

Anforderungen und Lösungen zur Drahtlos-Anbindung in Echtzeit-kritischen Automatisierungsanwendungen

Dr.-Ing. Andreas Frotzscher

Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS,
 Institutsteil Entwurf Adaptiver Systeme EAS
 Zeunerstraße 38
 01069 Dresden
 andreas.frotzscher@eas.iis.fraunhofer.de

Abstract: Regelungsanwendungen in der Industrieautomation stellen sehr hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der genutzten Kommunikationstechnologie. Insbesondere bei der Anbindung beweglicher Anlagenteile bieten drahtlose Übertragungssysteme deutliche Vorteile gegenüber drahtgebundenen Lösungen. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wurde am Fraunhofer IIS eine leistungsfähige Funktechnologie mit extrem niedrigen Übertragungslatenzen und flexibel anpassbare Zykluszeiten im Bereich < 1 ms erforscht.

Die Funktechnologie eignet sich als drahtlose Erweiterung von drahtgebundenen Echtzeit-Feldbussystemen und unterstützt einen weitest gehenden Plug & Manufacture Betrieb in realen Automatisierungsanwendungen. Dieser Beitrag fasst die typischen Anforderungen der Automatisierungsanwendungen zusammen und stellt die erforschte Funktechnologie vor.

1 Einleitung und Motivation

In zahlreichen Anlagen der Industrieautomatisierung befinden sich ein Teil der Sensoren und Aktuatoren sowie andere Automatisierungskomponenten auf beweglichen Subsystemen. Werkzeuge (sog. Endeffektoren) an Robotern, Schlittenbahnen sowie Sensoren und Aktoren auf Rundtaktischen oder Koordinatentischen sind Beispiele solcher Subsysteme. Darüber hinaus müssen in einigen Anwendungen die Werkzeugmaschinen oder Robotik-Systemen zwischen bestimmten Produktionsschritten ihr Werkzeuge automatisch wechseln.

In allen genannten Anwendungsbeispielen müssen die Sensoren und Aktuatoren häufig mit sehr kurzen Zykluszeiten im einstelligen Millisekunden-Bereich an die übergeordnete Steuerung bzw. Regelung angebunden werden. In vielen Anwendungen ist dabei eine isochrone, harte Echtzeitfähigkeit gefordert, d.h. diese genannten kurzen Zykluszeiten müssen jederzeit wiederholbar garantiert erreicht werden. Daraus resultieren sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des eingesetzten Kommunikationssystems. Tabelle 1 fasst die Anforderungen einiger Beispiel-Anwendungen zusammen.

Tabelle 1: Anforderungen aus industriellen Anwendungen

	Motion Control [1]	Werkzeug-Maschinen [2]	ZDKI Anforderungsprofile [3]		fast automation Anforderungsprofil [4]
			HiFlecs B	HiFlecs C	Closed Loop Control
Isochrone Zykluszeit	250 μ s – 1 ms	< 500 μ s	1 ms	125 μ s – 1 ms	125 μ s
Paketverlust-rate	$<10^{-9}$	$<10^{-9}$	-	$<10^{-9}$ max. 1 Paket-fehler / Tag & Link	max. 1 Paketverlust / Tag < 2 Paketverlust in Folge / Monat
Telegramm-größen	20 – 50 Byte	50 Byte	< 50 Byte	17-37 Byte	> 16 Byte
Bewegungs-geschwindigkeit	<10 m/s	-	< 6 m/s	$<5,5$ m/s	$< 5,5$ m/s
Reichweite	< 50 m	-	250 m	> 10 m	> 10 m

Zur Anbindung dieser beweglichen Komponenten werden derzeit ausschließlich drahtgebundene Echtzeit-Bussysteme (z.B. ProfiNET IRT, EtherCAT, Sercos III) in Verbindung mit Kabelschleppketten, Drehdurchführungen, Schleifkontakte und Steckkontakte (insbesondere für Wechselwerkzeuge) eingesetzt. Jedoch bringen diese zahlreiche Nachteile mit sich, wie die Beschränkung der möglichen Bewegungstrajektorien der Anlagenteile, der Anzahl anschließbarer Automatisierungskomponenten sowie Einschränkungen bzgl. der spätere Umrüstung- und Erweiterbarkeit. Darüber hinaus sind sie anfällig gegenüber Kabelbrüchen, Materialermüdung und Verschmutzungen.

