

**Finding leaks
in industrial
processes with
ultrasound sensors
-- a digital solution for the analogue world.**

Objectives

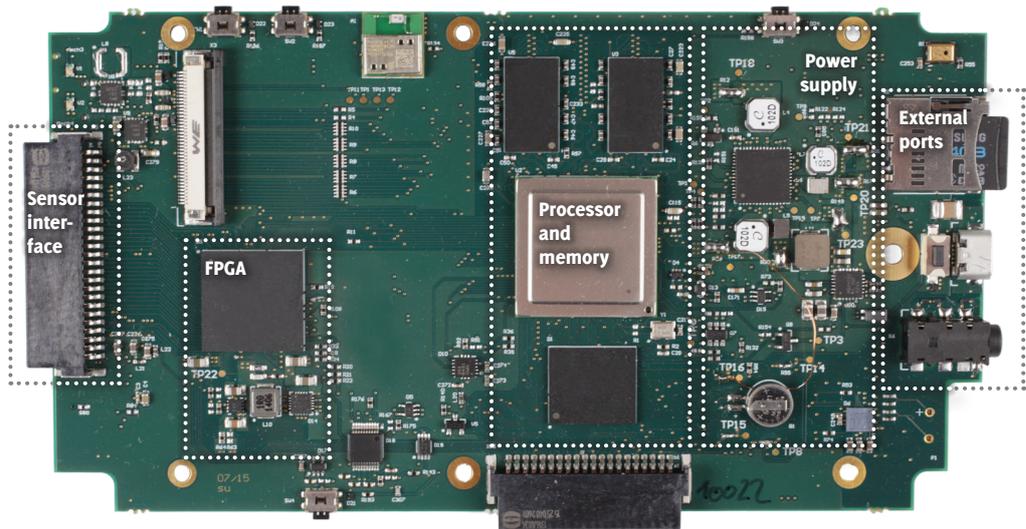
Up to 10% of all electrical energy used in industry goes solely into the production of compressed air. Approximately a third of this air leaks away, causing not only wasted energy and increased costs in these processes but also malfunctioning of the relevant machinery. As an approach to this problem, ultrasonic technology has already been employed for some time in the finding of leaks. The established analogue inspection methods are certainly robust, simple and reasonably priced. However, they only achieve detection of ultrasonic waves in a narrow frequency band with a width usually of about 4 kHz. This results on one hand in high sensitivity. On the other hand the significance of the data extracted from the signal may be limited, because narrow frequency range fields of the spectrum are arbitrarily selected which may not contain crucial audio events. In consequence, maintenance staff are often faced with the task of detecting compressed air escapes with very narrow-band analogue testing equipment and very rough estimated values. It is not uncommon for test measurements to have to be written down by hand. Any computation of the

Taking measurements on the hardware developed by IMMS for a hand-held digital scanner that will find and evaluate leaks in compressed air tubing by means of ultrasound. Photograph: IMMS.

losses through leakage will barely be possible on the basis of this information, a fact which complicates any planning of effective measures when it comes to preventive maintenance and energy management. For the problem described, a completely new approach and new solutions are demanded by the new industrial revolution represented by Industry 4.0 and Maintenance 4.0. They require networked systems, mobility, instant availability and the evaluation of data for process optimisation purposes.

With this in mind, SONOTEC and IMMS have now developed an innovative, digital sonographic testing device. The hand-held tester with a five-inch touchscreen provides preventive maintenance by a first-time combination. It contains an innovative measuring system that covers a wide frequency range (from 20 to 100 kHz) and innovative sensors for both structure-borne and air-borne sound, combined with smart apps that are intuitive in use. It features stor-

Circuit board developed at IMMS for the new digital ultrasonic leak scanner. Photograph: IMMS.



age of test data, levels and spectrograms, generation of test reports and camera documentation of leaks. To transmit data efficiently and to enable the data to be integrated into existing systems, the device uses interfaces like Bluetooth, USB and SD/MMC.

SONOTEC was the developer of the overall system concept for the manual device, of the hardware and software for the ultrasonic detectors and of the application software including the data evaluation algorithms and user interface.

IMMS was the designer of the digital components of the hardware and the developer of the FPGA firmware which is crucial to the performance of the device. IMMS also adapted and ported the Android operating system and developed algorithms by means of which the ultrasonic audio signal is converted into audible output. This last feature enables staff to make the association they have been used to on analogue devices.

