

## Scalable ultrasonic and volume flow sensor platform

### to optimise energy efficiency

Working on the electronics for an automatable sensor solution to use compressed air in industry in an energy-efficient way. Photograph: IMMS.

#### Motivation and overview

Compressed air leaks cause the most energy losses in industry. Up to 10% of electrical energy is used just to generate compressed air. 30% of this is lost on average due to leaks. Due to this it is very important to find leaks, evaluate losses and initiate maintenance measures. To use compressed air for industrial processes in an energy-efficient way, IMMS, together with the companies Sonotec GmbH and Postberg + Co. GmbH, has developed an automatable sensor solution for leakage detection and evaluation, with which compressed air systems can be retrofitted. This simplifies repair and maintenance decisions and significantly increases energy efficiency. The product will be launched on the market by Sonotec GmbH in 2022.

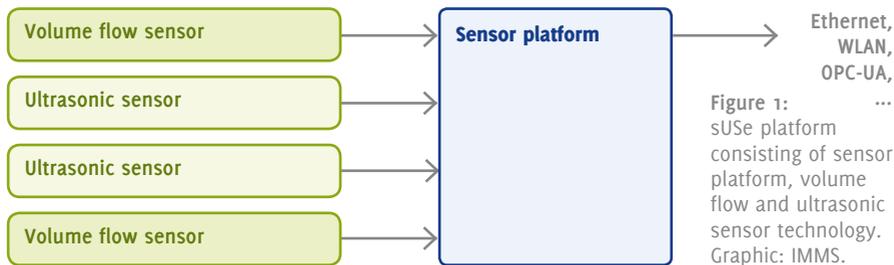
#### Functionality of the overall system

The sUSE platform is an integrated monitoring system consisting of multiple, distributed, connected and permanently installed ultrasonic and volume flow sensors, which can be used to monitor and evaluate the energy efficiency of the compressed air systems (Figure 1). On the one hand, the volume flow, i.e. the integral quantity

More on  
sUSE auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Annual report

© IMMS 2020



of compressed air, is measured with corresponding sensors at various points in the system and related to the quantity fed into the compressed air system. On the other hand, leaks are acoustically located and evaluated by the ultrasonic sensors. They are also distributed in the compressed air system and according to the relative arrangement to each other it is possible to locate the leak. From the combined data of total volume flow and identified leakage points, the proportions of leakage on the losses of compressed air can be determined precisely.

### IMMS contribution: Electronics platform, signal processing and communications

IMMS has developed a high-performance and scalable electronics platform for the digital processing of sensor data.

In order to be able to precisely allocate shares of leakage points in the compressed air loss, the data of total volume flow and many ultrasonic sensors distributed over the system must be combined. Since the compressed air for many applications, such as for various actions of an industrial robot, is supplied at changing points in different quantities, the sUSE platform and all associated sensors must operate time-synchronously. Therefore, IMMS took a modular approach in designing the hardware components and connected the sensors using programmable logic devices (FPGA) to ensure the real-time capability of the system.

This edge platform for decentralised data processing is used for each measurement point of the monitoring system. To be able to adapt the sensors very flexibly for customer-specific tasks without a need for hardware changes, IMMS developed the components for signal processing using a model-based design technology and implemented the application algorithms for FPGA integration on this basis. For an integration into maintenance systems, suitable communications interfaces and protocols were implemented and the corresponding communications capability of the wireless sensors was established.

The platform consists of a mainboard with integrated central processing unit (CPU), an FPGA and attachable sub-modules. In addition to the ultrasonic and volume flow sensors developed by the project partners, it should also be possible to integrate other commercially available sensors, such as pressure, temperature and acceleration sensors. To this end, preliminary investigations have been carried out and the transmission protocols and interfaces for integrating the sensors have been specified.

### Mainboard

IMMS has investigated and compared available CPU modules for the mainboard. To minimise development effort and hardware costs, a Phycore iMx8M SoM (system on module) from Phytec was selected. It contains an iMx8 CPU, memory (LPDDR4 Ram and EMMC) and can optionally be equipped with a wireless module (WLAN, Bluetooth).

