

HoTSens

an ASIC for extremely precise measurement
at 300°C to support industrial efficiency



Device measurements for an ASIC that has put an IMMS method into practice for extremely precise measurements in very hot environments. Photograph: IMMS.

Objectives and overview

In the HoTSens project, integrated sensors and electronics have been developed as a system solution, which will measure pressure and temperature with deviation of less than 2% either way when the ambient temperature is as high as 300°C. This is sensor technology which is vital in industrial situations where data must be captured despite extraordinarily high ambient temperatures.

No specialised ASICs (application-specific integrated circuits) have so far been available for use at operating temperatures above 225°C. To enable today's increasingly complex machinery and equipment to be operated safely with the highest possible efficiency in use of resources and energy, the state of each device and process needs to be monitored at many points simultaneously, fast and accurately. The nearer to the process is any sensor and signal-evaluating equipment, the less interference there will be, and the more exactly can the signals be registered and processed. However, bringing such a system closer to the process means that it will need to withstand ever higher temperatures.

*More on the
HoTSens project:
www.imms.de*

The new module has high-temperature electronics integrated into it. The resulting sensor system will amplify and calibrate the primary signals from a combined pressure and temperature sensor in such a way that any potential errors in the pressure signal are ironed out.

IMMS has developed high-temperature ASICs with time-coded signals and adjustment algorithms for precise measurements and has tested and characterised them. For the purpose, a new test setup was first designed and made, then successfully tested. It has an integrated cooling system to enable full semi-automatic wafer testing up to 300 °C. Second, a high-precision substitute bridge circuit has been designed, then constructed and successfully used for the characterisation.

The IMMS solution in detail: Analogue or digital? Better both.

The problem: high impact of heat and tiny measurement signals

The chip is subject to particularly taxing demands if it is in a high-temperature environment. Use of analogue circuits is restricted in such cases, as they may react strongly to heat. The properties of the chip material can alter greatly as the temperature rises, with resulting changes to the properties of the circuit. In turn, the measuring system would become inaccurate or suffer irreversible damage. The signals from the Wheatstone bridge used for measurements in the new combined pressure and temperature sensor are tiny: only between 0 and 10 mV. Heat will have a particularly strong effect because errors like those associated with the offset for the input may well exceed these values.

To compensate completely for this effect involves a huge amount of effort as further compensation is needed for the correction circuits themselves. It is customary to employ an ADC (analog-to-digital converter) to enable the data to be processed digitally. However, under the present requirement of accuracy at $\pm 2\%$ in relation to the maximum value, not even this method will be successful. Yet another difficulty is that the necessary digital circuits would require a very large chip area and complex corrective algorithms.

Remedy: signals time-coded, computation for corrections

To address the issues, IMMS brought in a new design concept based on time-coded signals (see Fig. 1). The input stage is analogue; the input signal is converted to a current that is switched ON and OFF by a PWM (pulse width modulation) and is thus binary, alternating between only two values, as would be the case with a digital signal.

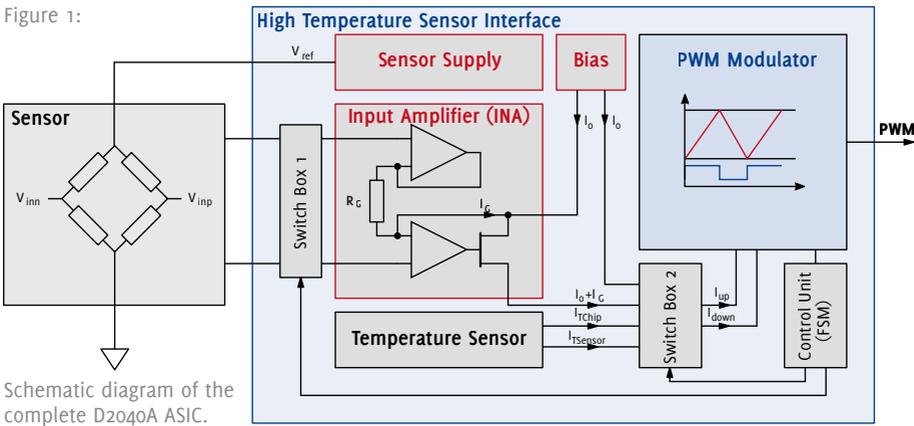
Article on

wafer testing

up to 300 °C at

www.imms.de.

