

Den optimalen MEMS-Beschleunigungssensor auswählen

Von Chris Murphy

Beschleunigungssensoren sind in der Lage, Beschleunigung, Neigung, Schwingung oder Schock zu messen und werden deshalb in unterschiedlichen Applikationsbereichen verwendet, angefangen von Wearables, am Körper tragbaren Fitnessgeräten bis hin zu industriellen Plattform-Stabilisierungssystemen. Man kann aus hunderten Bauteilen auswählen, die in den verschiedensten Preis- und Leistungskategorien angeboten werden. Dieser Artikel erörtert die Schlüsselparameter und Merkmale, die der Entwickler für die Beurteilung und Auswahl benötigt, welche für die jeweilige Applikation bezüglich Inklination und Stabilisation wesentlich sind.

Vielfältige Beschleunigungssensoren und Anwendungsgebiete

Die neuesten kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensoren finden Anwendung in Applikationen, in denen traditionell hauptsächlich piezoelektrische Beschleunigungssensoren und andere Sensoren eingesetzt wurden. Applikationen wie CBM (Condition-based maintenance), Strukturüberwachung (SHM), Anlagenüberwachung (AHM), Vitaldatenüberwachung (VSM) und IoT drahtlose Sensor Netzwerke sind Einsatzgebiete für die nächste Generation an MEMS Sensoren, die Lösungen dafür bieten. Bei der Vielzahl der Beschleunigungssensoren und Applikationen gestaltet sich die richtige Wahl nicht einfach.

Es gibt keinen Industriestandard, der definiert, welche Kategorie an Beschleunigungssensoren jeweils passt. Tabelle 1 zeigt einige Kategorien und die korrespondierenden Applikationen. Die gezeigten Werte für Bandbreite und g -Bereich sind typisch für Beschleunigungssensoren in der gezeigten Endanwendung.

Sensortyp	Hauptapplikation	Bandbreite	g -Bereich
Konsumer	Bewegung, statische Beschleunigung	0 Hz	1 g
Automotive	Crash / Stabilisierung	100 Hz	< 200 g / < 2 g
Industrial	Plattformstabilitäts-Neigung	5 bis 500 Hz	25 g
Taktisch	Waffen / Craft navigation	< 1 kHz	8 g
Navigation	U-Boot / Craftnavigation	> 300 Hz	15 g

Tabelle1: Beschleunigungssensortypen und typische Applikationsgebiete

Bild 1 zeigt eine Momentaufnahme des Angebots an MEMS-Beschleunigungssensoren und ordnet jeden Sensor entsprechend seiner Schlüsselparameter und dem Grad der Intelligenz/Integration der jeweiligen Applikation zu. Ein Hauptaugenmerk dieses Artikels gilt den Beschleunigungssensoren

der nächsten Generation auf Basis fortschrittlicher MEMS-Strukturen und Signalverarbeitung, zusammen mit erstklassigen Gehäusetechniken bieten sie Stabilität und Rauschperformenz, vergleichbar mit denen von teuren Nischenprodukten bei gleichzeitig geringem Stromverbrauch. Diese Attribute und andere kritische Beschleunigungssensor-Spezifikationen werden im folgenden Abschnitt entsprechend ihrer Applikationsrelevanz im Detail diskutiert.

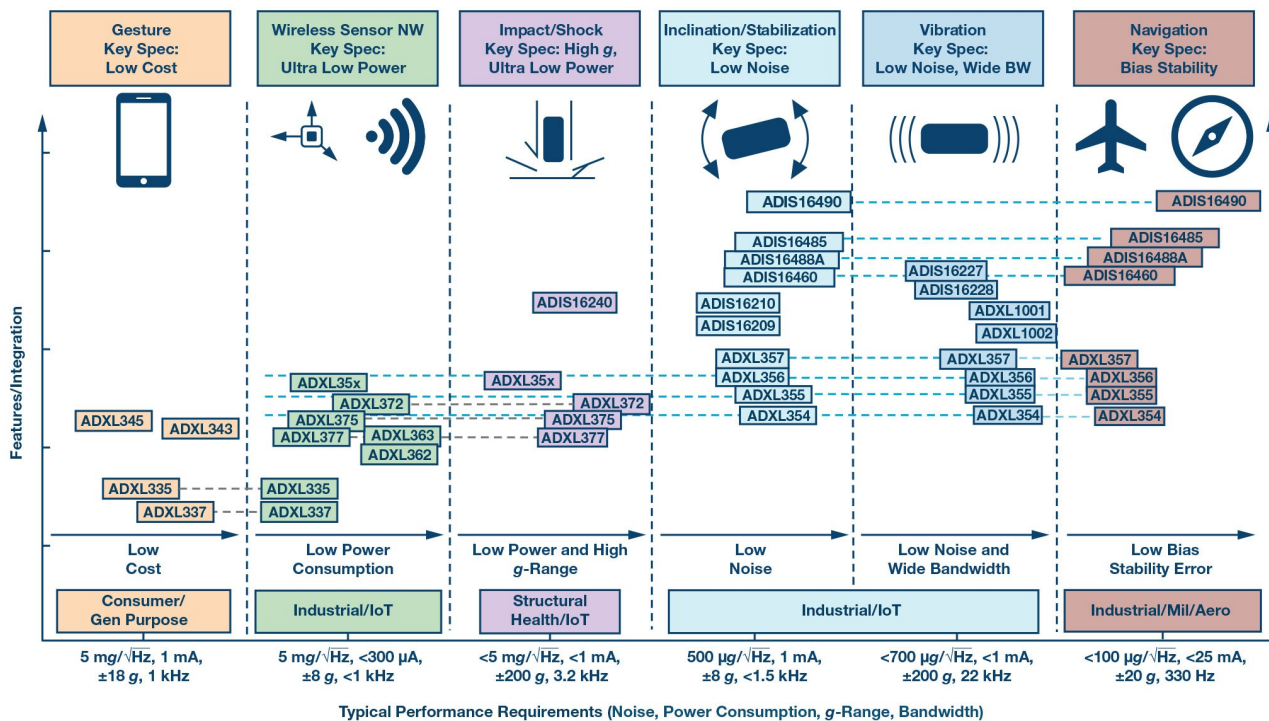


Bild 1: MEMS-Beschleunigungssensoren von Analog Devices für verschiedene Applikationsgebiete, die eine Lage oder Bewegungsrichtung (Neigung, englisch Inklination oder Tilt) erkennen müssen. Schlüsselkriterien sind dabei Bias-Stabilität, Offset über Temperatur, geringes Rauschen, Wiederholgenauigkeit, Schwingungsrektifizierung und Querachsenempfindlichkeit.

