

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Anwendungshinweis werden First Sensors LBA-Differenzdrucksensoren experimentell mit anderen Sensoren verglichen, die nach dem gleichen Messprinzip arbeiten, bei dem der Differenzdruck mit Hilfe der thermischen Massendurchflussmessung einer kleinen Luftströmung durch den Sensor bestimmt wird. Bei der Messung von feuchter Luft verlieren alle Vergleichssensoren mit Strömungswiderständen von 15 Pa/(ml/s) bis 300 Pa/(ml/s) ihre Kalibration oder fallen komplett aus. Die LBA-Differenzdrucksensoren mit Strömungswiderständen von >10 kPa/(ml/s) benötigen aufgrund ihres sehr kleinen, im Silizium-Chip integrierten Strömungskanals 100- bis 1000-fach weniger feuchte Luft zur Durchführung der Messungen und behalten ihre spezifizierte Messgenauigkeit über die gesamte Testdauer.

1 EINFÜHRUNG

Die LBA-Niedrigst drucksensoren ab 25 Pa (0,25 mbar) Messbereichsendwert bestimmen den Differenzdruck (ΔP) über die Messung einer sehr kleinen Gasströmung durch einen im Sensorchip integrierten Strömungskanal mit sehr hoher pneumatischer Impedanz. Die Sensoren nutzen dabei das Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung auf MEMS-Ebene. Neben dem Strömungskanal und dem Messelement enthält der Silizium-Sensorchip eine komplette analoge CMOS-Signalaufbereitung.

2 DURCHFLUSSBASIERTE DIFFERENZDRUCKSENSOREN

Aufgrund des Messprinzips kommt es bei durchflussbasierten Differenzdrucksensoren während des Betriebs zu einer Gasströmung durch den Sensor. Dies gilt für alle Differenzdrucksensoren die auf dem Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung beruhen, im Gegensatz zu piezoresistiven Drucksensoren, bei denen das zu messende Gas auf eine undurchlässige Membran aus Silizium trifft. Wegen ihrer hohen Messempfindlichkeit werden durchflussbasierte Sensoren erfolgreich zur präzisen und kostengünstigen Messung kleinster Differenzdrücke von wenigen Millibar eingesetzt.

Für die jeweilige Anwendung muss entschieden werden, wie viel Durchfluss durch den Sensor zulässig ist. Dies hängt stark davon ab, wie der ΔP -Sensor in der Anwendung eingebaut und genutzt wird.

Unter Umständen können durchflussbasierte Niedrigst-Differenzdrucksensoren von anderen pneumatischen Komponenten wie Verbindungsschläuchen und Filtern gestört werden. Einige Hersteller empfehlen daher bestimmte maximale Schlauchlängen oder geben Korrekturformeln an, um die Kalibration des Sensors zu gewährleisten. Außerdem kann staubbeladene oder feuchte Luft einen negativen Einfluss auf das Messergebnis haben. Manche Sensoren verwenden daher interne Filter bzw. Staubfallen.

Entwickler von Systemen und Geräten, die Differenzdrucksensoren nach dem Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung einsetzen, müssen die Auswirkungen der Strömung durch den Sensor berücksichtigen um die Genauigkeit und Langlebigkeit ihrer Produkte zu gewährleisten. Leider gibt es zu diesem Thema keine standardisierten Test- oder Zertifizierungsverfahren und meist auch keine genauen technischen Informationen. Die Tests in diesem Bericht wurden durchgeführt um deutlich zu machen, welche grundlegende Bedeutung die Strömung durch durchflussbasierte Differenzdrucksensoren für den verlässlichen Betrieb unter realen Umgebungsbedingungen hat.

Hinweis:

Die pneumatische Impedanz R_{pn} des Sensors, gemessen in [kPa/(ml/s)], bestimmt den Gasfluss durch den Sensor bei einem bestimmten Druckabfall ΔP_s über dem Sensor:

$$\text{Gasfluss durch den Sensor} = \frac{\Delta P_s}{R_{pn}}$$

3 DURCHFLUSSMESSUNG MIT DIFFERENZDRUCKSENSOREN

Durchflussbasierte Differenzdrucksensoren werden häufig zur Messung von Druckdifferenzen genutzt, die durch Gasströmungen in Rohrleitungen und Strömungskanälen verursacht werden. Beispiele sind die Bestimmung des Atemflusses in der Medizintechnik sowie die Messung von Luftströmungen oder die Filterüberwachung in der Klimatechnik.

