

# Dichtheit von Sensorsystemen

Typprüfung vs. Stückprüfung | Prüfparameter | Dichtheitsprüfung im Fertigungsprozess

*Dr. Joachim Lapsien<sup>1</sup>,*

*<sup>1</sup>CETA Testsysteme GmbH, Marie-Curie-Str. 35-37, 40721 Hilden, Deutschland*

## Zusammenfassung

Sensorsysteme werden unter den unterschiedlichsten Bedingungen eingesetzt und sind einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt. Entsprechend vielfältig sind die Anforderungen. Hierzu gehört bisweilen auch die Dichtheit gegen Verschmutzung und Feuchtigkeit, deren Anforderungen in der Definition der IP-Schutzarten beschrieben sind. Hierbei handelt es sich um Typprüfungen. Prototypen und Baumuster werden strikt nach den Vorgaben der angestrebten IP-Schutzart im Labor auf die Dichtheit gegen das Eindringen von Fremdkörpern und Feuchtigkeit geprüft. Die Stückprüfung hingegen dient dem Nachweis einer gleichbleibenden Fertigungsqualität. Die in den Fertigungsprozess integrierte Dichtheitsprüfung kann nicht unter den Bedingungen der Laborprüfung durchgeführt werden. Hier gilt es entsprechende Vorgaben für die Prüfung in der Produktionslinie festzulegen. Dieses sind der Prüfdruck und die zulässige Leckrate. In Abhängigkeit von der geforderten Leckrate ist dann die Auswahl eines geeigneten Prüfverfahrens möglich. Praktische Ansätze zur Festlegung der Prüfparameter Prüfdruck und Leckrate werden behandelt.

**Keywords:** Dichtheitsprüfung, Typprüfung, IP-Schutzart, Stückprüfung, End-of-Line-Prüfung

## Dichtheit und Sensorsysteme

Sensorsysteme werden in fast jedem industriellen Bereich verwendet und müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Wenn sie in feuchtigkeitsbelasteter Umgebung verwendet werden, müssen sie wasserdicht sein. Denn das Eindringen von Flüssigkeiten kann zu schwerwiegenden Funktionsstörungen des Sensorsystems und der Elektronik führen. Häufig wird ein Dichtheitsgrad entsprechend einer IP-Schutzart (z. B. IP 67) gefordert. In der Definition der IP-Schutzarten wird nur beschrieben, wie ein geeigneter Labortest durchzuführen ist. Hierbei handelt es sich um eine Typprüfung.



Abb. 1: Lichtschrankensensor [1]

## Typprüfungen und Stückprüfungen

Die Typprüfung hat das Ziel festzustellen, dass die Bestimmungen der Norm für die betreffenden Schutzarten von einem Prototypen oder Baumuster erfüllt werden. Sie dient dem Nachweis, dass das Produkt die vom Hersteller angegebene Eigenschaft besitzt und den Anforderungen entspricht. Bei Produkten, die in geringer Stückzahl hergestellt werden, sowie im Allgemeinen auch bei in Einzelausführung gebauten Geräten, reicht eine vereinfachte Typprüfung aus.

Die Stückprüfung dient dem Nachweis einer gleichbleibenden Produktqualität. Bei der Fertigung großer Stückzahlen und in einigen Branchen ist es schon seit Jahren üblich, dass jedes Produkt zu 100 % produktionsbegleitend auf Dichtheit geprüft wird. Dies ist insbesondere dann der Fall, je komplexer und wertiger das Produkt ist, so dass sich eine Nacharbeit wirtschaftlich lohnt, oder je sensibler und kritischer die Anwendung ist, in der das Produkt eingesetzt wird, oder wenn der dichtheitsbedingte Ausfall hohe Folgeschäden auslöst. Hier verlässt man sich nicht auf die Typprüfung. So werden beispielsweise Produkte, die im Automotive-Bereich eingesetzt werden, zu 100 % auf Dichtheit geprüft.

### Typprüfung IP-Schutzarten für Wasserprüfungen

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 die Dichtheit gegen das Eindringen von Feuchtigkeit geprüft. Das Ergebnis der Prüfung wird in einem Prüfzertifikat zusammengefasst.

#### Vorteile der Typprüfung

- Erkennung und Vermeidung von Fehlern schon in der Entwicklungsphase.
- Schaffung von Vertrauen in das Produkt durch das Prüfzertifikat einer neutralen Prüfstelle.
- Minderung des Risikos der Produkthaftung durch eine erfolgreiche Baumusterprüfung
- Verringerung der Herstellkosten durch eine erfolgreiche Eignungsprüfung.
- Die erfolgreich bestandene Typprüfung bescheinigt eine erhöhte Produktsicherheit und -zuverlässigkeit.