Overall concept

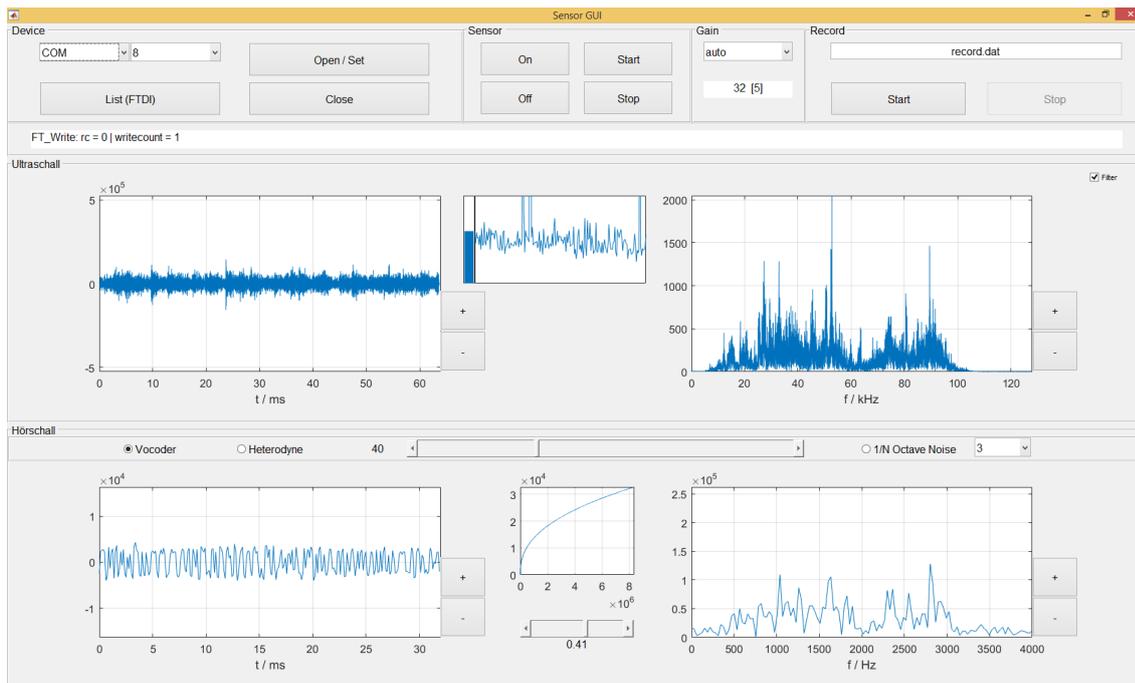
To enable the physical information contained in the ultrasonic signals to be utilised, broad-band detectors require high sampling rates and high-performance signal processing. SONOTEC has therefore carried out a thorough analysis of the physical fundamentals and the technical background both to leak detection and evaluation and to other applications, with complete re-evaluation. This has provided the basis for the new SONOTEC method which is used in this and other innovative applications, integrating powerful computation, flexible signal processing algorithms.

The result is a completely digital, scalable, modular solution. Two newly developed ultrasonics detectors are attached to the hand-held device by cable. These detectors do the signal pre-processing and analogue-digital conversion. The flexible digital interface between ultrasonic detectors and device leaves room for a wide range of possible future sensors. Further, the internal structure of the platform will also support extension to several fast measuring channels and some slower auxiliary data channels, a method which will mean this technology can in future be used in an ever-wider range of maintenance applications.

Operation of the device, internal computation and data communication are all managed by various apps which SONOTEC has developed. Encapsulated within the apps and the digital core processing unit are various complex functions. The fully-automated data throughput enables the user to concentrate on the inspection task and the various procedures involved in it. Of great importance for the ease of use is that the highly complex ultrasonic data employed are converted into easily understood graphics. High-performance chart and plot functions have been implemented to ensure that the results are simply and clearly represented. Features integrated into the device besides the measurement and signal evaluation functions themselves are maintenance notes and routing hints guiding the test engineer in complex setups.