Der Sensor wird in einem Nebenzweig (Bypass) zur Hauptströmungsleitung eingesetzt und misst den Druckabfall $\Delta P = P_1 - P_2$ über einem Strömungselement wie in Bild 1 gezeigt. Der Druckabfall ist dabei ein Maß für den Volumendurchfluss durch die Hauptleitung. Es gibt verschiedene Elemente zur Erzeugung eines künstlichen Druckabfalls: Blenden, laminare Strömungselemente, Pitotrohr oder Venturidüse. In der Spirometrie kommen spezielle Pneumotachographen (z.B. nach Fleisch oder Lilly) zum Einsatz.

Die Differenzdrucksensoren der LBA-Serie bieten sehr hohe pneumatische Widerstände von >10 bis >100 kPa/(ml/s) abhängig vom jeweiligen Druckbereich. Grundsätzlich brauchen die LBA-Sensoren daher viel weniger Bypass-Strömung für die Druckmessung und stören so die Hauptströmung auch viel weniger als Sensoren mit einem geringeren pneumatischem Widerstand. Dies macht die LBA-Differenzdrucksensoren in dieser für viele Anwendungen wichtigen Eigenschaft vergleichbar mit membranbasierten Drucksensoren.

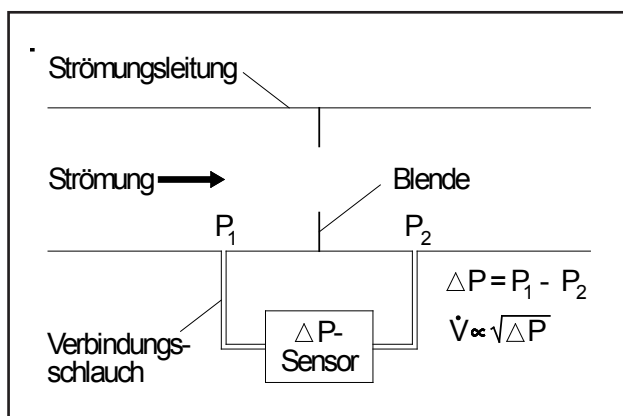


Bild 1: Typische Anordnung zur Durchflussmessung nach dem Differenzdruckverfahren

4 GEFAHR DURCH FEUCHTIGKEIT

In manchen Anwendungen enthält das zu messende Gas eine beträchtliche Menge Feuchtigkeit. Außerdem kann die Temperatur des Gases höher sein als die Umgebungstemperatur. Ein Beispiel sind medizintechnische Anwendungen zur Messung des Atemflusses. Hier atmet der Patient feuchte Luft aus, die normalerweise wärmer ist als die Umgebung bzw. das Beatmungsgerät und es kann zu Kondensation an den Innenflächen von Strömungskanälen, Verbindungsschläuchen, Verbindungsstücken und anderen Elementen kommen. Kleine Wassertröpfchen können sich zusammenschließen und größere Tropfen oder sogar Wasseransammlungen bilden. Dies kann im Hauptströmungskanal, in den Verbindungsschläuchen zum Sensor oder sogar im Sensor selber passieren und die pneumatischen Eigenschaften des Messgeräts verändern. Im schlimmsten Fall kommt es zu einer Verstopfung und damit zu einem Totalausfall des Sensors.

Im Allgemeinen stellt Feuchtigkeit im Gasstrom eine Sicherheitsgefahr in Bezug auf die Verlässlichkeit und den Betrieb des Messsystems dar. Die Größe der Gefahr hängt allerdings stark vom Strömungswiderstand (pneumatische Impedanz) des Sensors ab.

5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VON FEUCHTIGKEIT

Um die Gefahr von Feuchtigkeit für durchflussbasierte Differenzdrucksensoren zu untersuchen wurden verschiedene Vergleichstests durchgeführt.

Der Versuchsaufbau wurde so gewählt, dass einstellbare und reproduzierbare Bedingungen für die verschiedenen Tests möglich waren. Mehrere durchflussbasierte ΔP -Sensoren mit unterschiedlichen pneumatischen Widerständen wurden parallel angeschlossen, so dass sie jeweils gleichen Differenzdrücken und Testbedingungen ausgesetzt waren.

