

First Sensor 

is now part of

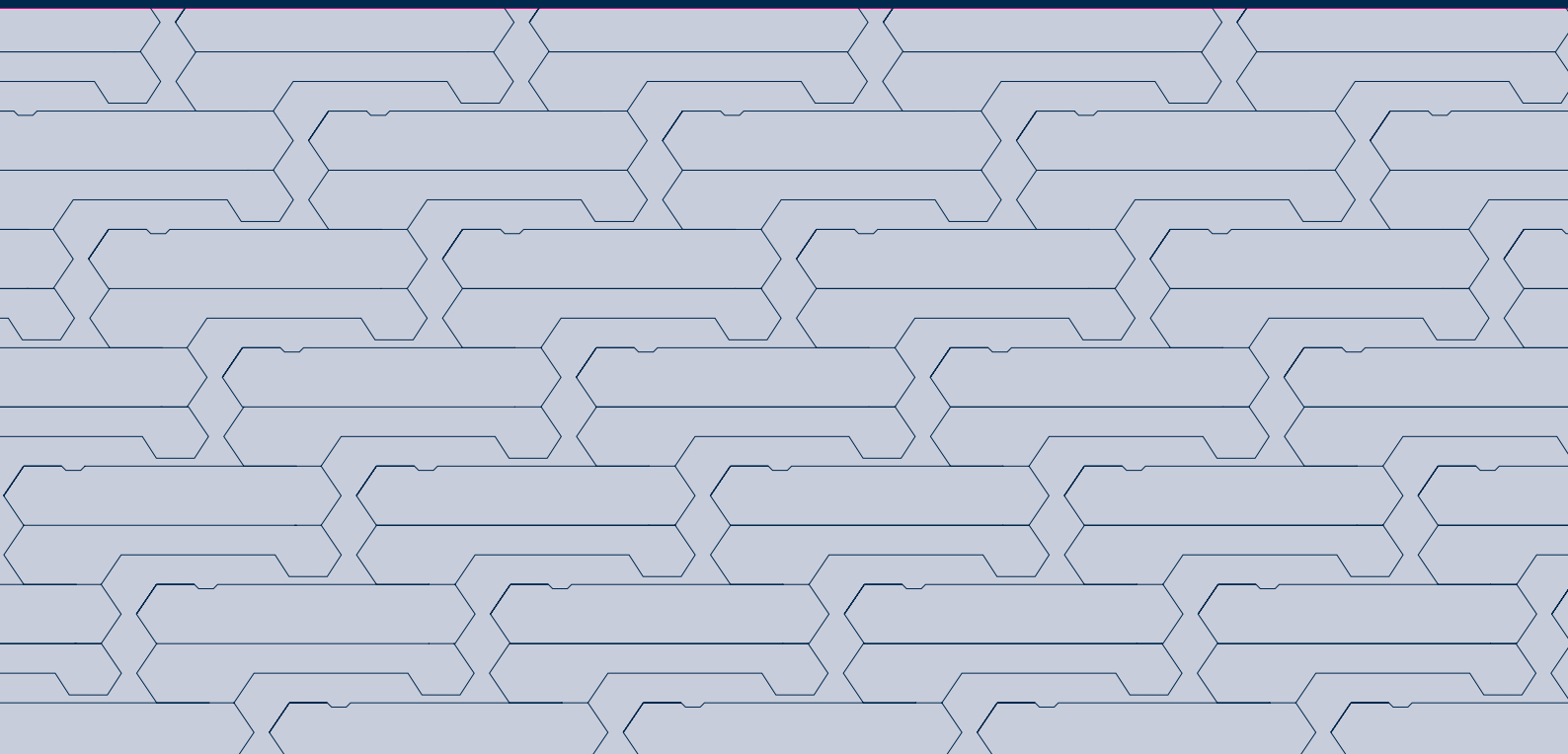


---

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeits- prüfung

---

Anwendungshinweis



# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 1. Einführung

Das physikalische Prinzip der dynamischen oder kalorimetrischen Drucksensoren basiert auf der Messung einer Mikroströmung, die durch einen Strömungskanal innerhalb des Sensorgehäuses strömt. Da sich der Gasstrom durch den Sensor proportional zum angelegten Differenzdruck verhält, kann der Sensor kalibriert und als Drucksensor verwendet werden. Eine Bypass-Verbindung des dynamischen Drucksensors zur Differenzdruckquelle ist für viele Anwendungen typisch. Solche Quellen können Strömungsrohre, Kanäle mit Strömungswiderständen oder Geschwindigkeitssonden sein, die in Abhängigkeit vom

Durchfluss einen Differenzdruck erzeugen. Jedes Mal, wenn in der Quelle ein Differenzdruck erzeugt wird, wird auch der Bypass, der den dynamischen Drucksensor und die Verbindungsrohre enthält, durchströmt. Wenn der Hauptgasstrom Staub enthält, besteht somit physikalisch die Möglichkeit des Transports von Staub zum Sensor, was zum Zusetzen des Strömungskanals führt und die Leistungsfähigkeit des Sensors beeinträchtigt.

Ziel dieser Prüfung ist es, die Eignung von dynamischen Drucksensoren für den Betrieb in staubigen Umgebungen zu untersuchen,

insbesondere unter Bedingungen, die in HLK-Anlagen herrschen. Es ist wichtig, das Risiko eines Sensorausfalls im Zusammenhang mit durch Staub verursachten Zusetzungen abzuschätzen und die Bedingungen für einen sicheren Betrieb und die Langzeitstabilität sowie mögliche Schutzvorkehrungen in extrem staubigen Umgebungen zu bestimmen. Ein weiteres Ziel der Prüfung besteht darin, die Störfestigkeit verschiedener dynamischer Sensoren gegenüber Staub zu vergleichen und zu verstehen, welche Merkmale der Sensor-konstruktion die Stabilität von Sensoren in staubigen Umgebungen verbessern können.

## 2. Allgemeine Anforderungen an den Prüfaufbau für die Staubverträglichkeitsprüfung

- Die Betriebsbedingungen für die geprüften Sensoren sollten den in realen HLK-Umgebungen üblichen Betriebsbedingungen entsprechen.
- Die Konzentration und Art des Staubs im Luftstrom während der Prüfungen müssen mit der Situation in realen HLK-Kanälen vergleichbar sein.
- Beschleunigte Staubverträglichkeitsprüfungen können durchgeführt werden, wenn die volumetrische Staubkonzentration und der Geschwindigkeitsdruck bewusst auf ein höheres Niveau geregelt werden als im „normalen“ Betrieb.

Die angemessene Sauberkeit von HLK-Kanälen wird bekanntermaßen von Regulierungsbehörden festgelegt. So gibt beispielsweise der portugiesische Verband der Kälte- und Klimatechnikbranche APIRAC [sh. Literaturhinweis 1] vor, dass eine angemessene Sauberkeit der Kanäle erreicht ist, wenn die gemessene Konzentration an Oberflächenstaub kleiner als  $1 \text{ g/m}^2$  ist.

HLK = Heizung, Lüftung, Klimatechnik

Die finnische Gesellschaft für Raumluftqualität und Raumklima FISIAQ legt für neue Klimakanäle zwei Sauberkeitsklassen fest [sh. Literaturhinweis 2]: Bei der Klasse P1 beträgt der Grenzwert für die Oberflächenstaubkonzentration  $1 \text{ g/m}^2$ , wohingegen

der Grenzwert bei der Klasse P2  $2,5 \text{ g/m}^2$  beträgt. Im Vereinigten Königreich [sh. Literaturhinweis 2] liegt die Obergrenze für Zuluftkanäle bei  $1 \text{ g/m}^2$  und für Abluftkanäle bei  $6 \text{ g/m}^2$ . Es gilt zu beachten, dass die Staubkonzentration, die die Sauberkeit der Kanäle beschreibt, in Gramm pro Quadratmeter Kanalfläche angegeben wird.

