

Langzeitstabile Durchflussmessung für Verbrauchsgase

Proline t-mass F/I 300/500 von Endress+Hauser mit innovativem Sensordesign
für mehr Stabilität auch unter Prozesseinflüssen

Kai Weltin, Product Manager Sales Marketing, Endress+Hauser Deutschland

Matthew Hull, Senior Expert Product Manager Thermal and Air, Endress+Hauser Flow Switzerland

Kurzfassung

Die patentierte langzeitstabile Sensortechnologie, die bei Proline t-mass 300/500 von Endress+Hauser verwendet wird, beruht auf einem einzigartigen Design. Dieses nutzt die Vorteile herkömmlicher Sensortechnologien, ohne deren Nachteile wie alterungsbedingte Drift oder verschlechterte Empfindlichkeit gegenüber Durchflussänderungen zu übernehmen. Durch einen komplett im eigenen Haus durchgeführten Herstellungsprozess und eine vollumfängliche Qualitätssicherung der Sensoren wird sichergestellt, dass die Durchflussmessgeräte, die das Werk verlassen, ihre Spezifikation selbst nach längerem Einsatz in anspruchsvollen Anwendungen einhalten. Die Diagnose-, Verifizierungs- und Überwachungsfunktionen von Heartbeat Technology sorgen zudem für eine erhöhte Zuverlässigkeit und Sicherheit sowie eine dokumentierte Gerätefunktionalität ohne Prozessunterbrechung.

Proline t-mass F/I 300/500

Die Gerätefamilie Proline t-mass steht für eines der fünf modernen elektrischen Messverfahren im Durchflussportfolio von Endress+Hauser. Das Verfahren basiert auf dem thermischen Messprinzip, das insbesondere für die Messung von Verbrauchs- und Prozessgasen bei geringem Druck und kleinsten Mengen geeignet ist. Es zeichnet sich durch eine hohe Messdynamik und direkte Massemessung aus. Als Inline-Variante t-mass F für typische Rohrleitungsgrößen (DN 15 bis 100) und als Einsteckvariante t-mass I für große runde und eckige Leitungen ist das Messprinzip vielseitig einsetzbar. Neben der Genauigkeit spielt die Langzeitstabilität eines Messsystems im industriellen Einsatz eine wichtige Rolle. Beispielsweise werden thermische Massezähler zur Messung des Erdgasverbrauchs von Dampfkesseln verwendet. Würde die Messung driften, könnte der Kunde dies als erhöhten Erdgasverbrauch interpretieren und die Effizienz des Kessels in Frage stellen. Nur eine langzeitstabile Messung unterstützt bei der Überwachung solch wichtiger „Energy Performance Indicators“ (EnPI).



Bild 1: Inline-Gerät in Kompaktvariante und Einsteckgerät mit rostfreiem Getrenntgehäuse (links) der Proline t-mass 300/500 Gerätefamilie

Grundlagen des thermischen Messprinzips

Wie der Name schon andeutet, beruht das thermische Durchflussmessprinzip auf Wärmeübertragung. Eine definierte Menge an Wärmeenergie wird von einem geheizten Sensor (Widerstandselement) in ein Medium abgegeben und beim Vorbeiströmen abgetragen. Dieser Energieverlust wird durch das System wieder ergänzt und anschliessend gemessen. Je höher die Strömung am Sensor, umso mehr Energie ist notwendig, um diese Wärme wieder zu ersetzen. Damit es möglich ist, den Energieverbrauch des Sensors ins Verhältnis zur Durchflussmenge zu setzen, muss eine Konstante in die Messung eingeführt werden. Diese besteht aus der Temperaturdifferenz zwischen dem geheizten Sensor und dem Medium. Zur Messung der Mediumtemperatur wird ein zweiter Sensor (Widerstandselement) eingesetzt. Wenn angestrebt wird, eine stetige Temperaturdifferenz von beispielsweise 10 °C aufrechtzuerhalten, können Durchflussänderungen anhand der aufgewendeten Wärmeenergie bestimmt werden.

Eine Schwierigkeit der Bestimmung des Durchflusses mittels Wärmeübertragung besteht darin, dass diese nicht allein vom Durchfluss abhängt. Die Wärmeübertragung wird auch von der Art des Fluids, den Prozessbedingungen (Druck und Temperatur) sowie der Sensorform und des Sensoraufbaus beeinflusst. Diese Faktoren müssen zusammen betrachtet und bei der Messung berücksichtigt werden, um mit dem thermischen Messprinzip ein zuverlässiges Ergebnis zu erreichen. Wenn sich beispielsweise die Zusammensetzung des Fluids verändert, tritt ein Messfehler ein, falls keine Korrektur in der Software erfolgt. Das Gleiche gilt für Veränderungen des Sensors, was als „Drift“ bezeichnet wird.