Drahtlose Übertragungssysteme können hier deutliche Verbesserungen erzielen. Allerdings konnten die bisher verfügbaren Funktechnologien diese hohen Anforderungen (vgl. Tabelle 2) nicht erfüllen. Die nächste Mobilfunk-Generation 5G wird in ihrer Ausprägung URLLC (engl. Ultra Reliable Low Latency Communication) Zykluszeiten von 1 ms bei der max. Paketverlustrate von 10^{-5} auf der Luftschnittstelle unterstützen [9]. Dies ist zwar eine deutliche Verbesserung des aktuellen Stands der Technik. Für Anwendungen aus dem Bereich der Motion Control als auch bei Werkzeugmaschinen reichen diese Verbesserungen jedoch noch nicht aus. Sie erfordern Zykluszeiten im Sub-Millisekunden-Bereich als auch Paketfehlerraten von weniger als 10^{-9} .

Tabelle 2: Aktuelle und zukünftige Funktechnologien für industrielle Anwendungen

Funk-Technologie	WLAN [5]	IWLAN [6]	Bluetooth [7]	IO-Link Wireless [8]	5G URLLC [9]
Frequenzbänder	2,4 GHz, 5 GHz, 60 GHz	2,4 GHz, 5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	Mobilfunkfrequenzen, 3,7 GHz, 5 GHz
Min. Zykluszeit (Luftschnittstelle)	k. A.	k. A.	1,5 ms	5 ms	1 ms
Max. Paketfehlerrate	k. A.	k. A.	k. A.	10^{-9}	10^{-5}
Max. Teilnehmeranzahl / Funkzelle	> 100	> 100	7	120	k. A.

In diesem Beitrag wird eine neue Funktechnologie vorgestellt. Im Vergleich zu heutigen Funktechnologien wird damit eine echtzeitfähige Signalübertragung mit einer bis zu 8-fach kürzeren Zykluszeit bei einer deutlich verbesserten Zuverlässigkeit ermöglicht.

2 Echtzeit-Funksystem UWIN

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wurde die neuartige Echtzeit-Funktechnologie UWIN (Ultra Reliable and realtime Wireless Industrial Network) für industrielle Anwendungen erforscht und entwickelt. Sie ist als Drahtlos-Erweiterung für drahtgebundene Echtzeit-Feldbusse ausgelegt und erfüllt das Closed-Loop-Anforderungsprofil aus [4].

In Analogie zur Topologie eines Feldbus-Systems dient ein Funkmodem als Gateway zur drahtgebundenen Infrastruktur, bzw. zur Regelung. Für die Systemarchitektur ist es naheliegend, dieses Funkmodem als Basis (Master) für ein zelluläres Funksystem zu betreiben. Die Kommunikation der Funkteilnehmer (Slaves) mit der Regelung wird über den Master abgewickelt, zusätzlich wird auch die Zeitsynchronisation der mobilen Slaves über den Master gesteuert (in Entsprechung zu Anforderungen aus dem Precision Time Protocol [10]).

Abbildung 1 zeigt die Netzwerktopologie zusammen mit dem inneren Aufbau der Funkmodems. Der Kommunikationsstack ist schematisch anhand der Schichten des OSI (Open Systems Interconnection) Modells dargestellt. In der Abbildung sind die untersten Schichten (PHY, MAC und Netzwerkschicht) dargestellt. Zusätzlich enthält der Master das Feldbus-Gateway zur Anbindung an die übergeordnete Regelung, bzw. der Infrastruktur, während die Slaves digitale I/O Schnittstellen zum Anschluss von Sensoren und Aktoren enthalten. Darüber hinaus verfügt der Master über ein Modul zur Koexistenzanalyse, das dem Netzwerkmanagement Informationen über den Zustand des Funksystems und der Funkumgebung liefert.

