

Zuverlässige Echtzeit-Funkvernetzung für die Automation – Durchbruch in den Sub-Millisekunden-Bereich

Andreas Frotzscher, Hannes Ellinger, Oliver Haala

Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS,
Institutsteil Entwurf Adaptiver Systeme EAS
Münchner Straße 16
01087 Dresden

{ andreas.frotzscher, [hannes.ellinger](mailto:hannes.ellinger@eas.iis.fraunhofer.de) }@eas.iis.fraunhofer.de

Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Nordostpark 84

90411 Nürnberg

oliver.haala@iis.fraunhofer.de

Abstract: Viele Anwendungen im Bereich der Industrieautomation müssen Daten sehr latenzarm und in Echtzeit übertragen. Insbesondere bei der Anbindung beweglicher Anlagenteile bieten drahtlose Übertragungssysteme deutliche Vorteile gegenüber drahtgebundenen Lösungen. Aktuell verfügbare Funktechnologien können jedoch Anwendungen mit isochronen Zykluszeiten im Sub-Millisekunden-Bereich nicht unterstützen. Für diese Anwendungen wurde am Fraunhofer IIS die UWIN Funktechnologie entwickelt, die sich durch extrem niedrige Übertragungslatenzen und flexibel anpassbare Zykluszeiten im Bereich < 1 ms auszeichnet. Sie ist ausgelegt als Funk-Erweiterung von drahtgebundenen Echtzeit-Feldbussystemen und ermöglicht die latenzarme Übertragung im Nahbereich. Die UWIN Funktechnologie wurde in Laborumgebung verifiziert und wird aktuell in verschiedenen Feldversuchen evaluiert. Dieser Beitrag vergleicht die UWIN Funktechnologie mit den aktuell verfügbaren Funkssystemen und stellt die Ergebnisse der Validierungstests in Laborumgebungen sowie der Feldversuche vor.

1 Einleitung und Motivation

Moderne Produktionssysteme sind geprägt von einem hohen Digitalisierungsgrad und Flexibilität der Produktionsprozesse. Sie enthalten häufig eine Vielzahl von beweglichen Subsystemen (z.B. Einarm-Roboter, Schlittenbahnen) und mobilen Systemen (z.B. Autonomous mobile robots, AMR). Diese benötigen dabei meist eine latenzarme Datenanbindung an die übergeordnete Steuerung bzw. Regelung oder an andere Subsysteme. Insbesondere zur Regelung sehr dynamischer Prozesse (z.B. Antriebsregelung, Motion Control, z.B. in Robotikszszenarien siehe Abbildung 1) werden isochrome Zykluszeiten im Sub-Millisekunden-Bereich bei einer



© Hiersemann

Abbildung 1: Beispiel einer Roboter-gestützten Prüfanlage (Quelle: Fa. Hiersemann Prozessautomation)

extrem hohen Übertragungszuverlässigkeit benötigt. In [1] wurden die Anforderungen verschiedenster industrieller Anwendungen untersucht und tabellarisch zusammengestellt (Siehe Tabelle 1).

Derzeit werden dafür ausschließlich drahtgebundene Echtzeit-Bussysteme (z.B. ProfiNET IRT, EtherCAT, Sercos III) in Verbindung mit Kabelschleppketten, Drehdurchführungen und Schleifkontakten eingesetzt. Dies beschränkt jedoch sehr die Beweglichkeit der Anlagenteile, benötigt einen relativ großen Bauraum und kann beim Retrofit von bestehenden Anlagen nur mit erheblichem Kosten- und Zeitaufwand eingesetzt werden. Der Datenaustausch zwischen mobilen Subsystemen (z.B. zwischen kollaborierenden AMR's) ist mit drahtgebundenen Bussystemen überhaupt nicht möglich.

Drahtlose Übertragungssysteme können hier deutliche Verbesserungen erzielen, da sie neben der Flexibilität, eine uneingeschränkte Beweglichkeit ermöglichen, den Retrofit von bestehenden Anlagen sehr erleichtern und den Datenaustausch zwischen kollaborierenden mobilen Systemen erst ermöglichen.

