

Erprobungstests von drahtlosen Sensor-Aktor-Systemen in rauen Industrieumgebungen

Dipl.-Ing. Michael Höing, Weidmüller Interface
Dipl.-Ing. Kai Helmig, Fachhochschule Lippe und Höxter
Prof. Dr.-Ing. Uwe Meier, Fachhochschule Lippe und Höxter

Tests of Wireless Sensor Actuator Interfaces in Harsh Industrial Environments

More and more innovative applications of automation technology require the usage of wireless technologies even for transmission of automation signals in harsh IP67 environments. The presentation looks at a sensor actuator interface based on Bluetooth technology and provides information about the limits of interference resistance and transmission reliability of process data transfer in industrial fields. It shows the environmental impact on the primary physical parameters delay spread, doppler spread, attenuation, and signal-to-noise ratio and its correlation to the application specific process parameters delay, bit error rate, and packet loss.

Keynotes: Wireless sensor actuator interface, interference, transmission reliability

1. Einleitung

In vielen innovativen Applikationen der Automatisierungstechnik besteht zunehmend der Wunsch, Wireless-Technologien auch für die Übertragung von Automatisierungsinformationen in rauen IP67-Umgebungen einzusetzen. Der Vortrag betrachtet ein Sensor-Aktor-System auf Basis der Bluetooth-Funktechnologie und gibt Auskunft über die Grenzen der Störfestigkeit und Übertragungssicherheit einer Prozessdatenübertragung im industriellen Umfeld. Es wird gezeigt, welche Auswirkungen die Verschlechterung der primären physikalischen Parameter Delay Spread, Doppler Spread, Zusatzdämpfung und Signal-Rausch-Verhältnis auf die applikationsspezifischen Prozessparameter Delay, Bitfehlerrate und Paketverluste haben.

2. Das Bluetooth basierte SAI-System

Sensor-Aktor-Interfaces (SAI's) sind Feldgeräte, die Sensorsignale erfassen oder Signale für Aktoren bereitstellen (Abb. 1). Üblicherweise sind die Geräte für den industriellen Einsatz konzipiert und durch entsprechende Schutzmaßnahmen an die raue Industrieumgebung angepasst. SAI's sind von nahezu allen Herstellern, die sich mit der industriellen Automatisierung befassen, verfügbar und busseitig für alle gängigen Feldbussysteme ausgelegt.



Abb. 1: Kabelgebundenes Sensor-Aktor-Interface (SAI) in einer Automatisierungsapplikation



Abb. 2: Drahtloses Bluetooth Sensor-Aktor-Interface

Die verwendeten Bluetooth SAI's basieren hardwaremäßig auf der Weidmüller-SAI-Plattformfamilie. Hierbei handelt es sich um eine der Industrieumgebung speziell angepasste Gerätefamilie im IP67-Design. Ein sehr stabiles, vergussfreies Gehäusekonzept, gegenüber Umwelteinflüssen unempfindliche Kunststoffmaterialien und elektronisch robuste Schaltungen bilden den Kern der SAI-Module. Für die Bluetooth-SAI's wurde das konventionelle, kabelgebundene Feldbusinterface der Standard-Baugruppen durch ein kommerziell verfügbares, vorqualifiziertes Bluetooth-Modul mit einer integrierten Antenne mit isotroper Richtcharakteristik ersetzt (Abb. 2). Zur Anwendung für die Datenübertragung kommt das WIRELESSopen-Protokoll [1, 2] unter Verwendung des Bluetooth-Profiles SPP (Serial Port Profile). Für die vorliegenden Messungen wurde das asynchrone Transportverfahren unter Verwendung des Pakettyps DM1 verwendet, welches eine Vorwärtsfehlerkorrektur FEC (forward error correction) und eine Rückwärtsfehlerkorrektur ARQ (automatic repeat request) verwendet. Für die Rückwärtsfehlerkorrektur wurde hier die maximale Anzahl der Telegrammwiederholungen auf 5 begrenzt [3].