Herkömmliche Sensortechnologie mit und ohne Vergussmaterial

Auf dem Markt gibt es verschiedene Sensortechnologien, die von Herstellern thermischer Durchflussmessgeräte eingesetzt werden. Für den vorliegenden Artikel werden Sensortechnologien mit und ohne Vergussmaterial von Herstellern industrieller thermischer Durchflussmessgeräte betrachtet. Der am häufigsten anzutreffende Sensoraufbau besteht aus zwei Widerstandsthermometern, meistens aus Platin (zum Beispiel Pt100) und entweder als gewickelter Draht oder Dünnsfilmsensor. Diese Widerstandsthermometer werden in metallische, meistens aus rostfreiem Stahl gefertigte Schutzhülsen gepackt und mit einer thermisch leitenden Paste vergossen, um isolierende Hohlräume zu entfernen und die Widerstandsthermometer in den Schutzhülsen zu fixieren. Abschliessend wird die Schutzhülse zugeschweisst, um das Sensorinnere vom Prozess physisch zu trennen und zu schützen. Hier reden Hersteller thermischer Massedurchflussmessgeräte oft von „nassen Sensoren“ (engl. „wet sensor“), da der Aufbau Vergussmaterial beinhaltet.

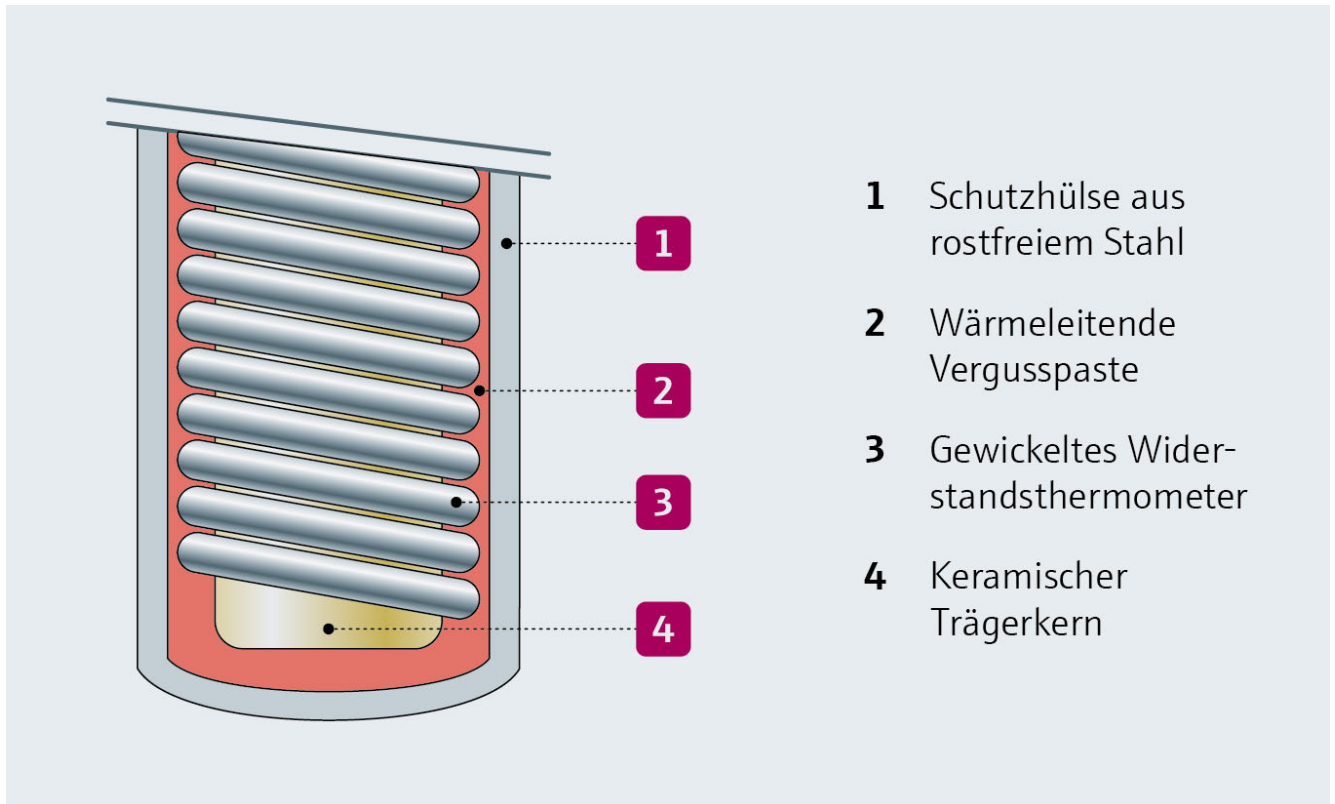


Bild 2: Schnittansicht eines klassischen thermischen Sensoraufbaus

Ein einziger Hersteller setzt ein patentiertes „trockenes“ Sensordesign ein. Der Aufbau ist sehr ähnlich zu dem oben vorgestellten Aufbau – mit dem Hauptunterschied, dass keine Vergusspaste verwendet wird, daher der Begriff „trockene Sensoren“ (engl. „dry sensor“). Damit trotzdem ein gleichbleibender, stabiler Wärmeübergang zwischen dem geheizten Widerstandsthermometer und der Schutzhülse erfolgt, wird mit sehr engen Produktionstoleranzen gearbeitet und die Schutzhülse durch Rundkneten eng an das gewickelte Widerstandsthermometer gepresst. So werden die Hohlräume effektiv auf ein Minimum reduziert. Um die Möglichkeit eines Kurzschlusses zu verhindern und die Kontaktfläche zu vergrößern, wird zusätzlich eine Glasbeschichtung zwischen der Schutzhülse und dem gewickelten Widerstandsthermometer eingesetzt.

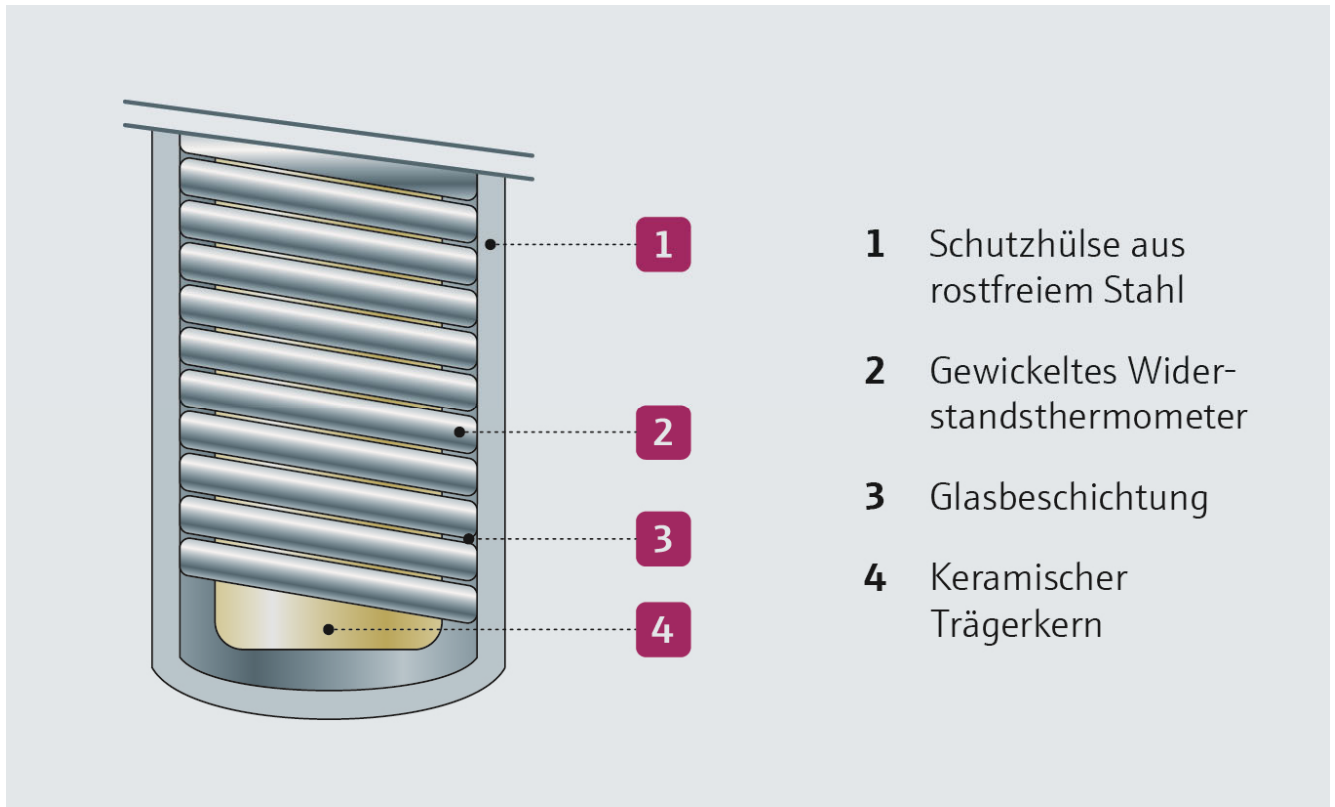


Bild 3: Schnittansicht eines patentierten thermischen Sensoraufbaus. Auf den Einsatz von wärmeleitender Vergusspaste wird verzichtet.