Wenn Luft durch die Kanäle strömt, werden Staubpartikel auf den Innenflächen von ihren ursprünglichen Positionen weggetragen, was zu einer Aufwirbelung von Partikeln und einer erhöhten Volumenkonzentration von Schwebstoffen in den Kanälen und Innenräumen führt. Die Mechanismen hinter der Staubablagerung auf den Innenflächen der Kanäle und der Aufwirbelung in den Luftstrom werden in [sh. Literaturhinweis 3] analysiert.

Das Sauberkeitsniveau des bei dieser Staubprüfung verwendeten geschlossenen Kanal-kreislaufs kann als

$(\text{Staubmasse}) / (\text{Größe der Kanalinnenfläche})$

geschätzt werden. Es wird hier davon ausgegangen, dass durch die Zugabe einer entsprechenden Menge Staub in den geschlossenen Kanalkreislauf eine „Verschmutzung“ des Kanals erzeugt werden kann, die den Grenzwert für die Staubkonzentration [sh. Literaturhinweise 1 und 2] wesentlich übersteigt. In diesem Fall kann eine „beschleunigte“ Staubverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden. Eine Betriebszeit im „normalen“ Kanal kann einer kürzeren Betriebszeit im „verschmutzten“ Kanal entsprechen, multipliziert mit einem Faktor, der dem Verhältnis der Sauberkeitsniveaus jeweils im „verschmutzten“ und im „normalen“ Kanal entspricht.

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

Ein weiterer Faktor, der eine „beschleunigte“ Prüfung ermöglicht, ist ein vorsätzlich höher als „normal“ geregelter Durchfluss durch den Kanal. Ein hoher Durchfluss hat zwei Dinge zur Folge: Zunächst gelangt eine größere Menge Staub von den Kanalwänden in den Luftvolumenstrom. In Quelle 3 [sh. Literaturhinweise] wird dargelegt, dass eine Erhöhung des Durchflusses um den Faktor 2 die volumetrische Staubkonzentration um den Faktor ~10 erhöht. Des Weiteren erzeugt ein größerer Durchfluss einen größeren Geschwindigkeitsdruck an einer Geschwindigkeitssonde. Wenn beispielsweise der durchschnittliche von einer Staudruck-Geschwindigkeitssonde erzeugte Differenzdruck im typischen Betrieb einer HLK-Anlage 100 Pa und während einer Staubverträglichkeitsprüfung 500 Pa beträgt, ist der zusätzliche „Beschleunigungsfaktor“  $500/100 = 5$ . Mit anderen Worten ist die durch den Sensor strömende Luftmenge während der Prüfung in demselben Zeitintervall 5-mal größer als im „normalen“ Betrieb.

## 3. Prüfaufbau für die Staubverträglichkeitsprüfung

In Abb. 1 - 3 ist der für die Prüfung verwendete Kanalkreislauf dargestellt. Das Umluftgebläse erzeugt einen Luftstrom mit einem Luftgeschwindigkeitsdruck von 100 bis 500 Pa.

Alle geprüften dynamischen Drucksensoren sind mit 1/8-Zoll-Silikonrohren mit einer Länge von 15 cm an zwei Geschwindigkeitssonden angeschlossen.

Die Verbindungsrohre sind vertikal so ausgerichtet, dass der Durchfluss den Staub nach oben zu den Sensoren zieht.



Abb. 1 Kanalkreislauf

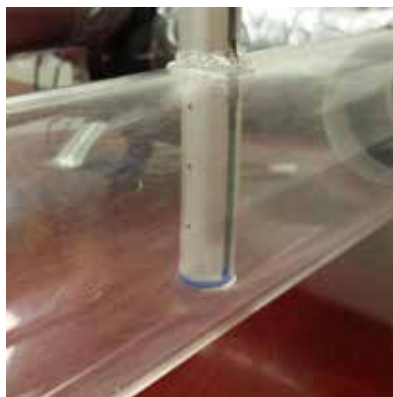


Abb. 2 Staudruck-Geschwindigkeitssonde

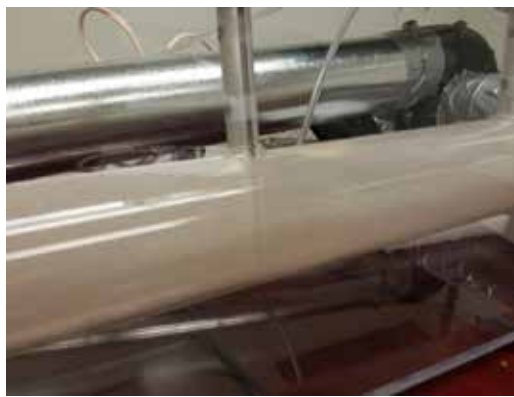


Abb. 3 Staub im Kanal während des Betriebs

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 3.1 Art des Prüfstaubs

Für die Prüfung wurden zwei Arten von Staub verwendet. Zu Beginn der Prüfung wurde der Prüfstaub Nr. 2 der amerikanischen Gesellschaft für Heizungs-, Kälte- und Klimatechnik ASHRAE verwendet. Leider führten die in diesem Staub enthaltenen Flusen zum Zu-

setzen des Gebläserades und der Kanalkreislauf musste zur Reinigung geöffnet werden.

Nach einer Prüfdauer von ~300 Stunden wurde in den Kanalkreislauf Feinprüfstaub des amerikanischen Verbands der Automobil-

ingenieure SAE eingefüllt. SAE-Staub enthält keine Flusen, so dass die Anlage über einen langen Zeitraum ohne Reinigung des Gebläses betrieben werden konnte.

ISO 12103-1, SAE-Feinprüfstaub

| Chemische Zusammensetzung      | CAS-Nummer | % Massenanteil |
|--------------------------------|------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 14808-60-7 | 68 – 76        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1344-28-1  | 10 – 15        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1309-37-1  | 2 – 5          |
| Na <sub>2</sub> O              | 1313-59-3  | 2 – 4          |
| CaO                            | 1305-78-8  | 2 – 5          |
| MgO                            | 1309-48-4  | 1 – 2          |
| TiO <sub>2</sub>               | 13463-67-7 | 0,5 – 1,0      |
| K <sub>2</sub> O               | 12136-45-7 | 2 – 5          |

Tabelle 1: Zusammensetzung des SAE-Feinprüfstaubs

ISO 12103-1, SAE-Feinprüfstaub

| Partikelgröße in µm | Gesamt-Volumenanteil % kleiner als |
|---------------------|------------------------------------|
| 1                   | 2,6                                |
| 2                   | 11,2                               |
| 3                   | 19,8                               |
| 4                   | 27,3                               |
| 5                   | 33,7                               |
| 7                   | 43,8                               |
| 10                  | 54,0                               |
| 20                  | 72,0                               |
| 40                  | 90,9                               |
| 80                  | 99,6                               |
| 120                 | 100,0                              |

Tabelle 2: Volumenanteil der Staubpartikelgrößen im SAE-Feinprüfstaub

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 4. Prüfung 1 – Initialer Test mit ASHRAE-Prüfstaub Nr. 2

### 4.1 Geprüfte Sensoren

- Test-Sensor von First Sensor LDES500UF6S (500 Pa)
  - mit Filter, 90- $\mu\text{m}$ -Poren (Filter 2)
  - mit Filter, 20- $\mu\text{m}$ -Poren (Filter 4)
  - kein Filter
- Sensoren Nr. 1.1 und 1.2
- Sensor Nr. 2
- Sensor Nr. 3
- Sensor Nr. 4
- Sensor Nr. 5

### 4.2 Prüfverfahren

Zunächst wurden dem Kanalkreislauf ca. 42 g Staub zugegeben. Die äquivalente Oberflächenstaubkonzentration an den Innenflächen des Kanals betrug etwa 56 g/m<sup>2</sup>, was ca. der 60-fachen Verschmutzung entspricht, die in realen Kanälen zulässig ist.

Alle Sensoren waren an zwei Geschwindigkeitssonden angeschlossen (siehe Abb. 4). Die Sensoren wurden so positioniert, dass ihre Anschlüsse vertikal nach unten gerichtet waren. Die Länge des vertikalen Verbindungsrohres mit einem Innendurchmesser von 3 mm betrug ca. 15 cm.

Der zu Beginn der Prüfung im System erzeugte Geschwindigkeitsdruck betrug etwa 250 Pa.