Neigungssensorik (Inklination oder Tilt)

Die akkurate Erfassung von Inklination oder Tilt ist eine anspruchsvolle Applikation für kapazitive MEMS-Beschleunigungssensoren, speziell bei gleichzeitiger Vibration. Die Verwendung kapazitiver MEMS-Beschleunigungssensoren zur Erfassung einer Neigungswinkelgenauigkeit von $0,1^\circ$ in einer dynamischen Umgebung ist schwierig — $<1^\circ$ ist schwierig und $>1^\circ$ ist sie aber gut zu erreichen. Damit ein Beschleunigungssensor Tilt und Inklination effizient misst, muss man gute Kenntnis von Sensorperformance und Umgebung der Endapplikation haben. Statische Umgebungen bieten viel bessere Voraussetzungen bei der Messung der Inklination als dynamische Umgebungen, da Vibration oder Schock die Neigungsdaten verfälschen und zu großen Messfehlern führen. Die wichtigsten Spezifikationen für die Messung von Tilt sind Tempco-Versatz, Hysterese, Rauscharmut, Kurz/Langzeit-Stabilität, Wiederholgenauigkeit und gute Schwingungsrektifizierung.

Durch Kalibrierverfahren nach der Montage können folgende Fehler korrigiert werden: Zero-g Bias Genauigkeit, Zero-g Bias Drift nach Löten, zero-g Bias Drift wegen PCB-Gehäusemontage, zero-g Bias Tempco, Empfindlichkeitsgenauigkeit, Nichtlinearität und Querachsenempfindlichkeit.

Andere Fehlergrößen sind Hysterese, Zero-g Bias Drift und Empfindlichkeitsdrift über die Lebensdauer, Zero-g Bias Drift durch Feuchte und Temperatur bedingte Biegung/Verdrehung der Leiterplatte. Diese Fehler können nicht wegkalibriert werden, diese erfordern eine Reduzierung am Einsatzort.

I-Sensor mit Kalibrierfunktion, Kompensation und Signalverarbeitung

Das Angebot an Beschleunigungssensoren von Analog Devices kann unterteilt werden in MEMS (ADXLxxx) und I-Sensor (ADIS16xxx) für Spezialanwendungen. I-Sensoren oder intelligente Sensoren sind hoch integrierte (4 bis 10 Freiheitsgrade) und programmierbare Bauteile für Applikationen unter dynamischen Bedingungen. Diese hoch integrierten Plug-and-Play-Lösungen bieten Werkskalibrierung, embedded Kompensation und Signalverarbeitung – vermeiden alle bislang genannten Fehler am Einsatzort und reduzieren alle Einschränkungen bei Design und Verifikation. Diese umfangreiche Werkskalibrierung betrifft die gesamte Sensorsignalkette bezüglich Empfindlichkeit und Bias über den spezifizierten Temperaturbereich, der typisch -40°C bis +85°C umfasst. Für jeden I-Sensor gibt es Korrekturformeln, mit denen nach der Installation eine präzise Messung erfolgen kann. In einigen Systemen ersetzt die Werkskalibrierung die Kalibrierung im System bzw. vereinfacht sie generell.

I-Sensor zielen auf spezielle Applikationen. Der in Bild 2 gezeigte [ADIS16210](#) wurde entwickelt und zugeschnitten für Inklinationsapplikationen und bietet entsprechend gebrauchsfertig eine vorkonfigurierte relative Genauigkeit von <1°. Diese ist zurückzuführen auf die integrierte Signalverarbeitung und die bauteilspezifische Kalibrierung für optimale Genauigkeit. Mehr über I-Sensor später im Abschnitt Stabilisierung.

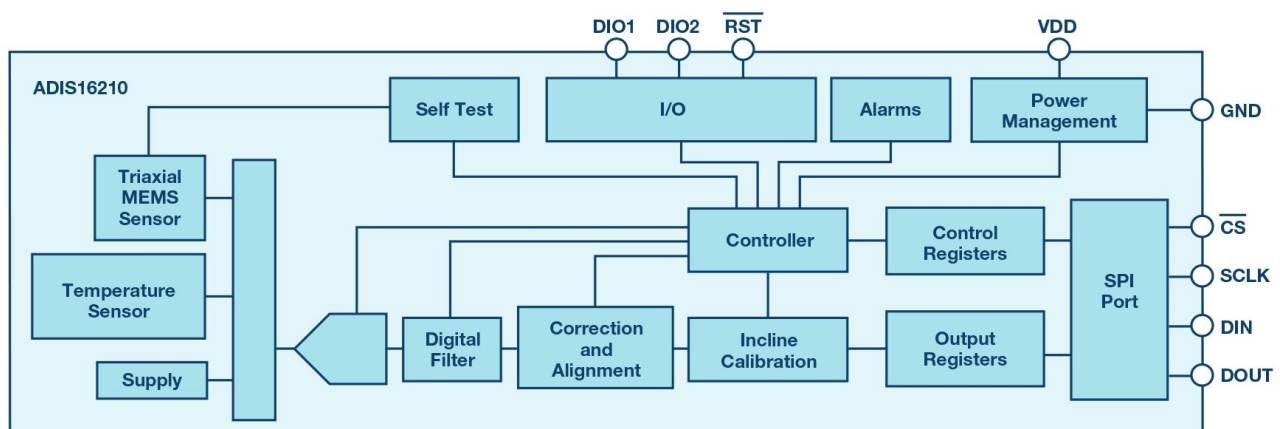


Bild 2: ADIS16210 für präzise dreiachsige Inklination.