Figure 1:



Schematic diagram of the complete D2040A ASIC.

Areas exposed to especially strong temperature effects are marked in red. Diagram: IMMS.

Fig. 2 demonstrates the principle: by charging and discharging a capacity using a current source, it is possible to convert a constant current into timed intervals. The signals at the output are easy to measure using a commercially available MCU (microcontroller unit), for instance. There is no need for an ADC. This is the current state of the art, and yet it is very hard to keep under control when the temperature ranges above 250°C, which is the aim here: the highlighted areas in Figure 1 are still very much influenced by temperature, and the signal alterations due to this may well be as great as the input signal itself: i.e. the offset in the input stage – the error – can lie in a range extending to ±10 mV, which is also the range of the tiny signals from the Wheatstone bridge, again between 0 and 10 mV, on which the measurements depend. In addition, at temperatures above 250°C the external resistance will alter with temperature change in a non-linear fashion, as does that of the internal reference material. As a consequence, even the supply voltage to the Wheatstone bridge (V_{REF}) varies with the temperature. To compensate for these effects is an inexact science in this temperature range, and a huge computing task at that.

IMMS has taken the PWM procedure described above and extended it so that it is possible to remove from the measured value those elements which reflect temperature and ageing (offset, span, for instance) by simple corrective computation. Two additional measurements are carried out to log current values for the temperature-dependent elements and are taken into account

Figure 2: Time coding as shown here, using the time-coding principle developed by IMMS, has enabled tiny signals (o...10mV) to be converted into exact measurements at very high temperatures.

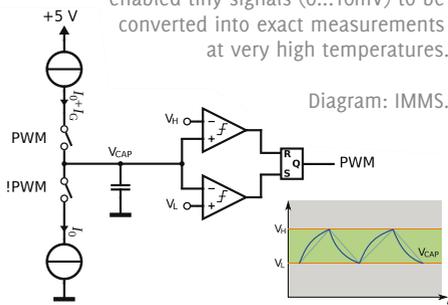


Diagram: IMMS.

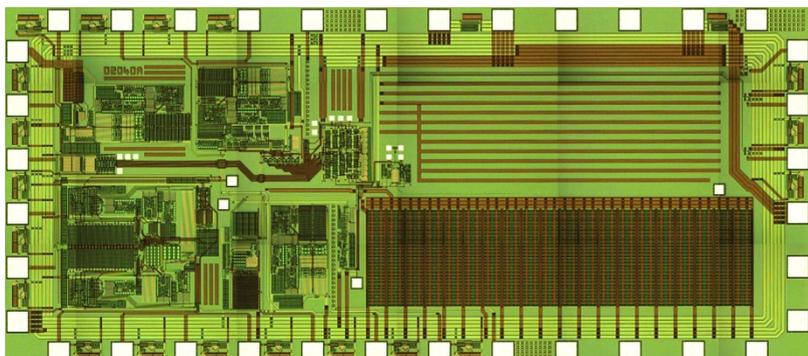


Figure 3: The D2040A chip has been fabricated with the new principle integrated into it. Photograph: IMMS.

before the measured value is shown on screen. This computation achieves the compensation because the PWM is designed with appropriately staggered phases.

