ADMONT -

Battery-less RFID sensor chip transmits measurement data from aqueous solutions



With the passive RFID sensor chip developed at IMMS, it is possible to signal data measurements from aqueous solutions to NFC-enabled devices such as smartphones. One example of use is cell culture monitoring. Photograph: IMMS.

Objectives and overview: Monitoring of cell cultures, microbes and viruses

The growth of cells, viruses and microbes like bacteria or fungi which are being cultured is dependent not only on the nutrients but also on details of the ambient humidity and temperature and pH value of the medium. Lab investigations and sample cultivation stand or fall by the maintenance of constant conditions, particularly temperatures, during experiments. Unfortunately, this is not always possible.

Why are cells, microbes and viruses cultured and under what conditions?

Cell cultures are used not only for pure research into molecular and cellular processes or for diagnostics. They may be needed, among other things, for new pharmaceuticals where the metabolic processes in bacterial growth and the effect, for instance of antibiotics, are being investigated. Human cell cultures can be used in analysing the side effects of new substances (in cosmetics or domestic chemicals) so that animal experiments are cut significantly. The procedure is to take cells from tissue out of the organism and cultivate and test them under sterile, continuously standardised conditions in vitro. If mammalian cells, for instance, are to be cultured

Annual Report

and tested, the pH value must be between 7.2 and 7.4, the humidity between 96% and 98% and the temperature kept constant between 37°C and 37.5°C. Depending on the organism, the temperature will be 21° C to 28° C for soil-dwellers and 4° C to 10°C for sea-dwellers during culture. The conditions to be maintained in investigating cultured microbes and viruses will be similar.

There are bio-technological applications which are for the investigation of such things as thermophile bacteria at temperatures up to and above 100°C. An instance is the attempt to obtain thermostable enzymes for soap and detergent additives. Here again, the strict temperature limits may not be exceeded at any stage of the culture or analysis.

Sensors to monitor fluctuating conditions for samples in the incubator

The chambers used in culturing samples can be accurately regulated up to $+100^{\circ}$ C and will maintain constant temperatures by circulating the air or employing a waterfilled lagging. It must be said, however, that this works well only if the incubators are never or seldom opened. It is often necessary to introduce substances into samples during the sort of serial investigations, e.g. applied to pharmaceuticals, which will mean variations of temperature are also introduced and these may, depending on the culture, sabotage test results.

A possible solution is to make additional measurements enabling critical parameters (temperature, for instance) to be sensed directly in the sample so that the entire series of tests is under continuous, undisturbed quality control. For this, sensors are necessary which will detect these values in the target range flexibly, simply and sufficiently accurately, causing no cross-contamination and no time delay; and using the lab equipment already present.

IMMS' passive RFID sensor chip sends temperature measurements from aqueous solutions

IMMS has developed an RFID (Radio Frequency Identification) sensor chip which is not reliant on an outside power supply. Placed in aqueous solutions, it will measure the temperature so that the quantities are captured by an RFID readout unit and then processed. The energy-efficient chip which has been created by IMMS captures and digitises the relevant quantities using electrical power of only 3.5 microwatts. Theoretically, this means a comparable battery-assisted sensor will operate without interruption for at least a 10-year period from a mignon battery of 1000 mAh typical capacity. However, no battery is necessary in the case of such low power take-up. A

More on ASIC development at www.imms.de.

Annual Report **IMMS 2017**

publication only with express permission of IMMS Reproduction and rights reserved. V GmbH. IMMS

GmbH

77

> ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB > in-ovo > Contents

* Funding

> fast realtime

readout unit generates a magnetic field which is strong enough to supply the pas-78 sive RFID chip with sufficient power, so that sensor data is captured and transmitted > fast realtime through both container and liquid for a distance of up to 4 cm.

Accuracy and efficiency of both energy and money use are here combined. The new digital temperature sensor employed in the RFID sensor chip is capable of a wide measuring range, from o°C to 125°C, maintaining absolute accuracy of ±0.4°C across the whole system. To keep costs to a minimum, IMMS has used conventional established CMOS technologies and developed a single-chip solution with an integrated sensor and embedded electronic signal processing. As a result, the only additional component requiring connection to the chip is the RFID antenna. Direct * Funding contact with the sampled cultures remains secure because bio-compatible materials are used.

Currently, the principles put into practice for temperature measurements using a passive RFID sensor are being applied to further varieties of quantity by IMMS. Among these will be pH value, humidity and dissolved oxygen. All will then be possible to monitor when analysing cell cultures, microbes and viruses. Even beyond these bio-analysis possibilities, the development is promising for many and varied other applications. One could be the capturing of relevant parameters affecting industrial manufacture by means of passive RFID sensors, e.g. the details of cooling lubricants. There is the additional advantage that NFC-enabled end devices can be employed as power source and readout unit. Work is therefore going ahead on a demonstrator app for the use of the RFID chip in conjunction with Android-based smartphones.

More on ASIC development at www.imms.de.

Figure 1: RFID system. IMMS developed the RFID tag. Graphic: IMMS.



The IMMS solution in detail

RFID sensors not only to identify but also to measure and signal quantitative data

RFID enables electronic systems to identify objects automatically without any contact and to capture metadata relating to them. Inside an RFID tag which is attached to an object for identification purposes, there is a tiny chip connected to an antenna. The RFID readout device communicates with the tag by magnetic or electromagnetic field. Figure 1 shows the circuit of an RFID system in schematic form.

