

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

In diesem Anwendungshinweis werden LDE-Differenzdrucksensoren von First Sensor experimentell mit anderen Sensoren verglichen, die nach dem gleichen durchflussbasierten Messprinzip arbeiten. 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 LDE-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. Dadurch behalten sie ihre spezifizierte Messgenauigkeit über die gesamte Testdauer.

### 1. Einführung

Die LDE/LME/LMI-Niedrigstdrucksensoren ab 25 Pa (0,25 mbar) bestimmen den Differenzdruck ( $\Delta p$ ) durch die Messung einer sehr kleinen Gasströmung durch einen im Sensorchip integrierten Strömungskanal mit sehr hoher pneumatischer Impedanz. Die Sensoren basieren dabei auf dem Prinzip der thermischen

Massendurchflussmessung auf MEMS-Ebene. Neben dem nur ca. 4 mm<sup>2</sup> großen Siliziumchip, der den Strömungskanal und das Messelement enthält nutzen die LDE/LME/LMI-Differenzdrucksensoren einen Mikrocontroller zur internen digitalen 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 durchfluss-basierte 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 zu tolerieren ist. Dies hängt stark davon ab, wie der  $\Delta p$ -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 auf die grundlegende Bedeutung der Strömung durch durchflussbasierte Differenzdrucksensoren für einen verlässlichen Betrieb unter realen Umgebungsbedingungen hinzuweisen.

#### Hinweis:

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

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

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

### 3. Durchflussmessung mit Differenzdrucksensoren

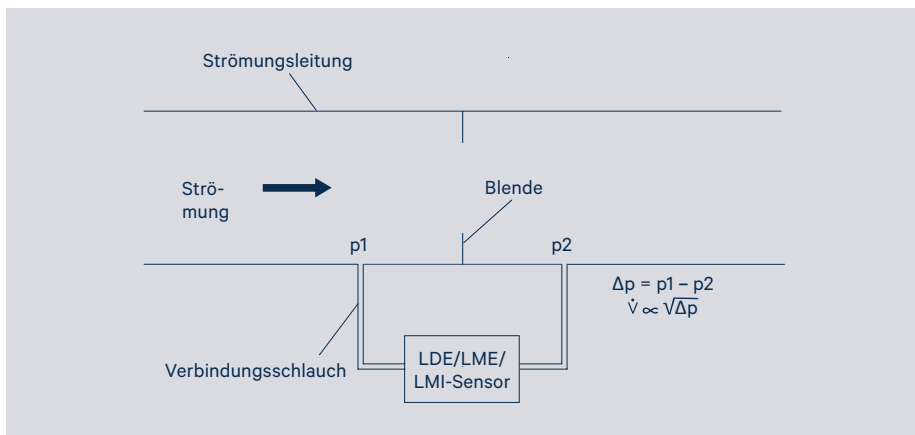
Durchflussbasierte Differenzdrucksensoren werden häufig zur Messung von Druckdifferenzen genutzt, die durch Gasströmungen in Rohrleitungen und Strömungskanälen verursacht werden. Beispiele sind die Bestimmung des Atemflusses in der Medizintechnik sowie die Messung von Luftströmungen oder die Filterüberwachung 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 (**Bild 1**). 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 LDE/LME/LMI-Serie von First Sensor bieten sehr hohe

pneumatische Widerstände von  $>10$  bis  $>100$  kPa/(ml/s) abhängig vom jeweiligen Druckbereich. Grundsätzlich brauchen die 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 LDE/LME/LMI-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 Wassertropfen 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 Verstop-

fung 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.

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

### 5. Experimentelle Untersuchung von durchflussbasierten Drucksensoren in feuchter Luft

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  $\Delta p$ -Sensoren mit

unterschiedlichen pneumatischen Widerständen wurden parallel angeschlossen, so dass sie jeweils gleichen Differenzdrücken und Testbedingungen ausgesetzt waren.

