

Hochgenaue digitale Temperatursensoren dank Kalibrationsverfahren auf Waferbasis

Die Funktionsweise von Temperatursensoren basiert auf physikalischen Effekten, die sich mit der Temperatur ändern. Zum Beispiel nutzen Widerstandsthermometer die Tatsache, dass der Widerstand von Materialien mit der Temperatur variiert. Thermoelemente nutzen den Seebeck-Effekt, der eine Spannung erzeugt, wenn zwei unterschiedliche Metalle an einem Ende zusammentreffen und an verschiedenen Temperaturen gehalten werden. Halbleiter-Temperatursensoren nutzen die temperaturabhängige Änderung von Halbleiterparametern. Beim digitalen Niedrigleistungs-Temperatursensor SMT172 sind dies beispielweise zwei als Stromquellen konfigurierte BJT-Transistoren, welche einen Kondensator laden und entladen und durch einen Schmitt-Trigger eine PWM erzeugen.

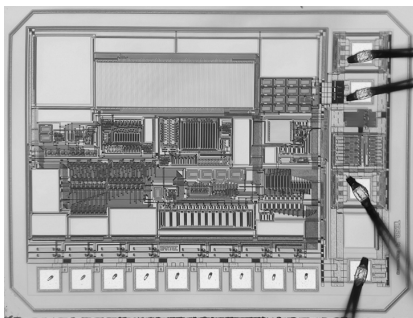


Abbildung 1: SMT172-Chip 1.3mm x 1.7mm

Nach der Umwandlung des Sensorsignals in ein elektrisches Signal muss dieses übertragen werden, um es für die Verarbeitung und Analyse verfügbar zu machen. Die Übertragung kann drahtgebunden oder drahtlos erfolgen. In industriellen Umgebungen werden häufig geschirmte Kabel verwendet, um Irritationen durch elektromagnetische Störungen zu minimieren. Die drahtlose Übertragung, wie etwa über Funkkommunikation ermöglicht die Fernüberwachung von Temperaturen in verschiedenen Umgebungen.

Die Übertragung des Sensorsignals von einem Temperatursensor zur weiteren Verarbeitung und Analyse kann auf zwei Hauptarten erfolgen: analoge Übertragung und digitale Übertragung.

Zusätzlich dazu gibt es spezielle Kommunikationsprotokolle wie I²C, die für die digitale Kommunikation zwischen Sensoren und anderen Geräten verwendet werden können. Bei der analogen Übertragung wird das Sensorsignal in Form einer kontinuierlichen, nicht diskreten Spannung oder Stromstärke übertragen. Dieses Signal variiert proportional zur gemessenen Temperatur. Analoge Signale sind anfällig für Störungen und Verzerrungen, insbesondere über längere Übertragungsstrecken oder in Umgebungen mit elektromagnetischen Einflüssen. Daher erfordert die Verarbeitung und Analyse analoger Signale spezielle Schaltungen, um Qualitätsverluste zu verhindern.

Eine weitere Möglichkeit zur verlustfreien Datenübertragung über weite Distanzen ist die Pulsweitenmodulation. PWM ist eine Technik, bei der ein Signal, in diesem Fall die Temperaturdaten des Sensors SMT172, in ein digitales Signal umgewandelt und übertragen wird.

Bei der Pulsweitenmodulation wird ein periodisches Signal, die Trägerwelle, zur Übertragung von Informationen verwendet. Die Information wird durch die Breite der Impulse im Verhältnis zur Periodendauer kodiert. Eine längere Impulsbreite steht für einen höheren Temperaturwert, eine kürzere für einen niedrigeren.

Der Temperatursensor erfasst kontinuierlich die Temperatur und wandelt diese dann in digitale Werte um. Basierend auf einem festgelegten Schema wird die Pulsbreite der PWM moduliert, um die Temperaturdaten zu übertragen.

Die modulierten PWM-Daten werden über eine geeignete Verbindung, z. B. eine elektrische Leitung ~~oder eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle~~, übertragen.

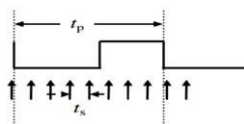


Abbildung 2 Ausgangssignal (PWM) des SMT172

Ein Empfänger, ~~der auf die gleiche PWM-Konfiguration eingestellt ist, kann diese Impulse empfangen und interpretieren.~~ Der Empfänger, der die PWM-Impulse empfängt, demoduliert die Daten, um den ursprünglichen Temperaturwert zu rekonstruieren. Dies geschieht durch Messung der Impulsbreiten und Umwandlung dieser Breiten in entsprechende Temperaturwerte auf der Grundlage des vordefinierten Modulationschemas.

