefordert ist, dass das Produkt dicht gegen ein Medium sein muss, so ist es möglich durch einen Vergleich der dynamischen Viskositäten des Mediums mit dem als Referenzmedium gewählten Wassers eine Abschätzung für eine Leckrate vorzunehmen.

Hierbei sollten auch die verschiedenen Betriebstemperaturen des Produktes beachtet werden. Dabei werden die dynamischen Viskositäten des Betriebsmediums in Abhängigkeit von der Temperatur mit den entsprechenden dynamischen Viskositäten von Wasser gegenübergestellt. D.h. rechnerisch wird ein Bezug zur Wasserdichtheit hergestellt, wobei z. B. für 20°C eine Luftleckrate von $0,6 \text{ ml}/\text{min}$ als „Ankerwert“ verwendet wird.

Werden Leckraten auf der Basis eines Vergleiches von dynamischen Viskositäten festgelegt, so sollte - je nach Medium - eventuell noch ein Sicherheitsabschlag an der so berechneten Leckrate vorgenommen werden.

3.4 Vererbung von Leckraten

Wenn ähnliche oder leicht modifizierte Produkte hergestellt werden, die sich – aus der Sicht der Dichtheitsprüfung – nur geringfügig voneinander unterscheiden und wenn bei der Produktion ähnlich gut überwachte Montageprozesse zum Einsatz kommen, so kann es durchaus legitim sein, die Leckrate des einen Produkttyps auch bei der anderen Produktvariante zugrunde zu legen.

Zur Beurteilung, ob die Produkte aus prüftechnischer Sicht ähnlich sind, sollten relevante Kriterien herangezogen werden (z. B. Montageprozess, Ausschussquote, Quote

der Produktrückläufer aufgrund von Leckagen, befüllbares Volumen, Art der Fügetechnik, Wandstärke, Art der Adaption, intern verbaute Komponenten).

Und es muss geprüft werden, inwiefern trotz gleicher Leckrate Anpassungen am Prüfprozess notwendig sind, wie z. B. an der Füllzeit, an der Stabilisierzeit und damit an der Gesamtprüfzeit. Findet hierzu keine qualifizierte Überprüfung statt, so besteht die Gefahr, dass entweder zu scharf oder zu unscharf geprüft wird.

In der Literatur findet man Informationen zur Dichtheit in Abhängigkeit von der Leckrate und Lochgröße. In Tabelle 4 sind einige Orientierungswerte aufgeführt. Die Leckrate hat üblicherweise die Einheit „mbar*s/l“ bzw. „ml/min“, wobei $1 \text{ mbar*s/l} = 60 \text{ ml/min}$.

Tabelle 4: Orientierungswerte zu Dichtheit, Lochgröße und Leckrate [4], [5]

Dichtheit	Lochgröße	Leckrate	Gasleckrate bei $\Delta p = 1 \text{ bar}$
Wasserdicht	10 μm	10^{-2} mbar*s/l	ca. 1 ml / 100 s
Dampfdicht	3 μm	10^{-3} mbar*s/l	ca. 1 ml / 15 Minuten
Bakteriendicht	1 μm	10^{-4} mbar*s/l	ca. 1 ml / 3 Stunden
Öldicht	300 nm	10^{-5} mbar*s/l	ca. 1 ml / 1 Tag
Virendicht	100 nm	10^{-6} mbar*s/l	ca. 1 ml / 10 Tage
Gasdicht	30 nm	10^{-7} mbar*s/l	ca. 1 ml / 100 Tage
„absolut dicht“	1 nm	$10^{-10} \text{ mbar*s/l}$	ca. 1 ml / 300 Jahre

Diese Orientierungswerte beruhen auf einer Modellrechnung: In einem auf einen negativen Überdruck von -1 bar evakuierten Behälter befindet sich ein Loch. Wenn dieses plötzlich geöffnet wird, so dringt die über dem Lochquerschnitt anstehende Luftsäule (Atmosphärendruck von 1013 hPa) mit Schallgeschwindigkeit in den Behälter ein. Dies erzeugt einen von der Lochgröße abhängigen Volumenstrom, die Leckrate. Die in Tabelle 4 angegebenen Leckraten können als ersten Ansatz für Prüfungen im Druckbereich bis 1 bar zugrunde gelegt werden.