Neueste Beschleunigungssensor Architekturen wie der [ADXL355](#) sind universeller einzusetzen (Inklination, Zustandsüberwachung, Vitalstrukturüberwachung, IMU/AHRS-Applikationen) und bieten weniger applikationsspezifische aber trotzdem integrierte Blöcke mit vielen Funktions-Merkmalen wie in Bild 3 gezeigt.

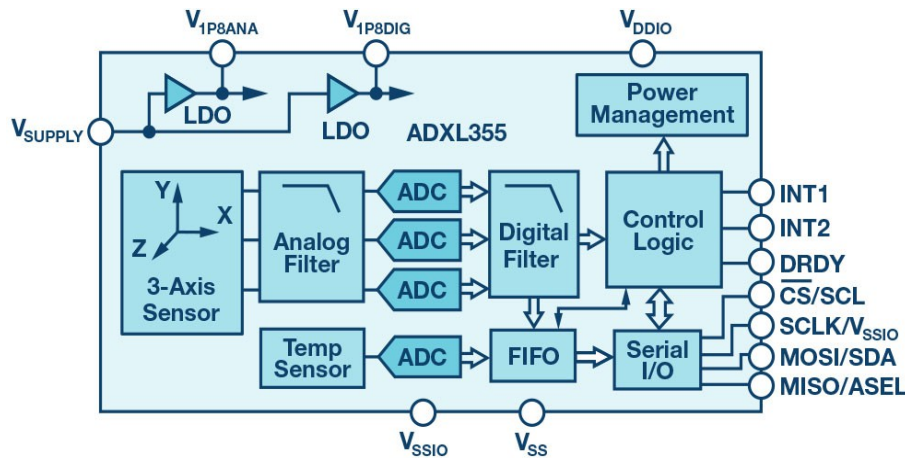


Bild 3: ADXL355 ein rauscharmer, low Power, 3-Achsen MEMS-Beschleunigungssensor mit geringer Drift

Zwei universelle Beschleunigungssensoren im Vergleich

Im folgenden Abschnitt wird der Allzweck-Beschleunigungssensor [ADXL345](#) mit dem ADXL355 verglichen, ein aktueller rauscharmer und Low-Power-Sensor, der breit eingesetzt werden kann zum Beispiel als IoT-Sensorknoten und als Inklinometer (Neigungsmesser). Der Vergleich zeigt die Fehlerquellen in einer Neigungsapplikation und welche Fehler kompensiert oder beseitigt werden können.

Tabelle 2 zeigt eine Fehlerquelleneinschätzung für den ADXL345 Konsumer-Beschleunigungssensor und seine Spezifikationen sowie die korrespondierenden Tilt-Fehler. Zur Erreichung der besten Tilt-Genauigkeit ist eine Temperaturstabilisierung oder Kompensation erforderlich. In diesem Beispiel wird eine konstante Temperatur von 25 °C angenommen. Die größten Fehler, die nicht kompensiert werden können, stammen vom Offset über die Temperatur, von der Bias-Drift und dem Rauschen. Zur Reduzierung des Rauschens kann die Bandbreite verringert werden, wobei Inklinationapplikationen typischerweise eine Bandbreite unter 1 kHz erfordern.

Sensorparameter	Performance	Bemerkung	Typ. Applikations-Fehler [g Tilt °]
Rauschen	X/Y axis 290 $\mu\text{g}/\text{V}(\text{Hz})$	Bandbreite bei 6,25 Hz	0,9 mg
Bias-Drift	Allan deviation	X/Y-Achsen Kurzzeit (z.B. 10 Tage)	1 mg
Initialer Offset	35 mg	Ohne Kompensation	35 mg
		Mit Kompensation	0 mg
Fehler	Ohne Kompensation	6,25 Hz Bandbreite	36,9 mg
Fehler	Mit Kompensation	6,25 Hz Bandbreite	1,9 mg

Tabelle 2: Fehlerquelleneinschätzung des ADXL345

Tabelle 3 zeigt die selben Kriterien für den ADXL355. Die Kurzzeit Bias-Werte wurden von den Allan-Variance-Plots im ADXL355 Datenblatt ermittelt. Bei 25 °C wurde für den universell einsetzbaren ADXL345 die kompensierte Tiltgenauigkeit mit 0,1° ermittelt. Beim Industrietyp ADXL355 sind es 0,005°. Vergleicht man ADXL345 und ADXL355, kann man respektive erkennen, dass der größere Fehlerbeitrag vom Rauschen stark reduziert wurde auf 0,05° bis 0,0045° und die Bias Drift auf 0,057° bis 0,00057°. Das zeigt den großen Fortschritt bei den kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensoren bezüglich Rauschen und Bias Drift — und das ermöglicht viel bessere Werte für die Inklinationsgenauigkeit unter dynamischen Bedingungen.