	Diagnose & Wartung		Diskrete Fertigung		Lager und Logistik		
	Generell	Condition Monitoring	Generell	Motion Control	Generell	AGV	Kran-szenario
Latenz (Sensor → Controller → Aktor)	>20 ms	100 ms	1 ms – 12 ms	250 μs – 1 ms	> 50 ms	15 ms – 20 ms	15 ms – 20 ms
Zuverlässigkeit (Erfolgreiche Übertragung in Latenzanf.)	$1 - 10^{-4}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-9}$	$1 - 10^{-9}$	$1 - 10^{-2}$	$1 - 10^{-6}$	$1 - 10^{-6}$
Datenrate	kbit/s – Mbit/s	kbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s
Paketgröße	> 200 Byte	1 – 50 Byte	20 – 50 Byte	20 – 50 Byte	< 300 Byte	< 300 Byte	< 300 Byte
Reichweite	< 100 m	100 m – 1 km	< 100 m	< 50 m	< 200 m	~ 2 m	< 100 m

Tabelle 1: Anforderung verschiedener industrieller Anwendungen

2 Stand der Technik

Bisher in der Industrie eingesetzte Funktechnologien (z.B. WLAN, IWLAN, Bluetooth, IO-Link Wireless) können die o.g. Anforderungen im Bereich Motion Control nicht vollständig erfüllen. Ihre Übertragungslatenzen sind zu hoch, sodass sie keine isochronen Zykluszeiten von < 1 ms unterstützen. Gleichzeitig werden neue Funktechnologien demnächst zur Verfügung stehen und Verbesserungen hinsichtlich der Latenz und Zuverlässigkeit anbieten. Hierbei ist neben der neuen Mobilfunk-Generation 5G mit Release 16 in ihrer Ausprägung URLLC (engl. Ultra Reliable Low Latency Communication) auch die neue Funktechnologie DECT 2020 New Radio zu nennen. Gleichzeitig wird an einer Erweiterung des WiFi-Standards gearbeitet, der mit IEEE 802.11be kürzere Übertragungslatenzen erreichen soll. Diese Technologien werden nachfolgend aus Sicht des Maschinen- und Anlagenbauers in ihren technischen Parametern und ihren Marktreifegraden verglichen. Hierfür werden 2 Szenarien betrachtet (Siehe Abbildung 2).

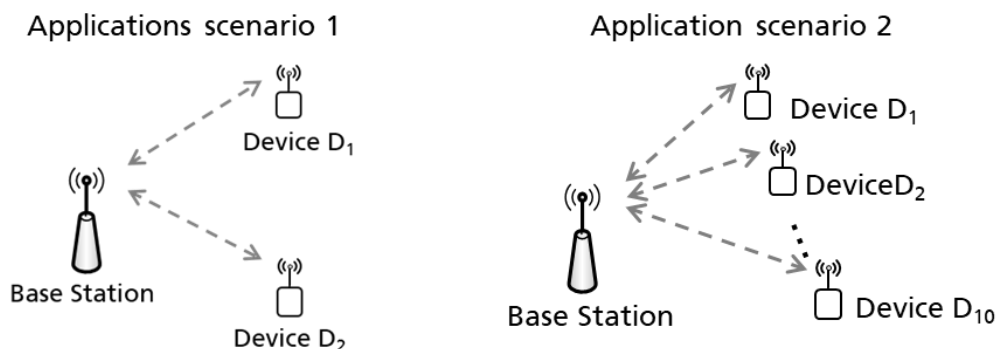


Abbildung 2 Betrachtete Applikationsszenarien für Technologievergleich (Zyklische Übertragung von je 16 Byte in Downlink und Uplink zwischen Base Station und 2 bzw. 10 Field Devices)

In beiden Szenarien sollen zyklisch Daten zwischen einer SPS oder Controller mit drahtlos angebotenen Sensoren, Aktoren bzw. sonstigen Peripheriegeräten übertragen werden. Dabei ist die SPS an eine Base Station angeschlossen und die Sensoren, Aktoren etc. an sog. Field Devices angebunden. In beiden Szenarien sollen zyklisch 16 Byte von der Base Station zu den Field Devices (Downlink) und zurück (Uplink) übertragen werden.

Wie oben erwähnt unterschieden sich die betrachteten Funktechnologien in ihrer Marktreife. Während von einigen Technologien bereits Produkte am Markt verfügbar sind, ist bei anderen Technologien der Standardisierungsprozess noch nicht abgeschlossen. Daher soll hier ein Marktreifegrad (engl. Market Readiness Level, MRL) eingeführt werden, angelehnt an den Technologiereifegrad (Technology Readiness Level, TRL).

MRL	Beschreibung
1 – 4	Technologie noch in Standardisierungsprozess
5	Standardisierung abgeschlossen und verabschiedet
7	Prototypen der Technologie am Markt verfügbar
9	Produkte der Technologie am Markt verfügbar

Tabelle 2: Kategorisierung des Marktreifegrades

Die betrachteten Funktechnologien werden hinsichtlich von 5 Parametern verglichen:

- MRL
- Minimal erreichbare Zykluszeit in dem Applikationsszenario 1 (2 Field Devices)
- Minimal erreichbare Zykluszeit in dem Applikationsszenario 2 (10 Field Devices)
- Paketverlustrate
- Netto-Paketgröße pro Zykluszeit, Verbindung und Downlink/Uplink

Abbildung 3 fasst die Ergebnisse des Technologievergleichs grafisch zusammen und stellt sie mit den Anforderungen aus dem Bereich Motion Control gegenüber.