In der Praxis stellt man fest, dass Produkte, die auf Wasserdichtheit geprüft werden, je nach Prüfteiltyp, mit zulässigen Leckraten zwischen 0,6 ml/min und 8 ml/min geprüft werden. Ähnlich groß ist die Spanne der bei Öldichtheit verwendeten zulässigen Leckraten, die stark von den Eigenschaften des Öls abhängen. Anhand dieser großen Spannweite ist zu erkennen, dass die Zugrundelegung von Orientierungswerten unter Umständen den Prüfprozess unnötig verschärft.

Weiterhin ist zu beachten, dass nur selten ein einzelnes Loch als Leck vorhanden ist. Die Gesamtleckage ergibt sich eher aus einer Vielzahl von Mikroporositäten.

3.5 Ableitung aus Korrelationsversuchen im Labor

Industriell übliche Orientierungswerte können für die zulässige Leckrate eines Produktes zugrunde gelegt werden.

Sicherheitshalber sollte die Festlegung der Leckrate durch Laboruntersuchungen abgesichert werden, da sonst die Gefahr besteht, dass zu scharf geprüft wird, verbunden mit einer zu hohen Ausschussquote. Hierbei werden Prüfteile mit unterschiedlichen Produktionsgütern mit einer geeigneten Prüfmethode auf Dichtheit geprüft. Dabei ist zu beachten, dass alle in der Produktionspraxis auftretenden Fehlerbilder geprüft werden.

Anschließend erfolgt eine Laborprüfung unter den Bedingungen der angestrebten IP-Schutzart. Diese Prüfung ist in der Regel zerstörend, da das Eindringen von Feuchtigkeit nachgewiesen werden muss. Unter bestimmten Bedingungen kann aber auch eine Funktionsprüfung stattfinden, um die Funktion und die leckagebedingte Beeinträchtigung der Funktion des Produktes nachzuweisen.

Anhand einer Korrelation der Dichtheitsprüfung mit dieser unabhängigen Untersuchung kann dann entschieden werden, welche Leckrate noch tolerabel ist. Dieses ist ein für die Auditierung des Prozesses sehr sinnvolles Vorgehen.

3.6 Vermessung realer Produktionsfehler

Bei Produkten, für die keine IP-Schutzart benannt wird, verzichtet man auf die unabhängige Prüfung. Dann werden Prüfteile mit typischen in der Praxis auftretenden Produktionsfehlern präpariert und mit einer geeigneten Methode zur Dichtheitsprüfung vermessen. Das Ziel ist die eindeutige Erkennung der kritischen Fehler und die Ableitung einer korrespondierenden Leckrate.

3.7 Analyse von Feldrückläufern

Anhand von undichten Rückläufern aus dem Feld kann die während der Inverkehrbringung verwendete zulässige Leckrate bestätigt oder auch angepasst werden. Hierzu können Produkte beispielsweise unter Wasser abgedrückt werden und die austretende Luft aufgefangen werden. Dabei kann auch direkt die Position des Lecks lokalisiert werden. Alternativ kann natürlich auch eine Dichtheitsprüfung zur Leckageermittlung durchgeführt werden.

Allerdings ist hierbei zu beachten, dass Feldrückläufer aufgrund des Praxisbetriebs eventuell durch Feuchtigkeit oder Schmutz kontaminiert sind. Metallische Teile können korrodiert sein. Dieses kann Einfluss auf die gemessene Luftleckrate haben. So kann beispielsweise der Fall eintreten, dass Leckagen sich durch Korrosion oder Verschmutzung temporär verschließen, so dass bei der Nachuntersuchung unter Umständen sogar zu geringe Leckraten festgestellt werden. Bei der Untersuchung von Feldrückläufern müssen die gemessenen Leckagen also besonders kritisch bewertet werden.

3.8 Erkennbarkeit und Nachstellung von Leckagen

Bisweilen stellt sich die Fragen, welche Leckrate mit der zur Verfügung stehenden oder der favorisierten Prüftechnik oder mit vertretbarem Aufwand prozesssicher erkennbar ist. Dieses kann im Rahmen von Machbarkeitsuntersuchungen erarbeitet werden.