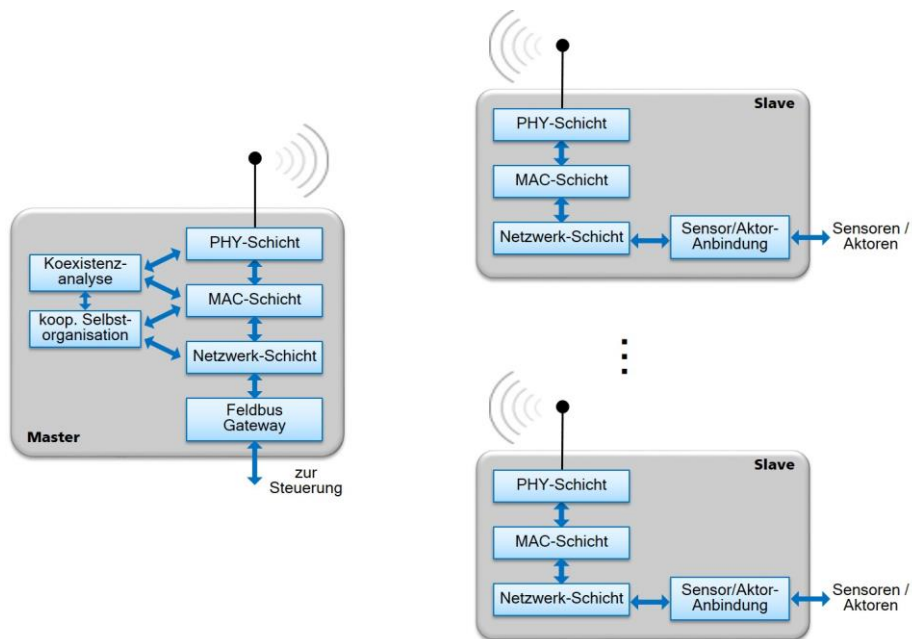


Abbildung 1: Netzwerktopologie und Architektur der Funkknoten

Die Leistungsparameter dieser neuen Funktechnologie sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 Leistungsparameter des UWIN Echtzeit-Funk Systems

Parameter	Wert	Bemerkung
Zykluszeit	125 μ s – 10 ms	Adaptierbar an Anwendungsanforderung
Topologie	Stern	
Anzahl Slaves / System	8 Slaves (@ 125 μ s) 80 Slaves (@ 1 ms)	Einstellbar
Payload pro Slave	max. je 33 Byte in UL & DL	Adaptierbar
Reichweite	> 20 m	
Zuverlässigkeit	Paketverlust < 10^{-9}	
Frequenzband	5 GHz (U-NII)	
Signalbandbreite	2 x 20 MHz	

Beim Einsatz von Funkssystemen in der Industriautomation ergeben sich verschiedene Herausforderungen. Zum einen liegen sehr funkunfreundliche Umgebungsbedingungen vor. Diese zeichnen sich durch einen starken und schwer vorhersagbaren Mehrwegeempfang, Interferenzen mit anderen Funkssystemen aus. Dies erfordert auf physikalischer Schicht eine robuste Wellenform, mit der sich die extremen und gegensätzlichen Anforderungen Zuverlässigkeit und geringe Latenz im Rahmen der Vorgaben aus Sensor-Aktor-Netzwerken vereinbaren lässt. Durch die Nutzung mehrerer Diversitätsgrade (Raum, Zeit und Frequenz) im Medienzugriff wird die Zuverlässigkeit des Systems erhöht. Ein weiterer wichtiger Baustein zur Garantie der Echtzeitfähigkeit ist der gleichzeitige Betrieb eines Interferenz- und Koexistenzmanagements, um den Zustand des Funksystems überwachen zu können und gleichzeitig benachbarte Funkssysteme erkennen zu können.

