

# Absicherung der Dichtheit von Sensorsystemen im Produktionsprozess

## Ensuring the Leak Tightness of Sensor Systems in the Production Process

Dr. Joachim Lapsien, CETA Testsysteme GmbH, Hilden, Deutschland, joachim.lapsien@cetatest.com

### Kurzfassung

Aufgrund der vielfältigen industriellen Einsatzbereiche von Sensorsystemen werden an diese Komponente eine Vielzahl von Anforderungen gestellt. Hierzu gehört auch die Dichtheit gegen Verschmutzung und Feuchtigkeit. Das Eindringen von Flüssigkeiten kann zu schweren Funktionsstörungen des Sensorsystems und damit der angeschlossenen Elektronik führen. Damit kommt der Dichtheitsprüfung als Stückprüfung in der Produktionslinie eine besondere Bedeutung zu. Weit verbreitet ist der Einsatz der Prüfmediums Druckluft im industriellen Fertigungsprozess im Rahmen der 100 % Inline-Dichtheitsprüfung. Das Prüfmedium Druckluft lässt sich bis zu einer Luftleckrate von  $10^{-3}$  mbar\*l/s (je nach Prüfteilvolumen) einsetzen. Als wasserdicht wird üblicherweise eine Luftleckrate von  $10^{-2}$  mbar\*l/s angenommen. Gekapselte Sensorsysteme können nicht von innen mit Druckluft befüllt werden. Sie werden in einer Prüfhäube geprüft, die unter Druck gesetzt wird. Der leakagebedingte Druckabbau in das Prüfteilinnere wird mit hoher Auflösung detektiert.

### Abstract

Due to the wide range of industrial applications for sensor systems, a large number of requirements are placed on this component. This also includes tightness against contamination and moisture. The penetration of liquids can cause serious malfunctions of the sensor system and thus of the connected electronics. Thus, the leak test as a routine test in the production line is of particular importance.

The use of compressed air as a test medium is widespread in industrial production processes as part of the 100 % inline leak test. The test medium compressed air can be used down to an air leakage rate of  $10^{-3}$  mbar\*l/s (depending on the test part volume). An air leakage rate of  $10^{-2}$  mbar\*l/s is usually assumed to be watertight.

Encapsulated sensor systems cannot be filled with compressed air from the inside. They are tested in a test hood which is pressurised. The leakage-related pressure loss into the test part interior is detected with high resolution.

## 1 Absicherung der Dichtheit

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.

Von besonderer Bedeutung ist die Absicherung der Fertigungsqualität von Sensorsystemen in der Produktionslinie. Daraus ergibt sich der Anspruch 100 % geprüfte Produkte auszuliefern, verbunden mit der Integration der Dichtheitsprüfung als End-of-Line-Test in die Fertigungslinie. Hierbei handelt es sich um eine Stückprüfung.

In der Produktionslinie kann ein Labortest gemäß der IP-Schutzart natürlich nicht durchgeführt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche müssen passende Anforderungen an eine Dichtheitsprüfung in der Produktionslinie erarbeitet werden. Idealerweise können der Prüfdruck und die zulässige Leckrate definiert werden.

## 2 Leckraten und Dichtheit

In **Tabelle 1** sind einige Orientierungswerte für Leckraten in Abhängigkeit von der geforderten Dichtigkeit aufgeführt. Die Leckrate wird üblicherweise in der Einheit „mbar\*l/s“ bzw. „ml/min“ angegeben, wobei 1 mbar\*l/s = 60 ml/min.

| Dichtheit              | Grenzleckrate   | Prüfmedium               |
|------------------------|---|--------------------------|
| Wasserdicht            | $Q_L < 10^{-2}$ mbar*l/s  | Druckluft                |
| Dampfdicht             | $Q_L < 10^{-3}$ mbar*l/s  | Druckluft<br>Wasserstoff |
| Bakteriendicht         | $Q_L < 10^{-4}$ mbar*l/s  | Wasserstoff              |
| Öldicht<br>Benzindicht | $Q_L < 10^{-5}$ mbar*l/s<br>(abhängig von Viskosität,<br>Temperatur des Öls)          | Wasserstoff<br>Helium    |
| Virendicht             | $Q_L < 10^{-6}$ mbar*l/s<br>bis $Q_L < 10^{-8}$ mbar*l/s<br>(abhängig von Virengröße) | Helium                   |
| Gasdicht               | $Q_L < 10^{-7}$ mbar*l/s  | Helium                   |
| Technisch dicht        | $Q_L < 10^{-10}$ mbar*l/s   | Helium                   |