Annual Report **IMMS 2017**

RFID is not only used to identify an object but can also be used to read and write 79 data onto the radio tag using the RFID readout device. This particular characteristic 5 for has a great advantage over conventional barcodes, which do not permit the data to 5 A be altered after printing. There are yet more valuable functions in sensor-capable 5 II radio tags. These sensor RFID tags contain not only the "identify", "read" and "write" 5 A functions but also sensors which can at the same time be used to monitor physical 5 P parameters such as temperature. 5 in

Passive RFID sensors need no batteries; NFC will mean a wide range of applications $\rightarrow C$

RFID technology works over more than one frequency range: from low frequency up to high and ultra high and even microwaves, as shown in Figure 2. The scenario which is the focus of ADMONT and the idea of transfer to industrial use means that IMMS is concentrating on developing RFID temperature sensor tags in the HF range at 13.56 MHz, because in this range the captured data can be read and displayed by smartphones and other NFC-enabled devices.

In contrast to what happens with active RFID tags, the power supply for passive HF tags comes not from batteries but from a magnetic field generated by the readout device. This field produces an induction current in the antenna of the tag. The power must be sufficient to ensure successful communication at the required distance between reader and tag.

As the data is being exchanged between reader and tag by means of the same magnetic field, this may produce in the case of passive tags communicating at HF undesired crosstalk or noise in the power supply of the tag. The noise is capable of seriously affecting the accuracy of the integrated sensor. In IMMS' development work, the challenge was to solve this problem for the new RFID sensor tag.



of IMMS

> fast realtime > ANCONA

- > INSPECT
- > ADMONT
- > PTB
- > in-ovo
- > Contents
- * Funding

IMMS 2017



Figure 3: Passive HF RFID tag with integrated temperature sensor (left: photograph of chip; right: RFID tag with chip on the RFID antenna coil, in use for measurements in a liquid). Photographs: IMMS.

New aspects. Passive RFID for HF with integrated temperature sensor

It is current practice to construct commercially available RFID sensors from individual components, which are the detector element (temperature, for instance) connected via readout electronics and a microcontroller to an RFID transponder chip. In the case of the one-piece passive RFID temperature sensor developed by IMMS for HF, all these functions are united on a single chip. This methodology means the entire system runs under optimal power and price conditions and is suitable for miniaturised energy-autonomous wireless sensor nodes which can be used in settings which include life sciences. Figure 3 shows the complete passive HF RFID transponder for measuring temperatures in liquid environments.

Where does the challenge lie?

It is a considerable challenge to combine onto a single chip an RFID transponder and a temperature sensor while at the same time achieving the operating ranges and accuracies of commercially available stand-alone sensors. Most RFID transponder ICs which include a temperature sensor detect the temperature less accurately than separate sensors. These individual sensors operate at accuracy of $\pm 0.15^{\circ}$ C in a range between -55° C and 125° C. The temperature corridor in the case of RFID systems in the current state-of-the-art for HF is narrow: between 50 K and 60 K; and the accuracy not better than $\pm 0.8^{\circ}$ C.

This great discrepancy between the separate and the integrated type of RFID sensor tag is largely due to the noise caused by the power supply. Passive RFID systems are powered by energy generated in the HF field. As mentioned above, the noise generated thereby can seriously affect the accuracy of the sensor. Individual temperature detectors are powered without noise and are thus only exposed to interference

Annual Report

45 GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

- > fast realtime
- > ANCONA
- > INSPECT
- > ADMONT
- > PTB
- > in-ovo
- > Contents
- * Funding



during actual communication. This means that the integrated solution must meet the great challenge of improving the passive system to such an extent that signals are received and transmitted not only with energy efficiency but also without noise.

Chip architecture

Figure 4 shows the schematic circuit diagram of an RFID chip with a power management unit (PMU), an RFID frontend, a temperature sensor and a digital control unit (DCU). The PMU receives the energy from the magnetic field generated by the RFID reader and converts it into a stable, well-regulated supply voltage for the complete sensor tag.

The RFID frontend contains a demodulator and modulator for frequency modulation as appropriate and clock recovery for exact timing of the data streams so that the working signals go back and forth in the frequency ranges required at the particular time. The demodulator converts the modulated HF signal into a digital bitstream; the modulator shifts the response signal into the carrier frequency.

The DCU carries out the command received from the RFID and sends the response to the modulator block for transfer to the readout device. The DCU is a communication protocol engine and a volatile memory. The temperature sensor is connected to this volatile memory, which can be read and written to using RFID commands.

The schematic circuit diagram of the time-domain based low-power temperature sensor is also shown in Figure 4; it combines a digital delay generator and a time-todigital converter (TDC). The delay generator is responsible for a pulse-width modulated (PWM) signal (i.e. signals of alternating on/off length, high and low pulse)

Annual Report



Figure 5:

Proportional relationship of duty cycle D and	
neasured temperature T in °C (or Kelvin) for the	
naximum temperature range of o – 600 K that	
an be processed for the PWM signals.	

Diagram: IMMS.

which reflects temperature, in that the duty cycle (the relationship between the alternating pulse widths) is directly proportional to the temperature measured, as Figure 5 shows. The TDC converts this duty cycle into a binary digital value.

Problem arising: noise rises on readout and corrupts the measured values

The supply voltage for the RFID sensor tag goes through several processing steps. First, a rectifier ensures that the alternating current generated by the magnetic field is converted into direct current. The level of the output current from the rectifier varies markedly depending on where RFID sensor tag and readout unit are situated in relation to each other. The output from the rectifier is kept to a set value by the next stage, the low-dropout (LDO) regulator, which generates the supply to the RFID sensor tag. However, it is not possible for the LDO to smooth out sufficiently the rapid voltage fluctuations caused by the RFID communication in the frequency band between 100 kHz and 1 MHz.

