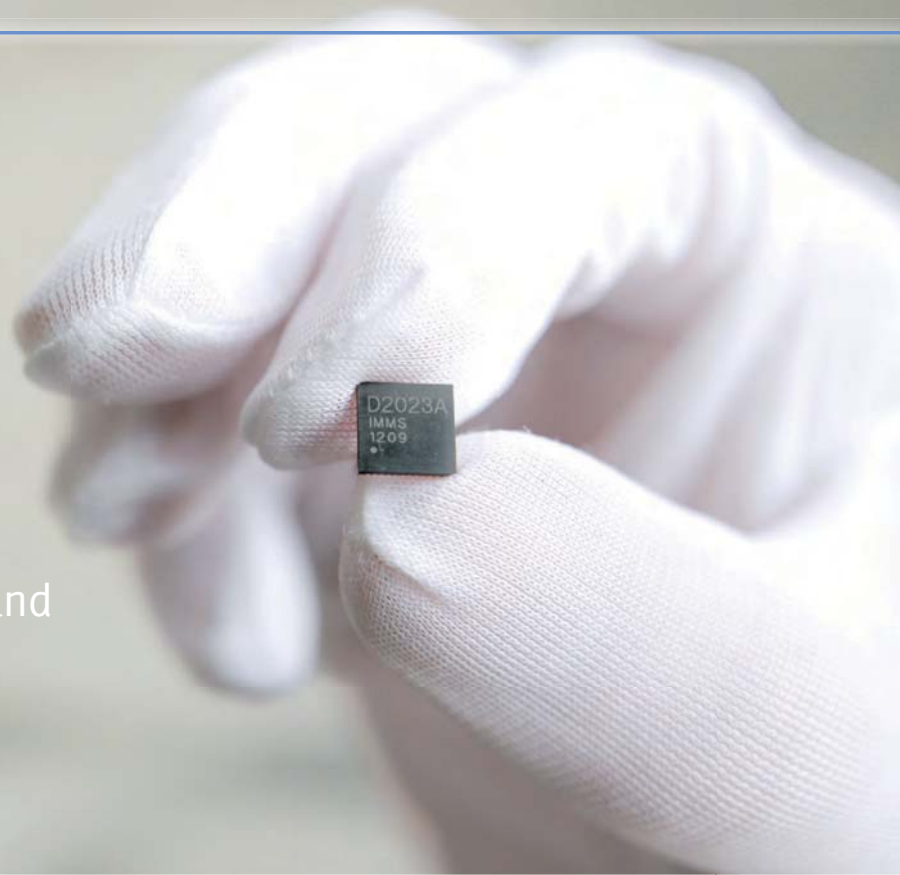


Thermulab

A high-temperature sensor system for greater energy efficiency in gas-fired power stations and combustion engines



Microchip with an operating temperature of up to 150°C, developed by IMMS as part of the “Thermulab” project. Photograph: IMMS.

Why is it needed?

To achieve high thermodynamic efficiency in gas power stations or combustion engines, the working temperatures are raised almost to the thermal limit of the materials contained in the equipment, reaching up to 1200°C, so that highly accurate measurement of the temperature at various points is required to avoid breaching of that limit. To date, the need has been for sensors with long, extremely well-protected cables leading to the evaluation unit. This unit with its data-processing electronics has had to be kept at a distance which would ensure it never reached a temperature above 100°C.

With their armature, the cables from the sensors were thus extremely heavy and resource-intensive. In the state of the art, it was also customary to use printed circuit cards with several discrete components for the evaluation technology. The aim of the current project has, therefore, been to shrink the data-processing equipment and to integrate it directly into the sensor component, with no cable at all. This necessitates evaluation electronics that work accurately at temperatures up to 150°C. In the context of the Thüringen “Thermulab” research project, IMMS has thus developed an ASIC for a compact intelligent high-temperature sensor system. “Thermulab” stands for the German for thermodynamic multi-sensor technology

to monitor high-temperature processes, particularly in exhaust ducts. The ASIC replaces several discrete components with one integrated circuit, offering better performance, greater robustness and more accurate measurement. Networking is simplified by the use of a digital data bus which, also, because there are fewer cables means lighter weight and lower cost. The data from the sensors can be processed on a distributed basis, significantly improving energy efficiency. Sensor merging and data compression achieve much lower data rates, again resulting in lower energy consumption.

