

Metrology enabling power consumption of ultra-low-power circuits to be characterised dynamically



Staff member at work on a measurement circuit developed by IMMS to provide dynamic characterisation of ultra-low-power (ULP) circuits. These ULP circuits are what enable self-powered functioning of networked integrated sensor systems. Photograph: IMMS.

Objectives and overview

The need for self-powered network sensors in Industry 4.0 and IoT

The key to production that is efficient, networked, automated and flexible is digitalisation. Digital monitoring of production states, production processes and the quality produced means using more and more sensor systems. Such systems are significant trailblazers for the fourth industrial revolution (also called Industry 4.0) and the IoT (Internet of things).

*More on
Industry 4.0 at
www.imms.de*

The systems are known as cyber-physical systems, or CPS. They are used at many points to capture, process and transmit measurements and control data. If existing plant and machinery are to be retrofitted with the necessary sensor systems, the systems will have to function without outside energy, at inaccessible points, among them those where it is impossible to change a battery or deliver power by cable. Here and across the whole Internet of Things, the challenges presented to integrated sensors and evaluation software are increasing all the time, as the tasks needing to

*More on
Green-ISAS at
www.imms.de*

*Annual Report
© IMMS 2018*

be done become ever more complex while the energy that can be used remains at a minimum.

New ultra-low-power circuits improve system efficiency but still cannot be validated with standard instrumentation

Increasingly, the self-powered systems are using ULP-ICs (ultra-low-powered integrated circuits). In the Green-ISAS research group, IMMS has developed ULP ICs that process signals from a temperature sensor chip with remarkable energy efficiency. They are now at the manufacturing stage. This ASIC (application-specific integrated circuit) is so designed that it requires only a tiny amount of energy. This fact is a particular challenge to the present conventional instruments measuring fluctuations in take-up of electric current during switching on or off.

The energy needs of ULP ICs on standby are mere nanowatts but they may rise a millionfold during their customary operation. This has certain consequences for their characterisation. Their current consumption is the most important characteristic of ULP ICs. It can range from nanoamperes (nA) during standby to milliamperes (mA) in operating mode. It is thus necessary to achieve measurement of current needs across a range from 1 nA : 1 mA $\triangleq$ 1 : 10⁶ – smoothly, without interruption. In these ICs, switching between standby and operation mode is a matter of fractions of a second, but recording is needed throughout the procedure. High-speed measurement is essential.

Only if the measuring instrument fulfils this requirement is it possible to investigate and characterise current consumption by consumers of electricity during actual consumption – in this case consumption by ULP ASICs in a self-powered detection system based on a sensor network. The results of the characterisation process are the foundation of the design of the energy supply within electronic systems which do not depend on an outside source. Ammeters currently available on the market do not fully meet the challenge.

Possibility of characterising ULP ICs with the IMMS measuring circuit

In the Green-ISAS research group, IMMS has developed a circuit that measures up to the challenge. Initially designed as an auxiliary device for commercial oscilloscopes, it has been fully developed and brought into use. The hardware can measure the power consumption in a dynamic range from 1 nA to 1 mA in dependence on time

55

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Contents
- * Funding

More on energy efficiency at
www.imms.de.

More on test and characterisation at
www.imms.de.

Step 2: Keep the operating voltage constant

To counteract this effect, an OPV (operation amplifier) is inserted in addition to the shunt resistance between source and load. This OPV then regulates the load voltage U_L to match the source voltage U_Q minus the offset voltage U_{OS} of the OPV. An instrumentation amplifier (INA) is used to measure differentially the voltage drop across the shunt, amplify it and allow it to be measured with a relevant device such as an oscilloscope. This method allows the operating voltage to be kept constant and independent of the measuring range.

> RoMulus:RFID
> Green-ISAS:Test
> Green-ISAS:EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus:MEMS
> Contents
* Funding

Step 3: Extend the dynamic range for current measurement

To achieve the wide range of current measurement, additional modifications are required. For this, transistors are installed in parallel to the shunt resistances. As the voltage drop across the shunt becomes equal to the voltage flowing through the transistor (approx. 700mV), the transistor becomes electrically conductive and short-circuits the shunt. This method permits several shunts to be connected in series so that the varying resistance of the shunts means a much greater range of fluctuation in the measurable current is covered.

A measurement circuit with four current measuring ranges was developed and laid out in fulfilment of this scheme (Figure 2).