> fast realtime
> ANCONA
> INSPECT
> ADMONT
> PTB
> in-ovo
> Contents
* Funding

Figure 6:

Communications voltage V_{DCA} and power management voltage V_{DDA} in the chip. The signals are shown for three phases:

- 1. Idle,
- 2. Command,
- 3. Response.

Diagrams: IMMS.



Annual Report

This means that the voltage in the temperature sensor may well suffer from ripple during the HF communication, with impairment of detection.

Figure 6 shows the results of simulation for the demodulated communication signals and supply voltage on the chip. It can be seen (1) that the RFID tag is in the idle phase before the start of communication. The rectifier output voltage V_{DCA} and the output voltage as regulated by the LDO V_{DDA} still had a very low ripple of approximately 25 mV (peak-to-peak). If commands are transferred (2) from the RFID reader to the RFID tag, there is an interference effect on V_{DCA} and V_{DDA} with peak-to-peak values of 300 mV and 540 mV respectively – visible in the diagram in the lower left section of Figure 6. Also – lower right, Figure 6 – it can be seen that during the response phase (3) from the RFID tag to the RFID reader there are peak-to-peak amplitudes of 150 mV and 120 mV.

This high degree of interference affecting the LDO output voltage is due to the processes of HF communication and energy transfer in the passive RFID tag. It is at the exact moment when the readout device is transmitting a command to read out the temperature data that the measurements delivered by the temperature detector are distorted.

Solution to the problem: record a series of measurements and use only those which did not coincide with communication

Faced with this, IMMS has developed a solution enabling a single command to cause a series of measured values to be recorded and transferred. Figure 7 shows for two cases the timing relationships between the readout command, the noise in the supply voltage (vdda), the sensor output (pwm, dataready) and the response from the



> fast realtime > ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB > in-ovo > Contents * Funding

RFID sensor tag. The two cases are standard readout and continuous readout. When 84 the standard readout command is sent, the temperature information is returned in one action to the reader. In contrast, after the "serial" command a number of sets of temperature data are returned to the readout device. In both cases, the temperature sensor had already been switched ON before the readout command came, as is revealed by the activity of the PWM signal shown in green. Each time measurement > PTB has been completed and there is a new measured value ready for transfer, the signal "dataready" is shown.

Figure 7 (a) shows how the transfer of the standard readout command distorts the measured value that is to be sent next: the noise generated on the output voltage "vdda" while the measurement is being taken leads to an error in the rising edge of "pwm" which alters the ratio. Thus, in the case of single readings using the standard readout method, the response from the RFID temperature detector is always affected by interference.

Figure 7 (b) shows the response to a serial readout command requiring several sets of data to be sent one after the other to the reader. Here it is clear that the data arriving after the second response is not affected by the voltage interference due to the readout command because there is no HF communication coming at that time from the reader. There are still errors after the second response because of supply noise generated by the communication from the tag while it responds, but this noise has much less effect on the measurement. Furthermore, the RFID reader is capable of applying an averaging procedure to series of values transferred, reducing the residual inexactitude so much that it barely affects the measuring accuracy of the complete system.

Measurement, characterisation and calibration

The comparative measurement results are given in Table 1. They show the RFID sensor achieving resolution of 9.01°C in the case of single readings but of 0.56°C for serial readings. This is confirmation that it is the voltage fluctuations caused by the standard readout command which are the main source of error in sensor accuracy. Using serial communication improves the accuracy by a factor of 16. Nine samples of the integrated chip RFID sensor were subjected to the complete measurement process in a temperature chamber. After two-point calibration at 20°C and 100°C the error interval is reduced to $\pm 0.2^{\circ}$ C. If the tolerance limits are set to 3σ , i.e. an error

Annual Report **IMMS 2017**

> fast realtime > ANCONA > INSPECT > ADMONT

> in-ovo

> Contents

* Funding



tion at 20°C and 100°C; the red line relates to the average tolerance of 3σ . Diagrams: IMMS.

probability of 0.27%, the measurements are accurate to ±0,4°C in the range from 0°C to 125°C. The results of this characterisation are shown in Figure 8.

Procedure	Resolution (°C)	Main source of error	and characte-
Standard readout	9.01	Voltage interference	risation at
Serial readout	0.56	Noise at sensor	www.imms.de
			www.iiiiii.o.

Table 1: Resolution achieved by different commands.

To improve its measurement accuracy, the sensor is calibrated. The user exposes the detector to a known temperature, records the measured value and uses computer software to mathematically map this value to the expected value. Two-point calibration of the detector involves using two known temperatures, measuring the detector's reaction and asking the software to recalculate the original values against the newly calibrated ones. Figure 8 shows the error for the nine sensors (a) before calibration and (b) after the two-point calibration at 20°C and 100°C.

To take an example, if the temperature has to be kept constant at above 68°C for a particular cell culture, the RFID sensor tags are calibrated to an accuracy of 0.5°C at 68°C. If the tag were only accurate to 1°C, the user could not be certain that the temperature had been correctly regulated to 68°C.