Does it really work? Planning the characterisation

High-precision substitute bridge circuit and high-resolution temperature grid

It was necessary to construct a special measuring station to characterise the D2040A. For these purposes, a highly accurate substitute bridge circuit was needed because the input signal is so low at 0...10 mV and is itself produced by a Wheatstone bridge. To enable the chip behaviour at these temperatures to be evaluated, this substitute circuit is heated to 300 °C in a holder sustaining high temperatures. The temperature is decreased very slowly in the cooling process; meanwhile a measurement program is carried out and the data acquired is saved as a time-related heat transfer graph together with the current temperature. By this means it is possible to use a high-resolution temperature grid to establish the offset and amplification values.

These values are then processed as follows. The full-scale deflection is standardised as 1 to provide comparability. Then the offset and amplification are established across the range of temperature and represented in a graphic like that in Figure 3.

An accurate measuring ASIC in heat up to 300 °C

The measurements show impressive accuracy across the whole range of temperature. After correction for linear temperature dependence, the residual error is $\pm 1.5\%$ FS (where FS is the full-scale deflection). This residual error accords with an input offset of $\pm 150 \mu\text{V}$ – meaning that the input offset (originally up to $\pm 10 \text{mV}$) has been reduced a hundredfold or so. The method also disposes of the temperature drift almost entirely. Systems previously available have only been able to operate with

More about testing and characterisation: www.imms.de.

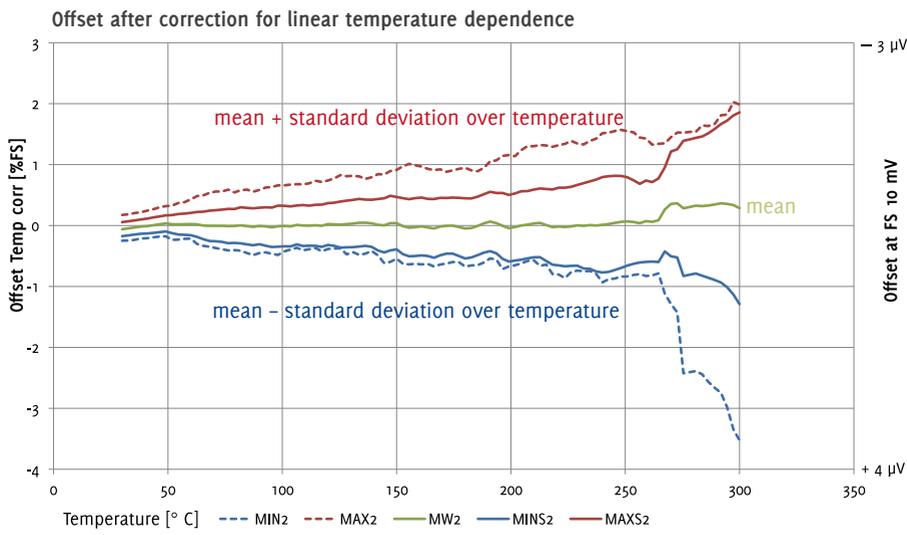


Figure 4: Measurements at accuracy of $\pm 1.5\%$ FS (FS being full scale). Diagram: IMMS.

this tiny degree of error if high-quality components were being analysed. Five chips were used in the measurement program.

Resistance to ageing at 300°C was also evaluated. After 100 hours of constant use in the hot environment, the chip was still coming up to expectations. It will be necessary to carry out a further series of measurements to determine ageing behaviour before the average life of the chip can be established.

Future prospects

The concept newly developed by IMMS to enable very precise readings to be taken from Wheatstone bridges has been built into an ASIC and its efficacy convincingly demonstrated in a high-temperature environment. This prototype provides around 10 – 20 measurements per second and it is thought that it will be possible to raise this rate by a factor of at least 10 on successor chips. The first ASIC created is currently undergoing further examination. A demonstrator is being created which will be available in the course of 2017. It will also be possible to transfer the principles to other technologies where use of an analogue to digital converter is prohibited for cost or other reasons.

