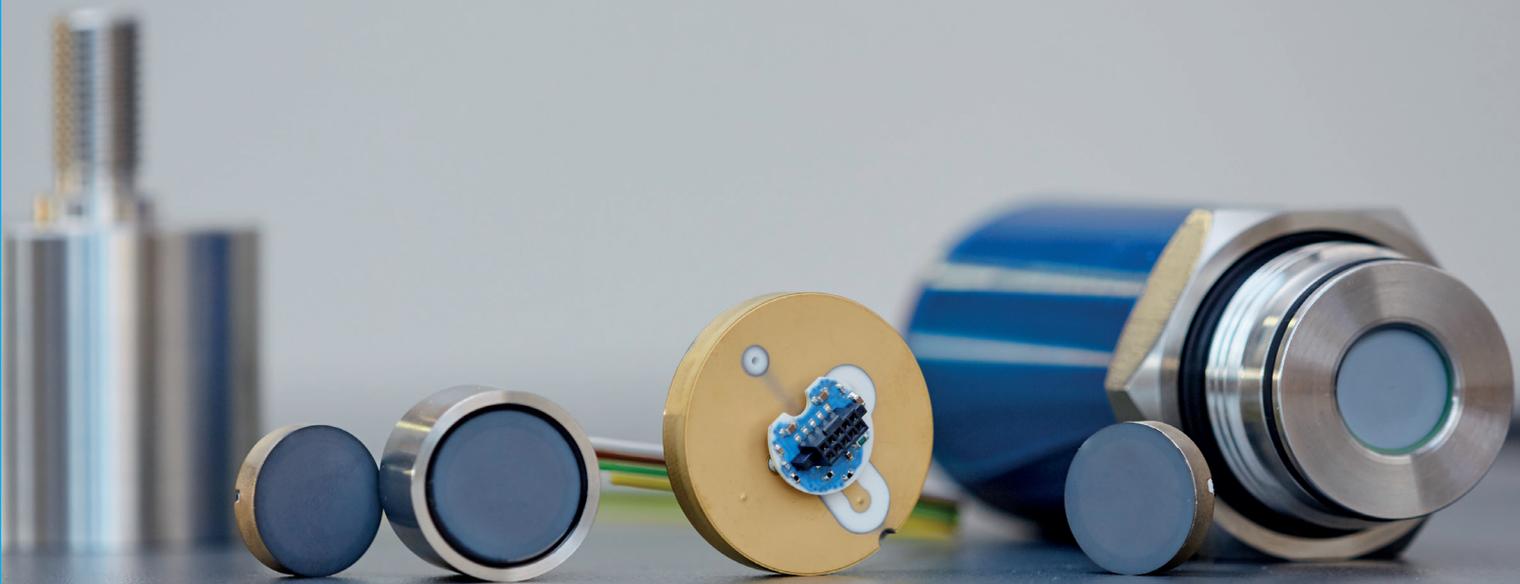


Hochpräzisions-Druckmessung mit kleinen kapazitiven Sensoren auf Keramikbasis



Verzeichnis

1	Einleitung	3
2	Drucksensor	3
3	Prüfung	5
4	Ergebnisse	6
5	Schlussfolgerungen	14

Von Dr. Jorge Andres Diaz

Universitätsprofessor und Experte im Bereich der Sensorcharakterisierung und -entwicklung.

Leiter des Sensorcharakterisierungslabors (SCL) CICANUM. Universität von Costa Rica.



Über den Autor:

Dr. Diaz ist Universitätsprofessor mit dem Schwerpunkt Sensordesign und Instrumentierung und ist der Leiter des Sensorcharakterisierungslabors. Er erlangte den Grad eines Ph.D. an der Universität von Minnesota und hat sich zu einem internationalen Experten auf dem Gebiet der Charakterisierung der Gaskonzentrations-, Durchfluss- und Druckmessung sowie der Geräteentwicklung entwickelt. Er hat als Mitarbeiter der NASA an mehr als 20 Projekten im Bereich der in-situ-Probenahme, der Beurteilung und der Optimierung tragbarer Systeme für verschiedene Anwendungen auf der Erde und im Weltall mitgewirkt und arbeitet seit 22 Jahren als Berater für die Halbleiterindustrie in den Bereichen Produktentwicklung und Sensortechnik und hat mehrere Patente und Auszeichnungen erhalten.

Kontakt

Dr. Jorge Andres Diaz
Universidad de Costa Rica, Escuela
de Física (Fakultät für Physik)
San José, Provincia de San Jose,
Costa Rica

jorge.andres.diaz@gmail.com
www.ucr.academia.edu

1 Einleitung

Wenn wir über Hochpräzision bei der Druckmessung sprechen, stellen wir uns mitunter große und sperrige Drucksensoren vor, die aus der Raumfahrt oder dem Militär stammen. Diese kosten leicht Tausende von Dollar für einen einzigen Messumformer. Dies gilt für Anwendungen, bei denen eine sehr hohe Genauigkeit (üblicherweise weniger als 0,1 % v.E., 1 % v.M.) und eine präzise Temperaturkompensation ($< 0,001 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$) erforderlich ist, um ein genaues und wiederholbares Signal zu liefern, das über die Zeit stabil ist. Ich war an Anwendungsprojekten im Weltall, in der Atmosphäre und auf der Erde (**Ref 1, 2, 3**) beteiligt, bei denen ein einziger Drucksensor mit den genannten Spezifikationen mehrere tausend Dollar kosten kann. Ein Betrag, der ohne jegliches Zögern von Kunden gezahlt wird, die einzigartige und kundenspezifische Geräte benötigen, die eine solche Genauigkeit erfordern. Kann eine solche Leistung jedoch auch von einem kleinen Keramiksensor erreicht werden, der günstig ist? Meine erste Reaktion war: Nein, das ist unmöglich. Ich arbeite seit mehr als 20 Jahren mit Drucksensoren und habe kundenspezifische Drucksensoren für spezifische Anwendungen in rauen Umgebungen entwickelt (**Ref 4**). Ich weiß also, was mit kleinen Drucksensoren auf Keramikbasis erreicht werden kann und was nicht. Unabhängig davon, ob sie kapazitive oder piezoresistive Technologien verwenden, sind der Hochpräzision aufgrund ihrer Bauform Grenzen gesetzt. (**Ref 5**) Dies war die Herausforderung, als ich gebeten wurde, eine neue Familie von Drucksensoren von einem bekannten europäischen Unternehmen, das auf industrielle Messgeräte spezialisiert ist, zu beurteilen. Wie genau und stabil können diese kleinen Sensoren arbeiten? Der vorliegende Artikel beschreibt die Ergebnisse.

2 Drucksensor

Der Ceracore USC30 ist ein kleiner Drucksensor für die Messung von Absolut- und Relativdruck (**Ref 6,7,8,9**). Laut Hersteller bietet seine kapazitive Keramikmesszelle aus 99,9 % reinem Al_2O_3 neue Designs und neue digitale Möglichkeiten, wodurch eine hohe Überdruck- und Abriebbeständigkeit erreicht wird. Er zeigt außerdem weniger starke Montageeinflüsse und nimmt für sich eine bessere Leistung, Stabilität, Genauigkeit und Temperaturkompensation sowie eine flexiblere Anpassung an verschiedene Anwendungen als seine Vorgängerversionen in Anspruch.



Abbildung 1: Ceracore USC30:
Kapazitiver Hochpräzisions-Drucksensor

Um diese Ansprüche zu bestätigen, prüften wir den USC30 mit einem Außendurchmesser von 17,5 mm und einem Relativdruckbereich von 0-4 bar, was eine der am häufigsten eingesetzten Messbereiche dieses Sensors darstellt. Wie gewünscht wurden die Sensoren auf 0-4,5 bar und 10-65 °C kalibriert.

Tabelle 1 beschreibt die technischen Daten des gewählten Sensors: Dieser kapazitive Sensor wird ausschließlich im Endress+Hauser-Werk in Maulburg im Südwesten von Deutschland, unweit der französischen und Schweizer Grenze, produziert. Heute ist Endress+Hauser in Maulburg ein führender Hersteller von Messgeräten, Sensoren und Komponenten und Anbieter von Dienstleistungen für die Füllstand-, Druck- und Differenzdruckmessung sowie von Lösungen für das Bestandsmanagement.

