

Wie dicht ist dicht? oder: suchst Du noch oder misst Du schon?

Werner Große BLEY, INFICON, Köln
Gerald SCHRÖDER, Forschungszentrum Jülich, Jülich

Kurzfassung. Komponenten oder Anlagen auf Dichtheit zu prüfen ist eine uralte Aufgabe, die mit aller einfachsten Mitteln, aber auch mit Hightech Geräten durchgeführt werden kann. Dabei spielt neben der Vorgehensweise, mit der man die genaue Leckstelle findet, immer auch die Frage nach der Größe der Leckage eine zunehmend wichtige Rolle. Die Zertifizierung nach ISO 9000 fordert eine regelmäßige Überprüfung und Kalibrierung der Messmittel. Diese Anforderung kann bei den einfachen Methoden (wie z.B. der Blasenprüfung) nicht erfüllt werden, so dass Leckdetektoren mit Prüflecks eingesetzt werden müssen, die auch eine „rückführbare“ Kalibrierung erlauben. Es soll in diesem Beitrag an Beispielen gezeigt werden, wie man zulässige Leckagen festlegt und aus den Prüfergebnissen der Dichtheitsprüfung auf die realen Leckverluste des interessierenden Prozessmediums (Flüssigkeiten und Gase) im Betrieb schließen kann. Dabei sollen die Einflüsse der Temperatur, des Drucks und der Gas-/Flüssigkeitsart dargestellt und einfache Faustformeln zur praktischen Anwendung vorgestellt werden. Auch die Frage der „absoluten“ Dichtheit wird angesprochen.

1 Einführung

Die Prüfung von Komponenten oder Anlagen auf Dichtheit ist eine alte Aufgabe, die schon immer mit einfachen Mitteln, bei zunehmenden Anforderungen aber auch mit immer spezielleren Methoden und Hightech Geräten durchgeführt werden kann. Da man am liebsten „absolute Dichtheit“ hätte, wird zunächst gar nicht über die Größe einer möglichen Leckage gesprochen. Mit zunehmender Anforderung zeigt sich aber, dass es unausweichlich ist, auch über Leckageraten zu sprechen und eine Anforderung zu definieren. Wie man diese Anforderung erarbeitet und was dabei schief gehen kann, soll dieser Beitrag beleuchten.

2 Der Begriff „Dichtheit“ in der Technik

2.1 „Absolute Dichtheit“ in der Umgangssprache

In der Werbung für Produkte des täglichen Gebrauchs findet man häufig Angaben wie „absolut dicht“, „100% dicht“, „100% aromadicht“, usw. Es werden dazu Bilder gezeigt, auf denen der Artikel unter Wasser getaucht wird oder z.B. eine Sektflasche mit sprudelnder Flüssigkeit unterhalb des „absolut dichten“ Verschlusses zu sehen ist.

Man möchte suggerieren, dass die Dichtheit des Gezeigten über jeden Zweifel erhaben ist und die Funktion („Frischhalten“, „vor Auslaufen bewahren“, „Druck halten“,...) unter



allen Umständen erfüllt wird. Für unser Empfinden steht dabei die Wasserdichtheit, symbolisiert durch Bläschen im Wasserbad bzw. die Druckdichtheit, symbolisiert durch den Flaschenverschluss als Synonyme für Dichtheit überhaupt. Dass ein Gegenstand in Ordnung ist, der ein Leck besitzt, und sei es noch so klein, schließen wir gedanklich aus.

