

Selbsttestfähiger Temperatursensor mit SPI - Bus für selbststeuernde logistische Prozesse

Detmar Westphal, Rainer Laur

SFB637 – Teilprojekt B6

Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik (ITEM)
Universität Bremen, Otto-Hahn-Allee, Postfach 330440, D-28334 Bremen

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 637 "Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen" werden an der Universität Bremen im Teilprojekt B6 der Institute ITEM und IMSAS hierarchische, modulare Sensorknoten zur Unterstützung selbststeuernder logistischer Prozesse entwickelt. Im Folgenden wird hierzu ein über SPI – Bus ansprechbarer Temperatursensor mit Selbsttest vorgestellt. Die Realisierung des Selbsttest erfolgt hierbei auf Basis der Fenstermethode nach [Fis00].

1. Einleitung

Zur automatischen Entscheidungsfindung in selbststeuernden logistischen Prozessen werden Informationen über den Zustand der zu transportierenden Güter benötigt. Im Teilprojekt B6 wird hierzu ein hierarchisches, modulares und selbstkonfigurierendes Sensornetzwerk entwickelt, dessen Informationen lokal am Transportgut vorverarbeitet und an ein zentrales Auswertungs- und Steuerungssystem gesendet werden [SFB]. Zur Reduzierung der Wartungskosten und für eine einfache Handhabung ist das System in der Lage die modular anschließbaren Sensoren selbstständig entsprechend des automatisch über RFID erfaßten Transportgutes zu konfigurieren und in das Netzwerk einzubinden. Zur Gewährleistung dieser Aufgabe müssen fehlerhafte Informationen aufgrund defekter Sensoren selbstständig erkannt und durch eine Umkonfiguration des Netzes möglichst kompensiert werden. Ein manueller Eingriff in das System ist also lediglich zum Austausch defekter Systemkomponenten notwendig. Hierzu müssen die wiederverwendbaren Sensoren selbsttestfähig sein. Die Kommunikation der Sensoren mit ihren Auswertungsknoten erfolgt hierbei über einen SPI – Bus. Die Kommunikation der Knoten wird über eine verschlüsselte Funkschnittstelle realisiert. Zur Temperaturüberwachung wurde der im Folgenden vorgestellte Temperatursensor auf Basis eines Pt1000 Temperaturwiderstandes entwickelt und mit einem Selbsttest versehen.

2. Systembeschreibung des Sensors

Das Sensorsystem gemäß Abbildung 1 besteht aus einem μ -Controller mit 10Bit A/D – Wandler, einem 2 Kanal 12Bit D/A-Wandler, einem Instrumentenverstärker, einem Pt1000 Temperaturwiderstand und einem Referenzwiderstand. Der DAC Erzeugt über seinen Kanal B die Betriebsspannung für den Spannungsteiler, bestehend aus Pt1000 und dem Referenzwiderstand R zur Arbeitspunkteinstellung. Kanal A liefert die Referenzspannung zum Nullabgleich des Meßsystems. Die Ansteuerung des DAC erfolgt über den μ -Controller. Die Differenz der temperaturabhängigen Ausgangsspannung des Spannungsteilers und der Referenzspannung wird durch den Instrumentenverstärker verstärkt und über den A/D – Wandler des μ -Controllers digitalisiert. Die Software des μ -Controllers übernimmt die Filterung und Konvertierung des Temperatursignals, die Steuerung des DAC und die Kommunikation über den SPI – Bus.

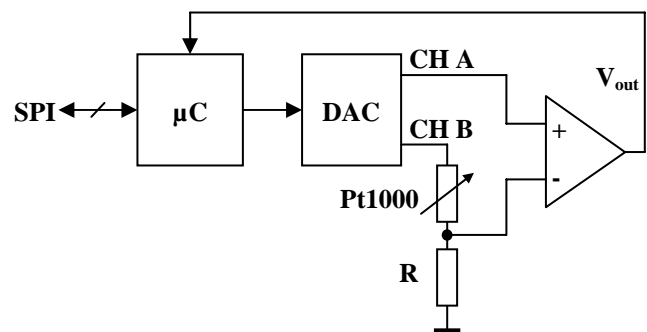


Abb. 1: Blockschaltbild Sensor

Die Verwendung des DAC bietet hierbei die Möglichkeit das System über die Software zu kalibrieren und bei Bedarf durch einen Ferneingriff über ein Softwareupdate den Meßbereich für die aktuelle Meßaufgabe anpassen zu können. Der erste Prototyp des Temperatursensorsystems wurde in SMD Bauweise mittels einer zweiseitig bestückten, 15mm x 23mm großen Platine realisiert. Der zur Erprobung eingestellte Meßbereich betrug 0°C bis 100°C.