Another component of the mainboard is an FPGA, with which the interfaces to the sub-modules can be adapted to the specific application. The acquired signals from the sensors are further processed in the FPGA. Thus, level calculations, FFT and data compression can be performed. The data is then transferred to the CPU via a PCIe connection.

Furthermore, an M.2 connector has been applied to the board, which can be used to expand the system with additional components, such as the AI hardware accelerator "Google Coral AI Accelerator".

### Sub-Basic

The base module is plugged onto the main board to implement power supply, communications interfaces (Ethernet, USB 3.0, RS485(Modbus)) and digital IO.

The power supply was designed for an input voltage range of 7 to 36 V. A circuit protects the downstream electronics from overvoltage, overcurrent and against reverse polarity of the supply voltage. The 5V system voltage generated in this way is then fed to the mainboard via a connector.

As communications interfaces, the Ethernet and USB 3.0 signals of the System-on-Module were routed to corresponding connectors. Furthermore, two galvanically isolated RS485 transceivers were integrated. Thus Modbus communications can be implemented.

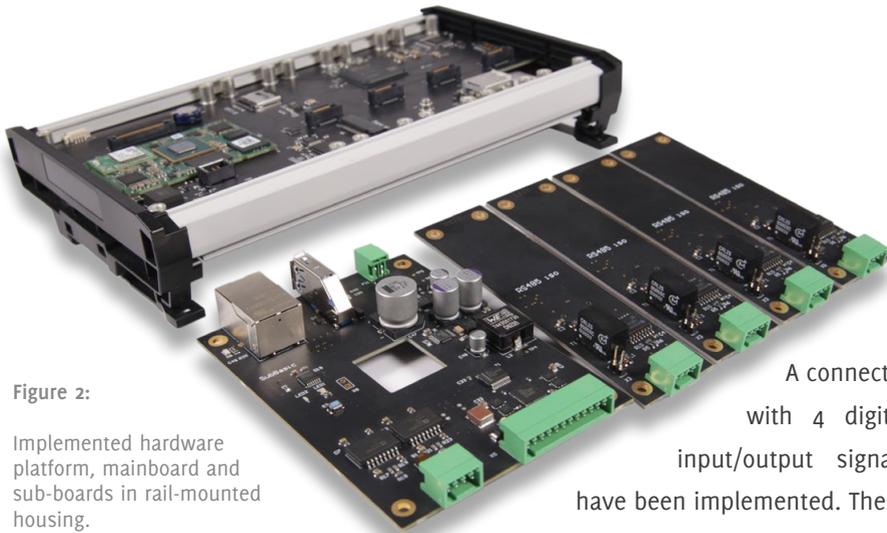


Figure 2:

Implemented hardware platform, mainboard and sub-boards in rail-mounted housing.  
Photograph: IMMS.

A connector with 4 digital input/output signals have been implemented. These are galvanically isolated and allow an integration into existing systems.

### Sub-communications modules

As the first communications modules, an RS485 and an LVDS module were designed to connect all sensors developed and used in the project to the platform. To increase noise immunity, communications and voltage supply of the sensors are galvanically isolated.

### FPGA

With the FPGA the interfaces to the sensors are realized, the sensor data are pre-processed by FFT and level calculation and the data are buffered and forwarded to the CPU. The FPGA firmware can be adapted according to the application and the modules used.

FPGA and CPU communicate via a PCIe connection. Data is written to a buffer in the FPGA and then transferred to the CPU's memory using Direct Memory Access (DMA). Several available PCIe IP cores were evaluated and the XDMA subsystem for PCIe was implemented.

### Sensor technology

The concept allows a number of sensor types to be connected, which can be used separately or in parallel (e.g. for real-time correlation) or towards data fusion. Digital sensors are ideal for the concept.

