

Beurteilung des Störpotenzials für industrielle Funkkommunikation am Beispiel von PROFINET-Kommunikation über Bluetooth 5

Gustavo Cainelli, Lisa Underberg, Lutz Rauchhaupt

Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg

Werner-Heisenberg-Str. 1

39106 Magdeburg

{gustavo.cainelli, lisa.underberg, lutz.rauchhaupt }@ifak.eu

Abstract: Trotz der Entwicklung zuverlässiger Funkkommunikationslösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen sind Befürchtungen weit verbreitet, dass die Funkübertragung ungewollt oder gezielt gestört werden kann. Entsprechende Diskussionen bei der Überarbeitung der VDI/VDE-Richtlinie 2185 "Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik" im VDI/VDE-GMA Fachausschusses 5.21 "Funkgestützte Kommunikation" wurden zum Anlass genommen, das Störpotenzial bei industrieller Funkkommunikation näher zu untersuchen.

Für die erste Testreihe wurde eine Funktechnologie ausgewählt, die aufgrund des Mediumzugriffsmechanismus robust gegen passive Umgebungseinflüsse ist, wie sie im industriellen Umfeld anzutreffen sind: Bluetooth. Untersucht wurden Funkgeräte mit Bluetooth 5, die in der Lage sind, PROFINET-I/O-Kommunikation zu übertragen. Dabei wurden die Entfernung zwischen den Funkgeräten, die Entfernung zwischen Funkgerät und Störer, die Richtung der logischen Verbindung sowie die Störleistung variiert. In dem Beitrag werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und diskutiert.

Die vorgestellte Testreihe soll als Blaupause für weitere Testreihen zur Untersuchung von Kommunikationssystemen mit WiFi 6 und 5G verwendet werden. Die Untersuchungen sollen dazu beitragen, die Ungewissheit über das Störpotential auf industrielle Funkkommunikation zu verringern. Darüber hinaus sind die Testreihen ein Mittel, um Eigenschaften künftiger Funkkommunikationssysteme wie Elastizität und Resilienz zu erforschen.

1 Einleitung

Mit steigendem Interesse an Funkkommunikationssystemen für industrielle Anwendungen wird das fehlende Vertrauen der Endanwender immer deutlicher. Insbesondere, wenn für den Produktionsprozess kritische Aufgaben ausgeführt werden sollen, sind Endanwender zurückhaltend, eine neue Kommunikationstechnologie einzuführen. Gleichzeitig ist ihnen das Potential eines Funkkommunikationssystems durch dessen Nachrüstbarkeit und Ermöglichung von fahrerlosen Transportsystemen (FTS, engl: automated guided vehicle, AGV) bewusst. Der Test des Zeit- und Fehlerverhaltens aus Anwendungssicht in einer virtuell oder physisch emulierten Umgebung ist in diesem Kontext die Grundlage, das nötige Vertrauen aufzubauen, bevor ein Kommunikationssystem in der operativen Produktion eingesetzt wird.

Die Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines Kommunikationssystems aus der Sicht einer Anwendung ist dabei ein Schlüssel, da diese Perspektive die Anforderungen des Endanwenders spiegelt [1]. Aus Sicht einer industriellen Anwendung ist das Kommunikationssystem, egal ob kabellos, kabelgebunden oder hybrid, transparent, solange es ihren Anforderungen genügt. Insbesondere hybride Systeme sind in industriellen Anwendungen relevant, da die Kombination aus bestehenden kabelgebundenen Systemen mit neuen Funksystemen naheliegt [2]. Entsprechend sollte ein Testsystem, das aus Applikationssicht die Performanz ermittelt, auf jedes Kommunikationssystem anwendbar sein.

Die daraus resultierende Trennung von Testsystem und zu testendem System (engl.: system under test, SUT) ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Testsystem legt die Rahmenbedingungen für das SUT fest, indem es Einflussgrößen wie Nutzdatenhäufigkeit, Senderverhalten und Umgebungseigenschaften festlegt. Das Verhalten des SUT erfasst das Testsystem, indem es für die Ermittlung von Kenngrößen wie der Übertragungszeit, der Paketverlustquote und dem Nutzdandurchsatz relevante Daten misst. Basierend auf diesen Daten führt das Testsystem eine statistische Auswertung durch.

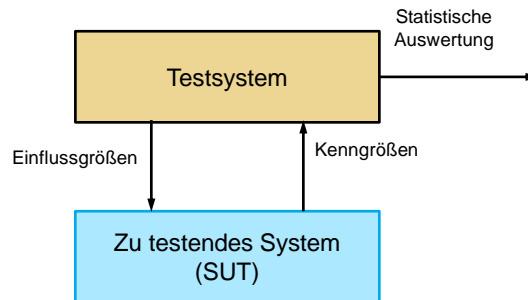


Abbildung 1: Prinzip des Tests von Zeit- und Fehlerverhalten eines zu testenden Systems (engl.: System under test, SUT) mit einem davon unabhängigen Testsystem [2].

Dieses Prinzip des Testens erlaubt die reproduzierbare Durchführung von Tests, sodass beispielsweise unterschiedliche Funkkommunikationssysteme unter gleichen Bedingungen analysiert werden können. Gleichzeitig ist die gezielte Hinzunahme spezifischer Störer, beispielsweise durch Funkgeräte oder einen Signalgenerator möglich.

Dieser Beitrag fasst Grundlagen zu Bluetooth und PROFINET in Abschnitt 2 zusammen. Ebenso wird ein Überblick über Untersuchungen des Zeitverhaltens von Bluetooth-Lösungen gegeben in der Literatur gegeben. Abschnitt 3 beschreibt detailliert den verwendeten Ansatz von Performanztests aus Anwendungssicht und den Testaufbau. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4 analysiert. Abschnitt 5 fasst diesen Beitrag zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Technologieüberblick

2.1 Mediumzugriff bei Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) verwendet ein Polling-Verfahren durch den BLE-Master, bei dem dieser den Mediumzugriff aller BLE Geräte koordiniert, indem er die Zeit in Abschnitte, sogenannte Connection Events (CEs) teilt [3]. Ein CE beginnt mit der Übertragung eines Datenpakets vom Master an eines der BLE-Geräte. Während des CE tauschen Master und Gerät abwechselnd Datenpakete aus, bis alle Nutzdaten übertragen wurden. Anschließend wechselt das BLE-Gerät in einen Standby-Modus, während der Master ein CE mit dem nächsten Gerät initiiert. Die CEs werden in regelmäßigen Abständen generiert und überlappen sich nicht.