Tabelle 1 Technische Informationen zum Ceracore USC30

Größe:	Außendurchmesser 17,5 mm
Umgebungs-/Prozesstemperatur:	-40 bis +125 °C
Lagertemperatur:	-40 bis +125°C
Elektrostatische Entladung (ESD):	Max. 2 kV
Betriebsspannung:	2,9 bis 5,5 V
Material:	99,9 % Al ₂ O ₃
Leistungsaufnahme:	< 1,6 mA
Analoges Ausgangssignal:	Ratiometrisch oder absolut
Digitale Schnittstelle:	UART oder SPI
Drucksignal:	24 bit
Temperatursignal (optional):	16 bit
Messrate:	1,25 bis 160 ms
Nominale Relativdruckbereiche:	-100 bis 100 mbar / -10 bis 10 kPa / -1,5 bis 1,5psi
	-200 bis 200 mbar / -20 bis 20 kPa / -3 bis 3 psi
	-400 bis 400 mbar / -40 bis 40 kPa / -6 bis 6 psi
	-1 bis 1 bar / -100 bis 100 kPa / -15 bis 15 psi
	-1 bis 2 bar / -100 bis 200 kPa / -15 bis 30 psi
	-1 bis 4 bar / -100 bis 400 kPa / -15 bis 60 psi (gewählt)
	-1 bis 10 bar / -0,1 bis 1 MPa / -15 bis 150 psi
	-1 bis 20 bar / -0,1 bis 2 MPa / -15 bis 300 psi
	-1 bis 40 bar / -0,1 bis 4 MPa / -15 bis 600 psi
	-1 bis 100 bar / -0,1 bis 10 MPa / -15 bis 1500 psi
Nominale Absolutdruckbereiche:	0 bis 100 mbar / 10 kPa / 1,5 psi
	0 bis 200 mbar / 20 kPa / 3 psi
	0 bis 400 mbar / 40 kPa / 6 psi
	0 bis 1 bar / 100 kPa / 15 psi
	0 bis 2 bar / 200 kPa / 30 psi
	0 bis 4 bar / 400 kPa / 60 psi
	0 bis 10 bar / 1 MPa / 150 psi
	0 bis 20 bar / 2 MPa / 300 psi
	0 bis 40 bar / 4 MPa / 600 psi
	0 bis 100 bar / 10 MPa / 1500 psi

3 Prüfung

Zur Bestimmung der Sensorleistung wurde eine Anzahl von 20 Stück auf einem Metallverteilerstück montierten Sensoren einer Reihe von verschiedenen Drücken und Temperaturen ausgesetzt (**Ref 10**). Das kompensierte Ausgangssignal wird dann mit einem Referenzdruckmessgerät mit einem Druckbereich von 0 bis 200 psi und einer Messwertgenauigkeit von $\pm 0,01\%$ und einem Referenztemperaturmessgerät mit einem Bereich von -50 bis $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Genauigkeit von $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ verglichen.

Die vom Hersteller bereitgestellten Sensoren sind bereits in einem Bereich von 10 - $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 0 - 65 psi Druck- und Temperatur kalibriert, was eine Anpassung der Optionen in den technischen Informationen darstellt. Die Bestimmung der Sensorgenauigkeit besteht darin, die Druckausgabe des Sensors mit dem Referenzmessgerät bei jeder Temperatur zu vergleichen. Wie in Abbildung 2 gezeigt, werden je 9 Druckpunkte je Temperatur bei 5 verschiedenen Temperaturen zur Bestimmung der Genauigkeit im gewählten Temperaturbereich verwendet. Zusätzlich werden 3 Zyklen bei Raumtemperatur zur Bestimmung der Wiederholbarkeit verwendet. Insgesamt wurden also 9 Temperaturstufen für diese Charakterisierung verwendet.

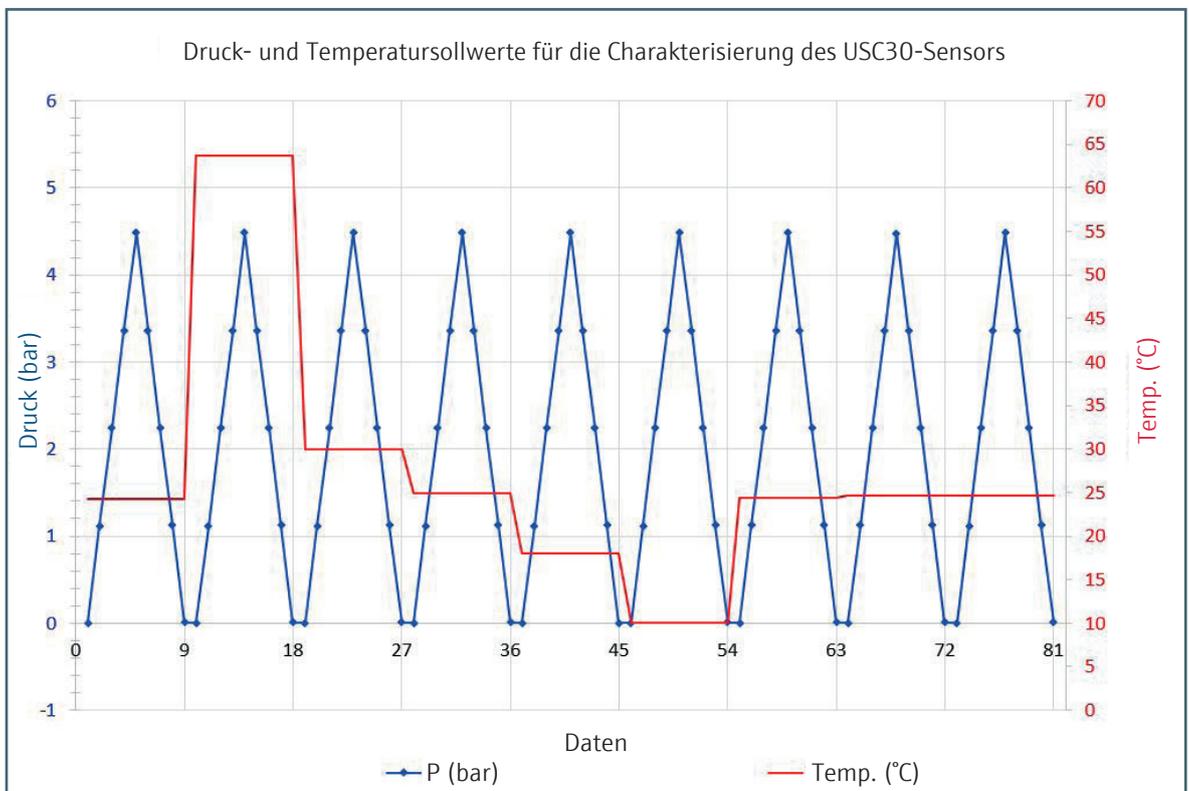


Abbildung 2: Druck- und Temperaturverifizierungssequenz

4 Ergebnisse

Für jeden Drucksensor kann die Genauigkeit als Messfehler in Prozent vom Endwert (% v.E.) spezifiziert werden:

$$\text{Messfehler in \% v.E.} = [(P \text{ Sensor} - P \text{ Ref}) / FS \text{ Sensor}] \times 100 \quad (1)$$

Für standardmäßige kleine Drucksensoren aus Keramik ist die typische Genauigkeitsabweichung für die meisten Sensoren gleich ± 1 % v.E. bei Raumtemperatur. Einige Drucksensoren in der Automobilindustrie können sogar eine Genauigkeitsabweichung von 3 % oder gar 5 % v.E. haben. Meiner Erfahrung nach kann bei einem Drucktransducer von „**Hochpräzision**“ gesprochen werden, wenn er eine Genauigkeitsspezifikation von $< 0,1$ % v.E. über den spezifizierten Temperaturbereich aufweist. Abbildung 3 zeigt die Prüfergebnisse der 20 Stück USC30-Sensoren, die als Messfehler in % v.E. für alle geprüften Temperaturen dargestellt werden. Zur besseren Veranschaulichung der Leistung der Sensoren werden die Grafen auf die Standard-Industriespezifikationen (± 1 % v.E.) referenziert, außerdem wird der Bereich der Hochpräzisionsspezifikationen ($\pm 0,1$ % v.E.) eingezoomt, wie in Abbildung 4 dargestellt.