**Tabelle 1** Dichtheit, Leckrate (Orientierungswerte) und Prüfmedien [1]

### 3 Prüfmedium Druckluft

Der Einsatz des Prüfmediums Druckluft ist bei der industriellen Dichtheitsprüfung weit verbreitet. So ist Druckluft in allen Produktionsstätten verfügbar. Es handelt sich um ein objektives und quantitatives Messverfahren, das sich gut in automatisierten Produktionslinien integrieren lässt. Bei der Prüfung wird das Prüfteil - im Gegensatz zur Prüfung im Wasserbad - nicht benetzt, und es kann nach der Prüfung sofort weiterverarbeitet werden (z.B. Verpackung und Auslieferung).

Das Prüfmedium Druckluft kann bis zu einer Luftleckrate von  $10^{-3}$  mbar·l/s (abhängig vom Prüfteil) verwendet werden. Für geforderte Wasserdichtheit wird üblicherweise eine Luftleckrate von  $10^{-2}$  mbar·l/s (= 0,6 ml/min) angenommen. Diese Leckrate kann als ein erster Ansatz verwendet werden.

Wenn die Leckrate angenommen wird, wird empfohlen, praktische Tests durchzuführen, um die Leckrate zu verifizieren. Andernfalls kann es vorkommen, dass die Leckrate zu niedrig gewählt wird, was einen zu hohen virtuellen Ausschuss zur Folge hat.

Typische Beispiele von Automotive-Sensoren, die mit Druckluft geprüft werden, sind Öldrucksensoren, ABS-Sensoren, Niveausensoren.

### 4 Dichtheitsprüfung direkt befüllbarer Prüfteile

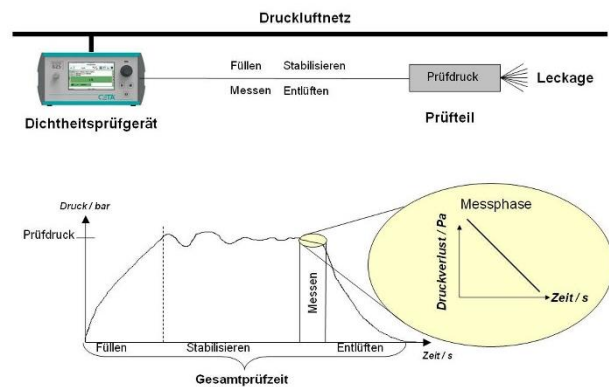
Bei direkt befüllbaren Prüfteilen besteht der Prüfprozess (**Bild 1**) aus den zeitlich aufeinander folgenden Phasen: Füllen, Stabilisieren, Messen und Entlüften.

In der Füllphase wird das Prüfteil mit dem Prüfdruck befüllt, wobei die Fülldruckgrenzen überwacht werden.

Die sich daran anschließende Stabilisierphase ist notwendig, damit Druckluftstörungen, die durch den Befüllprozess entstehen und durch Schaltvorgänge der internen Ventile des Prüfgerätes erzeugt werden, abklingen können. Zudem muss sich die Temperatur der Druckluft an die Prüfteiltemperatur anpassen. Durch den Füllvorgang wird, im Falle einer Überdruckprüfung, die Druckluft adiabatisch komprimiert, was eine Temperaturerhöhung zur Folge hat. Zudem wird in der Stabilisierphase überwacht, ob der Prüfdruck gehalten wird.

In der Messphase wird der zeitliche Druckverlust mit einem hochauflösenden Drucksensor gemessen und mit den zulässigen Toleranzen verglichen. Die Messphase muss so lang sein, dass hinreichend viele und aussagekräftige Messwerte vorliegen. Eine stabile Messphase ist dadurch gekennzeichnet, dass der leakagebedingte Druckverlust proportional zur Zeit ist.

