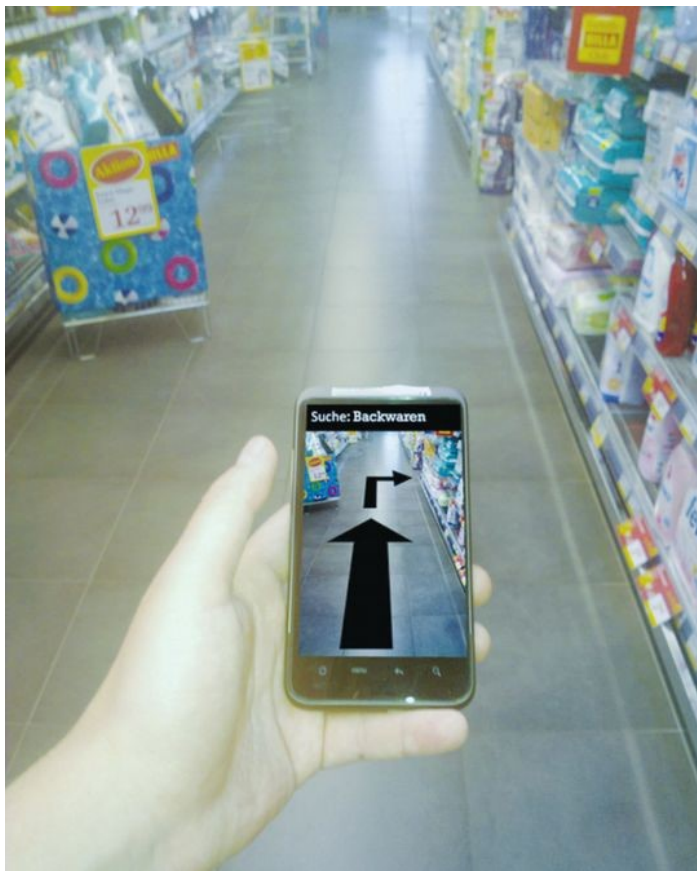


## MEMS-Sensoren

# Beschleunigungssensor vs. Gyroskop

05.09.2014 | Autor / Redakteur: Majid Dadafshar \* / Kristin Rinortner

Beschleunigungssensoren und Gyroskope kommen im Transportwesen, in der Raumfahrt, in Industrierobotern, Autos oder Smartphones zum Einsatz. Im Beitrag geben wir einen Überblick zu Funktionsweise und Anwendungen.



<<https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/762600/762639/original.jpg>>

**MEMS verstehen: Anwendungsbeispiel Beschleunigungssensor für die Navigation in geschlossenen Räumen.**

(Bild: Maxim)

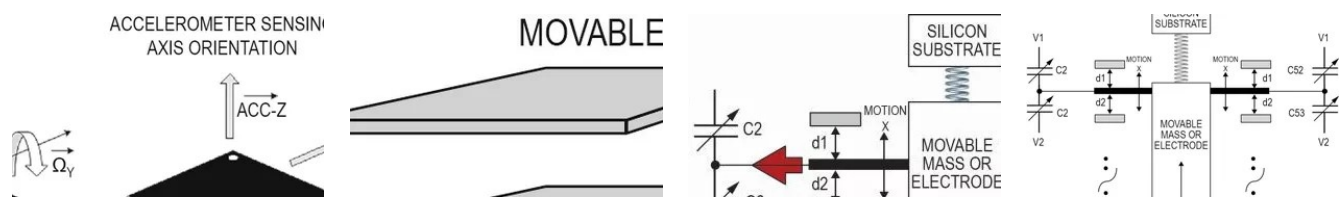
MEMS-Bauelemente fassen mechanische und elektrische Komponenten in kleinen, mikrometergroßen Strukturen zusammen. Mit einer Kombination aus Halbleiter- und Mikrobearbeitungsverfahren werden neben der gesamten Elektronik auch Sensoren und mechanische Elemente auf einem gemeinsamen Siliziumsubstrat angefertigt.