Das Gebläse wurde bei 96 h, 168 h und 238 h nach Beginn der Prüfung gestoppt und alle Sensoren wurden erneut vermessen.

Es wurde festgestellt, dass der Geschwindigkeitsdruck auf etwa 120 Pa abfiel, obwohl die Versorgungsspannung für das Gebläse während der Prüfung konstant war. Nach 238 h wurde der Kanalkreislauf zerlegt. Das Gebläserad war mit einer Agglomeration von Flusen und Staub zugesetzt, die zu einem verringerten Luftstrom und somit zu einem verringerten Geschwindigkeitsdruck geführt hatten. Nach der Reinigung des Gebläserades wurden dem Kanalkreislauf weitere 15 g Staub zugegeben. Die Gesamtmenge des zugegebenen Staubs betrug somit 57 g (Staubkonzentration von ca.

76 g/m<sup>2</sup>), wobei während der Reinigung weniger als 5 g an agglomeriertem Staub entfernt wurden. Der Geschwindigkeitsdruck wurde auf ca. 375 Pa erhöht – bei gleichbleibender Versorgungsspannung am Gebläse. Die Prüfung wurde noch weitere 66 h fortgesetzt, womit die Gesamtzeit 304 h betrug.

Die deutlichsten Veränderungen der Empfindlichkeit der geprüften Sensoren wurden nach Zugabe des zusätzlichen Staubanteils und der Erhöhung des Geschwindigkeitsdrucks festgestellt.

### 4.3 Beobachtungen

Während der Prüfung wurde eine Agglomeration von Staub bei sehr hohen Staubkonzentrationen beobachtet. Agglomerierte Flusen hatten das Gebläserad zugesetzt und mussten entfernt werden. Infolgedessen variierte die Staubzusammensetzung während der Prüfung. Es ist davon auszugehen, dass auch kleine

Staubpartikel agglomerieren, was zu einer Erhöhung der effektiven Partikelgröße im Kanal führt. Die Staubkonzentration in der Strömung und ihre Zusammensetzung werden durch das dynamische Gleichgewicht zweier Prozesse bestimmt – Ablagerung von Staub auf den Kanaloberflächen und Aufwirbelung von Staub

zurück in die Strömung. Das Agglomerieren von Staub und seine Ablagerung an den Kanalwänden, den Schaufeln des Gebläserades und den Spalten in Fugen können mit der Zeit zu einer Verringerung der volumetrischen Staubkonzentration im Luftstrom führen.

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

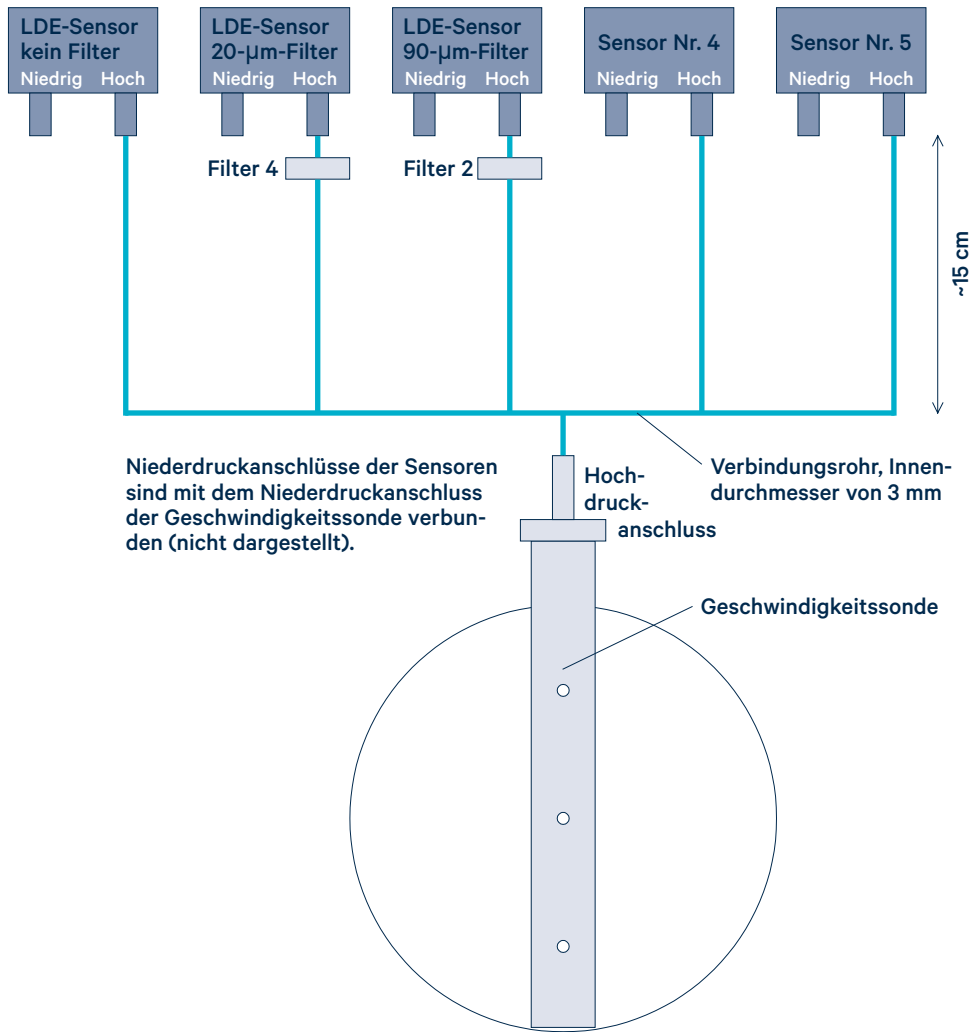


Abb. 4 Schematische Darstellung der Sensoranschlüsse an die Geschwindigkeitssonde

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 4.4 Prüfergebnisse

### LDE-Sensoren von First Sensor

Die normierte Empfindlichkeit der LDE-Sensoren ist in Abb. 5 dargestellt.

Filter 2 enthält eine 1,59 mm dicke Schicht aus porösem Kunststoffmaterial von GenPore ([www.genpore.com](http://www.genpore.com)) mit 90- $\mu\text{m}$ -Poren und einem Innendurchmesser von 10 mm. Filter 4 enthält eine GenPore-Kunststoffschicht gleicher Dicke mit einem Innendurchmesser von 12 mm und 20- $\mu\text{m}$ -Poren.

Der pneumatische Widerstand der Filter betrug  $\sim 12$  Pa-s/ml für Filter 2 und  $\sim 35$  Pa-s/ml für Filter 4. Dieser Widerstand ist deutlich geringer als der pneumatische Widerstand von LDE-Sensoren von  $\sim 50.000$  Pa-s/ml für einen 500-Pa-Sensor.

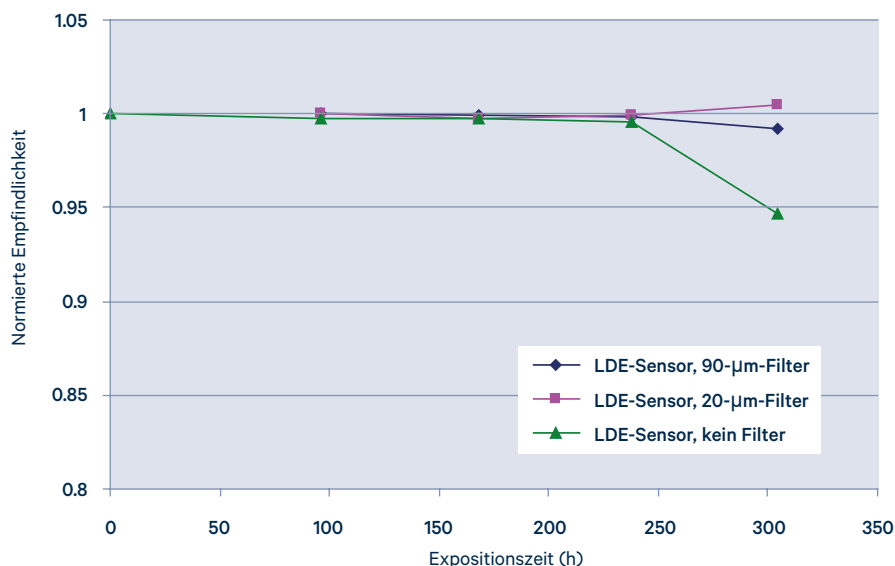


Abb. 5 Empfindlichkeit von LDE-Sensoren während der Staubverträglichkeitsprüfung

### Sensoren Nr. 1.1 und 1.2

Die Sensoren Nr. 1.1 und 1.2 wurden geprüft. Die Empfindlichkeit von Sensor Nr. 1.1 fiel während der Prüfung auf einen Wert unterhalb von 90 % der anfänglichen Empfindlichkeit ab (Abb. 6).