#### Nachteile der Typprüfung

- Tests werden nur an einem Baumuster oder Prototypen durchgeführt.
- Die Typprüfung ist eine Laborprüfung und nicht in den Produktionsprozess integrierbar.
- Das Prüfzertifikat der Typprüfung sagt nichts über die Konstanz der Fertigungsbedingungen der Serienprodukte aus.

### Stückprüfung Produktionsbegleitende Dichtheitsprüfung

Bei der in den Produktionsprozess integrierten Dichtheitsprüfung werden alle dichtheitsrelevanten Komponenten und Montageprozesse abgeprüft. Hierzu gehören beispielsweise die Vollständigkeit der Schweißnaht, Klebnaht oder Schraubverbindungen, die Maßhaltigkeit der eingesetzten abdichtenden Komponenten und deren korrekte Platzierung, das Vorhandensein der dichtenden Elemente (z.B. O-Ringe, Dichtmatten), die Rauigkeit bzw. Unversehrtheit von Oberflächen, auf denen abgedichtet wird, die Dichtheit der Steckverbinder und Kabeldurchführungen und korrekt montierte und unbeschädigte Druckausgleichselemente. Nur wenn die Summe der Einzelleckagen geringer ist als die zulässige Gesamtleckrate, wird das Produkt als dicht bewertet.

#### Vorteile der Stückprüfung

- Jedes Prüfteil wird geprüft.
- Messwerte können aufgezeichnet werden und sind somit rückverfolgbar.

- Produktionsprobleme werden sehr schnell erkannt.
- Erhöhte Sicherheit hinsichtlich der Qualität der ausgelieferten Produkte.
- Absicherung des Produktionsprozesses.

#### Nachteile der Stückprüfung

- Notwendigkeit der Festlegung produktspezifischer Prüfparameter.
- Kosten für die Integration eines Dichtheitsprüfstandes.
- Aufwand der begleitenden Dokumentation.

### **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 Größe der zulässigen Leckrate ist vorab zu entscheiden, welches Prüfmedium eingesetzt wird (Tab. 1).

*Tab. 1: Übersicht über Prüfmedien, industrielle Dichtheitsprüfmethoden und die damit nachweisbaren Luftleckraten [1]*

Prüfmedium	Luftleckrate (*)	Messung / Nachweis
Wasser	$> 10^{-2}$ mbar <sup>*/l</sup> /s	Luftblasen
Druckluft	$> 10^{-3}$ mbar <sup>*/l</sup> /s	Druckänderung Massendurchfluss
Wasserstoff (Formiergas)	$> 10^{-6}$ mbar <sup>*/l</sup> /s	H <sub>2</sub> -Konzentration
Helium	$> 10^{-9}$ mbar <sup>*/l</sup> /s	He-Konzentration

(\*) Anmerkung: 1 mbar<sup>\*/l</sup>/s = 60 ml/min

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

### **Methoden zur Festlegung der Prüfdruckes**

Für die Wahl des Prüfdruckes gibt es verschiedene Ansätze, wenn 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.

Betriebsdruck (plus Sicherheitszuschlag)

Wenn bekannt ist, welcher maximale Druck im Betrieb des Produktes (z. B. bei Druckbehältern, Pumpen, Zylindern) auftreten kann, 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 ergebende Druck sollte auch der Prüfdruck bei der Dichtheitsprüfung sein.

Barometrische Druckänderungen

Einige Produkte sind im Betrieb aufgrund von unterschiedlichen Höhen über dem Erdboden (z. B. bei Höhenfahrten, Luftfahrt) unterschiedlichen Außendrücken ausgesetzt.

Quantitativ wird der höhenabhängige Luftdruck durch die sogenannte „barometrische Höhenformel“ (Gl. 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,  $0^\circ\text{C}$ )

$h = \text{Höhe in m über Normal-Null}$

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

Tab. 2: Anwendung der barometrischen Höhenformel und Berechnung des Druckunterschiedes zum Normaldruckniveau [1]

Höhe $h$	Druck $p(h)$	Druckdifferenz $p(h) - p_0$
0 m	101.325 Pa	0 Pa = 0 mbar
500 m	95.179 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	-72.751 Pa = -727,5 mbar

In der Nähe der Erdoberfläche gilt näherungsweise: Mit je 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 vorgesehenen Zieldruck nicht mehr möglich ist.