Daran schließt sich der Entlüftvorgang an, in der das Prüfteil wieder auf Atmosphärendruck gebracht wird.



**Bild 1** Prinzip der Druckverlustprüfung [2]

Der leakagebedingte zeitliche Druckverlust lässt sich mit Hilfe der sogenannten Leckratenformel berechnen:

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

wobei

Luft-Leckrate  $Q_L$

Effektives Prüfvolumen (Summe aus befüllbarem Prüfteilvolumen und Volumina der Zuleitung, der Adaption und des Prüfgerätemesskreises)  $V_{\text{Prüfvolumen}}$

Zeitlicher Druckverlust  $\Delta p / \Delta t$

Als Einheiten für die Luft-Leckraten werden häufig „mbar·l/s“ oder „ml/min“ verwendet, wobei 1 mbar·l/s = 60 ml/min.

Der zeitliche Druckverlust ist proportional zur Leckrate und umgekehrt proportional zum Volumen. Er ist umso geringer, je größer das befüllbare Prüfteilvolumen ist.

### 5 Dichtheitsprüfung gekapselter Prüfteile

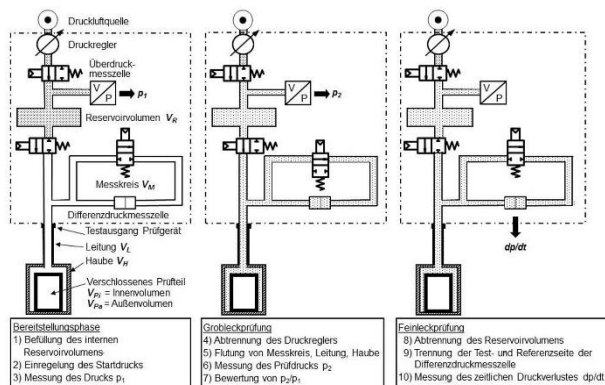
Gekapselte Bauteile können nicht von innen mit Druckluft befüllt werden. Zu dieser Produktklasse gehören z.B. Sensoren, Relais, Mikroschalter oder Armbanduhren. Ein typisches Beispiel ist ein gekapselter Lichtschrankensensor (**Bild 2**).



**Bild 2** Lichtschrankensensor als Beispiel für ein gekapseltes Prüfteil [3]

Diese Produkte werden in einer die Prüfteilaußenkontur möglichst eng umfahrenden Haube platziert. Diese wird unter Druck gesetzt, und der zeitliche Abbau des Druckes in das Prüfteil wird registriert. Diese Prüfmethode wird auch als Haubenprüfung bezeichnet.

Hierbei stellt sich folgendes Problem: Weist das Prüfteil ein Grobleck auf, wird es schon während der Befüllphase der Haube direkt mit Druckluft gefüllt. In diesem Fall würde bei der Dichtheitsprüfung nur die Dichtheit der das Prüfteil umgebenden Haube geprüft. Daher muss im ersten Schritt kontrolliert werden, dass das Prüfteil kein Grobleck aufweist (Grobleckprüfung). Danach folgt die eigentliche Feinleckprüfung mittels Druckverlustmessung (**Bild 3**).



Ein im Prüfgerät integriertes Reservoirvolumen wird auf einen Druck  $p_1$  gefüllt und vom Druckregler getrennt. Dann wird das Sperrventil des internen Reservoirvolumens geöffnet und die Luft in die an das Prüfgerät angeschlossene Haube geflutet. Da sich die Luft des Reservoirvolumens auf ein größeres Volumen verteilt, stellt sich ein geringerer Druck  $p_2$  ein. Durch das Verhältnis  $p_2/p_1$  kann man feststellen, welches Volumen angefüllt wird. Liegt kein Grobleck vor, gilt:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_{\text{Reservoir}}}{V_{\text{Reservoir}} + V_{\text{Messkreis}} + V_{\text{Leitung}} + V_{\text{Haube}} - V_{\text{Prüfteil, außen}}}$$