Im Folgenden werden die wesentlichen Merkmale des Funksystems näher dargestellt.

2.1 PHY

Als Basis für die Signalstruktur (Wellenform) der Funkübertragung wird das Modulationsverfahren MIMO-OFDM verwendet. Die Verwendung der Mehrantennentechnik MIMO (Multiple Input Multiple Output) dient der Erhöhung der Übertragungssicherheit durch die Ausnutzung der Diversität der Funkkanäle. Die OFDM-Signalstruktur baut auf 802.11a [11] auf, welches speziell für das 5 GHz U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) Band angepasst wurde. Prinzipiell können aber auch andere Frequenzbänder genutzt werden, wie beispielsweise das Frequenzband 3,7 – 3,8 GHz, das für industrielle Funkssysteme in Deutschland reserviert ist. Dafür können bei der Bundesnetzagentur eine regionale Zuteilung beantragt werden. Um dieses Frequenzband nutzen zu können, sind jedoch Änderungen in der Modulation auf der PHY Schicht notwendig.

Die hohe Signalbandbreite (20 MHz Kanal) zusammen mit einer kurzen Symboldauer (kleine FFT Länge) stellt den Grundbaustein dar, um sehr kurze Paketlängen zu erreichen. Dies ist Grundvoraussetzung einer extrem niedrig-latenten Datenübertragung und erfüllt die Anforderungen an sehr kurze Zykluszeiten der Sensor/Aktor-Regelungs-Kommunikation.

Das verwendete Modulationsverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ist speziell geeignet, den im industriellen Umfeld auftretenden Mehrwegeempfang mit passenden Entzerrungsalgorithmen zu beherrschen. In Tabelle 4 sind die Parameter des Modulationsverfahrens, sowie der Kanalkodierung zusammengefasst.

Tabelle 4: OFDM System Parameter der PHY Schicht

Parameter	Variable	UWIN
Trägerfrequenz	f_{RF}	5.150 – 5.725 GHz
Abtastperiode	T_S	50 ns
IFFT Länge	N	64
OFDM Symboldauer	T_{OFDM}	3.2 μ s
CP Länge	N_{CP}	0.8 μ s
# OFDM Symbole pro Nutzer	N_{OFDM}	2
Burst Dauer	T_{Burst}	8 μ s
Belegte Bandbreite	BW	16.5625 MHz
Unterträgerabstand	Δf	312.5 kHz
# der Daten-Unterträger	K	38
# der Pilotunterträger	K_P	14
Modulation		bis zu 64-QAM
Channel Code		Conv. Code (base R=1/2)

2.2 Medienzugriff

Das UWIN Funksystem realisiert eine logische Stern-Topologie. Um die gleichzeitig geforderte Zuverlässigkeit zu erreichen, nutzt die das Funksystem 2 Funk-Kanäle gleichzeitig. Zur Unterstützung der geforderten isochronen Echtzeitfähigkeit organisiert der Master den Medienzugriff der Funkknoten nach einem Zeitschlitzverfahren. Ihm wird eine TDMA Rahmenstruktur (Superframe) zugrunde gelegt, der zudem eine zeitliche Trennung von Uplink und Downlink realisiert (Time Division Duplex). Den verschiedenen Übertragungen zwischen dem Master und den Slaves werden dedizierte Zeitschlitze auf die beiden Funkkanäle zugewiesen, die zur Laufzeit entsprechend der aktuellen Kanaleigenschaften und Umfeldbedingungen dynamisch angepasst werden.