### Board Support Package (BSP)

Based on the existing Board Support Package for the Phycore iMx8M SoM module, an appropriate adapted version was created that contains all software components required for the sensor platform. The Yocto distribution builder is used to create the BSP. Yocto is a framework that allows extremely flexible (Linux) distributions to be created from the source code of all the contained components. The information needed for this is organised in layers in the Yocto framework. This permits a fine grained control to adjust the created distribution to the necessary requirements. Accordingly, a sUSE layer was added to the existing layers. This layer contains the SOM configuration, presets for various software packages, build instructions for software not yet included in the other layers, etc.

In addition, support for the RAUC project (Robust Auto-Update Controller) has been added via another Yocto layer. With the help of the RAUC project, system updates can be performed in a very flexible, robust and tamper-proof way. For the sensor platform, RAUC has been configured so that a complete system update can be performed at runtime via redundant bootloader and rootfs partitions. This process is secured using digital signatures. Furthermore, it is also possible to perform the initial installation of the system software via the RAUC update mechanism. In addition, thanks to integration in the Yocto build process, RAUC update files are generated automatically.

### Driver

For the data exchange between CPU and FPGA via PCIe, different drivers are necessary, which put into practice the different levels of interface communications. On the one hand there is a driver for the PCI host controller used in the SoC, which is already available in the Linux kernel. On the other hand a driver which controls the data exchange with DMA as well as its synchronization is required. An official driver for this purpose is provided by the manufacturer for the FPGA PCIe core.

However, various tests and research have shown that this driver does not allow reliable data exchange, especially on architectures other than i686. Therefore, IMMS has modified a community project, which provides a derived driver, and integrated it into the BSP. In addition, test programs have been created that allow recording data supplied by the FPGA via the PCIe interface.

- > *Integrated sensor systems*
- > *Distributed measurement + test systems*
- > *Mag6D nm direct drives*
- > *Contents*
- \* *Funding*

## Outlook

The Edge platform was primarily developed to optimise energy efficiency in compressed air systems. Here, the sensor platform can be used as a retrofit solution to permanently monitor the compressed air at industrial plant and machine parts, improve energy efficiency and thus contribute to reducing CO<sub>2</sub> emissions. However, the modular approach of the platform also makes it easy to use in other application scenarios, such as predictive maintenance.

In the next step, the system will be integrated and evaluated in industrial machinery and the use of the platform in other application fields will be demonstrated. The product will be launched on the market by Sonotec GmbH in 2022.

**Contact person:** Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, [tino.hutschenreuther@imms.de](mailto:tino.hutschenreuther@imms.de)

Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag

The sUSE project was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy on the basis of a resolution of the German Bundestag under the reference ZF4085709P08.



## Skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform

### für die Optimierung der Energieeffizienz

Arbeiten an der Elektronik für eine automatisierbare Sensorlösung, um Druckluft in der Industrie energieeffizient zu nutzen. Foto: IMMS.

#### Motivation und Überblick

Druckluftlecks verursachen die meisten energetischen Verluste in der Industrie. Bis zu 10% der elektrischen Energie werden dort allein dafür verwendet, Druckluft zu erzeugen. 30 % davon gehen durchschnittlich aufgrund von Leckagen verloren. Umso wichtiger ist es, Lecks zu finden, Verluste zu bewerten und daraus Maßnahmen für die Instandhaltung einzuleiten. Um Druckluft für Industrieprozesse energieeffizient zu nutzen, hat das IMMS gemeinsam mit den Firmen SONOTEC GmbH und Postberg+Co. GmbH eine automatisierbare Sensorlösung zur Leckageortung und -bewertung entwickelt, mit der sich Druckluftsysteme nachrüsten lassen. Mit der skalierbaren Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform sUSe werden Entscheidungen zu Reparaturen und Instandhaltung vereinfacht und die energetische Effizienz deutlich gesteigert. Das Produkt wird im Jahr 2022 von der SONOTEC GmbH in den Markt gebracht.

