



RoMulus – UHF RFID chip for battery-free operation of commercial sensors in I4.0 applications

Carrying out measurements on the energy-efficient UHF RFID sensor transponder chip. This chip is for operating without use of a battery a variety of commercially available digital I²C sensors requiring varied power levels. Photograph: IMMS.

Objectives and overview

Wireless sensors: key to success for Industry 4.0

Value creation is increasingly shifting from production to data-based services and platforms which will align processes and business interactions. Small and medium-sized industrial companies in particular face the challenge of securing their global competitiveness in the future not only through high-quality products and process excellence, but also through creation of new value-added services and digital business models. Core technologies such as sensors for data acquisition and wireless networking are necessary to implement these solutions. For many applications, wireless mobile sensors are essential, especially when retrofitting existing systems. IMMS has therefore researched and developed an innovative solution that combines sensors with RFID systems at low cost and without batteries, thus opening up a wide range of industrial applications.

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

*More on
RoMulus at
www.imms.de*

UHF RFID systems for longer range and parallel identification

Typically, RFID systems consist of one or more transponders (also known as tags), and at least one reader, which communicates with the surrounding RFID tags by

*Annual Report
© IMMS 2018*

means of an RF (radio frequency) field. They answer with their unique identification number, enabling access checks and tracking. UHF RFID systems work, as the name suggests in the ultra-high frequency (UHF) waveband, usually between 860 and 960 MHz and they rely on the principles of far-field radiated coupling and of back-scattering. UHF RFID tags are thus capable of communicating with the reader over a much greater distance (up to five metres) than the magnetic-field-coupled high-frequency (HF) RFID tags. These tags, operating at a frequency of only 13.56 MHz, will only communicate over a few centimetres. Thanks to their high data transmission rate, UHF RFID systems are ideal for applications in which several objects must be read at the same time. They are therefore already well established in industrial environments, e.g. for tracking goods.

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

UHF RFID sensor systems not only for identification but also for reading out measured sensor values

If sensors are integrated directly into these UHF RFID systems, numerous industrial 4.0 application scenarios are possible. Standard protocols allow existing infrastructure to be reused with readers. The sensor data is read out using the same address range in which additional product information is stored.

Lack of energy-efficient, self-powered, flexible transponder architectures

If these UHF RFID sensor systems can be operated passively, i.e. only with the energy from the reader, they can be used for applications where batteries or wired systems are out of the question, e.g. on rotating parts. For this, energy-efficient solutions are necessary.

The state-of-the-art solution involves RFID sensor transponder ICs designed for specific applications, in which the sensor is integrated directly into the RFID chip in order to optimise energy efficiency, functionality and sensor accuracy. These ICs are not flexible enough for widespread use in several application scenarios at once.

However, most commercial RFID sensor systems are discreetly built from classic RFID transponder ICs, microcontrollers (MCUs) and individual sensor ICs. Most of the energy that can be generated from the reader is consumed by the microcontroller, which limits the range and thus the application scope.

UHF RFID chip to operate commercial sensors without battery

In this regard, IMMS has developed an energy-efficient UHF RFID transponder chip which enables different types of commercially available digital I²C sensors requir-



Figure 1:
UHF RFID transponder with IMMS-developed UHF RFID sensor transponder chip (centre) and temperature sensor (bottom right) for wireless measurements. Photograph: IMMS.

ing varied power levels to be operated on a passive basis.

In this case, the chip is equipped with a flexible on-chip I²C master and a power management unit which can be individually configured. The developed chip requires no maintenance or power supply and can therefore be easily integrated into various products, machines and objects in a wide variety of application scenarios for sensor data acquisition. Such an RFID transponder IC was previously not available.

The IMMS solution in detail

Starting point: how to overcome disadvantages of existing discrete solutions

In commercial RFID sensor systems as they have been constructed to date, the sensor operations are managed by the MCU by means of SPI (serial peripheral interface) or I²C. This means that the MCU is the master and the RFID transponder tag IC and the sensors are all slaves. There are three main disadvantages to such systems.

1. **Energy efficiency:** most of the energy available is used up by the MCU, which requires approx. 100 µA/MHz. In contrast to HF RFID, UHF RFID transponders work on a very tight energy budget because there is very little far-field energy and the efficiency of the energy extraction is very low (approx. 30 – 40%). The communications range and the reading reliability of the RFID sensor are strongly limited by the microcontroller.
2. **Flexibility:** Sensor operation is not controlled directly by the RFID reader, but by the MCU. The firmware of the MCU must be programmed sensor-specifically, based on the start time, the energy consumption and the measuring period. This brings complexity and additional effort to the development and design of RFID sensors.
3. **Cost efficiency:** the MCU including the external components which it requires accounts for a high proportion of the overall cost of the RFID sensor.