Wenn es also keine Spezifikation gibt, werden unter Einsatz von Testlecks Versuche zur Erkennbarkeit von Leckraten durchgeführt. Hierbei werden verschiedene Testlecks (Abb. 2), die bei dem Prüfdruck unterschiedliche Durchflüsse haben, zusätzlich zu einem Masterdichtteil in den Messkreis geschaltet, und das Messsignal wird bewertet. Damit kann die Entscheidung zur Festlegung einer zulässigen Leckrate unterstützt werden.



Abb. 2: Testleck, das einen definierten Durchfluss bei dem angelegten Druck hat. Testlecks dienen der Nachstellung von grenzwertigen Prüfteilen [1]

3.9 Umrechnung der Volumenstroms auf andere Prüfdrücke

Wenn der Durchfluss eines Kalibriernormals unter definierten Bedingungen ermittelt wurde, so lässt er sich auf andere Betriebsdrücke (bei Einsatz des gleichen Mediums) mittels Gleichung 6 umrechnen:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{p_{2,\text{innen}}^2 - p_{2,\text{außen}}^2}{p_{1,\text{innen}}^2 - p_{1,\text{außen}}^2} \quad \text{Gl. 6}$$

Die Drücke sind hierbei als Absolutdrücke einzusetzen.

Beispiel: Ein Testleck hat einen Durchfluss von $Q_1 = 1,00$ ml/min bei einem Druck von 1 bar ($p_{1,\text{innen}} = 2$ bar absolut) ausströmend gegen Atmosphäre ($p_{1,\text{außen}} = 1$ bar absolut). Soll das Testleck bei einem Druck von 3 bar ($p_{2,\text{innen}} = 4$ bar absolut) eingesetzt werden, so hat es einen Durchfluss von $Q_2 = 5$ ml/min, wenn die Luft gegen Atmosphäre ausströmt ($p_{2,\text{außen}} = 1$ bar absolut).

Da diese Formel ideale Verhältnisse voraussetzt (laminare Strömung durch einen zylinderförmigen Flusskanal), ist die Anwendbarkeit nicht universell möglich, sondern nur in einer gewissen „Druckumgebung“. So liefert eine Umrechnung z. B. von 1 bar (relativ) auf 20 bar (relativ) keine verbindlichen Ergebnisse. Sicherheitshalber wäre das Kalibriernormal bei dem geänderten Druck zu kalibrieren.

Anmerkung: Wendet man diese Formel auf die zulässige Leckrate von Prüfteilen an, um diese bei anderen Betriebsdrücken zu definieren, so wird die so ermittelte Leckrate der Realität in der Regel nicht gerecht, da z. B. die stärkere Belastung der Nähte und Dichtungen nicht berücksichtigt wird. Diese Formel gilt daher streng genommen nur für die Umrechnung der Durchflüsse durch ein mechanisch stabiles Kalibriernormal (Testleck oder Testdüse). Für die Umrechnung von Leckraten auf andere Betriebsdrücke kann Gleichung 6 als Abschätzung verwendet werden.

3.10 Umrechnung von Leckraten auf andere Prüfgase

Wenn bei der Dichtheitsprüfung des Produktes ein anderes gasförmiges Prüfmedium eingesetzt wird, so müssen die Leckraten (Q_L) von einem Gas auf ein anderes umgerechnet werden. Das Verhältnis der Leckraten ist umgekehrt proportional zum Verhältnis der dynamischen Viskositäten (Gleichung 7):

$$Q_{\text{Gas},2} = Q_{\text{Gas},1} \cdot \frac{\eta_{\text{Gas},1}}{\eta_{\text{Gas},2}} \quad \text{Gl. 7}$$

Ergänzend sei angemerkt, dass die Viskosität von Gasen mit steigender Temperatur zunimmt. In Tabelle 5 sind die dynamischen Viskositäten verschiedener Gase bei 0°C und 1013,25 hPa angegeben.