Die wichtigsten Bestandteile eines MEMS-Bauteils sind die mechanischen Elemente, der Sensormechanismus und ein ASIC bzw. Mikrocontroller. MEMS-Sensoren werden in großem Umfang zum Messen von linearen Beschleunigungen entlang einer oder mehrerer Achsen sowie von Drehbewegungen um eine oder mehrere Achsen verwendet. Ihre Signale werden zur Steuerung von Systemen verwendet (Bild 1). MEMS-Beschleunigungssensoren messen in der Regel mit einer Positionsmess-Schaltung die Verschiebung einer Masse. Für die digitale Weiterverarbeitung wird das gemessene Signal mithilfe eines A/D-Wandlers in eine digitale Information umgewandelt. Gyroskope

dagegen messen die Verschiebung der Resonanzmasse und ihrer Aufhängung infolge der Coriolis-Beschleunigung.

---

## BILDERGALERIE



## Funktionsprinzip eines Beschleunigungssensors

Das zweite Bewegungsgesetz von Newton besagt, dass die Beschleunigung eines Körpers direkt proportional zu der auf den Körper wirkenden Kraft ist, dieselbe Richtung wie diese Kraft hat und umgekehrt proportional zu ihrer Masse ist. Wichtig ist die Tatsache, dass die Beschleunigung eine Kraft erzeugt, die von einem Beschleunigungssensor erfasst wird. Die vom Beschleunigungssensor gemessene Größe ist also eigentlich keine Beschleunigung, sondern eine Kraft. Die Beschleunigung wird somit indirekt über eine Kraft gemessen, die auf eine der Achsen des Beschleunigungssensors wirkt. Beschleunigungssensoren sind elektromechanische Komponenten mit Bohrungen, Hohlräumen, Federn und Kanälen, die mithilfe von Mikrobearbeitungsverfahren angefertigt werden. Die Produktion von Beschleunigungssensoren erfolgt in einem mehrschichtigen Waferprozess. Die Beschleunigungskräfte werden anhand der Verschiebung einer Prüfmasse in Bezug auf feststehende Elektroden gemessen.

## Der Sensormechanismus eines Beschleunigungsaufnehmers

Ein verbreitetes Messverfahren, das in Beschleunigungssensoren zum Einsatz kommt, ist kapazitiver Natur. Die Beschleunigung wird dabei als Kapazitätsänderung einer beweglichen Masse erfasst (Bild 2). Typisch für diese Technik sind ihre hohe Genauigkeit und Stabilität, die geringe Verlustleistung und die einfach herzustellende Struktur. Ihre Anfälligkeit gegen Rauschen und Temperaturschwankungen ist gering. Die Bandbreite eines kapazitiven Beschleunigungsaufnehmers beträgt wegen der Geometrie (Feder) und der im IC eingeschlossenen, dämpfend wirkenden Luft nur wenige 100 kHz.

Die Kapazität kann entweder einseitig oder differenziell erfasst werden. Ein differenzieller Beschleunigungssensor (Bild 3) enthält eine einzige bewegliche Masse (eine Kondensatorplatte), die mit einer mechanischen Feder zwischen zwei als Bezugspunkte dienenden Siliziumsubstraten oder Elektroden (als weitere Kondensatorplatten) aufgehängt ist. Die Bewegung ( $x$ ) der Masse zwischen den feststehenden Elektroden ( $d1$  und  $d2$ ) bewirkt eine Änderung der Kapazitäten  $C1$  und  $C2$ . Indem man die Differenz zwischen  $C1$  und  $C2$  errechnet, kann man ermitteln, wie weit und in welche Richtung sich die Masse verschiebt.

Die durch Beschleunigung hervorgerufene, im Mikrometerbereich liegende, Verschiebung der beweglichen Masse bewirkt eine extrem geringe Kapazitätsänderung, die es zu erfassen gilt. Dies bedingt die Verwendung einer großen Zahl beweglicher Massen und feststehender Elektroden, die parallelgeschaltet werden. Diese Anordnung ergibt eine höhere Kapazitätsänderung, die sich präziser erfassen lässt und die kapazitive Technik unter dem Strich praktikabler macht.

## Beschleunigungskraft sorgt für Kapazitätsänderung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die beschleunigungsbedingte Kraft für die Verschiebung einer Masse und damit für eine Kapazitätsänderung sorgt. Durch die Parallelschaltung mehrerer

Elektroden entsteht eine größere Kapazität, die sich einfacher detektieren lässt (Bild 4). V1 und V2 sind dabei elektrische Verbindungen zu jeder Seite der Kondensatoren. Es entsteht ein Spannungsteiler, dessen Mittelpunkt die Spannung der Prüfmasse ist.