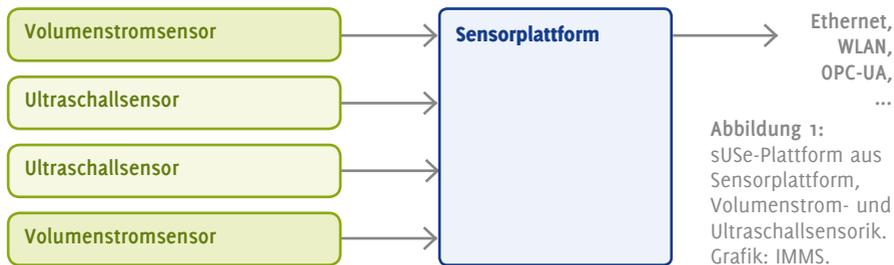
*Mehr zu  
sUSe auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)*

#### Funktionsweise des Gesamtsystems

Die sUSe-Plattform ist ein ganzheitliches Monitoring-System, welches aus mehreren, über ein Druckluftsystem verteilten drahtlos vernetzten und fest installierbaren

*Jahresbericht*

© IMMS 2020



Ultraschall- und Volumenstrom-Sensoren besteht, mit denen sich die Energieeffizienz der Druckluftsysteme überwachen und bewerten lässt (Abbildung 1). Zum einen wird der Volumenstrom, also die integrale Menge an Druckluft, mit entsprechenden Sensoren an verschiedenen Stellen im System gemessen und zu jener Menge in Beziehung gesetzt, die in das Druckluftsystem eingespeist wird. Zum anderen werden durch die ebenso im Druckluftsystem verteilten Ultraschallsensoren und aus deren Anordnung zueinander Lecks akustisch geortet und bewertet. Aus den zusammengeführten Daten von Gesamtvolumenstrom und identifizierten Leckagestellen lassen sich die Anteile der Leckagen am Druckluftverlust genau zuordnen.

### IMMS-Beitrag: Elektronikplattform, Signalverarbeitung und Kommunikation

Das IMMS hat eine performante und skalierbare Elektronikplattform für die digitale Verarbeitung der Sensordaten entwickelt. Um Anteile von Leckagestellen am Druckluftverlust genau zuordnen zu können, müssen die Daten von Gesamtvolumenstrom und vieler, über das System verteilter Ultraschallsensoren zusammengeführt werden. Da die Druckluft für viele Anwendungen, wie z.B. für verschiedene Aktionen eines Industrieroboters, an wechselnden Stellen in unterschiedlicher Menge zugeführt wird, müssen sUse-Plattform und alle zugehörigen Sensoren zeitsynchron arbeiten. Daher hat das IMMS bei der Konzeption der Hardware-Komponenten einen modularen Ansatz verfolgt und die Sensoren mittels programmierbarer Logikbausteine (FPGA) angebunden, um die Echtzeitfähigkeit des Systems zu gewährleisten.

Diese Edge-Plattform zur dezentralen Datenverarbeitung wird für jeden Messpunkt des Monitoring-Systems eingesetzt. Um die Sensoren sehr flexibel für kundenspezifische Aufgaben anpassen zu können, ohne Änderungen an der Hardware vornehmen zu müssen, wurden vom IMMS die Komponenten zur Signalverarbeitung mit einer modellbasierten Entwurfstechnologie entwickelt und auf dieser Basis die

Anwendungsalgorithmen für die FPGA-Integration konfiguriert. Für die Integration in Instandhaltungssysteme wurden geeignete Kommunikationsschnittstellen und -protokolle implementiert und die entsprechende Kommunikationsfähigkeit der drahtlosen Sensoren hergestellt.

## Hardware-Entwicklung

Die Plattform besteht aus einem Mainboard mit integrierter zentraler Recheneinheit (CPU), einem FPGA und aufsteckbaren Sub-Modulen. Neben den von den Projektpartnern entwickelten Ultraschall- und Volumenstromsensoren sollen auch andere kommerziell erhältliche Sensoren integriert werden können, wie z.B. Druck-, Temperatur- und Beschleunigungssensoren. Dazu wurden Voruntersuchungen durchgeführt und die Übertragungsprotokolle und Schnittstellen für die Einbindung der Sensoren spezifiziert.

