

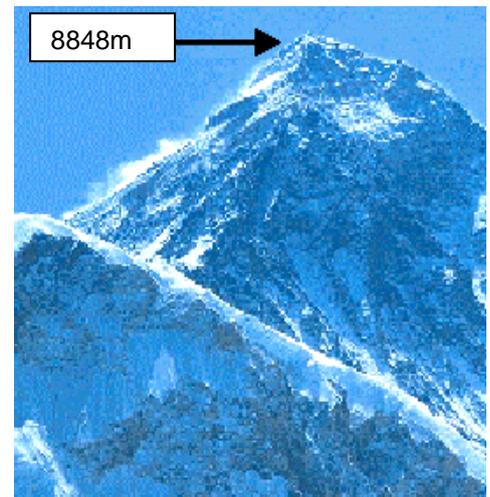


# MS5611 – Präzise Höhenmessung (24 bit) mit dem Drucksensor- modul MS5611

**Präzise Höhenmessung lässt sich mit verschiedenen physikalischen Methoden realisieren. Dazu gehören optische (Lasermessgeräte), elektronische (Mikrowellendetektoren) und barometrische Verfahren. Wie die Höhe in guter Präzision mit einem miniaturisierten Drucksensor auf Siliziumbasis (MS5611) gemessen werden kann, ist Inhalt des nachstehenden Artikels der Firma AMSYS.**

Der Begriff: atmosphärischer Druck beschreibt den Druck, der durch das Gewicht der Luftschicht, die die Erde umgibt, erzeugt wird. Da die Luft ein kompressibles Medium ist, muß die atmosphärische Umgebung nach unten dichter sein und damit die Luftsäule schwerer als in umgekehrter Richtung. Folglich nimmt der Luftdruck ab dem Nullpunkt (= Meereshöhe) bei 1013 mbar mit wachsender Höhe ab. Von Meereshöhe aus gemessen ändert sich der atmosphärische Druck mit näherungsweise 1 mbar/8 m. Näherungsweise, weil durch die Kompressibilität der Luft ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Luftdruck und Höhe existiert. So liegt z.B. am Gipfel des Mount-Everest mit 8848 m über Normalnull der Luftdruck bei 310 mbar.

Dass bei Kenntnis des barometrischen Druckes der funktionale Zusammenhang zwischen Höhe und Luftdruck zur Höhenbestimmung verwendet werden kann, wird in den nachstehenden Ausführungen erläutert.



**Abbildung 1:** Gipfel des Mount Everest

## Das Prinzip der Höhenmessung

Die aus dem Schulunterricht bekannte klassische barometrische Höhenformel gilt für den Spezialfall, dass die Temperatur  $T$  in jeder Höhe gleich, die Atmosphäre also isotherm ist:

$$p(h_1) = p(h_0) e^{-\frac{Mg \Delta h}{RT}} \quad (1)$$

- $R$  = universelle Gaskonstante ( $8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )
- $M$  = mittlere molare Masse der Atmosphäregase ( $0,02896 \text{ kgmol}^{-1}$ )
- $g$  = Erdbeschleunigung  $g = 9,80620 \text{ m/s}^2$  auf dem 45. Breitengrad
- $T$  = absolute Temperatur (273 K)
- $\Delta h = h_1 - h_0$



# MS5611 – Präzise Höhenmessung (24 bit) mit dem Drucksensor- modul MS5611

Im Allgemeinen variiert jedoch die Temperatur mit der Höhe. Mit einem linearen Ansatz, dessen Gültigkeit auf die Troposphäre beschränkt ist, gilt für die Temperatur  $T(h)$ :