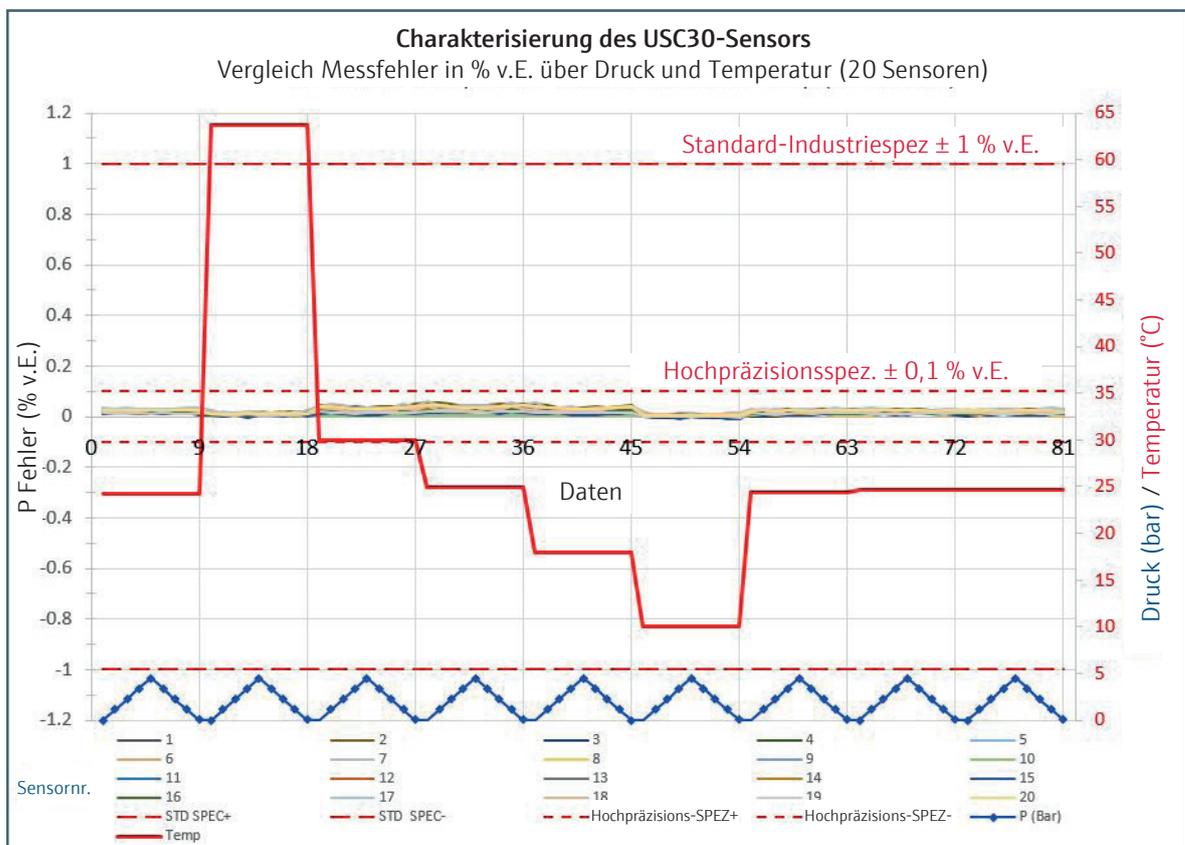


Abbildung 3: Ergebnis der Druck- und Temperaturverifizierung (% v.E.) für 20 Ceracore-USC30-Sensoren

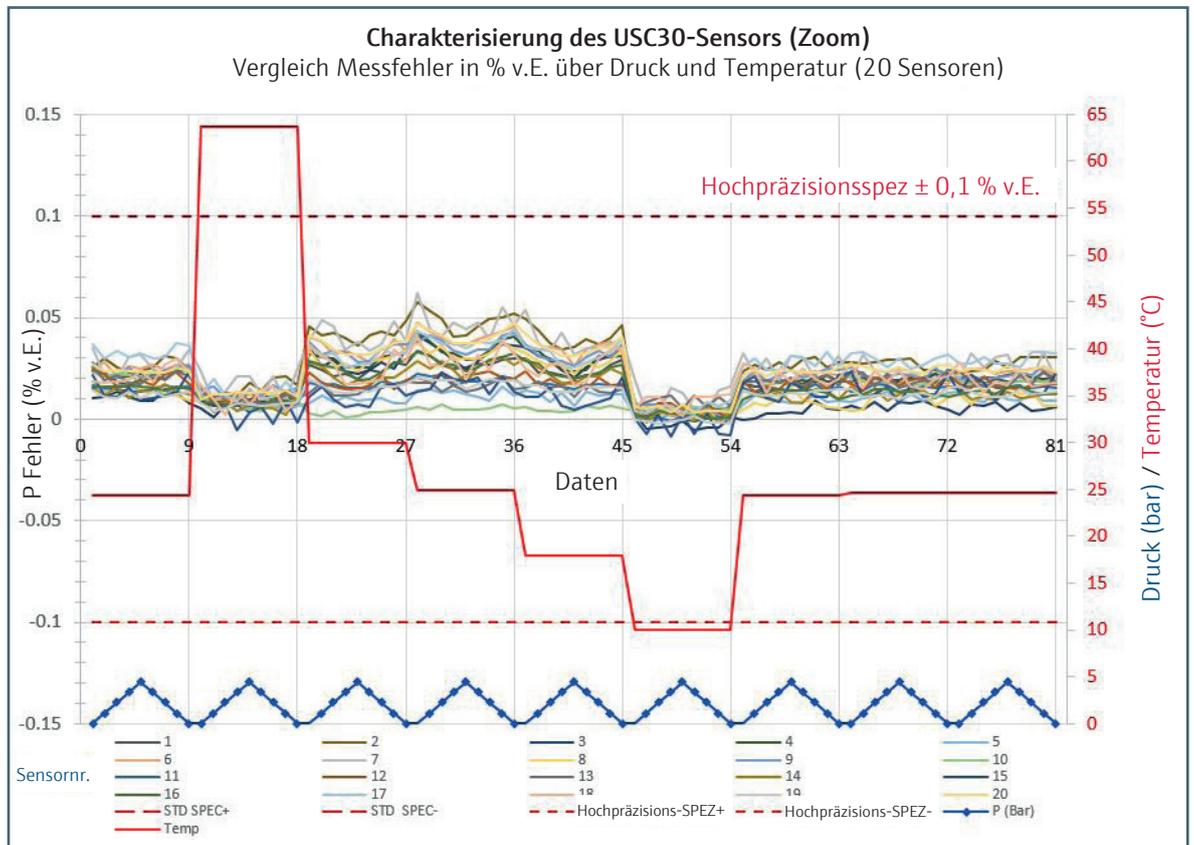


Abbildung 4: Ergebnis der Druck- und Temperaturverifizierung für 20 Ceracore-USC30-Sensoren. Zoom der Genauigkeit in % v.E.

Zur separaten Veranschaulichung von Temperatur- und Druckeinflüssen wird der Messfehler in Abhängigkeit vom Endwert (% v.E.) in Abbildung 5, abhängig vom Druck und in Abbildung 6, abhängig von der Temperatur dargestellt. Eine vergrößerte Ansicht der Messfehler in Abhängigkeit vom Endwert (% v.E.) für jeden Parameter aller 20 Sensoren findet sich in dem jeweils zweiten Diagramm.