#### 5.1 Versuchsaufbau

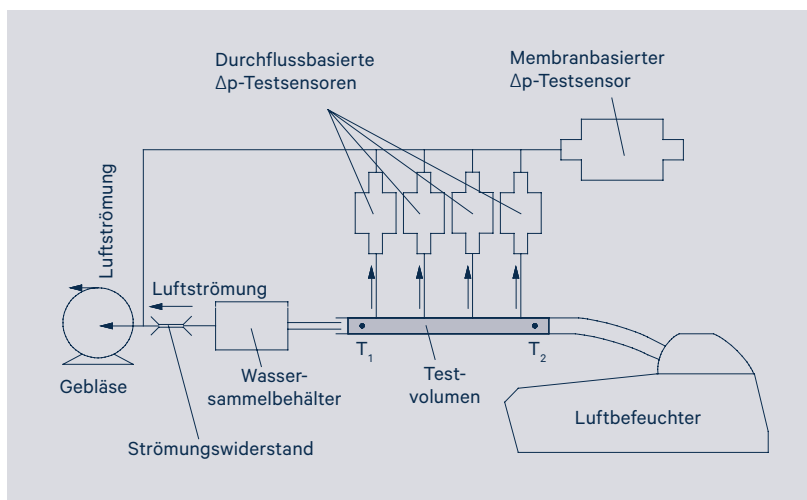
Der Versuchsaufbau in **Bild 2** erzeugte annähernd 100 % Luftfeuchtigkeit in einem Testvolumen innerhalb eines Kunststoffschlauchs mit 2 cm Innendurchmesser. Das Testvolumen wurde von einem typischen Haushalts-Luftbefeuchter gespeist. Das andere Ende des Schlauchs wurde über einen Strömungswiderstand 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.

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.



**Bild 2** Darstellung des Versuchsaufbaus

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

### 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  $\Delta p$  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  $\Delta p$  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.

### 5.3 Getestete Sensoren

Sensor von **First Sensor**

#### LDES250UF6S

Druckmessbereich 0...250 Pa  
 pneumatischem Widerstand ~80 kPa/(ml/s)  
 Ausgangssignal 0,5...4,5 V

Sensor von **First Sensor**

#### LDES050UF6S

Druckmessbereich 0...50 Pa  
 pneumatischem Widerstand ~30 kPa/(ml/s)  
 Ausgangssignal 0,5...4,5 V

Sensor von **Hersteller #1**

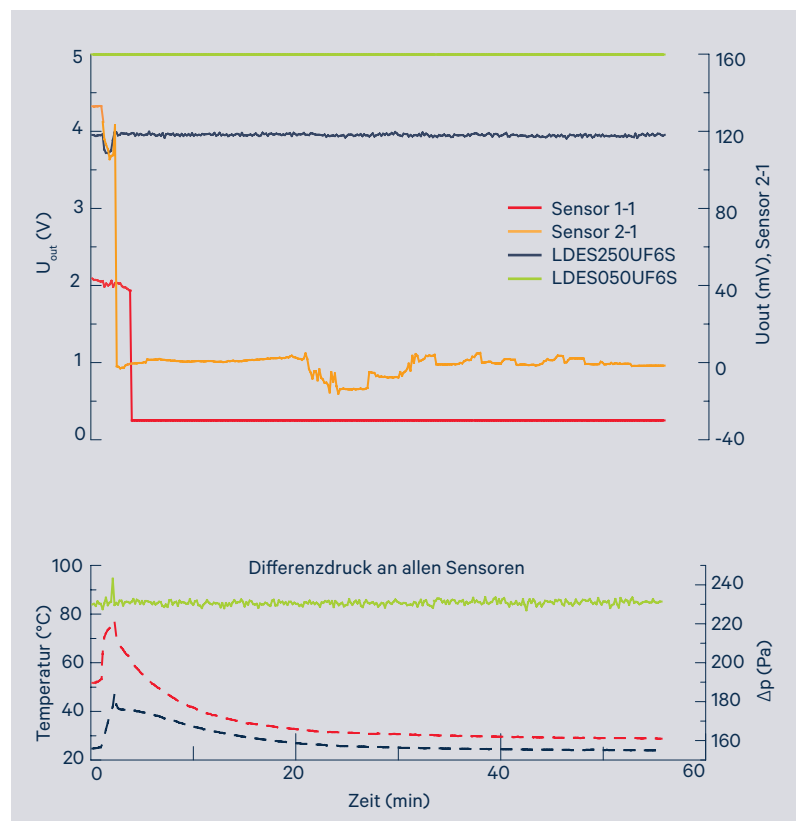
#### Sensor 1-1

Druckmessbereich -20...+500 Pa  
 pneumatischem Widerstand ~300 Pa/(ml/s)  
 Ausgangssignal 0,25...4,00 V