IO-Link Wireless ist bereits seit einiger Zeit mit Produkten auf dem Markt verfügbar und erreicht unter den verglichenen Funk-Technologien die höchste Zuverlässigkeit (d. h. die niedrigste Paketverlustrate). Die Echtzeitfähigkeit (d. h. die minimal erreichbare Zykluszeit) sowie die Nettonutzdatenmenge pro Field Device sind jedoch vergleichsweise sehr gering. Die Spezifikation von DECT 2020 NR ist Ende 2020 verabschiedet worden. Es bietet gute Echtzeit- und Datennutzlastfähigkeiten, aber seine Zuverlässigkeitseigenschaften sind nicht zufriedenstellend. Die Spezifikation von 5G Rel. 16 ist zu Beginn dieses Jahres verabschiedet worden und bietet eine bessere Echtzeit und die höchste Nettonutzdatenmenge, hat aber Defizite bei der Übertragungszuverlässigkeit.

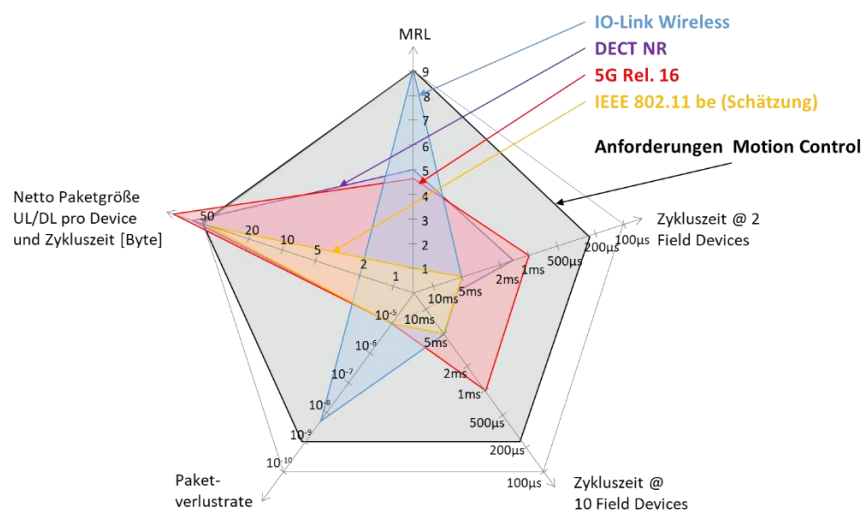


Abbildung 3: Vergleich des Stands der Technik mit den Anforderungen im Bereich Motion Control

Aktuell erarbeitet die IEEE 802.11be Working Group eine Erweiterung des WLAN Standards für niedriglatente Datenübertragungen. Dessen Standardisierung ist jedoch noch in einer sehr frühen Phase und die Leistungsparameter sind noch nicht abgestimmt. Anhand der adressierten Anwendungsfälle ist davon auszugehen, dass Übertragungslatenzen von minimal 5 ms bei einer mittleren Übertragungszuverlässigkeit erreicht werden sollen. Damit schneidet IEEE 802.11be im Vergleich zu den anderen Technologien am schlechtesten ab. Der Vergleich zeigt, dass keine der betrachteten Funktechnologien die Anforderungen von Motion Control-Anwendungen umfänglich erfüllt. Die Kombination von einer sehr niedrigen Übertragungslatenz bei einer gleichzeitig sehr hohen Übertragungszuverlässigkeit kann derzeit keine der untersuchten Funktechnologien bieten.

Generell existieren zur Erhöhung der Übertragungszuverlässigkeit etablierte Datensicherungsverfahren, die oberhalb der Bitübertragungsschicht eingesetzt werden können. So können im Falle eines erkannten Übertragungsfehlers angeforderte Sendewiederholungen (Automatic Repeat reQuest (ARQ)-Protokolle) genutzt werden, um ein Paket mehrfach zu übertragen. Dieser Prozess führt allerdings zu einer Erhöhung der Latenz. Einfacher, aber zeitlich deterministisch können Übertragungen unaufgefordert redundant erfolgen, wobei dies eine feste Reduktion des Datendurchsatzes zur Folge hat [2]. Weiterhin gewährleisten die genannten Verfahren keine Möglichkeiten zur Kompensation eines dauerhaft gestörten Übertragungskanal.