Der Sensor Nr. 1.2 war wesentlich weniger stabil. Dessen Empfindlichkeit fiel nach einer Prüfdauer von 168 h auf einen Wert unterhalb von 80 % der anfänglichen Empfindlichkeit ab. Bei der Neuvermessung fiel die Empfindlichkeit des Sensors auf Null ab. Der Sensor wurde durch den Sensor Nr. 1.2 (2) ersetzt. Die Empfindlichkeit des neuen Sensors fiel während der Prüfung auf einen Wert unterhalb von 7 % der anfänglichen Empfindlichkeit ab.

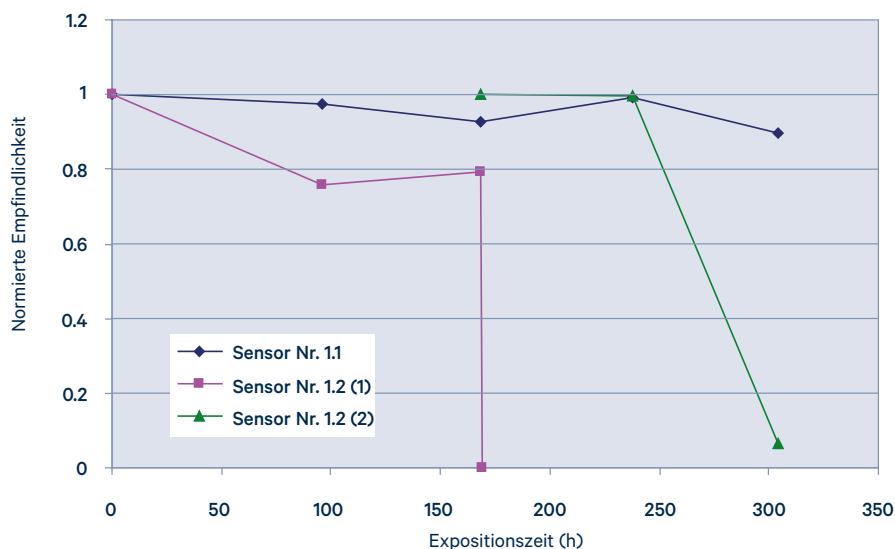


Abb. 6 Empfindlichkeit der Sensoren Nr. 1.1 und 1.2 während der Staubverträglichkeitsprüfung

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## Sensor Nr. 2

Das Druckverhalten des Sensors Nr. 2 ist nicht linear. Die Schwankungen bei der Staubverträglichkeitsprüfung sind in Abb. 7 dargestellt. Die Empfindlichkeit des Sensors wurde für einen Teilbereich von 0 bis 200 Pa berechnet, in dem das Druckverhalten linearer war. Die Veränderung der Empfindlichkeit, die etwa 35 % ihres Ausgangswertes erreichte, ist in Abb. 8 dargestellt.

Nach einer Prüfdauer von 304 Stunden wurde der Sensor pneumatisch „gereinigt“. In einen Anschluss des Sensors wurde Druckluft aus einer 35-ml-Spritze (ca. 0,5 bar) gegeben und es wurde Staub weggeblasen. Bei der „Reinigung“ wurde eine deutlich sichtbare Staubwolke ausgeblasen. Dadurch wurde die Empfindlichkeit des Sensors nahezu wieder auf den Ausgangswert zurückgesetzt (gestrichelte Linie in Abb. 7).

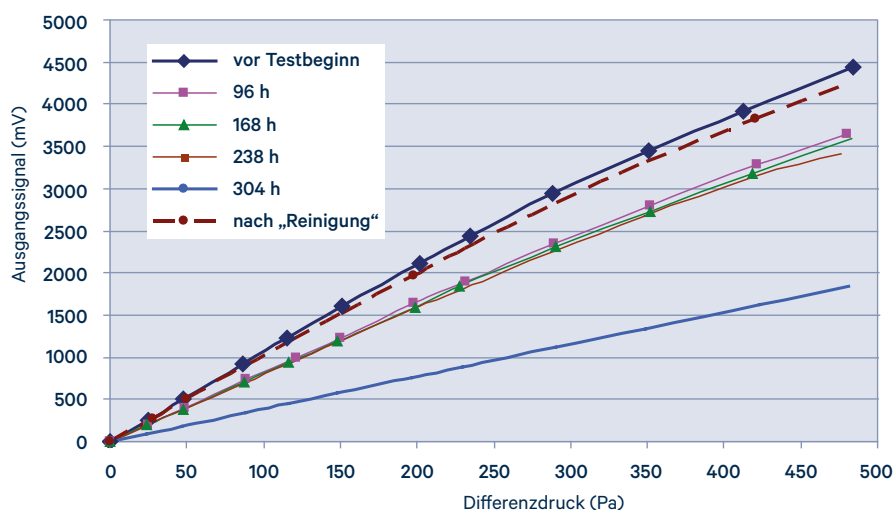


Abb. 7 Druckverhalten von Sensor Nr. 2 während der Staubverträglichkeitsprüfung

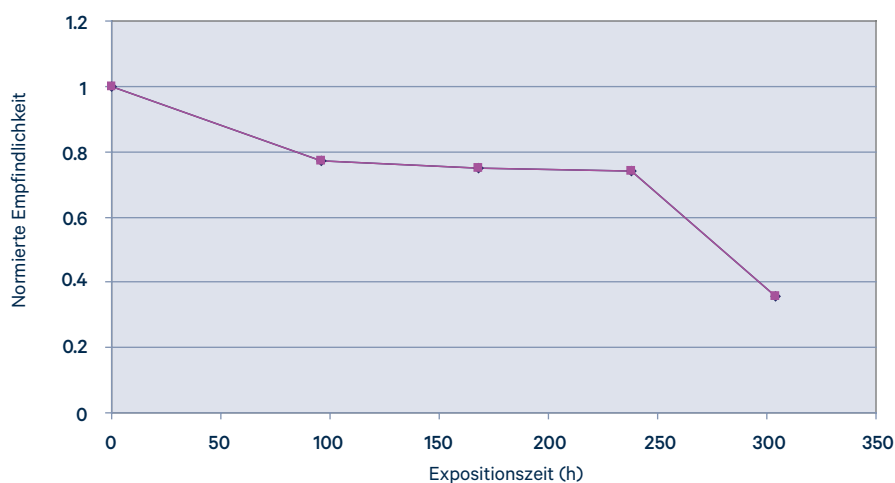


Abb. 8 Empfindlichkeit von Sensor Nr. 2 während der Staubverträglichkeitsprüfung



# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## Sensor Nr. 3

Die Empfindlichkeit von Sensor Nr. 3 bei der Staubverträglichkeitsprüfung ist in Abb. 9 dargestellt. Nach einer Prüfdauer von 304 Stunden fiel die Empfindlichkeit auf ~60 % der anfänglichen Empfindlichkeit ab.