Vor- und Nachteile der herkömmlichen Sensortechnologie

Beide Sensortechnologien zeichnen sich durch Vor- und Nachteile aus. Der Hauptvorteil des klassischen Designs (Bild 2) ist ein guter Wärmeübergang zwischen Widerstandsthermometer und Schutzhülse dank des wärmeleitenden Vergussmaterials. Luftgefüllte Hohlräume werden ebenfalls stark reduziert. Dies ist vorteilhaft, da Lufteinschlüsse einen isolierenden Effekt haben, der einen guten Wärmetransfer verhindert. Zudem könnte sich in den Hohlräumen Feuchtigkeit bilden, die das Messsignal stören oder den Sensor längerfristig beispielsweise durch Korrosion zerstören würde.

Ein Nachteil des klassischen „nassen“ Sensordesigns besteht darin, dass das organische Vergussmaterial dazu neigt, mit der Zeit auszuhärten und durch Ausdehnung beziehungsweise Zusammenziehen Risse zu bilden. Diese Risse oder Änderungen im Aufbau des Sensorkerns beeinflussen den thermischen Widerstand im Sensor und führen schließlich zur Drift des Messsignals. Je extremer die Prozessbedingungen sind, umso schneller treten diese Alterungsprozesse auf. Temperaturschocks oder rasch und häufig wechselnde Temperaturen führen schneller zu Drift in dieser Sensorart.

Das patentierte „trockene“ Design (Bild 3) beseitigt das Problem mit alterungsbedingter Drift, da kein Vergussmaterial verwendet wird. Allerdings hat auch dieses Design Nachteile. Aufgrund von

Oberflächenrauigkeit und Produktionstoleranzen kann sich die Kontaktfläche für den Wärmestrom im Vergleich zur Variante mit Vergusspaste verringern, da mit Luft gefüllte Hohlräume nicht komplett ausgeschlossen werden können. Dadurch erhöht sich der thermische Kontaktwiderstand und ein optimaler Wärmetransfer wird verhindert. Dies kann die Reaktionszeit verlängern und die Messempfindlichkeit des Sensors verschlechtern.

Gemäß den Angaben eines Herstellers verfügt das Vergussmaterial sogar über stoßdämpfende Eigenschaften, was theoretisch eine schützende Wirkung gegen Vibrationen hätte. Diese Aussage impliziert, dass Sensoren ohne Vergussmaterial empfindlicher gegen Vibrationen sind und leichter durch diese beschädigt werden können. Das lässt sich aber ohne eine praktische Überprüfung nur schwer bestätigen. Theoretisch könnte ein elastisches Vergussmaterial Stöße besser dämpfen, aber dies wäre nur der Fall, solange das Vergussmaterial auch elastisch bleibt. Wenn es mit der Zeit aushärtet, geht diese schützende Wirkung verloren, und Stöße könnten sogar schneller und effektiver zu alterungsbedingter Drift führen.

Eine weitere Problematik des „nassen“ Sensordesigns ist, dass das Sensorinnere aus verschiedenen Materialien besteht: einem keramischen Trägerkern, einem gewickelten Draht, einem organischen Vergussmaterial und einer metallischen Schutzhülse. Jedes Material hat einen anderen Wärmeausdehnungskoeffizient und reagiert unterschiedlich auf Temperaturveränderungen. Dieses Verhalten fördert alterungsbedingte Drift.

Patentierte langzeitstabile Durchflusssensoren von Endress+Hauser

Bei dem in Proline t-mass 300/500 eingesetzten Sensor handelt es sich um ein „trockenes“ Design, denn es wird kein organisches Vergussmaterial im Sensorkern verwendet. Anders als bei den oben vorgestellten Konkurrenzsensoren findet beim patentierten Design von Endress+Hauser keine Umformung statt. Stattdessen wird auf eine innovative Sensortechnologie gesetzt, die durch das Fehlen von Vergussmaterial und die homogene, unveränderliche Kernstruktur für ein driftfreies Verhalten sorgt.