Eine Alternative dazu stellen die Verfahren der Network Coded Cooperation (NCC) dar. Diese vereinen die Vorteile kooperativer Verfahren mit den Vorteilen Netz-basierter Codierverfahren. Die Anwendung von NCC führt somit zu robusten und gleichermaßen effizienten Kommunikationseigenschaften. Es existieren zwar zahlreiche Entwürfe für Protokollschichten mit NCC-Funktionalitäten [3, 4, 5, 6], allerdings wurden nur die wenigsten dieser Entwürfe für URLLC Anwendungsfälle konzipiert. Die einzige bekannte Ausnahme bildet XOR-CoW Protokoll [6]. Allerdings sind die für dieses Protokoll vorgeschlagenen, Netz-basierten Codier- und Decodiervorgänge so simpel, dass das Potential an Zuverlässigkeitserhöhung nicht vollständig ausgeschöpft wird.

3 UWIN - Ultra reliable Wireless Industrial Network

Zur Unterstützung schneller Automatisierungssysteme wurde am Fraunhofer IIS die Echtzeit-Funktechnologie UWIN (Ultra reliable Wireless Industrial Networks) erforscht. Sie ist ausgelegt als eine Drahtlos-Erweiterung von Echtzeitfeldbussystemen zur isochronen Datenübertragung im Nahbereich, z.B. in Fertigungszellen. Sie zeichnet sich durch eine extrem hohe Übertragungszuverlässigkeit und gleichzeitig extrem niedrigen Übertragungslatenzen aus, wodurch isochrone Zykluszeiten von minimal 125 μ s zuverlässig unterstützt werden können.

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 Base Station für ein zelluläres Funksystem zu betreiben. Die Kommunikation der Funkteilnehmer (Field Devices) mit der Regelung wird über die Base Station abgewickelt, zusätzlich wird auch die Zeitsynchronisation der mobilen Field Devices über die Base Station gesteuert.

Abbildung 4 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.

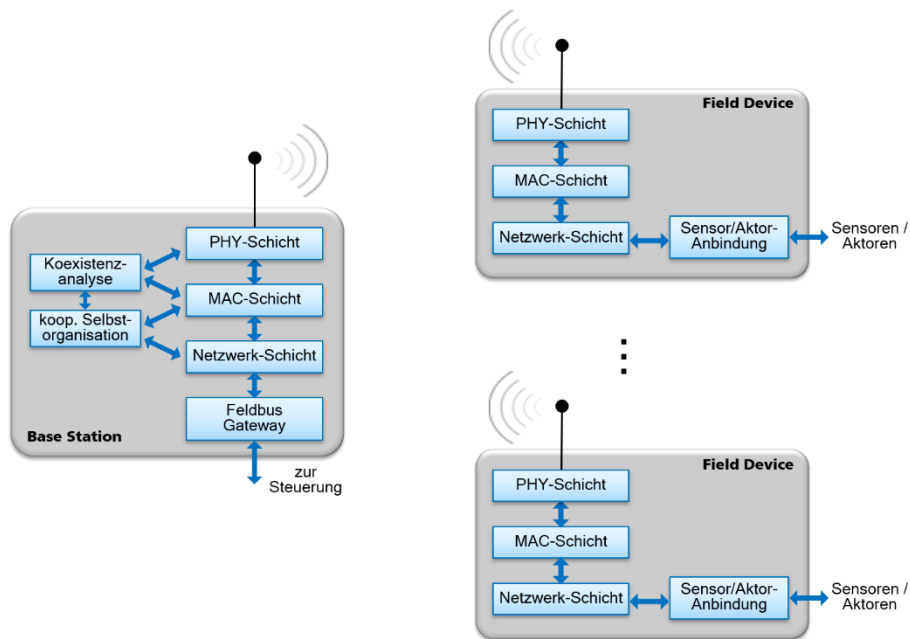


Abbildung 4: Netzwerktopologie und Architektur der Funkknoten

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	6 Slaves (@ 125 μ s) 80 Slaves (@ 1 ms)	Einstellbar
Payload pro Field Device	max. je 32 Byte in UL & DL	Adaptierbar
Reichweite	> 20 m	
Zuverlässigkeit	Paketverlustrate < 10^{-8}	
Frequenzband	5 GHz (U-NII)	
Signalbandbreite	2 x 20 MHz	

Beim Einsatz von Funksystemen in der Industrieautomation ergeben sich verschiedene Herausforderungen. Zum einen liegen sehr funkunfreundliche Umgebungsbedingungen vor. Diese zeichnen sich durch einen starken und schwer vorhersagbaren Mehrwegeempfang und Interferenzen mit anderen Funksystemen 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 Funksysteme erkennen zu können.