5.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau in Bild 2 erzeugte annähernd 100 % Luftfeuchtigkeit in einem Testvolumen innerhalb eines Kunststoffschlauchs mit 2 cm Innendurchmesser. Das Testvolumen wurde von einem typischen Haushalts-Luftbefeuchter gespeist. Das andere Ende des Schlauchs wurde über einen Strömungswiderstand mit einem Gebläse verbunden. Als durchflussbegrenzender Strömungswiderstand diente ein engerer Kunststoffschlauch mit einem Innendurchmesser von 1/16 inch (1,6 mm) und einer Länge von ~5 cm. Um eine Verstopfung zu verhindern, wurde ein Sammelbehälter für Wasser mit einem Volumen von 1,5 l vor dem engeren Schlauch angebracht. Das Testvolumen wurde mit jeweils einem Druckanschluss der untersuchten Differenzdrucksensoren verbunden.

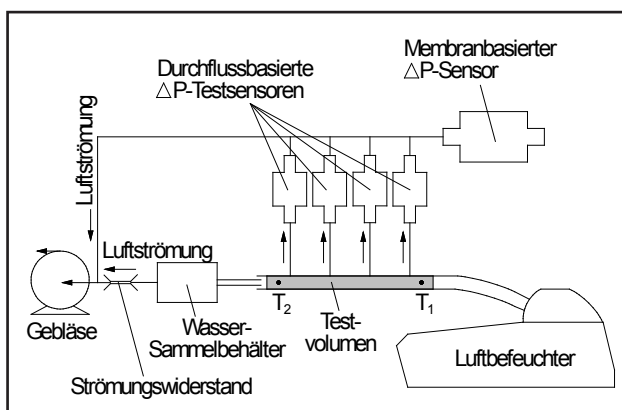


Bild 2: Darstellung des Versuchsaufbaus

Die Versuchsanordnung war so ausgelegt, dass der Druck im Testvolumen nahezu dem Umgebungsdruck entsprach, während das Gebläse langsam feuchte Luft vom Befeuchter ins Testvolumen zog.

Die Temperatur der befeuchteten Luft direkt am Ausgang des Luftbefeuchters betrug 90 °C und war damit zu hoch für einen einwandfreien Betrieb der Sensoren. Daher wurde das Testvolumen ca. 25 cm entfernt vom Befeuchter angebracht. Die Temperaturen T_1 (am Eingang des Testvolumens) und T_2 (am Ende des Testvolumens) wurden im Testvolumen mit zwei Heißleitern (NTC-Widerständen) gemessen. Die Temperaturverteilung innerhalb des Testvolumens hängt von der durch das Gebläse erzeugten Strömung ab. Bei ausgeschaltetem Gebläse entsprach die Temperatur im Testvolumen nahezu der Umgebungstemperatur.

5.2 Testverfahren

Die untersuchten Sensoren wurden parallel zueinander betrieben wie in Bild 2 gezeigt. Ein Druckanschluss war mit dem Testvolumen verbunden, der andere Druckanschluss über einen weiteren Schlauch direkt mit dem Gebläse (ohne ein durchflussbegrenzendes Strömungselement). Durch diese Anordnung waren die Sensoren einem Differenzdruck ausgesetzt, der feuchte Luft durch die Sensoren fließen ließ.

Der an den untersuchten Sensoren anliegende Differenzdruck ΔP wurde von einem membranbasierten Differenzdrucksensor überwacht. Ein Druckanschluss dieses Sensors war offen gegenüber Atmosphärendruck. Das Sensorausgangssignal wurde in einem elektronischen Regelkreis zur Regelung des Gebläses genutzt um während der Tests einen konstanten Differenzdruck ΔP zu gewährleisten.

Die getesteten Differenzdrucksensoren wurden vertikal über dem Testvolumen angeordnet, so dass die feuchte Luft nach oben strömen musste um die Sensoren zu erreichen. Hierdurch wurde verhindert, dass Kondenswasser in die Sensoren fließen konnte.