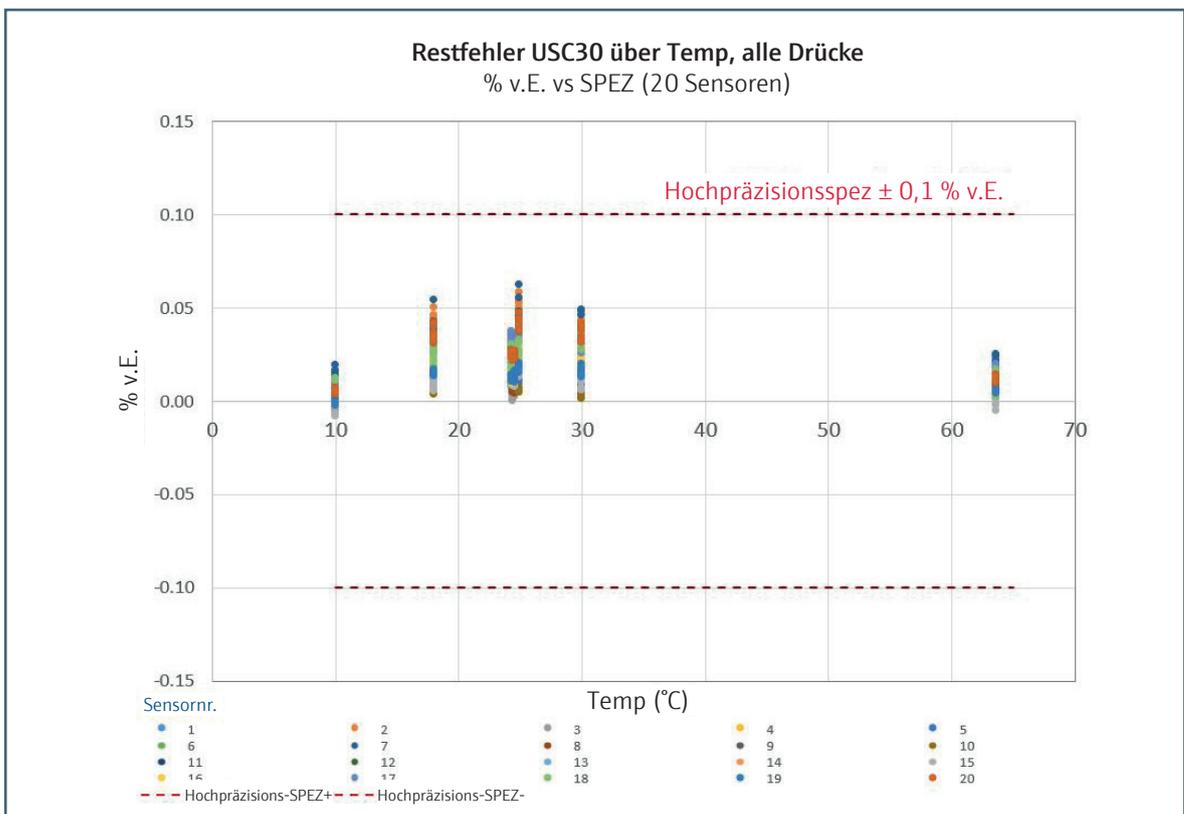
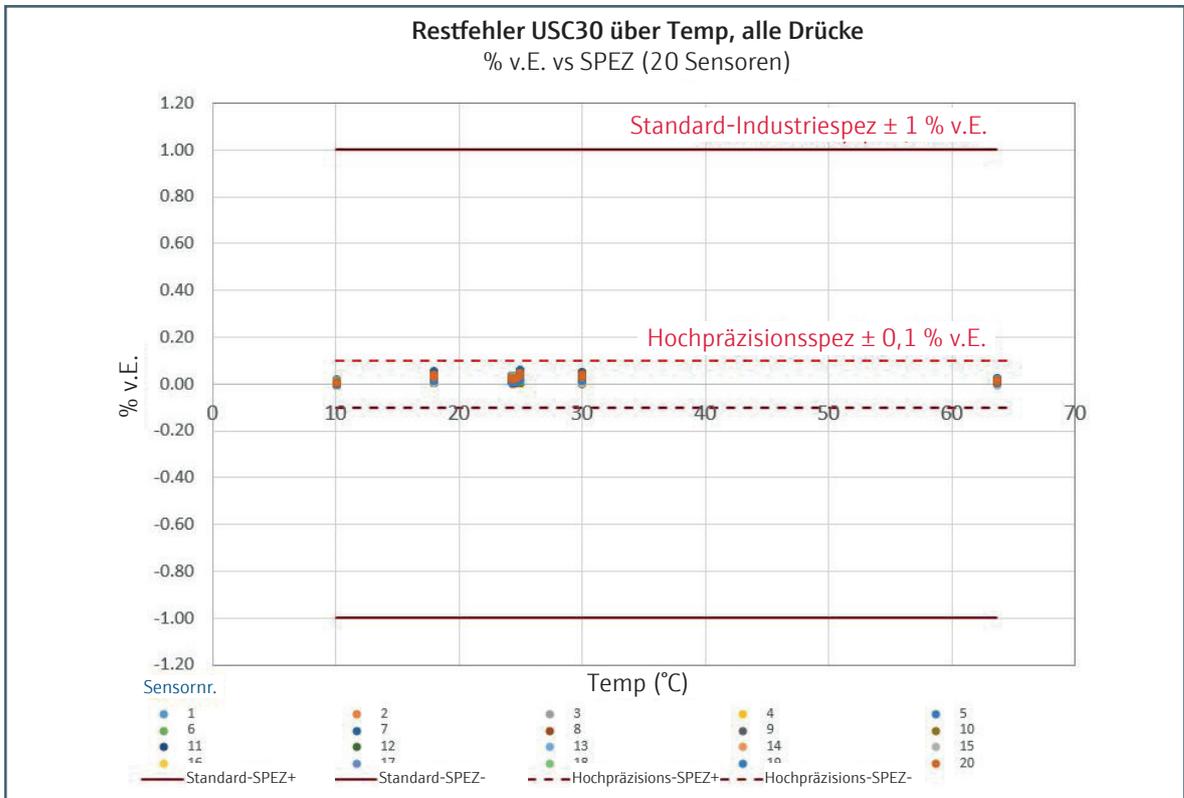


Abbildung 5: Druckeinflüsse auf USC30-Sensoren. % v.E. vs Druck für alle Sensoren. (Zoom auf Y-Achse in unterem Diagramm)