New approach: Transponder architecture without microcontroller

New transponder architectures were required in order to operate digital sensors without MCUs and to overcome the aforementioned disadvantages. IMMS has there-

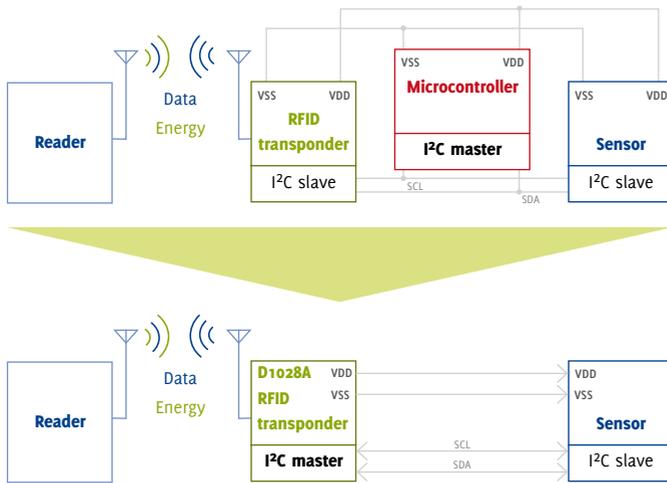


Figure 2:

Top: In conventional discrete RFID sensor systems, the sensors (slave) are controlled by the microcontroller as master.

Bottom: The microcontroller is no longer necessary in the case of RFID sensor systems using the new RFID transponder IC D1028A with an integrated (on-chip) master. Diagram: IMMS.

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

fore developed a new RFID transponder IC with integrated (on-chip) master in the RoMulus project (Figure 2). The master-slave communications is controlled directly by the RFID reader by writing the I²C communications information into the command registers in the transponder memory. This information is used by the on-chip I²C master to initiate the I²C transactions with the external sensors.

The IMMS RFID sensor transponder IC with I²C master

The IMMS-developed EPC-C1-G2-compatible UHF RFID sensor transponder IC can be used with the flexible on-chip I²C master and the configurable power management unit, which can supply a regulated voltage for various external sensors up to 1.8 V at a maximum current of 1 mA. The on-chip I²C master block eliminates the need for a microcontroller for read/write operations with external sensors. This reduces the power consumption of the overall system and the number of external components required to build an RFID sensor transponder.

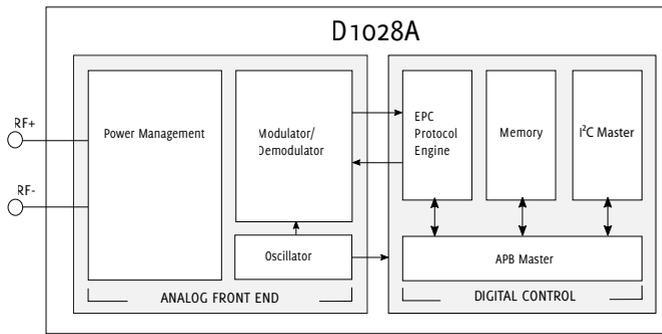
The chip also offers the following configuration options: multiple read and write operation; combined read and write operation (write information to start sensor operation and read back acquired data after operation); start delay (time to start sensor); delay between two consecutive I²C writes (required when writing information to external non-volatile memory). The architecture of the chip is shown in Figure 3.

More on chip developments:
www.imms.de

Energy storage and power consumption flow

Unique to the developed chip is the flexible power management, with which stable communications with the external I²C sensors is achieved. It provides stable voltag-

Annual Report



Architecture of the RFID transponder IC developed at IMMS with the codename D1028A.

Diagram: IMMS.

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

es not only for the internal circuits, but also for the external sensors. The chip uses an external capacitor to automatically store energy while the sensor transponder is in the reader's energy field. When the required energy for system and sensor operation is reached, an internal interrupt signal "Power_OK" is initiated. From this point on, operation of the connected I²C slave chips can be initiated. The charging process of the external capacitor, the read/write sequence and the delay between two commands can be configured via standard read/write commands to take into account the types and differences in power consumption of commercially available sensors. Power management and power consumption flow with external I²C sensor are shown in Figure 4.

