

Vernetzte Funkkommunikation unterstützt die ressourcenschonende Produktion - Ein Funksystem für das Energieverbrauchs- und Umweltmonitoring in der industriellen Fertigung

*Dipl.-Ing. Dmytro Krush¹, M. Sc. Christoph Cammin¹, Dr.-Ing. Ralf Heynicke¹,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Scholl¹, Dipl.-Ing. Bernd Kärcher²*

¹Professur für Elektrische Messtechnik, Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr
Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

²Festo AG, CR-MC, Ruiter Straße 82, 73734 Esslingen

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt ein Funksystem, das für das Energieverbrauchs- und Umweltmonitoring industrieller Fertigungsumgebungen entwickelt wurde. Zunächst werden in diesem Beitrag die spezifischen Anforderungen an das Funksystem beschrieben. Besondere Beachtung findet dabei die Koexistenzfähigkeit zu weiteren Funksystemen im gleichen Frequenzband, sowie die Fähigkeit, Messdaten von permanent verfügbaren Sensoren wie auch von energieautarken Sensoren erfassen zu können. Zusätzlich wurde die Einbeziehung von mobilen Bedienelementen im Feld ermöglicht. Die eingesetzten Hardware-Komponenten sind modular aufgebaut, um eine einfache und kostengünstige Erweiterung bzw. Integration neuer Funktechnologien zu ermöglichen. Zum Nachweis der postulierten Koexistenzfähigkeit des Funksystems wird ein Messaufbau aufgezeigt und das positive Ergebnis der Messung mit Hilfe eines Spektrogramms dargelegt.

Keywords: Funksensorik, Umweltmonitoring, Prozessmonitoring, Industrie 4.0

Einleitung

Tendenziell ist ein weiterer Anstieg der Energiekosten in den kommenden Jahren zu erwarten. Daher ist auch die Energieeffizienz in der industriellen Fertigung von zunehmender wirtschaftlicher Bedeutung. Darüber hinaus besteht seitens der Industrie ein Interesse, CO₂-Emissionen produktspezifisch zuordnen zu können. Ziele des vom BMBF geförderten Verbundprojektes ESIMA [1] sind die Messung von Energieflüssen sowie eine detaillierte Analyse und Zuordnung der Energieverbräuche in den verschiedenen Prozessschritten bei der Fertigung eines Produktes.

ESIMA steht dabei für "Optimierte Ressourceneffizienz in der Produktion durch Energieautarke Sensorik und Interaktion mit Mobilen Anwendern" [1]. Das ESIMA-Projektkonsortium setzt sich wie folgt zusammen: Die FESTO AG (Projektkoordinator) als Hersteller pneumatischer und elektrischer Komponenten, die Varta

Microbattery GmbH als Hersteller für Akkusysteme, die EnOcean GmbH als Hersteller energieautarker Sensoren und die Professur für Elektrische Messtechnik der Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg zur Entwicklung eines robusten Funksystems, die Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. als Partner für die Sensorik-Entwicklung, die c4c Engineering GmbH für das Software-Engineering, das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU-Braunschweig zur Untersuchung von Konzepten der Energie- und Ressourceneffizienz sowie die Daimler AG als Anwendungspartner.

Ein Aspekt in ESIMA ist die Interaktion mit mobilen Anwendern. Im Sinne von Industrie 4.0 wird innerhalb von ESIMA ein durchgängiges Informationskonzept realisiert. Das im Projekt ESIMA verfolgte Konzept orientiert sich an den Erfordernissen eines Anlagenbetreibers.

Es wurden die Energieflüsse der elektrischen und pneumatischen Versorgungen erfasst, um daraus Kennzahlen abzuleiten und zu visualisieren. In einem weiteren Schritt werden die Kennzahlen analysiert, um Optimierungspotenzial hinsichtlich höherer Energieeffizienz aufzeigen zu können. Dabei werden alle Ebenen und Bereiche im Unternehmen berücksichtigt. In ESIMA wurde dazu ein Rollenmodell entwickelt, das individuelle vertikale Zielgruppen, wie beispielsweise Maschinenbediener, Instandhalter und die unterschiedlichen Ebenen des Managements beinhaltet. Zusätzlich wird auch ein horizontaler, Informationsaustausch z.B. für „Shop-Floor-Meetings“ angeboten.