The IMMS contribution

The know-how of IMMS in the field of digital architectures and of signal flows for acoustic measuring systems and audio pre-processing was fundamen-



MATLAB development environment to achieve audible output. Diagram: SONOTEC.

tal to the work. On the basis of the overall system concept, IMMS developed the hardware plans for the hand-held device, creating the circuit diagram and board layout to fit. IMMS integrated an FPGA for the implementation of the rapid-response signal processing algorithms. This hardware element, into which logic circuits can be programmed, is the crucial item influencing the level of performance. The IMMS contribution also included implementation of a NXP-iMx6 processor to evaluate the data and provide the human-to-machine interface. IMMS also carried out the integration of Bluetooth, two SD card slots and USB. The device memories are 1GB DDR3 and 8GB Flash. The lithium 15Wh battery can be charged via USB.

A parallel data bus enables the processor to access the FPGA memory and to transmit the computed data. It is also possible to use this interface to load the FPGA firmware into the FPGA.

FPGA firmware: signal processing and audibility

The FPGA can be easily reprogrammed, which means that application-specific algorithms can be implemented using additional firmware modules. The firm-

ware developed by IMMS for the FPGA is used for the leak detection application of the device. The main elements of the firmware are the detector interface, the digital signal processing algorithms and the interface with the processor. At the interface to the detector, the serial data stream received is transmitted to the signal processing part of the firmware. It contains algorithms implementing signal correction filters, an FFT¹ (which enables frequency domains to be computed) and the conversion of the ultrasonic signal into the audible output.

For the device to be used easily, it is important how the ultrasonic signals are made "audible" to the testing engineer. In the old analogue method, the narrow frequency band surrounding the carrier wave frequency was just shifted into the audible range. The frequency spectra with a low sample ratio that used to be computed from this are, however, significantly different from spectra with higher sample ratios as used in the new method. In the new device it is effectively possible to employ all the state-of-the-art signal processing capabilities of acoustic measurement technology. IMMS addressed the audibility problem by developing an algorithm based on a voice encoder procedure which compresses the ultrasonic signals

¹ FFT Fast Fourier transform. An algorithm used to split up a digital signal into its frequency domains in order to enable the domains to be analysed.



The newly developed ultrasonic detector in use for preventive maintenance purposes. The device was launched at the 2016 Hannover Messe. Photo copyright: fotolia: industrieblick/SONOTEC.

in the frequency range between 10 and 100 kHz by a factor of 32 and modulates them into the audible range. The algorithm was first implemented in MATLAB and then evaluated and optimised in cooperation with SONOTEC. After this, it was implemented in an FPGA, tested and verified.

Operating system

For the complex hardware architecture of the device, IMMS started by analysing two possible operating systems, Embedded Linux and Google's Android. The choice fell on adapting Android to the requirements. The advantages of choosing this system for the new mobile leak testing device are the energy-saving functions that it includes and the fact that many users are already familiar with Android based devices and operation, which makes using the ultrasonic tester intuitive. As Android is available as open-source software, it is also easy to make any necessary adaptations or extensions. One example is that the user access to the internal memory and SD cards of the leak-finder was specially adapted from the standard method to fit it for use in an inspection device. Other advantages were also exploited, such

as the high-performance Android Studio development environment which helped in the app creation. In addition, the Android application programming interface (API) makes it convenient to access a great number of standard functions for a manual device, such as creating the graphic user interface, accessing standard interfaces (like USB or audio output) and managing the standby behaviour.

For porting of the operating system a board support package provided by the manufacturer of the CPU was used. IMMS made certain adaptations, particularly adapting some crucial components. Among these are most importantly the boot loader and Linux core, which have to support all of the hardware components of the device. The Institute developed a device driver which enables the ultrasonic data streams transmitted by the FPGA to be transferred to the host CPU of the device, where they are further processed. Here the particular challenge was to adapt the driver and FPGA to each other so as to achieve rapid and efficient data transmission at a rate of 3.8 MB/s. This speed means that data is transferred in real time, making available a continuous data stream, for instance for storage at an SD card or for output as an audible signal.

Future prospects

SONOTEC and IMMS cooperated closely on a pilot run and the testing of the devices manufactured. The leak-finder was presented to the public for the first time at the Hannover Messe in the spring of 2016, with great success. Currently, IMMS is supporting SONOTEC in its ongoing transfer of the small-scale manufacture to the device mass-production stage. This means that, before long, users will have in their hands a device which provides improved diagnosis of machinery faults so that less energy is wasted and, above all, more support is available for the assessment of trends and planning of maintenance intervals.