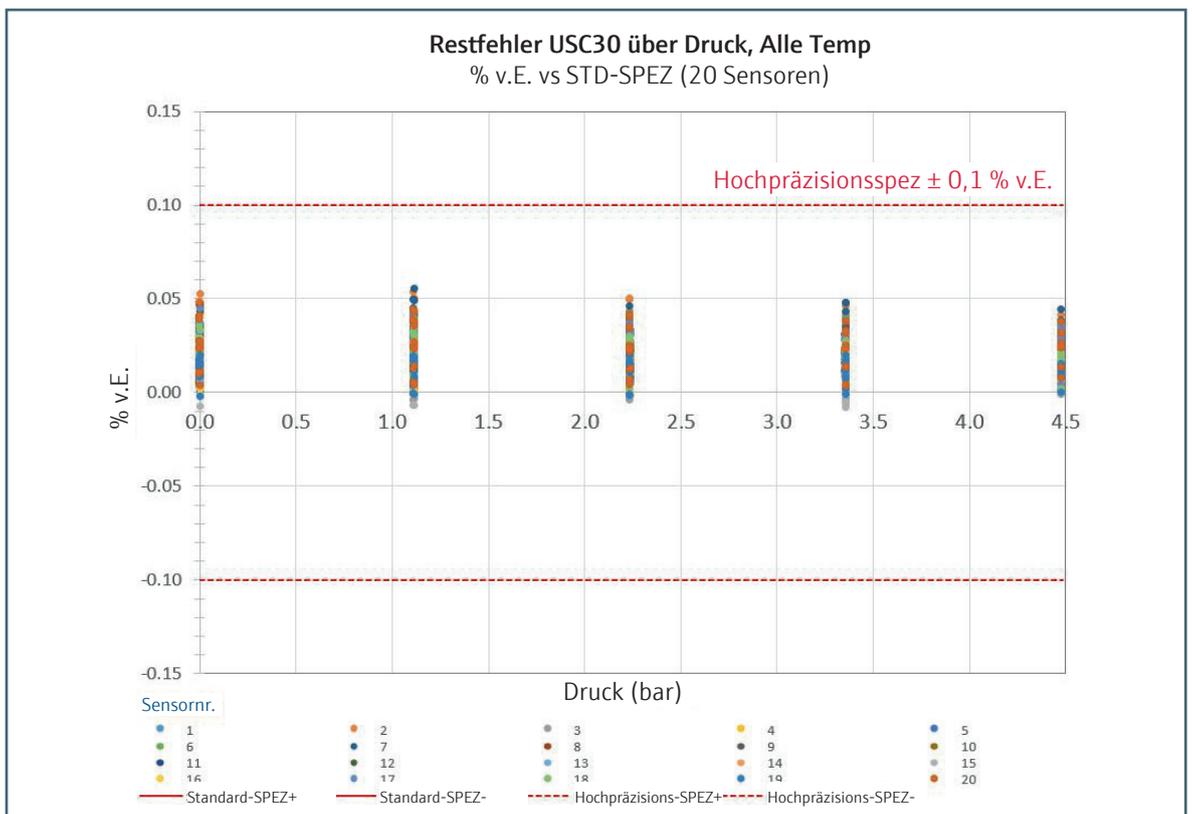
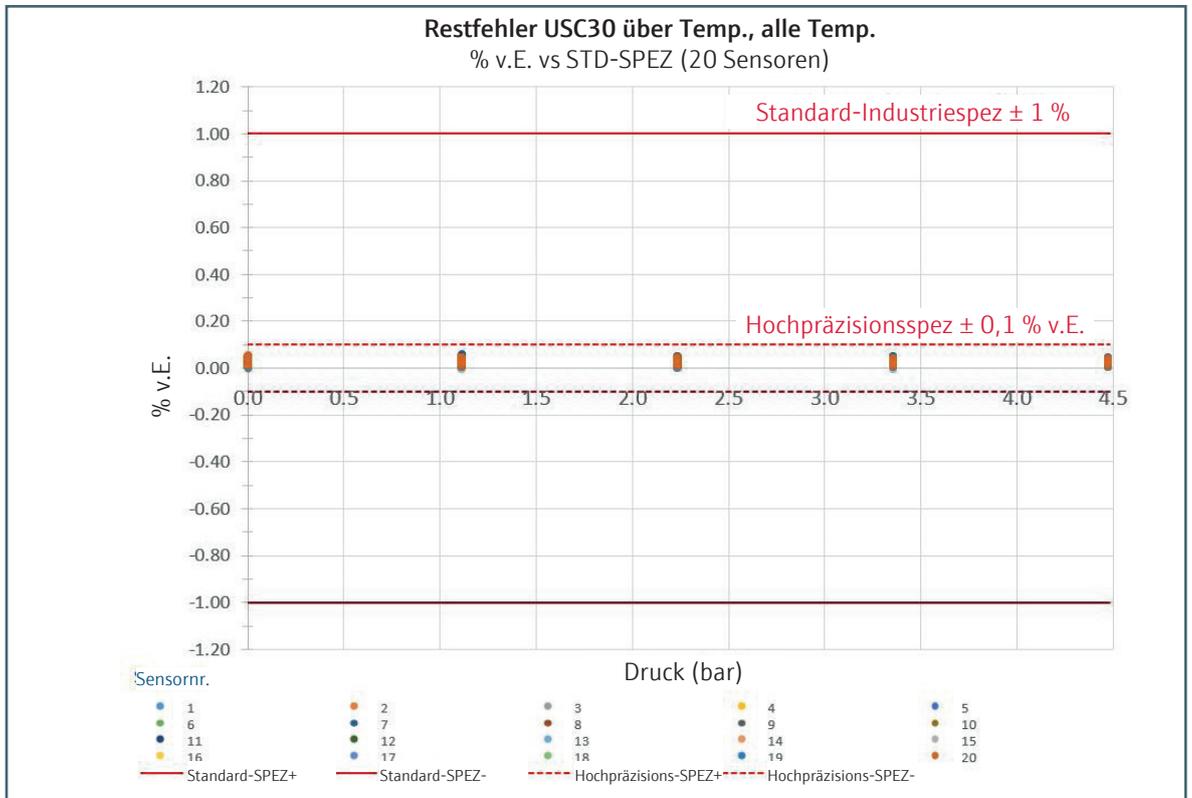


Abbildung 6: Temperatureinflüsse auf USC30-Sensoren. % v.E. vs Temperatur für alle Sensoren. (Zoom auf Y-Achse in unterem Diagramm)

Die Prüfung der 20 Ceracore-USC30-Sensoren zeigt ein sehr bemerkenswertes Ergebnis. Der maximale Fehler für alle Sensoren liegt bei nur **0,062 % v.E.**. Im Vergleich zur typischen Industriespezifikation ist das **16-mal** besser als jeder Standard-Drucktransducer mit einer Spezifikation von 1 % v.E. und **1,6-mal** besser als der festgelegte Schwellenwert für Hochpräzision von 0,1 % v.E. Abbildung 7 zeigt eine Zusammenfassung der bei den 20 Sensoren gemessenen maximalen Genauigkeitsabweichung, die Wiederholbarkeit bei Raumtemperatur für dieselbe Partie und die maximale individuelle Genauigkeitsabweichung für jeden Sensor im Vergleich mit der STD-SPEZ und dem Hochpräzisions-Schwellenwert.

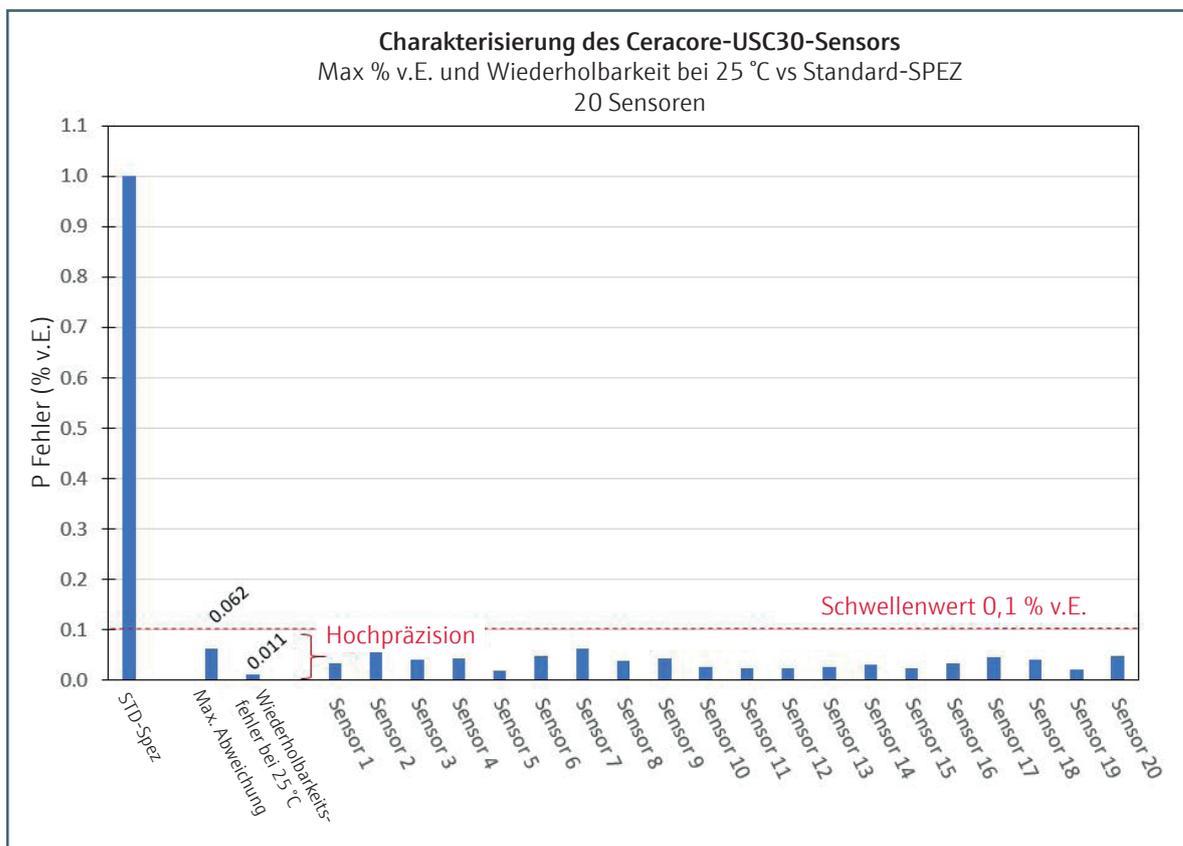


Abbildung 7: Zusammenfassung aller Sensoren. Max % v.E. @ allen Temp. und Wiederholbarkeit bei 25 °C

Ein Drucktransducer mit einer guten Genauigkeit in Abhängigkeit vom Endwert (% v.E.) kann Druckmesswerte über den kompletten Gerätebereich innerhalb der Spezifikation halten, ist aber insbesondere bei hohen Drücken besser als bei niedrigen Drücken. Es gibt viele Anwendungen, bei denen diese Art von Verhalten nicht ausreichend ist: Die Leistung muss bei jedem eingestellten Druck ähnlich sein, weswegen als andere Art der Spezifizierung der Genauigkeit der Prozentsatz des Sollwerts oder des Messwerts (% v.M.) zur Verfügung steht; wodurch gewährleistet wird, dass der Drucksensor die Messwerte bei einem beliebigen Druck auf dieselbe Weise genau innerhalb der Spezifizierung misst. (Der Sollwert für den Druckwert Null wird aus dieser Charakterisierung ausgenommen, da die Division durch Null nicht definiert ist).

