Genauigkeit von MEMS piezoresistiven Drucksensoren verstehen

Dieser Artikel soll – basierend auf der Erfahrung aus unzähligen Kundengesprächen – Anwendungstipps liefern, die die Entwicklung mit MEMS Drucksensoren vereinfachen und häufige Fehler- und Irritationsquellen vermeiden sollen. Außerdem ist eine genaue Definition ausschlaggebender Begriffe enthalten.

Bei der Entwicklung und Herstellung eines Produktes, gibt es immer wieder den Fall, dass der starr vorgegebene Preis des Sensors die Spezifikation bestimmt. Kann kein entsprechender Sensor gefunden werden, werden folglich die Anforderungen an das Produkt reduziert – solange, bis der Zielpreis erreicht ist.

Meist und insbesondere in der Medizintechnik aber ist es andersherum. Hier bestimmen Normen und Vorgaben über die Funktionalität des Endgerätes die Spezifikation des Sensors. Erst im zweiten Schritt gilt es, herauszufinden, wie kostengünstig ein Sensor unter Einhaltung der Vorgaben herstellbar ist.

Begrifflichkeiten

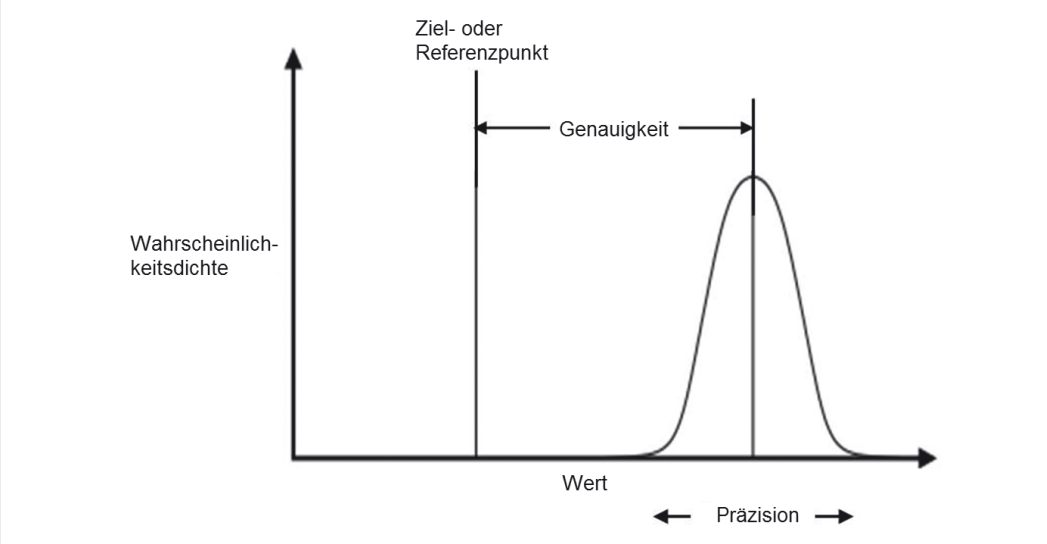
In beiden Fällen ist es erforderlich, die beschreibenden Parameter des Produktes zu verstehen. Da hierbei wesentliche Begrifflichkeiten von Unternehmen zu Unternehmen häufig unterschiedlich verwendet werden, kommt es zu Verwechslungen und Missverständnissen. Um diese zu vermeiden, zum Beispiel in einem Gespräch zwischen Sensorhersteller und Kunde, ist es wichtig, zu Beginn zu klären, was mit einzelnen Definitionen gemeint ist und bei Bedarf

Für viele Anwendungen ist es heutzutage erforderlich einen mikroelektromechanischen (MEMS) Drucksensor auszuwählen und zu integrieren. Allerdings lassen sich die Anforderungen aus Normen und/oder internen Vorgaben nicht ohne Weiteres in Spezifikationen für einen Drucksensor übersetzen. Eine weitere Schwierigkeit stellen die in den Datenblättern von Drucksensoren enthaltenen hersteller- und produktspezifischen begrifflichen Unterschiede dar. Sie verkomplizieren die Entscheidung, welcher Sensors der geeignete ist.

Kurz gefasst:

Die Entwicklung von MEMS Sensoren ist kompliziert. Datenblätter sollten hierbei als Orientierung dienen. Allerdings sind die verwendeten Begriffe nicht einheitlich definiert. Dies soll in diesem Artikel für die wichtigsten Begriffe nachgeholt werden.