Zur Erfassung der Energieflüsse werden miniaturisierte, teils energieautarke Sensoren eingesetzt. Neben elektrischen und pneumatischen Größen werden darüber hinaus auch Umweltparameter, wie beispielsweise Raumtemperatur oder Beleuchtungsstärke in der Fertigung erfasst. Um eine einfache, flexible und gleichzeitig kostengünstige Integration in Fertigungsanlagen bzw. das Nachrüsten bereits bestehender Fertigungsanlagen zu ermöglichen, wird eine funkbasierte Kommunikationsarchitektur vorgeschlagen, mit dem Vorteil, dass die Messwerte sowie die visualisierten Kennwerte der Prozessabschnitte den Anwendern auch mobil zur Verfügung gestellt werden können.

Anforderungen an die Kommunikationsarchitektur zum Energie- und Umweltmonitoring in der Fertigung

Aus den in ESIMA hergeleiteten Zielgruppen bzw. Rollenprofilen werden die Anforderungen an die Kommunikationsarchitektur abgeleitet. Es hat sich gezeigt, dass zur Erfüllung der Kernaufgabe des Energie- und Umweltmonitorings Messraten in der Größenordnung von 1 Hz ausreichend sind. Dagegen können die Aktualisierungsintervalle der Umweltparameter, wie etwa der Raumtemperatur, ohne Informationsverlust aufgrund der großen Zeitkonstanten der thermischen Prozesse im Minuten-Bereich entsprechend größer ausfallen. Diese niedrigen Messraten begünstigen nicht nur den energieautarken Betrieb, sondern ermöglichen ihn erst. Diese Fähigkeit ist insbesondere für Sensoren relevant, deren Betrieb über Monate ausschließlich mit Akkus erfolgen muss und in denen keine Energy-Harvesting Techniken zum Einsatz kommen können [2].

Der Funkkanal in industriellen Umgebungen ist sowohl frequenzselektiv als auch zeitvariant [3]. Häufig besteht keine direkte Sichtverbindung zwischen den Empfangs- und Sendeantennen. Viele Fertigungsumgebungen sind bereits mit Funksystemen, wie etwa WLAN ausgestattet. Diese können jedoch aufgrund der undefinierten Latenzzeiten nicht für die Übertragung von Sensordaten genutzt werden.

Aufgrund der geforderten Datenraten genügt im Vergleich zu WLAN die Übertragung weniger Bytes, wodurch Schmalbandfunksysteme eingesetzt werden können. Für diese Funksysteme kann der Funkkanal als frequenzflach angesehen werden, sodass im Vergleich zu Breitband-Funksystemen keine aufwändige Kanalentzerrung erforderlich ist [4, 5, 6]. Zudem können mit diesen Funksystemen geringe Latenzzeiten mit hoher Zuverlässigkeit gewährleistet werden [4, 5, 6].

Eine weitere Anforderung des neuen Funksystems besteht darin, gegenseitige Beeinflussung der bereits installierten WLAN-Systeme in der Fertigung durch geeignete Koexistenzsicherungsmaßnahmen auszuschließen.

Beschreibung des Funksystems

Zur Entwicklung des Funksystems wurden die Erfahrungen bei der Implementierung von Funksystemen in Fertigungsanlagen weiterentwickelt [2, 4, 7, 8]. Das hier vorgeschlagene Funksystem ist Aufgrund der sehr guten Verfügbarkeit von Transceivern auf das weltweit verfügbare und lizenzfreie 2,4 GHz ISM-Band ausgelegt. Hierdurch können handelsübliche Low-Cost Transceiver eingesetzt werden [9]. Als Modulationsart wird GFSK mit einer Bitrate von 1 Mbit/s eingesetzt. In Anlehnung an den Standard IEEE 802.15.1 [10] werden bis zu 81 Kanäle in einem Kanalaraster von jeweils 1 MHz genutzt.

Mit Hilfe eines, sogenannten „Blacklisting“-Verfahrens kann die Nutzung von bestimmten Kanälen bzw. Frequenzen ausgeschlossen werden, um Interferenzen zu anderen Funksystemen auszuschließen.