Characterisation of the new measurement circuit

The characterisation was carried out using a precision IV analyser with the current kept constant over time. Instead of a load, the analyser itself was used as the load and a current was generated between 1nA and 10mA. At the same time, the drops in voltage across the shunt at the outputs of all INAs were measured and the currents calculated from the results. These measurements were compared with

More on test and characterisation at www.imms.de.

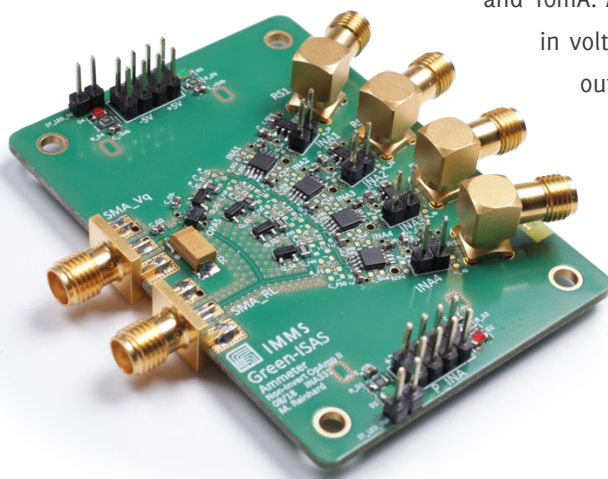


Figure 2:
The measurement circuit developed at IMMS with four current measurement ranges for time-resolved power characterisation of ULP ICs. Photograph: IMMS.

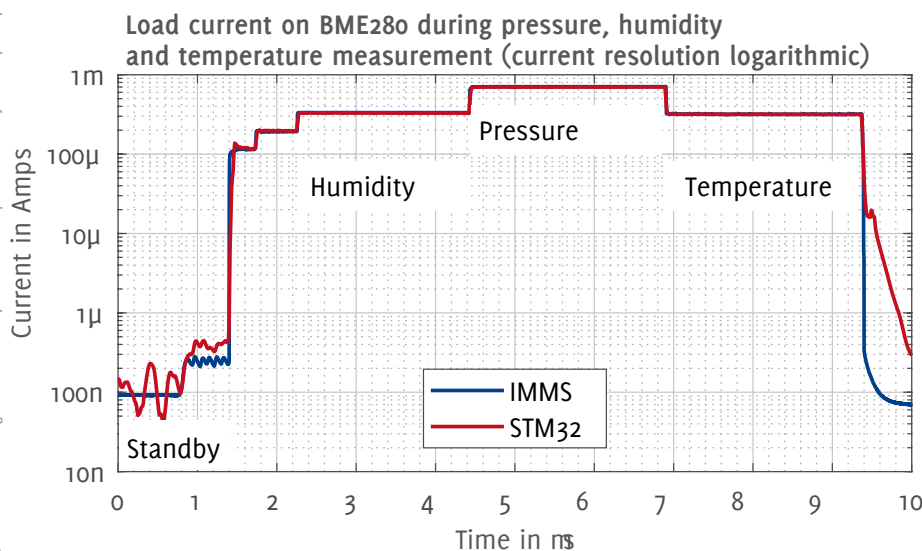
the current that was being supplied. Any deviation between the current supplied and measured across this range from 1nA to 10mA is found to be less than $\pm 1\%$. It was also possible to prove for the other parameters of the measurement IC that the values had been achieved that were the original target.

Comparative measurements using currently conventional measurement methods

What stood out was the improvement that had been achieved over results from commercially available measurement devices such as the STM32CubeMonitor-Power, which addresses a range of current from 100nA to 50mA and a bandwidth of 100kHz. The outstanding improvements are the effects of extending the range of current measured so that the minima are 1nA and raising the bandwidth so that the maxima are 1MHz. For comparison, the current consumption of the BME280 ULP sensor made by Bosch was investigated as an example. This is an IC that determines temperature, pressure and humidity. According to its specifications, the sensor requires 100nA on standby and up to 700 μ A during normal operation. In the investigation, the BME280 was programmed to wake up from standby, take measurements and then return to standby. Current consumption was recorded for this period in real time. The results are given in the following Figure 4. Clearly apparent is the deviation of the STM32CubeMonitor-Power on standby from the BME280: deviation due to the limited resolution and the slow return to standby operation attributable to parasitics.

More on test
and charac-
terisation at
www.imms.de.