2.2 Leckagerate als Maß für Dichtheit

In der Technik ist nun genau die Leckrate die alles entscheidende Größe. Das grundlegende Postulat lautet: „Es gibt keine absolute Dichtheit“, denn alle Materialien und gefügten Teile haben, wenn auch noch so kleine Spalte und Öffnungen, und seien sie auch nur atomar groß. Dichtheit bedeutet deshalb im technischen Sprachgebrauch immer: „Frei von Lecks entsprechend einer gegebenen Spezifikation“ (siehe auch die Europäische Norm DIN EN 1330-8 „Zerstörungsfreie Prüfung – Begriffe der Dichtheitsprüfung“, Absatz 3.3.6). Die Frage ist damit natürlich nur verschoben, nämlich zu der Aufgabe, eine Spezifikation zu definieren. Dabei hat man sich am Einsatzzweck der Komponente oder Anlage zu orientieren und nicht an der Leistungsfähigkeit des gerade verfügbaren Lecksuchgerätes. Es ist also nicht „absolute Dichtheit“ und dementsprechend „keine Anzeige“ des Leckdetektors zu fordern, sondern eine obere Grenze für eine zulässige Leckagerate festzulegen, die dann bei der Prüfung unter definierten Bedingungen nicht überschritten werden darf.

Um eine Vorstellung von dem Zusammenhang zwischen Lochgrößen und Leckageraten zu bekommen, kann die folgende Tabelle dienen. Hier ist eine Reihe von Leckageraten mit ihrem Leckdurchmesser und einer praktischen Beschreibung des Verhaltens in einer Wasserdruck- oder Wasserbadprüfung angegeben. Man erkennt unschwer, dass selbst kleinste Lecks noch nennenswerten Gasverlust bedeuten, insbesondere wenn man einmal die Teilchenzahl in einem cm^3 Gas berücksichtigt (ca. 10^{18} Teilchen!).

Tabelle 1. Leckageraten als Maß für Dichtheit

| Leckagerate qL in mbarl/s | Durchmesser des Lecks | Leckagebeschreibung (bei $\Delta p=1\text{bar}$) |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 10^{+2} | 1,0mm | Wasser läuft aus |
| $10^0 = 1$ | 0,1mm | Wasserhahn tropft |
| 10^{-2} | 0,03mm | „wasserdicht“ (tropft nicht) |
| 10^{-3} | 30 μm (Haardurchmesser) | 1 Bläschen (1mm^3) pro Sekunde |
| 10^{-6} | ~ 0,1 μm (Blende) | ~ 1cm^3 Gasverlust in 12 Tagen |
| 10^{-8} | ~ 0,4 μm x 2mm Wanddicke | ~ 3cm^3 Gasverlust in 1 Jahr |
| 10^{-11} | < 0,1 μm | ~ 1cm^3 Gasverlust in 3000 Jahren |

3 Wie entsteht eine Spezifikation?

3.1 Vorgehensschritte

Wie geht man nun vor, um für eine technische Komponente oder Anlage eine Dichtheitsanforderung zu definieren? Wie oben bereits erwähnt, wird hierzu die Zweckbestimmung des Objektes herangezogen. Wie wird der Zweck durch ein Leck gestört und ab welcher Leckgröße ist der Effekt vernachlässigbar? Diese Frage gilt es zu beantworten. Dabei sind häufig nicht alle Fakten offensichtlich, so dass man Annahmen oder Hypothesen machen muss. In diesem Fall ist es unerlässlich, auch gleich eine Risikobetrachtung zu machen und eine entsprechende Sicherheit in die Dichtheitspezifikation einzubauen. Eine natürliche Grenze für solche Sicherheitszuschläge setzt die Wirtschaftlichkeit, denn das Prüfverfahren muss natürlich in angemessener Zeit durchführbar sein und darf nicht am Ende teurer als der Prüfling sein.

3.2 Beispiel: geruchsdichter Benzintank

Als Beispiel mag ein Benzintank dienen, der in einem Auto eingebaut keine Geruchsemissionen abgeben darf. Der Zweck des Tanks ist also in dieser Betrachtung nicht einfach nur, kein Benzin herauströpfen zu lassen, sondern so gasdicht zu sein, dass selbst empfindliche Nasen sich nicht durch Benzingeruch gestört fühlen werden.