2.2 Mediumzugriff bei PROFINET

PROFINET ist in der Lage, zyklisch zeitkritische Nutzdaten zu übertragen und dabei Anforderungen vieler industrieller Applikationen einzuhalten. Der PROFINET-Controller konfiguriert die PROFINET-Geräte und steuert den Datenaustausch. Parameter des Controllers wie z. B. die Zykluszeit können über ein Engineering-Werkzeug vorgegeben werden [4].

2.3 Performanztests von Bluetooth in der Literatur

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Performanztests von Bluetooth-Systemen, da diese in einem hybriden Netz mit PROFINET den Engpass darstellen.

[5] evaluiert die Leistungsfähigkeit eines BLE Mesh Systems in einer Büroumgebung. Datendurchsatz und Paketfehler werden an einem ausgewählten Endgerät erfasst, welches als Basisstation bezeichnet wird. Die weiteren Endgeräte generieren regelmäßig Datenpakete und schicken diese zur Basisstation. Aus den Ergebnissen schließen die Autoren, dass ein BLE Mesh System weniger gut für Anwendungen der Zustandsüberwachung mit kleinen Sendezeitabständen geeignet sei. Werden die Zeitabstände größer, werde BLE Mesh als Kommunikationstechnologie attraktiver. Die hier verwendete Methode ist nicht geeignet, die Übertragungszeit zu erfassen, da die Basisstation und die Endgeräte nicht synchronisiert sind.

In [6] werden Datendurchsatz und der Received Signal Strength Indicator (RSSI) für BLE 5 mit zwei Kommunikationsgeräten gemessen. Die PHY-Varianten "LE 1M" und "LE 2M", welche sich wesentlich durch die bereitgestellte Übertragungsrate von 1 bzw. 2 Mbit/s auszeichnen. Ein Gerät wurde ortsfest positioniert, während die Position des zweiten Geräts variiert wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass BLE 5 eine gute Abdeckung in Innenraumszenarios erreicht. Ein ähnlicher Versuchsaufbau wurde in [7] verwendet, welche das Verhalten von BLE untersucht, während zeitgleich ein ZigBee-System betrieben wird. Ergebnisse einer analytischen sowie der praktischen Evaluation werden präsentiert. Inwiefern die durchgeführten Tests reproduzierbar sind, wird nicht deutlich. Das Zeitverhalten wird weder in [6] noch in [7] untersucht.

In [9] und [10] wird ebenfalls die Leistungsfähigkeit eines Kommunikationssystems analysiert. In [9] steht ein hybrides System aus PROFIBUS DP und einem auf IEEE 802.15.4a-basierenden Funksystem im Fokus. [10] analysiert ein WirelessHART System. Bei diesen Messungen wurde die Firmware der Geräte adaptiert, sodass Datenpakete gezielt generiert, mit Zeitstempeln versehen und evaluiert werden konnten. Diese Messmethode erlaubt potentiell akkurate Messungen des Zeitverhaltens, erfordern jedoch einen Zugriff auf den Quellcode der Geräte oder Protokolle.

Der Blick auf die bisherigen Arbeiten rund um Performanztests insbesondere von Bluetooth zeigt, dass die Analysemöglichkeiten deutlich von der Zugänglichkeit des Quellcodes durch die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler abhängt.

Wenn kein Zugang zum Quellcode besteht, wird in der Regel auf Paketgeneratoren wie iPerf [11] oder D-ITG [12] zurückgegriffen. Beide Generatoren bauen eine TCP- oder UDP-Verbindung auf, generieren an der Quelle Datenpakete und messen an der Senke den Datendurchsatz sowie die Paketverlustquote. Obwohl iPerf und D-ITG etablierte Werkzeuge sind, sind sie für eine bestimmte Gruppe von industriellen Applikationen nicht geeignet. Typischerweise genutzte Schnittstellen wie UART oder digitale Ein- und Ausgänge (Digital I/O) werden nicht unterstützt. Ebenfalls bauen nur wenige Applikationen auf TCP- oder UDP-Verbindungen auf. Das Zeitverhalten eines Kommunikationssystems wird ebenfalls nicht (iPerf) oder nicht ausreichend (D-ITG) genau erfasst, da Quelle und Senke nur grob synchronisiert werden können. Die von industriellen Anwendungen geforderte Genauigkeit von $< 1 \mu\text{s}$ kann somit nicht erfasst werden.

Vor diesem Hintergrund bleibt der Performanztest von Funkkommunikationslösungen aus Sicht industrieller Applikationen teilweise offen. Das in diesem Beitrag verwendete Testsystem schließt diese Lücken und wird im nächsten Abschnitt näher erläutert. Erste Messungen von PROFINET über Bluetooth sind in [13] publiziert.

3 Performanztest aus Sicht industrieller Anwendungen

Aus der Sicht einer industriellen Anwendung sind die zuvor beschriebenen Eigenschaften wie hohe Genauigkeit wichtig. Um das Zeitverhalten eines Kommunikationssystems entsprechend messen zu können, muss das Testsystem einem umfassenden Konzept folgen und seine Implementierung muss strengen Anforderungen genügen. In diesem Abschnitt wird zunächst ein universell anwendbarer Ansatz für Performanztests vorgestellt. Dann wird dieses Konzept auf das in dieser Arbeit untersuchte SUT angewandt. Außerdem werden die eingesetzten Messgeräte vorgestellt. Es wird beschrieben, welche logischen Kommunikationsverbindungen einem Performanztest unterzogen werden und wie diese Tests systematisch aufgebaut werden können.

3.1 Universelles Testkonzept

Das in dieser Arbeit verwendete Testsystem basiert auf einem universellen Konzept zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens von Funklösungen, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Dieses Konzept enthält alle Komponenten, die erforderlich sind, um bei allen Tests zu jeder Zeit konsistente Ausgangsparameter zu gewährleisten. Das Testsystem emuliert die verteilte Anwendung, indem es Daten von der Quelle zum Ziel überträgt und dabei das SUT für den Transport verwendet. In diesem Fall ist das SUT das auf Bluetooth basierende Kommunikationssystem. Für reproduzierbare Tests muss der Funkkanal der vom SUT genutzt wird bekannt und vom Testsystem kontrollierbar sein.