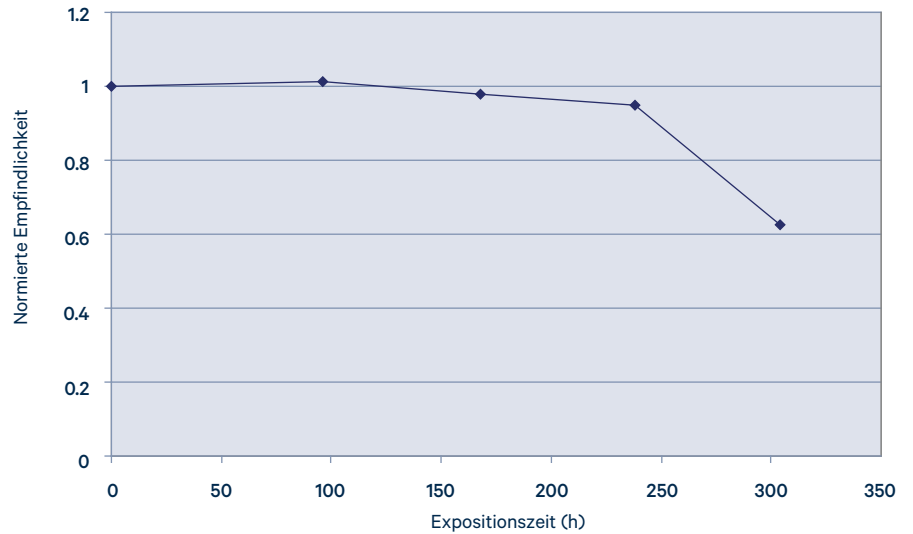


Abb. 9 Empfindlichkeit von Sensor Nr. 3 während der Staubverträglichkeitsprüfung

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## Sensor Nr. 4

Die Veränderung der Empfindlichkeit von Sensor Nr. 4 ist in Abb. 10 dargestellt. Der Sensor erwies sich in den ersten 238 Stunden als äußerst stabil. Anschließend fiel seine Empfindlichkeit um etwa 30 % ab.

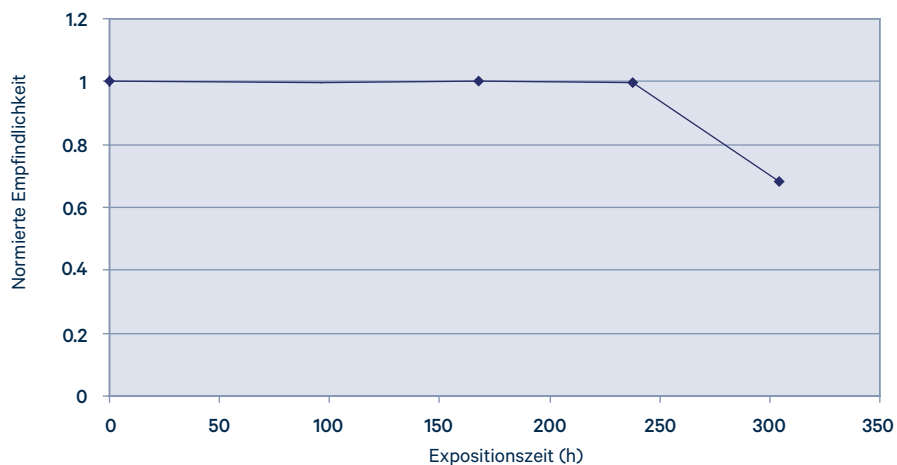


Abb. 10 Empfindlichkeit von Sensor Nr. 4 während der Staubverträglichkeitsprüfung

## Sensor Nr. 5

In Abb. 11 sind Schwankungen im Druckverhalten von Sensor Nr. 5 während der Staubverträglichkeitsprüfung dargestellt.

Bei der pneumatischen „Reinigung“ nach einer Prüfdauer von 304 Stunden wurde die anfängliche Empfindlichkeit des Sensors nahezu wiederhergestellt (gestrichelte Linie in Abb. 11).

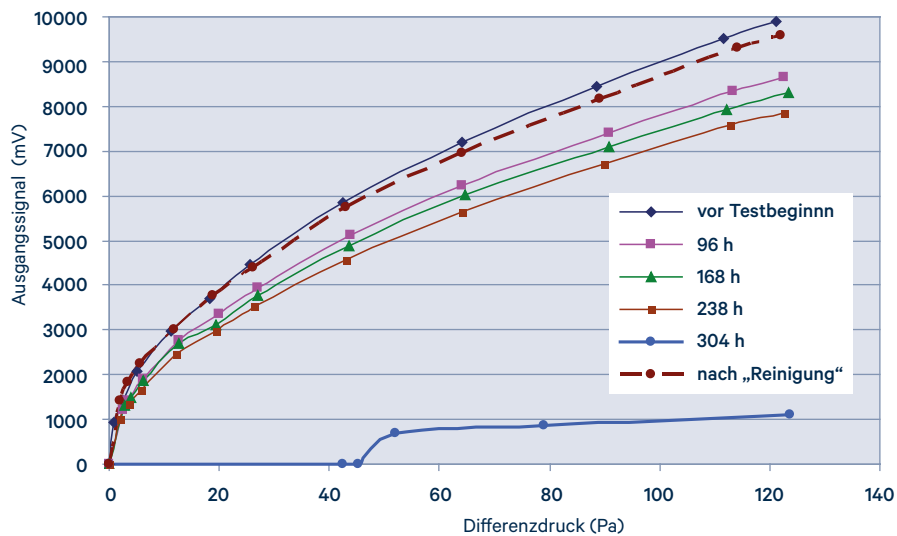


Abb. 11 Druckverhalten von Sensor Nr. 5 während der Staubverträglichkeitsprüfung

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 4.5 Analyse der Ergebnisse

In Abb. 12 ist die Veränderung der normierten Empfindlichkeit im Zusammenhang mit durch Staub verursachten Zusetzungen für einige der stabilsten Sensoren dargestellt.

Durch das Erzeugen einer hohen Staubkonzentration und eines hohen Geschwindigkeitsdrucks im Kanalkreislauf wurde der Betrieb aller Sensoren mit Ausnahme des mit dem Staubfilter 4 geschützten LDES500 beeinträchtigt. Der pneumatische Widerstand dieses Filters beträgt etwa 0,07 % des Widerstands des Sensors LDES500. Ein Zusetzen des Filters mit Staub, was gelegentlich zu einem erhöhten Widerstand führen kann, beeinflusst die Druckempfindlichkeit der LDE-Sensoren nur unwesentlich.

Der Sensor LDES500 mit dem höchsten pneumatischen Widerstand von ~50.000 Pa·s/ml zeigt eine bessere Störfestigkeit gegenüber Zusetzungen mit Staub als alle anderen geprüften Sensoren. Der Anschluss eines Filters an den LDE-Sensor verbessert die Störfestigkeit gegenüber Staub weiter.

Der Einsatz von Staubfiltern ist für Sensoren mit geringem pneumatischem Widerstand problematisch, da ihre Druckempfindlichkeit nach dem Anschließen eines Filters wesentlich abfällt und durch das Zusetzen des Filters instabil wird.

Der pneumatische Widerstand von Filter Nr. 2 beträgt ~35 Pa·s/ml. Im Vergleich zum LDE-Sensor ist der Widerstand des Filters mehr als 1.400-mal geringer als der Sensorwiderstand. Der sehr hohe pneumatische Widerstand der LDE-Sensoren ermöglicht den Einsatz von Staubfiltern zum effektiven Schutz vor Feinstaub.