What does the microchip do in particular?

In view of the high number and great complexity of elements composing the integrated microchip, its highly accurate analogue components and its relatively large digital section with microcontroller and memory blocks, plus the operating temperature up to 150°C, IMMS found it necessary to take new design routes and new measurement technology as a means of characterisation. The greatly extended temperature range is at present met by no commercially available circuit solutions. The standard to date has been cir-



IMMS

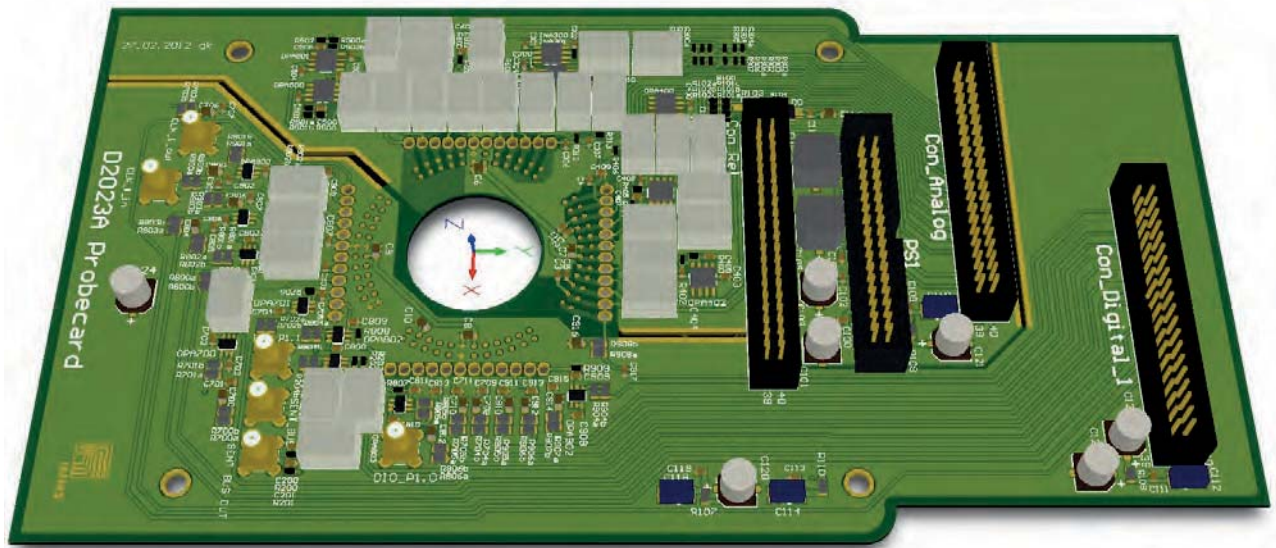


Fig. 1: Layout of the testing card shown as 3D image. Graph: IMMS, Industrial Electronics and Measurement Technology.

circuits functioning at up to 125°C. The IMMS microchip, operating at 150°C, will support temperature measurements with a thermocouple to an accuracy tolerance of 1°C in the range from -40°C to 1200°C.

There is, however, a disadvantage to thermocouples: the voltage emitted is tiny, around 50µV/K. To calculate a temperature from this voltage, a reference temperature is also necessary. To meet the challenge, IMMS has developed electronics which evaluate very tiny voltage differences, almost without potential, and will exactly determine the temperature at the reference point. The result is an ASIC which amplifies these temperature signals with low noise and then converts them into digital information by means of a suitable ADC. The digital element of the chip analyses the data from the sensor and transmits it in corrected form as a serial data stream. Two PWMs (pulse-width modulated outputs) or one SENT with a driver stage are the means of analysis and streaming. SENT stands for single-edge nibble transmission bus and is an interface used in automotive engineering to transmit data between the sensor and the control device.