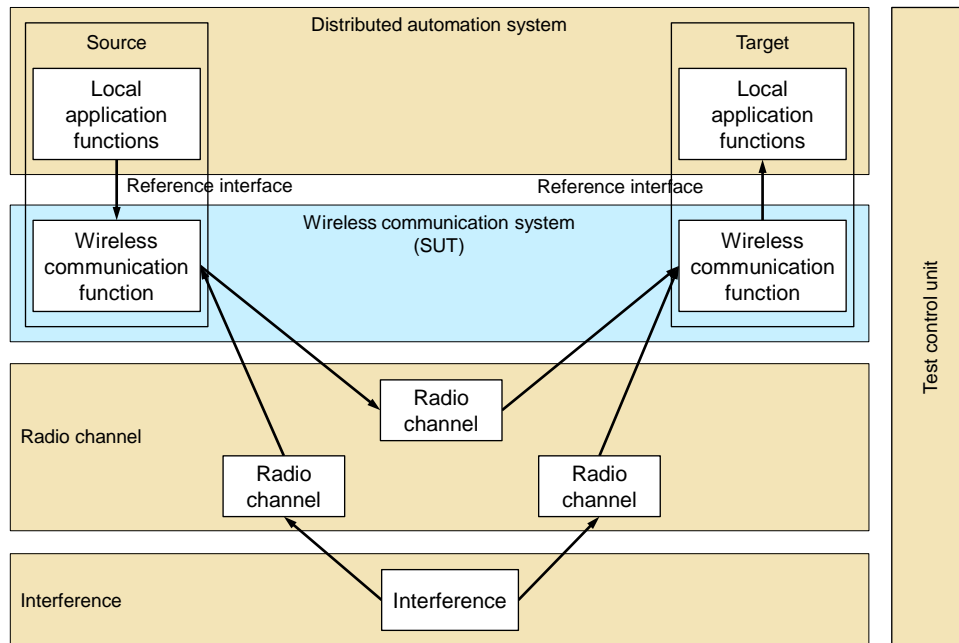


Abbildung 2: Universelles Konzept zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens von Funklösungen [3].

Wie in [1] beschrieben, können Performanztests entweder in einer realen Umgebung, in einer Referenzumgebung oder in einer Laborumgebung durchgeführt werden. Bei einer realen Umgebung befindet sich die zu untersuchende Funkanwendung in der Fabrik, in der sie tatsächlich zum Einsatz kommt. Die Referenzumgebung ist eine physikalisch emulierte Umgebung, die einer realen Umgebung ähnelt, z. B. ein fabrikähnliches Gebäude mit der Möglichkeit Reflektionsflächen aufzubauen, um Mehrwegeausbreitung aufgrund von Maschinen oder Wänden nachzubilden. In der Laborumgebung werden ein Kanalemulator und ein Signalgenerator eingesetzt, um die Einflüsse einer realen Umgebung zu emulieren. Der Kanalemulator stellt die passiven Umwelteinflüsse wie Entfernung und Ausbreitungsverhalten dar, und der Signalgenerator fungiert als störender Frequenznutzer, z. B. ein anderes Funkkommunikationssystem. Die Funkgeräte werden in geschirmte Boxen untergebracht, um sie und die Messung vor möglichen Umwelteinflüssen zu schützen, die im Labor vorhanden sein könnten.

Jede Umgebung bringt individuelle Vorteile mit sich. So können in einem Labor größere Entfernungen leicht nachgebildet werden, während eine Referenzumgebung auf ihre tatsächliche räumliche Ausdehnung beschränkt ist.

Das gesamte Testsystem, bestehend aus einem verteiltem Anwendungssystem, dem Funkkanalemulator und dem Signalgenerator zum Erzeugen von Interferenzen, wird durch eine zentrale Managementeinheit konfiguriert, gesteuert und überwacht. Gleichzeitig werden die während des Tests ermittelten Messergebnisse erfasst und für eine anschließende Analyse vorverarbeitet. Dieses universelle Konzept zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens von Funklösungen ist sowohl für den Test von Standardgeräten oder Prototypen als auch für Simulationen geeignet.

3.2 Testaufbau

Die Topologie des Testsystems und des SUT ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** abgebildet. Das SUT besteht aus einem auf Bluetooth Low Energy (BLE) basierendem Funksystem, einem PROFINET-Controller und drei PROFINET-Geräten. Dies entspricht einer möglichen realen industriellen Anwendung, bei der die Funkgeräte zur Übertragung des PROFINET-Datenverkehrs als Teil eines hybriden drahtgebundenen und drahtlosen Kommunikationsnetzwerks verwendet werden.

Im vorliegenden Fall besteht das Funksystem aus einem BLE-Master und drei BLE-Geräten. Der BLE-Master (BT-M) ist mit dem PROFINET-Controller verbunden und jedes BLE-Gerät (BT-D1, BT-D2 und BT-D3) ist mit jedem der PROFINET-Geräte verbunden. Die physikalischen Verbindungen werden durch gerade Linien dargestellt, die mit Bluetooth, PROFINET oder Digital I/O beschriftet sind.

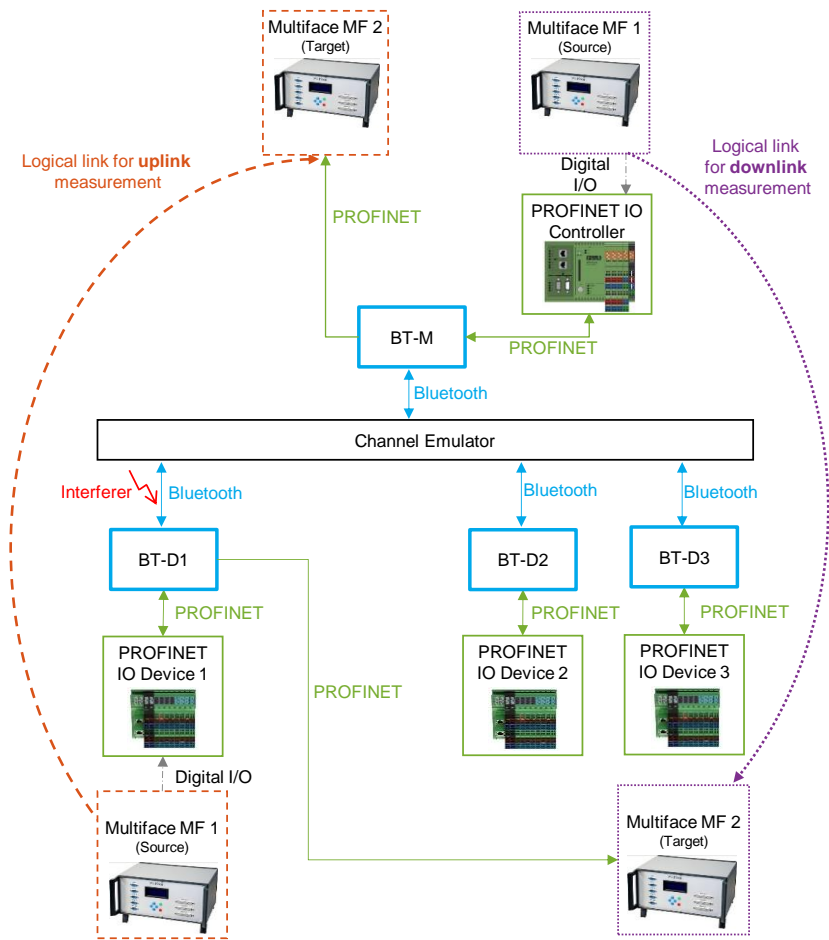


Abbildung 3: Topologie von Testsystem und SUT im Labor (vgl. [13]).