Die Netzwerktopologie des vorgeschlagenen Funksystems ist sternförmig aufgebaut. Dies ermöglicht eine hohe Dichte an parallel betriebenen Funksystemen mit definierten Latenzzeiten. Zudem können vergleichsweise kostengünstige Sensorknoten auch bei bidirektionaler Kommunikation energiesparsam eingesetzt werden.

Das Gateway dient gleichzeitig als Schnittstelle zum LAN und somit zum Backend-System bzw. zur Datenbank.

Für die Datenübertragung von den Sensoren zum Gateway sind die Sensoren jeweils einer von bis zu vier Uplink-Spuren (UL) zugeordnet. Jede UL-Spur unterstützt bis zu 15 Sensoren. Somit lassen sich insgesamt bis zu 60 Sensoren mit einem Gateway verbinden. Für die Kommunikation vom Gateway zu den Sensoren steht eine Downlinkspur (DL) zur Verfügung. Die bis zu fünf Spuren arbeiten mit Hilfe von FDMA und TDMA insgesamt im Voll duplexbetrieb. Zur Vermeidung von Interferenzen beträgt der spektrale Abstand zwischen der DL-Spur und den UL-Spuren zu jeder Zeit mindestens 22 MHz. Die Kommunikation ist zeitlich in HF-Frames unterteilt, die jeweils 3,328 ms dauern. Somit kann bei im Fall einer Störung mit bis zu zwei zusätzlichen Paketwiederholungen in den folgenden beiden HF-Frames eine Übertragung innerhalb einer maximalen Latenzzeit von 10 ms erreicht werden. Jeder HF-Frame besteht wiederum aus 16 Zeitschlitz (Slots) die jeweils 208 μ s lang sind. Der Aufbau des HF-Frames ist in Abbildung 1 gezeigt. Am Ende eines jeden HF-Frames, d.h. im 16. Slot, in Abbildung 1 grau skizziert, findet ein Frequenzwechsel statt. Das Funksystem verwendet ein Frequency-Hopping-Verfahren, um zum einen Fading-Einbrüche des Funkkanals zu umgehen und um zum anderen die Wahrscheinlichkeit von Interferenzen mit anderen Funksystemen weiter zu reduzieren. Je nach Umgebung und Anforderungen können hierfür unterschiedliche Frequency-Hopping-Algorithmen ausgewählt werden.

Jedes DL-Telegramm beinhaltet nach einer Preamble von 16 Bit und einem Sync-Wort von 24 Bit drei weitere Bytes für das Protokollmanagement. Für Nutzdaten stehen weitere 112 Bit zur Verfügung. Zur Fehlererkennung in der Übertragung wird eine zyklische Redundanzprüfung (CRC) mit einer Codelänge von 32 Bit verwendet. Die Restfehlerwahrscheinlichkeit liegt damit in der Größenordnung von 10^{-9} [4]. Der gesamte Aufbau des DL-Telegramms ist in Abbildung 2 gezeigt. Die Telegramme der Sensoren im Uplink (UL) sind ähnlich wie die DL-Telegramme aufgebaut. Der Aufbau des UL-Telegramms ist in Abbildung 3 gezeigt. Sie beinhalten zusätzlich noch ein Guard-Interval von 8 μ s. Dieses Guard-Interval dient dazu, dass zwei Sensoren, die nicht exakt synchron zu ihren Zeitschlitz senden, sich nicht überlagern. Da ein Byte des Protokolloverheads entfallen kann, ist ein UL-Telegramm ebenfalls 208 μ s lang.

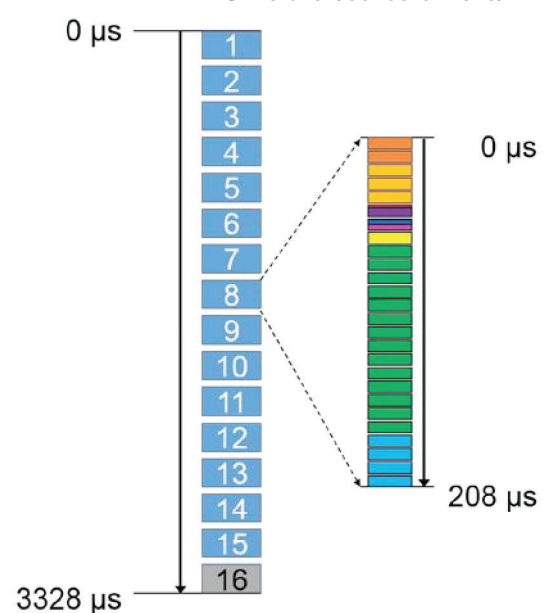


Abb. 1: Skizze des HF-Frames mit insgesamt 16 Slots und Darstellung eines DL-Telegramms.