Why did the test setup have to be so complicated?

The complex demands on the microchip – wide temperature range, large digital blocks and highly accurate analogue components – involved great effort for the test setup. It was the most comprehensive and complex setup yet undertaken by the Institute.

IMMS verified and characterised the microchip at the stage when it was on the semiconductor wafer. The testing card necessarily uses a “needle spider” to contact the bond islands on the chip and itself contains the test circuit. The research group created the circuit diagram, simulated the circuit, designed the layout and constructed the PCB in four layers. Among the items contained on the PCB are connections to the testing system and 30 relays to put the specified tests into practice (see Fig. 1). Investigation and testing of the finished (testing) card were carried out (see Fig. 2). To enable components to be tested with the same setup after the test had been run on the wafer, the testing card was provided with a slot for the chip socket.

The tests of the microchip were run on the IMMS MTS-1 modular system normally used for semiconductor testing. This test system, developed at the Institute, comprises chassis, controller and tester instruments which fulfil the PXI standard. Seven different PXI testers were necessary for the “Thermulab” testing. PXI stands for PCI eXtensions for Instrumentation. Among the instruments were a high-resolution digital multimeter to measure current and voltage precisely, a digital generator/analyser to produce and measure digital signals, and a digitiser capable of acquiring data from rapid signals. To generate and determine the analogue and digital direct voltages, two PMUs (parametrical measuring units) developed by IMMS specially for the purpose were used. The PXI cards were wired up using custom terminal modules (see Fig. 3) which route the resources of the PXI test instruments to the DUT connections on the testing card (DUT: device under test). The connection of the testing card is to the port module.

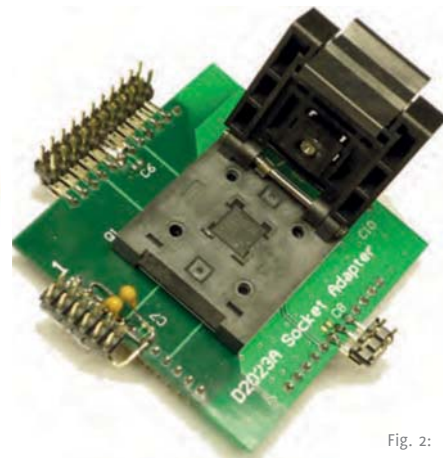
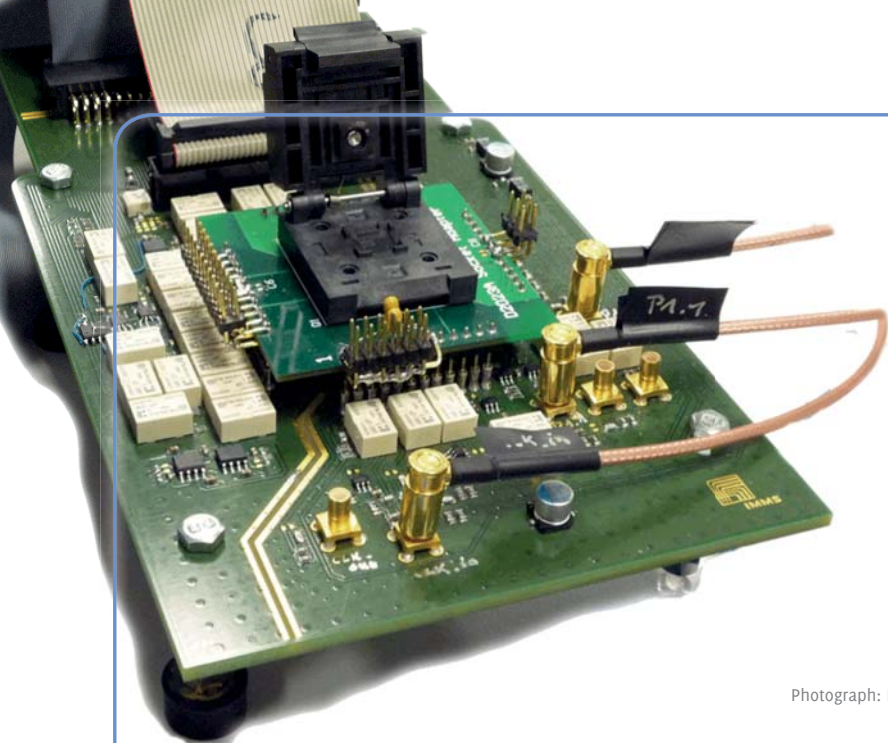