Das Testsystem besteht aus einem Kanalemulator, der die realen Ausbreitungsbedingungen nachbildet, und mehreren Multifaces, Geräten die die Basisparameter liefern und die Leistungsparameter messen. Das vom Kanalemulator verwendete Modell für den Pfadverlust ist das η -Power Law mit $\eta = 2$, was einen Pfadverlust im freien Raum entspricht. Ein Software-Tool berechnet die Dämpfung und steuert den Kanalemulator auf der Grundlage einer bestimmten Entfernung.

Die geschirmten Boxen haben Ethernet-Anschlüsse, zum Anschluss der Funkgeräte an das PROFINET-System oder bzw. an die Multifaces, und HF-Anschlüsse, die zum Anschluss an den Kanalemulator dienen.

Die Multifaces bieten mehrere Schnittstellen, die typischerweise bei industriellen Kommunikationsgeräten verwendet werden, wie z. B. RS-232, digitale E/A und Ethernet. Die Multifaces wurden vom ifak auf der Basis leistungsfähiger FPGA entwickelt, wodurch sie in der Lage sind, Echtzeitverkehr zu generieren und Zeitparameter mit einer Genauigkeit von $< 1 \mu\text{s}$ [14] zu erfassen. Darüber hinaus kann der Inhalt der zu übertragenden Nachrichten individuell festgelegt werden, wenn eine serielle Schnittstelle verwendet wird. Dies ist in Fällen nützlich, in denen PROFINET-Kommunikation getestet werden sollen, ohne PROFINET-Geräte zu verwenden, die ggf. Einschränkungen mit sich bringen. Das vorgeschlagene System erlaubt es, jedes Byte eines zu sendenden Pakets zu spezifizieren, so dass ein PROFINET-Paket emuliert werden kann.

Die Multifaces sind an einen PC angeschlossen, der als zentrale Managementeinheit fungiert, wie in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben. Auf dem PC läuft eine vom ifak Magdeburg implementierte Software namens FTTManager, die die Funktionalität einer Teststeuereinheit bereitstellt.

3.3 Logische Verbindungen als Testobjekt

Eine logische Verbindung (LL) stellt eine Kommunikationsbeziehung zwischen zwei Instanzen einer Anwendung dar. Eine einzelne logische Verbindung kann mehrere physische Verbindungen umfassen. Abbildung 3 zeigt die LLs zwischen zwei Multifaces. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse des Zeit- und Fehlerverhaltens dieser beiden logische Verbindungen vorgestellt: Eine Uplink-Kommunikation von Multiface (MF)3 zu MF1 über PROFINET-Gerät 1, BT-Gerät 1 und den BT-Master wie auf der linken Seite als gekrümmter gestrichelter Pfeil dargestellt und in umgekehrter Richtung eine Downlink-Kommunikation von Multiface (MF)1 zu MF3 über den, den BT-Master und BT-Gerät 1, wie auf der rechten Seite als gekrümmter gestrichelter Pfeil dargestellt.

Das MF1 erzeugt symmetrische Rechtecksignale entsprechend dem konfigurierten Sendezeitabstand für die logischen Verbindung. Die digitalen Ausgänge von MF1 sind mit den digitalen Eingängen des PROFINET-Controllers und der PROFINET-Geräte verbunden. Das MF3 hat die Zielanwendung implementiert und misst den PROFINET-Verkehr.

Darüber hinaus werden Daten über weitere logische Verbindungen vom PROFINET-Gerät 2 an den PROFINET-Controller und vom PROFINET-Controller an das PROFINET-Gerät 3 gesendet. Das Zeitverhalten dieser logischen Verbindungen ist nicht Gegenstand dieses Beitrages.

3.4 Beschreibung von Testgruppe und Testfällen

Den Performanztests liegt eine sorgfältige und umfassende Spezifikation zugrunde. Sie ist in Testgruppen (TG) gegliedert die jeweils mehrere Testfälle (TC) umfassen. Jeder Testfall ist durch einen konsistenten Satz von Einflussgrößenwerten bestimmt, die durch den Testaufbau realisiert werden. Jede Testgruppe zielt auf die Untersuchung eines bestimmten Aspekts oder eines bestimmten Einflusses auf das SUT ab. Bei den vorliegenden Performanztests steht die Untersuchung des Einflusses von Interferenzen im Fokus, wobei zusätzlich einzelne Einflussgrößen variiert werden.

Folgende Einflussgrößenwerte sind in dieser Testgruppe konstant:

Anzahl logischer Verbindungen

- In dieser Testgruppe waren 4 logische Verbindungen aktiv, jeweils zwei Verbindungen von den Geräten zur Steuerung und zwei von der Steuerung zu den Geräten.

Nutzdatenlänge je Verbindung

- Über jede logische Verbindung wurden 16 Bit Nutzdaten übertragen, die eine fortlaufende Nummer darstellen mit deren Hilfe die erfolgreiche Nachrichtenübertragung geprüft werden kann.

Sendezeitabstand je Verbindung

- Alle 131 ms wird eine neue Nachricht generiert, deren Inhalt eine fortlaufende Nummer darstellt.

PROFINET-Zyklus

- Für die PROFINET-Übertragung beträgt die Zykluszeit 16 ms.

Bluetooth Connection Intervall

- Das Connection Intervall ist die Zeit zwischen dem Beginn von zwei Verbindungsereignissen (CE). Bei BLE ist der Datenaustausch zwischen Master und Slave in aufeinanderfolgenden CEs [4] strukturiert. Das Bluetooth Connection Intervall beträgt 7,5 ms.

Abstand zwischen der Störquelle und dem BT-Gerät 1

- Als Störquelle wird ein Vektorsignalgenerator genutzt, der über den Kanalemulator mit dem BT-Gerät 1 verbunden ist, wobei eine Entfernung von 3 m konfiguriert wurde.

Störsignal

- Das Störsignal mit einem Vektorsignalgenerator gemäß IEEE 802.11g mit 20 MHz Bandbreite im Kanal 7 erzeugt.