Tabelle 5: Dynamische Viskosität von Gasen bei 0°C und 1013,25 hPa [6]

Gas	Dynamische Viskosität η
Argon (Ar)	$21,2 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
Helium (He)	$18,7 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
Kohlendioxid (CO ₂)	$13,7 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
Luft	$17,2 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
Schwefeldioxid (SO ₂)	$11,6 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
Stickstoff (N ₂)	$16,5 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
Wasserstoff (H ₂)	$8,4 \cdot 10^{-6}$ Pa*s

Wird bei einer Prüfaufgabe die zulässige Leckrate mit 1 ml/min für das Prüfmedium Argon vorgegeben, so entspricht dies einer Leckrate von 1,23 ml/min beim Einsatz des Prüfmediums Luft und 1,28 ml/min bei Verwendung des Prüfmediums Stickstoff.

4. Tücken der Dichtheitsdefinition über den zeitlichen Druckverlust Leckrate

Bisweilen existieren Prüfvorschriften, in denen die geforderte Dichtheitsanforderung bei der Dichtheitsprüfung mit Druckluft über einen maximal zulässigen zeitlichen Druckverlust definiert wird, der einheitlich für verschiedene Prüfteilvolumina gilt.

Die sogenannte Leckratenformel (Gleichung 8) stellt bei einem stabilen Messzustand einen Zusammenhang zwischen der Leckrate Q_L , dem effektivem Prüfvolumen V_{eff} und dem zeitlichem Druckverlust dp/dt her. Die aus dem Leck austretende Luft strömt in die Umgebung auf Atmosphärendruck (1 bar = 100.000 Pa) aus.

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{s}} \right] = \frac{Q_L [\text{ml/min}]}{V_{\text{Prüfvolumen}} [\text{ml}]} \cdot \frac{100.000 \text{ Pa}}{60 \text{ s/min}} \quad \text{Gl. 8}$$

Der zeitliche Druckverlust ist insbesondere umgekehrt proportional zum Volumen. Wird aber der zeitliche Druckverlust unabhängig vom Volumen vorgeschrieben, bedeutet dies zwangsläufig, dass die zulässigen Leckraten bei den verschiedenen Prüfteilvolumina unterschiedlich sind.

Ein Druckverlust von 100 Pa in 10 s, d. h. von 10 Pa/s, entspricht bei einem Volumen von 100 ml einer Leckrate von 0,6 ml/min, aber bei einem Volumen von 750 ml einer Leckrate von 4,5 ml/min (Abb. 3). Das kleinvolumige Produkt ist wasserdicht, aber das Produkt mit dem größeren Volumen nicht unbedingt.

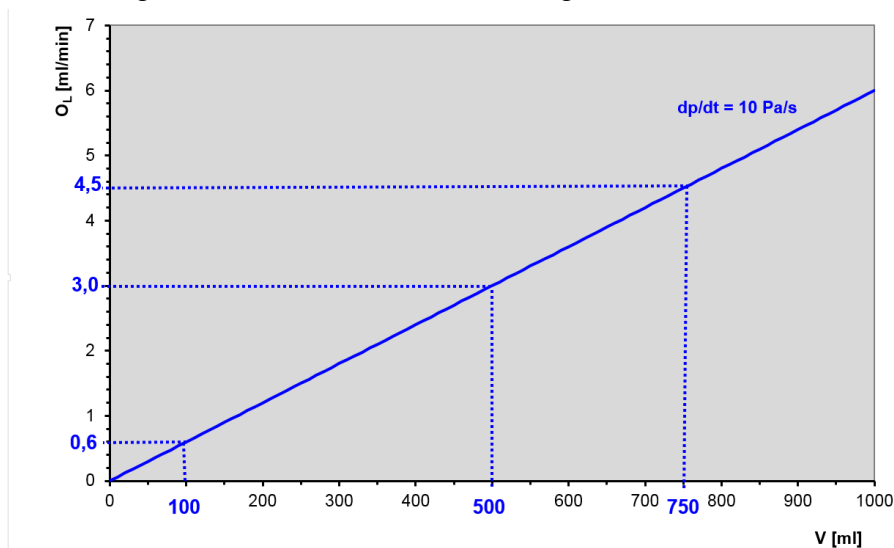


Abb. 3: Leckrate in Abhängigkeit vom Prüfvolumen bei einem zeitlichen Druckverlust von 10 Pa/s [1]

Da der leakagebedingte Druckverlust von dem Prüfvolumen abhängt, wird empfohlen, die Dichtheitsanforderung des Produktes immer über eine zulässige Leckrate zu definieren.