Fig. 2:
Testing card
to test the “Thermulab” chip (l.)
and housing plus microchip on the adapter board (r.)
Photograph: IMMS, Industrial Electronics and Measurement Technology

To achieve extremely accurate testing of all the important parameters within fractions of a second, comprehensive measuring procedures were created for the wafer test using the graphic programming environment LabVIEW®. The vital parameters included the power consumption of the circuit and the currents generated within the chip. Temperatures were measured at both the reference point and the thermocouple. The reference voltage source integrated into the microchip (specially developed for the purpose by IMMS) supplies stable voltage across the temperature range from -40°C to 150°C. There were further tests, those on the automatic error recognition, memory and microcontroller functions.

To characterise the circuit, the Institute examined the ICs extremely thoroughly, calibrating the reference voltage source in the process and making certain settings. As a check, IMMS heated the circuit gently in steps of 10°C from -40°C up to 150°C and measured all the parameters in relation to the reference voltage source at each stage. These results make it possible to calibrate the ICs as early as on the wafer prober.

By way of conclusion, the Institute adapted the necessary application software to prepare it for later use. This involved offset compensation and averaging to increase the accuracy of the IC. The error recognition system internal to the ASIC warns of errors in the application, such as a broken cable or missing sensor.

What of the future?

It will be possible to achieve further optimisation of the microchip area if a number of test pins are saved and the memory is reduced to half its present size. It may also be possible in future to integrate more external components into the sensor IC. The redesign of the “Thermulab” chip currently taking place is expected to improve even on the accuracy so far achieved.

Bibliography:

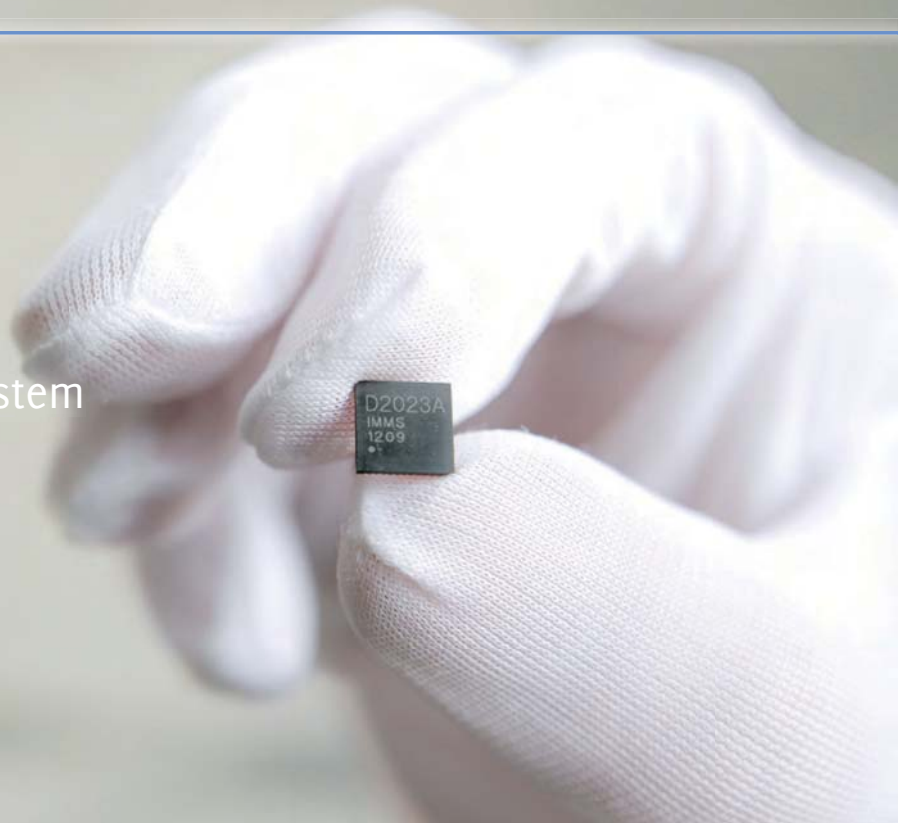
IMMS published a paper in 2012 on this subject – cf. no. 30 in the publications list, p. 49ff.