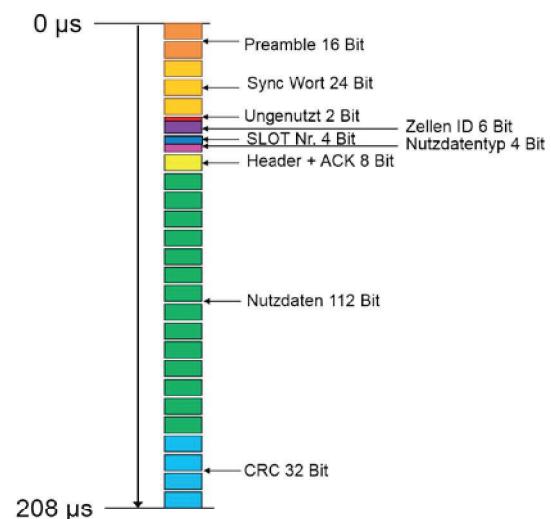


Abb. 2: Detaildarstellung eines Downlink-Telegramms.

Hardware-Architektur des Funksystems

Die Gateways wurden auf Basis des Xilinx Zynq System-on-Chip (SoC) realisiert, das ein konventionelles FPGA mit einem ARM-Zweikern-Mikrokontrollersystem vereint [11]. Durch die Verwendung des integrierten SoC kann ein energieeffizienter und kompakter Aufbau realisiert werden. Abbildung 4 zeigt die Hardware-Architektur des Gateways.

Zur Steuerung der Funktransceiver im Gateway werden Zustandsautomaten verwendet, die mittels VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) als Parallelstrukturen im programmierbaren Logik-Teil des SoCs realisiert sind. Über einen als Dual-Port RAM realisierten Puffer werden die Daten zwischen den ARM-Mikrocontroller und den VHDL-Datenverarbeitungsstrukturen bidirektional ausgetauscht. Im ARM-Mikrocontroller werden die Sensordaten seriell weiterverarbeitet und auf die LAN-Schnittstelle umgesetzt.

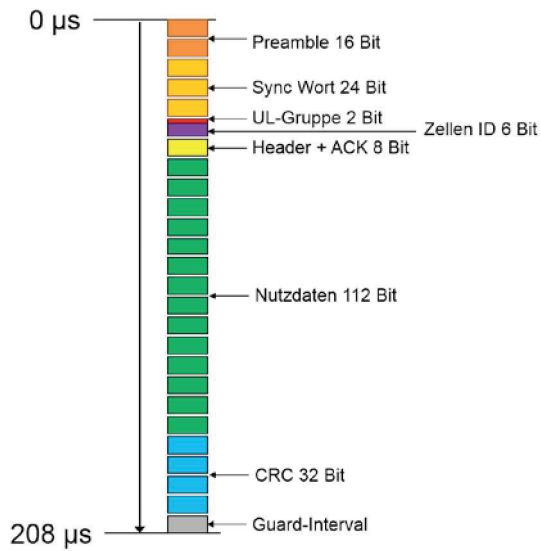


Abb. 3: Detaildarstellung eines Uplink-Telegramms.

Abbildung 5 zeigt ein Foto eines Demonstrators des Gateways. Dieser ist mit fünf Funkmodulen bestückt, eines mit einem Texas Instruments / Chipcon CC2400-Transceiver Chip [12, 13] als Sender für den Downlink. Die vier weiteren Funkmodule sind auf Basis der Nordic NRF 2401A-Transceiver Chips [14] entwickelt und dienen dem Empfang des Uplinks. Diese Transceiver Chips wurden aufgrund ihrer Fähigkeit zu schnellem Frequenzwechsel und der guten spektralen Eigenschaften im Sende- bzw. Empfangsbetrieb ausgewählt.