3. Systemparameter und deren Messung

Für die Untersuchung des Systemverhaltens wurde eine Traffic-Applikation im Bluetooth-Master realisiert. Ein einzelnes SAI-Modul wird mit der Zykluszeit 50 ms periodisch über eine Zeitdauer bis zu 28 min abgefragt (Abb. 3). Dies entspricht ca. 33.000 Zyklen. Das SAI antwortet mit einem SPP-Protokoll, das aus 7 Byte besteht:

- 1 Byte dient als Identifier für das angesprochene SAI-Modul.
- 1 Byte dient als Polling Byte zur zusätzlichen Überprüfung verloren gegangener Pakete.
- 2 Byte bilden ein Zählerwort, das nach jeder Master-Abfrage inkrementiert wird. Damit kann der Master die Reihenfolge der Telegramme erkennen. Falsche Zählerstände werden als Telegrammverlust gewertet.
- 2 Byte beinhalten ein festes Bitmuster zur Bitfehlererkennung.
- 1 Byte überträgt den LQI-Wert (link quality indication) des SAI-Moduls. Der LQI-Wert ist ein Maß für die von Bluetooth ermittelte Kanalqualität und wird aus der

über mehrere Telegramme ermittelten Bitfehlerrate BER_{BB} des Bluetooth-Basisbandes abgeleitet.

Protokoll-Analysatoren erfassen und protokollieren sämtliche Bluetooth bezogenen Kommunikationsparameter auf der UART- und auf der Luftschnittstelle.

Die UART-Schnittstelle ist das geräteinterne Interface zwischen Mikrokontroller und Bluetooth-Modul. Über einen entsprechenden Adapter werden die UART-Leitungen (TX und RX) über zwei RS232-Schnittstellen an einen PC/Laptop angebunden. Somit kann der Protokoll-Analysator sämtliche Telegramme aufzeichnen, welche zwischen dem Bluetooth-Modul und dem Mikrokontroller ausgetauscht werden. Für die Messungen auf der Luftschnittstelle wird an Stelle des RS232-Adapters ein Bluetooth-USB-Dongle als Empfänger an den PC angeschlossen.

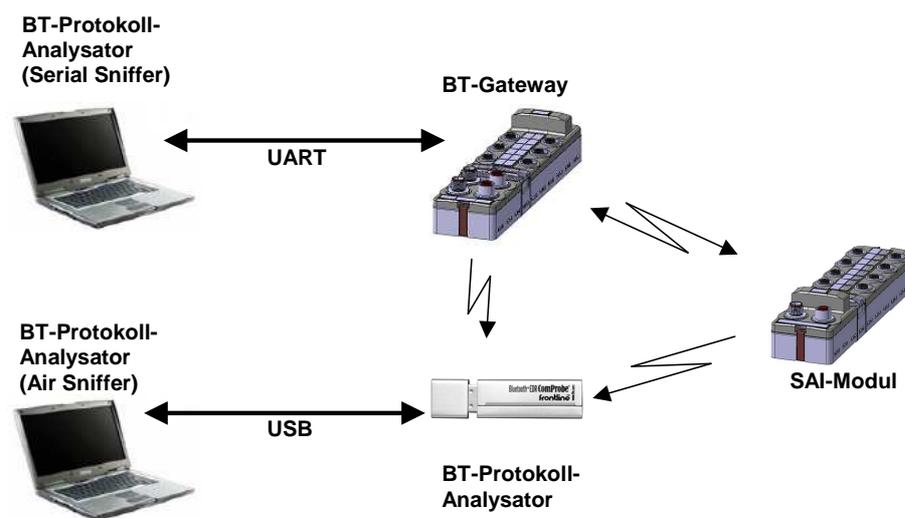


Abb. 3: Messaufbau mit Bluetooth-SAI-System und Protokoll-Analysator

Um den Einfluss verschiedener fremdartiger Funksysteme ohne Umgebungseffekte erfassen zu können, empfehlen sich Messungen, bei denen das Bluetooth-SAI-System und Störsysteme (hier WLAN) leitungsgebunden über Koppler miteinander verbunden sind (Abb. 4).