Im Falle eines Groblecks wird zusätzlich das innere Volumen des Prüfteils mit angefüllt und es gilt:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_{\text{Reservoir}}}{V_{\text{Reservoir}} + V_{\text{Messkreis}} + V_{\text{Leitung}} + V_{\text{Haube}} - V_{\text{Prüfteil, außen}} + V_{\text{Prüfteil, innen}}}$$

Die formelmäßigen Zusammenhänge ergeben sich aus der idealen Gasgleichung unter der Annahme konstanter Temperatur („isotherme Zustandsänderung“). Im Ausgangszustand befinden sich die Volumina auf Umgebungsdruckniveau, so dass in diese Formeln die Drücke als positive bzw. negative Überdrücke einzusetzen sind.

## 6 Projektierungsbeispiel

Ein Sensorsystem soll wasserdicht sein (Leckrate 0,6 ml/min) und wird bei einem Druck von 100 mbar getestet. Das Verdrängungsvolumen des montierten Sensorsystems (Außenmaße: 2 cm x 4 cm x 1,5 cm) beträgt 12 cm<sup>3</sup>. Das System ist gekapselt. Das Prüfteil muss somit in einer Haube geprüft werden. Der Steckerbereich ist dicht und wird in der Haube nicht abgedichtet. Das mit Luft befüllbare innere Volumen des Prüfteils beträgt 30 % des

Verdrängungsvolumens, entsprechend 3,6 cm<sup>3</sup>. Dieses Volumen wird im Fall eines Groblecks gefüllt. Die Montagetoleranz in x-, y- und z-Richtung beträgt jeweils +/- 0,15 mm.

Dadurch ergeben sich ein Verdrängungsvolumen von 12,257 cm<sup>3</sup> bei einem Prüfteil mit Maximaltoleranz und ein Verdrängungsvolumen von 11,747 cm<sup>3</sup> bei einem Prüfteil mit Minimaltoleranz. Das „Toleranzatmen“ beträgt 0,51 cm<sup>3</sup> und ist geringer ist als das im Grobleckfall befüllte Innenvolumen von 3,6 cm<sup>3</sup>. Damit ist die Erkennung von Groblecks messtechnisch möglich.

Bei der Auslegung der Prüfhaube sind Montagetoleranzen und Handlingsaspekte zu berücksichtigen. In diesem Fall eignet sich ein umlaufendes Spaltmaß von +0,5 mm zwischen Haube und nominal dimensioniertem Prüfteil. Damit ergibt sich ein Leervolumen der Haube von 13,776 cm<sup>3</sup>.

Es wurde ein internes Reservoirvolumen von 20 cm<sup>3</sup> in das Prüfgerätes eingebaut.

Der interne Messkreis des Prüfgerätes hat ein Volumen von 6 cm<sup>3</sup>. Die Messleitung (Länge: 1,0 m, Innendurchmesser 4 mm) hat ein Volumen von 12,56 cm<sup>3</sup>.

Die sich unter Berücksichtigung der Prüfteiltoleranzen ergebenden rechnerisch ermittelten Werte sind in **Tabelle 2** dargestellt.

|                                      | Prüfteiltoleranz |             |               |
|--------------------------------------|------------------|-------------|---------------|
|                                      | +/- 0 mm         | +0,15 mm    | -0,15 mm      |
| Haubenleervolumen                    | 13,776 ml        | 13,776 ml   | 13,776 ml     |
| Verdrängungsvolumen                  | 12,000 ml        | 12,257 ml   | 11,747 ml     |
| Haubenrestvolumen                    | 1,776 ml         | 1,519 ml    | 2,029 ml      |
| Reservoirvolumen                     | 20 ml            | 20 ml       | 20 ml         |
| Leitungsvolumen                      | 12,56 ml         | 12,56 ml    | 12,56 ml      |
| Messkreisvolumen                     | 6 ml             | 6 ml        | 6 ml          |
| Reservoirfülldruck $p_1$             | 200 mbar         | 200 mbar    | 200 mbar      |
| Haubendruck $p_2$ für Nicht-Grobleck | 99,0 mbar        | 100 mbar    | 99,5 mbar     |
| Verhältnis $p_2/p_1$ Nicht-Grobleck  | 49,58 %          | 49,90 %     | 49,27 % (2)   |
| Verhältnis $p_2/p_1$ Grobleck        | 45,52 %          | 45,79 % (1) | 45,26 %       |
| Leckrate                             | 0,6 ml/min       | 0,6 ml/min  | 0,6 ml/min    |
| Prüfvolumen                          | 20,336 ml        | 20,079 ml   | 20,589 ml     |
| Druckverlustgradient $dp/dt$         | 49,2 Pa/s        | 49,89 Pa/s  | 48,6 Pa/s (3) |