Der diagnostizierte Zustand des Funksystems kann auch zur kooperativen Selbstorganisation genutzt werden. Ein Aspekt dieser Selbstorganisation besteht darin, besonders störanfällige Kanäle durch die Ausnutzung kooperativer Paketweiterleitungsstrategien und NCC gezielt zu kompensieren. Gleichzeitig können die für

NCC erforderlichen Signalisierungsinformationen interpretiert werden, um den aktuellen Zustand des Funksystems noch genauer zu erfassen. Eine Modellbildung und Simulation des Funksystems erlaubt einerseits eine geeignete Wahl der Freiheitsgrade des NCC Verfahrens hinsichtlich einer angestrebten Erhöhung der Übertragungszuverlässigkeit und ermöglicht andererseits einen unmittelbaren Vergleich zwischen NCC und nicht-kooperativen Ansätzen.

3.1 Modellbildung

In Anlehnung an die bereits vorgestellten Applikationsszenarien (Abbildung 2) erfolgt eine Modellbildung des typischen Anwendungsfalls einer hochdynamischen Regelung. Innerhalb eines Kommunikationszyklus sollen Daten zwischen einer Base Station (BS, Controller) und den Field Devices (FD, Sensor/Aktor-Knoten) ausgetauscht werden. Konkret werden die auszutauschenden Down- bzw. Uplink Pakete mit Groß- bzw. Kleinbuchstaben bezeichnet (Abbildung 5).

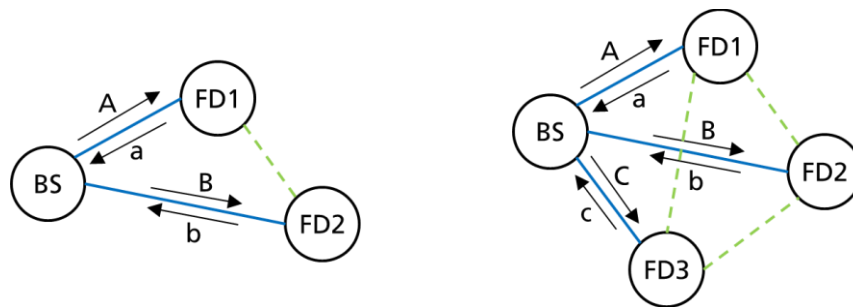


Abbildung 5: Visualisierung der gewünschten Paketübertragungen in einem Kommunikationssystem mit zwei (links) bzw. drei Field Devices (rechts)

Weiterhin wird von einer statischen, vollvermaschten Topologie ausgegangen, d.h. ein ausgesendetes Paket eines Teilnehmers kann sowohl unmittelbar von dem direkt adressierten Teilnehmer (blaue Linien in Abbildung 5) als auch von allen anderen Teilnehmern (grüne Linien in Abbildung 5) empfangen werden, sofern die Kanaleigenschaften zu diesem Zeitpunkt günstig sind. Die Modellierung dieser Eigenschaften erfolgt auf Paketebene, wobei jeder Kanal durch eine Paketfehlerrate parametrisiert wird. Die Paketfehlerrate gibt an, welcher Anteil an Paketaussendungen nicht erfolgreich empfangen werden konnte. Hierbei werden die Kanäle als symmetrisch und die auf unterschiedlichen Kanälen auftretenden Paketfehler als zeitlich unkorreliert angenommen.

Zur Bewertung des Verbesserungspotentials durch den Einsatz von NCC werden drei unterschiedliche Möglichkeiten der Datensicherung untersucht. Bei dem Verzicht auf Maßnahmen zur Datensicherung werden alle zu übertragenden Pakete genau einmal ausgesendet (einfache Übertragung). Eine einfache Möglichkeit einer Datensicherung besteht darin, die Aussendung jeden Datenpakets unaufgefordert zu wiederholen (zweifache Übertragung). Beim Einsatz von NCC werden Pakete entweder nativ (z.B. A) oder kombiniert codiert (A+B) übertragen, wobei ein kombiniertes Paket aus mehreren nativen Paketen gebildet wird (Codiervorgang). Der Empfänger eines einzelnen kombinierten Paketes kann die enthaltenen nativen Pakete nur dann rekonstruieren, wenn er noch weitere geeignete kombiniert codierte oder native Pakete empfängt (Decodiervorgang). Für die konkrete Implementierung des NCC Codecs sei auf [7] verwiesen.

Ein NCC Codierschema umfasst einerseits eine Zuweisung der verfügbaren Zeitschlitz an die Netzteilnehmer und andererseits eine Vorschrift nach welcher die Bildung kombiniert codierte Pakete erfolgen soll. Im Sinne der NCC sind hier zwei Phasen vorgesehen. In einer ersten Phase (Broadcast Phase) übermitteln alle Netzteilnehmer nacheinander native Pakete, wohingegen in der zweiten Phase (Relaying Phase) kombiniert codierte Pakete übermittelt werden. Die im Rahmen dieses Beitrags untersuchten Verfahren der Datensicherung sind in Abbildung 6 gegenübergestellt. Als Metrik zur Bewertung eines Datensicherungsverfahrens wird die Paketverlustrate definiert, wobei ein Paketverlust einen gescheiterten Versuch der Übertragung eines Pakets innerhalb der Zykluszeit beschreibt. Je nach Datensicherungsverfahren wird ein Paketverlust durch einen oder mehrere Paketfehler hervorgerufen.