Folgende Einflussgrößen wurden variiert und bestimmen die einzelnen Testfälle:

Abstand zwischen den Funkgeräten

- Die Entfernung zwischen BT-Master und BT-Slaves wurde mithilfe des Kanalemulators konfiguriert und beträgt entweder 10 m oder 100 m.

Stördauer (Ton/Toff)

- Das Störsignal liegt entweder kontinuierlich an oder wird mit folgenden Verhältnissen an und ausgeschaltet: 10/5 ms, 10/10 ms, 10/20 ms.

Störleistung

- Die konfigurierte Störleistung beträgt 10 mW oder 100 mW.

Beobachtungsdauer

- Die Ergebnisse basieren auf einer Stichprobe von jeweils 100.000 Nachrichtenübertragungen. Zusätzlich wurden Testfälle mit einer Beobachtungszeit von einer Stunde durchgeführt, bei denen das Störsignal 10 bzw. 20 Minuten deaktiviert, 20 Minuten aktiviert und nochmals 10 bzw. 20 Minuten deaktiviert war.

4 Ergebnisse der Untersuchungen

Zur Bewertung des Einflusses von Interferenzen auf die PROFINET-Kommunikation über Bluetooth 5 wird die Aktualisierungszeit nach VDI 2185-4 herangezogen [14]. Die Aktualisierungszeit ist definiert als der Zeitabschnitt von der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der Nutzdaten einer Quelle an der Bezugsschnittstelle eines Ziels bis zur Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der unmittelbar nachfolgend übertragenen Nutzdaten der gleichen Quelle. Die Aktualisierungszeit (Update time) entspricht im Idealfall dem Sendezeitabstand. Das heißt, die übertragenen Nutzdaten werden an der Bezugsschnittstelle des Ziels in denselben zeitlichen Abständen übernommen, wie sie an der Bezugsschnittstelle der Quelle übergeben wurden.

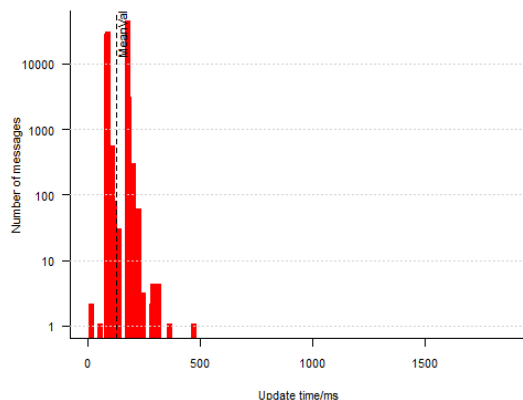


Abbildung 4: TC 01-03-01-01-01: Downlink, Geräteentfernung 10 m, ohne Störung

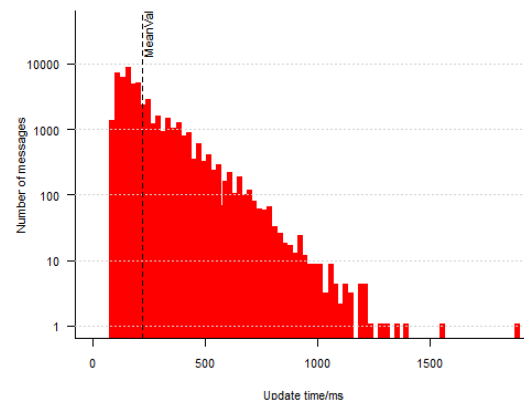


Abbildung 5: TC 01-03-01-01-03: Downlink, Geräteentfernung 10 m, 100 mW kontinuierliche Störung

Abbildung 4a zeigt das Histogramm der Aktualisierungszeit des Downlink für den ungestörten Fall. Die Werteverteilung zeigt eine deutliche Abweichung vom Mittelwert, dem Wert des Sendezeitabstandes von 131 ms. Die Ursache dafür sind der Kommunikationszyklus des PROFINET-Systems von 16 ms und das Connection Interval des Bluetooth Systems von 7,5 ms. Dadurch nimmt die Zeitdifferenz im Normalfall nicht den Wert des Sendezeitabstandes ein. Die Werte der Aktualisierungszeit für die einzelnen Nachrichtenübertragungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Bis auf einzelne Ausreißer entsprechen die Werte der Standardabweichung. Die Ausreißer sind erfahrungsgemäß nicht in Störungen der Funkübertragung begründet, sondern im Zeitverhalten des komplexen Prozesses des gesamten Übertragungssystems. Neben den bereits erwähnten Zyklen der Kommunikationssysteme wird das Zeitverhalten durch die Verarbeitungsprozesse der beteiligten Controller beeinflusst. Bei der untersuchten Implementierung kommt dabei zusätzlich ein spezieller Algorithmus zum Einsatz, der eine robuste PROFINET-Übertragung über Funkkommunikationssystem gewährleistet. Dadurch kam es bei den hier vorgestellten Testfällen zu keiner Zeit zu einem Busfehler. Die PROFINET Übertragung wurde trotz der hier vorgestellten Interferenzen nicht gestört. Allerdings hat dieser Algorithmus Auswirkungen auf das Zeitverhalten der Nachrichtenübertragungen.

In Abbildung 5 ist das Histogramm der Übertragungszeit bei einer kontinuierlichen Störung von 100 mW bei 3 m Entfernung des Störers zum Bluetooth Slave und 10 m Entfernung zwischen den Kommunikationspartnern (man beachte die logarithmische Skala für die Anzahl der Übertragungen). Die großen Übertragungszeitwerte erklären sich durch den erwähnten Algorithmus und die Fehlerbewertung des Messsystems. Als fehlerhaft gilt eine Nachricht auch, wenn die Übertragungszeit den Wert des Sendezeitabstandes überschreitet. Es wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass ein neuer Nachrichtenwert vorliegt und der vorhergehende deshalb als veraltet angesehen werden kann.

Der Einfluss der Interferenz auf die Übertragungszeit der einzelnen Nachrichten ist in Abbildung 7 deutlich zu erkennen. Die eingezeichnete Standardabweichung ist größer im Vergleich zu Abbildung 6.

Bei der Bewertung der Aktualisierungszeitwerte ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Steuerung als auch der Bluetooth Master jeweils 4 Verbindungen zu verwalten hat, was zusätzliche Zeitverzögerungen zum Zeitverhalten beiträgt.