More on the
HoTSens project:
www.imms.de

Contact person: Georg Gläser, M.Sc., georg.glaeser@imms.de

SPONSORED BY THE



The HoTSens project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research in the IKT 2020 programme under the reference 16ES0008.

served. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

HoTSens

ASIC für hochgenaue Messungen bei 300°C
für effizientere Industrieanwendungen



Device-Messungen für einen ASIC, mit dem ein am IMMS entwickeltes Konzept für hochpräzise Messungen in Hochtemperatureumgebungen realisiert wurde. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Im Projekt HoTSens wurde eine integrierte Systemlösung für Sensorik und Elektronik entwickelt. Diese misst bei hohen Umgebungstemperaturen von bis zu 300 °C sehr genau Druck und Temperatur mit Abweichungen kleiner +/- 2%. Solche Sensorik ist dort erforderlich, wo unter außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen in Industrieanlagen und Maschinen Daten erfasst werden müssen.

Bislang sind spezielle, für den Hochtemperatureinsatz ausgelegte integrierte Mikroelektronikschaltungen (ASICs) für eine maximale Betriebstemperatur von bis zu 225 °C erhältlich. Um zunehmend komplexer werdende Maschinen und Anlagen sicher und mit höchstmöglicher Ressourcen- und Energieeffizienz betreiben zu können, müssen die Maschinen- und Prozesszustände schnell, präzise und an vielen Stellen gleichzeitig erfasst werden. Je näher sich ein System aus Sensoren und Auswertungs-elektronik am Prozess befindet, desto störungsärmer und genauer können Signale erfasst und verarbeitet werden. Soll ein solches System jedoch näher zum Prozess vordringen, muss es immer höheren Temperaturen standhalten.

*Mehr zu
HoTSens unter
www.imms.de*

Das neue Sensorsystemmodul mit integrierter Hochtemperaturelektronik verstärkt und kalibriert die primären Signale eines kombinierten Druck- und Temperatursensors, um mögliche Fehler des Drucksignals ausgleichen zu können.

> *Smarte Jacke*

> *ENTOMATIC*

> *KOSERNA*

Das IMMS hat Hochtemperatur-ASICs mit zeitkodierter Signalverarbeitung und Korrekturrechnungen für das System entwickelt, die ASICs getestet und charakterisiert. Hierfür hat das Institut zum einen ein Test-Setup mit integrierter Kühlung für einen kompletten halbautomatischen Wafertest bis 300°C und zum anderen eine hochpräzise Brückenersatzschaltung entwickelt, aufgebaut und erfolgreich eingesetzt.

> *HoTSens*

> *INSPECT*

> *AFIA*

> *Inhalt*

* *Förderung*

Die Lösung im Detail: Analog oder Digital? Die Wahrheit liegt in der Mitte.

Problem: Große Temperatureinflüsse und kleine Messsignale

Gerade in Hochtemperaturumgebungen ergeben sich spezielle Herausforderungen an den Entwurf des Chips. Analogschaltungen sind nur bedingt einsetzbar, da sie zum Teil stark durch die Temperatur beeinflusst werden. Da sich die Materialeigenschaften des Chips über der Temperatur stark verändern können, kommt es folglich zu Abweichungen der Schaltungseigenschaften. Das Messsystem würde dadurch ungenau oder sogar irreversibel geschädigt.

Die Wheatstone-Messbrücke im genannten kombinierten Druck- und Temperatursensor gibt ein kleines Messsignal von 0...10mV aus. Hier wirken sich Temperatureinflüsse besonders stark aus, weil in der Regel Fehler, wie z.B. Eingangs-Offsets, diese Werte bereits übersteigen können. Diese Einflüsse vollständig durch Abgleichen zu korrigieren, ist extrem aufwendig, da auch die Korrekturschaltungen neue Abgleichmaßnahmen erfordern. Üblicherweise wird hier ein Analog/Digital-Wandler eingesetzt, um die weitere Verarbeitung digital vorzunehmen – auch das ist in diesem Umfeld nicht mit der geforderten, hohen Genauigkeit von +/- 2% Abweichung bezogen auf den Maximalwert möglich. Zudem würden die benötigten digitalen Schaltungen eine sehr große Chipfläche und komplexe Korrekturalgorithmen erfordern.