Future prospects

These temperature detectors as passive RFID sensors operating at HF have the potential to enable measuring processes of the life sciences to be digitised, automated and carried out with the aid of smartphones and other easily-available NFC-enabled end devices. Even beyond this, the passive integrated RFID sensor chip developed by IMMS will cope with the high demands of the ultra low power (ULP) systems

More on ASIC development at www.imms.de.

Annual Report **IMMS 2017**

More on test

> Contents

* Funding

which are necessary in IoT and Industry 4.0 applications. The great advantage of 86 passive RFID sensor tags is that they require neither maintenance nor an outside electricity supply and can thus be integrated into a wide variety of application scenarios. IMMS is currently concentrating on improving the sensitivity of the tag and the power consumption of the chip. The Institute is also, in the ADMONT project, developing a modular sensor system, an RFID bridge ASIC, which will connect a variety of commercially available sensors provided with standard interfaces to a multiplicity > in-ovo of applications in industrial settings.

Contact person:

Muralikrishna Sathyamurthy, M.Sc., muralikrishna.sathyamurthy@imms.de>

ADMONT at

> Contents

* Funding

www.imms.de.





The ADMONT project has received funding from the ECSEL Joint Undertaking under grant agreement No 661796. This Joint Undertaking has received support as Innovation Action from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and Finland, Sweden, Italy, Austria, Hungary. The IMMS sub-project "Design of intelligent in vitro diagnostic und bioanalytical sensor and actuator systems" has received funding under the reference 16ESE0057.

IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH

Annual Report **IMMS 2017**

> fast realtime > ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB

ADMONT -

Batterieloser RFID-Sensor-Chip funkt Messdaten aus wässrigen Lösungen



Mit dem am IMMS entwickelten batterielosen RFID-Temperatursensor-Chip können Messwerte aus wässrigen Lösungen an NFC-fähige Geräte wie Smartphones gefunkt werden, z.B. zum Monitoring von Zellkulturen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick:

Zustandsüberwachung von Zellkulturen, Mikroben und Viren

Das Wachstum von Zellkulturen, Viren und Mikroben, wie z.B. Bakterien oder Pilzen, hängt neben den Nährstoffen vom pH-Wert des Mediums, der Luftfeuchte und von der Temperatur ab. Die Qualität von Probenkultivierungen und Untersuchungen im Labor steht und fällt damit, Bedingungen und speziell Temperaturen während der Versuche konstant zu halten. Das ist jedoch nicht immer möglich.

Unter welchen Bedingungen untersucht man Zellkulturen, Mikroben und Viren?

Mit Zellkulturen werden nicht nur molekulare und zelluläre Prozesse grundlegend erforscht und Diagnoseverfahren entwickelt. Für neue Arzneimittel werden beispielsweise Stoffwechselprozesse beim Mikrobenwachstum und die Wirkung, z.B. von Antibiotika, untersucht. Darüber hinaus können mit humanen Zellkulturen Nebenwirkungen neuer Substanzen, z.B. für die Kosmetik oder Haushaltchemie, analysiert und damit Tierversuche drastisch eingeschränkt werden. Für eine Zellkultur werden aus dem Gewebeverband entnommene Zellen außerhalb des Organismus, in vitro, unter sterilen und standardisierten kontinuierlichen Bedingungen gezüchtet und den Tests

Jahresbericht

unterzogen. Um beispielsweise Säugetierzellen zu kultivieren und zu testen, benötigt man einen pH-Wert von 7,2 bis 7,4, eine Luftfeuchte von 96% bis 98% und eine konstante Temperatur von 37°C bis 37,5°C. Je nach Organismus müssen Zellen von Bodenorganismen bei 21°C bis 28°C oder von meeresbewohnenden Organismen bei 4°C bis 10°C gezüchtet werden. Ähnliche Bedingungen sind bei der Untersuchung von kultivierten Proben mit Mikroben und Viren einzuhalten.

Biotechnologieanwendungen erfordern beispielsweise Untersuchungen thermo- > philer Bakterien bei Temperaturen bis über 100°C, z.B. um aus ihnen thermostabile Enzyme für Waschmittelzusätze zu gewinnen. Auch hier gilt es, genaue Temperatur- > grenzwerte während der gesamten Kultivierung und Untersuchung streng einzuhalten.

> fast realtime > ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB > in-ovo - > Inhalt . * Förderung

77

Schwankende Bedingungen für Proben im Brutschrank können durch Sensorik überwacht werden

Für die Probenkultivierung verwendete Brutschränke lassen sich bis +100 °C exakt regeln und erzeugen dank Luftzirkulierung oder Wasserummantelung gleichbleibende Temperaturen. Das gilt allerdings nur, wenn Brutschränke nicht oder nur selten geöffnet werden. Für Versuchsreihen werden jedoch häufig Substanzen, wie z.B. neue Medikamente, in die Proben eingebracht, was Temperaturschwankungen in der Probe nach sich ziehen und je nach Kultur Testergebnisse erheblich verfälschen kann.

Einen Ausweg bieten zusätzliche Messungen, mit denen kritische Parameter, wie z.B. die Temperatur, direkt in den Proben detektiert werden und so die Versuchsreihen einem permanenten Qualitätsmonitoring unterzogen werden können. Dazu ist eine Sensorik notwendig, die diese Werte ohne Querkontamination und ohne Zeitverzug im Zielbereich genau genug erheben kann, flexibel und einfach zu handhaben ist und sich einfach mit bestehender Laborausrüstung nutzen lässt.