Sensorparameter	Performance	Bemerkung	Typ. Applikations-Fehler [g Tilt °]
Rauschen	X/Y Achse 290 $\mu\text{g}/\text{V}(\text{Hz})$	Bandbreite bei 6,25 Hz	78 μg
Bias-Drift	Allan Deviation	X/Y-Achsen Kurzzeit (z.B. 10 Tage)	<10 μg
Initialer Offset	25 mg	Ohne Kompensation	25 mg
		Mit Kompensation	0 mg
Gesamtfehler	Ohne Kompensation	6,25 Hz Bandbreite	25 mg
Gesamtfehler	Mit Kompensation	6,25 Hz Bandbreite	88 μg

Tabelle 3: Fehlerquelleneinschätzung des ADXL355

Eine hohe Tilt-Genauigkeit erreichen

Bei der Auswahl eines hochwertigen Beschleunigungssensors ist es wichtig, die erforderliche Performance zu erreichen, besonders, wenn die Applikation eine Tiltgenauigkeit unter 1° erfordert. Die Genauigkeit in der Applikation kann abhängig von den Applikationsbedingungen variieren (große Temperaturwechsel, Vibration) und von der Wahl des Sensortyps (Konsumer- versus Industrie- oder taktischer Typ).

In diesem Fall erfordert der ADXL345 eine extensive Kompensation und Kalibrierung, um die <1° Tiltgenauigkeit zu erreichen, was für das Gesamtsystem zusätzliche Kosten und Aufwand erfordert. Abhängig von der Größe der Vibrationen in der Endumgebung und vom Temperaturbereich, kann dies auch nicht durchführbar sein. Im Bereich 25 °C bis 85 °C ist die Tempco-Offset-Drift 1,375° — was bereits nicht die Anforderung nach weniger als 1° für die Tilt-Genauigkeit erfüllt.

$$0.4 \frac{\text{mg}}{^{\circ}\text{C}} \times \frac{1^{\circ}}{17.45 \text{ mg}} \times (85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) = 1.375^{\circ}$$

[Formel 1]

Die maximale Tempco-Offset-Drift des ADXL355 im Bereich 25°C bis 85°C ist 0,5°.

$$0.15 \frac{\text{mg}}{^{\circ}\text{C}} \times \frac{1^{\circ}}{17.45 \text{ mg}} \times (85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) = 0.5^{\circ}$$

[Formel 2]

Die Wiederholgenauigkeit von ADXL354 und ADXL355 ($\pm 3,5 \text{ mg}/0,2^{\circ}$ für X und Y; $\pm 9 \text{ mg}/0,5^{\circ}$ für Z) ist für 10 Jahre vorausbestimmt und schließt Tests ein wie Temperaturdrift (hohe statische Betriebstemperatur (HTOL, $T_A = 150^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{SUPPLY}} = 3,6 \text{ V}$ und 1000 Stunden), Temperaturzyklen (-55°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ und 1000 Zyklen), Geschwindigkeitsänderungen, Breitbandrauschen und Temperaturhysterese. Durch reproduzierbare Tilt-Messung unter allen Bedingungen, ermöglichen die neuen Beschleunigungssensoren minimale Tilt-Fehler ohne aufwändige Kalibrierung in rauer Umgebung, auch wird der Kalibrieraufwand nach der Montage minimiert.

ADXL354 und ADXL355 bieten eine garantierte Temperaturstabilität bei einem Null Offset Koeffizient von $0,15 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$ (maximal). Diese Stabilität minimiert Aufwand und Kosten im Zusammenhang mit der Kalibrierung und dem Test, und erhöht beim OEM den Durchsatz. Zusätzlich hilft das hermetisch dichte Gehäuse, dass das Endprodukt seine Wiederholgenauigkeits- und Stabilitätsspezifikationen über einen langen Zeitraum nach Verlassen des Werks beibehält.

Vibrationen verfälschen den Sensor-Offset und bewirken Systemfehler

Typischerweise zeigen die Datenblätter keine Werte für Wiederholgenauigkeit und Immunität auf den Schwingungsgleichrichtungsfehler (VRE, vibration rectification error), da diese ein potentieller Indikator für geringere Performance sind. Beispielsweise ist der ADXL345, ein universell einsetzbarer Sensor für

Konsumerapplikationen, dafür ausgelegt, wo das VRE für den Designer keine große Rolle spielt. In anspruchsvolleren Applikationen wie etwa Initialnavigation in Inklinationsapplikationen oder in vibrationsstarken Umgebungen ist eine Empfindlichkeit beim VRE vom Designer schon zu beachten, deshalb müssen die Datenblätter von ADXL354/ADXL355 und [ADXL356/ADXL357](#) diese Werte nennen.

VRE, wie in Tabelle 4 gezeigt, ist der Offsetfehler, der auftritt, wenn der Sensor breitbandigen Vibrationen ausgesetzt ist. Der VRE liefert einen großen Fehlerbeitrag bei der Tilt-Messung, verglichen zum 0-g-Offset über die Temperatur und zum Rauschbeitrag. Deshalb wird er oft nicht im Datenblatt genannt, auch kann er sehr einfach andere Schlüsselspezifikationen in den Schatten stellen.

VRE ist das Verhalten eines Beschleunigungssensors bei Vibrationen, die gleichgerichtet werden. Diese gleichgerichtete Anteile können den Offset des Beschleunigungssensors driften lassen, was große Fehler bewirkt, speziell in Applikationen, in denen der DC-Ausgang das Nutzsignal liefert. Jede kleine Änderung am DC-Offset kann als eine Änderung in der Inklination gesehen werden und zu Systemfehlern führen.

Typ	Max, Neigungsfehler 0 g Offset versus Temperatur [°/°C]	Rausch- empfind- lichkeit [°/√(Hz)]	Schwingung/Rectification [°/g ² _{rms}]
ADXL345	0,0100	0,0011	0,0231
ADXL355	0,0085	0,0014	0,0231

Tabelle 4: Grad- und Neigungsfehler, Messbereich 1 ± 2 g in einer 1-g-Orientierung, Offset durch Vibration mit $2,5 \text{ g}_{\text{rms}}$.