Lösung: Zeitkodierte Signale und Korrekturrechnungen

Deshalb wurde am IMMS ein neues Konzept auf der Grundlage zeitkodierter Signale erarbeitet (siehe Abbildung 1). Eine analoge Eingangsstufe wandelt das Eingangssignal in einen Strom um, der von einem Pulsweitenmodulator (PWM) ein- und ausgeschaltet wird und somit wie ein Digitalsignal nur zwei Werte annimmt. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2 dargestellt: Durch Laden und Entladen einer Kapazität mit einer Strom-

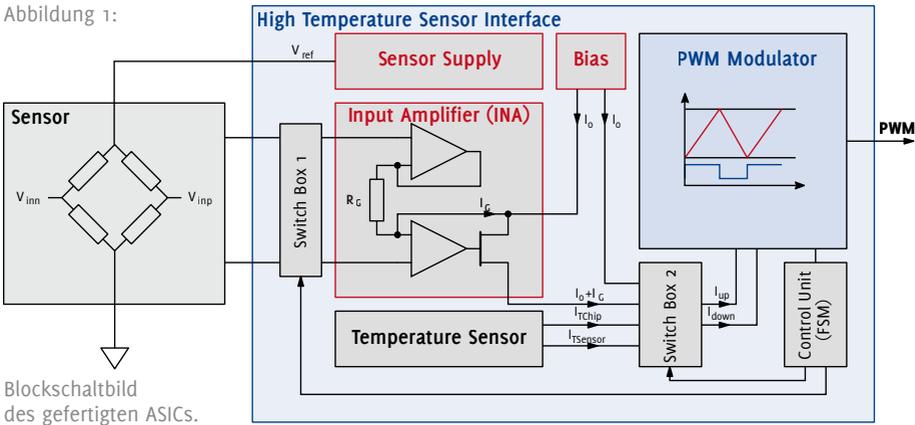
Fachartikel

zum Wafertest

bis 300°C auf

www.imms.de.

Abbildung 1:



Blockschaltbild des gefertigten ASICs.

Bereiche, die besonders hohen Temperatureinflüssen unterliegen, sind rot markiert Grafik: IMMS.

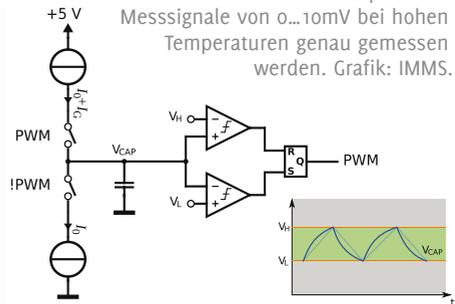
- > Smarte Jacke
- > ENTOMATIC
- > KOSENA
- > HoTSens
- > INSPECT
- > AFIA
- > Inhalt
- * Förderung

quelle kann ein konstanter Strom in Zeitabstände umgewandelt werden. Diese lassen sich am Ausgang einfach mit z.B. einem handelsüblichen Mikrocontroller messen, ohne einen Analog/Digital-Wandler zu verwenden. Diese Lösung ist Stand der Technik und im anvisierten Temperaturbereich > 250°C nur schwer zu beherrschen: Die in Abbildung 1 eingefärbten Blöcke beinhalten nach wie vor Temperaturabhängigkeiten. Die allein hieraus resultierenden Signaländerungen können die Größenordnung des Messsignals annehmen. Der Offset der Eingangsstufe, also der Fehler, liegt dann im Bereich von bis zu ± 10 mV und ist damit so groß wie das Brückensignal von 0 bis 10 mV, das gemessen werden soll. Zusätzlich sind die externen Widerstände bei hohen Temperaturen ab 250°C ebenso nichtlinear temperaturabhängig wie die interne Referenzquelle. Damit ist selbst die Brückenversorgungsspannung (V_{REF}) temperaturabhängig. Die rechnerische Kompensation dieser Effekte ist in diesem großen Temperaturbereich nur näherungsweise und mit großem Aufwand möglich.