$$T(h) = T(h_0) - a \cdot (h_1 - h_0) \quad (2)$$

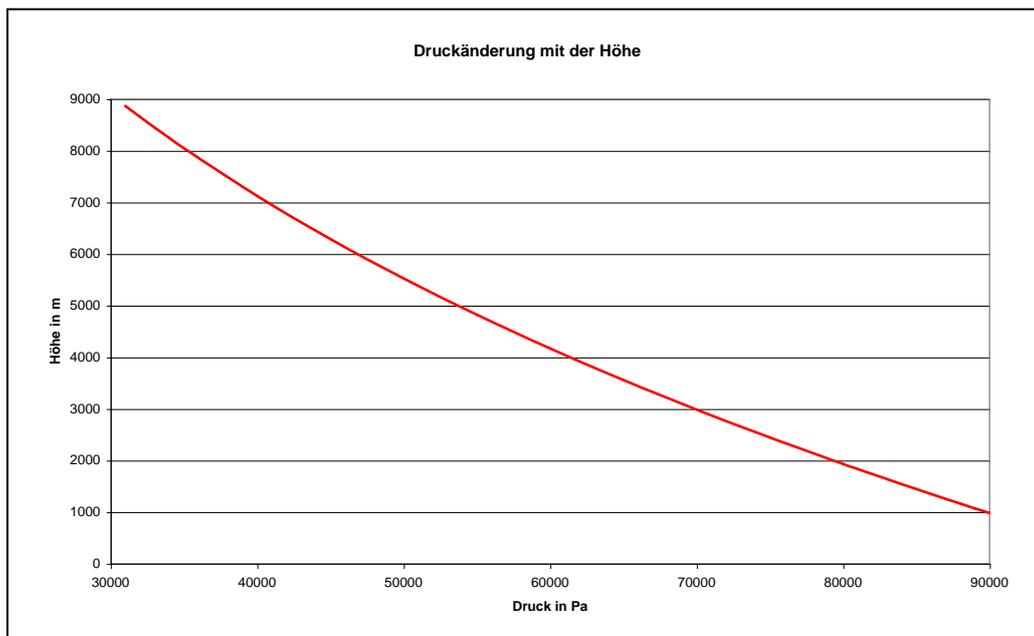
Damit schreibt sich die barometrische Höhenformel:

$$p(h_1) = p(h_0) \left( 1 - \frac{a \Delta h}{T(h_0)} \right)^{\frac{Mg}{Ra}} \quad (3)$$

Messungen der Temperaturprofile in der Atmosphäre zeigen, dass der lineare Ansatz eine gute Näherung für normale Wetterlagen ist, wobei für  $a$  ein mittlerer Wert von 0,65 K/100 m angenommen werden kann.

$R$  ist konstant und  $M$  und  $g$  werden als konstante Größen vorausgesetzt, was im Geltungsbereich der Formel seine Berechtigung hat und nur zu kleinen Ungenauigkeiten führt.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Luftdruck und Höhe (siehe *Abbildung 2*) kann prinzipiell dazu benutzt werden, um einen Absolutdrucksensor als Höhenmesser einzusetzen. Dabei muss erwähnt werden, dass der Drucksensor in dem erwarteten Messbereich mit genügender Genauigkeit kalibriert sein muss. Das bedeutet, das Ausgangssignal des Sensors muss proportional zur Änderung des atmosphärischen Druckes sein.



**Abbildung 2:** Druckänderung in Abhängigkeit von der Höhe



# MS5611 – Präzise Höhenmessung (24 bit) mit dem Drucksensor- modul MS5611

## Praktische Messungen

Misst man mit einem Absolutdrucksensor den am Standpunkt herrschenden atmosphärischen Druck, so muss man beachten, dass dies immer eine Überlagerung des höhenabhängigen und des barometrischen Druckes (Wetterlage) ist. Das bedeutet, dass man bei einer Messung des Atmosphärendruckes immer zwei Effekte misst. Dies muss bei der Ermittlung der Höhe berücksichtigt werden.

Zur praktischen Bestimmung der Höhe gibt es in Abhängigkeit der Gegebenheiten verschiedene Methoden.