Fig. 3: Test setup showing IMMS MTS-1 and the connecting wires to the testing card. Photograph: IMMS, Industrial Electronics and Measurement Technology.

Thermulab

Hochtemperatur-Sensorsystem für energieeffizientere Gaskraftwerke und Verbrennungsmotoren



Wozu ein spezielles Hochtemperatur-Sensorsystem?

Um den thermodynamischen Wirkungsgrad von Gaskraftwerken oder Verbrennungsmotoren zu steigern, wird die bis zu 1200°C heiße Prozesstemperatur bis nahe an die thermische Belastungsgrenze der verarbeiteten Materialien erhöht. Es sind hochpräzise Temperaturmessungen an zahlreichen Stellen notwendig, um diese Grenze nicht zu überschreiten. Bislang waren hierzu Sensoren mit langen und aufwändig abgeschirmten Kabeln zur Auswerteelektronik notwendig. Diese Einheit zur Datenverarbeitung musste in einer Entfernung untergebracht werden, in der es maximal 100°C heiß werden durfte.

Die Leitungen der Sensoren hatten daher ein hohes Gewicht und eine schlechte Ressourceneffizienz. Zudem war es Stand der Technik, für die Auswerteelektronik Leiterkarten mit mehreren diskreten Bauelementen einzusetzen. Ziel war es, die Datenverarbeitung zu verkleinern und ohne Kabel direkt in die Sensorbaugruppe zu integrieren. Hierfür ist eine Auswerteelektronik notwendig, die bei Temperaturen bis zu 150°C präzise arbeiten kann. Daher hat das IMMS im Thüringer Forschungsprojekt „Thermulab“ (Thermodynamische Multisensorik zur Überwachung von Hochtemperaturprozessen, insbesondere in Abgaskanälen) einen applikationsspezifischen integrierten Schaltkreis (ASIC) für ein kompaktes, intelligentes Hochtemperatur-Sensorsystem entwickelt. Er ersetzt mehrere diskrete Bauteile durch eine in-

Vom IMMS im Projekt „Thermulab“ entwickelter Mikrochip mit einer Betriebstemperatur von bis zu 150 °C. Foto: IMMS.

tegrierte Schaltung mit einer besseren Performance, macht genauere Messungen möglich und ist weniger störanfällig. Ein digitaler Datenbus macht die Vernetzung einfacher und durch weniger Leitungen leichter und kostengünstiger. Die Daten der Sensoren können dezentral ausgewertet werden und die Energieeffizienz wird deutlich verbessert. Sensorfusion und Datenkompression erlauben eine wesentlich geringere Datenrate, wodurch weniger Energie gebraucht wird.

Was macht den Mikrochip besonders?

Durch die Vielzahl und die hohe Komplexität der benötigten Elemente des integrierten Mikrochips, dessen hochpräzise Analogkomponenten, dessen großen Digitalteil mit Mikrocontroller und den erforderlichen Speicherblöcken sowie durch dessen hohe Betriebstemperatur bis zu 150°C war es notwendig, dass das IMMS neue Wege im Design und bei der Charakterisierung durch die Messtechnik beschritten hat. Für einen solchen stark erweiterten Temperaturbereich stehen keine kommerziell verfügbaren Lösungen zur Verfügung. Standard sind bislang Schaltkreise, die bis 125°C funktionieren. Der bei 150°C arbeitende Mikrochip des IMMS unterstützt in Verbindung mit einem Thermoelement Temperaturmessungen im Bereich von -40°C bis 1200°C mit einer Genauigkeit von 1°C.