All Sensors GmbH
www.allsensors.com



Graphik 1: Verhältnis zwischen Genauigkeit und Präzision

gemeinsame Termina festzulegen. Um dies zu erreichen, ist es oft hilfreich, zu ergründen, wie die einzelnen Parameter bestimmt oder gemessen werden.

Im Folgenden sind häufige Verwechslungen von Parametern dargestellt. Dabei wird auf eine Parameterverwechslung aus der Sicht des Sensorherstellers eingegangen. Der je nach Kunde eventuell abweichende Sprachgebrauch kann nicht berücksichtigt werden.

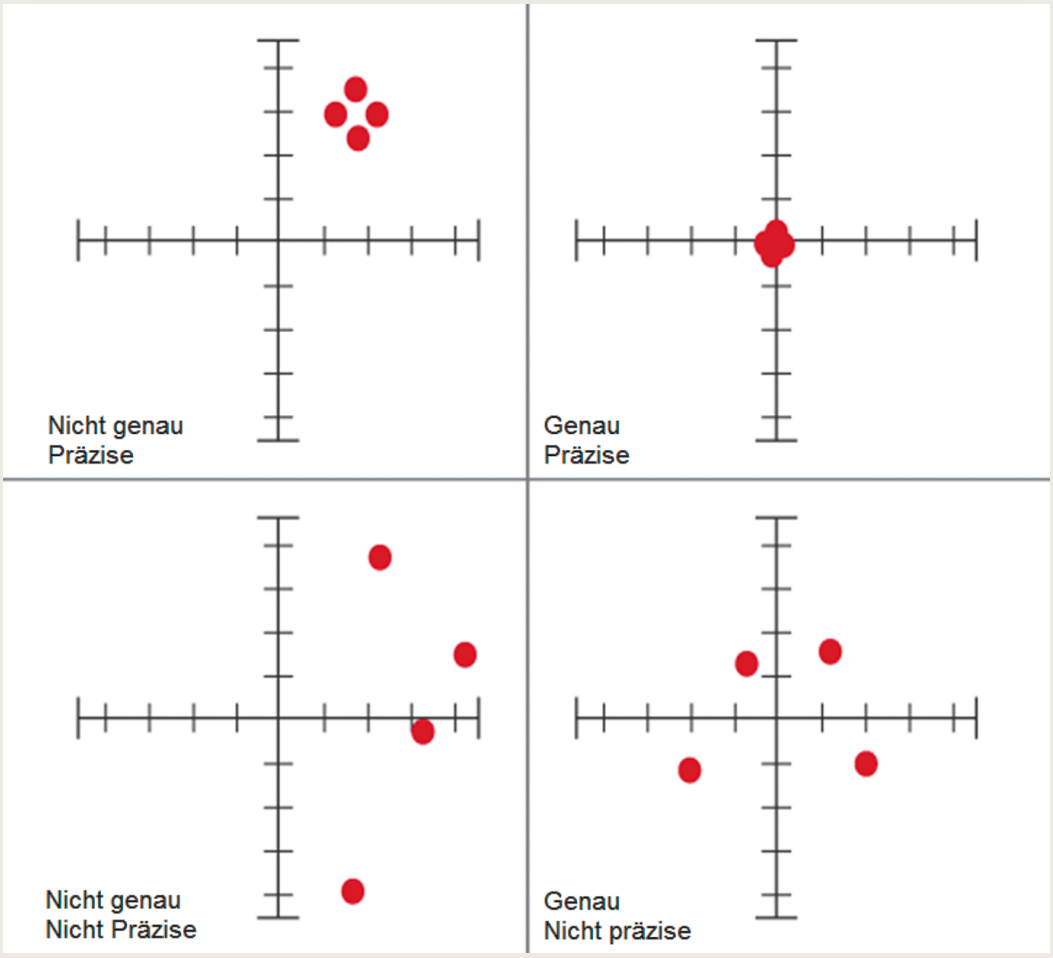
Genauigkeit versus Präzision

Die Begriffe Genauigkeit und Präzision werden häufig synonym verwendet, besonders in Werbetexten für Produkte, die Sensoren enthalten. Die zwei folgenden Graphiken zeigen den deutlichen Unterschied zwischen beiden Spezifikationen. Graphik 1 zeigt die Präzision als statistische Verteilung von Messpunkten mehrerer Sensoren am gleichen Arbeitspunkt im Vergleich zur Genauigkeit als Abstand eines tatsächlichen Wertes eines jeden Sensors zum Ziel- oder Vergleichswert. Bei präziseren Sensoren sind die Messwerte enger verteilt, bei genaueren Sensoren liegen sie näher am geforderten Wert. Graphik 2 zeigt, wie sich Präzision und Genauigkeit am Beispiel von Farbpunkten auf Zielscheiben unabhängig voneinander verändern können.