Die Entwickler von Endress+Hauser hatten sich drei Hauptziele für das Design gesetzt: (1) Der Sensor sollte ein langzeitstabiles Verhalten zeigen, (2) sein Messverhalten sollte sich nicht durch Prozess- oder Umgebungseinwirkungen beeinflussen lassen und (3) er sollte sich mit möglichst kleinen Produktionstoleranzen fertigen lassen, um Streuungen zwischen Sensorchargen auszuschließen und eine gleichbleibende Qualität zu erlangen. Sämtliche Hauptziele wurden mit dem neu entwickelten Design erreicht. Der Sensorkern (Bild 4) besteht aus Silber, das durch ein spezielles Verfahren mit der Sensorspitze aus rostfreiem Stahl (optional aus Alloy C22) verbunden wird. Es entsteht ein homogenes Material ohne Hohlräume, wie das Schliffbild (Bild 5) zeigt.

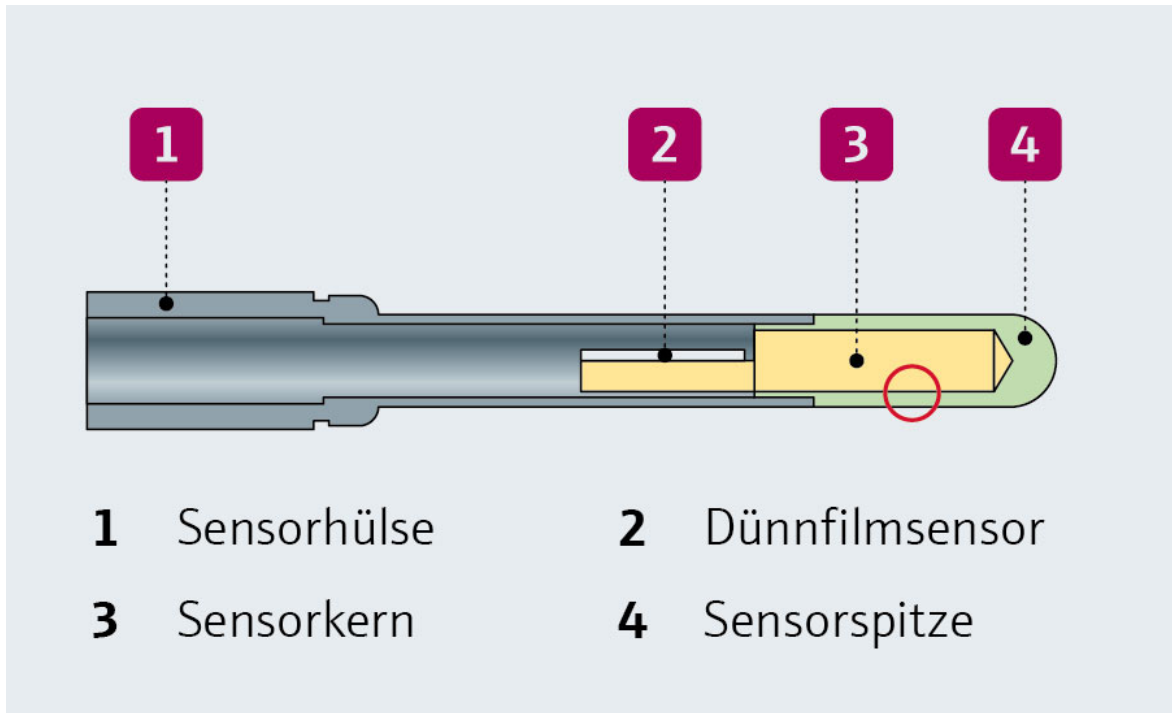


Bild 4: Querschnitt des Sensors (Heizer) von t-mass 300/500. Der rote Kreis markiert die in Bild 5 (unten) als Vergrößerung dargestellte stoffschlüssige Verbindung zwischen Sensorspitze und Sensorkern.