### Mainboard

Das IMMS hat verfügbare CPU-Module für das Mainboard untersucht und verglichen. Um Entwicklungsaufwand und Hardwarekosten zu minimieren, wurde ein Phycore iMx8M ausgewählt, ein System-on-Module (SoM) der Firma Phytec. Es beinhaltet eine iMx8-CPU sowie Speicher (LPDDR4 Ram und EMMC) und kann optional mit einem Funkmodul (WLAN, Bluetooth) ausgestattet werden.

Ein weiterer Bestandteil des Mainboards ist ein FPGA, mit dem die Schnittstellen zu den Sub-Modulen applikationsspezifisch angepasst werden können. Die erfassten Signale der Sensoren werden im FPGA weiterverarbeitet. So können Pegelberechnungen, FFT und Datenkomprimierung durchgeführt werden. Die Daten werden über eine PCIe-Verbindung anschließend zur CPU übertragen.

Weiterhin wurde ein M.2-Steckverbinder auf das Board aufgebracht, mit dem das System mit weiteren Komponenten erweitert werden kann, wie zum Beispiel mit dem KI-Hardwarebeschleuniger Google Coral AI Accelerator.

### Sub-Basic

Das Basismodul wird auf das Mainboard aufgesteckt, um Spannungsversorgung, Kommunikationsschnittstellen (Ethernet, USB 3.0, RS485(Modbus)) und Digital IO zu realisieren.

Die Spannungsversorgung wurde für einen Eingangsspannungsbereich von 7 bis 36 V konzipiert. Eine Schaltung schützt die nachfolgende Elektronik vor Überspan-

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung
- Leistungen für eingebettete Systeme auf [www.imms.de](http://www.imms.de)



Abbildung 2:

Realisierte Hardware-Plattform, Mainboard und Subplatinen in Hut-schienengehäuse. Foto: IMMS.

nung, Überstrom und gegen Verpolung der Versorgungsspannung. Die so erzeugte 5V-Systemspannung wird dann dem Mainboard über einen Steckverbinder zugeführt. Als Kommunikationsschnittstellen wurden die Ethernet- und USB-3.0-Signale des System-on-Modul auf entsprechende Steckverbinder geführt. Weiterhin wurden zwei galvanisch getrennte RS485-Transceiver integriert. Somit kann eine Modbus-Kommunikation realisiert werden.

Es wurden 4 Anschlüsse für Digital-Input-Output-Signale realisiert. Diese sind galvanisch getrennt ausgeführt und ermöglichen eine Integration in bestehende Anlagen.

### Sub-Kommunikationsmodule

Als erste Kommunikationsmodule wurden eine RS485- und eine LVDS-Baugruppe entworfen, mit der alle im Projekt entwickelten und verwendeten Sensoren an die Plattform angeschlossen werden können. Um die Störsicherheit zu erhöhen, sind die Kommunikation und Spannungsversorgung der Sensoren galvanisch getrennt ausgeführt.

### FPGA

Mit dem FPGA werden die Schnittstellen zu den Sensoren realisiert, die Sensordaten per FFT und Pegelberechnung vorverarbeitet und die Daten zur CPU gepuffert und weitergeleitet. Die FPGA-Firmware kann je nach Applikation und verwendeten Modulen angepasst werden.

FPGA und CPU kommunizieren über eine PCIe-Verbindung. Die Daten werden im FPGA in einen Zwischenspeicher geschrieben und dann mittels Direct Memory Ac-

cess (DMA) in den Speicher der CPU übertragen. Es wurden mehrere verfügbare PCIe IP Cores evaluiert und das XDMA-Subsystem für PCIe implementiert.

## Sensorik

Durch das Konzept lassen sich eine Reihe von Sensortypen anschließen, die sowohl separat als auch parallel (z. B. für Echtzeit-Korrelationen) oder in Richtung Datenfusion eingesetzt werden können. Ideal für das Konzept sind digitale Sensoren.