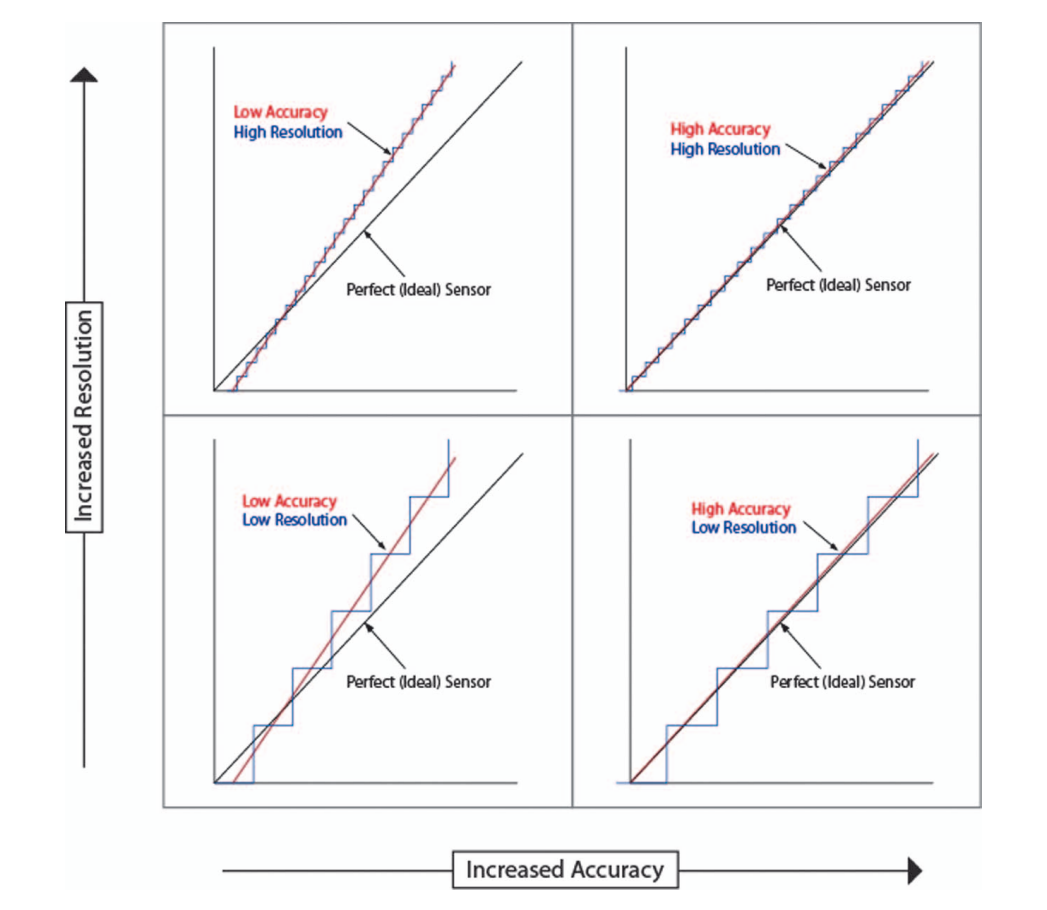
In der Regel weisen Sensoren aus einer Charge eine hohe Präzision auf. Die Genauigkeit kommt durch den individuellen Abgleich oder die Justierung zustande. Für kritische Anwendungen ist es daher empfehlenswert, bei der Bemusterung von Sensoren mehrere Produktionschargen zu testen, um nicht nur eine Aussage über die chargenabhängige Genauigkeit sondern auch über die Präzision zwischen den Chargen zu bekommen.