LBA-Differenzdrucksensoren: sehr unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit

5.3 Getestete Sensoren

Die folgenden handelsüblichen Differenzdrucksensoren verschiedener Hersteller wurden getestet:

- First Sensors LBA-Sensor mit Druckmessbereich 0...250 Pa, pneumatischem Widerstand ~80 kPa/(ml/s) und Ausgangssignal 0.5...4.5 V.
- Bezeichnung: **LBAS250UF6S**
- First Sensors LBA-Sensor mit Druckmessbereich 0...50 Pa, pneumatischem Widerstand ~30 kPa/(ml/s) und Ausgangssignal 0.5...4.5 V.
- Bezeichnung: **LBAS050UF6S**
- Sensor von Hersteller #1 mit Druckmessbereich -20...+500 Pa, pneumatischem Widerstand ~300 Pa/(ml/s) und Ausgangssignal 0.25...4.25 V.
- Bezeichnung: **Sensor 1-1**
- Sensor von Hersteller #2 mit Druckmessbereich 0...±20 Pa, pneumatischem Widerstand ~15 Pa/(ml/s) und Ausgangssignal ±70 mV.
- Bezeichnung: **Sensor 2-1**

6 TEST #1

Im ersten Test wurden alle vier Sensoren über 10 cm lange Kunststoffschläuche mit einem Innendurchmesser von 1/8 inch (3,2 mm) mit dem Testvolumen verbunden. Bild 3 zeigt die während des Tests gemessenen Sensorausgangssignale. Der angewandte Differenzdruck ΔP über den Sensoren betrug gleichbleibend ca. 230 Pa.

Der Luftbefeuchter und das Gebläse wurden ca. 30 min vor dem Anschließen der Testsensoren angeschaltet. Diese Zeit war nötig, um warme und feuchte Bedingungen im Testvolumen zu erzeugen. Erst danach wurden die Sensoren mit dem Testvolumen verbunden. Schon nach 30 s zeigten sich erste sichtbare Kondensationsspuren an der Innenseite des Verbindungsschlauchs zum Sensor 2-1, dem Sensor mit dem geringsten pneumatischen Widerstand aller vier Testsensoren (siehe Bild 4).

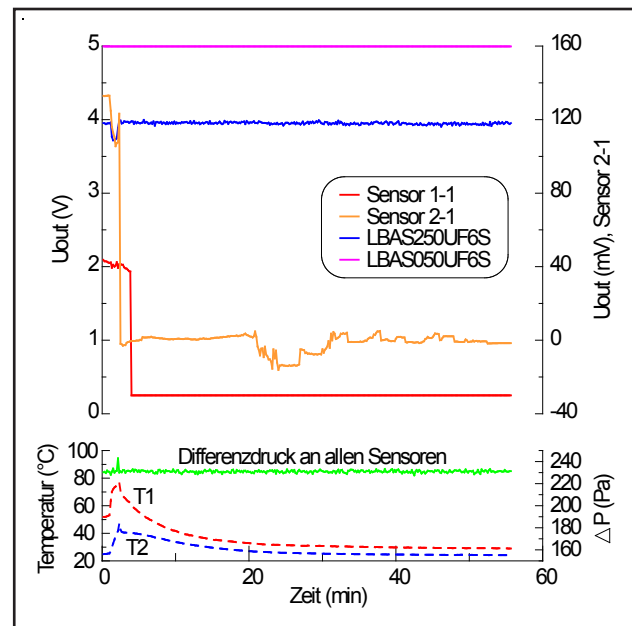


Bild 3: Sensorausgangssignale während Test #1

Nach einer Minute zeigte Sensor 2-1 einen plötzlichen Abfall des Ausgangssignals (während der membranbasierte Drucksensor weiterhin einen gleich bleibenden Druck anzeigte). Nach einer weiteren Minute mit unregelmäßigem Signalverhalten fiel die Ausgangsspannung dramatisch von ~120 mV bis auf ~0 mV, verursacht durch eine sichtbare Verstopfung des Verbindungsschlauchs mit Kondenswasser.

Die Verstopfung des Sensors 2-1 verursachte einen plötzlichen Temperaturanstieg im Testvolumen sowie eine kurze Druckspitze bis die Gebläseregelung wieder einen konstanten Differenzdruck ΔP einstellte (siehe unteres Diagramm in Bild 3).

Auch Sensor 1-1 verlor schnell seine Funktion (nach ~4 min). Seine Ausgangsspannung fiel auf null, wiederum verursacht durch eine sichtbare Verstopfung des Verbindungsschlauchs mit Kondenswasser (siehe Schlauchanschluss am Testvolumen in Bild 5 ganz links).