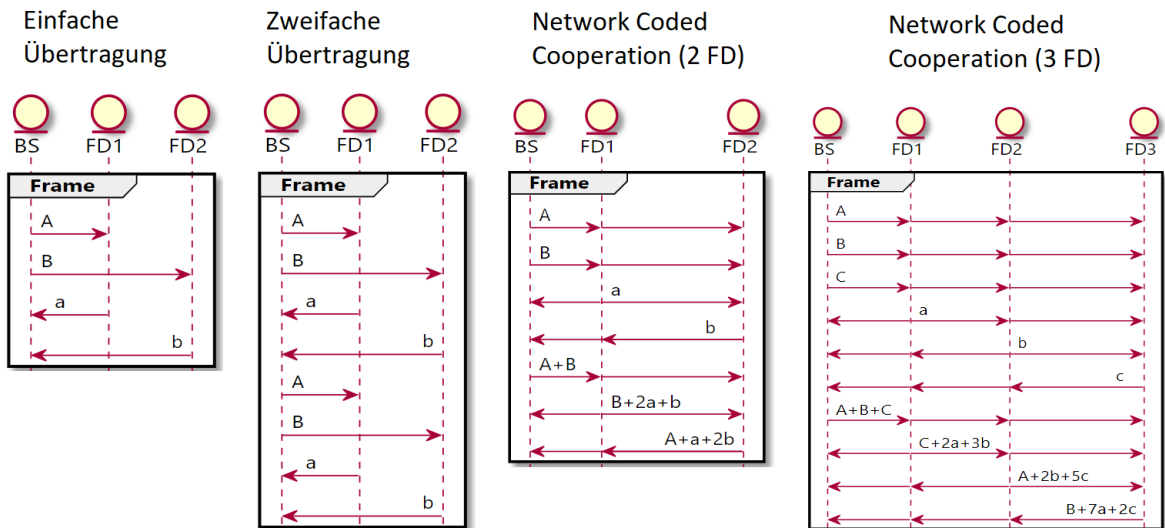


Abbildung 6: Gegenüberstellung unterschiedlicher Datensicherungsverfahren

3.2 Simulationsergebnisse

Bei den durchgeführten Simulationen wird exemplarisch die Paketverlustrate zwischen BS und FD1 ausgewertet und gesondert für den Uplink bzw. Downlink angegeben, falls sich die beiden Werte voneinander unterscheiden. In der Praxis gibt es zwei häufig auftretende Fehlerfälle. Sofern sich weitere Funkssysteme in der unmittelbaren Umgebung befinden, können auf allen Kanälen Paketfehler sporadisch auftreten. Weiterhin ist es möglich, dass ein Störobjekt die Kanaleigenschaften zwischen BS und einem FD dauerhaft signifikant verschlechtert. Diese Fehlerfälle werden im Folgenden gesondert untersucht.

Zunächst wird ein Netzwerk mit homogenen Kanaleigenschaften betrachtet, d.h. die Paketfehlerrate auf allen Kanälen ist gleich hoch. Bei dem Verzicht auf ein Datensicherungsverfahren führt jeder Paketfehler unmittelbar zu einem Paketverlust, daher sind Paketfehler- und Paketverlustrate identisch. Wird jedes Datenpaket unaufgefordert wiederholt übertragen, führt dies bereits zu einer signifikanten Reduktion der Paketverlustrate. Der Einsatz von Network Coded Cooperation führt, je nach Datenflussrichtung (Uplink/Downlink), zu leicht unterschiedlichen Paketverlusten. Allerdings befinden sich diese signifikant unterhalb der Paketverlustrate, die sich durch die wiederholte Übertragung ergibt (Abbildung 7).

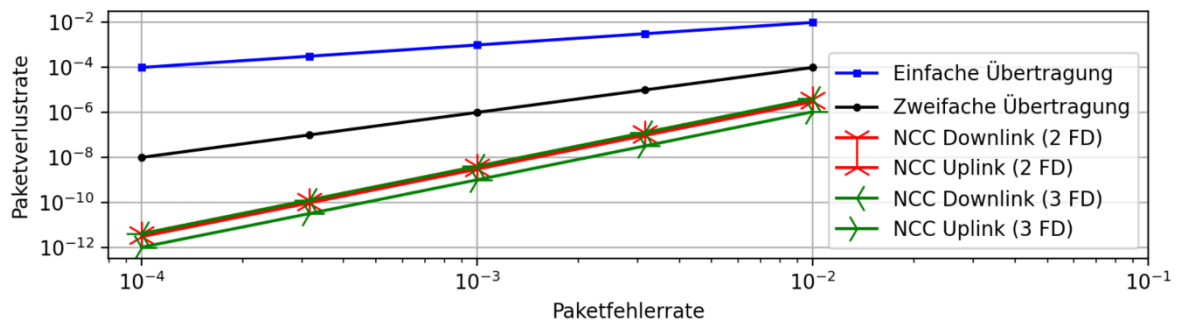


Abbildung 7: Resultierende Paketverlustrate zwischen BS und FD1 für Kanäle mit gleichen Eigenschaften