Genauigkeit versus Auflösung

Noch häufiger als die Begriffe Genauigkeit und Präzision werden Genauigkeit und Auflösung vertauscht. Beispielsweise, wenn auf die Frage nach der nötigen Genauigkeit des Sensors die Antwort „13 oder 14 bit“ folgt. Die Auflösung eines Sensors ist die kleinste Signaländerung, die er verlässlich anzeigen kann. Es ist wichtig, diese zu kennen, um zu bestimmen, was der geringste messbare Druckunterschied ist. Ist die Auflösung nicht der limitierende Faktor, so ist der Signalrauschabstand an dieser Stelle ausschlaggebend. Ein analog-digital Konverter (ADC), der den gleichmäßigen Output eines Analogsensors für den Gebrauch in einer digitalen Kontrollanwendung quantisiert, hat eine höhere Auflösung je größer die Anzahl der



Graphik 2: Die Entfernung von einem Zielpunkt zeigt bildlich den Unterschied zwischen Genauigkeit und Präzision.



Graphik 3: Genauigkeit im Gegensatz zur Auflösung bei einem ideal funktionierenden Sensor

Bits ist. Graphik 3 zeigt den Unterschied zwischen Auflösung und Genauigkeit, wenn der Output des Sensors quantisiert wird.

Ob die A-D-Wandlung des Signals außerhalb des Sensors (bei Drucksensoren mit analogem Ausgangsignal) oder im Sensor (Sensoren mit digitalem Ausgangsignal) erfolgt, ist bei dieser Betrachtung nicht relevant. Ausschlaggebend ist immer die Anzahl der Bits, die für die Anwendung zur Verfügung stehen.

Genauigkeit definieren / Sensoren vergleichen

Vergleicht ein Unternehmen seine eigenen Produkte und behauptet, ein Produkt oder eine Produktfamilie wären doppelt so genau wie ein anderes Produkt/ eine andere Produktfamilie, sollte dieser Vergleich korrekt sein. Allerdings existieren viele verschiedene anerkannte Formate zur Messung und Definition von Genauigkeit. Das macht es sehr viel schwieriger, die Genauigkeit von Produkten einer Firma mit Produkten einer anderen Firma zu vergleichen.

Genauigkeit wird gewöhnlich in Hinblick auf Ungenauigkeit oder Fehler definiert. Mit der folgenden Beschreibung möglicher Fehler können die Datenblätter verschiedener Hersteller von Drucksensoren leichter verglichen werden.

Fehlerarten sind bei Drucksensoren im Allgemeinen:

- Nullpunktfehler und Spanne-Fehler

Durch die Produktion der Sensoren ergibt sich eine initiale Abweichung des Sensors zu einem Normal- oder Referenzgerät. Je nach Komplexität des Sensors und Aufwand bei der Herstellung kann diese Abweichung größer oder kleiner sein.

- Nichtlinearität

Nichtlinearität meint die Abweichung des Sensorsignals von einer idealen Geraden. Wesentlich ist hier, wie diese ideale Gerade definiert oder gefunden wird. Meist wird die „Best Fitting Straight Line“ (BFSL) verwendet, eine Gerade, die durch ein Näherungsverfahren (meist nach kleinstem quadratischen Fehler) an die Kennlinie des Sensors angenähert ist. Weiter wäre es möglich, die Linearität auch als Start- oder Endpunkt bezogen oder als fixe Gerade zu definieren.

- Temperaturfehler im Nullpunkt und der Signalspanne

Jeder Drucksensor ist auch ein Temperatursensor. Dabei ist der Nullpunkt temperaturabhängig, was einer Parallelverschiebung der Ausgangskennlinie durch Temperatureinfluss entspricht. Zusätzlich ist auch die Empfindlichkeit des piezoresistiven Drucksensors stark temperaturabhängig. Durch die Physik gegeben, sinkt die Empfindlichkeit immer mit steigender Temperatur.

- Thermische- und Druckhysterese

Je nach der Richtung, aus der auf einen Ausgangspunkt in Druck oder Temperatur zurückgekehrt wird, kann der jetzt erzielte Ausgabewert des Sensors vom Ausgangswert abweichen. In der Regel sind diese Fehler sehr klein, so dass eine Temperaturhysterese selten oder gar nicht spezifiziert wird und die Druckhysterese meist mit der Linearität zusammen.

- Wiederholfehler (Reproduzierbarkeit)

Wiederholfehler sind Abweichungen im Ausgangssignal, wenn mehrfach derselbe Arbeitspunkt angefahren wird.