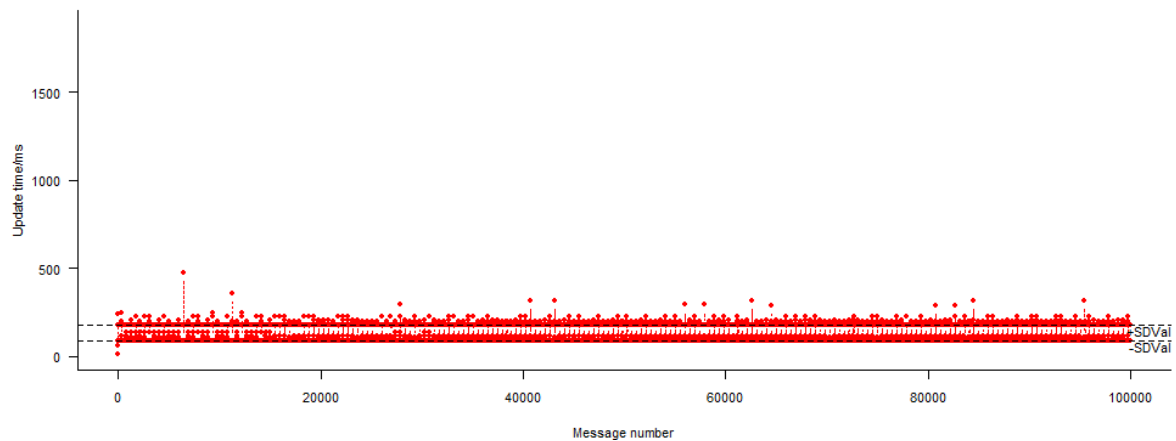


Abbildung 6: TC 01-03-01-01-01: Downlink, Geräteentfernung 10 m, ohne Störung

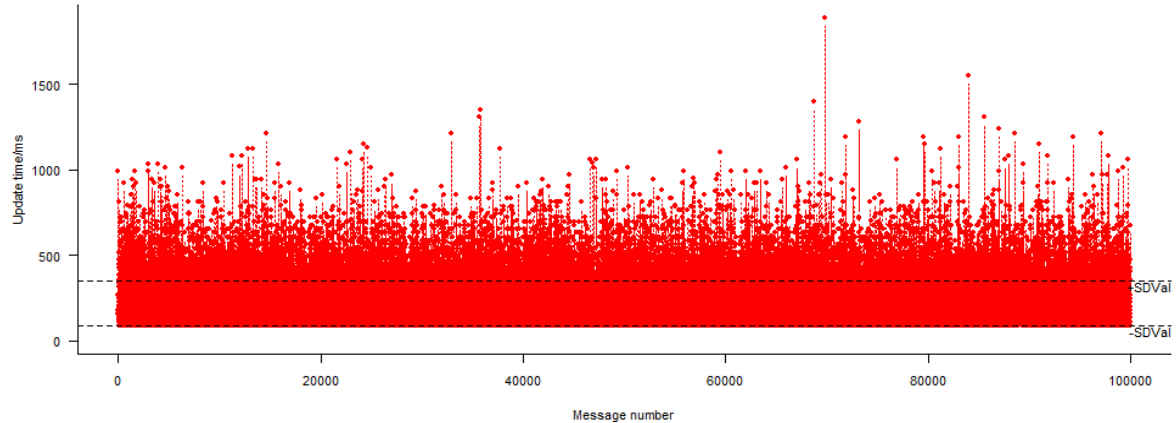


Abbildung 7: TC 01-03-01-01-03: Downlink, Geräteentfernung 10 m, 100 mW kontinuierliche Störung

Trotz kontinuierlichem Störsignal ist nicht zu erkennen, dass das Bluetooth-System die gestörten 20 MHz im Frequenzsprungverfahren ausspart, was ein verbessertes Zeitverhalten erwarten lassen würde.

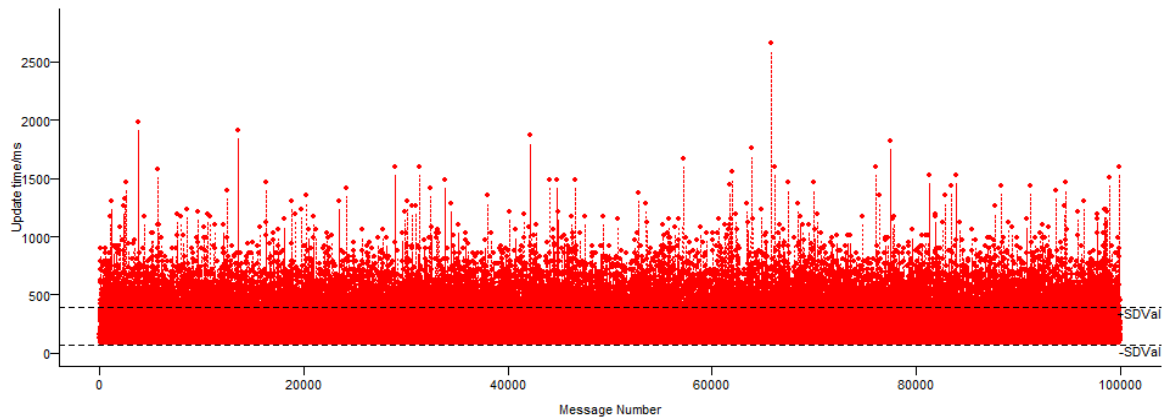


Abbildung 8: TC 01-03-02-03: Downlink, Geräteentfernung 100 m, 100 mW kontinuierliche Störung

So kommt es bei Vergrößerung der Entfernung zwischen den Geräten zu einem noch stärkeren Einfluss der Interferenz. In Abbildung 8 wurde die Skala der Aktualisierungszeit an die Maximalwerte angepasst. Wegen des schlechteren SNIR benötigt es mehr Übertragungen bis eine Nachricht den Kriterien einer korrekten Nachricht entspricht.

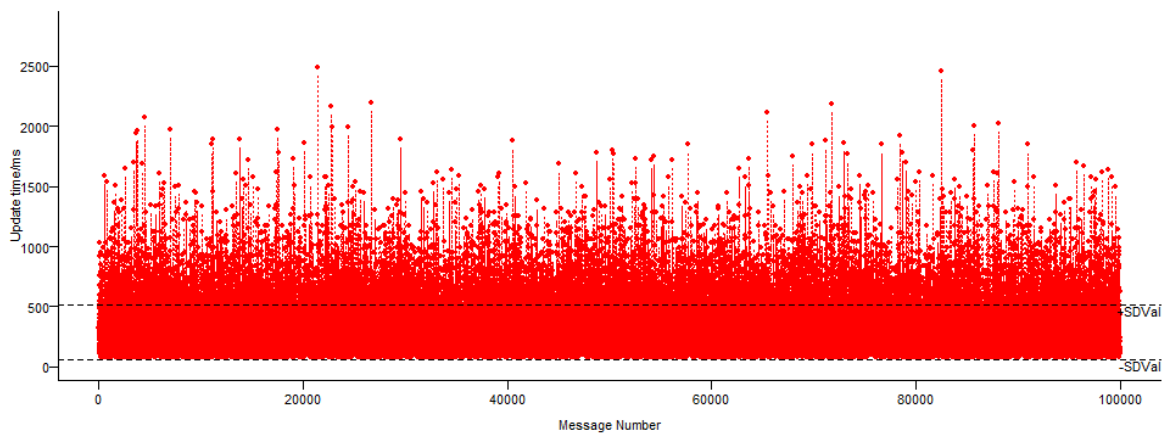


Abbildung 9: TC 01-03-02-03: Uplink, Geräteentfernung 100 m, 100 mW kontinuierliche Störung