Durch den modularen Aufbau kann das Gateway kostengünstig erweitert oder umgerüstet werden. So sind neue Funkmodule bzw. Funktechnologien, wie beispielsweise von EnOcean [15], in Zukunft vergleichsweise einfach in das Gateway integrierbar.

In Abbildung 6 ist ein Foto eines Gateway in einem Gehäuse gezeigt. Die vier Antennen zum Empfang der Uplinks der Sensoren sind auf einer gemeinsamen Massefläche integriert. Das Sendesignal des Downlinks wird zum Anschluss einer externen Antenne aus dem Gehäuse geführt.

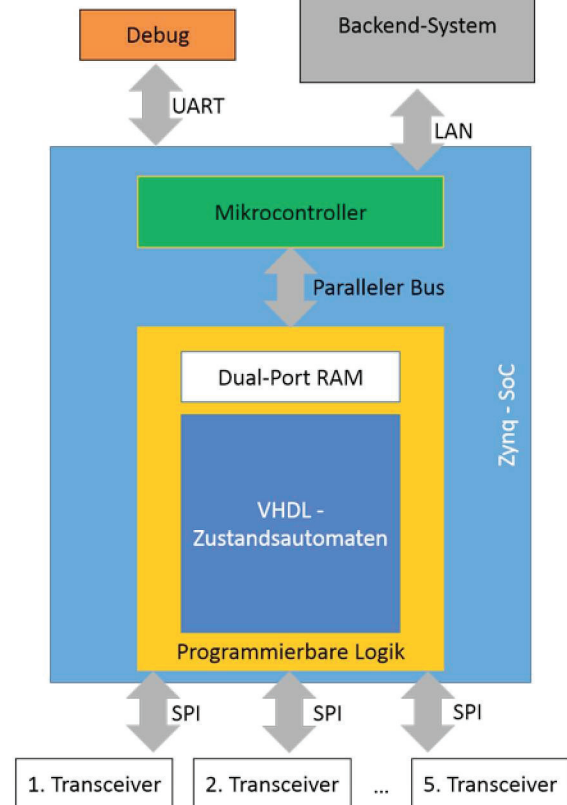


Abb. 4: Hardware-Architektur des Gateways.



Abb. 5: Foto des Hardware-Aufbaus des Gateways mit aufgesteckten Funkmodulen.

Durch die zusätzliche räumliche Trennung von UL- und DL-Antennen werden Interferenzen reduziert. Das Gehäuse des Gateways wurde speziell an die Komponenten angepasst und mittels 3D-Druck hergestellt. Der LAN-Anschluss ist durch einem in Abbildung 6 am unteren Rand liegenden, roten Steckverbinders aus dem Gehäuse geführt.



Abb. 6: Foto des Gateways mit den Antennen des Receiver-Zweigs, eingebaut in ein Gehäuse und herausgeführten Anschluss für eine externe Sendeantenne.

Die Sensoren sind ebenfalls modular aufgebaut. Somit können auch sensorseitig neue Funkmodule bzw. Funktechnologien einfach integriert bzw. substituiert werden. Hierzu verfügen die Sensoren über eine spezielle, innerhalb von ESIMA standardisierte Schnittstelle. In dem hier beschriebenen Funksystem werden sensorseitig derzeit Funkmodule mit dem CC2541-SoC von Texas Instruments eingesetzt [16], da diese SoCs neben dem Transceiver einen Mikroprozessor zur Steuerung des Kanalzugriffs beinhalten.

Koexistenztest

Exemplarisch ist ein typisches, im Rahmen von ESIMA zu erwartendes Koexistenzszenario betrachtet worden: Drei WLAN-Systeme nach IEEE 802.11b/g [17] senden mit jeweils hoher Auslastung auf den WLAN-Kanälen 1, 7 und 13. Damit sind die Frequenzbereiche von 2402 MHz bis 2422 MHz, 2432 MHz bis 2452 MHz sowie 2462 MHz bis 2482 MHz durch diese WLAN-Systeme belegt. Diese Frequenzbereiche sind entsprechend für das Funksystem ausgespart. Der Messaufbau ist in Abbildung 7 gezeigt. Die eingesetzten WLAN-Accesspoints sind mit 30 dB, der Downlink des Gateways mit 20 dB und die Sensoren jeweils mit 10 dB Dämpfungsgliedern an einen 16-Fach Leisterteiler/Kombinierer angeschlossen.