**Tabelle 2** Druckverhältnisse und Druckverlustgradienten für die verschiedenen Toleranzen des Prüfteils [5]

Da während des Produktionsprozesses die exakten Toleranzen der Serienteile nicht bekannt sind, gilt es eine für alle erlaubten Toleranzlagen passende Prüfgeräteeinstellung festzulegen. Hierzu dienen die in **Tabelle 2** aufgeführten Werte:

Prüfteile, bei denen ein Druckverhältnis kleiner als 45,79 % (1) gemessen wird, sind Grobleckteile.

Alle Prüfteile, bei denen sich bei der Grobleckprüfung ein Druckverhältniswert größer als 49,27 % (2) einstellt, haben kein Grobleck.

Somit beträgt die Differenz der Druckverhältnisse zwischen einem Grobleckteil und einem Nicht-Grobleckteil mindestens 3,48 % (= 49,27 % - 45,79 %). Bei Prüfteiltol-

leranzen innerhalb von  $\pm 0,15$  mm ist somit eine eindeutige Unterscheidung zwischen Grobleck und Nicht-Grobleck möglich.

In der Praxis legt man die Bewertungsgrenze in diesem Beispiel auf 47 %. Alle Prüfteile, die bei der Grobleckprüfung ein Druckverhältnis größer als 47 % aufweisen, haben kein Grobleck. Bei diesen schließt sich die Feinleckprüfung an, und es wird gemessen, ob der Druckverlustwert innerhalb der erlaubten Toleranz liegt.

Da der Haubendruck von der Toleranz des Prüfteils abhängt, wird der Druck in einer Nachfüllphase und vor der Feinleckprüfung auf den Prüfdruck von 100 mbar nachge-regelt. Damit findet die Feinleckprüfung immer bei dem gleichen Druck statt.

Anhand **Tabelle 2** ist ersichtlich, dass der Druckgradient vom Haubenrestvolumen, d.h. Haubenvolumen minus Verdrängungsvolumen des Prüfteils abhängt. Sicherheits-halber wird der kleinste Druckgradient von 48,6 Pa/s (3) zugrunde gelegt. Für ein prozesssicheres Signal (d.h. wenn ein  $C_g$ -Wert  $> 1,33$  gefordert ist) werden in der Praxis ca. 30 bis 40 Pa benötigt. Damit ist von einer reinen Messzeit in der Größenordnung von ca. 1 s auszugehen. In diesem Beispiel ergibt sich die Gesamtprüfzeit aus der Summe der Phasenzeiten aus Reservoirfüllen (1 s), Umfluten (1,5 s), Nachfüllen auf 100 mbar (1 s), Stabilisieren (1,5 s), Mes-sen (1 s), Entlüften (0,5 s). Somit beträgt die Gesamtprüf-zeit, bestehend aus Grobleckerkennung und Feinleckprü-fung unter Berücksichtigung der Prozesssicherheit, insge-samt ca. 7 s (inkl. interner Delayzeiten des Prüfgerätes).

Aufgrund des Druckgradienten in der Größenordnung von ca. 49 Pa/s und einer Differenz von ca. 3,5 % zwischen einem Grobleckteil und einem Nicht-Grobleckteil kann ein Dichtheitsprüfgerät mit Überdrucksensor eingesetzt werden. Hierbei wird der Überdrucksensor zur Überwachung des Prüfdruckes und für den Groblecktest sowie im hoch-auflösenden Modus für die Druckverlustmessung verwen-det.