Das dynamische Scheduling des Medienzugriffes benötigt Informationen über den Zustand der Funkverbindungen im Netzwerk und über die Funkumgebung. Das Koexistenzmanagement hat die Aufgabe diese Informationen bereitzustellen. Zur Überwachung des Zustandes der verschiedenen Funkverbindungen erhebt der Master-Knoten statistische Kenngrößen zur Beurteilung der Übertragungsqualität seines Empfangssignals (u.a. Bitfehler- und Paketfehlerraten, Empfangsleistung). Zusätzlich wird die Nutzung der

Funkfrequenzbänder und benachbarter Frequenzbänder überwacht. Dazu wird das Empfangssignal spektral ausgewertet, Funkpakete im Frequenzspektrum erkannt und deren Funktechnologie identifiziert. Aus diesen Informationen werden statistische Kenngrößen abgeleitet, u.a. Pakethäufigkeiten, Empfangsleistungsverteilung und Muster in den Paketabfolgen. Diese Informationen nutzt das Netzwerkmanagement zur Beurteilung der aktuellen Netzwerkqualität und löst ggf. den Wechsel eines Kanals in dem Funksystem aus. Da UWIN zwei Kanäle gleichzeitig nutzt, kann der Kanalwechsel vollständig nahtlos erfolgen.

2.3 Feldbus-Anbindung

In der Automatisierungstechnik sind standardisierte Schnittstellen und die Interoperabilität der Komponenten von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund verfügt der UWIN Master Knoten über eine ProfiNET IRT Schnittstelle und lässt sich als Peripherie-Gerät in ein bestehendes Regelungssystem einbinden. Die Prozessabbilder aller UWIN Slave-Knoten werden in dem UWIN Master zu einem Prozessabbild zusammengefasst und um ein Diagnose-Byte zur Signalisierung von Übertragungsproblemen ergänzt. Dieses Prozessabbild wird zyklisch über die ProfiNET IRT Schnittstelle mit der Regelung synchronisiert. Auf diese Weise ist die Funkübertragung der Prozessdaten für die Regelung vollständig transparent. Mithilfe des Diagnose-Byte kann die Regelung zudem eine sichere Fehlerbehandlung im Fall von Übertragungsproblemen durchführen und je nach Anwendung in den Übergang in den Fail-Safe Status einleiten.

Die erforderliche Zeitsynchronisation zwischen der Regelung und dem UWIN Master ist über das PTP Protokoll in ProfiNET IRT abgesichert. Die Zeitsynchronisation innerhalb des UWIN Funksystems wird über die Aussendung von sog. Beacons realisiert und erreicht eine Genauigkeit von weniger als 1 Mikrosekunde. Dabei synchronisiert der UWIN Master seinen TDMA Zeitrahmen mit dem IRT Zyklus der Regelung. In Abbildung 2 ist der Zeitablauf der einzelnen Übertragungen in dem UWIN System in einem Ablaufdiagramm beispielhaft dargestellt für einen UWIN Master und zwei UWIN Slaves.

Die Funkübertragung in dem UWIN Netzwerk ist direkt an den ProfiNET IRT Zyklus gekoppelt. Durch die Funkübertragung wird eine zusätzliche Latenz von einer Zykluszeit eingefügt. Dies muss in der Auslegung der Regelung berücksichtigt werden.