Abb. 2: Prototyp Sensor

3. Fehlersimulation

Für die verwendeten kommerziellen Bauelemente des Systems standen keine Simulationsmodelle zur Verfügung. Daher wurde ein äquivalentes System mit Sensorbrücke und Instrumentenverstärker auf Transistorebene mit Modellen eines CMOS 0,7µm Prozesses [Alc98] zur Nachstellung der Schaltungsfunktion erstellt. Je Transistor wurden Open Gate, Open Drain / Source, sowie Kurzschlüsse zwischen Drain und Gate, Gate und Source und Drain und Source simuliert. Für die enthaltenen Widerstände wurden jeweils hoch- und niederohmige Fehler angenommen. Die im Instrumentenverstärker enthaltenen Operationsverstärker wurden hierbei als einfache Two-Stage-OPs ausgeführt. Die durchgeführten Fehlersimulationen wiesen hierbei ein auch für das reale System plausibles Verhalten auf. Zusammenfassend ergaben sich am Ausgang des Instrumentenverstärkers folgende Gruppen von direkten Defektverhalten, bzw. abschnittswisen Kombinationen aus diesen Gruppen.

1. Fehlerkennlinie nahe V_{dd} oder V_{ss} :

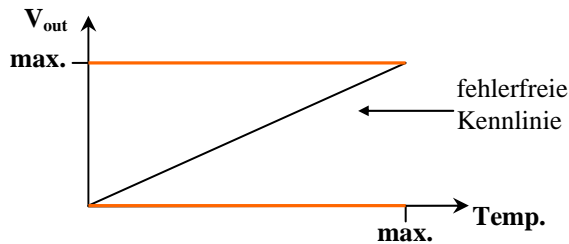


Abb. 3: Fehlergruppe 1

Dieses Verhalten ergab sich für 49 der simulierten Defekte.

2. Konstantes Ausgangssignal innerhalb des Arbeitsbereiches:

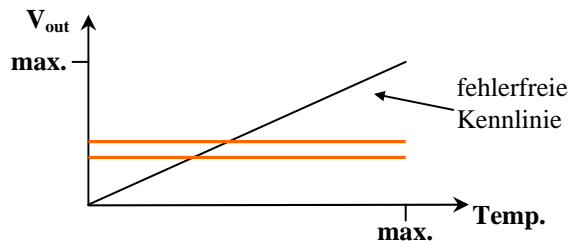


Abb. 4: Fehlergruppe 2

Dieses Verhalten ergab sich für 26 der simulierten Defekte.

3. Positiver oder negativer Offset:

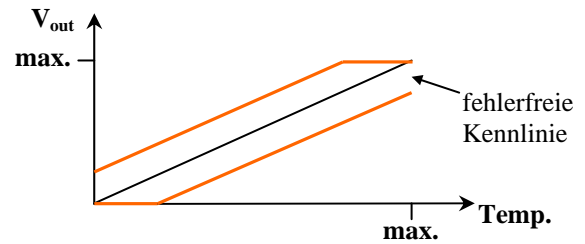


Abb. 5: Fehlergruppe 3

Dieses Verhalten ergab sich für 15 der simulierten Defekte.

4. Offset und Verstärkungsänderung:

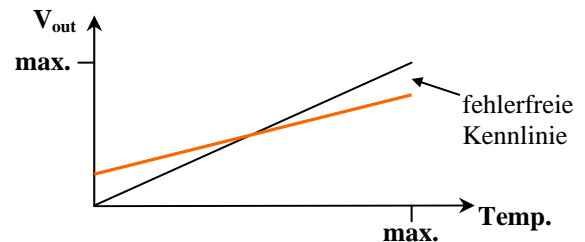


Abb. 6: Fehlergruppe 4

Dieses Verhalten ergab sich für 7 der simulierten Defekte.

5. Änderung der Verstärkung:

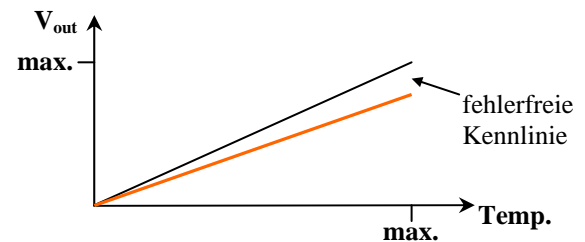


Abb. 7: Fehlergruppe 5

Dieses Verhalten ergab sich für 16 der simulierten Defekte.