More on energy efficiency at www.imms.de.

Measurement and characterisation

The RFID sensor transponder IC was developed in standard X-FAB 0.18 μm technology. An evaluation board with embedded antenna for the measurement and characterisa-

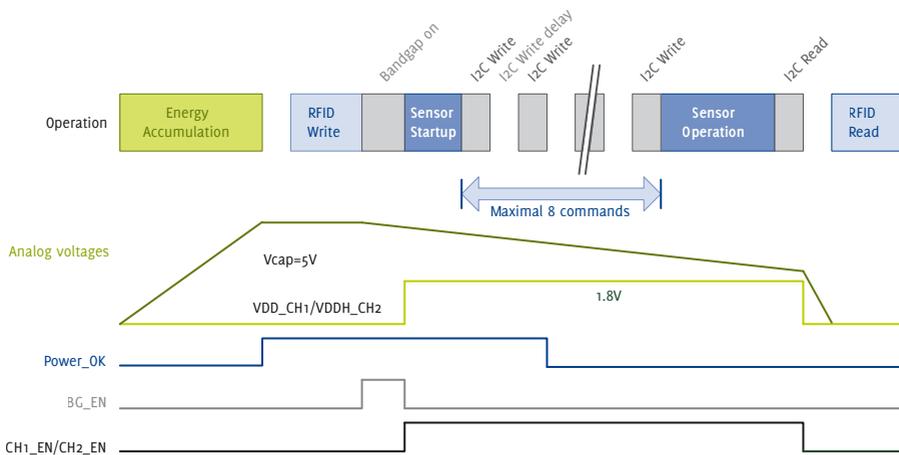


Figure 4: Power management and flow of energy consumption in the RFID transponder IC with external I²C sensor. Diagram: IMMS.

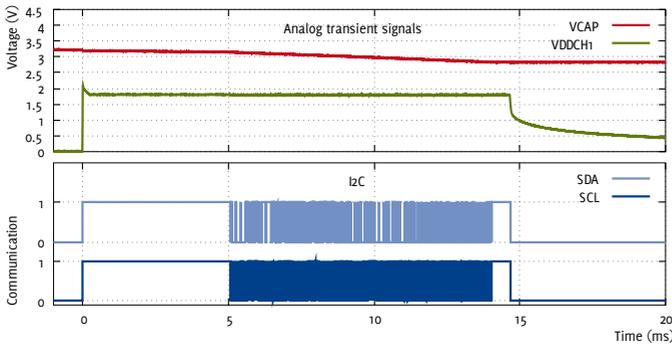


Figure 5:

In I²C operation, the RFID transponder IC supplies a stable voltage of 1.8V. The measured values confirm the functionality of the power management and the communications with an external I²C slave IC.

Diagram: IMMS.

tion of the chip was developed. For functional testing of power management and I²C communications, a commercially available I²C slave IC was connected to the transponder IC. During I²C operation, the chip supplied a stable voltage of 1.8V. The measured values shown in Figure 5 confirm the functionality of the power management and the communications with an external I²C slave IC.

Future prospects: digital added-value thanks to RFID-based sensors

The UHF RFID transponder IC developed by IMMS provides industry with a basis for developing innovative products for wireless sensor data acquisition and achieving competitive advantages with new data-driven business models. Following the measurements and the successful evaluation of the proof-of-concept, IMMS is currently working on a redesign of the chip to make it available to its industrial customers for the development of wireless products. Value creation based on sensor data will play an important role for industry in the future. IMMS is, therefore, constantly working with its strategic industry partners in developing innovative energy-saving and efficient chips.

Contact person:

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

We thank microsensys, our business partner, for the many discussions we have had on the practical specifications for the ASIC, also for the ensuing product development and for the constructive collaboration in the context of the RoMulus project.

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research

The RoMulus project has been supported within the Research Programme ICT 2020 by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the reference 16ES0362. Only the author is responsible for the content of this publication.

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

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

More on
Industry 4.0 at
www.imms.de

All RoMulus
publications:
www.imms.de.