Figure 4: Current measurements made for the Bosch sensor BME280 compared: those made with the measurement circuit developed at IMMS for ULP sensors and those made with the STM-32CubeMonitor already on the market. Diagram: IMMS.



The results of the comparative measurements clearly indicate that the new IMMS measurement circuit fulfils the demands made on it. The range of varying current to be measured (between 1nA and 10mA) is shown, with a measurement error of less than 1%. The measurement circuit topology means that operating voltage is kept constant at a level above the load throughout the measurement process and kept independent of the load current.

Future prospects

The measurement circuit here presented will make exact predictions possible concerning energy required by sensor chips onto which ultra-low-power signal processing circuits are integrated or concerning the energy needs of more complex ULP systems such as wireless sensors. It will, for example, enable measurement intervals to be matched so closely to the energy available that the sensor system will operate independently of an outside energy source. The measurement circuit is, furthermore, a powerful development tool that will help optimise ULP systems in that it enables the exact way that changes in hardware or software affect energy needs to be calculated swiftly.

If the measurement circuit is to be used without an oscilloscope, it will require the addition of an evaluation and visualisation unit. IMMS is currently experimenting with compact solutions to this problem that include microcontrollers and ADCs. Measuring the drop in voltage at the shunt resistors will then be possible in parallel at a sampling rate faster than 1 MSample/s. Using the right algorithm, the microcontroller will be able to compute the resulting current without any dead time due to switchover from one shunt to another.

Contact person: Dipl.-Ing. Michael Meister, michael.meister@imms.de



Freistaat
Thüringen



Thuringian Ministry
for Economic Affairs, Science
and Digital Society

The Green-ISAS research group was supported by the “Land” of Thüringen and the European Social Fund under the reference 2016 FGR 0055.

Messumgebung zur dynamischen Charakterisierung des Leistungsverbrauchs von Ultra-Low-Power-Schaltungen



Arbeiten für eine Messschaltung, die das IMMS entwickelt hat, um Ultra-Low-Power-Schaltungen dynamisch charakterisieren zu können. Mit diesen ULP-Schaltungen können vernetzte integrierte Sensorsysteme energieautark arbeiten. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Industrie 4.0 und IoT benötigen energieautarke vernetzte Sensorik

Digitalisierung ist der Schlüssel zur effizienten, vernetzten, automatisierten und flexiblen Produktion. Um hierfür Zustände, Prozesse und Qualität in der Fertigung zu überwachen, werden immer mehr Sensorsysteme eingesetzt. Sie sind einer der wesentlichen Wegbereiter für die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) und das Internet der Dinge (IoT).

Mit diesen cyber-physischen Systemen (CPS) werden an zahlreichen Stellen Mess- und Steuerdaten erfasst, verarbeitet und transportiert. Um bestehende Maschinen und Anlagen mit der notwendigen Sensorik nachrüsten zu können, muss diese energieautark arbeiten, z.B. an schwer zugänglichen Stellen, wo ein Batteriewechsel oder eine kabelgebundene Stromversorgung nicht möglich sind. Hier wie auch im gesamten IoT-Umfeld steigen die Anforderungen an integrierte Sensorik und Auswertelektronik stetig, da immer komplexere Aufgaben zu erledigen sind und dabei nur wenig Energie verbraucht werden soll.

*Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de.*

*Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de*

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2018

Neue Ultra-Low-Power-Schaltungen bringen höhere Energieeffizienz in die Systeme, lassen sich aber noch nicht mit Standard-Messtechnik validieren

Für diese autarken Systeme werden immer häufiger Ultra-Low-Power-Schaltkreise (ULP-IC) eingesetzt. Das IMMS hat in der Forschergruppe Green-ISAS Ultra-Low-Power-Schaltungen für eine sehr energieeffiziente Verarbeitung von Sensorsignalen für einen Temperatursensorchip entwickelt und in die Fertigung übergeben. Diese anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) wurde mit einem äußerst niedrigen Energiebedarf ausgelegt, was insbesondere bei Ein- und Umschaltvorgängen eine Herausforderung für handelsübliche Messtechnik zur Charakterisierung der dynamischen Leistungsaufnahme darstellt.