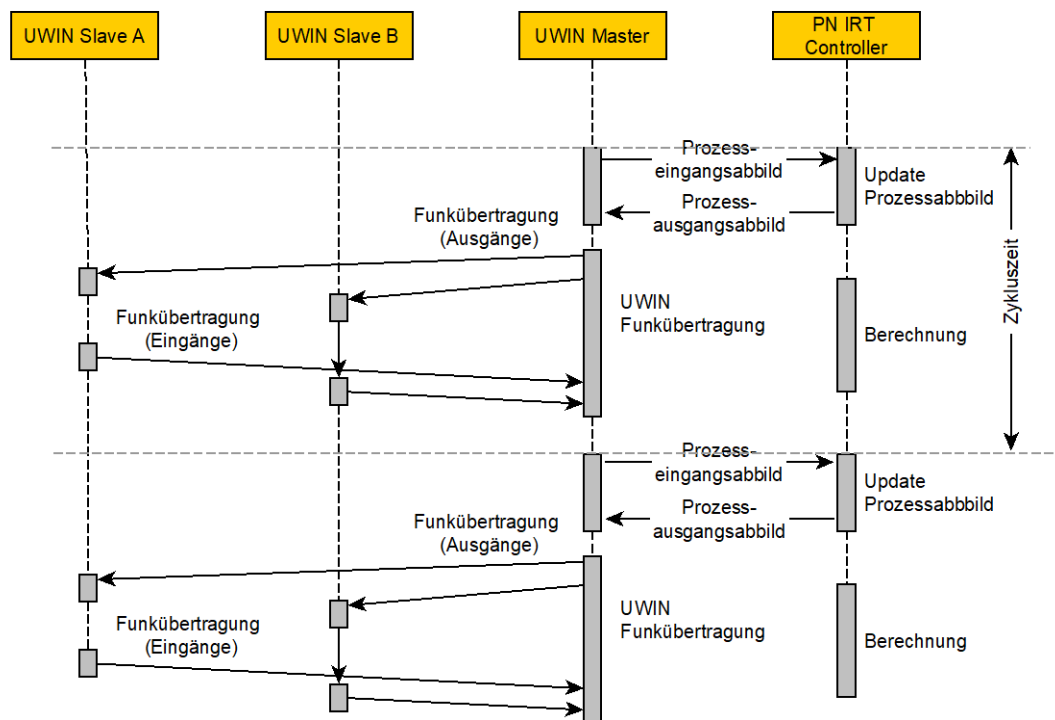


Abbildung 2: Ablaufdiagramm der Kommunikation einer Regelung mit einem UWIN Funksystem

In der ersten Realisierung des UWIN Funksystems können an die Slaves zunächst nur digitale Sensoren und Aktuatoren angeschlossen werden. Auf Kundenwunsch können auch andere Schnittstellen bereitgestellt

werden. Wünschenswert wäre beispielsweise auch eine ProfiNET IRT Schnittstelle in den Slaves. Jedoch ist die direkte Übertragung der ProfiNET IRT Kommunikation (sog. Bridging) aufgrund unterschiedlichen Übertragungslatenzen zu den per Ethernet und Funk angebotenen Peripheriegeräten sehr schwierig. In Kooperation mit einem Hersteller von ProfiNET IRT Controllern könnte diese Problemstellung durch eine direkte Integration des UWIN Master in die ProfiNET IRT Regelung gelöst werden. Damit ließe sich zudem die zusätzliche Latenz durch die Funkübertragung deutlich minimieren.

3 Labordemonstration

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von UWIN wurde das Funkprotokoll in Hardware implementiert. Durch die sehr hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit und die Übertragungsraten wurde eine dedizierte FPGA- bzw. DSP/SDR-Implementierung notwendig. Als Hardware Basis für die Funkknoten wurde ein frei am Markt verfügbares Xilinx Evaluationsboard (Typ ZC706) gewählt.