Mit weniger Messbandbreite den VRE reduzieren

VRE kann durch verschiedene Resonanzen und Filterung im Beschleunigungssensor hervorgerufen werden, beim ADXL355 hat der VRE eine starke Abhängigkeit von der Frequenz. Die Vibrationen werden bei Resonanz verstärkt um einen Faktor gleich der Güte in der Resonanz. Die Vibrationen werden bei höheren Frequenzen gedämpft, entsprechend der 2-Pol Sprungantwort zweiter Ordnung des Resonators. Je größer die Güte bei Resonanz des Sensors ist, umso größer ist VRE wegen der großen Verstärkung der Vibrationen. Größere Messbandbreiten führen zur Integration der hochfrequenten In-Band-Vibrationen und bewirken höheren VRE (Bild 4). Viele durch Vibration bedingte Probleme lassen sich durch die Wahl der passenden Bandbreite des Sensors vermeiden, Hochfrequenzvibrationen werden so ausgeblendet.

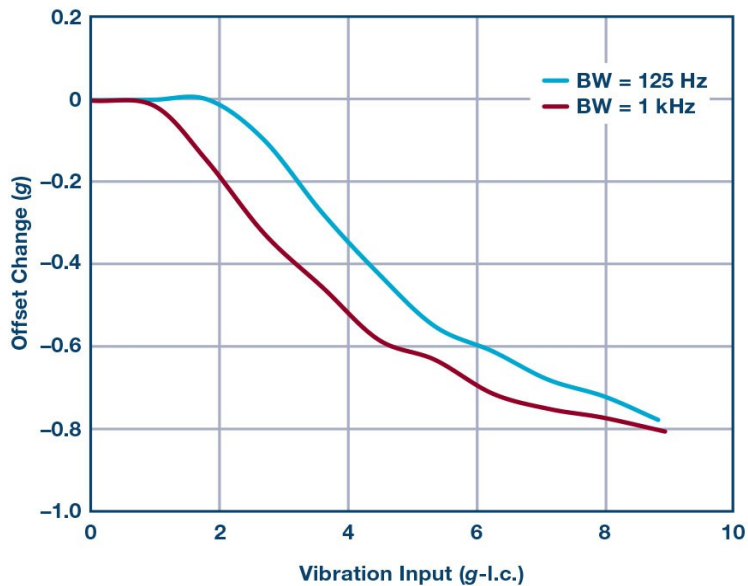


Bild 4: VRE-Test des ADXL355 bei unterschiedlichen Bandbreiten.

Statische Tiltmessungen erfordern Beschleunigungssensoren für geringe g, typisch von ± 1 g bis ± 2 g mit Bandbreiten kleiner 1,5 kHz. Der ADXL354 mit Analogausgang und der ADXL355 mit Digitalausgang sind low Power 3-Achsen-Beschleunigungssensoren mit geringer Rauschdichte ($20 \mu\text{g}/\text{Hz}$ und $25 \mu\text{g}/\text{Hz}$ respektive) und geringer 0 g Offset Drift. Sie haben integrierte Temperatursensoren und einstellbare Messbereiche wie in Tabelle 5 gezeigt.

Typ	Messbereich [g]	Bandbreite [kHz]
ADXL354B	$\pm 2, \pm 4$	1.5
ADXL354C	$\pm 2, \pm 8$	1.5
ADXL355B	$\pm 2, \pm 4, \pm 8$	1
ADXL356B	$\pm 10, \pm 20$	1.5
ADXL356C	$\pm 10, \pm 40$	1.5
ADXL357B	$\pm 10, 24; \pm 20, 48; \pm 40, 96$	1

Tabelle 5: Messbereiche von ADXL354/ADXL355/ADXL356/ADXL357

ADXL354/ADXL355 und ADXL356/ADXL357 sind im hermetisch dichten Gehäuse untergebracht, was sehr gute Langzeitstabilität garantiert. Die Merkmale abhängig vom Gehäuse zeigen Tabelle 5. Die Bedeutung des Gehäuses wird oft übersehen, kann doch der Hersteller durch entsprechende Auswahl besondere Merkmale bezüglich Stabilität und Drift erzielen. Analog Devices hat das besonders im Blick, und bietet eine breite Palette an Gehäusen für die unterschiedlichsten Applikationsgebiete.

Hohe Temperaturen und dynamische Einflüsse

Bevor Beschleunigungssensoren für hohe Temperaturen und raue Umgebung erhältlich waren, waren die Designer gezwungen, ICs mit Standardtemperaturbereichen einzusetzen, die außerhalb der Datenblattgrenzen lagen. Das bedeutet, der Endverbraucher übernahm die Verantwortung und das Risiko bei der Qualifikation der Komponente bei erhöhter Temperatur, was teuer ist und zeitintensiv. Hermetisch dichte Gehäuse sind bei erhöhten Temperaturen als robust bekannt und lassen Feuchte und Schmutz, die Korrosion verursachen, nicht eindringen. Analog Devices bietet eine Palette an hermetisch dichten Gehäusen mit verbesserter Stabilität und Performance über die Temperatur.

Analog Devices hat die Performance von Kunststoffgehäusen bei erhöhten Temperaturen untersucht – besonders die Eignung von Leadframe und den Anschlüssen für die Hochtemperatur-Lötprozesse und der sicheren Befestigung für Umgebungen mit großem Schock und großer Vibration. So kann Analog Devices 18 Sensoren mit spezifiziertem Temperaturbereich von -40°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ anbieten, einschließlich [ADXL206](#), [ADXL354/ADXL355/ADXL356/ADXL357](#), [ADXL1001/ADXL1002](#), [ADIS16227/ADIS16228](#) und [ADIS16209](#). Die meisten Mitbewerber bieten keine kapazitiven Beschleunigungssensoren für -40°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ oder raue Umgebung an, wie sie etwa in der Schwermaschinenindustrie, in Bohrtürmen und der Exploration eingesetzt werden.