Für ULP-Schaltungen liegt der Energiebedarf im Standby-Betrieb im Nanowatt-Bereich, kann jedoch im Normalbetrieb auf das Millionenfache ansteigen. Für die Messtechnik zieht das einige Herausforderungen nach sich. Die wichtigste Kenngröße zur Bewertung der Leistungsaufnahme von ULP-ASICs ist ihre Stromaufnahme, die im Wertebereich typischerweise zwischen Nanoampere (nA) im Standby-Betrieb bis Milliampere (mA) im Normalbetrieb schwankt. Daher muss der Strombedarf mit einem sehr hohen Dynamikbereich von $1 \text{ nA} : 1 \text{ mA} \triangleq 1 : 10^6$ messtechnisch erfasst werden – und das stufenlos. Ein Umschalten zwischen Normal- und Standby-Betrieb dauert zudem nur Bruchteile von Sekunden und muss ebenfalls erfasst werden. Das erfordert eine hohe Geschwindigkeit des Messsystems.

Erst wenn ein Messsystem diese Anforderungen erfüllt, kann die Leistungsaufnahme von elektrischen Verbrauchern, sprich ULP-ASICs in einem autarken vernetzten Sensorsystem, während ihres Einsatzes untersucht und charakterisiert werden. Diese Messergebnisse bilden die Basis für die Auslegung der Energieversorgung energieautarker elektronischer Systeme. Am Markt verfügbare Strommessgeräte erfüllen diese Anforderungen nur unzureichend.

Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de

Mit der Messschaltung des IMMS lassen sich Ultra-Low-Power-Schaltungen charakterisieren

Das IMMS hat in der Forschergruppe Green-ISAS eine Messschaltung, die die beschriebenen Anforderungen erfüllt, als Vorsatzgerät für handelsübliche Oszilloskope entwickelt, aufgebaut und erfolgreich eingesetzt. Mit der Hardware wird der Strombedarf im Dynamikbereich von 1 nA bis 10 mA in Abhängigkeit von der Zeit mit einem Messfehler von unter 1% erfasst. Die Messschaltung ist zudem so gestaltet, dass die Betriebsspannung über der Last während der gesamten Messung unabhängig vom Laststrom konstant gehalten wird.

Mehr zu Test
und Charakterisierung auf
www.imms.de

Jahresbericht

Anforderungen und Messkonzepte

Die angestrebten Messparameter der am IMMS entwickelten Schaltung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Parameter	Anforderungen
Spannungsbereich der Last	$U_L = 0 \text{ V} \dots 3,3 \text{ V}$
Laststrombereich	$I_L = 1 \text{ nA} \dots 10 \text{ mA} \pm 1 \%$
Frequenzbereich	$f = \text{DC} \dots 1 \text{ MHz}$
Spannungsdrop	$U_{\text{drop}} < 1 \text{ mV}$
Rauschpegel (<100 kHz)	$I_{\text{noise}} < 1 \text{ nA}$

Zur Realisierung der Messschaltung, die in Abbildung 1 dargestellt ist, wurden mehrere Konzepte untersucht und bezüglich ihrer Eignung bewertet.

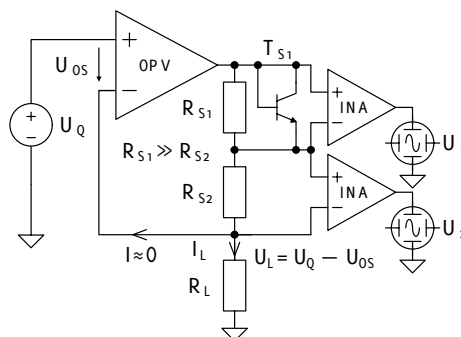
Schritt 1: Laststrom ermitteln

Für eine erste Variante der Strommessung an ULP-ICs wurde ein Shunt-Widerstand zwischen Quelle und Last vorgeschaltet. Aus dem gemessenen Spannungsabfall U_S über dem Shunt R_S wird der Laststrom $I_L = U_S/R_S$ berechnet. Bei dieser passiven Variante entsteht jedoch der Nachteil, dass die Versorgungsspannung der Last U_L nicht mit der Spannung der Quelle U_Q übereinstimmt und somit ein Spannungs-Drop U_{drop} in Abhängigkeit des Betriebsstroms entsteht.

Schritt 2: Betriebsspannung konstant halten

Um diesem Effekt zu begegnen, wird zum Shunt-Widerstand ein Operationsverstärker (OPV) zwischen Quelle und Last geschaltet. Dieser OPV regelt dann die Spannung der Last U_L auf die Spannung der Quelle U_0 abzüglich der Offsetspannung U_{0s} .