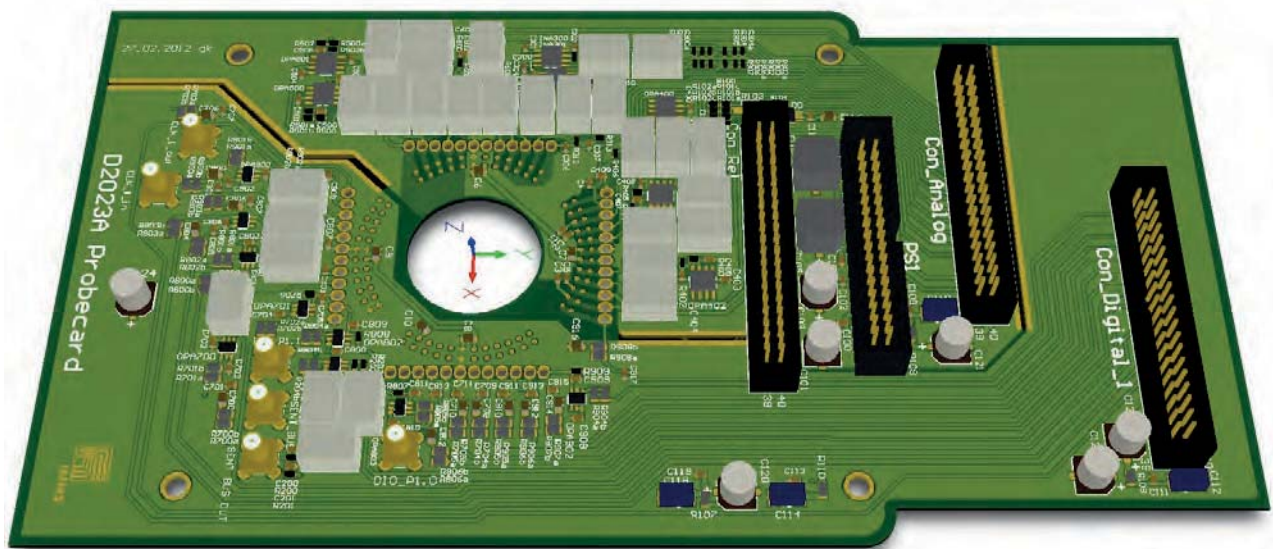


Bild 1: Layout der Probecard als 3D-Bild. Grafik: IMMS, Industrielle Elektronik und Messtechnik.

Thermoelemente haben allerdings den Nachteil, dass die ausgegebene Spannung sehr klein ist und sich im Bereich von $50 \mu\text{V/K}$ bewegt. Um aus dieser Spannung einen Temperaturwert zu berechnen, wird zudem eine Referenztemperatur benötigt. Für diese spezifischen Anforderungen hat das IMMS eine Elektronik entwickelt, die sehr kleine Spannungsdifferenzen nahezu potenzialfrei auswerten und die Temperatur am Referenzpunkt präzise ermitteln kann. Ergebnis ist ein ASIC, der diese Temperatursignale rauscharm verstärkt und sie dann mit einem geeigneten Analog-Digital-Wandler in digitale Informationen umwandelt. Der Digitalteil des Chips bewertet die Sensordaten, korrigiert sie und gibt sie als seriellen Datenstrom aus. Das erfolgt über zwei pulsweitenmodulierte Ausgänge (PWM) oder einen Single Edge Nibble Transmission Bus (SENT-Ausgang) mit Treiberstufe. SENT ist eine im Automobilbau verwendete Schnittstelle, die Daten zwischen Sensor und Steuergerät sicher überträgt.

Warum war der Testaufbau so komplex?