Batterieloser RFID-Sensor-Chip des IMMS funkt Temperaturwerte aus wässrigen Lösungen

Das IMMS hat einen passiven RFID-Mikroelektronik-Chip ohne eigene Stromversorgung entwickelt. Dieser wird in wässrige Lösungen gegeben und misst dort Temperaturwerte, die von einer RFID-Ausleseeinheit erfasst und verarbeitet werden. Mit dem am IMMS entwickelten energieeffizienten Chip werden Messgrößen mit einer elektrischen Leistung von nur 3,5 Mikrowatt erfasst und digitalisiert. Damit könnte ein entsprechender Sensor aus einer Mignon-Batteriezelle mit einer typischen Kapazität von 1000 mAh mehr als zehn Jahre lang kontinuierlich betrieben werden. Eine

Mehr zu ASIC-Entwicklungen: www.imms.de.

Jahresbericht

Batterie ist dank dieser geringen Leistungsaufnahme jedoch überflüssig: Die RFID-Ausleseeinheit erzeugt ein magnetisches Feld, das dazu ausreicht, den passiven RFID-Chip durch Behälter und Flüssigkeiten hindurch in Abständen von bis zu vier Zentimetern mit Strom zu versorgen sowie Messdaten zu erfassen und zu senden.

Der RFID-Chip vereint hohe Genauigkeit, Energie- und Kosteneffizienz. Der neue digitale RFID-gekoppelte Temperatursensor kann in einem großen Bereich von o°C bis 125°C mit einer systematischen absoluten Genauigkeit von ±0,4°C messen. Das IMMS hat für minimale Kosten unter anderem etablierte CMOS-Technologien genutzt und eine Einzelchip-Lösung mit integriertem Sensor und mit eingebetteter elektronischer Signalverarbeitung entwickelt. An diesen Chip muss daher bis auf die RFID-Antenne keine weitere Komponente angeschlossen werden. Ein direkter Kontakt mit Probenkulturen ist durch biokompatible Materialien sichergestellt.

Das für Temperaturmessungen realisierte Prinzip für batterielose RFID-Sensorik wird derzeit am IMMS auf weitere Messgrößen übertragen. Damit werden sich u.a. weitere Parameter für Tests mit Zellkulturen, Mikroben und Viren überwachen lassen, wie z.B. pH-Wert, Luftfeuchte und gelöster Sauerstoff. Darüber hinaus ist die Entwicklung die Basis für vielfältige Anwendungsentwicklungen über die Bioanalytik hinaus. Beispielsweise ließen sich mit passiver RFID-Sensorik Messdaten für industrielle Fertigungsprozesse erfassen, u.a. für das Monitoring von Kühlschmierstoffen. Darüber hinaus können NFC-fähige Endgeräte als Stromversorgungs- und Ausleseeinheit genutzt werden. Daher wird derzeit eine Demonstrator-App für den Einsatz des RFID-Chips mit Android-basierten Smartphones erarbeitet.

Mehr zu ASIC-Entwicklungen: www.imms.de.

Lösung im Detail

Abbildung 1: RFID-System. Das IMMS hat den RFID-Tag entwickelt. Grafik: IMMS.



RFID-Sensoren

können nicht nur identifizieren, sondern auch Daten erfassen und senden

Dank RFID (Radio Frequency Identification) können elektronische Systeme Objekte automatisch und berührungslos identifizieren und Metadaten dieser Objekte aufzeichnen. Der RFID-Tag enthält einen kleinen Mikrochip, der mit einer Antenne verbunden ist, und wird zur Identifikation an einem Objekt angebracht. Das RFID-Lese- ° gerät kommuniziert mit dem RFID-Tag über magnetische bzw. elektromagnetische Felder. Das Prinzip eines RFID-Systems ist in Abbildung 1 dargestellt.

Jahresbericht

> fast realtime > ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB > in-ovo > Inhalt - * Förderung

RFID wird nicht nur zur Identifikation eines Objekts verwendet, sondern kann auch79zum Lesen und Schreiben von Informationen auf das Funketikett mit Hilfe der RFID-> fast realtimeLesegeräte verwendet werden. Diese spezifische Charakteristik gilt als größter Vorteil> ANCONAgegenüber herkömmlichen Barcodes, bei denen die Daten nach dem Druck nicht> INSPECTmehr verändert werden können. Noch mehr Funktionalität bieten Sensor-fähige> ADMONTRFID-Tags. Diese Sensor-Tags enthalten neben der Identifikations-, Lese- und Schreib-> PTBfunktion Sensoren, mit denen sich gleichzeitig physikalische Parameter, wie z.B. die> in-ovoTemperatur, überwachen lassen.>

> Inhalt

* Förderung

Passive RFID-Sensoren messen ohne Batterien, eine NFC-Kommunikation soll breite Anwendungen erschließen

In der RFID-Technologie gibt es mehrere Frequenzbereiche, von Niederfrequenz über Hoch- und Ultrahochfrequenz bis Mikrowellen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Für das in ADMONT verfolgte Szenario und die Übertragbarkeit auf Industrieanwendungen konzentriert sich das IMMS auf die Entwicklung von RFID-Temperatursensor-Tags im Hochfrequenz (HF)-Bereich bei 13,56 MHz, weil dort die Sensordaten per Smartphone und andere NFC-fähige Geräte ausgelesen und angezeigt werden können.

Im Gegensatz zu aktiven erfolgt bei passiven RFID-Tags im HF-Bereich die Stromversorgung nicht über Batterien, sondern über ein vom Lesegerät erzeugtes Magnetfeld. Dieses Feld induziert in der Antenne des Tags einen Strom, der zur Versorgung genutzt wird, sobald das Tag in der Energiezone des Lesegeräts liegt. Diese Energie muss genügen, um die geforderte Kommunikationsreichweite zwischen Lesegerät und Tag zu gewährleisten.