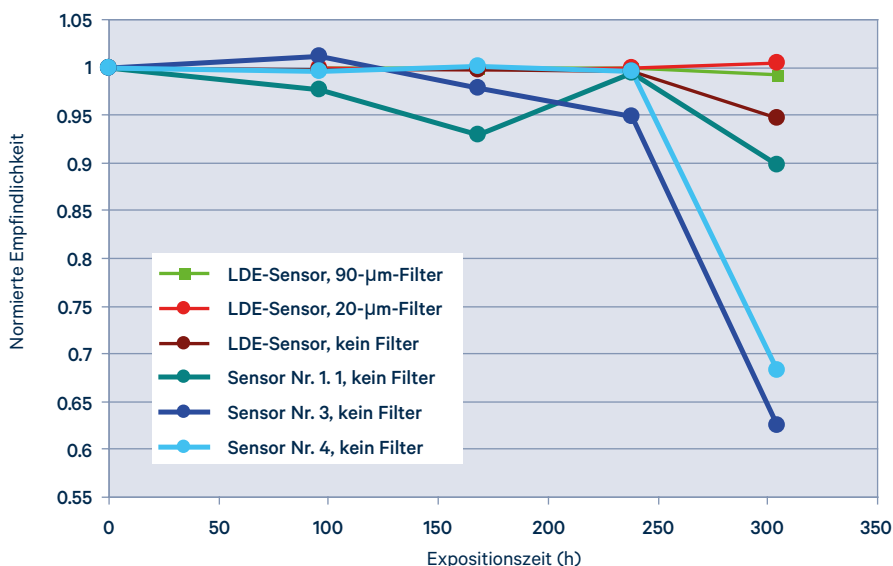


Abb. 12 Normierte Empfindlichkeit ausgewählter Sensoren während der Staubverträglichkeitsprüfung

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 5. Prüfung 2 – Test mit viel Staub und hohem Durchfluss

### 5.1 Geprüfte Sensoren

Für diese Langzeitprüfung wurden neue Sensoren Nr. 1.1 und 3 verwendet. Die Sensoren Nr. 2 und 4 wurden wie oben beschrieben pneumatisch gereinigt. Dabei konnte eine Empfindlichkeit des Sensors Nr. 2 von 94 % der anfänglichen Empfindlichkeit wiederhergestellt werden. Bei Sensor Nr. 4 konnten nach der

pneumatischen Reinigung wieder 95 % der anfänglichen Empfindlichkeit erreicht werden. Es wurden zwei neue Sensoren LDES500UF6S (500 Pa) für die Prüfung verwendet:

- mit Filter mit 20- $\mu$ m-Poren (Filter 4)
- ohne Filterschutz

Die Sensoren 1.2 und 5 wurden wegen ihres schlechten, instabilen Verhaltens in staubigen Umgebungen von dieser Staubverträglichkeitsprüfung ausgeschlossen (siehe Ergebnisse der initialen Prüfung).

### 5.2 Prüfverfahren

Zu Beginn der Prüfung (nach der Reinigung des Gebläserades) wurde dem System SAE-Feinstaub zugegeben, sodass das Gesamtstaubgewicht im Kanalkreislauf 77 g bzw. 103 g/cm<sup>2</sup> betrug.

Nach 449 und 984 Stunden der Prüfung wurden jeweils weitere 10 g Staub zugegeben, sodass die Gesamtstaubkonzentration entsprechend 116 g/cm<sup>2</sup> bzw. 129 g/cm<sup>2</sup> betrug.

Während der Prüfung wurde ein konstanter Geschwindigkeitsdruck von 500 Pa aufrechterhalten.

### 5.3 Faktor für beschleunigte Alterung

Die bei der Prüfung verwendete Oberflächenstaubkonzentration von mehr als 100 g/cm<sup>2</sup> übersteigt die zulässige Konzentration um das 100- bis 130-Fache.

Der zweite Faktor ist der Geschwindigkeitsdruck. Ein Geschwindigkeitsdruck von 500 Pa wurde während der Prüfung aufrechterhalten. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Druck mindestens 5-mal höher ist als der durchschnittliche Betriebsdruck, der im realen Betrieb in den Kanälen herrscht. Der höhere Druck führt zu einem größeren Luftvolumen, das durch die Sensoren strömt, und damit zu einem 5-mal schnelleren Zusetzen.

Der dritte Faktor hängt mit der Menge an Staub zusammen, die von den Kanalwänden wieder in das Luftvolumen hinein „aufgewirbelt“ wird. Die Wirkung der Aufwirbelung hängt von der Luftgeschwindigkeit ab. Es wurde gezeigt (Quelle 3, Abb. 10 [sh. Literaturhinweise]) dass die Reduzierung des Durchflusses durch

den Kanal um den Faktor ~2 zu einer ~10-mal geringeren volumetrischen Staubkonzentration führt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass bei normalem Betrieb ein um das 2-Fache verringerter Durchfluss (4-fach verringerter Geschwindigkeitsdruck) eine um das ~10-Fache verringerte Staubkonzentration erzeugt als bei den jeweils vorhandenen Staubbedingungen.

Basierend auf den Annahmen, dass

- die „Verschmutzung“ des Kanals ~100- bis 130-mal höher als maximal zulässig ist,
- die Nebenströmung durch den im Bypass mit der Geschwindigkeitssonde verbundenen Sensor ~5-mal größer ist als im Normalbetrieb,
- der Faktor für die zusätzliche Erhöhung der volumetrischen Staubkonzentration durch eine Erhöhung des Durchflusses ~10 beträgt,

schätzen wir, dass der Faktor für beschleunigte Alterung bei der Staubverträglichkeitsprüfung etwa  $100 \times 5 \times 10 = 5.000$  beträgt. Mit anderen Worten, 1.000 Stunden der Prüfung entsprechen einer Betriebsdauer in HLK-Anlagen von ~500 Jahren.

Es ist möglich, dass sich kleinere Staubpartikel bei hoher Staubkonzentration zu größeren Agglomeraten vereinigen. Dadurch kann die Feinstaubkonzentration mit der Zeit absinken. Um diesen Effekt auszugleichen, wurde periodisch weiterer Staub in den Kanalkreislauf gegeben.

Zur indirekten Bestätigung einer hohen Staubkonzentration im Luftstrom während der Prüfung kann die Zusetzungsrate der Sensoren mit schlechter Störfestigkeit gegenüber Staub als Indikator verwendet werden (siehe Abb. 13).

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 5.4 Prüfergebnisse

In Abb. 13 sind Schwankungen der Sensorempfindlichkeit während der Staubverträglichkeitsprüfung dargestellt.

Die Empfindlichkeit der Sensoren Nr. 1, 1, 2 und 3 änderte sich während der Staubverträglichkeitsprüfung deutlich. Diese Sensoren wurden regelmäßig pneumatisch gereinigt. Die durch rote Pfeile gekennzeichneten Reinigungsvorgänge führten zu einer teilweisen Wiederherstellung der Empfindlichkeit.

Auffällig war, dass der Sensor Nr. 3 während der ersten 168 Stunden eine unerwartete zusetzungsbedingte Erhöhung der Empfindlichkeit zeigte. Nach dem ersten Reinigungsvorgang führte die Zusetzung mit Staub zu demselben typischen Empfindlichkeitsabfall wie bei allen anderen Sensoren.

Der Sensor Nr. 4 zeigte eine bessere Stabilität, obwohl seine Empfindlichkeit in 1240 Stunden auf unter 60 % des Anfangswertes fiel.

In Abb. 14 ist die Veränderung der Empfindlichkeit für zwei Sensoren LDES500UF6S (mit und ohne Filter) dargestellt. Die Daten von Sensor Nr. 4 sind zum Vergleich dargestellt.

Es bestätigte sich, dass Filter ein hohes Maß an Staubschutz bieten. Für den durch Filter geschützten LDE-Sensor wurde keine Empfindlichkeitsveränderung festgestellt – im Rahmen von Empfindlichkeitsmessfehlern von  $\pm 0,3\%$  (bedingt durch die Wiederholgenauigkeit des Kalibriersystems).