### a). Man kennt z.B. die Höhe $h_0$ des Ausgangspunktes der Höhenmessung.

Am Ort  $h_0$ , dessen geographische Höhe bekannt ist, ermittelt man den herrschenden Druck  $p(h_0)$  und die Temperatur  $T(h_0)$ . Diese setzt man ebenso wie den Wert  $h_0$  in die Gleichung (3) ein. Nach dem Aufstieg misst man am Punkt  $h_1$  den Druck  $p(h_1)$  und setzt den Wert ebenfalls in die Gleichung (3) ein. Durch Auflösen nach  $\Delta h = h_1 - h_0$  kann man die Höhe  $h_1$  ermitteln.

### b). Man kennt die Höhe $h_0$ des Ausgangspunktes der Höhenmessung nicht.

In diesem Falle muss man die Größe  $h_0$  erst bestimmen. Dazu braucht man die Angabe des barometrischen Drucks unter Normalbedingung (Isobarenkarte) und die entsprechende Temperatur; setzt die Größen in die Formel (3) ein und misst den Druck  $p(h_1)$  am Ausgangspunkt der Höhenmessung. Mit diesen Informationen lässt sich aus  $\Delta h$  mit  $h_0 = 0$  die absolute Höhe am Messort in Bezug auf Meereshöhe berechnen. Diese Größe ist dann die Größe  $h_0$  für die Ermittlung der Höhe aus dem Beispiel a).

Die Genauigkeit der Messung hängt bei diesem Verfahren von der Stabilität der Wetterlage (barometrischer Druck) ab. Ändert sich diese während des Aufstiegs auf die Höhe  $h_1$ , so muss die Änderung bei der Berechnung der Höhe mit berücksichtigt werden. Dazu muss im Beispiel a) der Wert  $p(h_0)$  mit einem zweiten synchronisierten Drucksensor am Ort  $h_0$  überwacht und gegebenenfalls bei der Berechnung von  $h_1$  angepasst werden.

Man muss sich zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit vor Augen halten, dass die verwendete Formel eine approximative Näherungsformel ist. Wesentliche Voraussetzungen sind der lineare Temperaturverlauf (keine Berücksichtigung von adiabatischen Temperaturänderungen, Luftvermischungen aufgrund von Wetterwechsel, Luftfeuchtigkeit usw. und  $M, g = \text{const.}$ ) und stabile barometrische Wetterverhältnisse. Unabhängig von der Ungenauigkeit der Formel spielt für die Höhenbestimmung die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen der verwendeten Drucksensoren eine wesentliche Rolle.

## Drucksensor als Höhenmesser

Die meisten kommerziell erhältlichen Höhenmesser auf der Basis von Drucksensoren haben einen Anzeigebereich von  $-100$  bis  $4'000$ ,  $5'000$  oder  $9'000$  Meter bei einer Auflösung von einigen 10 Metern (max. 14 bit) und sind daher nicht als sonderlich präzise zu bezeichnen. Eine bessere Auflösung war bisher nur mit größerem Kostenaufwand zu erreichen.

Genauso wichtig wie die Auflösung ist die Gesamtgenauigkeit und speziell für Außenanwendung der Temperaturgang des Messgerätes in Offset und im Spannsignal. Wichtige, praxisorientierte Faktoren sind bei mobilen Systemen die Eigenstromaufnahme und die Baugröße.



# MS5611 – Präzise Höhenmessung (24 bit) mit dem Drucksensor- modul MS5611

All diese Eigenschaften vereinigt der 24 bit-Drucksensor MS5611. Der ultra miniaturisierte Absolutdrucksensor ist auf der Grundlage eines piezoresistiven Druckmesselementes aufgebaut und als digitaler Höhenmesser für mobile Anwendungen konzipiert. Zusätzlich zur Druckbestimmung erlaubt der Sensor eine hochgenaue Temperaturmessung, die zur Höhenbestimmung nach Formel (3) ebenfalls notwendig ist.