Der Echtzeitspektrumanalysator ist mit einem 30 dB Dämpfungsglied an den Summenanschluss angeschlossen. Die Isolation zwischen den Anschlüssen ist mit typ. 30 dB angegeben, die Gesamteinfügedämpfung als Leisterteiler beträgt typ. 12,5 dB [18].

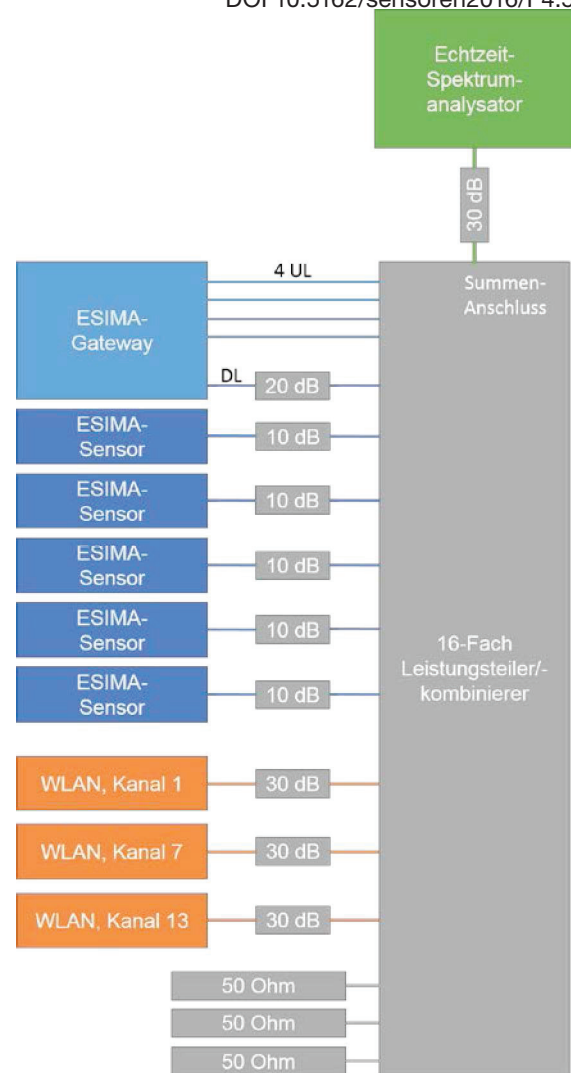


Abb. 7: Messaufbau zum Test eines Koexistenzszenarios.

Mit typisch 3,5 dB zusätzlicher Dämpfung durch Kabel, Anschlüsse und Adapter ergeben sich die jeweiligen Empfangsleistungen gemäß der Tabelle 1. Die Dämpfungen sind so gewählt worden, dass die Leistungen an den ESIMA-Komponenten jeweils in einer Größenordnung liegen, die in einem realen Szenario zu erwarten sind.

In Abbildung 8 ist ein Spektrogramm dieses Koexistenzszenarios gezeigt, welches mit einem Echtzeit-Spektrumanalysator aufgenommen wurde [19]. Auf der horizontalen Achse ist die Frequenz im ISM-Band von 2400 MHz bis 2483 MHz aufgetragen. Die Zeit in ms ist vertikal von oben nach unten aufsteigend dargestellt. Die Leistung ist durch die entsprechende Farbe kodiert. In Abbildung 8 sind auch die zeitlich nahezu ununterbrochen sendenden WLAN-Systeme in ihren jeweiligen Bändern mit den Mittelfrequenzen 2412 MHz, 2442 MHz und 2472 MHz zu erkennen. In den Frequenzbereichen dazwischen sendet das Funksystem mit einem Frequenzwechsel am Ende eines jeden Frames.

Tab. 1: Leistungspegel in dBm, die durch die angegebenen Sender jeweils an den jeweiligen Empfängern im Messaufbau anliegen.