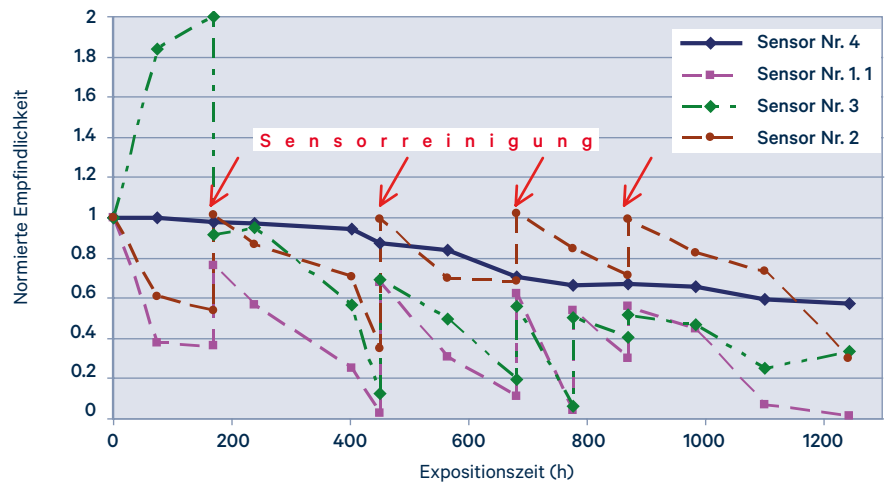


Abb. 13 Empfindlichkeitsschwankungen durch Zusetzen der Sensoren mit Staub

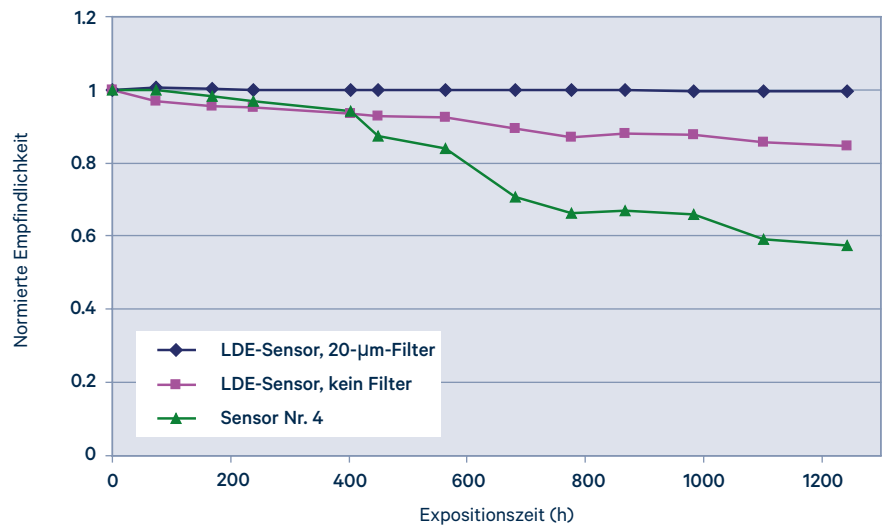


Abb. 14 Empfindlichkeitsschwankungen der Sensoren LDES500UF6S

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 5.5 Prüfen von Glasfaserfiltern mit LDE-Sensoren

Die Wirksamkeit des Filterschutzes gab Anlass zu zusätzlichen Prüfungen mit neuen Filtern:

- Glasfaserfilter APFA
- Glasfaserfilter APFD

Diese Standardfilter werden von Millipore gefertigt. Die technischen Daten sind unter folgendem Link verfügbar:

<http://www.emdmillipore.com>

Aus dem Filtermaterial wurden Scheiben mit einem Durchmesser von ~1 cm geschnitten und in Kartuschen eingesetzt (siehe Abb. 15).

Nach einer Prüfdauer von 776 Stunden wurden zwei neue Sensoren LDES500UF6S (500 Pa) und zwei Sensoren LDES050UF6S (50 Pa) mit geringerem pneumatischem Widerstand mit den APFA- und APFD-Glasfaserfiltern 5 bis 8 (siehe Abb. 16) an den Prüfaufbau für die Staubverträglichkeitsprüfung angeschlossen.

Während der nächsten ~470 Betriebsstunden zeigten diese Sensoren keine Veränderung der Empfindlichkeit (im Rahmen der Wiederholgenauigkeit des Messsystems).



Abb. 15 Glasfaserfilter



Abb. 16 An Sensoren angeschlossene Filter in Kartuschen

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 5.6 Filter und pneumatischer Widerstand der Sensoren

Ein Staubfilter, der in Reihe an den Sensor angeschlossen ist, kann dessen Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. In Abb. 17 ist der Anschluss von Filter und Verrohrung an den Sensor schematisch dargestellt.

Die Differenzdruckquelle erzeugt einen Luftstrom, der durch die Kontur strömt, die das Verbindungsrohr, den Filter und den Sensor selbst umfasst. Alle Komponenten dieser Kontur haben einen pneumatischen Widerstand ungleich Null. Daher ist ein Druckabfall an jeder Komponente unvermeidlich. Dadurch ist der Druckabfall am Sensor (tatsächlich gemessener Druck) immer geringer als der Druck an der Quelle. Die Differenz zwischen diesen beiden Drücken kann minimiert werden, wenn der pneumatische Widerstand des Sensors wesentlich höher ist als der Widerstand des Rohres und des Filters.

Durch den sehr hohen pneumatischen Widerstand des Sensors LDES500UF6S wird der Einfluss der angeschlossenen Rohre und Filter auf die Empfindlichkeit nahezu vollständig beseitigt. Tatsächlich bleibt die werksseitig kalibrierte Druckempfindlichkeit (Skalenfaktor) unverändert, wenn der Anwender Rohre mit „angemessener“ Länge und Filter mit akzeptablem Widerstand anschließt. Wenn dieselben Komponenten mit einem um das 100-Fache geringeren Widerstand in Reihe an die Sensoren angeschlossen werden, führt dies zu Problemen aufgrund der verringerten Druckempfindlichkeit.

Ein weiteres Problem ist die Erhöhung des Filterwiderstandes durch die Staubbeladung während der Betriebslebensdauer. Die Auswirkungen der Staubbeladung werden z. B. in Artikel [4] beschrieben. Die Staubbeladung führt zu einem erhöhten Filterwiderstand und

damit zu einer verringerten Empfindlichkeit des Drucksensors.

Es ist hervorzuheben, dass der positive Effekt bezüglich der Aufrechterhaltung eines stabilen Betriebs durch den hohen pneumatischen Widerstand des Sensors „doppelt wirkt“, wenn sich der Widerstand des Filters ändert. Einerseits ist der Einfluss des erhöhten Filterwiderstandes auf das Druckverhalten der Sensoren umgekehrt proportional zum Sensorwiderstand. Andererseits ist auch die Luftmenge, die durch den Sensor und den Filter strömt, und damit die Staubmenge, die sich am Filter ansammelt, umgekehrt proportional zum Sensorwiderstand. Mit anderen Worten bleibt der Filter „sauberer“, wenn er mit dem Sensor mit hohem Widerstand verbunden ist, und seine Widerstandsänderung ist im Verhältnis zu dem hohen Widerstand des Sensors kleiner.

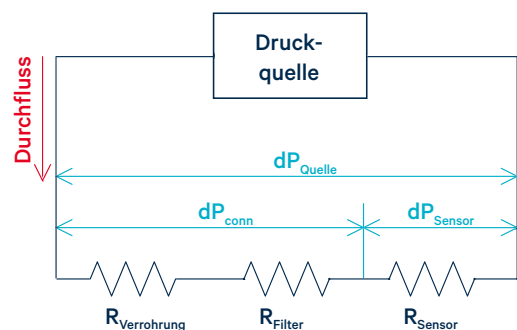


Abb. 17 Pneumatisches Schema des Sensoranschlusses

dP = Differenzdruck

| Komponente                             | Widerstand (Pa·s/ml) | Hinweis                |
|--|----------------------|------------------------|
| Sensor Nr. 1. 1                        | 135                  |                        |
| Sensor Nr. 1. 2                        | 280                  |                        |
| Sensor Nr. 2                           | 620                  |                        |
| Sensor Nr. 3                           | 170                  |                        |
| Sensor Nr. 4                           | 4300                 |                        |
| Sensor Nr. 5                           | 6200                 |                        |
| LDES500UF6S                            | 50000                |                        |
| Filter 4                               | 35                   | 0,07 % von LDES500UF6S |
| Filter 5                               | 52                   | 0,1 % von LDES500UF6S  |
| Filter 6                               | 48                   | 0,37 % von LDES050UF6S |
| Filter 7                               | 85                   | 0,17 % von LDES500UF6S |
| Filter 8                               | 79                   | 0,6 % von LDES050UF6S  |
| 1 m Rohr mit Innendurchmesser von 3 mm | 4,5                  |                        |
| 1 m Rohr mit Innendurchmesser von 5 mm | 0,6                  |                        |

Tabelle 3: Pneumatischer Widerstand der für die Staubverträglichkeitsprüfung verwendeten Komponenten.