Mehr zum Entwicklungsangebot des IMMS für ASICs: www.imms.de/ ASICs.

Am IMMS wurde das oben beschriebene PWM-Verfahren deshalb so erweitert, dass temperatur- und alterungsabhängige Größen, wie z.B. Offset und Übertragungsfaktor bzw. Span, durch eine Korrekturrechnung aus dem Messwert entfernt werden können: Durch zwei zusätzliche Messungen werden die aktuellen Werte der temperaturabhängigen Größen mitgeführt und am Lesegerät mit dem Messwert verrechnet. In der Rechnung kompensieren sich die temperaturabhängigen Terme durch geeignete Konstruktion des PWM-Phasenschemas.

Abbildung 2: Dank einer Zeitkodierung wie hier können mit dem darauf basierenden, vom IMMS entwickelten neuen Konzept kleine Messsignale von 0...10mV bei hohen Temperaturen genau gemessen werden. Grafik: IMMS.



© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Veröffentlichung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

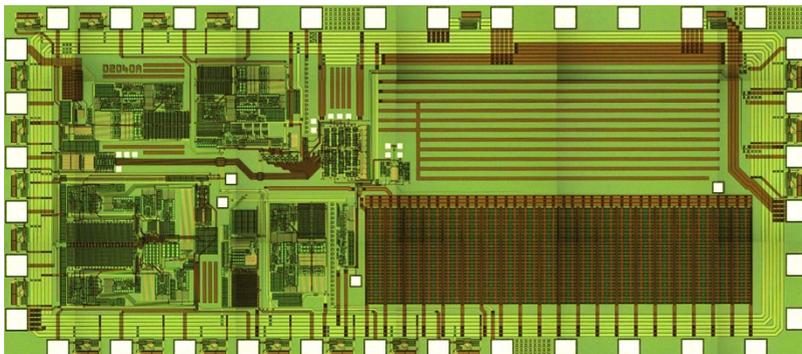


Abbildung 3: Das neue Konzept wurde im Chip D2040A integriert und gefertigt. Foto: IMMS.

Funktioniert es tatsächlich? Ein Charakterisierungskonzept

Hochpräzise Brückenersatzschaltung und hochaufgelöstes Temperaturnaster

Für die Charakterisierung des ASICs D2040A musste ein spezieller Messaufbau entwickelt werden. Da das Eingangssignal im Bereich von 0 bis 10 mV liegt und von einer Messbrücke erzeugt wird, musste hierfür eine hochpräzise Brückenersatzschaltung für die Charakterisierung entworfen werden. Um die Temperatureigenschaften des Chips bewerten zu können, wird er in einer Hochtemperaturfassung auf bis zu 300 °C aufgeheizt. Während des sehr langsamen Abkühlungsprozesses wird ein Messprogramm ausgeführt, das die aktuelle Übertragungscharakteristik ermittelt und zusammen mit dem Temperaturwert abspeichert. So werden die Werte für Offset und Verstärkung mit hochaufgelöstem Temperaturnaster ermittelt.

Die gewonnenen Werte werden wie folgt nachbearbeitet: Der Vollausschlag wird auf 1 normiert, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Daraufhin werden Offset und Verstärkung über der Temperatur ermittelt und in einer Grafik wie z.B. Abbildung 4 dargestellt.