Nachdem der Zweck „Geruchsdichtheit“ nun definiert ist, muss man fragen, was das eigentlich in technisch-physikalischer Sprache bedeutet. Typischerweise kennt man für verdampfende Stoffe eine so genannte „Geruchsschwelle“. Dies ist die kleinste Konzentration, bei der ein Mensch die Substanz noch als Geruch wahrnehmen kann. Für Benzin haben wir keine eindeutige Angabe zur Geruchsschwelle gefunden, hier müsste entsprechend experimentiert oder nachgeforscht werden. Für diesen Artikel möchten wir eine Benzinkonzentration von 1ppm in der Luft als Geruchsschwelle annehmen.

Als nächstes stellt sich die Frage: was hat die Leckagerate eines Benzintanks mit der Konzentration des Benzindampfs in der Luft zu tun? Nur wenn sich austretender Benzindampf im Innenraum des Fahrzeugs sammeln kann, entsteht überhaupt eine wahrnehmbare Konzentration. Wir müssen also wissen, wie groß der Innenraum ist und wie lange sich Benzindampf ansammeln kann, bevor wieder gelüftet wird. Hier sind wieder Annahmen zu treffen, bzw. die tatsächliche Einbausituation ist zu prüfen. Wir wollen annehmen, der Innenraum des Fahrzeugs sei 1m^3 und die Türen und Fenster sind im abgestellten Fahrzeug für 24h geschlossen geblieben.

Nachdem wir die Parameter festgelegt haben, brauchen wir nur noch eine simple Formel, um die Leckagerate Q auszurechnen, welche in gegebener Zeit Δt in einem festgelegten Volumen V mit Atmosphärendruck (1000mbar) einen Konzentrationsanstieg Δc an der Geruchsschwelle erzeugt:

$$Q = V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} = V \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot 1000\text{mbar}$$

Diese Formel zeigt den Druckanstieg $\Delta p/\Delta t$, der im Volumen V durch die Leckagerate Q erzeugt wird. Wenn man den austretenden Benzindampf betrachtet, so entsteht im Volumen ebenfalls ein Druckanstieg, aber nur für den Anteil des Benzindampfes. Man nennt diesen Teil-Druckanstieg „Partialdruck“anstieg und kann ihn in einen Konzentrationsanstieg umrechnen, indem man ihn einfach ins Verhältnis zum herrschenden Atmosphärendruck von ca. 1000 mbar setzt. Mit Hilfe dieser Formel errechnet sich eine Leckagerate von ca. 1×10^{-6} mbar/s, auf die mindestens als Schwellwert zu prüfen wäre.

Wenn man nun noch im letzten Schritt annimmt, dass dieser Wert nur die zulässige Gesamtleckagerate ist, so muss man (unter der Annahme von maximal 10 Einzellecks) den Schwellwert für ein Einzelleck sogar auf 1×10^{-7} mbarl/s herabsetzen. Auf diesen Wert ist dann die Prüfung auszulegen.

4 Wie wird die Dichtheitsanforderung geprüft?

4.1 Gängige Verfahren

Gängige Verfahren sind die Druckabfallprüfung mit Luft, die Blasenprüfung unter Luftdruck im Wasserbad und die Prüfung mit einem speziellen Prüfgas unter Benutzung eines selektiv darauf ansprechenden Leckdetektors.

Man ahnt bereits, dass Leckageraten von 1×10^{-6} mbarl/s oder sogar 1×10^{-7} mbarl/s nicht mit den einfachen Verfahren feststellbar sein werden.

4.2 Was leisten die Verfahren?

Wenn man die Leistungsfähigkeit der Verfahren bewerten will, so muss einmal die erreichbare Nachweisgrenze und dann der erforderliche Zeitbedarf geprüft werden, denn die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist eine unerlässliche Randbedingung.