Aufgrund seiner kleinen Bauform und der geringen Stromaufnahme eignet sich der MS5611 für mobile Anwendungen z.B. in Personennavigationsgeräten.

Der Drucksensor wird in Deutschland von der Firma AMSYS [1] vertrieben.

## Absolutdrucksensor MS5611

Der MS5611 [2] basiert auf modernsten Halbleiter-Technologien. Kernstück des Absolutdrucksensors ist eine Siliziummeßzelle, die nach dem piezoresistiven Prinzip arbeitet. Sie hat als druckempfindliches Element eine dünne Membrane, die anisotrop aus dem Siliziumkörper ausgeätzt wird. An geeigneten Stellen sind lokal Fremdatome in den Siliziumkristall eindiffundiert, so daß Zonen mit geänderter Leitfähigkeit entstehen, die elektrisch als Widerstände in Erscheinung treten. Sobald der Druck auf die Meßzelle einwirkt, deformiert sich die dünne Siliziummembran. Durch die auftretenden inneren Kräfte wird die molekulare Struktur des Kristalls reversibel verändert. Insbesondere in den Widerstandsgebieten finden im Kristallgitter starke Potentialverschiebungen statt, die zu einer meßbaren Änderung der elektrischen Werte führen (Piezoeffekt). Diese Widerstände sind zu einer Brücke geschaltet, so daß man bei Strom- oder Spannungseinprägung eine druckabhängige, elektrische Spannung erhält.

Die Siliziummesszelle ist auf einem PCB aufgebracht und mit Golddrähten mit den Löt pads des Substrats elektrisch verbunden. Dieses PCB-Substrat gestattet die Verwendung von Standard-SMD-Equipment mit Pick & Place-Automaten und die Lötung per Reflow bzw. Gasphase.

## Signalauswerteschaltung

Neben der Messzelle befindet sich eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC), welche prinzipiell die Funktion eines Präzisions-ADC erfüllt. Dieses ASIC dient zur Signalaufnahme und wandelt die analogen Signale der Meßzelle in 24 bit-Werte für Druck und Temperatur um. Das ASIC besteht aus einem Multiplexer, einem 24bit-Sigma-Delta-A/D-Wandler, einem EPROM und einem Digitalausgang mit SPI- und I<sup>2</sup>C-Interface.

Eine spezielle Ansteuertechnik (getakteter Multiplexer) erlaubt den Betrieb des Sensors mit sehr geringer Leistungsaufnahme. Dadurch wird der empfindliche Sensor nicht nennenswert erwärmt, was eine hervorragende Stabilität der Ausgangssignale der Messzelle zur Folge hat.

Der Wandler misst neben der Ausgangsspannung der Messzelle auch den temperaturabhängigen Brückenwiderstand. Dieses Signal wird zur Kompensation des temperaturabhängigen Drucksignals verwendet und erlaubt die Funktion eines sehr hoch auflösenden Thermometers (0,01°C Auflösung). Durch die Verwendung des Brückenwiderstandes zur direkten Temperaturmessung (keine unnötigen Temperaturgradienten zwischen Meßzelle und Temperatursensor) zeigt die Kompensationsmethode des Sensors auch bei starken Temperaturwechseln ihre Leistungsfähigkeit.

Der 24bit-Sigma-Delta-A/D-Wandler ist auf eine gute Linearität und geringes Rauschen über den gesamten Betriebsspannungs- und Temperaturbereich optimiert. Dadurch sind hochauflösende Höhenmesser mit 20cm (RSM) Auflösung ohne spezielle programmtechnische Kniffe einfach realisierbar. Bei Mehrfachmittelung kann sogar eine Auflösung von wenigen Zentimeter erreicht werden.