5. Anmerkungen

Bei der Dichtheitsprüfung von Komponenten, die später in ein Gesamtsystem verbaut werden, ist zu beachten, dass sich das Leckratenbudget additiv zusammensetzt. Wenn die zulässige Gesamtleckrate des Systems bekannt ist, so muss für die zulässige Leckrate der Komponente eine entsprechend geringere Leckrate festgelegt werden. Und die

Dichtheitsprüfung der Komponente sollte zumindest bei dem gleichen Prüfdruck stattfinden, mit dem das Gesamtsystem auf Dichtheit geprüft wird.

Falls die Leckrate sehr gering ist und keine hinreichende Auflösung bei der Druckverlustprüfung möglich ist, kann der Prüfdruck (und damit auch die Leckrate umgerechnet auf den neuen Prüfdruck) vergrößert werden, damit größere Messsignale ausgewertet werden können. Dieses ist natürlich nur möglich, wenn der neue Prüfdruck innerhalb der Belastungsgrenzen des Bauteils liegt. Bei höheren Prüfdrücken wird empfohlen eine dem Prüfteil angepasste und entsprechend durch Versuche validierte Leckrate festzulegen.

Montagebedingte Druckänderungen beim Fügen von Teilen können aufgrund des sich einstellenden positiven Überdruckes im Prüfteil Risiken für Klebprozesse darstellen. Es ist sicherzustellen, dass mechanisch bedingte Druckbelastungen einen noch nicht hinreichend ausgehärteten Kleber herausdrücken. Alternativ kann ein Druckausgleichselement integriert werden, durch das der mechanisch bedingte Druck wieder abgelassen wird.

6. Grenzen

Mit dem Prüfdruck lassen sich temperaturbedingte Druckänderungen nachstellen, aber nicht temperaturbedingte Mikrospalte, die sich aufgrund unterschiedlicher Material-Ausdehnungskoeffizienten bilden. Durch entsprechende Materialauswahl, konstruktive Maßnahmen und unabhängige Absicherungen ist sicherzustellen, dass dieses in der Praxis kein Problem darstellt.

Mit der Dichtheitsprüfung im Produktionsprozess lässt sich die Dichtheit des Produktes zum Zeitpunkt der Inverkehrbringung prüfen. Inwiefern das Produkt aber langzeitdicht ist, ist durch unabhängige Tests (künstliche Alterung, Untersuchung der Materialbeständigkeit,) sicherzustellen. Man kann das Produkt auch nach einer Zeit des Betriebes wieder auf Dichtheit prüfen, wobei sicherzustellen ist, dass eventuelle Verschmutzungen, Betriebsstoffe im Produkt oder Korrosionseffekte die Dichtheitsprüfung nicht beeinflussen bzw. eine Gefahr für das Prüfgerät darstellen.

Kriechen von Öl kann nicht bei der Abschätzung der Leckrate auf Grundlage des Vergleiches von dynamischen Viskositäten erfasst werden. In diesen Fällen sollten unabhängige Versuche durchgeführt werden, um abzusichern, dass die Leckratenabschätzung dem Produkt angepasst ist. Bisweilen wird ein zusätzlicher Sicherheitsabschlag (z. B. Halbierung der rechnerisch abgeleiteten Leckrate) zur Berücksichtigung des Kriechverhaltens angewendet.

Referenzen

- [1] Fotos, Grafiken und Tabellen
CETA Testsysteme GmbH, Hilden
- [2] Übersicht über die IP-Schutzartenprüfung, insbesondere Wasserprüfung
ITS GmbH Innovative Mess- und Testsysteme GmbH
- [3] Übersicht IP-Schutzarten
Asskühl GmbH & Co. KG
- [4] Leybold GmbH, Köln
https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/10/0f/8b/FVT_Grundlagen_der_Vakuumtechnik_DE591eea2256c34.pdf
- [5] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin
Fachausschuss Dichtheitsprüfung, Unterpunkt P2 und V9 im FAQ
<http://www.dgzfp.de/Fachausschüsse/Dichtheitsprüfung/FAQ>
- [6] Kuchling, Taschenbuch der Physik