Wenn wir nun die mindestens erforderliche Nachweisgrenze von 1×10^{-6} mbarl/s zu Grunde legen, so braucht man mit der Druckabfallprüfung bei einem Tankvolumen von 100 l und einem sehr guten Druckmessgerät mit einer Auflösung von 10^{-2} mbar immer noch 10 Tage, um zwischen „dicht“ und „undicht“ zu unterscheiden (Druckabfall: $\Delta p/\Delta t = 10^{-3}$ mbar pro Tag!). Hierbei ist noch nicht berücksichtigt, dass kleinste Temperaturschwankungen bereits größere Ausschläge hervorrufen können. Dieses Verfahren ist also hier überhaupt nicht geeignet, es wird vorzugsweise bei Leckageraten von $10^{-2} \dots 10^{-3}$ mbarl/s eingesetzt.

Die Blasenprüfung im Wasserbad kann bei solch kleinen Leckageraten auch nicht verwendet werden, weil durch die hohe Oberflächenspannung von Wasser überhaupt keine Blasenbildung erfolgen wird. Öffnungen im μm -Bereich sind für flüssiges Wasser bei wenigen Bar Druckdifferenz undurchlässig! (eine Berechnung von Lochgrößen ist in [1] beschrieben).

Es bleibt also nur der Prüfgasleckdetektor, der üblicherweise Helium (neuerdings auch Wasserstoffformiergas) als Prüfmedium benutzt. Mit solchen hochempfindlichen Leckdetektoren können in einer Vakuumkammer, in der sich der Benzintank, gefüllt mit Prüfgasgemisch befindet, Leckageraten bis herab zu 1×10^{-10} mbarl/s detektiert und sogar quantitativ gemessen werden. Für unsere Anwendung reicht diese Empfindlichkeit sicher aus. Der einzige Nachteil ist der relativ hohe Aufwand für eine Prüfkammer mit Vakuumsystem, dafür beträgt die Prüfzeit aber nur Sekunden und die Prüfung kann in einer Fertigungslinie integriert und automatisiert werden. Damit erfüllt sie als einzige auch die Anforderungen an zertifizierte Prüfmittel nach DIN ISO 9001.

Die folgende Tabelle fasst diese Aussagen noch einmal kurz und knapp zusammen:

Tabelle 2. Leistung der gängigen Dichtheitsprüfverfahren

| Verfahren | Zeitbedarf zum Test auf 10^{-6} mbarl/s | Sinnvolle Nachweisgrenze | Bewertung |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|---|
| Druckabfallprüfung mit Luft | bei 100l Tankvolumen > 10 Tage ($\Delta p/\Delta t=10^{-3}$ mbar pro Tag) | 10-2...10-3 mbarl/s | - höchste Auflösung des Druckmessgerätes erforderlich, kleine Lecks unmessbar - starker Temperatureinfluss |
| Blasenprüfung in Wasser (mit Luft) | nicht messbar wegen sehr hoher Oberflächenspannung von Wasser | 10^{-3} mbarl/s | + Lokalisierung möglich - kleine Lecks in Wasser nicht messbar |
| Prüfung mit Leckdetektor und Prüfgas | 10...30 s, je nach Prüflingsvolumen | $< 10^{-10}$ mbarl/s | + kleinste Lecks immer zu finden - Leckdetektorausrüstung teuer |

5 Fazit

Es gibt keine „absolute Dichtheit“! Die Anforderungen an die Dichtheit müssen immer vom Einsatzzweck bestimmt sein.

Viele Verfahren prüfen nur „Wasserdichtheit“, was zum Beispiel für Geruchsdichtheit um mindestens einen Faktor 1000 zu unempfindlich ist.

Für die Anforderung „Gasdichtheit“ ($< 10^{-6}$ mbarl/s) kommt praktisch nur der Prüfgasleckdetektor in Frage

6 Referenzen

[1] Wutz, Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage, Vieweg 2006

[2] DGZfP-Richtlinie DP1, Auswahl von Prüfgasen für die Dichtheitsprüfung