Da der Datenaustausch zwischen Lesegerät und RFID-Tag über das gleiche Feld erfolgt, kann dies gerade bei passiven Tags mit HF-Kommunikation ungewollte Störsignale, sogenanntes Rauschen, auf der Versorgungsspannung des RFID-Tags erzeugen. Dieses Rauschen kann die Genauigkeit eines integrierten Sensors erheblich beeinträchtigen. Diese Herausforderung war bei der Entwicklung des neuen RFID-Sensor-Tags zu lösen.

> **Abbildung 2:** RFID-Frequenzen und -Typen. Grafik: IMMS.



NFC Near Field Communication (13.56 MHz)



> Inhalt * Förderung

80

> fast realtime
> ANCONA
> INSPECT
> ADMONT
> PTB
> in-ovo

Abbildung 3: Passiver HF-RFID-Tag mit integriertem Temperatursensor (links: Chip-Foto, rechts RFID-Tag mit vergossenem Chip auf der RFID-Antennenspule bei Messungen in einer Flüssigkeit). Fotos: IMMS.

Was ist neu? Passive HF-RFID mit integriertem Temperatursensor

Kommerzielle RFID-Sensoren werden heute aus einzelnen Komponenten aufgebaut: So ist ein Sensorelement, z.B. die für Temperatur, über eine Ausleseelektronik und einen Mikrocontroller an einen RFID-Transponder-Chip angeschlossen. Mit dem am IMMS entwickelten integrierten passiven HF-RFID-Temperatursensor sind all diese Funktionen auf einem Chip vereint. Dadurch lässt sich das Gesamtsystem energetisch optimieren sowie kosteneffizient herstellen und ist für energieautarke, drahtlose Sensorknoten mit kleinstem Bauraum für Life-Science- und andere Anwendungen geeignet. Abbildung 3 zeigt den kompletten passiven HF-RFID-Transponder für die Temperaturmessung in Flüssigkeiten.

Was ist die Herausforderung?

Eine große Herausforderung besteht darin, RFID-Transponder und Temperatursensor auf einem einzigen Chip zu integrieren und dabei in Arbeitsbereiche und Genauigkeiten kommerziell verfügbarer Einzelsensorik vorzudringen. Die meisten RFID-Transponder-ICs mit integriertem Temperatursensor haben eine geringere Genauigkeit als eigenständige Temperatursensoren. Die Genauigkeit der Einzel-Temperatursensoren liegt bei ±0,15°C und der Messbereich bei -55°C bis 125°C. HF-RFID-Lösungen nach dem derzeitigen Stand der Technik, die über integrierte Temperatursensoren verfügen, können nur sehr schmale Temperaturkorridore von ca. 50 – 60 °C abbilden und erreichen dabei eine Genauigkeit von ±0,8 °C. Diese großen Unterschiede zwischen diskreter und integrierter RFID-Sensorik sind vor allem auf das durch die Stromversorgung verursachte Rauschen zurückzuführen. Bei passiven RFID-Systemen werden die Versorgungsspannungen aus der vom HF-Feld entnommenen Energie generiert. Das dabei erzeugte Rauschen kann die Genauigkeit des Sensors erheblich beein-



trächtigen. Einzel-Temperatursensoren werden rauschfrei mit Strom versorgt und sind daher nur während der Kommunikation Interferenzen ausgesetzt. Aus diesem Grund besteht für eine integrierte Lösung eine große Herausforderung darin, das passive RFID-Funksensor-System so zu optimieren, dass Signale rauscharm und energieeffizient aufgenommen und übertragen werden.

Chip-Architektur

Abbildung 4 zeigt das Blockschaltbild des RFID-Chips mit Power-Management-Einheit (PMU), RFID-Frontend, Temperatursensor und digitaler Steuereinheit (DCU). Die PMU nimmt die Energie aus dem vom RFID-Lesegerät erzeugten HF-Feld auf und konvertiert sie in eine stabile regulierte Versorgungsspannung für den gesamten RFID-Sensor-Tag.

Das RFID-Frontend enthält neben der Taktrückgewinnung für die zeitlich genaue Ausrichtung der Datenströme einen Demodulator und einen Modulator, die die Nutzsignale in die jeweils notwendigen Frequenzbereiche umsetzen bzw. zurückwandeln: Der Demodulator konvertiert das modulierte HF-Signal in einen digitalen Bitstream, während der Modulator die Antwort auf das Trägerfrequenzsignal umsetzt.

Die digitale Steuereinheit führt den empfangenen RFID-Befehl aus und sendet die Antwort an den Modulator-Block zur Übertragung an das Lesegerät. Der digitale Block besteht aus einer Kommunikationsprotokoll-Engine und einem flüchtigen Speicher. Der Temperatursensor ist mit dem flüchtigen Speicher verbunden, der über RFID-Befehle beschrieben und ausgelesen werden kann.