Sensor von **Hersteller #2**

#### Sensor 2-1

Druckmessbereich 0...±20 Pa  
 pneumatischem Widerstand ~15 Pa/(ml/s)  
 Ausgangssignal ±70 mV



**Bild 3** Sensorausgangssignale während Test #1

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

### 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  $\Delta p$  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 Kondensations Spuren an der Innenseite des Verbindungsschlauchs zum Sensor 2-1, dem Sensor mit dem geringsten pneumatischen Widerstand aller vier Testsensoren (**Bild 4**).

Nach einer Minute fiel bei Sensor 2-1 das Ausgangssignal plötzlich ab (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  $\Delta p$  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 sicht-

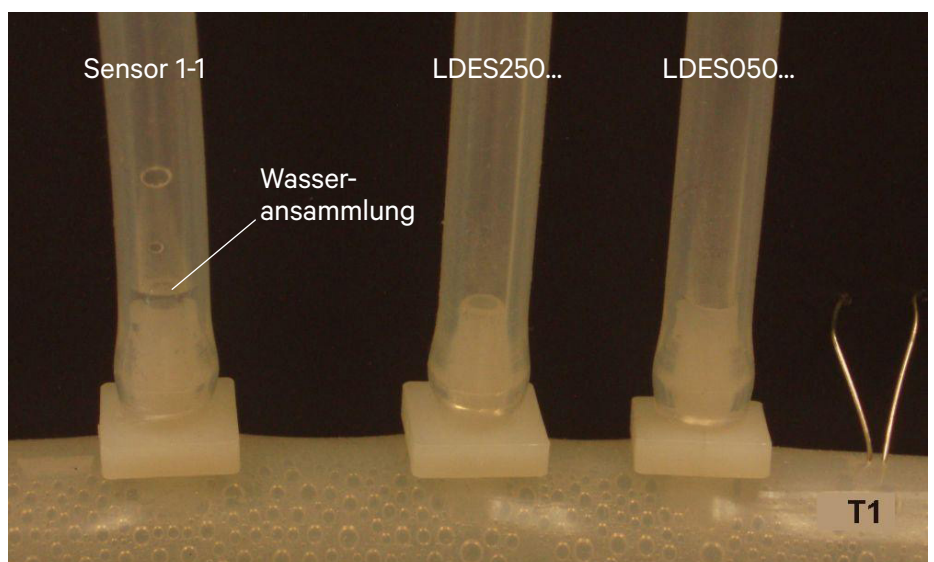
bare Verstopfung des Verbindungsschlauchs mit Kondenswasser (in **Bild 5** ganz links)

**Bild 5** wurde nach Abschluss von Test #1 aufgenommen. Die beiden rechten Schläuche, die zu den LDE-Sensoren LDES250UF6S und LDES050UF6S führen, zeigen keine Wasseransammlungen am Anschluss zum Testvolumen. Desweiteren konnte während des gesamten 55 minütigen Tests keine Kondensation in den Verbindungsschläuchen zu den LDE-Sensoren beobachtet werden.

Der Sensor LDES250UF6S zeigte während des gesamten Tests ein gleich bleibendes Ausgangssignal, das seiner kalibrierten Messgenauigkeit entsprach. Das Ausgangssignal des LDES050UF6S-Sensors war gesättigt, da der im Test verwendete Differenzdruck  $\Delta p$  über seinem Messbereich von 50 Pa lag.



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



**Bild 5** Verbindungsschläuche ~10 s nach Beginn von Test #1

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

### 7. Test #2

In einem zweiten Test wurde versucht, Sensor 1-1 einen Vorteil zu verschaffen und gleichzeitig die LDE-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 LDE-Sensoren betragen 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.