In Abbildung 9 sind die Aktualisierungszeiten der Nachrichtenübertragungen des Uplinks dargestellt. Die Standardabweichung ist noch einmal deutlich größer als beim Downlink für denselben Testfall. Dieses Verhalten ist typisch für Sterntopologien und ist auch im ungestörten Fall festzustellen.

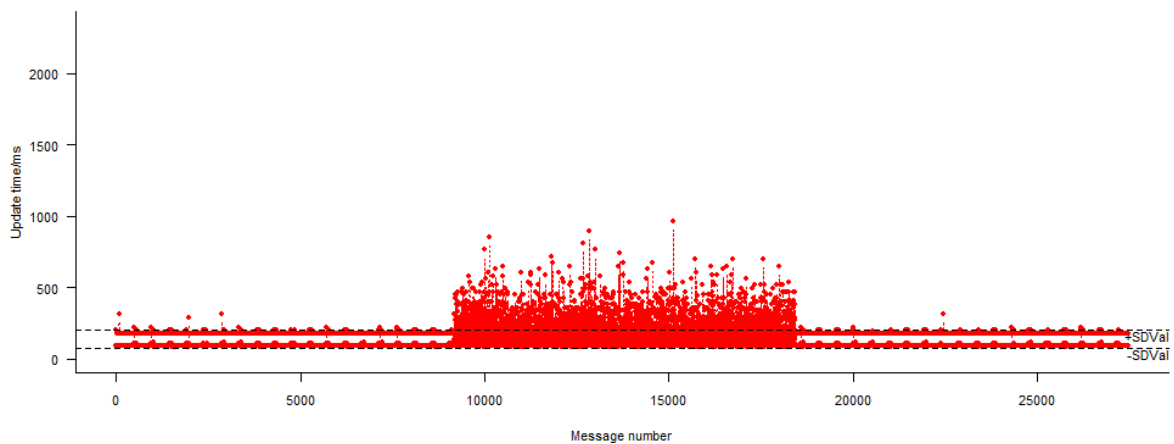


Abbildung 10: TC 01-03-03-01-01: Downlink, Geräteentfernung 10 m, 10 mW kontinuierliche Störung

Abbildung 10 zeigt die Aktualisierungszeiten für einen Testfall, bei dem das Störsignal erst nach 20 Minuten aktiviert und nach weiteren 20 Minuten wieder deaktiviert wurde. Auch in diesem Fall ist nicht zu erkennen,

dass das Bluetooth-System auf den Störer in einer Weise reagiert, die eine Verbesserung des Zeitverhaltens zur Folge hätte.

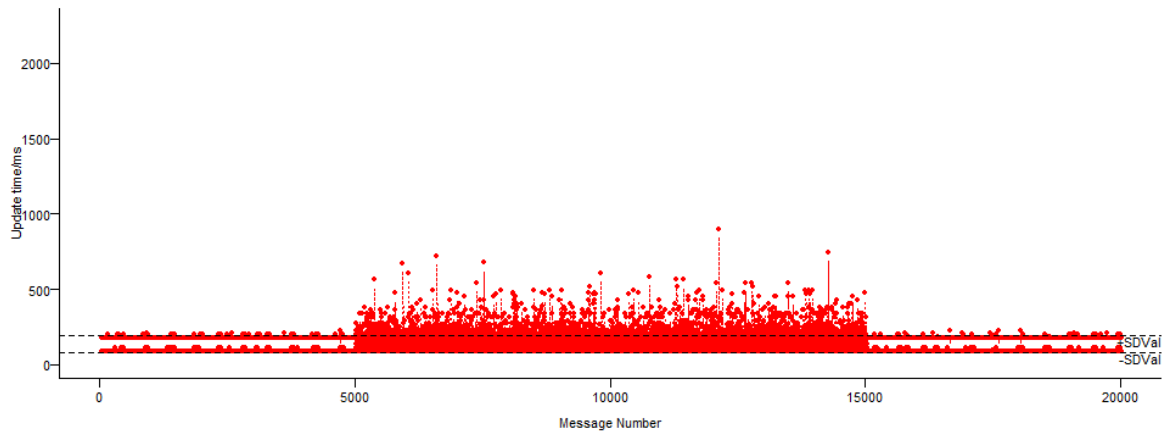


Abbildung 11: TC 01-03-04-02: Downlink, Geräteentfernung 10 m, 10 mW, Ton/Toff: 10/10 ms

Wird die Störung unterbrochen, zeigt sich das auch sofort im Zeitverhalten der Nachrichtenübertragung. Abbildung 11 zeigt die Werte für einen Testfall beim dem nach 10 Minuten ein Störer aktiviert wird, der jedoch nur 10 ms aktiv ist und anschließend für 10 ms deaktiviert wird. Diese zyklische Störung wirkt 20 Minuten auf das SUT bevor die verbleibenden 10 Minuten des Testfalls ungestört bleiben. In Abbildung 12 ist ein Ausschnitt für den Übergang vom ungestörten Fall zum gestörten Fall dargestellt. Die Übertragungszeit steigt plötzlich deutlich unf ist dann durch starke Schwankungen gekennzeichnet.