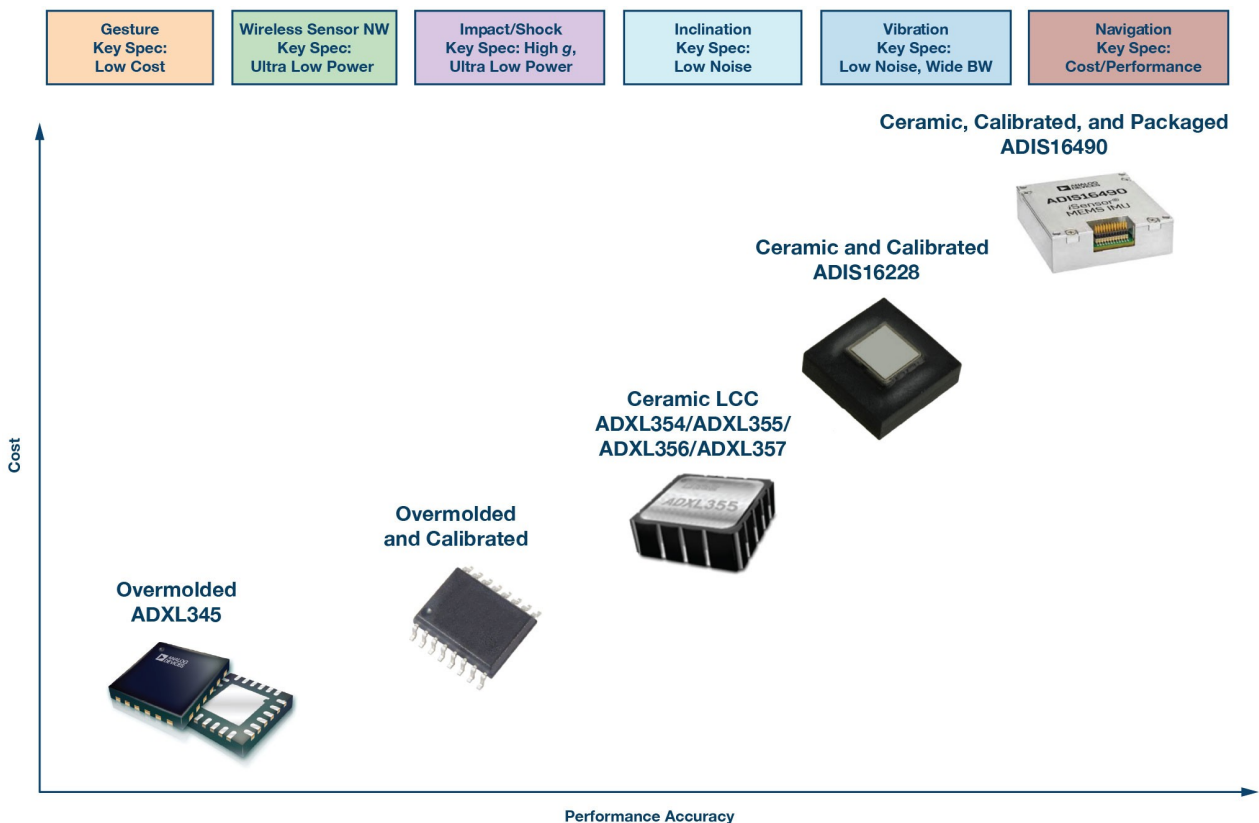


Bild 5: Mit fortschrittlichen Gehäusetechniken und zunehmender Integration (unter anderem die Kalibrierung) steigt die Leistungsfähigkeit der Sensorbausteine.

Inklinationsmessungen in sehr rauer Umgebung bei Temperaturen über 125° C sind eine extreme große Herausforderung. Der ADXL206 ist ein low Power Zwei-Achsen MEMS-Beschleunigungssensor hoher Präzision (Tilt-Genauigkeit <0,06°) für raue Umgebung und hohe Temperaturen in Bohrtürmen und bei der Exploration. Er ist untergebracht im 13 × 8 × 2 mm³ Keramik DIL-Gehäuse mit seitlichen Löt-Anschlüssen und für den Umgebungstemperaturbereich von -40° C bis +175° C sowie für über 175° C bei verringerter Leistung und 100 % Erholung.

Offset-Fehler durch Clipping bei Schockeinwirkung

Inklinationmessungen in dynamischen Umgebungen und bei Vibration wie sie in Landmaschinen oder Drohnen vorkommen, erfordern einen Beschleunigungssensor mit großem g -Bereich wie beispielsweise ADXL356/ADXL357. Messungen mit Beschleunigungssensoren in einem begrenzten g -Bereich neigen zum Clipping mit dem Ergebnis eines zusätzlichen Offsets am Ausgang. Clipping tritt auf bei Schocks mit schnellen Anstiegszeiten und langsamen Abklingen oder bei einem Gravitationsfeld von 1 g . In höheren g -Bereichen ist das Clipping reduziert, was den Offset für eine bessere Inklinationsgenauigkeit in dynamischen Applikationen verringert.

Bild 6 zeigt eine durch den g -Bereich begrenzte Messung mit der ADXL356 Z-Achse bei 1 g . Bild 7 zeigt die selbe Messung aber im erweiterten g -Bereich von $\pm 10 g$ bis $\pm 40 g$. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch den erweiterten g -Bereich des Sensors der Offset durch Clipping stark reduziert ist.