LBA-Differenzdrucksensoren: sehr unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit

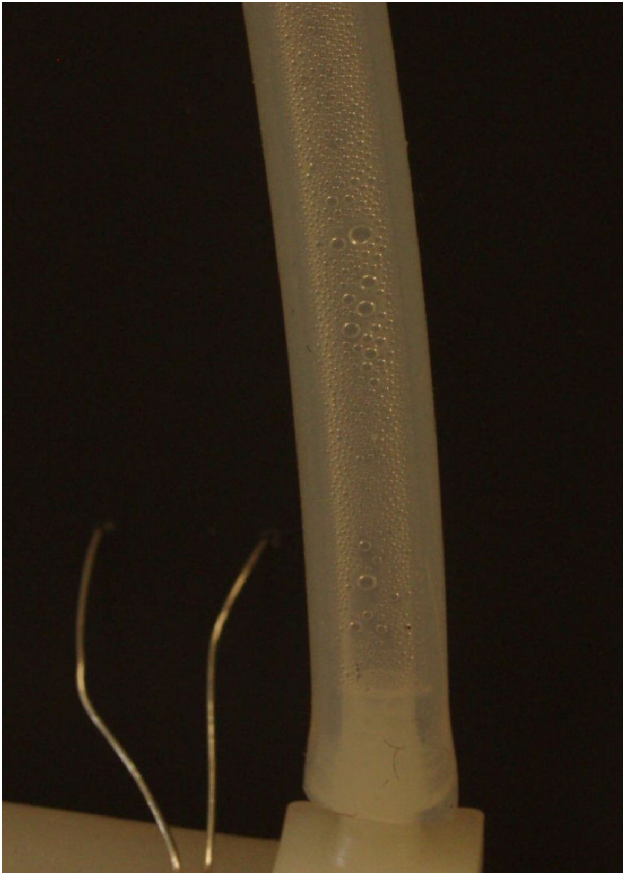


Bild 4: Verbindungsschlauch zum Sensor 2-1
~30 s nach Beginn von Test #1

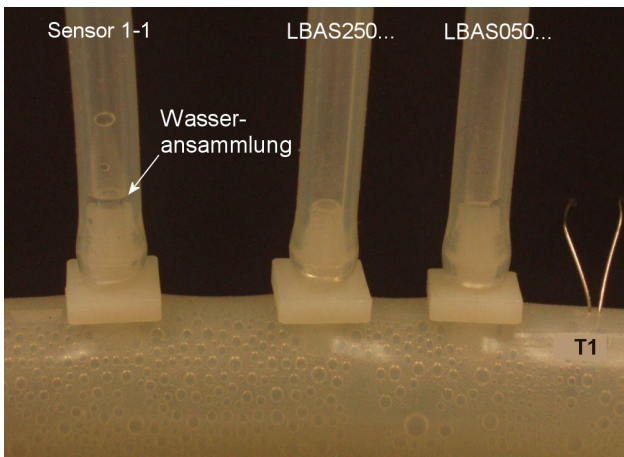


Bild 5: Verbindungsschläuche ~10 min nach Beginn
von Test #1

Bild 5 wurde nach Abschluss von Test #1 aufgenommen. Die beiden rechten Schläuche, die zu den LBA-Sensoren LBAS250UF6S und LBAS050UF6S führen, zeigen keine Wasseransammlungen am Anschluss zum Testvolumen. Desweiteren konnte während des gesamten 55 minütigen Tests keine Kondensation in den Verbindungsschläuchen zu den LBA-Sensoren beobachtet werden.

Der Sensor LBAS250UF6S zeigte während des gesamten Tests ein gleich bleibendes Ausgangssignal, das seiner kalibrierten Messgenauigkeit entsprach. Das Ausgangssignal des LBAS050UF6S-Sensors war gesättigt, da der im Test verwendete Differenzdruck ΔP über seinem Messbereich von 50 Pa lag.

7 TEST #2

In einem zweiten Test wurde versucht, Sensor 1-1 einen Vorteil zu verschaffen und gleichzeitig die LBA-Sensoren zu benachteiligen. Der Innendurchmesser des Verbindungsschlauchs zum Sensor 1-1 wurde auf 1/4 inch (6,4 mm) verdoppelt. Die Innendurchmesser der Verbindungsschläuche zu den beiden LBA-Sensoren betrug unverändert 1/8 inch (3,2 mm), wurden allerdings von 10 cm auf 3 cm gekürzt, so dass sich die Sensoren näher am Testvolumen befanden. Sensor 2-1 wurde in Test #2 nicht getestet.