Die analoge Spannung, die der Prüfmasse entspricht, durchläuft eine Ladungsverstärkung, die Signalaufbereitung, die Demodulation und die Tiefpassfilterung, bevor das Signal mittels eines Sigma-Delta-A/D-Wandlers in einen digitalen Wert umgewandelt wird. Der A/D-Wandler gibt einen seriellen digitalen Bitstrom aus, der einem FIFO-Puffer zugeführt wird. Dieser verwandelt das serielle Signal in einen parallelen Datenstrom, welcher sich wiederum mit einem seriellen Protokoll wie I<sup>2</sup>C oder SPI transformieren lässt, bevor er zur weiteren Verarbeitung an den Host übertragen wird (Bild 5).

### DE | Bosch Funktionsprinzip eines Beschleunigungssensors



Ein Sigma-Delta-ADC ist wegen seiner geringen Signalbandbreite und hohen Auflösung hervorragend für Beschleunigungssensor-Anwendungen geeignet. Da der Ausgangswert durch die Zahl der Bits definiert ist, lässt sich der Ausgang eines Sigma-Delta-ADC sehr einfach in g-Einheiten für eine Beschleunigungsaufnehmer-Anwendung verwandeln. Ein g entspricht der Erdbeschleunigung auf Seehöhe.

Wenn beispielsweise der X-Achsen-Wert des 10-Bit-A/D-Wandler aus dem Beispiel 600 von insgesamt 1023 ( $2^{10}-1$ ) lautet und die Referenzspannung 3,3 V beträgt, lässt sich die Spannung für die X-Achse wie folgt berechnen:

$$U_x = (600 \times 3,3) / 1023 = 1,94 \text{ V.}$$

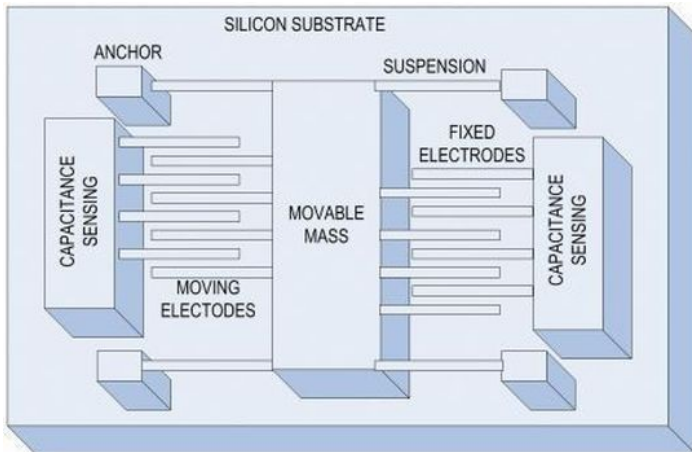
Bei jedem Beschleunigungssensor gibt es eine bestimmte Spannung, die einer Beschleunigung von 0 g entspricht. Zunächst wird also die Abweichung der Spannung von der 0-g-Spannung (diese kann dem Datenblatt entnommen werden und soll hier 1,65 V betragen) wie folgt berechnet:

$$1,94 \text{ V} - 1,65 \text{ V} = 0,29 \text{ V.}$$

Für die abschließende Umwandlung werden diese 0,29 V jetzt durch die Empfindlichkeit des Beschleunigungssensors dividiert (diese steht ebenfalls im Datenblatt und wird hier mit 0,475 V/g angenommen):

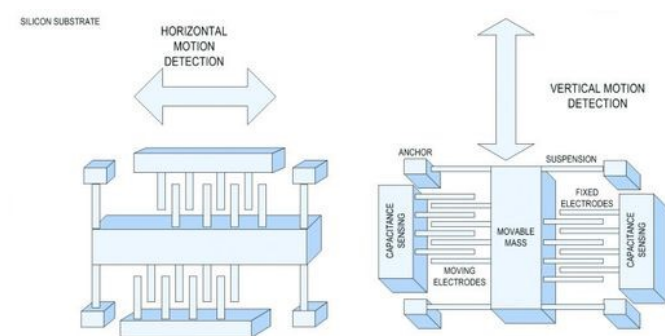
$$0,29 \text{ V} / 0,475 \text{ V/g} = 0,6 \text{ g.}$$

## Mehrachsen-Beschleunigungssensoren



<<https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/762600/762634/original.jpg>>

**Bild 6: Prinzipschaltung eines Beschleunigungssensors**  
(Bild: Maxim)



<<https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/762600/762635/original.jpg>>

**Bild 7: Schema eines Zwei-Achsen-Beschleunigungssensors**  
(Bild: Maxim)

werden: Bandbreite, Empfindlichkeit, Spannungsrauschdichte, Null-g-Spannung, Frequenzgang und der Dynamikbereich.