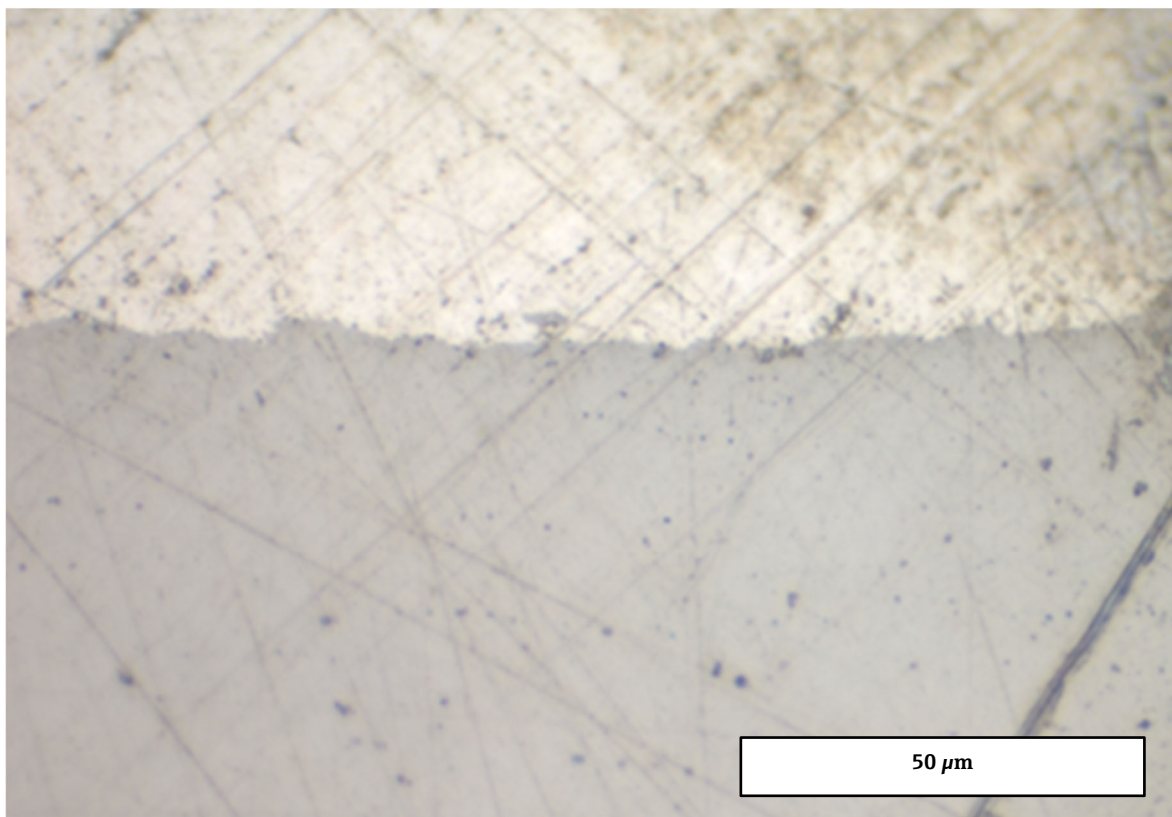


Bild 5: Vergrößerung der stoffschlüssigen Verbindung in Bild 4

Optimale Wärmeübertragung

Der Sensorkern sorgt für eine effiziente Wärmeleitung der vom Dünnschichtsensor (Bild 4) erzeugten Wärmeenergie. Diese wird entlang des Sensorkerns Richtung Sensorspitze geleitet und dann radial nach außen an das umgebende Fluid übertragen. Der Dünnschichtsensor wird dauerhaft auf den Sensorkern fixiert. Dieser Prozess findet in einem definierten Zeitraum unter vorgegebenen Temperatur- und Druckbedingungen statt, um eine optimale und sichere Verbindung zu erzielen. Da der Sensorkern eine stoffschlüssige Verbindung mit der Sensorspitze (Bild 5) eingeht, kann er sich nicht von dieser lösen. Die homogene Struktur und die fehlenden Hohlräume im Sensorkern ermöglichen eine optimale Wärmeübertragung von innen nach außen und umgekehrt. Aufgrund dieser soliden und unveränderlichen Struktur des Kerns wird eine langzeitstabile Messung sichergestellt – selbst bei Anlagenvibrationen und Prozesstemperaturänderungen. Zuletzt wird der Sensor durch Verschweißen komplett nach außen (zum Prozess und zur Umgebung hin) isoliert, damit der gesamte Messaufnehmer ein spalt- und dichtungsfreies System darstellt. Die einzigartige Sensortechnologie von Endress+Hauser verbindet die Vorteile der vorgestellten nassen und trockenen Sensordesigns, weist aber nicht die Nachteile auf, die mit den Designs anderer Hersteller verbunden sind. Für die Sensoren wird kein Vergussmaterial verwendet, das sich mit der Zeit verändern kann, sondern sie zeichnen sich durch einen homogenen und unveränderlichen Kern aus.

Nachweis der Langzeitstabilität

Bei der Entwicklung des Geräts wurde eine Reihe von Tests durchgeführt, welche die Langzeitstabilität und Robustheit der Sensoren unter Beweis stellen sollten. Nachfolgend werden zwei dieser Tests und deren Ergebnisse vorgestellt. Eine Charge von 40 Sensoren wurde ein Jahr lang im Temperaturprüfschrank Temperaturen von 180 °C ausgesetzt, gleichzeitig wurde ihr Driftverhalten mehrfach untersucht. Hierfür wurden die Sensoren kurzzeitig aus dem Temperaturprüfschrank genommen und auf einer Durchflussskalibrieranlage getestet, um den Messfehler bei verschiedenen Durchflussraten zu ermitteln. Bei allen Sensoren war dieser Fehler im ganzen Messbereich bei jeder Kontrolle innerhalb der spezifizierten $\pm 1\%$ des Messwerts. Die schwarzen Balken im Bild 6 stellen die Kontrolltage und die Bandbreite der Messfehler dar.