ASIC misst bis 300°C hochgenau

Die Messungen zeigen eine herausragende Genauigkeit im gesamten Temperaturbereich. Nach Korrektur der linearen Temperaturabhängigkeit liegt der verbleibende Fehler bei $\pm 1,5\%$ FS (bezogen auf den Vollausschlag von 10 mV). Das entspricht einem Eingangs-Offset von $\pm 150\ \mu\text{V}$: Der Offset der Eingangsstufe von bis zu $\pm 10\ \text{mV}$ wurde durch das neue Verfahren um etwa den Faktor 100 verringert. Auch die Temperaturdrift ist nahezu vollständig entfernt. Bei herkömmlichen Systemen kann ein so geringer Fehler nur durch Auslese guter Bauelemente erreicht werden. Für die Messungen wurden fünf Chips verwendet.

Mehr zu Test und Charakterisierung auf www.imms.de.

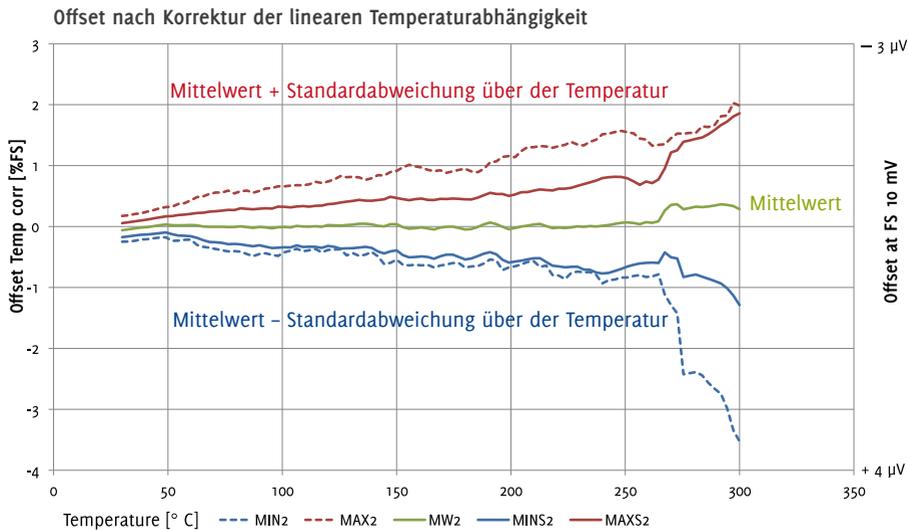


Abbildung 4: Messungen mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\%$ FS bezogen auf den Vollausschlag.
Grafik: IMMS.

Neben der Charakteristik wurde die Alterungsbeständigkeit bei 300°C evaluiert. Der Chip funktionierte nach 100 Stunden Dauerbetrieb in dieser Umgebung wie erwartet. Weitere Messungen zur Charakterisierung des Alterungsverhaltens sind notwendig, um die durchschnittliche Lebensdauer zu ermitteln.

Ausblick

Das neue, am IMMS entwickelte Konzept zum hochpräzisen Auslesen von Messbrücken wurde in einem ASIC integriert und mit herausragender Performance in einer Hochtemperaturumgebung demonstriert. Dieser Prototyp liefert etwa 10 bis 20 Messwerte pro Sekunde, was in einem möglichen Nachfolgechip um mindestens das zehnfache gesteigert werden kann. Der erste realisierte ASIC wird derzeit weiter evaluiert. Ein Demonstrator ist in Arbeit und wird im Laufe 2017 zur Verfügung stehen. Zudem kann das Konzept in andere Technologien übertragen werden, wo der Einsatz eines Analog/Digital-Wandlers zu kostspielig oder aus anderen Gründen ungünstig wäre.

Kontakt: Georg Gläser, M.Sc., georg.glaeser@imms.de

Mehr zu

HoTSens unter

www.imms.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Projekt HoTSens wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ unter den Kennzeichen 16ES0008 gefördert.