## Was sind Kriterien für Beschleunigungssensoren?

**Bandbreite (Hz):** Die Bandbreite eines Sensors gibt den Bereich der Vibrationsfrequenzen an, auf die er reagiert, bzw. die Häufigkeit, mit der zuverlässige Messungen durchgeführt werden können. Menschen können keine Bewegungen ausführen, die nennenswert über 10 bis 12 Hz hinausgehen. Zum Feststellen von Neigungen oder menschlichen Bewegungen ist deshalb eine Bandbreite von 40 bis 60 Hz mehr als

Bild 3 (siehe Bildergalerie) soll nun durch einen real produzierten Beschleunigungssensor ergänzt werden (Bild 6). Jetzt lässt sich ein direkter Bezug der einzelnen Komponenten eines Beschleunigungssensors zu seinem mechanischen Modell herstellen.

Montiert man einen weiteren Beschleunigungssensor um 90° gedreht (Bild 7), erhält man einen Zwei-Achsen-Beschleunigungsaufnehmer, wie man ihn für anspruchsvollere Anwendungen benötigt. Ein Zwei-Achsen-Beschleunigungssensor kann auf zwei Arten realisiert werden: Entweder man ordnet zwei Ein-Achsen-Beschleunigungsaufnehmer rechtwinklig zueinander an oder man verwendet nur eine Prüfmasse und platziert die kapazitiven Sensoren so, dass Bewegungen entlang beider Achsen erfasst werden können.

## Kriterien für Beschleunigungssensoren

Bei der Wahl des richtigen Beschleunigungsaufnehmers für eine bestimmte Anwendung müssen einige wichtige Eckdaten der ins Auge gefassten Bauelemente begutachtet

ausreichend.

**Empfindlichkeit (mV/g oder LSB/g):** Die Empfindlichkeit ist ein Maß für das minimal detektierbare Signal bzw. für die Änderung des elektrischen Ausgangssignals für eine bestimmte Änderung der mechanischen Messgröße. Die Empfindlichkeit bezieht sich stets nur auf eine bestimmte Frequenz.

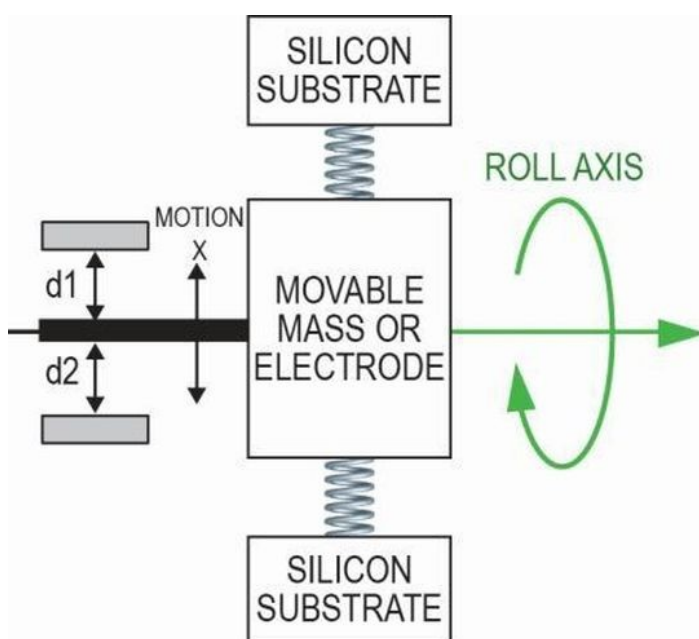
**Spannungsrauschdichte ( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ):** Das Spannungsrauschen ändert sich mit dem Kehrwert der Quadratwurzel der Bandbreite. Je schneller man die Werte des Beschleunigungssensors ausliest, umso geringer wird die Genauigkeit. Das Rauschen hat einen umso größeren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Beschleunigungssensors, je geringer die g-Werte sind und je kleiner somit das Ausgangssignal ist.