Abbildung 4 zeigt außerdem das Blockschaltbild des Time-Domain-basierten Low-Power-Temperatursensors, der aus einem Verzögerungsgenerator und einem Zeit-Digital-Wandler (Time to Digital Converter, TDC) zusammengesetzt ist. Dieser Verzö-

Jahresbericht IMMS 2017



Abbildung 5:

> fast realtime Proportionaler Zusammenhang von Tastverhältnis D und gemessener Temperatur T in °C (bzw. Kelvin) für den für die PWM-Signale maximal verarbeitbaren Temperaturbereich von o - 600 K. Grafik: IMMS.

gerungsgenerator erzeugt ein temperaturabhängiges pulsweitenmoduliertes (PWM-) Signal, das heißt unterschiedlich lange High- und Low-Pulse. Die Verhältnisse der Pulslängen (Duty Cycle) ist direkt proportional zur gemessenen Temperatur, wie in der Abbildung 5 dargestellt. Der TDC wandelt diesen Duty Cycle in einen binärcodierten digitalen Wert. * Förderung

Problem: Das Rauschen wird beim Auslesen des RFID-Tags stärker und verfälscht die Messwerte

Die Versorgungsspannung des RFID-Sensor-Tags wird in mehreren Stufen aufbereitet. Zuerst sorgt ein Gleichrichter (Rectifier) dafür, dass die durch das Magnetfeld induzierte Wechselspannung in eine Gleichspannung gewandelt wird. Die Höhe der Ausgangsspannung des Gleichrichters variiert stark in Abhängigkeit von der relativen Lage des RFID-Sensor-Tags zur Leseeinheit. Der nachgeschaltete Low-Dropout-Regler (LDO) erzeugt die Versorgungsspannung des RFID-Sensor-Tags, indem er die Ausgangsspannung des Gleichrichters auf einen festen Wert regelt. Dennoch kann ein LDO die schnellen durch die RFID-Kommunikation resultierenden Spannungsvariatio-



lahresbericht **IMMS 2017**

Abbildung 6:

Kommunikations- und Power-Management-Spannungen V_{DCA} und V_{DDA} im Chip. Die Signale werden in drei Bereichen angezeigt:

- 1. Ruhe.
- 2: Befehl,
- 3: Antwort.
- Grafiken: IMMS.

> ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB > in-ovo > Inhalt

nen im Frequenzband zwischen 100 kHz und 1 MHz nicht ausreichend ausregeln. Die Versorgungsspannung des Temperatursensors kann daher während der HF-Kommunikation eine hohe Restwelligkeit aufweisen, die den Temperatursensor stark stört.

Abbildung 6 zeigt Simulationsergebnisse für die demodulierten Kommunikationssignale und die Versorgungsspannung auf dem Chip. Es ist zu erkennen, dass sich das RFID-Tag, bevor die Kommunikation startet, in der Ruhephase (1) befindet: Die Ausgangsspannung des Gleichrichters V_{DCA} und die regulierte Ausgangsspannung des LDO V_{DDA} haben eine minimale Restwelligkeit von ca. 25 mV (Peak-to-Peak). Werden Befehle vom RFID-Reader zum -Tag übertragen (2), erzeugt dies Interferenzen auf V_{DCA} und V_{DDA} mit Peak-to-Peak-Amplituden von 300 mV und 540 mV, die im unteren linken Diagramm von Abbildung 6 zu sehen sind. Auch während der Antwortphase vom RFID-Tag zum -Reader (3) sind Interferenzen mit Peak-to-Peak-Amplituden von 150 mV und 120 mV zu sehen, siehe Abbildung 6 unten rechts.

Diese großen Interferenzen auf der Ausgangsspannung des LDOs sind auf den HF-Kommunikations- und Energietransferprozess in passiven RFID-Tags zurückzuführen. Daher wird die Messung des Temperatursensors immer genau dann stark verfälscht, wenn das Lesegerät einen Befehl zum Auslesen der Temperaturdaten sendet.

Lösung: Seriell Messwerte aufnehmen und nur die verwenden,

die nicht durch Kommunikation gestört wurden

Das IMMS hat daher eine Lösung entwickelt, bei der durch einen einzelnen Befehl mehrere Messwerte seriell aufgenommen und übertragen werden können. Abbildung 7 zeigt den zeitlichen Zusammenhang von Auslesebefehl (command), Rauschen auf der Versorgungsspannung (vdda), Sensorausgang (pwm, dataready) und Antwort



fast realtime ANCONA INSPECT ADMONT PTB in-ovo Inhalt * Förderung

83

Jahresbericht

IMMS 2017

des RFID-Sensor-Tags (response) für zwei Fälle: Standard-Auslesen und serielles Auslesen. Beim Standard-Lesebefehl werden die Temperatursensordaten einmalig an das Lesegerät zurückgesendet, wogegen beim seriellen Auslesen mehrere Sätze von Temperatursensordaten an das Lesegerät zurückgesendet werden. In beiden Fällen wurde der Temperatursensor bereits vor dem Auslesebefehl eingeschaltet, was durch die Aktivität des grün dargestellten Signals "pwm" verdeutlicht wird. Immer wenn die Messung abgeschlossen und ein neuer Messwert für die Übertragung zur > in-ovo Verfügung steht, wird dies mit dem Signal "dataready" angezeigt.

Abbildung 7 (a) zeigt, wie die Übertragung des Standard-Auslesekommando den anschließend zu übermittelnden Messwert stört: Durch das erzeugte Rauschen auf der Versorgungsspannung "vdda" innerhalb des Messintervalls kommt es zu einem Fehler bei der steigenden Flanke von "pwm", der das Tastverhältnis verfälscht. Die Antwort des RFID-Temperatursensors ist beim einmaligen Auslesen mittels Standardverfahren daher immer von Interferenzen betroffen.