Contact person:

Dipl.-Ing. Sebastian Uziel
Sebastian.Uziel@imms.de

**Lecksuche
in industriellen
Prozessen
mit Ultraschallsensorik.
Digitale Lösung für die analoge Welt.**

Motivation

In der Industrie werden bis zu 10% der elektrischen Energie allein dafür verwendet, um Druckluft zu erzeugen. Etwa ein Drittel dieser Luft entweicht durch Lecks und verursacht nicht nur Energieverluste und Kostensteigerungen in den Prozessen, sondern auch Fehlfunktionen in den betreffenden Maschinen und Anlagen. Um diesem Problem zu begegnen, werden bereits seit langem Ultraschalltechnologien zur Lecksuche eingesetzt. Die etablierten analogen Prüfverfahren sind zwar preiswert, robust und einfach. Mit ihnen lassen sich aber auch nur Ultraschallwellen in einem sehr schmalen Frequenzband mit einer Breite von in der Regel etwa 4 kHz erfassen. Dies ermöglicht einerseits eine hohe Empfindlichkeit, geht jedoch andererseits zu Lasten der Signalinformation, da mit der engen Frequenzspanne nur ein geringer Bereich willkürlich ausgewählt wird, der nicht unbedingt die wichtigen Ultraschallsignale enthalten muss. Instandhalter stehen daher regelmäßig vor der Aufgabe, mit schmalbandigen analogen Prüfgeräten Druckluftverluste aus sehr groben Schätzwerten zu bestimmen. Prüfwerte müssen nicht selten von Hand dokumen-

Messungen an der am IMMS entwickelten Hardware für ein digitales Handgerät, mit dem Lecks in Druckluftleitungen mittels Ultraschall gefunden und bewertet werden können.
Foto: IMMS.

tiert werden. Eine darauf aufbauende Bewertung von Leckverlusten ist damit kaum möglich. Dies erschwert die Planung von wirksamen Maßnahmen in der vorbeugenden Instandhaltung und im Energiemanagement.

Anforderungen von Industrie 4.0 und Maintenance 4.0, wie Vernetzung, Mobilität, schnelle Verfügbarkeit und Auswertung von Informationen für Prozessoptimierungen, erfordern ein völlig neues Herangehen und neue Lösungen für dieses Problem.

Die Firma SONOTEC und das IMMS haben daher ein neuartiges Ultraschallprüfgerät auf digitaler Basis entwickelt. Das tragbare Handgerät mit Fünf-Zoll-Touchscreen verbindet für die vorbeugende Instandhaltung erstmalig neuartige Messtechnik, die Ultraschallwellen in einem breiten Frequenzbereich von 20 bis 100 kHz erfasst, innovative Luft- und Körperschallsensorik sowie intelligente und intuitiv bedienbare Apps. Un-

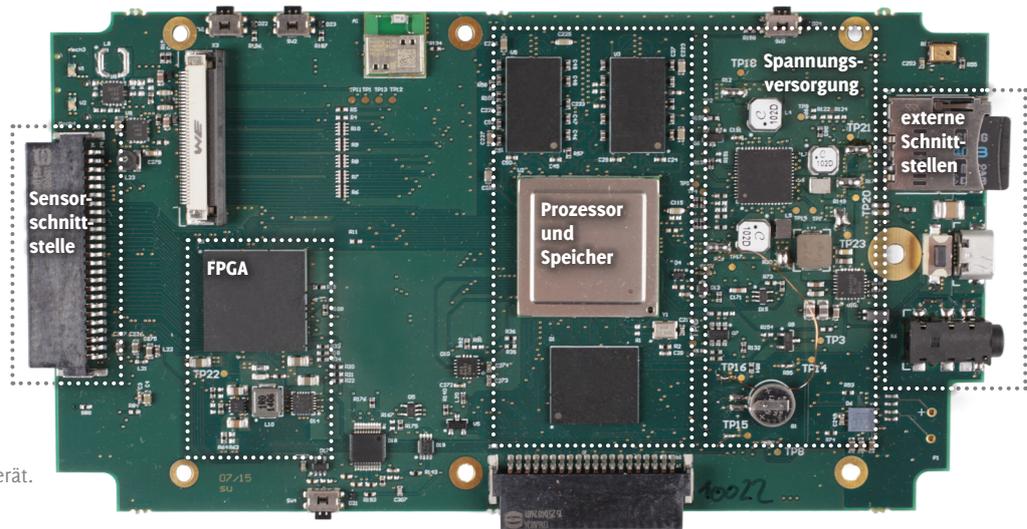


IMMS

WIR VERBINDEN DIE IT MIT DER REALEN WELT.