**Null-g-Spannung:** Dieser Wert gibt den Bereich der Spannungen an, die bei einer Beschleunigung von 0 g am Ausgang zu erwarten sind.

**Frequenzgang (Hz):** Hierbei handelt es sich um den (mit einer Toleranz von  $\pm 5\%$  angegebenen) Frequenzbereich, in dem der Sensor Bewegungen detektieren und einen korrekten Ausgangswert liefern kann. Mit der für das Frequenzband angegebenen Toleranz kann der Anwender berechnen, wie weit die Empfindlichkeit eines Bausteins bei einer beliebigen Frequenz innerhalb des angegebenen Bereichs von der Referenzempfindlichkeit abweicht.

**Dynamikbereich (g):** Dies ist der Bereich zwischen der geringsten vom Sensor messbaren Amplitude und der größten Amplitude, von der an das Ausgangssignal verzerrt oder gekappt wird.

## Beschleunigungssensor oder Gyroskop?



<<https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/762600/762636/original.jpg>>

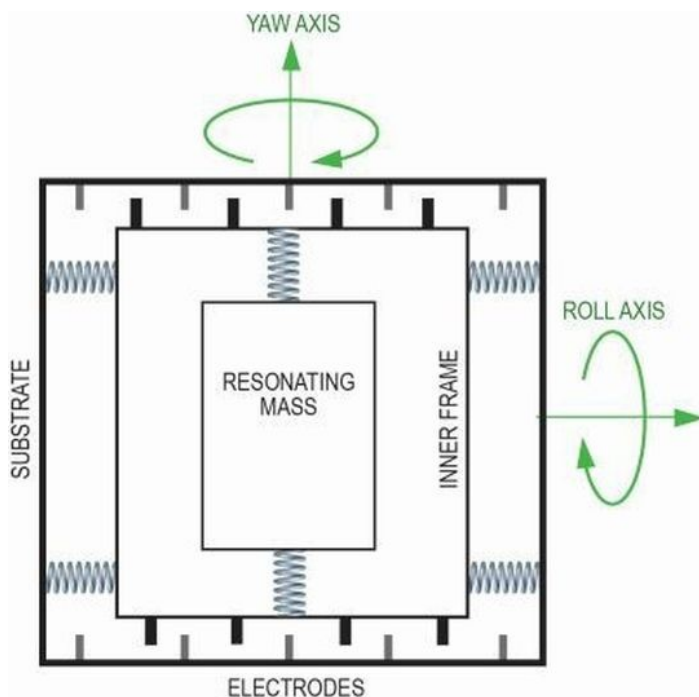
**Bild 8: Unempfindlichkeit eines Beschleunigungssensors gegenüber Drehungen**

(Bild: Maxim)

Bevor einige MEMS-Anwendungen vorgestellt werden, sollen die Unterschiede zwischen einem Beschleunigungssensor und einem Gyroskop erläutert werden. Beschleunigungsaufnehmer messen lineare Beschleunigungen (angegeben in mV/g) entlang einer oder mehrerer Achsen. Gyroskope dagegen messen Winkelgeschwindigkeiten (angegeben in mV/°/s). Nimmt man den zuvor beschriebenen Beschleunigungssensor und dreht ihn um die Längsachse (Rollen; siehe Bild 8), so ändern sich die Abstände d1 und d2 nicht. Dementsprechend reagiert der Ausgang des Bausteins nicht auf Änderungen der Winkelgeschwindigkeit.

Man kann den Sensor jedoch entsprechend konstruieren, dass die Prüfmasse über Federn so mit dem Substrat verbunden ist, dass sie





<<https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/762600/762637/original.jpg>>

**Bild 9: Anordnung von Innenrahmen und Substrat zum Erfassen von Drehbewegungen**  
(Bild: Maxim)

gegenüber der Bewegungsrichtung um  $90^\circ$  versetzt ist (Bild 9). Jetzt lässt sich die Coriolisbeschleunigung durch Messen der Kapazitäten an den Elektroden detektieren, die zwischen Innenrahmen und Substrat angebracht sind.