White Paper – Hochpräzisions-Druckmessung

Für genauere Drucktransducer wird die Genauigkeit als ein Prozentsatz des Messwerts oder des Sollwerts spezifiziert

$$\text{Messfehler in \% v.M.} = [(P \text{ Sensor} - P \text{ Ref}) / P \text{ Ref}] \times 100 \quad (2)$$

Typischerweise findet man kleine Drucktransducer mit einer spezifizierten Genauigkeit von 5 % v.M. oder sogar 1 % v.M. Ähnlich wie bei der Betrachtung der Genauigkeit in % v.E. kann ein Sensor mit einem Messfehler von unter 1% v.M. als ein **Hochpräzisions**sensor angesehen werden. Abbildung 8 zeigt die gleichen Testergebnisse der 20 X USC30-Sensoren, aber dieses Mal in % v.M. für alle Temperaturen und alle Drücke, mit Ausnahme der Sollwerte für den Nullwert des Druckes.

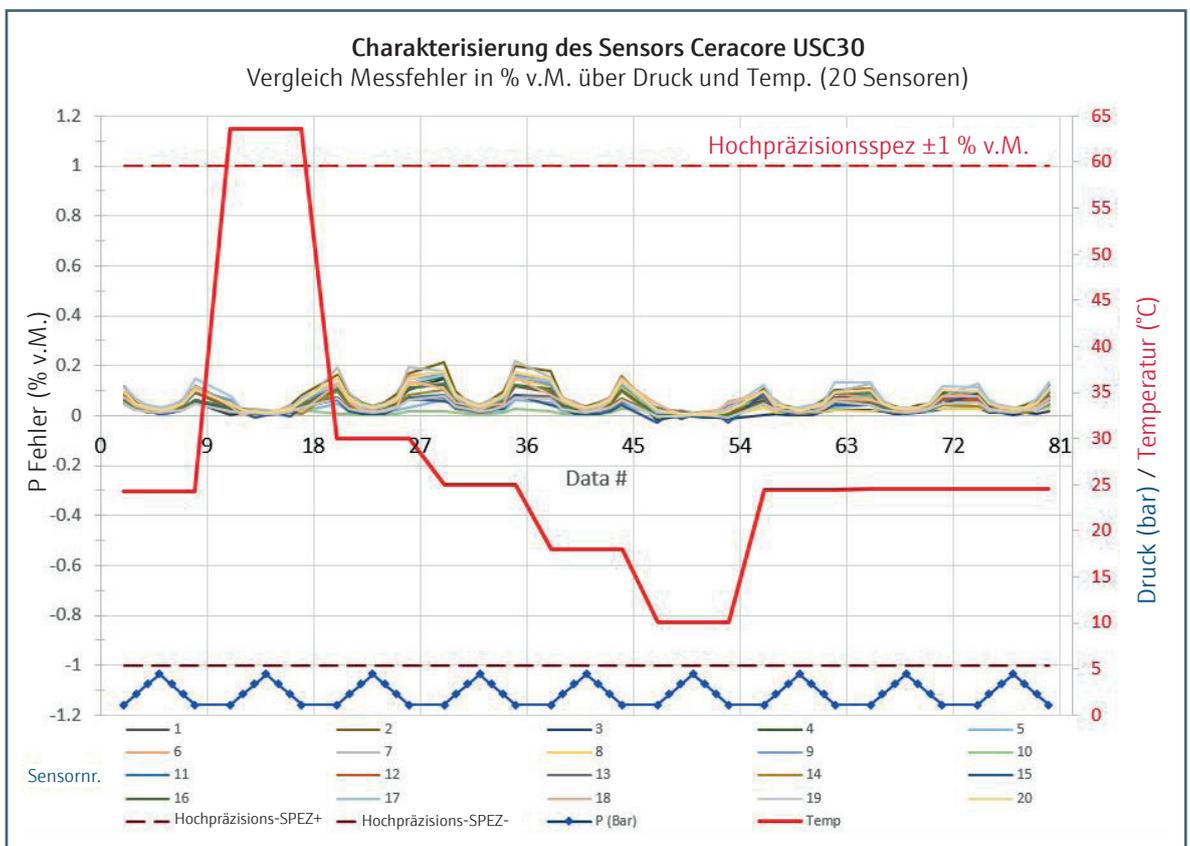


Abbildung 8: Ergebnis der Druck- und Temperaturverifizierung (% v.M.) für 20 Ceracore-USC30-Sensoren

Genauso wie bei der Darstellung der Genauigkeit in % v.E. wird zur separaten Veranschaulichung von Temperatur- und Druckeinflüssen die Genauigkeit in % v.M. in Abbildung 9 in Abhängigkeit vom Druck und in Abbildung 10 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

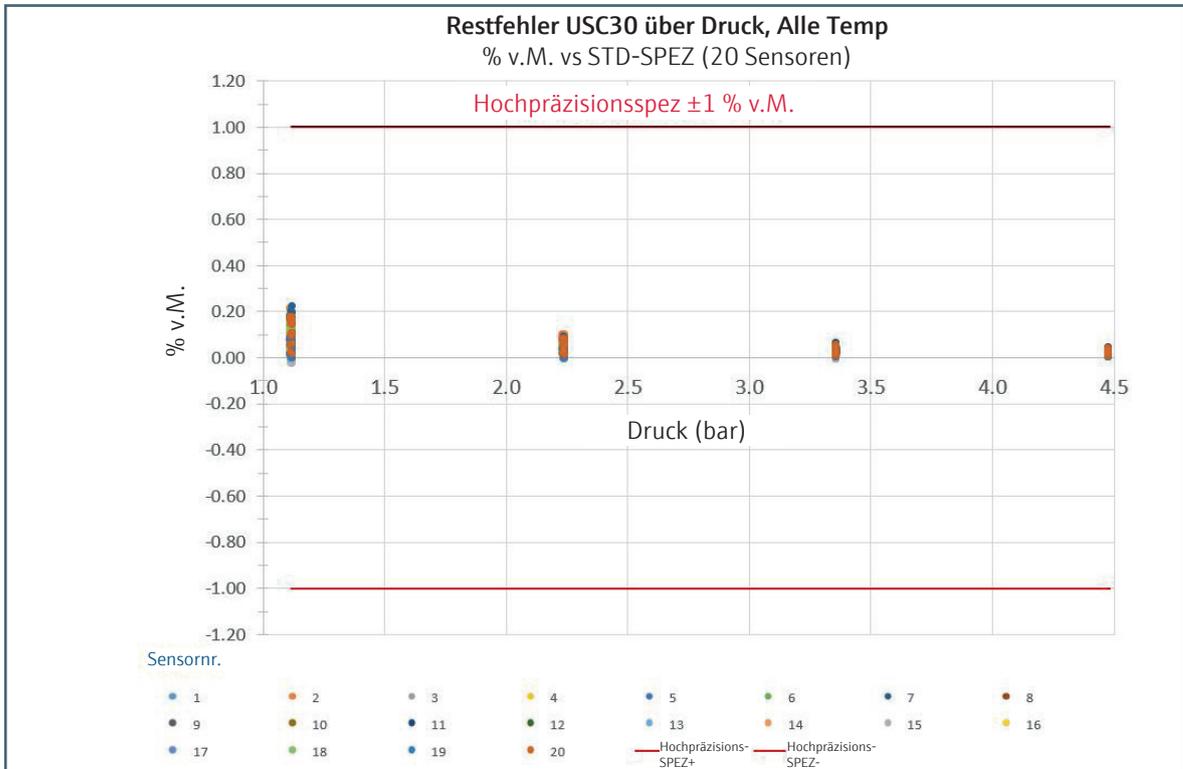


Abbildung 9: Druckeinflüsse auf USC30-Sensoren. % v.M. vs Druck für alle Sensoren