Weiterhin wird ein Netzwerk mit Kanälen betrachtet, die sich hinsichtlich der Paketfehlerrate unterscheiden. Der Kanal zwischen BS und FD1 ist gestört mit einer Paketfehlerrate zwischen 1 und 100%, wohingegen alle anderen Kanäle eine Paketfehlerrate von 0,01% aufweisen. Bei dem Verzicht auf ein Datensicherungsverfahren entspricht die Paketfehlerrate des gestörten Kanals der resultierenden Paketverlustrate. Auch hier führt eine unaufgefordert wiederholte Übertragung zu einer erheblichen Reduktion der resultierenden Paketverlustrate. Allerdings können im Fall eines Totalausfalls des Kanals keine Daten mehr zwischen BS und FD1 ausgetauscht

werden. Dies ist unter Nutzung von NCC nicht der Fall, da die Daten über redundante Pfade übermittelt werden können (Abbildung 8).

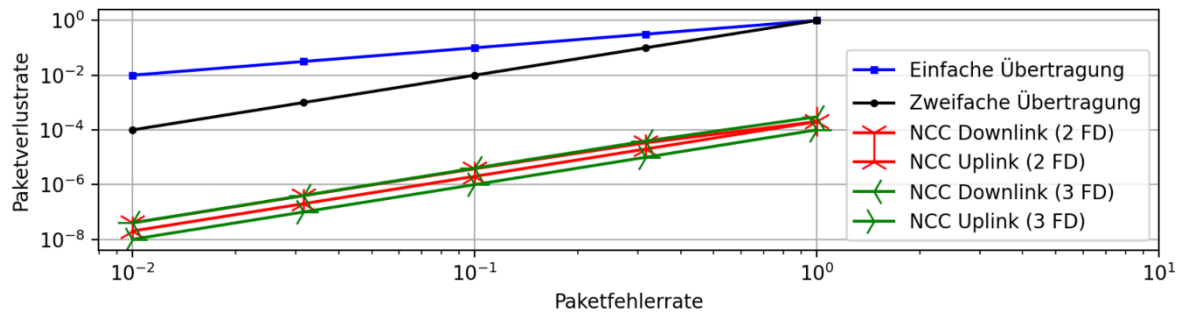


Abbildung 8: Resultierende Paketverlustrate zwischen BS und FD1 bei gestörtem Kanal zwischen BS und FD1

4 Technologie-Evaluierung

Um die UWIN Funktechnologie in Praxisumgebungen erproben zu können, hat das Fraunhofer IIS ein UWIN Evaluation-Kit entwickelt. Dieses besteht aus einer Base Station und zwei Field Devices (siehe Abbildung 9), die periodisch mit einer Zykluszeit von $125 \mu\text{s}$ Nutzdaten in Downlink und Uplink übertragen. Dabei überwacht die Base Station die Leistungsparameter der einzelnen Verbindungen. Das System arbeitet im lizenzfreien 5GHz U-NII Frequenzband, wobei der Anwender die genutzten Frequenzkanäle selbst bestimmen kann. Über eine Ethernet-Schnittstelle kann der Nutzer auf das Dashboard des Evaluationskits (siehe Abbildung 10) zugreifen. Es stellt verschiedene Leistungsparameter und Metriken zur Übertragungszuverlässigkeit der einzelnen Verbindungen sowohl im Zeitverlauf als auch als Langzeit-Statistiken dar. Mit dem Evaluation Kit gemeinsam mit interessierten Partnern die UWIN-Echtzeit-Funktechnologie in konkreten Anwendungsumgebungen erprobt werden, um so Erfahrungen in konkreten Einsatzszenarien und unter Einfluss umgebender Funkssysteme zu sammeln. Im Zuge dieser Erprobung werden weiterhin Echtzeit-Kanaleigenschaften erhoben. Diese lassen sich gut verwerten, da sich einerseits die resultierende Übertragungszuverlässigkeit unmittelbar aus diesen ableiten lässt und andererseits eine für diese Anwendungsumgebung realistische Parametrisierung der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Modelle ermöglicht wird.