# MS5611 – Präzise Höhenmessung (24 bit) mit dem Drucksensor-modul MS5611

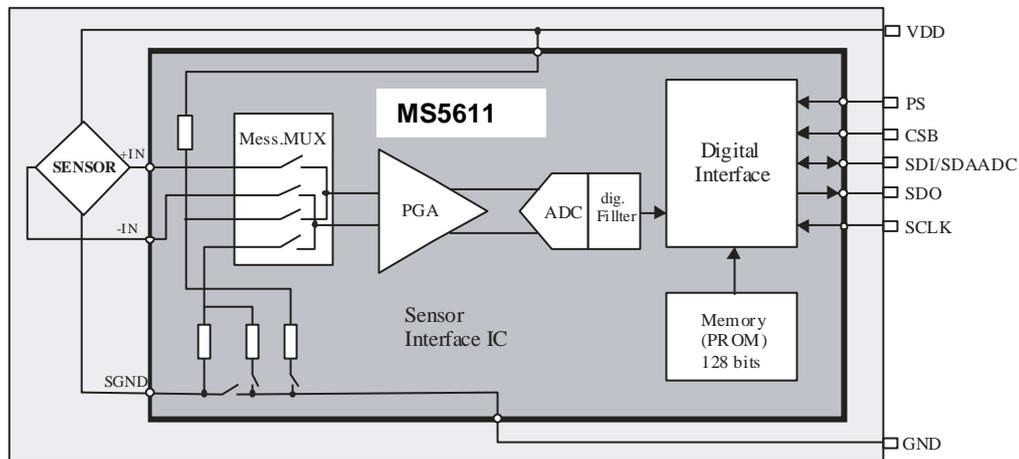


Abbildung 3: Prinzipschaltung der MS5611

## Korrektur „On Chip“

Das ASIC bildet mit der SPI oder I<sup>2</sup>C- Interface die Schnittstelle zwischen der piezoresistiven Druckmesszelle und einem externen Controller. Dieser wird dazu verwendet, um aus den Messwerten der Zelle und den gespeicherten Korrekturgrößen mit einem einfachen Algorithmus die korrigierten Druck- und Temperaturmesswert zu ermitteln.

Dazu werden die Korrekturkoeffizienten während der Herstellung im internen 128 bit EPROM gespeichert. Abweichungen von der idealen Übertragungsfunktion, bedingt durch Herstellungstoleranzen, wie Nullpunktverschiebung, Empfindlichkeitsstreuung, Nichtlinearitäten sowie die IC internen Toleranzen werden bei definierten Druck- und Temperaturbedingungen individuell gemessen und in die Korrekturwerte umgerechnet.

Im Betrieb nach dem Power-On Reset werden diese Korrekturdaten des Sensors automatisch aus dem EPROM gelesen. Anschließend werden in einer Schleife abwechselnd der nicht-kompensierte Druck- und der Temperaturwert an den Ausgang bereitgestellt. Eine einfache Rechnung mit nur einer Multiplikation errechnet im externen Prozessor den korrigierten Druckwert und die Temperatur.

Die Möglichkeit, den Sensor auf der Grundlage interner individueller Korrekturdaten und mit Hilfe eines externen einfachen Prozessors mit einer Drei-Draht-Schnittstelle (SPI) oder einer Zwei-Draht-Schnittstelle (I<sup>2</sup>C) kalibrieren und kompensieren zu können, erlaubt dem Benutzer ein Maximum an Flexibilität in seiner Systemarchitektur. Von besonderem Interesse ist der Sensor daher für die Anwendungen, die aus Gründen des übergeordneten Systems bereits einen Prozessor voraussetzen.