Die komplexen Anforderungen des Mikrochips mit hohem Temperaturbereich, großen digitalen Blöcken und hochpräzisen analogen Komponenten machten einen aufwendigen Testaufbau notwendig – den bislang umfangreichsten und komplexesten am Institut. So hat das IMMS den Mikrochip bereits auf dem Halbleiterwafer verifiziert und charakterisiert. Die dafür erforderliche Probecard kontaktiert mit einer Nadelspitze die Bondinseln auf den Chips und trägt die Testbeschaltung. Dafür haben die Forscher den Schalt-

plan erstellt, die Schaltung simuliert, das Layout entworfen und die Leiterplatte aus vier Lagen aufgebaut, die unter anderem 30 Relais für die Umsetzung der Testspezifikation und die Anschlüsse zum Testsystem enthält (Bild 1). Die bestückte Probecard wurde auf ihre Funktionalität hin untersucht und getestet (Bild 2). Damit nach dem Test am Wafer mit dem gleichen Aufbau auch Bauelemente geprüft werden können, wurde die Probecard mit einer Einsteckvorrichtung für die Chipfassungen versehen.

Die Tests am Mikrochip wurden auf dem für den Halbleitertest eingesetzten modularen System IMMS MTS-1 vorgenommen (Bild 3). Dieses am Institut entwickelte Testsystem besteht aus Chassis, Controller und Testerinstrumenten nach dem PXI-Standard. Für den „Thermulab“-Test waren sieben verschiedene PXI-Testerinstrumente erforderlich. Darunter sind ein hochauflösendes Digitalmultimeter für genaue Strom- und Spannungsmessungen, ein Digitalgenerator/-analyzer, um digitale Signale zu erzeugen und zu messen, sowie ein Digitizer zur Erfassung schneller Signale. Um die analogen und digitalen Gleichspannungen zu generieren und zu bestimmen, wurden zwei eigens hierfür im IMMS entwickelte Parametrische Messeinheit (PMUs) eingesetzt. Die PXI-Karten wurden mittels anwendungsspezifischer Terminal-Module verschaltet, die die Ressourcen der PXI-Testerinstrumente auf die Anschlüsse des Prüflings auf der Probecard routen. Am Portmodul erfolgt der Anschluss der Probecard.

Damit in Bruchteilen von Sekunden alle wichtigen Parameter, wie der Stromverbrauch des Schaltkreises und die im Chip erzeugten Ströme, sehr genau getestet werden können, wurden für den Wafer-Test die umfangreichen Messabläufe mit der grafischen

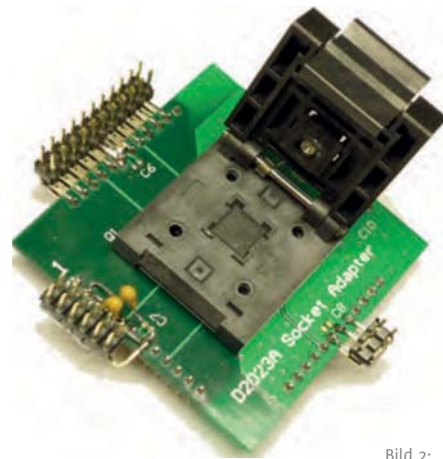
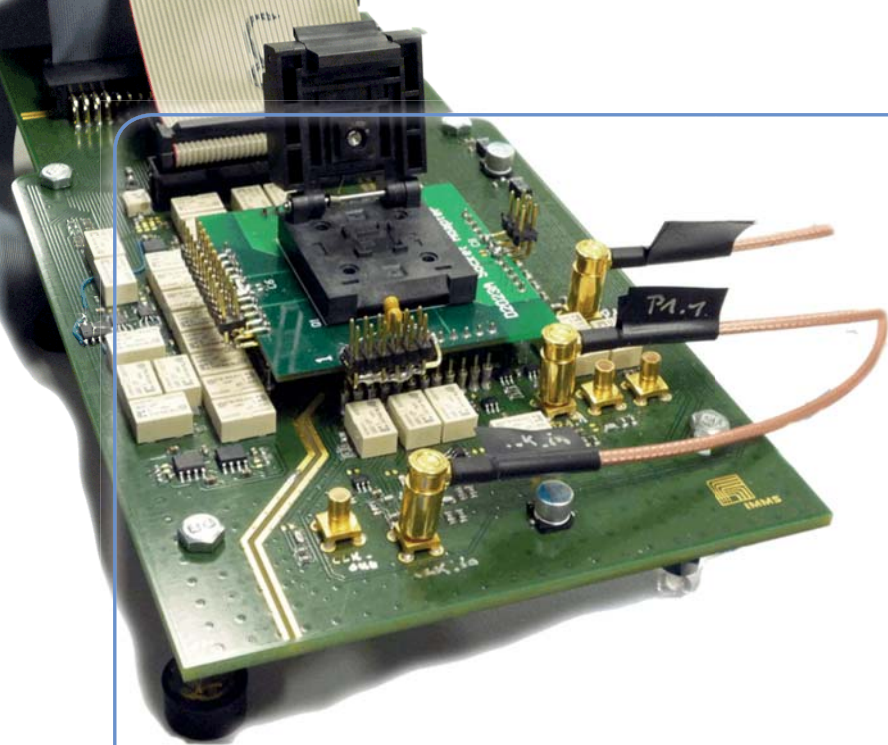