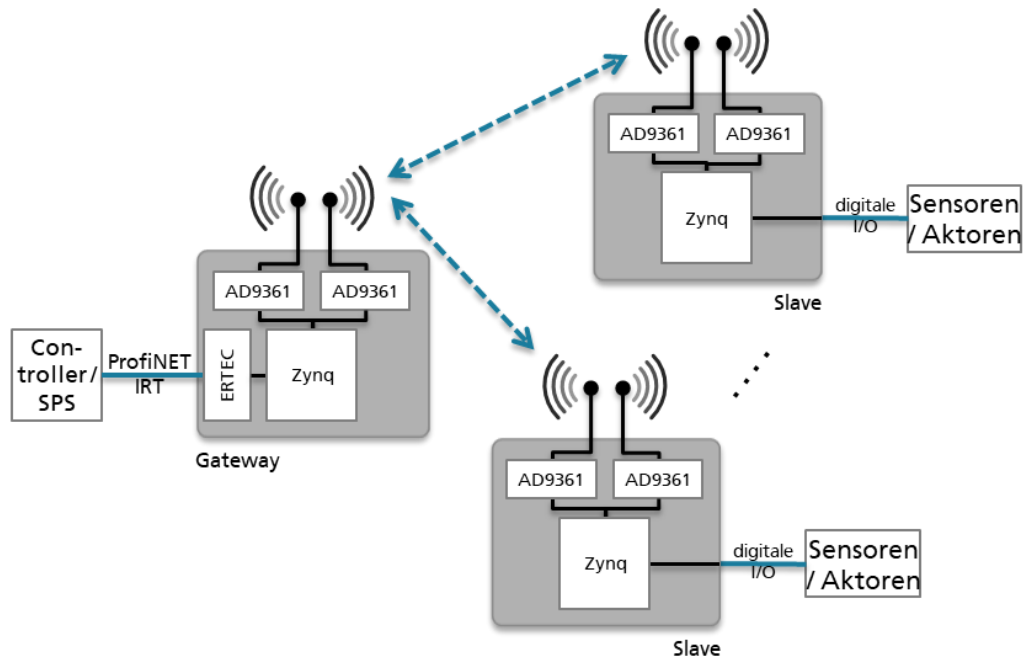


Abbildung 3: Blockdiagramm des Evaluierungs-Kit

Der Master und die Slaves enthalten zwei SDR Transceiver-Module AD 9361 von Analog Devices und einen Xilinx Zynq SoC als Verarbeitungshardware. Die ProfiNET IRT Anbindung im UWIN Master wird mithilfe eines ERTEC 200p realisiert. Die aktuelle Entwicklungshardware basierend auf den o.g. Development-Boards ist in einem 19“ Einschub eingebaut (Abbildung 4). Auf dieser Hardware wurden der PHY und MAC integriert, sowie erste Messungen in Laborumgebung durchgeführt.



Abbildung 4: Entwicklungshardware

4 Evaluierungs-Kit der UWIN Funktechnologie

Aktuell wird an einer dedizierten Hardware-Lösung mit erweitertem Funktionsumfang und einem deutlich geringeren Formfaktor von 160 x 105 x 55 (L x B x H in mm) gearbeitet. Abbildung 5 zeigt den aktuellen Aufbau der UWIN Funksystems im Labor.



Abbildung 5: Labor-Test der UWIN Funkknoten

Auf Basis dieser Funkknoten werden Evaluierungskits zusammengestellt, die jeweils ein UWIN Master und mehrere UWIN Slaves enthalten. Die Evaluierungskits werden interessierten Kunden aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus, als auch Anlagenbetreibern angeboten. Sie können somit bereits jetzt die Leistungsfähigkeit der UWIN Funktechnologie in ihren Echtzeit-Regelungsanwendungen untersuchen. Gleichzeitig können sie auch völlig neue Anlagenkonzepte ausprobieren und deren Potentiale ausloten, die jetzt durch die flexible Vernetzung mittels UWIN ermöglicht werden.

Während der Evaluierungsphase werden die Kunden bei der Integration der UWIN Funkknoten in ihre Anwendungen unterstützt. Darüber hinaus können auch kundenspezifische Anpassungen an den UWIN Funkknoten umgesetzt werden.

Im weiteren Verlauf der Technologie-Evaluierung adressiert das Angebot auch Hersteller von Automatisierungskomponenten. In enger Kooperation können sie die Möglichkeiten einer direkten Integration der UWIN Funktechnologie in ihre Regelungskomponenten untersuchen.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Funktechnologie UWIN vorgestellt, die insbesondere für die drahtlose, lokale Vernetzung in Echtzeit-Automatisierungsanwendungen entwickelt wurde. Sie kann als eine drahtlose Erweiterung von Echtzeit-Feldbussystemen eingesetzt werden und ist insbesondere für die Sensor/Aktor-Anbindung mobiler oder beweglicher Anlagenteile geeignet. Beispiele dafür sind die Anbindung von Werkzeugen und Greifern in Robotik-Anwendungen oder die Sensor/Aktor-Anbindung auf Rundtaktischen oder Koordinatentischen. Gleichzeitig werden durch die flexible Vernetzung mit UWIN neuartige und flexible Anlagenkonzepte umsetzbar.