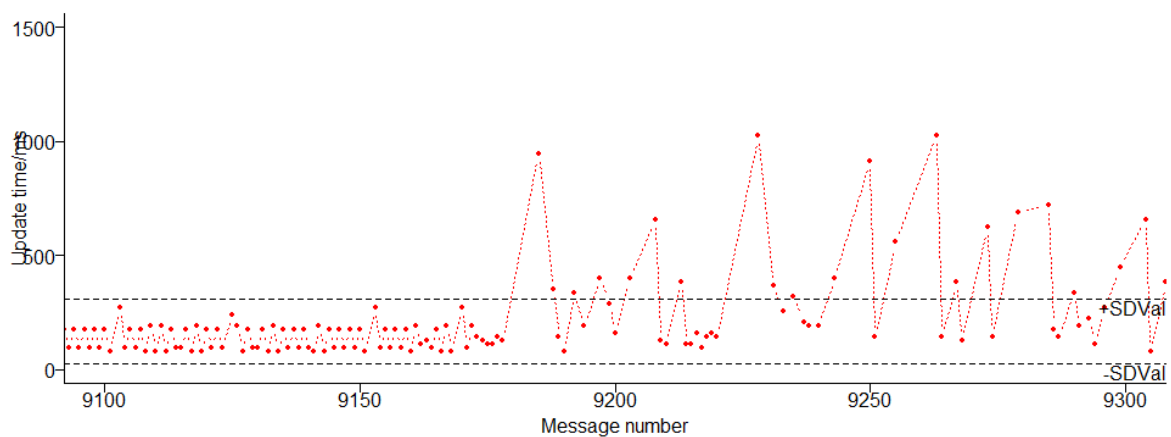


Abbildung 12: TC 01-03-03-02-02: Uplink, Geräteentfernung 10 m, 100 mW, kontinuierlich

5 Zusammenfassung

Eine Übersicht über die statistischen Werte von Übertragungszeit und Aktualisierungszeit gibt Tabelle 1 für die hier dargestellten Testfälle. Die Übertragungszeit für Nachrichtenübertragungen in einem Downlink kann durchaus Werte um 6 ms erreichen. Im Uplink sind es mindestens das dreifache. Allerdings benötigen 95% der Nachrichtenübertragungen über 100 ms und kommen damit bereits in den Bereich des Sendezeitabstandes. Der Einfluss der Interferenzen ist am Perzentil P95 der Übertragungszeit zu erkennen. Deutlicher zeigt sich der Einfluss am Mittelwert der Aktualisierungszeit, der im ungestörten Fall dem Sendezeitabstand von 131 ms entspricht, und an der Standardabweichung der Aktualisierungszeit.

Tabelle 1: Ergebnisse einer Testfallauswahl

Interferenz	Geräteentfernung	Link	TT Min [ms]	TT P95 [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
No	10 m	Down	6	100	131	45
No	10 m	Up	21	123	136	53
10 mW, 10/10 ms	10 m	Down	7	121	145	67
10 mW, 10/10 ms	10 m	Up	27	125	178	123
10 mW, kont.	10 m	Down	6	123	170	92
10 mW, kont.	10 m	Up	18	126	259	202
100 mW, kont.	10 m	Down	6	125	223	130
100 mW, kont.	10 m	Up	19	126	336	279
100 mW, kont.	100 m	Down	6	125	232	161
100 mW, kont.	100 m	Up	25	126	286	231

Wie bereits erwähnt führen beim untersuchten Bluetooth-System Interferenzen nicht zum Abbruch der PROFINET-Kommunikation. Einflüsse auf das Zeitverhalten sind aber deutlich zu erkennen. Neben der Stärke der Störung bezogen auf Leistung und Zeit spielt auch die Richtung der Datenübertragung eine Rolle. Eine Anpassung des Bluetooth-Systems auf die Störung ist im Zeitverhalten nicht zu erkennen.

Die Einflüsse durch Interferenzen können dadurch gemindert werden, dass einzelne zyklische Prozesse besser aufeinander abgestimmt werden. Das Bestreben die Mediumnutzung durch weniger zeitliche Redundanz der Übertragungen zu verringern muss mögliche Interferenzszenarien berücksichtigen. Hier besteht Verbesserungspotenzial durch flexiblere Algorithmen. Die im Bluetooth-Standard spezifizierten Verfahren zur ereignisorientierten Übertragung sollten durch Implementierungen nutzbar gemacht werden.

Die vorgestellte Testreihe kann als Blaupause für weitere Testreihen zur Untersuchung von Kommunikationssystemen verwendet werden. Im Rahmen der Forschungen des Industrial Radio Lab Magdeburg werden Untersuchungen mit WiFi 6 und 5G durchgeführt. Die Untersuchungen sollen dazu beitragen, die Ungewissheit über das Störpotential auf industrielle Funkkommunikation zu verringern. Darüber hinaus sind die Testreihen ein Mittel, um Eigenschaften künftiger Funkkommunikationssysteme wie Elastizität und Resilienz zu erforschen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] L. Underberg und R. Rauchhaupt, „Performance testing of novel wireless communication networks for industrial automation on the example of 5G,“ *Conference on Communication in Automation (Komma)*, 2019.
- [2] L. Underberg, S. Dietrich, R.Kays und G. Fohler, „Towards hybrid wired-wireless networks in industrial applications,“ in *IEEE ICPS*, St. Petersburg, Russia, May 2018.
- [3] 5G-ACIA, „Performance Testing of 5G Systems for Industrial Automation,“ White Paper, 2021.
- [4] G. Patti, L. Leonardi und L. L. Bello, „A bluetooth low energy real-time protocol for industrial wireless mesh networks,“ *IEEE IECON*, 10 2016.
- [5] X. Wu und L. Xie, „On the wireless extension of PROFINET networks,“ *IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium*, 2019.
- [6] E. Leon und M. Nabi, „An experimental performance evaluation of bluetooth mesh technology for monitoring applications,“ *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2020.
- [7] B. Badihi, M. U. Sheikh, K. Ruttik und R. Jäntti, „On performance evaluation of ble 5 in indoor environment: An experimental study,“ *IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2020.
- [8] H. Karvonen, K. Mikhaylov, D. Acharya und M. M. Rahman, „Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy Technology Under Interference,“ *13th EAI International Conference on Body Area Networks*, 2020.
- [9] D. Jiang, M. Fei, H. Wang und T. Li, „Wireless network performance test in hybrid wired/wireless network system,“ *9th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2011.
- [10] C. Krots, G. Cainelli, M. Feldman, C. Pereira und I. Müller, „Tool and method for end-to-end reliability analysis of wireless industrial networks,“ *6th International Embedded Systems Symposium*, 2020.
- [11] iperf, „iperf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP,“ [Online]. Available: <https://iperf.fr/>. [Zugriff am 24 09 2021].

- [12] A. Botta, A. Dainotti und A. Pescapè, „A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios,“ *Computer Networks vol. 56, no. 15*, 2021.
- [13] G. Cainelli und L. Underberg, „Performance analysis of Bluetooth Low Energy in hybrid network with PROFINET,“ *IEEE ETFA*, 2021.
- [14] A. Gnad und L. Rauchhaupt, „Multi-functional interface for test of industrial wireless solutions,“ *Embedded World Conference*, 2008.
- [15] VDI/VDE 2185 Blatt 4, „Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik - Messtechnische Performancebewertung von Funklösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen,“ 2019.