Abbildung 9 Field Device des UWIN Evaluation Kit

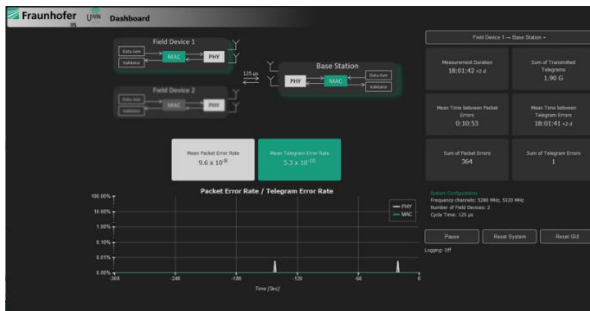


Abbildung 10 Dashboard des UWIN Evaluation Kit

In industriellen Umgebungen werden häufig mehrere Funktechnologien für verschiedene Anwendungen parallel eingesetzt. Um auch in diesen Umgebungen die hohe Übertragungszuverlässigkeit sicherzustellen, wurde insbesondere die Störresistenz gegenüber anderen Funktechnologien von Beginn an in dem Entwicklungsprozess mit betrachtet. Zur Verifikation werden derzeit in einem Funk-Testbed verschiedene Koexistenz-Szenarien aufgebaut und die Leistungsfähigkeit des UWIN Funksystem evaluiert. In der Präsentation werden erste Ergebnisse der Evaluierungstest mit vorgestellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Kommunikationssysteme, die in der Industrieautomation eingesetzt werden sollen, müssen einerseits latenzarme Kommunikation ermöglichen als auch eine extrem hohe Zuverlässigkeit gewährleisten. Insbesondere im Bereich von Motion Control sind die technischen Anforderungen besonders hoch. Existierende Funkkommunikationssysteme nach dem Stand der Technik können diese Anforderungen für viele Anwendungsfälle nicht vollumfänglich erfüllen.

Die Anforderung einer niedriglatenten, hochrobusten Kommunikation bildete das technologische Design Ziel für die Entwicklung der Echtzeit-Funktechnologie UWIN. Durch die Umsetzung unterschiedlicher Maßnahmen zur Steigerung der Robustheit kann UWIN Paketverlustraten im Bereich von 10^{-8} erreichen und mit isochronen Zykluszeiten von bis zu 125 μ s eine Vielzahl anspruchsvoller industrieller Anwendungsfälle (insb. Motion Control) abdecken.

Die Simulationsergebnisse vermitteln einen ersten Eindruck davon, welches zusätzliche Verbesserungspotential die Funktechnologie UWIN durch den Einsatz von NCC entfalten kann. Die Redundanz, die durch die Kombination mehrerer Pakete entsteht, kann besonders effizient genutzt werden. Deshalb ermöglicht bereits das zusätzliche Aussenden weniger kombinierter Pakete eine signifikante Verringerung der Paketverlustraten und die Kompensation eines Totalausfalls eines Kanals. Um das ermittelte Verbesserungspotential zu untermauern sollen die im Zuge der Feldversuche aufgezeichneten Echtzeit-Kanaleigenschaften als Grundlage für weitere Simulationen genutzt werden. Anschließend wird eine Integration von NCC als eine MAC-Erweiterung in der UWIN Funktechnologie angestrebt.

6 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] R. Prior, „Systematic Network Coding for Packet Loss Concealment in Broadcast Distribution,“ in *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Kuala Lumpur, 2011.
- [3] J. Krigslund, J. Hansen, M. Hundeboll, D. Lucani und F. Fitzek, „CORE: COPE with MORE in Wireless Meshed Networks,“ in *Vehicular Technology Conference*, Dresden, 2013.
- [4] K. Alic und A. Svigelj, „A one-hop opportunistic network coding algorithm for wireless mesh networks,“ *Wireless Networks*, pp. 1007-1018, 2018.
- [5] H. Seferoglu, A. Markopoulou und K. Ramakrishnan, „I2NC: Intra- and inter-session network coding for unicast flows in wireless networks,“ in *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, Shanghai, 2011.

- [6] V. N. Swamy, *Real-time Communication Systems For Automation Over Wireless: Enabling Future Interactive Tech*, Berkeley: University of California at Berkeley, 2018.
- [7] S. Kafaie, Y. P. Chen, O. A. Dobre und M. H. Ahmed, „Network Coding Implementation Details: A Guidance Document,“ in *22nd Annual Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference (NECEC)*, Newfoundland, 2013.
- [8] A. Frotzcher, 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.
- [9] D. Schulze, A. Gnat 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].
- [10] „fast automation,“ [Online]. Available: <https://de.fast-zwanzig20.de/industrie/fast-automation/>.
- [11] The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.), „IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE Std. 1588–2002,“ New York 2002, ISBN 0-7381-3369-8.