RoMulus – UHF-RFID-Chip zum batterie- losen Betrieb kommerzieller Sensoren in I4.0-Anwendungen

Messungen am energieeffizienten UHF-RFID-Sensor-Transponder-Chip. Mit ihm lassen sich verschiedene Arten handelsüblicher digitaler I²C-Sensoren mit unterschiedlichem Leistungsbedarf batterie-los betreiben. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Drahtlose Sensoren sind eine Schlüsselkomponente für den Erfolg von Industrie 4.0

Die Wertschöpfung verlagert sich zunehmend von der Produktion zu datenbasierten Dienstleistungen und Plattformen, um Prozesse und das Zusammenspiel von Unternehmen abzustimmen. Vor allem kleine und mittlere Industriebetriebe stehen vor der Herausforderung, ihre globale Konkurrenzfähigkeit in Zukunft nicht nur durch hohe Produktqualität und Prozess-Exzellenz, sondern auch durch neue Wertschöpfungsnetzwerke und digitale Geschäftsmodelle zu sichern. Um diese technisch zu realisieren, sind Kerntechnologien wie Sensorik zur Datenerfassung und drahtlose Vernetzung notwendig. Für viele Anwendungen sind viele mobile Sensoren ohne Verkabelung unerlässlich, insbesondere bei der Nachrüstung von Bestandsanlagen. Das IMMS hat daher Lösungen erforscht und entwickelt, die Sensorik mit RFID-Systemen kostengünstig und batterie-los verbindet und damit verschiedene industrielle Anwendungen erschließt.

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

*Mehr zu
RoMulus auf
www.imms.de*

UHF-RFID-Systeme für größere Reichweiten und parallele Identifikationen

Ein typisches RFID -System besteht aus einem oder mehreren Transpondern (Tags) und mindestens einem Lesegerät. Dieses kommuniziert über ein hochfrequentes (HF),

*Jahresbericht
© IMMS 2018*

engl. RF) Feld mit den umgebenden RFID-Tags. Diese antworten mit ihrer eindeutigen Identifikationsnummer und dienen der Nachverfolgung und Zugangskontrolle. UHF-RFID-Systeme arbeiten im UHF-Band (Ultra High Frequency) in der Regel im Frequenzbereich von 860 bis 960 MHz und verwenden die Prinzipien der Fernfeld-Strahlungskopplung und des Backscattering. UHF-RFID-Tags bieten so mit bis zu fünf Metern eine viel größere Lesereichweite als magnetfeldgekoppelte HF-Tags, die bei 13,56 MHz lediglich im Zentimeterbereich kommunizieren. UHF-RFID-Systeme sind dank ihrer hohen Datenübertragungsrate ideal für Anwendungen, bei denen mehrere Objekte gleichzeitig ausgelesen werden müssen. Sie sind daher im industriellen Umfeld bereits vielfältig etabliert, z.B. um Waren zu erkennen.

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

UHF-RFID-Sensorsysteme liefern neben der Identifikation auch Messdaten

Bindet man in diese UHF-RFID-Systeme Sensoren ein, sind weitaus mehr Industrie-4.0-Applikationsszenarien möglich. Durch Standard-Protokolle kann bereits vorhandene Infrastruktur mit Lesegeräten weiterverwendet werden. Die Sensordaten werden hierbei über den Adressbereich ausgelesen, in dem sich zusätzliche Produktinformationen speichern lassen.

Energieeffiziente, flexible Transponder-Architekturen für batterielosen Betrieb fehlen

Kann man nun diese UHF-RFID-Sensorsysteme passiv, also nur mit der Energie aus dem Lesegerät, betreiben, lassen sie sich für Anwendungen nutzen, wo Batterien oder kabelgebundene Systeme nicht in Frage kommen, wie z.B. an rotierenden Teilen. Hierfür sind energieeffiziente Lösungen notwendig.

Stand der Technik sind dabei auf spezifische Anwendungen ausgelegte RFID-Sensor-Transponder-ICs, bei denen der Sensor direkt im RFID-Chip *integriert* ist, um Energieeffizienz, Funktionalität und Sensorgenauigkeit innerhalb des ICs zu optimieren. Für den breiten Einsatz in mehreren Anwendungsszenarien sind diese ICs nicht flexibel genug.

Die meisten kommerziellen RFID-Sensorsysteme werden jedoch aus klassischen RFID-Transponder-ICs, Mikrocontrollern (MCU) und einzelnen Sensor-ICs *diskret* aufgebaut. Die meiste Energie, die aus dem Lesegerät gewonnen werden kann, verbraucht der Mikrocontroller, was die Reichweite und damit die Anwendungsbreite einschränkt.