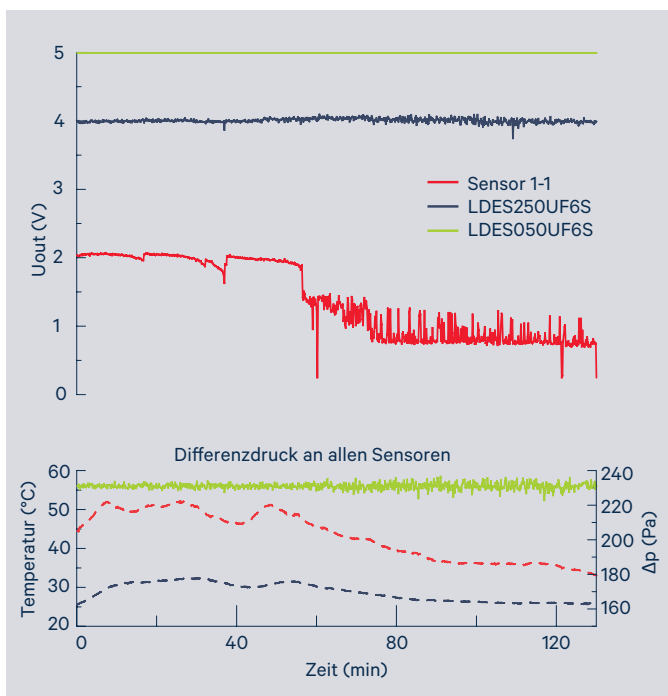
Der breitere Verbindungsschlauch sollte Sensor 1-1 weniger anfällig gegen Verstopfung durch Wasseransammlungen machen, da der größere Schlauchdurchmesser am Anschluss

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.

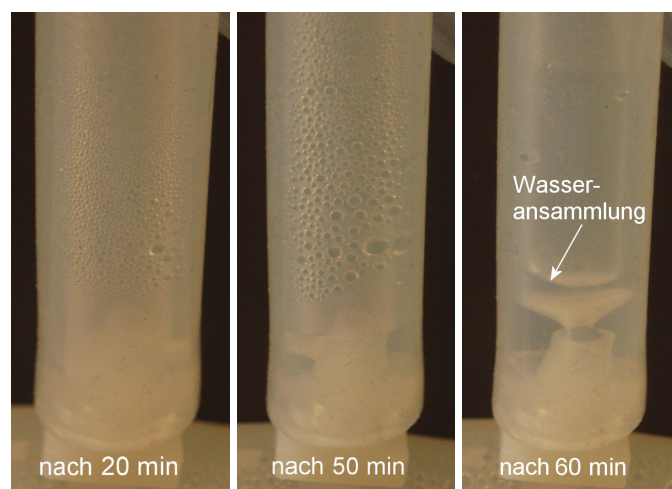
Wie erwartet funktionierte Sensor 1-1 in Test #2 länger als in Test #1. Erst nach ca. 60 Minuten verstopften Wasseransammlungen den Verbindungsschlauch am Anschluss zum Testvolumen und das Ausgangssignal fiel stark ab. Schon nach ca. 20 bzw. 40 Minuten waren kurzzeitig geringere Signalabfälle zu beobachten (bei konstantem Differenzdruck  $\Delta p$  der Versuchsanordnung). Diese Abfälle des Ausgangssignals lassen

sich durch eine teilweise Verstopfung bzw. Verengung entweder des Verbindungsschlauchs oder der inneren Strömungskanäle des Sensors durch Kondenswasser erklären. Da der Sensor kontinuierlich von Luft durchströmt wird, können geringere Wasseransammlungen durch die Strömung 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 LDE-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

## LDE/LME/LMI-Serie – Unempfindlich gegen Feuchtigkeit

---

### 8. 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 LDE-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 LDE-Sensoren beobachtet werden. Die Sensoren maßen während der gesamten Zeit den Differenzdruck  $\Delta p$  der Versuchsanordnung korrekt.

Darüber hinaus wurde in Test #2 der Abstand der LDE-Sensoren zum Testvolumen von 10 cm auf 3 cm verkürzt. Auch unter diesen erschwerenden Bedingungen zeigten die LDE-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.

### 9. 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.

Die LDE-Differenzdrucksensoren von First Sensor 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  $\sim 15$  Pa/(ml/s) bzw.  $\sim 300$  Pa/(ml/s) besitzen. In allen

Tests verloren die Vergleichssensoren schon nach weniger als einer Stunde ihre Kalibration oder fielen komplett aus. Die LDE-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. Die LDE/LME/LMI-Sensoren von First Sensor 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.