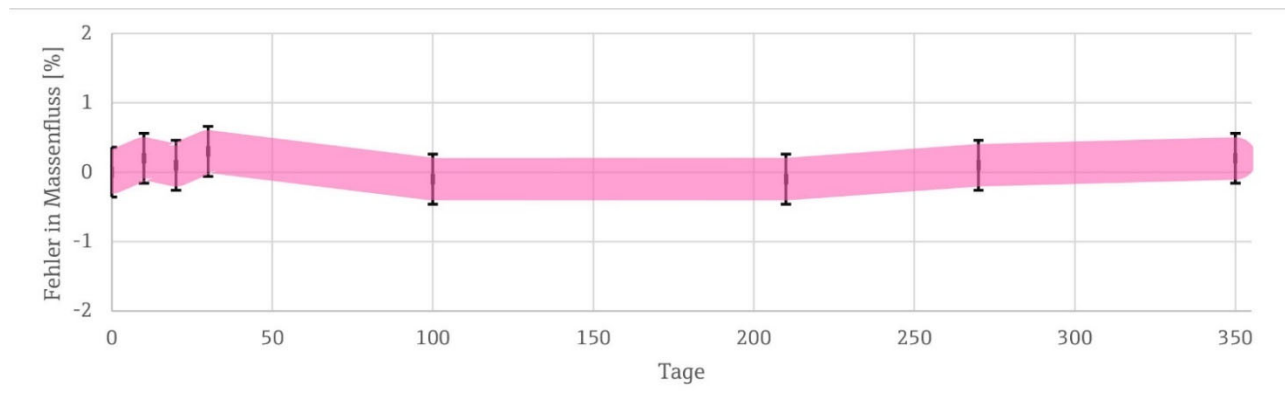


Bild 6: Testergebnisse zum Sensordriftverhalten bei 180 °C

Eine weitere Charge von 40 Sensoren wurde in einen Klimaschrank zum Untersuchen des Driftverhaltens einem Temperaturschocktest ausgesetzt. Es wurden insgesamt 500 Zyklen im Schrank gefahren. Bei einem Zyklus wurde die Temperatur zunächst bei -50 °C gehalten und danach schnellstmöglich auf $+180\text{ °C}$ aufgeheizt. Die Temperatur von 180 °C wurde wieder für eine gewisse Zeitspanne gehalten. Danach wurde die Temperatur für den nächsten Zyklus erneut auf -50 °C abgekühlt. Die Tests wurden mehrfach kurz unterbrochen und die Sensoren bei verschiedenen Durchflussraten auf einer Kalibrieranlage getestet. Die Grafik in Bild 7 zeigt das Driftverhalten der Sensoren als prozentualer Fehler des Massendurchflusses. Die registrierten Messfehler bewegen sich auch hier in einem feinen Toleranzband innerhalb der spezifizierten $\pm 1\%$ des Messwerts.

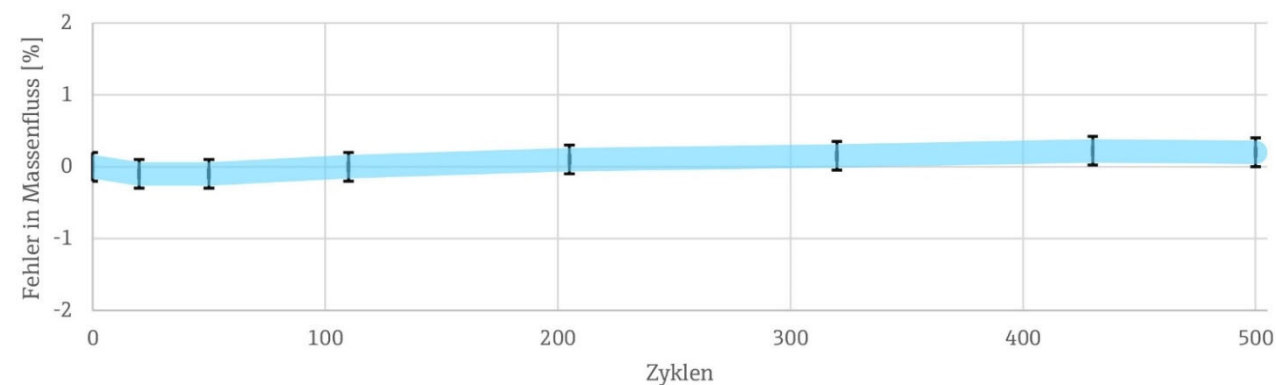


Bild 7: Ergebnisse der Untersuchung im Klimaschrank bis 500 Zyklen von -50 °C auf $+180\text{ °C}$