Mit dem breiteren Verbindungsschlauch wurde beabsichtigt, Sensor 1-1 weniger anfällig gegen Verstopfung durch Wasseransammlungen zu machen, da der größere Schlauchdurchmesser am Anschluss zum Testvolumen mehr Kondenswasser aufnehmen kann ohne zu verstopfen.

Bild 6 zeigt die Ausgangssignale der Sensoren während Test #2. In Bild 7 sieht man die zunehmende Verstopfung des 1/4 inch-Verbindungsschlauchs zum Sensor 1-1.

Wie erwartet funktionierte Sensor 1-1 in Test #2 länger als in Test #1. Erst nach ca. 60 Minuten verstopften Wasseransammlungen den Verbindungsschlauch am Anschluss zum Testvolumen und das Ausgangssignal fiel stark ab. Schon nach ca. 20 bzw. 40 Minuten waren kurzzeitig geringere Signalabfälle zu beobachten (bei konstantem Differenzdruck ΔP der Versuchsanordnung). Diese Abfälle des Ausgangssignals können erklärt werden durch eine teilweise Verstopfung bzw. Verengung entweder des Verbindungsschlauchs oder der inneren Strömungskanäle des Sensors durch Kondenswasser. Da der Sensor kontinuierlich von Luft durchströmt wird, können geringere Wasseransammlungen durch die Strömung jedoch wieder aufgelöst bzw. entfernt werden. Dies erklärt den kurzzeitigen Abfall und die anschließende Wiederherstellung des Ausgangssignals auf den vollen Signalwert (ca. 2 V bei einem Differenzdruck $\Delta P \approx 230$ Pa).

Wie schon in Test #1 zeigten beide LBA-Sensoren auch in Test #2 mit gekürztem Verbindungsschlauch keine Anzeichen einer Verstopfung oder Signalverschlechterung während der gesamten 2-stündigen Testdauer.

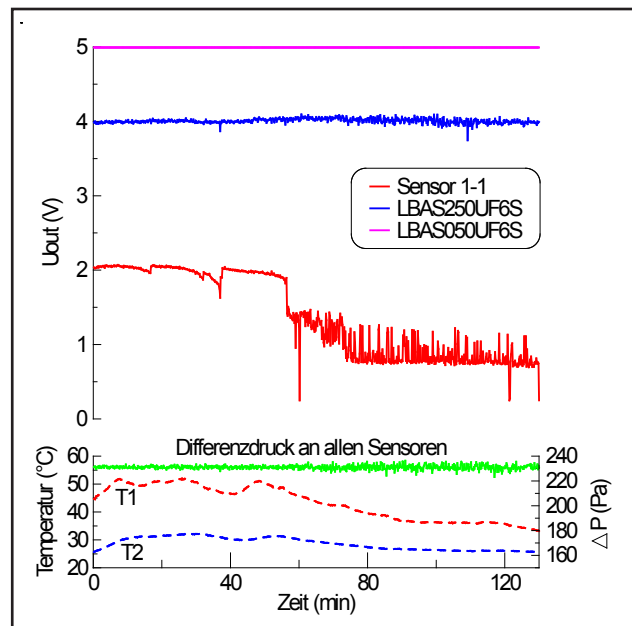


Bild 6: Sensorausgangssignale während Test #2

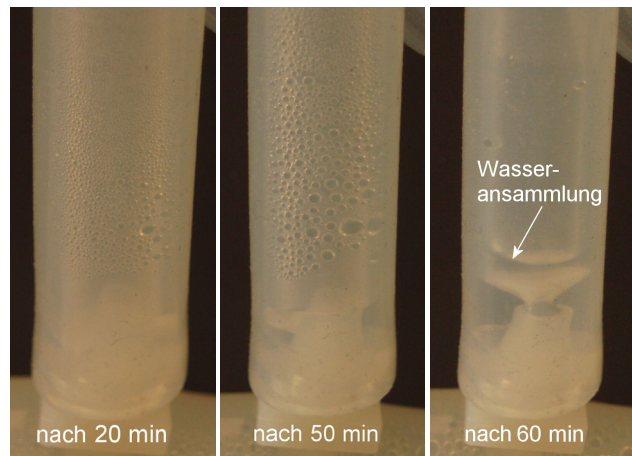


Bild 7: Verstopfung des 1/4 inch-Verbindungsschlauchs zum Sensor 1-1 während Test #2

DISKUSSION

Die hier durchgeführten Tests unterstreichen die Bedeutung eines hohen Strömungswiderstands von durchflussbasierten Differenzdrucksensoren für den zuverlässigen Betrieb in Anwendungen zur Messung von warmer und feuchter Luft.