UHF-RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren

Das IMMS hat daher einen energieeffizienten UHF-RFID-Transponder-Chip entwickelt. Mit ihm lassen sich verschiedene Arten handelsüblicher digitaler I²C-Sensoren mit



Abbildung 1:
UHF-RFID-Transponder mit dem am IMMS entwickelten UHF-RFID-Sensor-Transponder-Chip (Mitte) und Temperatursensor (unten rechts) für drahtlose Messungen. Foto: IMMS.

unterschiedlichem Leistungsbedarf passiv betreiben. Hierfür ist der Chip mit einem flexiblen On-Chip-I²C-Master und einer konfigurierbaren Power-Management-Einheit ausgestattet. Der entwickelte Chip benötigt keine Wartung oder Stromversorgung und kann so problemlos in verschiedene Produkte, Maschinen und Objekte in den unterschiedlichsten Anwendungsszenarien zur Sensordatenerfassung eingebunden werden. Ein solcher RFID-Transponder-IC war bisher nicht verfügbar.

Lösung im Detail

Ausgangspunkt: Nachteile etablierter diskreter Lösungen überwinden

In diskret aufgebauten kommerziellen RFID-Sensorsystemen werden die Sensoroperationen vom Mikrocontroller per SPI oder I²C gesteuert, d.h. die MCU agiert als Master und der RFID-Transponder-IC sowie die Sensoren operieren als Slave. Solche Systeme haben drei wesentliche Nachteile bezüglich:

1. **Energieeffizienz:** Der Großteil der verfügbaren Energie wird von der MCU mit ca. 100 μ A/MHz verbraucht. Im Gegensatz zu HF-RFID haben UHF-RFID-Transponder ein sehr knappes Energiebudget, da die Fernfeldenergie sehr klein und der Wirkungsgrad der Energieextraktion mit ca. 30 – 40 % sehr niedrig ist. Die Kommunikationsreichweite und die Lesezuverlässigkeit des RFID-Sensors werden durch den Mikrocontroller stark limitiert.
2. **Flexibilität:** Der Sensorbetrieb wird nicht direkt durch das RFID-Lesegerät, sondern durch die MCU gesteuert. Die Firmware der MCU muss Sensor-spezifisch programmiert werden basierend auf der Startzeit, dem Energieverbrauch und dem Messzeitraum. Das bringt Komplexität und zusätzlichen Aufwand bei der Entwicklung und dem Aufbau der RFID-Sensoren mit sich.
3. **Kosteneffizienz:** Die MCU inklusive der für sie benötigten externen Bauelemente macht einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten des RFID-Sensors aus.

Lösungsansatz: Transponder-Architektur ohne Mikrocontroller

Es bedurfte neuer Transponder-Architekturen, um digitale Sensoren ohne MCU betreiben und die genannten Nachteile überwinden zu können. Das IMMS hat daher

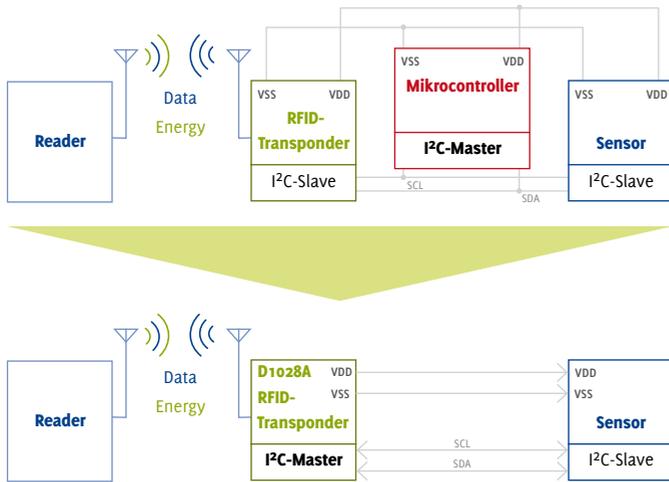


Abbildung 2:

Oben: In herkömmlichen diskret aufgebauten RFID-Sensorsystemen werden die Sensoren (Slave) vom Mikrocontroller als Master gesteuert.

Unten: In RFID-Sensorsystemen mit dem neuen RFID-Transponder-IC D1028A mit integriertem (on-chip) Master ist kein Mikrocontroller mehr notwendig. Grafik: IMMS.