## Plattform-Software

### Board Support Package (BSP)

Auf Basis des für das SoM-Modul Phycore iMX8M vorhandenen Board Support Packages wurde eine entsprechend angepasste Version erzeugt, die alle für die Sensorplattform benötigten Softwarekomponenten enthält. Zum Erstellen des BSPs kommt der Yocto-Distributions-Builder zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Framework, welches es erlaubt, äußert flexibel (Linux)-Distributionen aus dem Sourcecode aller enthaltenen Komponenten zu erstellen. Die hierfür benötigten Informationen im Yocto-Framework sind hierbei in Schichten (Layern) organisiert, die eine vom allgemeinen zum speziellen Fall immer feiner werdende Anpassung der erstellten Distribution an die notwendigen Anforderungen erlaubt. Demzufolge wurde den vorhandenen Schichten ein sUse-Layer hinzugefügt. Dieser enthält die SoM-Konfiguration, Voreinstellungen für verschiedene Softwarepakete, Build-Anweisungen für noch nicht in den anderen Layern enthaltene Software usw.

Zusätzlich wurde über einen weiteren Yocto-Layer die Unterstützung für das RAUC-Projekt (Robust Auto-Update Controller) hinzugefügt. Mit Hilfe des RAUC-Projektes können Systemupdates sehr flexibel, robust und manipulationssicher durchgeführt werden. Für die Sensorplattform wurde RAUC so konfiguriert, dass über redundante Bootloader- und Rootfs-Partitionen ein vollständiges Systemupdate zur Laufzeit durchgeführt werden kann. Dieses ist zudem über digitale Signaturen abgesichert. Weiterhin ist es möglich, auch das initiale Aufspielen der Systemsoftware per RAUC-Update-Mechanismus durchzuführen. Darüber hinaus werden dank der Integration in den Yocto-Buildprozess RAUC-Update-Dateien automatisch erzeugt.

Zum Datenaustausch zwischen CPU und FPGA über PCIe sind verschiedene Treiber notwendig, welche die unterschiedlichen Ebenen der Schnittstellenkommunikation realisieren. Das ist zum einen ein bereits im Linux-Kernel vorhandener Treiber für den im SoC verwendeten PCI-Hostcontroller, zum anderen ein Treiber, welcher den Datenaustausch mit DMA sowie dessen Synchronisation regelt. Hierfür wird passend zum FPGA-PCIe-Core ein offizieller Treiber vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

Verschiedene Versuche und Recherchen haben allerdings gezeigt, dass dieser insbesondere auf anderen Architekturen als i686 keinen zuverlässigen Datenaustausch erlaubt. Daher hat das IMMS ein Community-Projekt, das einen daraus abgeleiteten Treiber zur Verfügung stellt, entsprechend modifiziert und in das BSP integriert. Zudem wurden Testprogramme erstellt, die es erlauben, Daten aufzuzeichnen, die der FPGA über die PCIe-Schnittstelle liefert.

## Ausblick

Die Edge-Plattform wurde primär entwickelt, um die Energieeffizienz in Druckluftsystemen zu optimieren. Hier kann mit der Sensorplattform als Nachrüstlösung die Druckluft an Anlagen- und Maschinenteilen permanent überwacht, die Energieeffizienz verbessert und damit zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beigetragen werden. Durch den modularen Ansatz der Plattform kann diese aber auch einfach in anderen Anwendungsszenarien, wie z.B. zur vorausschauenden Wartung (Predictive Maintenance) eingesetzt werden.

Im nächsten Schritt wird das System in Anlagen integriert und evaluiert sowie der Einsatz der Plattform in weiteren Anwendungsfeldern demonstriert. Das Produkt wird 2022 von der SONOTEC GmbH in den Markt gebracht.

**Kontakt:** Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, [tino.hutschenreuther@imms.de](mailto:tino.hutschenreuther@imms.de)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Projekt sUSE wurde unter dem Kennzeichen ZF-4085709P08 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Leistungen für  
eingebettete  
Systeme auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Mehr zu  
sUSE auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)