Andere das System betreffende Faktoren, die sich auf die Genauigkeit auswirken können, sind unter anderem:

- Antwortzeit

Die Antwortzeit ist die Reaktionszeit des Sensorschips. Diese kann durch die mechanischen Konstanten bestimmt sein, eher aber durch den Druck, der eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. Meist wird hier aber die Antwortzeit eines digitalen Drucksensors definiert, die der verwendete Controller für die Signalwandlung und Verarbeitung braucht.

- Abhängigkeit von der Versorgungsspannung

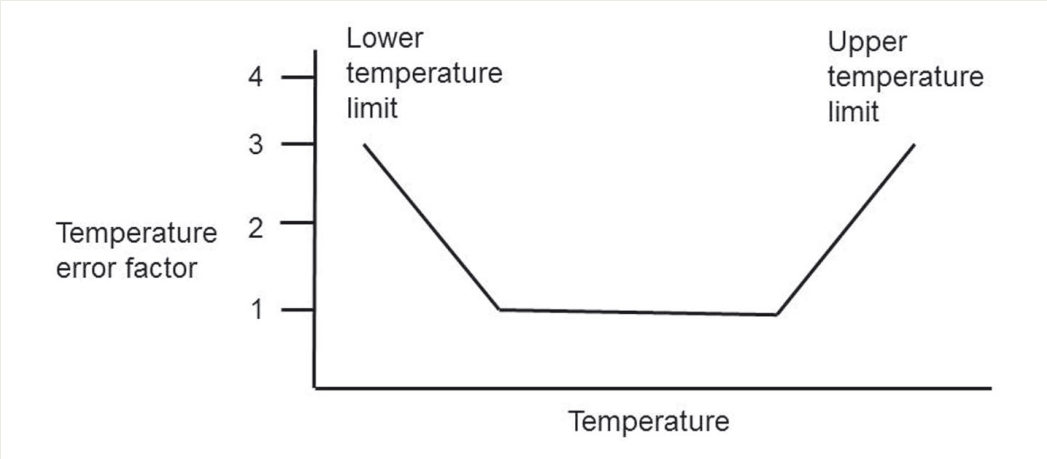
Gemeint ist die Abhängigkeit des Ausgangssignals des Sensors von der Versorgungsspannungshöhe (Ratiometrie) und von der „Sauberkeit“ der Versorgung, also von Rippeln oder Rauschen.

- Lageabhängigkeit

Die Lage beeinträchtigt das Ausgangssignal des Sensors

- Kurzzeit- und Langzeitstabilität

Bei der Stabilität unterscheidet man kurzzeitige Stabilität, die meist durch thermische Veränderung in der Zeit nach dem Einschalten verursacht wird, und lang-



Graphik 4: Der Faktor des Temperaturfehlers kann den zulässigen Gesamtfehler des Sensors unter Einfluss von Temperaturen im Grenzbereich um das ± 3-fache erhöhen.

zeitige Stabilität, die meist durch Alterung der Materialien und/ oder durch Abbau von mechanischen Spannungen im System herrührt.

Bei einem Vergleich der Datenblätter verschiedener Hersteller von Drucksensoren ist es zunächst essentiell, die dieselben Druck-Einheiten wie mm Quecksilber (Hg), Kilopascal (kPA), bar, Zoll Wasser, etc. zu verwenden.

Dann gilt es, die Bedingungen zu prüfen, bei denen die Spezifikationen erstellt wurden. Normalerweise werden die meisten MEMS Drucksensoren bei einer fixen Versorgungsspannung und einer festen Temperatur (und eventuell auch Feuchte) definiert.

Als drittes ist bei Fehlerangaben in Prozent darauf zu achten, welche Bezugsgröße für die %-Berechnung herangezogen wurde. In den meisten Fällen wird hier eine der folgenden Varianten gewählt:

- Endwertbezogene Fehler:

- Full Scale Span (FSS), also die maximale Signalspanne
- Full Scale (FS), also der maximale Druckmesswert
- Full Scale Output (FSO), also der Ausgangswert bei maximalem Druck (beinhaltet den Offset)

- Messwert bezogene Fehler

Error Budget oder TEB?

Die oben beschriebenen Einzelfehler werden in der Regel mit der Angabe von Fehlerwerten (Error Budgets, EB) beschrieben. Es gibt aber auch die Möglichkeit Genauigkeit als maximales Fehlerband (TEB, Total Error Band) zu definieren.