Hauseigene Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit

Der vollständige Herstellungsprozess und das Qualitätsmanagement erfolgen bei Endress+Hauser Flow Schweiz (Reinach). Zur Maximierung der Produktqualität und Minimierung von Fehlerquellen werden bereits zu Beginn der Produktentwicklung verschiedene Methoden zur Steigerung der Prozesssicherheit angewendet, wie zum Beispiel der Design- und Prozess-FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse). Neben den zuvor beschriebenen Sensoreigenschaften sorgt ein Betriebsmittel mit hohem Automatisierungsgrad beim Lötprozess für die gleichbleibende Qualität der Anbindung der Sensorelemente. Hierbei wird das geforderte Temperatur-Druck-Profil während eines

Produktionszyklus stets überwacht. Jede Schweissnaht wird unter Verwendung von Helium als Prüfgas auf Dichtheit getestet. Alle Sensoren werden mit einer Prüfspannung von 500 V auf Hochspannungsfestigkeit überprüft. Für die Korrelation zwischen dem Widerstandswert und der Temperatur werden alle Sensoren in einem Temperiersystem bei unterschiedlichen Temperaturen nach EN/IEC 60751 justiert. Die Hochpräzisionsreferenzsensoren messen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,025$ °C.

Zur Gewährleistung gleichbleibender Qualität werden alle produzierten Messaufnehmer auf einer rückführbaren Sensorqualitätskontrollanlage mittels Gasdurchfluss getestet. In kürzester Zeit werden dabei die Widerstand-Temperatur-Korrelation und die thermische Anbindung aller Sensoren überprüft. Die Materialrückverfolgbarkeit der verwendeten Komponenten sowie alle Testergebnisse und Messdaten werden in einer digitalen Datenbank erfasst und lassen sich jederzeit einem spezifischen Messaufnehmer zuordnen. Diese können die Sensorfertigung nur verlassen, wenn alle notwendigen Unterlagen vorhanden sind und die zahlreichen Tests erfolgreich durchgeführt wurden. Wenn ein Messgerät zur Rekalibrierung wieder ins Herstellerwerk kommt, werden diese Daten um die neuen Werte ergänzt. Damit ist jederzeit ein Vergleich und eine Darstellung der Gerätehistorie möglich.

Überprüfung der Sensorik mit Heartbeat Technology

Dank Heartbeat Technology ergeben sich weitere Möglichkeiten, die Sensorik im eingebauten Zustand zu überprüfen. So wird beispielsweise im Aufstartprozess des Gerätes und bei der Verifizierung mittels Heartbeat Technology eine Sensorprüfung durchgeführt. Hierbei werden die Widerstandswerte gemessen und eine Prüfung auf elektrische Nebenschlüsse zum Gehäuse umgesetzt. Dies erlaubt die Erkennung einer elektrischen Drift. Über eine entsprechende Alarmierung am Gerät und im Heartbeat Technology Verifikationsbericht wird der Sensorzustand angezeigt. Dies erhöht die Sicherheit im Anlagenbetrieb und ist jederzeit im eingebauten Zustand durchführbar.

Obwohl durch die Konstruktion der Sensoren eine thermische Drift nahezu ausgeschlossen ist, wurde bei Heartbeat Verification eine diesbezügliche Prüfroutine integriert. Die Überprüfung der thermischen Drift ist unter gewissen Voraussetzungen möglich. Hierzu müssen ein konstanter Durchfluss und eine konstante Prozesstemperatur vorhanden sein. Genauere Angaben zu den Prüfvoraussetzungen sind in den Handbüchern zu t-mass mit Heartbeat Verification (SD02477D/06/DE; SD02479D/06/DE) beschrieben. Das Messsystem erkennt selbstständig, wann die Voraussetzungen erfüllt sind, und führt die Prüfung hinsichtlich einer thermischen Drift durch. Sind diese nicht erfüllt, findet keine Prüfung statt und auf dem Protokoll erscheint der Hinweis „Nicht ausgeführt“. Das Verifizierungskonzept wurde von einer unabhängigen Stelle zertifiziert und ist gemäß ISO 9001 rückverfolgbar. Die Ergebnisse der Verifizierung sind auf interne Referenzen und Werkstoleranzen zurückgeführt. Die Gerätefunktionalität lässt sich auf Knopfdruck und ohne Prozessunterbrechung im eingebauten Zustand evaluieren.