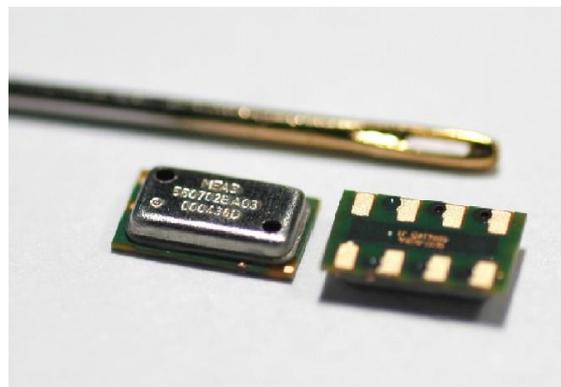


Abbildung 2: Drucksensor MS5611



# MS5611 – Präzise Höhenmessung (24 bit) mit dem Drucksensor- modul MS5611

## Genauigkeit und Stromverbrauch

Der neue Drucksensor MS5611 erzielt im Bereich von 10 bis 1200 mbar eine Auflösung des Drucksignals von 0,012 mbar und eine totale Messgenauigkeit von 0,2 % FS (entspricht  $\pm 2,5$  mbar im Bereich von  $-20$  bis  $85^{\circ}\text{C}$ ). Zusätzlich zur Druckbestimmung erlaubt das Sensormodul eine Temperaturmessung mit einer Auflösung von  $0,01^{\circ}\text{C}$ .

Die Verwendung des MS5611 als Höhenmesser in einer Digitaluhr demonstriert sehr gut die Möglichkeiten des Drucksensors. Bei einer Druckmessung pro Sekunde liegt der mittlere Stromverbrauch bei  $0,9 \mu\text{A}$ . Im Stand-By-Modus liegt der Stromverbrauch bei  $0,02 \mu\text{A}$ . Sogar mit einer sehr kleinen CR1215 (3 V/36 mAh) Lithium-Knopfzelle kommt man auf eine Batterielebensdauer von mehreren Jahren.

## Baugröße

Der komplette Drucksensor wird als QFN-Version ( $5,0 \times 3,0 \times 1,6 \text{ mm}^3$ ) geliefert und hat damit Abmessungen, die selbst für Uhranwendungen geeignet ist. Besonderer Vorteil an diesem Sensormodul ist die Tatsache, dass keine externen Bauelemente (interner Oszillator) benötigt werden.

## Zusammenfassung

Moderne Siliziumdrucksensoren haben fast vollständig die traditionelle mechanische Membrandruckdose verdrängt. Dennoch sagt man diesen neuen mikromechanischen Messelementen nach, dass sie wegen materialbedingten Ungenauigkeiten nur mit großem Aufwand für präzise Messinstrumente zu gebrauchen seien. Die Verbindung der modernen Mikrostrukturtechnik (MEMS) mit der integrierten elektronischen Signalbearbeitung (ASIC) demonstriert jedoch, dass Miniaturisierung und Präzisionsanforderungen sehr gut miteinander verträglich sind. Am Beispiel des barometrischen Drucksensors MS5611 in der Funktion eines Höhenmessers, wurde dies im vorhergehenden Artikel erläutert.

Die neuste Messung der Höhe des Mont Everest wurde im Mai 2005 von einer chinesischen Expedition durchgeführt. Sie ergab für den Gipfel eine Höhe von 8844,43 Meter bei einer Ungenauigkeit von  $\pm 2$  Zentimeter. Eingesetzt wurden Radardetektoren, Lasermessgeräte und ein Satellitenortungssystem. Mit dem MS5611 hätte man mit einer genaueren Höhenformel die Höhe theoretisch auch auf  $\pm 10$  Zentimeter ermitteln können.

## Weiterführende Informationen

- [1] Übersicht Absolutdrucksensoren :  
<http://www.amsys.de/produkte/drucksensoren/absolutdrucksensoren/>
- [2] Produktübersicht und Datenblatt MS5611:  
<http://www.amsys.de/produkte/drucksensoren/ms5611-hochaufloesender-praezisions-barometer-sensor/>

## Kontaktaufnahme

AMSYS GmbH & Co. KG – An der Fahrt 4 – 55124 Mainz – Deutschland  
Tel. 06131 / 469 8750 - Homepage: [www.amsys.de](http://www.amsys.de) - E-Mail: [info@amsys.de](mailto:info@amsys.de)