Der Einzelfehler (EB, Error budget) legt die maximale Abweichung des Messergebnisses innerhalb eines Toleranzbereichs fest, der von der im Sensor verbauten Technologie vorgegeben ist. Bei den jeweiligen Enden des Fehlerbands kann fallweise der zulässige Fehler mit einem Multiplikator erhöht werden: zum Beispiel der mögliche Temperaturfehler bei sehr hohen oder niedrigen Temperaturen (siehe Graphik 4).

Graphik 5 zeigt ein typisches Fehlerband um eine ideale Kennlinie. Diese Genauigkeit wird meist als ±-Wert angegeben und kann auch in den Grenzbereiche breiter werden.

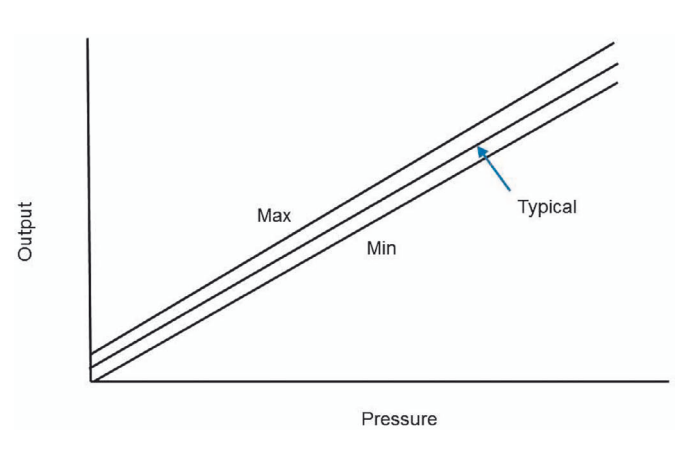
Das maximale Fehlerband kann sich zusammensetzen aus dem Linearitätsfehler, Temperatur- und Druck-Hysteresis, dem Temperaturkoeffizienten der Spanne und dem Temperaturkoeffizienten des Nullpunktes. Aber auch jede andere Kombination von Einzelfehlern ist denkbar. Oft werden Linearität, Hysterese und Abgleichfehler als „Accuracy“ also Genauigkeit zusammengefasst und die Temperaturfehler separat in Form eines Einzelfehlers definiert.

Welche dieser Methoden der Fehlerbeschreibung piezoresistiver Drucksensoren eingesetzt ist hersteller- aber auch produktabhängig. In der Vergangenheit gab es lediglich Sensoren mit analogem Ausgangssignal, entweder als mV- oder verstärkt als V-Signal. Hier sind die oben aufgeführten Fehler des Sensors einzeln messbar und auch einzeln verifizierbar. Bei den heute verwendeten Sensoren mit digitaler Signalaufbereitung sieht es ganz anders aus. Meist wird zur Kompensation der Fehler ein Polynom höherer Ordnung verwendet. Dabei werden verschiedene Fehler gleichzeitig mathematisch kompensiert. Das hat zur Folge, dass sich der Rest-Fehler nicht mehr einfach in Einzelfehler zerlegen lässt. Zum Beispiel kann die Linearität eines solchen Sensors eine Temperaturabhängigkeit aufweisen, welche nur durch die Art der Kompensation entsteht. Teilt man dennoch den Restfehler in Einzelfehler auf, so ist die Summe dieser Einzelfehler immer größer als der reale Gesamtfehler, was das Produkt letztendlich schlechter darstellt als es eigentlich ist.

Zusammenfassung

Bei piezoresistiven Drucksensoren gibt es einige unterschiedliche Methoden, um die Genauigkeit eines Sensors festzulegen. Sowohl seitens der Hersteller derartiger Sensoren als auch auf Seiten der Anwender kommt es oft zu unterschiedlichem Verständnis der Fehler. Ausschlaggebend für die Festlegung der Genauigkeit eines Produkts durch den Hersteller sind normalerweise die für den Sensor verwendete Technologie, die Wahl des Testequipments, der Testaufwand und das angestrebte Marktsegment, wie Industrie, Automobil, Medizin, Verbraucher etc.

Die Herausforderung für den Kunden ist es, beim Vergleich von mehreren Produkten verschiedener Hersteller genauestens zu recherchieren, mit welcher Methode der jeweilige Hersteller die Genauigkeit seines Produktes bestimmt, um anschließend den Sensor zu finden, der den Anforderungen der Anwendung des Kunden am besten entspricht. ◄



Graphik 5: Das maximale Fehlerband definiert minimale und maximale Toleranzen um ein Standardlevel herum.