Abbildung 1:



Prinzipielle Schaltungsstruktur der Messschaltung mit geregelter Spannung an der Last und erweiterbarem Dynamikbereich der Strommessung.

Grafik: IMMS.

des Operationsverstärkers. Der Spannungsabfall über dem Shunt wird differenziell mit einem Instrumentationsverstärker (INA) aufgenommen, verstärkt und mit einem Messgerät, z.B. mit einem Oszilloskop, gemessen. Somit wird die Betriebsspannung unabhängig vom Messbereich beibehalten.

Schritt 3: Dynamikbereich der Strommessung erweitern

Der angesprochene große Dynamikbereich erfordert ebenfalls weitere Neuerungen. Hierfür werden Transistoren parallel zu den Shunt-Widerständen geschaltet. Sobald der Spannungsabfall über dem Shunt die Größe der Flussspannung des Transistors von ca. 700 mV erreicht, wird der Transistor leitfähig und schließt den Shunt kurz. Auf diese Weise können mehrere Shunts in Reihe geschaltet werden, um mit Hilfe des variierenden Widerstandswertes des Shunts einen deutlich größeren Dynamikbereich des messbaren Stromes abzudecken.

Entsprechend dieses Konzepts wurde eine Messschaltung mit vier Strommessbereichen entwickelt und aufgebaut (Abbildung 2).

Charakterisierung der neuen Messschaltung

Die Messschaltung wurde bei zeitlich konstantem Strom mit einem Präzisions-IV-Analysator charakterisiert. Statt eines Verbrauchers wurde der Analysator als Last eingesetzt und damit ein Strom von 1 nA bis 10 mA generiert. Gleichzeitig wurden parallel die Spannungsabfälle über den Shunts an den Ausgängen aller INAs gemessen und daraus die Ströme ermittelt. Verglichen wurden die Messergebnisse mit dem eingespeisten Strom. Die prozentuale Abweichung zwischen dem eingespeisten und gemessenen Strom beläuft sich innerhalb des geforderten

Bereiches von 1 nA bis 10 mA auf unter ± 1 %. Auch bei den anderen

Parametern der Messschaltung konnte nachgewiesen werden, dass die ursprünglich angestrebten Werte erreicht wurden.

Mehr zu Test und Charakterisierung auf www.imms.de

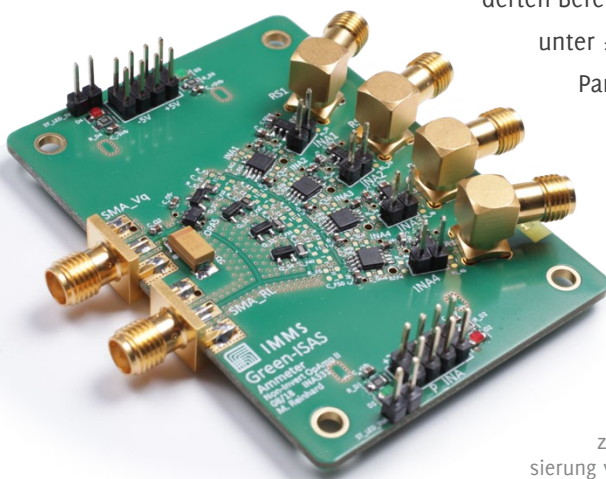


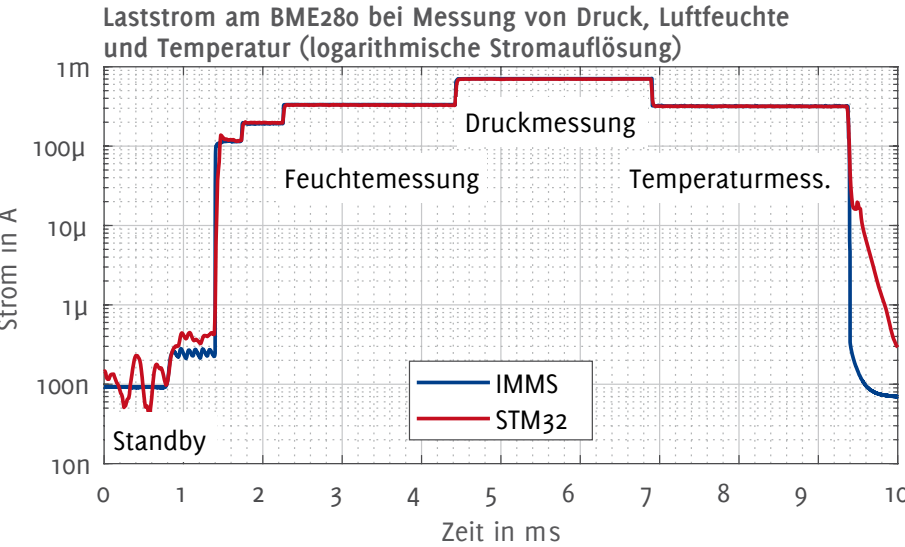
Abbildung 2:
Am IMMS entwickelte
Messschaltung mit vier
Strommessbereichen für die
zeitaufgelöste Leistungscharakteri-
sierung von ULP-Schaltungen. Foto: IMMS.