In beiden Tests, #1 und #2, wurden die LBA-Sensoren absichtlich an der wärmeren Seite des Testvolumens angeschlossen und waren dadurch der Luft mit dem höchsten Feuchtigkeitsgehalt ausgesetzt. Trotz dieses Nachteils konnte während der 1- bis 2-stündigen Tests keine sichtbare Kondensation in den Verbindungsschläuchen der LBA-Sensoren beobachtet werden und die Sensoren maßen während der gesamten Zeit den Differenzdruck ΔP der Versuchsanordnung korrekt.

Darüber hinaus wurde in Test #2 der Abstand der LBA-Sensoren zum Testvolumen von 10 cm auf 3 cm verkürzt. Auch unter diesen erschwerten Bedingungen zeigten die LBA-Sensoren keine Einschränkung ihrer Messgenauigkeit.

Die Tests #1 und #2 zeigen deutliche Unterschiede in der Funktion und Leistung der Sensoren abhängig von ihrem Strömungswiderstand. Ist der pneumatische Widerstand niedrig, fließen größere Mengen Luft durch den Sensor und seine Verbindungsschläuche. Bei hoher Luftfeuchtigkeit sind die Schläuche daher anfällig für Kondensation. Weiterhin können Wasseransammlungen an den Verbindungsstellen zu Verstopfungen und einem Ausfall der Sensoren führen.

Weiterhin ließen sich auch an den Wänden des Testvolumens größere Wassertropfen beobachten, die aus der Hauptströmung kondensierten (siehe Bild 5). Diese Wassertropfen könnten jeden Verbindungsschlauch verstopfen, z.B. indem sie sich durch die Schwerkraft oder Oberflächenspannung verbinden und verschieben. Auch wenn dies hier nicht beobachtet wurde, könnte dieser Effekt jeden Sensor treffen, unabhängig von seinem Strömungswiderstand. Daher liegt die Verantwortung zur Vermeidung dieser Art der Kondensation beim Entwickler des Messsystems bzw. Geräts.

SCHLUSSBETRACHTUNG

Für Differenzdrucksensoren nach dem Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung, die auf einer Gasströmung durch den Sensor beruhen, ist der pneumatische Widerstand des inneren Strömungskanals des Sensors entscheidend für ihre Beständigkeit gegenüber Kondensation und Verstopfung.

First Sensors LBA-Differenzdrucksensoren mit Strömungswiderständen von >10 kPa/(ml/s) wurden in einer Anwendung zur Messung von feuchter Luft experimentell mit zwei anderen Sensoren verglichen, die nach dem gleichen Messprinzip arbeiten, aber viel niedrigere Strömungswiderstände von ~ 15 Pa/(ml/s) bzw. ~ 300 Pa/(ml/s) besitzen. In allen Tests verloren die Vergleichssensoren schon nach weniger als einer Stunde ihre Kalibration oder fielen komplett aus. Die LBA-Sensoren zeigten keine Veränderung ihrer kalibrierten Messgenauigkeit über die gesamte Dauer der Versuche.

Der hohe Strömungswiderstand reduziert die Menge feuchter Luft, die durch den Sensor und seine Verbindungsschläuche fließt und damit auch die Menge an Feuchtigkeit die überhaupt kondensieren und möglicherweise die Strömungsleitungen verstopfen könnte.

Je weniger Luftströmung ein durchflussbasierter Drucksensor für seine Messungen benötigt, desto besser ist grundsätzlich sein Verhalten und seine Beständigkeit gegenüber feuchter Luft. First Sensors LBA-Sensoren besitzen einen sehr hohen Strömungswiderstand aufgrund ihres sehr kleinen, im Silizium-Chip integrierten Strömungskanals und bieten daher erhebliche Anwendungsvorteile.

Entwickler von Systemen und Geräten, die Differenzdrucksensoren nach dem thermischen Massendurchflussprinzip einsetzen, werden aufgefordert, ähnliche Tests für ihre speziellen Anwendungen durchzuführen, um die Eignung der Sensoren zu überprüfen.