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

Am IMMS entwickelte Platine für das neue digitale Ultraschallprüfgerät.
Foto: IMMS.



ter anderem lassen sich Prüfdaten, Pegelwerte und Spektrogramme speichern, Prüfberichte generieren und über die integrierte Kamera Lecks dokumentieren. Schnittstellen wie Bluetooth, USB und SD/MMC, ermöglichen eine effektive Datenkommunikation und eine Integration in bestehende Systeme.

SONOTEC hat das Gesamtsystemkonzept des Handgerätes entwickelt, die Hard- und Software der Ultraschallsensorik sowie die Applikationssoftware mit Datenauswertungsalgorithmen und Nutzeroberfläche. Das IMMS hat die digitalen Komponenten der Hardware entworfen und realisiert sowie die FPGA-Firmware entwickelt – ein wichtiges Element für die Performance des Geräts. Darüber hinaus hat es neben der Anpassung und Portierung des Android-Betriebssystems Algorithmen entwickelt, dank derer die Messwerte hörbar gemacht werden können. Somit können Prüfengeure an ein von Analoggeräten gewohntes Vorgehen bei der Lecksuche anknüpfen.

Die Lösung im Detail: Gesamtkonzept

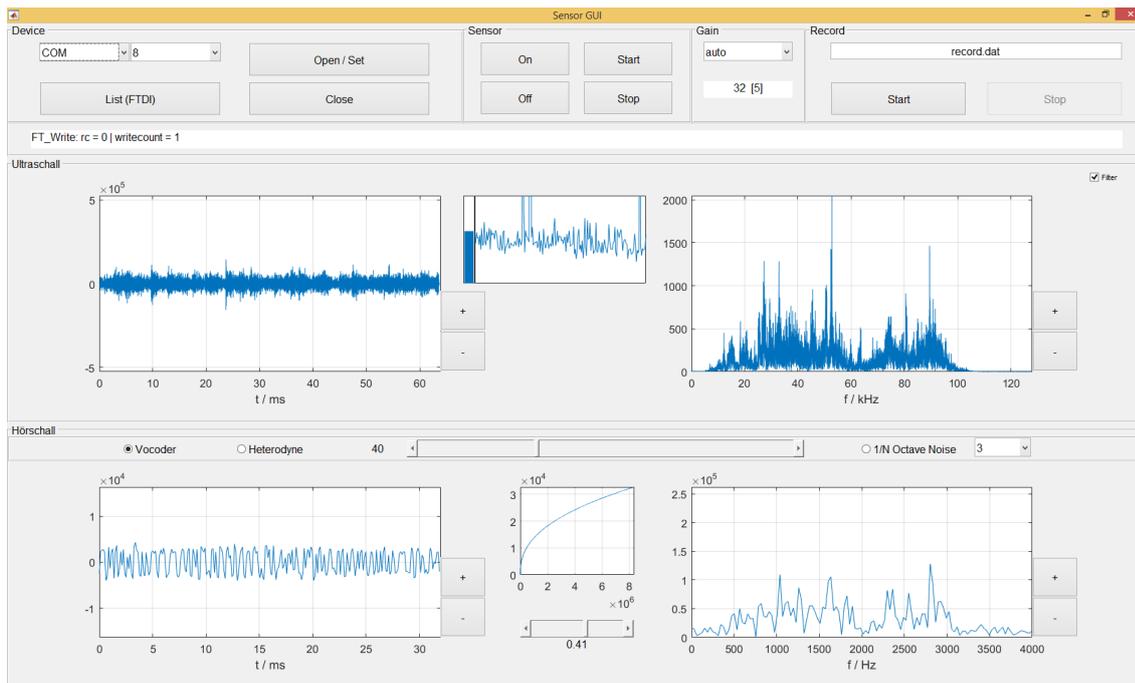
Breitbandige Sensorik erfordert hohe Abstraten und eine leistungsfähige Signalverarbeitung, um die in Ultraschallsignalen enthaltene physikalische Information nutzen zu können. SONOTEC hat daher die physikalischen Grundlagen und verfahrenstechnischen Hintergründe sowohl für das Problem der Lecksuche und -bewertung als auch für andere Anwendungen analysiert und neu bewertet. Auf dieser Basis hat SONOTEC eine neue Verfahrenskonzeption erarbeitet, die die Integration starker Rechenleistung, flexibler Signalverarbeitungsalgorithmen und Anwendungssoftware als Grundlage für diese und neue Anwendungen ermöglicht.