Weitere 5 Fehlerkennlinien setzten sich abschnittsweise aus den oben genannten defektiven Verhaltensmustern zusammen. 105 der simulierten Defekt wiesen innerhalb des aufgrund der Fertigungstoleranzen der Bauteile resultierenden Toleranzbereiches um die ideale Kennlinie keine signifikanten Abweichungen auf. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um Open – Gate Defekte. Diese zeigen bei Simulationen mit vorgeschalteten hochohmigen Widerständen nur bei einem ausreichend hochfrequenten Verhalten am Gate Auswirkungen, was hier nicht dem typischen Betriebsverhalten der Schaltung entspricht. Für realistischere Open – Gate Simulationen sind technologische Randbedingungen bei der Fehlermodellierung zu berücksichtigen, die aufgrund der kommerziellen Bauelemente in der Schaltung nicht verfügbar waren.

4. Selbsttest

Zur Aufwands- und Leistungsoptimierung wurden Strategien für einen Selbsttest des Sensorsystems gesucht, die mit der vorhandenen Hardware realisierbar sind. Der Selbsttest wurde daher durch zusätzliche Software des μ -Controllers realisiert und wird in den im Folgenden beschriebenen drei Stufen durchgeführt:

1) Beim Auftreten der oben beschriebenen Defekte wird ein im Vergleich zum nominellen dynamischen Verhalten der Schaltung abrupter Signalwechsel an V_{out} angenommen. Zur Erkennung derartiger Fehler durch eine entsprechende Auswertungssoftware eignet sich die in [Fis00] vorgestellte Fenstermethode. Diese basiert auf der Annahme, daß aufgrund des Systems und dessen Spezifikationen nur eine eingeschränkte dynamische Änderung des Meßwertes zwischen zwei Testzyklen zulässig ist. Ändert sich das Signal an V_{out} aufgrund eines Defektes außerhalb dieses Toleranzbereiches, wird ein Fehlverhalten angezeigt. Hierzu wird die Differenz zwischen aktuellem Meßwert und dem, im vorhergehenden Testzyklus abgespeicherten, letzten Meßwert mit einer als zulässig geltenden Abweichungsgrenze verglichen, die ein Testfenster um den vorhergehenden Meßwert bildet. Dieses Verfahren kann online parallel zur eigentlichen Meßaufgabe durchgeführt werden, so daß die Meßaufgabe nicht unterbrochen werden muß. Im aktuellen System beträgt der Abstand zwischen zwei Bewertungszyklen 33ms. Die in dieser Zeit zulässige Änderung des Meßwertes wurde auf 16 Inkremente des 10Bit A/D-Wandlers festgelegt, was einer zulässigen Temperaturänderung von $\pm 1,6^\circ\text{C}$ um den vorhergehenden Meßwert entspricht. Wird eine größere Änderung festgestellt, gilt dies als Fehlverhalten. Die Bereichsgrenze wurde bei nomineller Funktion vorerst experimentell ermittelt.

2) Problematisch bei der Verwendung der Fenstermethode ist der Fall, daß sich der Meßwert in einem Bereich innerhalb des Testfensters nahe V_{dd} oder V_{ss} befindet und ein Defekt auftritt, der zu einem V_{out} nahe dieser Spannungen (Fehlergruppe 1) führt. Da das defektive Verhalten innerhalb der zulässigen Grenzen liegt und dort verharret, kann ein derartiger Fehler durch die Fenstermethode nicht erkannt werden. Zur Detektion eines derartigen Verhaltens wurde ein Bereich von 14 Inkrementen entsprechend $1,4^\circ\text{C}$ um V_{dd} und V_{ss} festgelegt, innerhalb dessen ein Meßwert als fehlerbehaftet bewertet wird. Die daraus resultierende Einschränkung des Meßbereiches wurde in diesem Fall hingenommen, ist aber über eine Umkonfiguration des DAC und einer daraus resultierenden Erweiterung des Meßbereiches kompensierbar. Die Überprüfung dieses V_{dd} / V_{ss} - Kriteriums kann als Ergänzung zur Fenstermethode ebenfalls online durchgeführt werden.