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 dies auch die im Prüfteilinneren auftretende Druckbelastung. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung für den Fall eines konstanten Volumens (isochore Zustandsänderung) lässt sich die temperaturbedingte Druckänderung berechnen (Gl. 2):

$$\Delta p = p_1 \cdot \frac{\Delta T}{T_1} \quad (\text{Gl. 2})$$

In diese Formel sind die Absolutdrücke und die absoluten Temperaturen einzusetzen. Ist das Produkt für einen Betrieb in einem Temperaturbereich von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+120^\circ\text{C}$  zugelassen, ergeben sich ausgehend von dem Ausgangszustand (Atmosphärenluftdruck 1013 mbar und  $+20^\circ\text{C}$ ) folgende temperaturbedingte Druckänderungen:

Abkühlung:  $+20^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 293,15 \text{ K}$ ) auf  $-40^\circ\text{C}$ , d.h.  $\Delta T = -60 \text{ K} \Rightarrow \Delta p = -207,33 \text{ mbar}$

Erwärmung:  $+20^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 293,15 \text{ K}$ ) auf  $+120^\circ\text{C}$ , d.h.  $\Delta T = +100 \text{ K} \Rightarrow \Delta p = +345,56 \text{ mbar}$

Falls das Produkt bei Atmosphärendruck schon die Minimal- bzw. Maximaltemperatur angenommen hat und schockartig erwärmt oder abgekühlt wird, ergeben sich die folgenden temperaturbedingten Druckänderungen.

Erwärmung:  $-40^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 233,13 \text{ K}$ ) auf  $+120^\circ\text{C}$ , d.h.  $\Delta T = +160 \text{ K} \Rightarrow \Delta p = +695,35 \text{ mbar}$

Abkühlung:  $+120^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 393,15 \text{ K}$ ) auf  $-40^\circ\text{C}$ , d.h.  $\Delta T = -160 \text{ K} \Rightarrow \Delta p = -412,26 \text{ mbar}$

Je nach dem, welches Szenario in der Praxis am häufigsten auftritt bzw. das größte Risiko darstellt, ist der Prüfdruck entsprechend zu wählen. Inwiefern hier noch ein Sicherheitszuschlag zu berücksichtigen ist, ist seitens des Herstellers zu entscheiden. Zudem ist zu beachten, für welche Druckbelastungen 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.

### Ableitung aus der Tauchtiefe

Einige Produkte werden gemäß DIN 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.

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.

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

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

Für die produktionsbegleitende Dichtheitsprüfung liefert die IP-Schutzartprüfung keine direkten Vorgaben. Anhand der Prüfbedingungen einiger IP-Schutzartprüfungen (Tab. 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.

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

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

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

### 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 aufwändig die Druckbelastung konform der IP-Schutzart zu erzeugen. Dies würde bedeuten, dass das Prüfteil komplett mit dem Prüfdruck von außen beaufschlagt werden muss. Dieses ist möglich, erfordert aber eine Haubenprüfung. Da die Haube für die Aufnahme des Prüfteils ausgelegt werden muss, kann es bei unterschiedlichen 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.

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 in das Klebbett gedrückt und unter Umständen - und je nach Klebertyp - kann eine bessere Vernetzung erreicht werden.

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

Korrelationsuntersuchungen zur Beurteilung, ob die Richtung der Druckbeaufschlagung 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.

### Methoden zur Festlegung der Leckrate

Für die Wahl der Leckrate gibt es diverse Ansätze, wenn keine produktspezifische zulässige Leckrate vorgeschrieben ist: Messung der aus den Lecks austretenden Gasmenge, Umrechnung einer Flüssigkeitsleckrate in eine Gasleckrate, Viskositätsbetrachtung, Vererbung von Leckraten ähnlicher Produkte, Zugrundelegung industriell üblicher Orientierungswerte, Korrelationsversuche, Vermessung realer Produktionsfehler oder Untersuchung von Feldrückläufern.

#### Leckratenermittlung über die aus der Leckage austretenden 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, Behälter mit Volumenskala (z.B. Reagenzglas) über einen Zeitraum aufgefangen. Die aufsteigenden Luftblasen verdrängen das Wasser im Behälter. Nach Ablauf der Messzeit wird das Luftvolumen im Behälter abgelesen und die daraus resultierende Luftleckrate berechnet. Bei sehr geringen Prüfdrücken ist der hydrostatische Gegendruck des Wassers in der Tiefe der Leckage zu berücksichtigen, und der Prüfdruck ist entsprechend zu korrigieren.

#### Ableitung einer Gasleckrate aus einer Flüssigkeitsleckrate

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

Zur Abschätzung einer Gasleckrate  $\Delta V/\Delta t_{\text{Gas}}$  ausgehend von einer bekannten Flüssigkeitsleckrate  $Q_{\text{Flüssigkeit}}$  kann die folgende Formel (Gl. 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 ( $\odot: 5 \text{ mm}$ ) 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  $20^\circ\text{C}$ :  $\eta_{\text{Wasser}} = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ,  $\eta_{\text{Luft}} = 1,815 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ) ergibt sich eine Luftleckrate von  $\Delta V/\Delta t = 0,0121 \text{ mbar}\cdot\text{l/s}$  (entsprechend  $0,726 \text{ cm}^3/\text{min}$  Luft unter Normal-

druck). 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.