Besonders deutlich werden die erzielten Verbesserungen im direkten Vergleich mit handelsüblichen Messgeräten, wie dem STM32CubeMonitor-Power, der einen Strombereich von 100 nA bis 50 mA und eine Bandbreite von 100 kHz aufweist. Im Vordergrund stehen dabei vor allem die Einflüsse der Erweiterung des Strommessbereichs bis zu minimalen Strömen von 1 nA sowie der erhöhten Bandbreite von bis zu 1 MHz. Hierzu wurde die Stromaufnahme am Beispiel des ULP-Sensors BME280 von Bosch untersucht. Mit diesem IC werden Temperatur, Druck und Luftfeuchte bestimmt. Laut seiner Spezifikation benötigt der Sensor im Standby-Betrieb 100 nA und im Normal-Betrieb bis über 700 µA. Der BME280 wurde so programmiert, dass er aus dem Standby-Modus aufwacht, Messungen ausführt und danach wieder in den Standby-Betrieb zurückkehrt. Der Strom wurde dabei in Echtzeit aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Messungen sind in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt. Dabei wird vor allem die Abweichung des STM32CubeMonitor-Power im Standby-Betrieb des BME280 aufgrund der begrenzten Auflösung und der verlangsamten Rückkehr in den Standby-Betrieb aufgrund parasitärer Kapazitäten deutlich.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung zeigen deutlich, dass die IMMS-Messschaltung die gestellten Anforderungen erfüllt. Der Dynamikbereich des zu messenden Stroms von 1 nA bis 10 mA wird mit einem Messfehler von unter 1 % abgebildet. Auf Grund der Schaltungstopologie wird die Betriebsspannung über der Last während der gesamten Messung unabhängig vom Laststrom konstant gehalten.

Mehr zu Test und Charakterisierung auf www.imms.de

Abbildung 4: Vergleiche von Strommessungen am Bosch-Sensor BME280 mit der am IMMS entwickelten Messschaltung für ULP-Sensoren und dem kommerziell verfügbaren Messgerät STM32CubeMonitor. Grafik: IMMS.



Dank der vorgestellten Messschaltung sind exakte Vorhersagen über den Energiebedarf von Sensorchips mit integrierten Ultra-Low-Power-Signalverarbeitungsschaltungen oder auch von komplexeren ULP-Systemen, wie z.B. Funksensoren, möglich. Dadurch können beispielsweise Messintervalle so auf die vorhandene Energie abgestimmt werden, dass ein autarkes Sensorsystem realisiert werden kann. Die Messschaltung ist darüber hinaus ein leistungsfähiges Entwicklungswerkzeug bei der Optimierung von ULP-Systemen, da Auswirkungen von Hardware- und Softwareänderungen auf den Energiebedarf schnell und exakt ermittelt werden können.

Um die Messschaltung ohne ein Oszilloskop nutzen zu können, muss sie um eine Auswerte- und Darstellungseinheit erweitert werden. Dafür werden am IMMS kompakte Lösungen mit Mikrocontrollern und Analog-zu-Digital-Wandlern untersucht. Bei einer Abtastrate von über 1 MSample/s können dann die Spannungsabfälle an den Shunt-Widerständen parallel gemessen werden. Nach einem entsprechenden Algorithmus kann der Mikrocontroller daraus den resultierenden Laststrom ohne Totzeiten beim Umschalten zwischen den Shunts ermitteln.

Kontakt: Dipl.-Ing. Michael Meister, michael.meister@imms.de



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft

Die Forschergruppe Green-ISAS wurde gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen 2016 FGR 0055.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

*Mehr zu Test
und Charak-
terisierung auf
www.imms.de*

*Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de*

*Alle Green-ISAS-
Publikationen:
www.imms.de*