Entstanden ist eine komplett digitale sowie modulare und skalierbare Lösung. An das Handgerät werden per Kabel zwei neuentwickelte Ultraschallsensoren mit Signalvorverarbeitung und Analog-Digital-Wandlung angeschlossen. Da an das Gerät bereits digitalisierte Daten geliefert werden, wird ein breites Spektrum von Sensoren direkt verwendbar sein. Zudem erlaubt die interne Struktur der Plattform eine Erweiterung auf mehrere schnelle Messkanäle sowie um langsame Hilfskanäle. Dadurch wird sich diese Technik in der Instandhaltung künftig wesentlich breiter einsetzen lassen.

Die Bedienung des Prüfgeräts, die Berechnungen und die Datenkommunikation werden über verschiedene, von SONOTEC entwickelte Apps verwaltet. Komplexe Funktionen, wie z. B. Berechnungen, sind innerhalb der Apps und im digitalen Rechenkern gekapselt. Durch die Automatisierung des gesamten Datendurchlaufs kann sich der Nutzer auf die Prüfaufgabe und die diesbezüglichen Abläufe konzentrieren. Wesentlich für die einfachere Benutzung ist vor allem, dass komplexe Ultraschalldaten verwendet und in einfache grafische Information übersetzt werden. Daher wurde eine leistungsstarke Grafik für eine einfache und anschauliche Darstellung von Ergebnissen implementiert. Neben der Messfunktionalität und der Signalauswertung sind auch Routenführungen und Instandhaltungshinweise integriert.

Beitrag des IMMS

Grundlage der Arbeiten bildete das Know-how des IMMS im Bereich digitaler Architekturen und von Signalabläufen in akustischen Messsystemen sowie in der Audiovorverarbeitung. Ausgehend vom Gesamt-



MATLAB-Entwicklungsumgebung für die Hörbarmachung. Grafik: SONOTEC.

systemkonzept hat das IMMS das Hardwarekonzept für das Handgerät entwickelt und auf dieser Basis den Schaltplan und das Layout der Platine erstellt. Für die Implementierung der schnellen Signalverarbeitungsalgorithmen hat das IMMS ein FPGA integriert. Dieses Hardware-Element, in das logische Schaltungen programmiert werden können, ist das für die Performance wesentliche Element. Darüber hinaus wurde ein NXP-iMx6-Prozessor für die Auswertung der Daten und die Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie Bluetooth, zwei SD-Karten-Slots sowie USB implementiert. Das Gerät verfügt über 1GB DDR3 und 8GB Flash-Speicher. Der 15Wh Lithium-Ionen-Akkumulator kann über USB geladen werden.

Über einen parallelen Datenbus kann der Prozessor auf den Speicher des FPGA zugreifen und die berechneten Daten übertragen. Auch die FPGA Firmware kann über diese Schnittstelle in das FPGA geladen werden.

FPGA-Firmware: Signalverarbeitung und Hörbarmachung

Der FPGA lässt sich reprogrammieren und ermöglicht so über weitere Firmware-Module die Implementierung applikationsspezifischer Algorithmen. Für die Lecksuche hat das IMMS eine Firmware für den FPGA im Handgerät entwickelt. Hauptbestandteile sind die Sensorschnittstelle, digitale Signalverarbeitungsalgorithmen und die Schnittstelle zum Prozessor. Über die Schnittstelle zum Sensor wird der serielle Datenstrom empfangen und an die Signalverarbeitung weitergeleitet. Als Algorithmen wurden Filter zur Signalkorrektur, FFT zur Berechnung der Frequenzanteile und eine Hörbarmachung des Ultraschallsignals entwickelt.