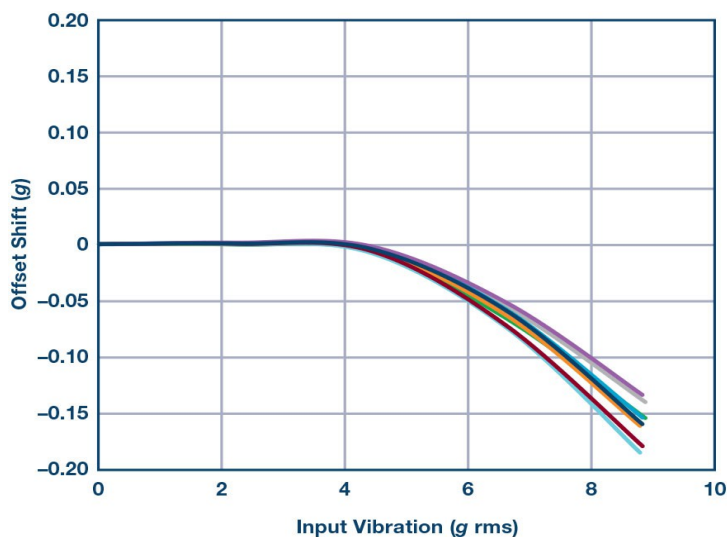


Bild 6: ADXL356 VRE, Z-Achsen Offset von 1 g , Bereich $\pm 10 g$, Z-Achsenorientierung = 1 g .

ADXL354/ADXL355 und ADXL356/ADXL357 bieten sehr gute Schwingungsrektifizierung, Langzeitwiederholgenauigkeit und geringes Rauschen in einem kleinen Gehäuse sehr gut passend für Tilt/Inklinationserfassung in statischen und dynamischen Umgebungen.

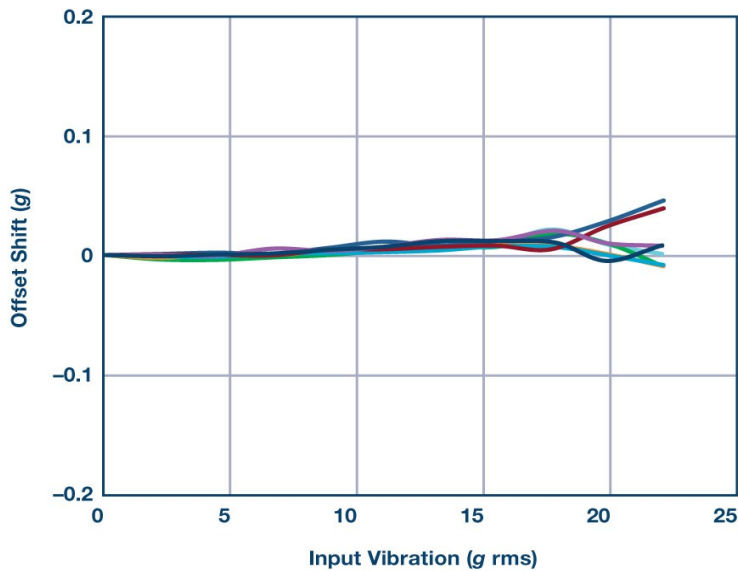


Bild 7: ADXL356 VRE, Z-Achsen Offset von 1 g, Bereich ± 40 g, Z- Achsenorientierung = 1 g.

Sensoren für Stabilisierungs-Anwendungen

Die Erfassung und das Verstehen von Bewegung bringen in vielen Applikationen einen Mehrwert. Er ergibt sich durch Nutzung der Bewegung, die ein System erwartet und führt zu höherer Performance (reduzierte Ansprechzeit, höhere Präzision, höhere Einsatz Geschwindigkeit), verbesserte Sicherheit und Zuverlässigkeit (Systemabschaltung in gefährlichen Situationen) oder anderer Mehrwerte. Es gibt viele Stabilisierungsapplikationen, welche die Kombination von Gyroskop und Beschleunigungssensor (Sensorfusion) erfordern (Bild 8). Wegen der Komplexität der Bewegung kommen sie zum Beispiel in einem UAV-basiertem Überwachungssystem und in Antennenausrichtsystemen auf Schiffen zum Einsatz.

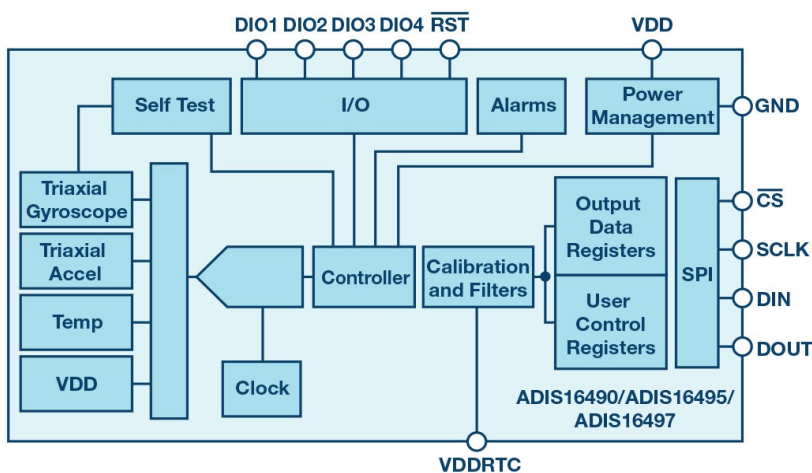


Bild 8: Diese inertielle Messeinheit (IMU) arbeitet in sechs Freiheitsgraden.

IMUs (Inertiale Messeinheit) mit sechs Freiheitsgraden nutzen mehrere Sensoren, so können sie Schwächen untereinander kompensieren. Die einfache Erfassung inertialer Bewegung in einer oder in zwei Achsen erfordern derzeit Beschleunigungssensoren und Gyroskope in Sensorfusion, um Vibration, Gravitation und andere Einflüsse zu kompensieren. Ein Beschleunigungssensor oder ein Gyroskop (Kreiselstabilisator) alleine kann dies nicht präzise Erfassen.