Leistung / dBm		Sender		
		Gateway, DL	Sensor	WLAN
Sendeleistung		0	0	+10
Empfangsleistung	Gateway, UL	-66	-56	-56
	Sensor	-76	-66	-66
	WLAN	-96	-86	-111
	Echtzeit-Spektrum-Analysator	-66	-56	-66

In den durchgeführten Labor-untersuchungen ist mit dem beschriebenen, kabelgebundenem Versuchsaufbau keine gegenseitige Beeinflussung zwischen den WLAN-Systemen und dem hier vorgestellten Funksystem beobachtet worden.

In Abbildung 8 ist an den langen Datenpaketen zu erkennen, dass der Downlink jeweils für 3,328 ms ununterbrochen gesendet wird. Die beispielhaft verwendeten fünf Sensoren senden jeweils in jedem zweiten Frame, wobei in einem Frame drei Sensoren gleichzeitig senden und im nächsten Frame zwei Sensoren gleichzeitig senden. Der Hopping-Algorithmus sieht einen variierenden Frequenzabstand zwischen den Uplink-Spuren der Sensoren vor. Dies ist für die beiden parallel sendenden Sensoren im Spektrogramm bei etwa 5,5 ms im Vergleich zu etwa 12,5 ms zu erkennen.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein neues Funksystem vorgestellt, das eine ressourcenschonende Produktion durch Energiemonitoring fördert. Dieses Funksystem unterstützt dabei sowohl energieautarke Sensoren als auch Sensoren mit durchgängiger Energieversorgung und höheren Datenraten. Durch ein Blacklisting- und ein Frequency-Hopping-Verfahren ist das Funksystem koexistenzfähig zu weiteren zeitgleich betriebenen Funksystemen, wie beispielsweise WLAN. Zudem kann eine definierte, maximale Latenzzeit von 10 ms erreicht werden. Auf diese Weise können die Anforderungen für das Energieverbrauchs- und Umweltmonitoring im industriellen Fertigungsumfeld vollständig erfüllt werden.

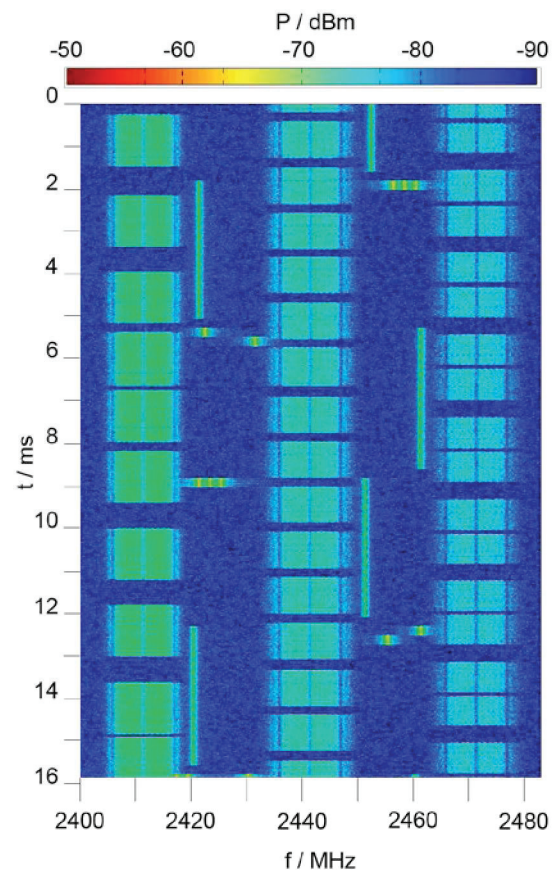


Abb. 8: Spektrogramm von dem beschriebenen Funksystem, das zusammen mit drei WLAN-Systemen zeitgleich betrieben wird.