3) Weiterhin problematisch sind Fehlverhalten der Gruppen 2, 4 und 5. Diese können zwar in den überwiegenden Fällen durch die Fenstermethode erkannt werden, liegt jedoch der letzte fehlerfreie Meßwert, also der Bereich des Testfensters

nahe der fehlerbehafteten Kennlinie, so kann der Defekt analog zum Fehlverhalten nahe V_{dd} oder V_{ss} nicht erkannt werden, da sich keine unzulässige Änderung einstellt. Liegt also die Fehlerkennlinie innerhalb des Testfensters um den letzten fehlerfreien Arbeitspunkt, können diese Fehler durch die Fenstermethode nicht erkannt werden. Die Erkennung derartiger Fehlverhalten ist durch die Überprüfung der Schaltungsverstärkung des Systems möglich. Aufgrund des nicht vorhersehbaren aktuellen physikalischen Meßwertes muß hierbei der als unbekannt anzusehende Einfluß des Sensors kompensiert werden, um eine hiervon unabhängige Aussage über die Verstärkung treffen zu können. Ohne zusätzliche Hardware ist dies in drei Schritten möglich:

1. Schritt:

Zur Kompensation des aktuellen Arbeitspunktes des Pt1000 wird die Referenzspannung aus Kanal A des DAC auf die Spannung am negativen Eingang des Instrumentenverstärkers verschoben, so daß sich ein Nullabgleich von V_{out} ergibt. Die Verschiebung ergibt sich aus einer Rückrechnung der Spannungsdifferenz am Verstärkereingang aus dem aktuellen Meßwert und dem nominellen Verstärkungsfaktor unter Berücksichtigung der Inkrementstufen von A/D-Wandler und DAC.

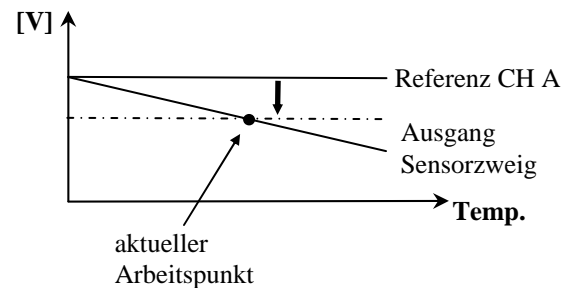


Abb. 8: Nullabgleich im Testbetrieb

2. Schritt:

Es wird überprüft, ob der Nullabgleich erfolgreich war, d.h. ob der nun am μ -Controller anliegende Meßwert in einem akzeptablen Toleranzbereich größer oder gleich Null ist. Dies ist zum einen der Fall, wenn die nominelle Verstärkung vorliegt mit der die vorhergehende Berechnung zum Nullabgleich durchgeführt wurde, aber auch, wenn die Verstärkung aufgrund eines Defektes größer als vorgesehen ist, da in diesem Fall anhand des nominellen Verstärkungsfaktors eine höhere Eingangsdifferenz berechnet wird als tatsächlich vorliegt (Abbildung 9). Dies führt beim obigen Nullabgleich ebenfalls zu einem Meßwert von Null hinter dem A/D-Wandler, da im vorliegenden System, mit ausschließlich positiver Versorgungsspannung, keine negativen Differenzen erkannt werden können. Daher wird die Referenzspannung an Kanal A des DAC anschließend um einen festen Wert angehoben, so daß sich ausgehend vom vorhergehenden Nullabgleich eine definierte Differenz an den

Instrumentenverstärkereingängen und somit eine entsprechend verstärkte Ausgangsspannung V_{out} einstellt.

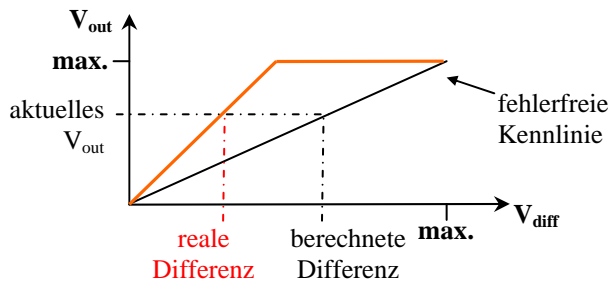


Abb. 9: Abweichung berechnete Differenzspannung

3. Schritt:

Es wird überprüft, ob sich der stimulierte Ausgangswert des Instrumentenverstärkers innerhalb eines zulässigen Toleranzbereiches um den erwarteten Wert befindet. Ist dies der Fall, sind die aktuelle Verstärkung des Systems und die Funktion des DAC korrekt, so daß die Referenzspannung an Kanal A des DAC wieder für den Meßbetrieb auf ihren nominellen Wert eingestellt werden kann.