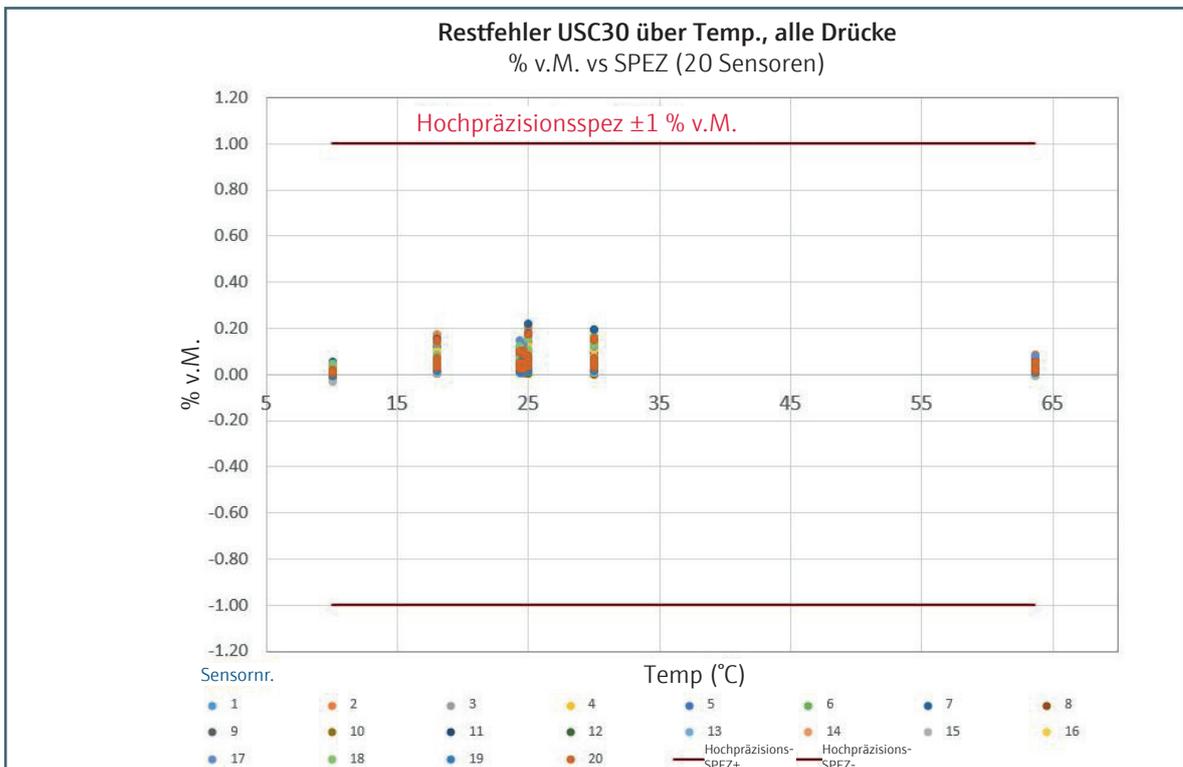


Abbildung 10: Temperatureinflüsse auf USC30-Sensoren. % v.M. vs Temperatur für alle Sensoren

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse für die Prüfung der 20 Sensoren, dargestellt in % v.M. Wie bei den Ergebnissen in % v.E. zeigt der Graf bemerkenswerte Vorteile des kleinen Drucksensors Ceracore USC30. Die maximale Messwertgenauigkeit liegt bei 0,22 % v.M. für alle geprüften Temperaturen, was 4,5-mal besser ist als die Zielvorgabe für Hochpräzisions-Drucktransducer mit einer spezifizierten Genauigkeit von 1% v.M. Die bei den Sensoren gemessene Wiederholbarkeit bei 25 °C ist 0,037 % v.M., was 27-mal besser ist als der erforderliche Schwellenwert für Hochpräzision.

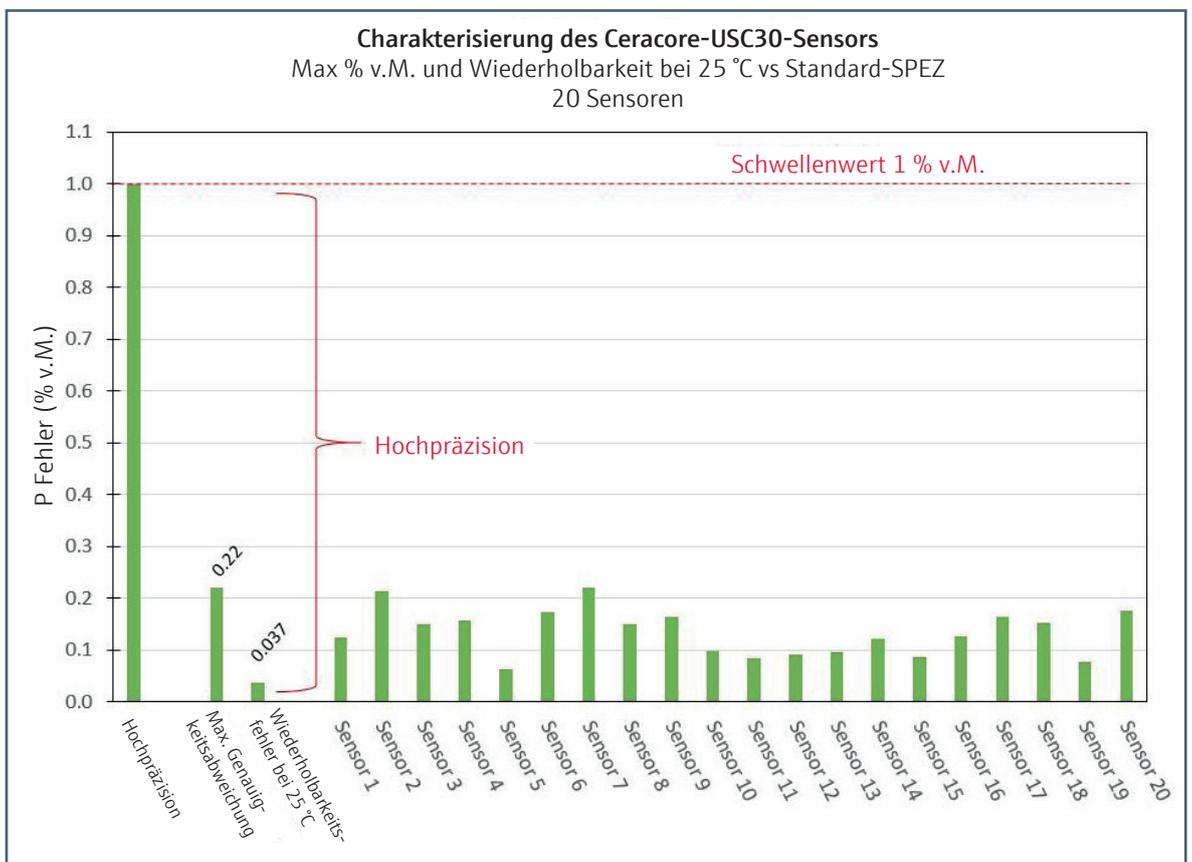


Abbildung 11: Standardgenauigkeit vs Genauigkeit des Ceracore USC30, dargestellt in % v.M.

Die abschließenden Parameter dieser Studie waren Temperaturleistung und Wiederholbarkeit bei Raumtemperatur. Die Temperaturleistung kann definiert werden durch Berechnung des Temperaturkompensationskoeffizienten (oder TCC), der ein lineares Verhalten zwischen Temperatur und Genauigkeitsabweichung annimmt. Je niedriger diese Zahl, desto anfälliger ist der Sensor gegenüber Temperatureinflüssen. Ein typischer Wert für TCC bei Hochpräzisionsensoren oder Sensoren mit sehr hoher Leistung ist $< 0,001$ % Fehleränderung / °C.

Für das getestete Los der 20 USC30-Sensoren haben wir die folgenden TCCs erhalten:

TCC (% v.E.) = 0,000088 % v.E. Fehleränderung/ °C, was **11-mal** niedriger ist als der Zielwert für **Hochpräzision**.

Für eine Wiederholbarkeit von % v.E. haben wir den Max.-Min. Fehler bei demselben Prüfpunkt innerhalb der 3 letzten Zyklen bei Raumtemperatur berechnet; dies lieferte die folgenden Ergebnisse, die ebenfalls in Abbildung 11 zu sehen sind:

Max. Wiederholbarkeit bei 25 °C (% v.E.) = 0,037 % v.E., was **27-mal** höher ist als der Zielwert für **Hochpräzision**.