Sollen hingegen Druckgradienten in der Größenordnung von 1 bis 30 Pa/s gemessen werden, so ist der Einsatz eines Dichtheitsprüfgerätes mit Differenzdrucksensor notwen-dig.

## 7 Praxistipps

Wenn das Toleranzatmen größer ist als das im Grobleckfall innen befüllbare Volumen, so lässt sich keine passende Prüfgeräte-einstellung hinsichtlich der eindeutigen Erkenn-barkeit von Grobleck- und Nicht-Grobleck-Prüfteilen fin-den. Diese Prüfaufgabe ist dann technisch nicht machbar. In derartigen Fällen ist zu prüfen, ob die Produktoleranzen verkleinert und damit das Toleranzatmen verringert wer-den kann.

Die Auflösung und die Taktzeit bei der Prüfung kleinvolu-miger Prüfteile lassen sich durch folgende Maßnahmen op-timieren:

- Verwendung einer Messleitung mit geringerem Innen-durchmesser, vorausgesetzt, dieses behindert den Füll-prozess nicht zu stark. So besitzt eine Messleitung mit 3 mm Innendurchmesser nur 56 % des Volumens einer gleich langen Messleitung mit 4 mm Innendurchmes-ser.

- Einsatz von speziellen geräteinternen Schaltventilen, die einen extrem geringen Schaltkick haben. Hier-durch verringert sich die Zeit bis zum Abklingen die-ser Druckluftstörungen.
- Verringerung der geräteinternen Volumina (Reser-voir- und Messkreisvolumen) durch Einsatz einer al-ternativen Prüfgerätekonfiguration.
- Einsatz einer Haube, die das Prüfteil möglichst eng umfährt. In Abhängigkeit von den Prüfteiltoleranzen ist der Einsatz von Präzisionshauben möglich, die sich bis auf nur 0,2 mm an die Außenkontur des Prüfteils „anschniegen“.
- Wird zur Beurteilung der Druckverhältnisse ein Über-drucksensor eingesetzt, so wird in der Praxis mindes-tens eine Trennung von 0,02 zwischen Grobleck und Nicht-Grobleck benötigt. Wird anstelle des Über-drucksensors ein Differenzdrucksensor zur Messung der Druckverhältnisse  $p_2/p_1$  eingesetzt, verbunden mit einer darauf angepassten Ventilschaltung, so lassen sich noch deutlich geringere Unterschiede in den Druckverhältnissen (Größenordnung 0,003) prozesssi-cher erkennen (wie es mit dem Differenzdruckprüfge-rät CETATEST 515 der Firma CETA Testsysteme GmbH, Hilden, möglich ist).

Um grenzwertige Prüfteile nachzustellen, werden in der Regel kalibrierte Testlecks verwendet. Diese haben bei ei-nem bestimmten Druck einen definierten Durchfluss, der näherungsweise der zulässigen Leckrate entspricht. Test-lecks werden pneumatisch parallel zu einem Masterdichtteil geschaltet und dienen der Simulation eines grenzwertigen Prüfteils. Das Testleck wird auch bei der Ermittlung der Messmittelfähigkeit verwendet.

Der Vollständigkeit halber ist anzumerken, dass Sensor-systeme, die innen vergossen werden, mit dieser Prüfme-thode nicht auf Dichtheit geprüft werden können.

## 8 Literatur

- [1] Übersicht über Dichtheit, Leckraten und Prüfmedien  
Zusammenstellung: CETA Testsysteme GmbH, Hilden
- [2] Prinzip der Druckverlustprüfung  
Diagramm: CETA Testsysteme GmbH, Hilden
- [3] Lichtschrankensensor  
Bildquelle: CETA Testsysteme GmbH, Hilden
- [4] Prinzip der Haubenprüfung  
Diagramm: CETA Testsysteme GmbH, Hilden
- [5] Druckverhältnisse und Druckverlustgradienten für verschiedene Toleranzen des Prüfteils  
Berechnungen: CETA Testsysteme GmbH, Hilden