Für diesen Verstärkungstest werden drei Testzyklen benötigt, so daß sich eine Dauer von ca. 100ms ergibt. Der Toleranzbereich für den Nullabgleich liegt beim vorliegenden Prototypen bei 30 Inkrementen des A/D-Wandlers und beim Verstärkungstest bei ± 32 Inkrementen. Dies ergibt sich aus den nichtidealen Schaltungseigenschaften, dem Restauschen des Systems und begrenzten Schwankungen der Temperatur während des Testzeitraums. Letztere müssen einbezogen werden, da der Einfluß des Temperatursensors beim Nullabgleich nicht entkoppelt, sondern nur dessen Einfluß nichtideal kompensiert wird. Die Annahme eines nahezu konstanten physikalischen Meßwertes ist also eine Grundvoraussetzung bei dieser Vorgehensweise und beeinflusst die Genauigkeit des Verfahrens. Da das System für diesen Test, abweichend von seinem nominellen Arbeitspunkt, umkonfiguriert werden muß, wird der letzte gültige Meßwert vor dem Test abgespeichert und während des Tests weiterhin ausgegeben. Aufgrund der Offlineschaltung des Systems während dieser Teststufe und des erhöhten Leistungsbedarfs durch die Testaktivität, wird diese Teststufe zur Abdeckung von Worst – Case – Fällen nur in Minutenabständen oder im späteren Gesamtsystem bei Anforderung durch die übergeordnete Hierarchieebene ausgeführt. Die Fenstermethode ist unter der Berücksichtigung der zeitlichen, physikalischen und Schaltungstechnischen Randbedingungen zwar genauer als der Verstärkungstest, erkennt aber lediglich Fehler im Betrieb des Systems. Der Offline - Verstärkungstest dient also ebenfalls zur Initialisierung der Fenstermethode nach dem Einschalten und muß zumindest einmal nach dem Einschaltvorgang ausgeführt werden.

5. Testaufwand

Für den implementierten Selbsttest wird die zur Erfüllung der spezifizierten Meßaufgabe benötigte Hardware mitgenutzt, d.h. es ist keine zusätzliche Hardware für den Selbsttest notwendig. Der verwendete μ -Controller besitzt ein Flash Memory von 2Kbyte für Programmcode. Die bisher implementierte Software zur Gewährleistung der Grundfunktionen benötigt hiervon 310 Byte. Der zusätzliche Aufwand für den Selbsttest beträgt weitere 246 Byte.

6. Zusammenfassung

Das vorliegende Temperatursensorsystem erfüllt die anwendungsspezifischen Spezifikationen bezüglich Temperaturmessung und Konfigurierbarkeit. Weiterhin wurde ein Selbsttest auf Basis der Fenstermethode implementiert. Zur Abdeckung der anhand von Fehler-simulationen ermittelten Sonderfälle wurden zwei weitere Teststrategien hinzugefügt. Hierbei werden die Fenstermethode und der Test zur Überprüfung auf Einhaltung des Arbeitsbereiches zwischen V_{dd} und V_{ss} , online parallel zur eigentlichen Meßaufgabe ausgeführt, ohne diese zu beeinflussen. Das Verfahren zur Überprüfung der Schaltungsverstärkung bedingt Eingriffe in die Meßkonfiguration und wird daher nur in größeren Zeitintervallen, auf Anforderung durch die übergeordnete Systemhierarchie oder zur Initialisierung ausgeführt. Experimentelle Versuche am vorliegenden Prototypen haben die Funktionsfähigkeit des Selbsttests gezeigt. Eingriffe in das System, z.B. Kurzschluß des Pt1000, Verstärkungsänderungen oder von außen stimulierte Änderungen von V_{out} wurden schon durch die Fenstermethode erkannt. Die zu Versuchszwecken ausschließliche Verwendung des Verstärkungstests erkannte ebenfalls die hierzu provozierten Fehler. Zur Gewährleistung der Meßaufgabe sind bei der Einstellung der Testkriterien und –grenzen die nichtidealen Eigenschaften der realen Schaltung zu berücksichtigen gewesen. Diese wurden so ausgelegt, daß eine sprungförmige Temperaturänderung am Sensor aufgrund der Fenstermethode zu keinem Fehlalarm führt, Änderungen aufgrund von Defekten aber möglichst effektiv erkannt werden.

7. Literatur

- [SFB] Homepage des SFB637, www.sfb637.uni-bremen.de
- [Fis00] M. Fischell, D. Westphal, W. Anheier, "Neuer Ansatz zum Selbsttest integrierter Sensoren in der Betriebsphase", ITG-GMM Workshop Mikroelektronik für die Informationstechnik, Darmstadt, 20.-21.November 2000
- [Alc98] Alcatel Microelectronics, "Spice Models for C07MA and C07MD – DS13296 Rev. 03", 26.10.1998