Der Empfänger kann ein herkömmlicher Mikrocontroller (z.B. STM32F030F4P6, STM32G031F4P6TR) oder ein spezielles Messgerät sein. Der Temperatursensor erzeugt ein PWM-Signal, dessen Pulsbreite proportional zur gemessenen Temperatur ist. ~~Dieses Signal wird von einem Mikrocontroller oder einem anderen Auswertegerät erfasst.~~ Der Mikrocontroller misst die ~~Dauer des Impulses, d. h. die Impulsbreite~~, und speichert diesen Wert in einem Register oder einer Variablen. Anhand einer vorgegebenen Skala oder einer mathematischen Formel wird die Pulsbreite in eine Temperatur umgerechnet.

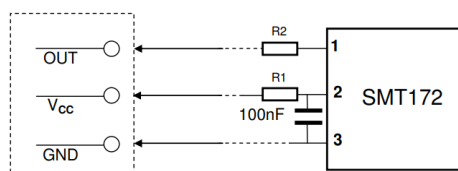


Abbildung 2: Anschluss für die Signalverarbeitung

Bei Temperatursensoren ist die Eigenerwärmung ein wichtiger Faktor, der die Genauigkeit von Temperaturmessungen beeinflussen kann. Wenn ein Temperatursensor elektrisch betrieben wird, kann die verbrauchte Energie Wärme erzeugen und somit die

Umgebungstemperatur verfälschen. Diese Eigenerwärmung kann, wie beim SMT172, durch sorgfältige Auswahl von Materialien, Design und Betriebsbedingungen minimiert werden. Bei hochpräzisen Anwendungen ist es entscheidend, die potenzielle Eigenerwärmung in Betracht zu ziehen und Kompensationsmethoden anzuwenden. Zudem ist beim SMT172 von Angst und Pfister die Eigenerwärmung vernachlässigbar, da der Aktivstrom minimal ist und die Wärmeabgebung an die Umgebung durch den mechanischen Aufbau maximal gewährleistet wird. Des Weiteren ist die Energie-Effizienz von $0.36 \mu\text{J}$ je Messung rekordverdächtig.

Kalibration auf Waferbasis

Die Wafer-Kalibrierung von Temperatursensoren erfolgt in mehreren Schritten, um einen exzellenten und höchst präzisen Sensor sicherzustellen:

Der Wafer wird in ein spezielles Testsystem eingebracht, das die elektrischen Eigenschaften jedes einzelnen Temperatursensors misst. Auf einem 6-Zoll Wafer sitzen in etwa 7000 Sensoren.

Die gemessenen elektrischen Signale werden mit bekannten Referenzwerten verglichen, um die Genauigkeit des Temperatursensors zu bestimmen. Werden Abweichungen festgestellt, werden entsprechende Korrekturfaktoren berechnet und auf den Temperatursensor angewendet.

Bei Raumtemperatur wird der Offset des Sensors festgestellt und durch Zener-Zapping ausgeglichen. Nach der Kalibrierung wird der Temperatursensor erneut getestet, um sicherzustellen, dass die Korrekturfaktoren die gewünschte Genauigkeit erreichen. Nach der Kalibrierung und Validierung wird der Wafer in einzelne Temperatursensoren geschnitten und zum Schutz vor äußeren Einflüssen in verschiedene Gehäusevarianten eingebettet. Die bekanntesten Gehäuse sind TO18, TO92, TO220 und SOT223.

Diese Wafer-basierte Kalibrierung ermöglicht eine hohe absolute Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Temperatursensoren, da sie in einem automatisierten Prozess durchgeführt wird und die einzelnen Sensoren auf dem Wafer unter ähnlichen Bedingungen hergestellt werden. Dadurch können Abweichungen zwischen den einzelnen Sensoren minimiert werden. Die Sensoren sind somit komplett kalibriert und abgeglichen. Auch nach dem Bestücken oder Montage in einer Sensorbaugruppe behalten die Sensoren die absolute Genauigkeit und müssen nicht nochmal abgeglichen werden.

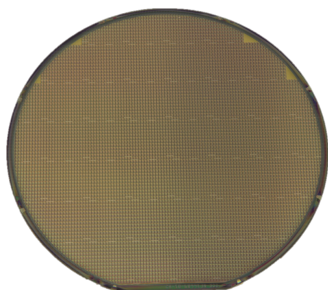


Abbildung 3: Wafer mit 7000 Temperatursensoren