Für den Umgang mit dem Gerät ist es wichtig, wie der Ultraschall für den Prüfer „hörbar“ gemacht wird. Beim analogen Verfahren wurde hierfür das schmale Frequenzband um die Trägerfrequenz in den Hörbereich verschoben. Die daraus berechneten Spektren mit niedriger Abtastrate haben aber eine andere Bedeutung als Spektren mit hoher Abtastrate aus dem neuen Verfahren. Im neuen Prüfgerät ist im Prinzip die komplette state-of-the-Art-Signalverarbeitung der akustischen Messtechnik möglich. Für die Hörbarmachung hat das IMMS ausgehend von einem Voice-





Das neuentwickelte Ultraschallmessgerät für die vorbeugende Instandhaltung im Einsatz. Das Gerät wurde auf der HANNOVER MESSE 2016 präsentiert. Bildrechte: fotolia: industrieblick/SONOTEC.

Encoder- Verfahren einen Algorithmus entwickelt, der die Ultraschallsignale im Frequenzbereich von 10 kHz bis 100kHz um Faktor 32 komprimiert und in den hörbaren Bereich transformiert. Der Algorithmus wurde zuerst in Matlab umgesetzt und mit SONOTEC gemeinsam bewertet und optimiert. Anschließend erfolgte die Implementierung in einem FPGA, sowie Test und Verifikation.

Betriebssystem

Für die komplexe Hardwarearchitektur hat das IMMS Embedded Linux und Googles Android als mögliche Betriebssysteme analysiert. Im Ergebnis wurde Android portiert. Das neue, mobile Prüfgerät profitiert vor allem von den in Android bereits enthaltenen Energiesparfunktionen sowie von dem vielen Nutzern bereits vertrauten Anzeige- und Bedienkonzept, was eine intuitive Bedienung ermöglicht. Da Android als OpenSource-Software vorliegt, lassen sich zudem leicht notwendige Anpassungen und Erweiterungen vornehmen. Somit wurde z.B. der Nutzer-Zugriff auf den internen Speicher und die beiden SD-Karten des Gerätes abweichend vom Standardverhalten speziell für den Einsatz als Prüfinstrument abgestimmt. Dar-

über hinaus wurden weitere Vorteile genutzt, wie z.B. die leistungsfähige Entwicklungsumgebung Android-Studio bei der Realisierung der Apps. Über die Android-API kann zudem auf sehr viele Standardfunktionen eines Handheld-Gerätes, wie Grafikausgabe, Schnittstellen und Standby-Funktionen, etc. komfortabel zugegriffen werden.

Für die Portierung des Betriebssystems auf Basis eines vom CPU-Hersteller bereitgestellten Board-Support-Packages hat das IMMS unter anderem die wichtigsten Komponenten, allen voran Bootloader und Linux-Kernel, für die Hardware des Gerätes angepasst. Das Institut hat einen Treiber entwickelt, der das Einlesen und die weitere Verarbeitung der vom FPGA gelieferten Ultraschall-Datenströme ermöglicht. Besondere Herausforderung war hierbei die genaue Abstimmung von Treiber und FPGA aufeinander, so dass eine schnelle und effiziente Datenübertragung mit einer Datenrate von 3,8MB/s gewährleistet ist. Damit werden die Daten in Echtzeit übertragen, so dass ein kontinuierlicher Datenstrom zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung steht, z.B. zur Speicherung auf SD-Karte und zur Ausgabe des hörbarmachten Signals.

Ausblick

SONOTEC und IMMS haben in enger Kooperation eine Nullserie entwickelt und getestet. Das Prüfgerät wurde erstmalig auf der Hannover-Messe im Frühjahr 2016 erfolgreich der Öffentlichkeit vorgestellt. Derzeit unterstützt das IMMS die Firma SONOTEC bei der weiteren Überführung des Gerätes in die Serienfertigung. Anwender werden damit künftig ein Prüfgerät zur verbesserten Diagnose von Maschinenfehlern, zur Erhöhung der Energieeffizienz und vor allem zur wesentlich besseren Bewertung von Trends und Planung von Wartungsintervallen zur Verfügung gestellt bekommen.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Sebastian Uziel
 Sebastian.Uziel@imms.de