Die UWIN Funktechnologie ist für den URLLC Bereich ausgelegt. Sie unterstützt extrem schnelle Automatisierungssysteme mit Zykluszeiten von minimal 125 μ s bei einer gleichzeitig sehr hohen Zuverlässigkeit mit einer Paketverlustrate von $< 10^{-9}$.

Aktuell wird an der Reduzierung des Formfaktors der Funkknoten und der Entwicklung eines Evaluierungskits gearbeitet. Dieses richtet sich an interessierte Anlagen- und Maschinenbauern, sowie auch an Anlagenbetreiber und Komponentenhersteller. Mithilfe des angebotenen UWIN Evaluierungskits können Kunden die Leistungsfähigkeit des Echtzeitfunksystems in ihren Anwendungen untersuchen. Damit können sie bereits jetzt die Potentiale neuartiger flexible Anlagenkonzepte ausloten, die durch die flexible Vernetzung mit UWIN ermöglicht werden.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde u.a. unterstützt im Rahmen der Förderprojekte „fast automation“ und „fast realtime“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Förderprogramms „Region Zwanzig20“ unter der Förderkennziffer 03ZZ051 OA und 03ZZ0504D.

7 Literaturverzeichnis

- [1] I. Aktas, A. Bentkus, F. Bonanati, A. Dekorsy, C. Dombrowski, M. Doubrava, A. Golestani, F. Hofmann, M. Heidrich, S. Hiensch, R. Kays, M. Meyer, A. Müller, S. ten Brink, N. Petreska, M. Popovic, L. Rauchhaupt, A. Saad, H. Schotten, C. Wöste und I. Wolff, „Funktechnologien für Industrie 4.0,“ VDE ITG, Frankfurt am Main, 2017.
- [2] A. Frotzsch, U. Wetzker, M. Bauer, M. Rentschler, M. Beyer, S. Elspass und H. Klessig, „Requirements and current solutions of wireless communication in industrial automation,“ in *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, Sydney, 2014.
- [3] D. Schulze, A. Gnatt und M. Krätzig, „Anforderungsprofile im ZDKI,“ 26 Oktober 2016. [Online]. Available: http://www.industrialradio.de/Publications/ZDKI-FG1_AnforderungsProfile_041116.pdf. [Zugriff am 11 April 2018].
- [4] „fast automation,“ [Online]. Available: <https://de.fast-zwanzig20.de/industrie/fast-automation/>.
- [5] G. Cena, L. Seno, A. Valenzano und C. Zunino, „On the Performance of IEEE 802.11e Wireless Infrastructures for Soft-Real-Time Industrial Applications,“ *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Bd. 6, Nr. 3, 08 2010.
- [6] Siemens, „IWLAN – the WLAN for challenging industrial applications,“ [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/industrial-wireless-lan.html>. [Zugriff am 19 09 2019].
- [7] G. Scheible, D. Dzung, J. Endresen und J.-E. Frey, „Unplugged but connected,“ *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 25-34, 2007.
- [8] Kunbus, „IO-Link Wireless,“ [Online]. Available: <https://www.kunbus.de/io-link-wireless.html>. [Zugriff am 19 09 2019].
- [9] K. Technologies, „Keysight Blogs,“ Keysight, [Online]. Available: https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2019/02/22/a_blueprint_to_5gne-9Bp4.html. [Zugriff am 19 09 2019].
- [10] IEEE, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE Std. 1588–2002, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.
- [11] IEEE, IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016.