Danksagung

Die in diesem Beitrag dargestellten Entwicklungen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern des vom BMBF geförderten Verbundprojekts ESIMA durchgeführt. Für die Unterstützung und sehr gute Zusammenarbeit möchten wir uns insbesondere bei Herrn Schulz (VDE-VDI), Herrn Haase, Herrn Hülsmann, Herrn Ritter, Herrn Pfeiffer, Herrn Erdogan (Festo AG), Herrn Mintenbeck, Herrn Kuhn, Herrn Merz (Hahn-Schickard), Frau Jürgensen, Herrn Link, Herrn Can, Frau Brunswig (C4C Engineering GmbH), Herrn Neef, Herrn Posselt, Herrn Tiede (IWF, TU-Braunschweig), Herrn Schirmeister, Herrn Stengel, Herrn Schulze, Herrn Wetzel (Daimler AG), Herrn Schmidt, Herrn Kraitmair, Herrn Pelka, Herrn Meyer, Herrn Lumbeck (EnOcean GmbH), Herrn Strass, Herrn Fischer, Herrn Krebs und Herrn Hahn (Varta Microbattery GmbH) bedanken.

Literaturnachweis

- [1] Verbundprojekt: Optimierte Ressourceneffizienz in der Produktion durch Energieautarke Sensorik und Interaktion mit Mobilen Anwendern, *ES/IMA*, [Online], [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://esima-projekt.de/>
- [2] R. Hornung, R. Heynicke, G. Scholl, *Schnelles drahtloses Funknetzwerk mit energieautarken Kommunikationsknoten*, 16. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2012, Nürnberg, 589-597 (2012); doi: 10.5162/sensoren2012/6.1.1
- [3] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall PTR, 2002, ISBN 0-13-042232-0
- [4] R. Heynicke et al., *Modular wireless fieldbus gateway for fast and reliable sensor/actuator communication*, IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, Hamburg, 1173-1176 (2008); doi: 10.1109/ETFA.2008.4638548
- [5] G. Scholl et al., *Wireless Automation*, 16th International Conference On Sensors and Measurement Technology, Sensor 2013, Nürnberg, 2013
- [6] B. Kärcher, R. Heynicke, G. Scholl, *WSAN–Wireless-Kommunikation auf der Sensor/Aktorebene auf dem Weg von der Spezifikation zur Umsetzung*, KommA 2014, Magdeburg, 2014
- [7] R. Heynicke, D. Krüger, G. Scholl, *Steigerung der Robustheit drahtloser Sensor/Aktor-Feldbussysteme durch prozessorientiertes adaptives Frequency-Hopping*, Wireless technologies Congress, Bochum 2010
- [8] D. Krüger, R. Heynicke, G. Scholl, *Wireless sensor/actuator-network with improved coexistence performance for 2.45 GHz ISM-band operation*, 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices 2012, Chemnitz, 1-5 (2012); doi: 10.1109/SSD.2012.6198099
- [9] D. Krush et al., *Standardisierung eines schnellen drahtlosen Sensor/Aktor-Netzwerkes für die Fertigungsautomatisierung*, XXIX Messtechnisches Symposium, 43-50 (2015); doi: 10.1515/9783110408539-006
- [10] IEEE Standards Association, *IEEE 802.15.1-2005 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN) Wireless LANs*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.1-2005.html>
- [11] Xilinx Inc., *Zynq-7000 All Programmable SoC*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>
- [12] Texas Instruments Inc., *CC2400*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://www.ti.com/product/CC2400>
- [13] Texas Instruments Inc., *CC2400*, Datenblatt, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2400.pdf>
- [14] Nordic Semiconductor ASA, *nRF2401A*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: https://www.nordicsemi.com/chi/node_176/2.4G_Hz-RF/nRF2401A
- [15] EnOcean GmbH, *Batterie lose Funktechnologie*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <https://www.enocean.com/de/>
- [16] Texas Instruments Inc., *CC2541*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://www.ti.com/product/CC2541?keyMatch=c2541&tisearch=Search-EN-Everything>
- [17] IEEE Standards Association, *IEEE 802.11: Wireless LANs*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>
- [18] Mini-Circuits, *ZC16PD-2185 Power Splitter/Combiner*, Datenblatt, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://194.75.38.69/pdfs/ZC16PD-2185.pdf>
- [19] Tektronix Inc., *Spektrumanalysator RSA6000*, [Zugriff: 2016-02-15]. Verfügbar unter: <http://de.tek.com/spectrum-analyzer/rsa6000>