Alle diese Ergebnisse deuten auf einen sehr stabilen kapazitiven Drucksensor hin, der mit Hochpräzisionswerte (Spez. $< 0,1$ % v.E.) und (Spez. < 1 % v.M.) konkurrieren kann.

5 Schlussfolgerungen

Betrachtet man die typischen Spezifikationen, die heute auf dem Markt von Herstellern von Drucksensoren sowohl für OEM- als auch für Transducer-Druckmessanwendungen angeboten werden (1 % v.E.), liegen die bei dieser Studie durch Prüfung der Sensoren Ceracore USC30 erhaltenen Ergebnisse weit über dem, was für einen kleinen keramischen OEM-Drucksensor zu einem fairen Preis zu erwarten ist. Die durchschnittliche Leistung hinsichtlich Genauigkeit und Wiederholbarkeit liegt innerhalb der Hochpräzisionsbereiche ($< 0,1$ % v.E., < 1 % v.M.). Diese Werte sind typisch für größere, schwerere, sperrigere und teurere Drucktransmitter. Die korrekten Materialien, der genaue Prozess, die korrekte Kalibriermethode, die geeignete Elektronikplatine für die Signalkonditionierung und die Implementierung von Temperatur- und Druckkompensationsalgorithmen höherer Ordnung, all dies ergibt zusammen einen Drucksensor, der jeden anderen kleinen Keramik-Drucksensor, der heute auf dem Markt zu finden ist, in den Schatten stellt.

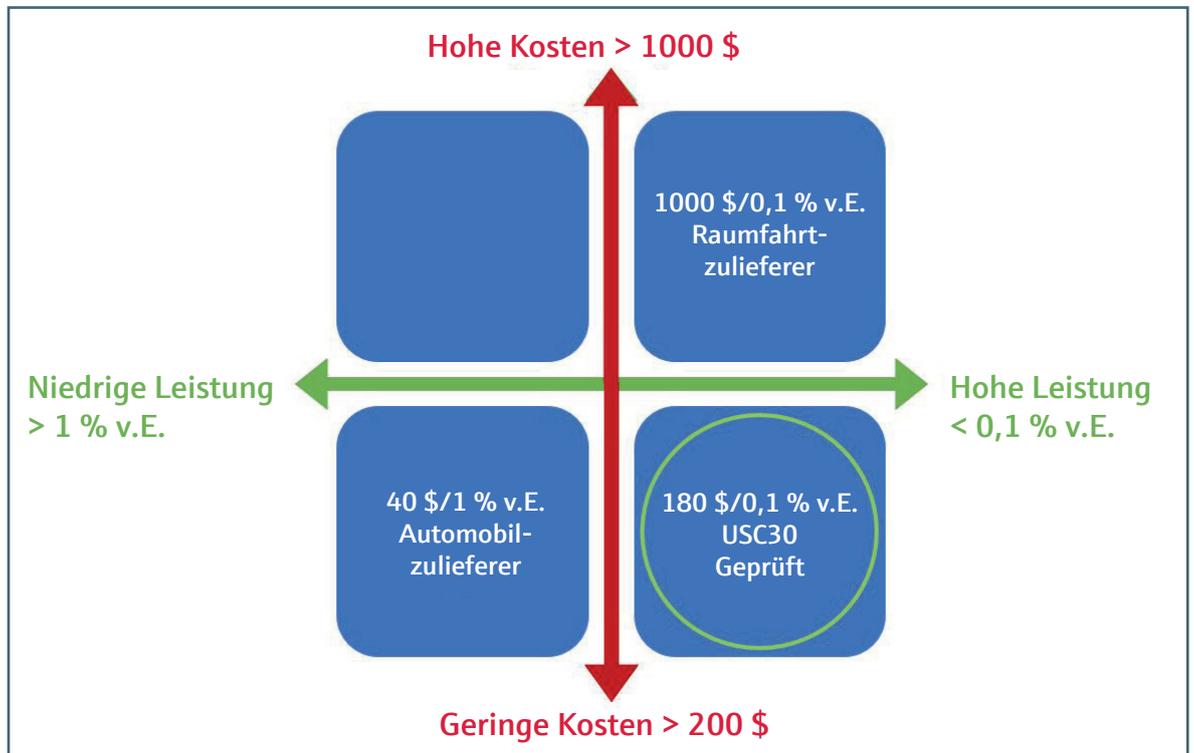


Abbildung 12: Studie zum Preis-Leistungs-Verhältnis

In einer Umgebung, in der Massenproduktion und Miniaturisierung die Prozessindustrie bestimmen und ein Bedarf an immer besseren Sensoren zu immer günstigeren Preisen besteht, muss man sich sowohl auf die Leistung der Sensoren (Genauigkeit, Wiederholbarkeit, Temperaturkompensation, Drift) als auch auf ihre Kosten in großen Mengen konzentrieren. Und genau hier wird ein Sensor wie der kürzlich von Endress+Hauser entwickelte Ceracore USC30 eine wichtige Rolle spielen, um die Lücke zwischen sehr hoher Leistung und geringen Kosten zu schließen und Anwendungen zu ermöglichen, die zuvor nicht möglich waren. Entweder war es zu teuer, den richtigen temperaturkompensierten Drucksensor zu integrieren, oder seine Leistung war aufgrund des Materialbudgets zu gering. Ich hoffe, dieser Artikel kann als Leitlinie für die Auswahl des richtigen Sensors für Ihre Anwendung dienen.



Referenzen:

1. Paper: J Am Soc Mass Spectrom (JASMS). **Evaluation of small mass spectrometer systems for permanent gas analysis.** 13 Aug 2002:1004-12. Arkin CR, Griffin TP, Ottens AK, Diaz JA, Follistein DW, Adams FW, Helms WR
2. Paper: J Am Soc Mass Spectrom (JASMS). **Unmanned aerial mass spectrometer systems for in-situ volcanic plume analysis,** 15 Jan 2015. Diaz J.A., Pieri D., Wright K., Sorensen P., Kline-Shoder R., Arkin CR., Fladeland M., Bland G., Buongiorno M.F., Ramirez C., Corrales E., Alan A., Alegria O., Diaz D. and Linick J
3. Paper: Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS) **Ozonesonde Quality Assurance: The JOSIE-SHADOZ (2017) Experience.** Sept 2018. Thompson, A. M.,..., **Diaz J.A.**, et al
4. US Patent #6612175B1. **Sensor usable in ultra pure and highly corrosive environments** Jul 20, 2000. NT International Inc/ Current: Entegris Inc. Tom Peterson, Jorge Andres Diaz, Gerald R. Cucci.
5. Sensor Expo and Conference Proceedings. **Capacitive Ceramic Pressure Sensors** June 7, 2012. Christopher Proios.
6. US Patent # 9958350. **Capacitive, ceramic pressure-measuring cell and method for the production thereof.** May 1, 2018. Endress+Hauser GmbH+Co. KG. Nils Ponath, Andreas Rossberg
7. US Patent # 9931717. **Assembly having at least two ceramic bodies joined with one another, especially a pressure measuring cell, and method for joining ceramic bodies by means of an active hard solder, or braze.** April 3, 2018. Endress+Hauser GmbH+CO. KG. Andreas Rossberg, Elke Schmidt, Markus Rettenmayr, Peter Siegmund
8. US Patent # 8966989. **Capacitive ceramic pressure measuring cell and pressure sensor with such a pressure measuring cell.** March 3, 2015. Endress+Hauser GmbH+Co. KG. Ulfert Drewes, Thomas Uehlin, Elke Schmidt, Andreas Rossberg
9. US Patent # 8104353. **Capacitive pressure sensor.** January 31, 2012. Endress+Hauser GmbH+Co. KG. Ulfert Drewes, Frank Hegner, Andreas Rossberg, Elke Schmidt, Sabine Stolle, Christel Kretschmar, Melanie Hentsche
10. Sensor Expo and Conference Proceedings. **How to find the right high-performance pressure sensor for your application: An independent performance characterization on capacitive ceramic pressure sensors.** June 27, 2012. Jorge A. Diaz

Sensors & Components

Endress+Hauser SE+Co. KG
Hauptstraße 1
79689 Maulburg
Germany

Tel. +49 7622 28 2147
E-Mail: sensors-components.pcm@endress.com
www.sensors-components.endress.com