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 6. Prüfung 2 – Test mit viel Staub und normalem Durchfluss

### 6.1 Geprüfte Sensoren

- **LDES500UF6S** (500 Pa)
  - **LMIS500UB3S** (500 Pa)
  - Sensor Nr. 2
  - Sensor Nr. 4
- Zwei neue Sensoren Nr. 1.1 und 1.2 wurden 389 Stunden nach Beginn der Prüfung an den Prüfaufbau angeschlossen.  
Alle Sensoren wurden ohne Staubfilter betrieben.

### 6.2 Prüfverfahren

Obwohl eine sehr hohe Staubkonzentration den Einsatz von Staubfiltern zum Schutz der Sensoren erfordert, können dynamische Drucksensoren bei geringer oder mittlerer Staubkonzentration potenziell auch ohne Filter fehlerfrei betrieben werden. Der Betrieb der Sensoren ohne Filter wurde unter weniger aggressiven Bedingungen geprüft, die näher an den realen Betriebsbedingungen in HLK-Anwendungen liegen.

Die Umlaufströmung im Kanalkreislauf wurde etwa um das 2-Fache reduziert, sodass der Geschwindigkeitsdruck von 500 Pa auf 125 Pa abfiel. Dies wurde als ein typischer durchschnittlicher Betriebsdruck in HLK-Anlagen angesehen. Infolgedessen wurde die Strömung durch die Sensoren um das 4-Fache und die volumetrische Staubkonzentration im Vergleich zu früheren Prüfungen um das ~10-Fache reduziert.

Während der Prüfung wurden dem Kanalkreislauf zusätzliche Mengen an SAE-Feinstaub nach folgendem Zeitplan zugegeben:

10 g zu Beginn der Prüfung  
5 g nach 231 Stunden  
7 g nach 462 Stunden  
5 g nach 532 Stunden  
7 g nach 764 Stunden  
5 g nach 1.119 Stunden

Die Masse der Staubbiladung wurde von 107 g auf 136 g erhöht, was zu einer Erhöhung der Oberflächenstaubkonzentration von 143 g/m<sup>2</sup> auf 181 g/m<sup>2</sup> führte.

Bei der neuen Prüfung:

- war die „Verschmutzung“ des Kanals ~150-mal höher als maximal zulässig
- entsprach die Nebenströmung durch den im Bypass mit der Geschwindigkeitssonde verbundenen Sensor ungefähr den Bedingungen im typischen Betrieb
- gab es im Vergleich zum typischen Betrieb keine zusätzliche Erhöhung der volumetrischen Staubkonzentration.

Der geschätzte Faktor für beschleunigte Alterung betrug in etwa 150. Mit anderen Worten: 1.000 Stunden der Prüfung entsprechen einer Betriebsdauer in HLK-Anlagen von ~17 Jahren.



# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 6.3 Prüfergebnisse

Die Veränderung der Sensorempfindlichkeit während der Prüfung mit gemäßiger Staubkonzentration ist in Abb. 18 dargestellt.

Die LMI- und LDE-Sensoren mit dem höchsten pneumatischen Widerstand zeigten keine messbare Veränderung der Empfindlichkeit. Alle anderen geprüften Sensoren zeigten einen signifikanten Abfall der Empfindlichkeit um 6 bis 40 %.

Die Prüfdauer von 1.257 Stunden entspricht einer Betriebsdauer in HLK-Anlagen von 21 Jahren.

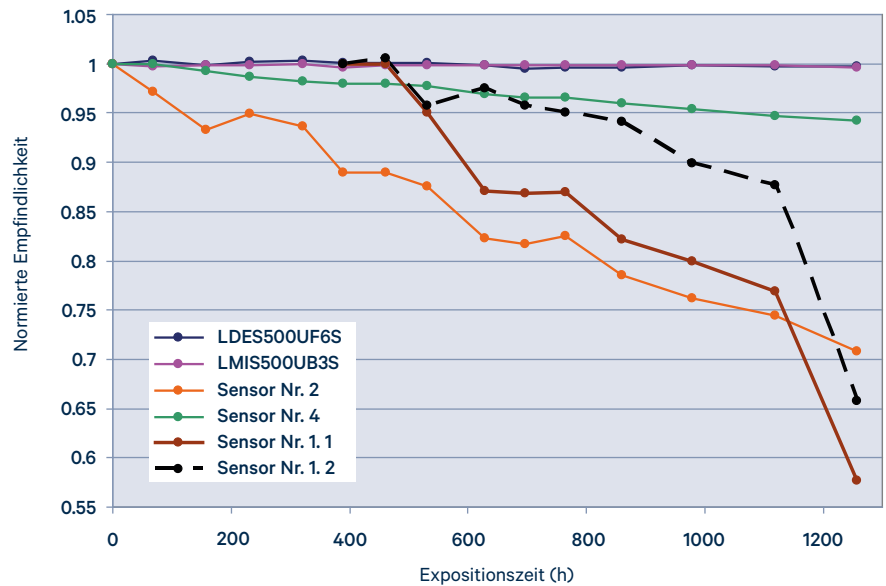


Abb. 18 Empfindlichkeitsveränderungen während der Prüfung mit gemäßiger Staubkonzentration

# Serien LDE/LME/LMI: Staubverträglichkeitsprüfung

## 7. Schlussbetrachtung

### 7.1 Betrieb mit viel Staub und normalem Durchfluss

- Die Sensoren wurden ohne den Einsatz von externen Partikelfiltern geprüft.
- Sensoren von First Sensor zeigten während der Prüfdauer, die ~21 Jahren unter normalen Betriebsbedingungen entspricht, keine messbaren Empfindlichkeitsveränderungen.
- Der Empfindlichkeitsabfall von Wettbewerberprodukten im Verlauf des Experiments betrug zwischen 6 % und 40 %.

### 7.1 Betrieb mit viel Staub und hohem Durchfluss

- Die Sensoren wurden ohne den Einsatz von externen Partikelfiltern geprüft.
- Sensoren von First Sensor zeigten während der Prüfdauer, die ~21 Jahren unter normalen Betriebsbedingungen entspricht, keine messbaren Empfindlichkeitsveränderungen.
- Der Empfindlichkeitsabfall von Wettbewerberprodukten im Verlauf des Experiments betrug zwischen 6 % und 40 %.

## 8. Allgemeine Beobachtungen

- Der pneumatische Widerstand – oder der Widerstand der Sensoren gegenüber dem Durchfluss – ist der wichtigste Indikator für die Sensorstabilität in stark verschmutzten Kanälen.
  - Im Durchschnitt haben Sensoren von First Sensor einen pneumatischen Widerstand, der 100-mal höher ist als bei Wettbewerberprodukten.
  - Ein hoher pneumatischer Widerstand führt zur Verringerung der Luftgeschwindigkeit im Verbindungsrohr. Dies trägt dazu bei, dass größere Partikel vor dem Eintritt in den Sensorströmungskanal von der Schwerkraft erfasst werden.
- Bei extrem starker Verschmutzung sind möglicherweise Staubfilter erforderlich.
  - Im Allgemeinen führt die Implementierung eines Filters zu einer leichten Verringerung der Sensorempfindlichkeit.
  - Eine längere Staubexposition kann zu Zusetzungen im Filter führen, was eine weitere Verringerung der Druckempfindlichkeit zur Folge hat.
  - Ein hoher pneumatischer Widerstand des Sensors ist unerlässlich, um die Verringerung der Leistungsfähigkeit durch den Einsatz von Staubfiltern zu minimieren.

### Literaturhinweise

- [1.] APIRAC – Avaliação, Limpeza & Restauo de sistemas AVAC (ALR 2004). Lissabon: APIRAC, 2004.
- [2.] Holopainen, R. et al – Effectiveness of duct cleaning methods on newly installed duct surfaces. Indoor Air, Band 13 (2003) 212–222
- [3.] B. Zhou, B. Zhao, Z. Tan – How Particle Resuspension from Inner Surfaces of Ventilation Ducts Affects Indoor Air Quality – A Modeling Analysis, Aerosol Science and Technology, 45:996–1009, 2011, DOI: 10.1080/02786826.2011.576281.
- [4.] W. Hinds, N. Kadrichu – The Effect of Dust Loading on Penetration and Resistance of Glass Fiber Filters, Aerosol Science and Technology 27:2 (1997), Seiten 162–173.