#### Viskositätsbetrachtung

Wenn gefordert ist, dass das Produkt dicht gegen ein Medium sein muss, so ist es möglich durch einen Vergleich der dynamischen Viskosität 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  $20^\circ\text{C}$  eine Luftleckrate von  $0,6 \text{ ml/min}$  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.

#### 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 Füge-technik, Wandstärke, Art der Adaption, intern verbaute Komponenten). Und es muss geprüft werden, inwiefern, trotz gleicher Leckrate, Anpassungen am Prüf-

prozess 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.

#### Verwendung von industriell üblichen Orientierungswerten

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

Tab. 4: Orientierungswerte zu Dichtheit, Lochgröße und Leckrate [4]

Dichtheit	Lochgröße	Leckrate
Wasserdicht	10 $\mu\text{m}$	$< 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$
Dampfdicht	3 $\mu\text{m}$	$< 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$
Bakteriendicht	1 $\mu\text{m}$	$< 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$
Öldicht	300 nm	$< 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$
Virendicht	100 nm	$< 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$
Gasdicht	30 nm	$< 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$
„absolut dicht“	1 nm	$< 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$

Diese Orientierungswerte beruhen auf einer Modellrechnung: In einem Behälter, der auf einen negativen Überdruck von -1 bar evakuiert wurde, 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 Tab. 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 wasserdicht sein sollen, je nach Produktart, mit zulässigen Leckraten zwischen 0,6 ml/min und 8 ml/min geprüft werden. Ähnlich groß ist die Spanne der zulässigen Leckraten für Öldichtheit, die auch von den Eigenschaften des Öls abhängt. Hieran ist zu erkennen, dass die Verwendung 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.

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 zerstörungsfrei 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 begleitende Funktionsprüfung stattfinden, um die Funktion und die leakagebedingte 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.

#### Vermessung realer Produktionsfehler

Bei Produkten, für die keine IP-Schutzart gefordert ist, verzichtet man auf die unabhängige Prüfung. Dann werden Prüfteile mit typischen in der Praxis real 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.

#### 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 das Leck 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.

### 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 der gemessene Druckverlust sehr gering ist, kann der Prüfdruck erhöht werden, um das Messignal zu vergrößern. Dies hat natürlich eine Auswirkung auf die Leckrate, die an den neuen Prüfdruck angepasst werden muss. Dieses Vorgehen ist nur möglich, wenn der neue Prüfdruck innerhalb der Belastungsgrenzen des Bauteils liegt. Weicht der neu gewählte höhere Prüfdruck stark von dem ursprünglichen Prüfdruck ab, wird empfohlen eine dem Prüfteil angepasste und 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 ein noch nicht hinreichend ausgehärteter Kleber durch die mechanisch bedingte Druckbelastung nicht aus dem Klebbett herausgedrückt wird.

Alternativ kann ein Druckausgleichselement integriert werden, durch das der mechanisch bedingte Druck wieder abgelassen wird.

### Grenzen

Um die Ursachen für undichte Produkte systematisch zu erfassen, bietet sich die Durchführung einer Fehlerbaumanalyse an. Hierbei werden auch Aspekte analysiert, die den Prüfprozess (z. B. Prüfdruck, Richtung der Druckbeaufschlagung, Leckrate) betreffen.

Mit dem Prüfdruck lassen sich temperaturbedingte Druckänderungen nachstellen, aber nicht temperaturbedingte Mikrospalte, die sich durch unterschiedliche 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. Das Produkt kann auch nach einer Zeit des Betriebes wieder auf Dichtheit geprüft werden, wobei zu beachten ist, dass eventuelle Verschmutzungen, Betriebsstoffe im Produkt oder Korrosionseffekte die Dichtheitsprüfung nicht beeinflussen bzw. eine Gefahr für das Prüfgerät darstellen.

Das Kriechverhalten von Öl kann bei der Leckratenabschätzung auf Grundlage des Vergleiches von dynamischen Viskositäten nicht erfasst werden. In diesem Fall sollten unabhängige Versuche durchgeführt werden, um abzusichern, dass die Leckrate zur Produkteigenschaft passt. Bisweilen wird hierbei ein zusätzlicher Sicherheitsabschlag (z. B. Halbierung der rechnerisch abgeleiteten Leckrate) zur Berücksichtigung des Kriechverhaltens angebracht.

### Literaturnachweis

- [1] Fotos, Grafiken und Tabellen  
CETA Testsysteme GmbH, Hilden
- [2] Übersicht über die IP-Schutzartenprüfung,  
ITS GmbH Innovative Mess- u. Testsysteme GmbH
- [3] Übersicht IP-Schutzarten  
Asskühl GmbH & Co. KG
- [4] Grundlagen der Vakuumtechnik  
Leybold GmbH, Köln