Bild 2:
 Probecard für den
 Test des „Thermulab“-Chips (links)
 und Fassung mit dem Mikrochip auf der
 Adapterplatine (rechts). Fotos: IMMS,
 Industrielle Elektronik und Messtechnik.

Programmierungsumgebung LabVIEW® erstellt. Temperaturen wurden an der Referenzstelle und am Thermoelement gemessen. Die im Mikrochip integrierte und eigens hierfür vom IMMS entwickelte Referenzspannungsquelle liefert eine stabile Spannung im Temperaturbereich von -40°C bis 150°C . Weiterhin wurden die automatische Fehlererkennung, der Speicher und die Funktionalität des Mikrocontrollers getestet.

Um den Schaltkreis zu charakterisieren, hat das Institut die integrierten Schaltungen sehr ausführlich untersucht, dabei die Referenzspannungsquelle kalibriert und verschiedene Einstellungen vorgenommen. Zur Kontrolle hat das IMMS den Schaltkreis in 10°C -Schritten von -40°C bis auf 150°C erwärmt und alle Parameter in Bezug auf die Referenzspannungsquelle gemessen. Auf Basis dieser Ergebnisse können die integrierten Schaltkreise bereits auf dem Waferprober kalibriert werden.

Abschließend hat das Institut die für den späteren Einsatz benötigte Applikationssoftware angepasst. So wird durch Offsetkompensation und Mittelwertbildung die Genauigkeit der integrierten Schaltung erhöht. Die interne Fehlererkennung des ASICs signalisiert Fehler in der Anwendung, wie Kabelbruch oder fehlenden Sensor.

Wie geht es weiter?

Optimierungen bezüglich der verwendeten Fläche des Mikrochips lassen sich dadurch erreichen, dass zahlreiche Testpins eingespart und der Speicherumfang auf die Hälfte reduziert wird. Zudem können künftig

weitere externe Bauelemente in den Sensor-IC integriert werden. Das momentan in der Prozessierung befindliche Redesign des „Thermulab“-Chips wird die bisher erreichte Genauigkeit verbessern.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Mario Hahn, mario.hahn@imms.de

Dipl.-Ing. Marco Reinhard, marco.reinhard@imms.de

Literatur:

Zu diesem Thema hat das IMMS 2012 einen Beitrag veröffentlicht, vgl. Nr. 30 der Publikationsliste, S. 49ff.

Bild 3: Testsetup mit dem System IMMS MTS-1 und den Verbindungsleitungen zur Probecard.

Foto: IMMS, Industrielle Elektronik und Messtechnik.