Abbildung 7 (b) stellt die Antwort auf einen serielles Auslesekommando dar, bei dem mehrere Datensätze des Temperatursensors seriell an das Lesegerät gesendet werden. Es ist zu erkennen, dass die Sensordaten nach der zweiten Antwort nicht durch die Versorgungsinterferenz aufgrund des Auslesebefehls beeinflusst werden, da keine HF-Kommunikation vom Lesegerät stattfindet. Jedoch kommt es bereits ab der zweiten Antwort zu Fehlern durch Versorgungsrauschen, das durch die Kommunikation des Tags während des Antwortens erzeugt wird. Dieses Rauschen hat jedoch wesentlich geringeren Einfluss auf die Messung. Weiterhin kann der RFID-Reader diese verbleibende Ungenauigkeit durch eine nachfolgende Mittelung der seriell übertragenen Werte soweit verringern, dass dieser Effekt die Messgenauigkeit des Gesamtsystems nicht dominiert.

Messung, Charakterisierung und Kalibrierung

Der Vergleich der Messergebnisse ist in Tabelle 1 dargestellt. Er zeigt, dass der Funksensor beim einmaligen Auslesen eine Auflösung von 9,01°C erreicht, für das serielle liegt sie dagegen bei 0,56°C. Das bestätigt, dass Versorgungsstörungen durch Standard-Auslesekommandos die Hauptfehlerquelle für die Sensorauflösung sind. Die serielle Kommunikation verbessert die Genauigkeit um den Faktor 16. Eine voll- 🗢 ständige Messung des integrierten RFID-Temperatursensors wurde in einer Temperaturkammer mit neun Samples des Chips durchgeführt. Nach einer Zweipunktkalibrie-

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

Iahresbericht **IMMS 2017**

> Inhalt

* Förderung

- 84 0
- > fast realtime > ANCONA > INSPECT > ADMONT > PTB



die Messungen auf ±0,4°C genau im Bereich von 0°C bis 125°C. Die Ergebnisse der Charakterisierung sind in Abbildung 8 dargestellt.

Verfahren	Auflösung (°C)	Dominante Fehlerquelle
Standardauslesen	9.01	Versorgungsstörung
Serielles Auslesen	0.56	Sensorrauschen

Tabelle 1: Durch verschiedene Verfahren erreichte Auflösung

Die Sensorkalibrierung wird mit dem Ziel durchgeführt, die Messgenauigkeit des Sensors zu verbessern. Der Anwender setzt den Temperatursensor einer bekannten Temperatur aus, zeichnet den Messwert auf und lässt ihn per Software auf den erwarteten Wert abbilden. Bei der Zweipunkt-Sensorkalibrierung werden zwei bekannte Temperaturen auf den Sensor angewendet, die Reaktion darauf gemessen und die Software aufgefordert, die ursprünglichen Werte auf die neuen kalibrierten Werte umzurechnen. Abbildung 9 zeigt die Messfehler der neun Sensoren (a) vor der Kalibrierung und (b) nach der Zweipunktkalibrierung bei 20°C und 100°C.

Wenn beispielsweise die Temperatur für eine bestimmte Zellkultur über 68°C konstant gehalten werden muss, dann werden die RFID-Sensor-Tags auf eine Genauigkeit von 0,5°C bei 68°C kalibriert. Hätte der Tag dagegen nur eine Genauigkeit von 1°C, könnte der Anwender nicht sicher sein, ob die Temperatur korrekt auf 68°C geregelt wurde.

Mehr zu ASIC-Entwicklungen: www.imms.de.

Die batterielosen HF-RFID-Temperatursensoren haben das Potenzial, die Digitalisierung und Automatisierung gesamter Messprozesse in Life-Science-Anwendungen zu ermöglichen und diese mit Smartphones und anderen gängigen NFC-fähigen Endge-

Jahresbericht IMMS 2017

Ausblick

räten durchzuführen. Darüber hinaus ist der von IMMS entwickelte passive integrier-86 te RFID-Temperatursensor in der Lage, die für IoT- und Industrie-4.o-Anwendungen > fast realtime notwendigen hohen Anforderungen für Ultra-Low-Power(ULP)-Systeme zu bewältigen. > ANCONA Der größte Vorteil ist, dass passive RFID-Sensor-Tags keine Wartung oder Stromver-> INSPECT sorgung benötigen und sich damit einfach in unterschiedliche Anwendungsszenari-> ADMONT en integrieren lassen. Das IMMS konzentriert sich derzeit darauf, die Empfindlichkeit > PTB des Tags und den Stromverbrauch des Chips zu verbessern. Darüber hinaus entwi-> in-ovo ckelt das IMMS im Projekt ADMONT auch einen modularen RFID-Brücken-ASIC für den Anschluss unterschiedlicher kommerzieller Sensoren mit Standardschnittstellen, um > Inhalt vielfältige Sensor-Anwendungsszenarien zu adressieren.

Kontakt:

Muralikrishna Sathyamurthy, M.Sc. MBA, muralikrishna.sathyamurthy@imms.de



Die Arbeiten im Verbundprojekt ADMONT werden als industrielle Forschung (Innovation Action) im ECSEL-Programm als Teil des Forschungsrahmenprogramms Horizont 2020 durch die Europäische Union und das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 661796 gefördert, das Teilvorhaben des IMMS "Entwurf intelligenter in-vitrodiagnostischer und bioanalytischer Sensor- und Aktorsysteme" unter dem Kennzeichen 16ESE0057.

* Förderung ADMONT auf

0

www.imms.de.

G