## Anwendungen für Beschleunigungssensoren und Gyroskope

Beschleunigungssensoren werden in Automobilen schon seit langer Zeit zum Detektieren von Unfällen eingesetzt, damit die Airbags genau im richtigen Moment gezündet werden können. Auch in Mobilgeräten werden sie genutzt, um beispielsweise die Displaydarstellung zwischen Hoch- und Querformat umzuschalten oder um das Weiterschalten zum nächsten Lied durch Klopfen zu ermöglichen, selbst wenn man das

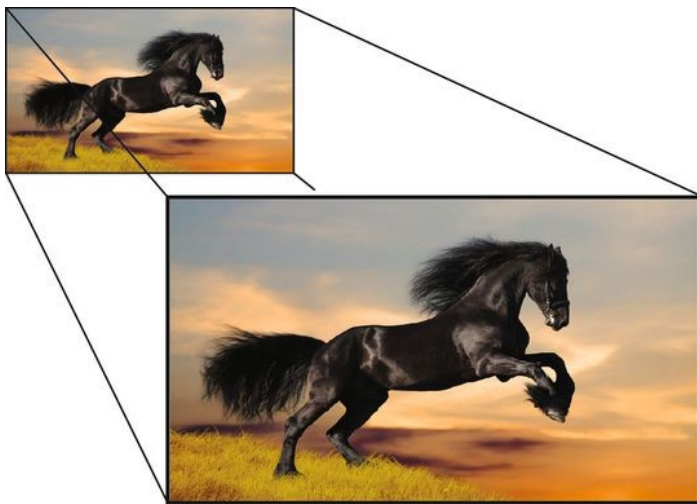
Gerät in der Tasche trägt. Die optische Bildstabilisierung stellt ein weiteres Anwendungsgebiet dar.

**a) Indoor-Navigation:** Unter der Beschleunigung versteht man die Änderungsrate der Geschwindigkeit. Man kann die Geschwindigkeits- und Entfernungsinformation durch einfache bzw. doppelte Integration aus dem Beschleunigungswert herleiten. Nimmt man die Messungen von Gyroskopen hinzu, lässt sich mithilfe einer speziellen Technik die Position und Richtung eines Objekts bezogen auf einen bestimmten Startpunkt verfolgen. Diese Methode nutzt man für die Navigation in geschlossenen Räumen ohne externe Referenz und ohne GPS-Signal.

**b) Optische Bildstabilisierung:** Die Hände von Menschen bewegen sich stets mit einer sehr geringen Frequenz von 10 bis 20 Hz. Beim Fotografieren mit einem Smartphone oder einer Kamera entsteht hierdurch eine Verwacklungsunschärfe. Diese Unschärfe wird umso stärker, je größer die Brennweite ist, d.h. je stärker das Bild gezoomt wird.

Hierzu das Beispiel eines Sensors, der horizontal mit einer Rate von  $0,08^\circ$  bewegt wird, bei einer SVGA-Kamera mit  $800 \times 600$  Pixeln und einem Bildwinkel von  $45^\circ$ . Bei  $45/800 = 0,056^\circ$  sind 1,42 Pixel unscharf. Je höher die Auflösung der Kamera ist, umso mehr Pixel werden unscharf.

Eine auf Gyroskopen basierende optische Bildstabilisierung (Bild 11) im Verbund mit entsprechender Korrektursoftware kann diese Unschärfe vermeiden. Hierzu werden die vom Gyroskop kommenden Messdaten einem Mikrocontroller zugeführt, der über einen Linearmotor eine entsprechende Gegenbewegung des Bildsensors veranlasst.



<<https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/762600/762638/original.jpg>>

**Bild 11: Optische Bildstabilisierung kann Verwacklungsunschärfen vermeiden.**

(Bild: Maxim)

### c) Gesteneingabe: MEMS-

Beschleunigungssensoren eignen sich für die Gestensteuerung einer kabellosen Maus oder zum Lenken eines Rollstuhls. Gyroskope kommen auch bei der Steuerung der Spielkonsole Wii zum Einsatz. Darüber hinaus lassen sich Gesten auch zur Steuerung des Cursors auf einem Fernsehbildschirm oder zum Bedienen virtueller Knöpfe nutzen, auch externe Geräte sind über ein drahtloses Handgerät steuerbar.