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

im Projekt RoMulus einen neuen RFID-Transponder-IC mit integriertem (on-chip) Master entwickelt (Abbildung 2). Die Master-Slave-Kommunikation wird direkt durch das RFID-Lesegerät mittels Schreiben der I²C-Kommunikationsinformationen in die Befehlsregister im Transponderspeicher gesteuert. Diese Informationen werden vom On-Chip-I²C-Master verwendet, um die I²C-Transaktionen mit den externen Sensoren zu initiieren.

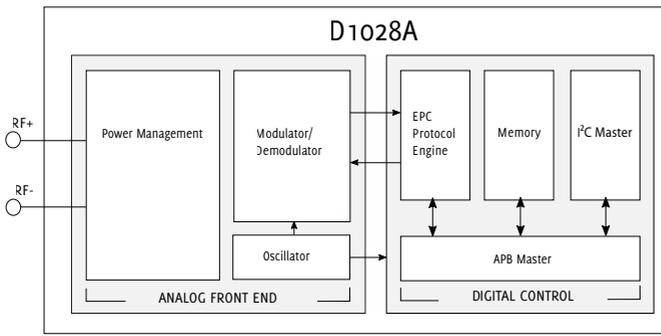
RFID-Sensor-Transponder-IC des IMMS mit I²C-Master

Der vom IMMS entwickelte EPC-C1-G2-kompatible UHF-RFID-Sensor-Transponder-IC kann dank des flexiblen On-Chip-I²C-Masters und der konfigurierbaren Power-Management-Einheit eine regulierte Spannung für verschiedenartige externe Sensoren bis zu 1,8 V bei einem maximalen Strom auf 1 mA liefern. Durch den On-Chip-I²C-Masterblock ist ein Mikrocontroller für Lese-/Schreiboperationen mit externen Sensoren nicht notwendig. Dies senkt den Stromverbrauch des Gesamtsystems und die Anzahl der externen Komponenten, die zum Aufbau eines RFID-Sensortransponders benötigt werden.

Weiterhin bietet der Chip folgende Konfigurationsmöglichkeiten: mehrfacher Lese- und Schreibbetrieb; kombinierter Lese- und Schreibbetrieb (Schreibinformationen zum Starten des Sensorbetriebs und Zurücklesen der erfassten Daten nach dem Betrieb); Startverzögerung (Zeit für das Starten des Sensors); Verzögerung zwischen zwei aufeinanderfolgenden I²C-Schreibvorgängen (erforderlich beim Schreiben von Informationen in einen externen nichtflüchtigen Speicher). Die Architektur des Chips ist in Abbildung 3 dargestellt.

Mehr zu Chip-Entwicklungen:
www.imms.de

Abbildung 3:



Architektur des am IMMS entwickelten RFID-Transponder-ICs mit der Bezeichnung D1028A.

Grafik: IMMS.

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

Energiespeicherung und Verbrauchsfluss

Einzigartig am entwickelten Chip ist das flexible Power Management, mit dem eine stabile Kommunikation mit den externen I²C-Sensoren erreicht wird. Es liefert stabile Spannungen nicht nur für die internen Schaltungen, sondern auch für die externen Sensoren. Der Chip nutzt einen externen Kondensator, auf dem automatisch Energie gespeichert wird, während sich der Sensortransponder im Energiefeld des Lesegeräts befindet. Wenn die erforderliche Energie für den System- und Sensorbetrieb erreicht ist, wird ein internes Interrupt-Signal "Power_OK" initiiert. Ab diesem Zeitpunkt kann der Betrieb der verbundenen I²C-Slave-Chips eingeleitet werden. Der Ladevorgang des externen Kondensators, die Schreib-/Lesesequenz und die Verzögerung zwischen zwei Befehlen sind über Standard-Lese-/Schreibbefehle konfigurierbar, um die Art und den unterschiedlichen Stromverbrauch von handelsüblichen Sensoren zu berücksichtigen. Das Power Management und der Energieverbrauchsfluss mit externem I²C-Sensor sind in der Abbildung 4 dargestellt.

Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de

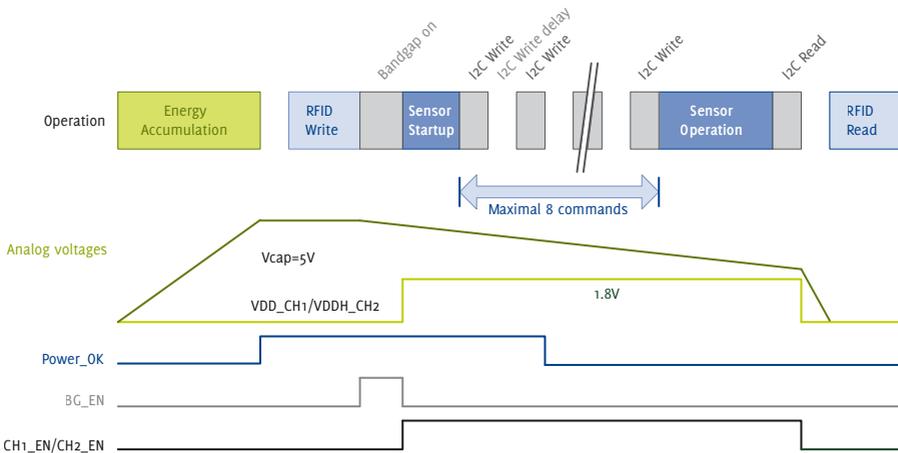


Abbildung 4: Power Management und Energieverbrauchsfluss des RFID-Transponder-ICs mit externem I²C-Sensor. Grafik: IMMS.

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

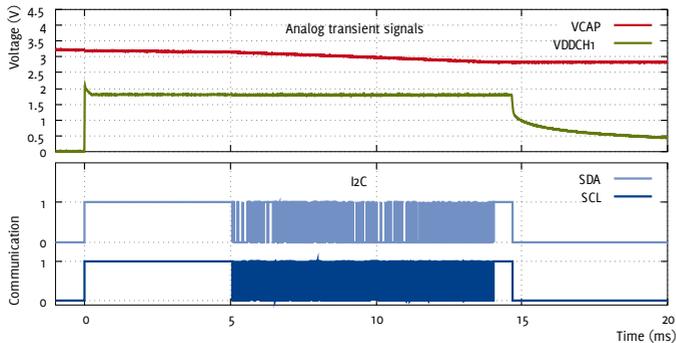


Abbildung 5:
Der RFID-Transponder-IC liefert eine stabile 1,8 V-Spannung für den I²C-Betrieb. Die Messergebnisse bestätigen die Funktionalität des Power Managements und der Kommunikation mit einem externen I²C-Slave-IC.
Grafik: IMMS.

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

Messung und Charakterisierung

Der RFID-Sensor-Transponder-IC ist in einer 0,18- μ m-Standardtechnologie von X-FAB entwickelt worden. Für die Messung und Charakterisierung des entwickelten Chips hat das IMMS eine Evaluierungsplatine mit eingebetteter Antenne entwickelt. Um den Funktionstest des Power Managements und der I²C-Kommunikation durchzuführen, wurde ein kommerzieller I²C-Slave-IC mit dem Transponder-IC verbunden. Der Chip lieferte eine stabile 1,8 V-Spannung für den I²C-Betrieb. Die in der Abbildung 5 dargestellten Messergebnisse bestätigen die Funktionalität des Power Managements und der Kommunikation mit einem externen I²C-Slave-IC.

Mehr zu Test
und Charakterisierung:
www.imms.de

Ausblick: Digitale Wertschöpfung dank RFID-basierter Sensorik

Der von IMMS entwickelte UHF-RFID-Transponder-IC bietet für die Industrie eine Grundlage, innovative Produkte zur drahtlosen Sensordatenerfassung zu entwickeln und mit neuen datengesteuerten Geschäftsmodellen Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Nach den Messungen und der erfolgreichen Auswertung des Proof-of-Concept arbeitet das IMMS derzeit an einem Redesign des Chips, um es seinen Industriekunden für die Entwicklung drahtloser Produkte zur Verfügung zu stellen. Die Wertschöpfung auf Basis von Sensordaten wird für die Industrie in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Daher arbeitet das IMMS ständig mit seinen strategischen Industriepartnern zusammen, um innovative energiesparende und effiziente Chips zu entwickeln.

Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de

Kontakt:

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

Alle RoMulus-
Publikationen:
www.imms.de

Wir danken unserem Partner microsensys für die vielen Diskussionen zu praktischen Anforderungen an den ASIC sowie an nachfolgende Entwicklungen von Produkten und für die konstruktive Zusammenarbeit im Projekt RoMulus.

Das Projekt RoMulus wurde unter dem Förderkennzeichen 16ES0362 im Förderprogramm IKT 2020 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.



GEFÖRDERT VOM