Die Daten eines Beschleunigungssensors beinhalten eine Gravitätskomponente und Beschleunigungsanteile von Bewegungen. Diese sind untrennbar, ein Gyroskop kann aber verwendet werden, um die Gravitätskomponente vom Sensorausgangssignal zu entfernen. Der Fehler durch die Gravitätskomponente des Sensors kann nach dem erforderlichen Integrationsprozess zur Bestimmung der Position aus der Beschleunigung größer werden. Wegen der Fehlersummierung ist ein Gyroskop alleine nicht ausreichend, um eine Position zu bestimmen. Gyroskop erfassen nicht die Gravitation, deshalb können sie als Unterstützungssensor zusammen mit einem Beschleunigungssensor agieren.

In Stabilisierungssaplikationen müssen MEMS-Sensoren präzise Messungen der Plattformausringung liefern, besonders, wenn sie in Bewegung ist. Bild 9 zeigt ein Blockdiagramm eines typischen Plattform-Stabilisierungssystems mit Servomotoren für die Winkelbewegungskorrektur. Der Motorregler übersetzt dort die Orientierungssensordaten in korrigierende Steuersignale für die Servomotoren.

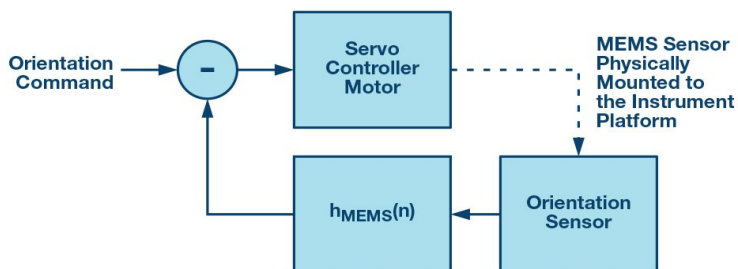


Bild 9: Basis Plattformstabilisierungssystem.

Industrie-IMUs sind Größenklassen genauer

Die Endapplikation bestimmt die erforderliche Genauigkeit, und ob Konsumer- oder Industrie Sensoren zum Einsatz kommen. Es ist wichtig zwischen beiden Typen abzuwägen, was sorgfältige Überlegungen bezüglich der feinen Unterschiede erfordert. Tabelle 6 zeigt die Hauptunterschiede zwischen Konsumer- und Mittelklasse-Industrie-Sensoren, integriert in einer IMU.

Unter guten Bedingungen und wenn weniger präzise Daten akzeptabel sind, genügt ein weniger genauer Sensor den Ansprüchen. Jedoch steigt die Nachfrage nach Sensoren für den Einsatz in dynamischer Umgebung, wo die weniger genauen Bausteine versagen, da sie nicht in der Lage sind, die Vibrations oder Temperatureffekte aus der aktuellen Messung zu reduzieren. So sind Messungen unter 3° bis 5° der erwarteten Treffergenauigkeit nicht möglich. Die meisten preiswerten Konsumer-Endprodukte spezifizieren keine Parameter wie Schwingungsrektifizierung, Winkelwanderung und andere, diese sind aber in industriellen Applikationen die größten Fehlerquellen.

Sensorparameter	Typische Industrie-Spezifikation	Verbesserung gegenüber Konsumerprodukt
Dynamik Bereich	Up to 40 g	3×
Rauschdichte	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	10×
Geschwindigkeitsabweichung	0,03 m/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$	10×
In-Run-Bias-Stabilität	10 μg	10×
Bias Wiederholgenauigkeit	25 mg	100×
-3 dB Bandbreite	500 Hz	2×

Tabelle 6: Industrielle MEMS-Bauteile bieten umfangreiche Charakterisierung aller bekannten potentiellen Fehlerquellen und erzielen gegenüber Konsumerprodukten eine Verbesserung bei der Präzision um Größenordnungen.

Um in einer dynamischen Umgebung eine Treffergenauigkeit von 1° herunter bis 0,1° zu erzielen, muss die Wahl des Designers den Fokus auf die Möglichkeit des Sensors legen, wie er Driftfehler über Temperatur und Vibrationseinflüsse unterdrückt. Sensorfilterung und Algorithmen (Sensorfusion) sind die kritischen Elemente zur Erzielung einer verbesserten Performance. Sie können die Performance-Lücke zwischen den Konsumer- und den Industriesensoren nicht schließen. Eine neue Klasse an Industrie-IMUs von Analog Devices erreicht eine Performance nahe derer, die früher in Flugkörperleitsystemen gefordert wurde. [ADIS1646x](#) und ADIS1647x bieten präzise Bewegungserfassung in Standard- und IMU-Mini-Gehäusen, ermöglichen das, was früher nur in Nischenapplikationen möglich war.

Ein zweiter Teil dieses Artikels setzt die Erläuterung der Schlüsselcharakteristiken von MEMS-Beschleunigungssensoren fort und erklärt, wie sie zu Applikationen wie Wearables, konditions-basiertes Monitoring sowie IoT einschließlich Struktur- und Gesundheitsmonitoring passen.

Referenzen

- [1] Long Pham and Anthony DeSimone. "[Vibration Rectification in MEMS Accelerometers.](#)" Analog Devices, Inc., 2017
- [2] Bob Scannell. "[High Performance Inertial Sensors Propelling the Internet of Moving Things.](#)" Analog Devices, Inc., 2017.
- [3] Mark Looney. "[Analyzing Frequency Response of Inertial MEMS in Stabilization Systems.](#)" *Analog Dialogue*, Vol. 46, 2012.

Chris Murphy [chris.murphy@analog.com] ist Applikationingenieur im European Centralized Applications Center, Dublin, Ireland. Er arbeitet für Analog Devices seit 2012, im Designsupport für Motorsteuerungen und die Industrieautomation. Er besitzt die Titel Master of Engineering in Elektronik und Bachelor of Engineering in Computerengineering.