MEMS-Beschleunigungssensoren und -Gyroskope kommen im Transportwesen, in der Raumfahrt, in Industrierobotern und in Automobilen schon seit langer Zeit zum Einsatz.

Ihr Anwendungsgebiet umfasst inzwischen auch die Smartphones, wo sie die Interaktion mithilfe von Gesten und Bewegungen ermöglichen.

Entwickler, die die Eigenschaften von MEMS-Bauelementen und von Beschleunigungssensoren und Gyroskopen kennen, können effizientere und kostengünstigere Produkte für Massen-Anwendungen entwerfen. Die MEMS-Bauelemente ermöglichen außerdem die Realisierung neuer Anwendungen, mit denen Technik mithilfe von Bewegungen und Gesten gesteuert wird.

\* Majid Dadafshar war bei Maxim Integrated in San Jose, USA, beschäftigt.

(ID:42848521)

## KOMMENTARE

Sie sind nicht angemeldet

S

**sebastian.gerstl** 05.08.2019, 18:24

Sehr geehrter Leser,

danke für Ihren Hinweis, aber wo sehen Sie denn das Problem? Im betreffenden Artikel von 2014 ist, wie auch in dem von Ihnen verlinkten PDF, ganz oben (mit nochmaligem namensnennenden Verweis am Fußende) Majid Dadafshar als Autor benannt.

Beste Grüße,  
die EP-Redaktion

?

**nicht registrierter User** 05.08.2019, 17:24

Tolle Übersetzung. Der Autor muss als solcher erkennbar bleiben! Oder zumindest die Quelle sollte angegeben werden

<https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5830.pdf> <<https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5830.pdf>>

---



**nicht registrierter User** 27.01.2017, 06:12

Ich habe heute viel dazu gelernt.

Horst Kern

## KARRIERECHANCEN

→<https://jobs.elel/listing?q=Analog>





<<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/elektronikingenieur-mwd-hardwareentwicklung-life-cycle-ahrensburg-basler-ag-383947>>

Basler AG

**Elektronikingenieur (m/w/d) Hardwareentwicklung Life Cycle** <<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/elektronikingenieur-mwd-hardwareentwicklung-life-cycle-ahrensburg-basler-ag-383947>>

in Ahrensburg | Flexible Arbeitszeit



<<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/iot-specialist-developer-mwd-wolfertschwenden-multivac-sepp-haggenmueller-se-co-kg-361503>>

MULTIVAC Sepp Haggenmüller SE & Co. KG

**IoT Specialist / Developer (m/w/d)** <<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/iot-specialist-developer-mwd-wolfertschwenden-multivac-sepp-haggenmueller-se-co-kg-361503>>

in Wolfertschwenden

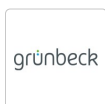


<<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/global-support-engineer-mfd-boeblingen-advantest-europe-gmbh-369787>>

Advantest Europe GmbH

**Global Support Engineer (m/f/d)** <<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/global-support-engineer-mfd-boeblingen-advantest-europe-gmbh-369787>>

in Böblingen



<<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/entwicklungsingenieur-mwd-schwerpunkt-iot-hoechstaedt-gruenbeck-wasseraufbereitung-gmbh-381474>>

Grünbeck Wasseraufbereitung GmbH

**Entwicklungsingenieur (m/w/d) Schwerpunkt IoT** <<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/entwicklungsingenieur-mwd-schwerpunkt-iot-hoechstaedt-gruenbeck-wasseraufbereitung-gmbh-381474>>

in Höchstädt



<<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/leiter-soft-und-hardwareentwicklung-mwd-schmoelln-indusol-gmbh-359295>>

**Leiter-Soft- und Hardwareentwicklung (m/w/d)** <<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/leiter-soft-und-hardwareentwicklung-mwd-schmoelln-indusol-gmbh-359295>>

in Schmölln | Betr. Altersvorsorge



<<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/senior-hardwareentwickler-mwd-tettnang-futronic-gmbh-385378>>

futronic GmbH

**Senior-Hardwareentwickler (m/w/d) <<https://jobs.elektronikpraxis.de/stellenangebot/senior-hardwareentwickler-mwd-tettnang-futronic-gmbh-385378>>**

in Tettnang | Flexible Arbeitszeit