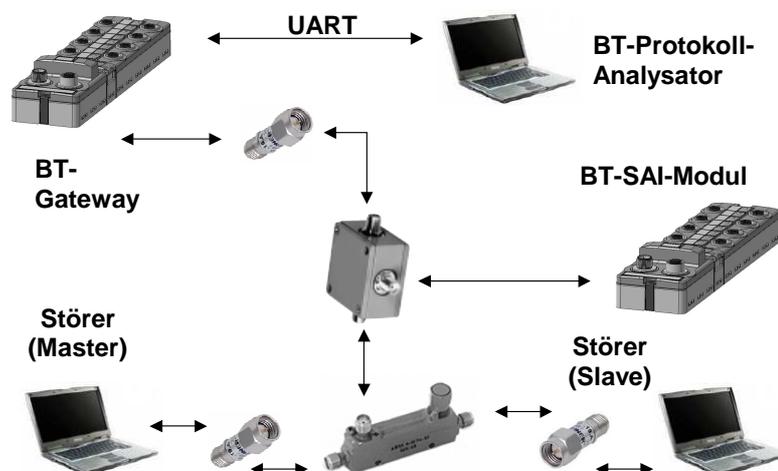


Abb. 4: Leitungsgebundener Messaufbau mit zusätzlichem WLAN-Störer

Über Teiler und Dämpfungsglieder wurde eine Standard-Umgebung geschaffen, die eine Funkstrecke von 3 m bzw. 12 m repräsentiert. Somit lassen sich exakt die, von WLAN-Clients durch Kommunikation mit dem Access-Point verursachten Störungen erfassen, ohne dass andere äußere Einflüsse die Datenübertragung beeinträchtigen. Das Bluetooth-Nutzsignal und das WLAN-Störsignal sind am SAI-Modul gleich stark, d.h. das Signal-Stör-Verhältnis SIR (signal-to-interference ratio) ist 0 dB. Mehrere WLAN-Störer werden mit unterschiedlichen Frequenzkanälen eingekoppelt.

3.1 Parameter der Hochfrequenz- und Basisbandebene

Einen direkten Zugang zu den physikalischen Einflussgrößen des Funkkanals erhält man durch Messungen in der HF-Ebene und im Bluetooth-Basisband.

Mit einem Netzwerkanalysator wird der frequenzabhängige Übertragungsfaktor gemessen. Dessen Kehrwert ist der Übertragungsverlust L (loss). Als Bewertungsparameter verwenden wir den Mittelwert L_{mean} und die Schwankung L_{delta} innerhalb des Frequenzbereichs 2,40...2,48 GHz. Diese frequenzselektiven Schwankungen werden als frequenzabhängiges Fading bezeichnet. Mit einer inversen Fourier-Transformation wird die Impulsantwort τ berechnet. Deren wichtiger Parameter ist das Delay Spread τ_{RMS} , welches ein Maß für die Verbreiterung der Impulsantwort durch Mehrwegeausbreitung angibt. Wir rechnen das Delay Spread mittels der Ausbreitungsgeschwindigkeit $3 \cdot 10^8$ m/s in eine entsprechende Wegstrecke d_{RMS} um.

Zeitabhängige Effekte des Funkkanals werden mit einer Sinusquelle konstanter Frequenz und einem selektiven Messempfänger ermittelt. Damit wird der zeitabhängige Übertragungsfaktor bei einer festen Messfrequenz bestimmt. Mittels einer Fourier-Transformation wird der Doppler variante Übertragungsfaktor und das Doppler-Spread B_D berechnet.

Wichtige Parameter des Bluetooth-Basisbandes (BB) sind:

- **Paketverluste (PL_{BB}):** Dieser Parameter beschreibt die Paketverluste auf dem Bluetooth-Layer Basisband (BB). Zusätzlich zu den DM1-Paketen werden Nullpakete für die Kommunikationssteuerung zwischen Master und Slave ausgetauscht. Pro Zyklus ergeben sich im Mittel ca. 29 BB-Pakete.
- **Bitfehlerrate (BER_{BB}), link quality indication (LQI):** Der Parameter BER_{BB} wird aus dem vom Bluetooth-Modul ausgegebenen LQI-Wert abgeleitet, der im direktem Bezug zur Bitfehlerrate BER_{BB} steht. Diese wiederum ist ein Maß für das am Demodulator vorliegende Signal-Rausch-Verhältnis. Der hier ausgewertete Parameter BER_{BB} ist vom SAI ermittelt. Dieser Parameter ist nur aussagekräftig, wenn die Paketverlustrate PL_{BB} gering ist.
- **Paketwiederholungen (PR):** Dieser Parameter beschreibt die Anzahl der erneut gesendeten Pakete im Bluetooth Basisband. Paketwiederholungen treten dann auf, wenn der Bluetooth-Empfänger der jeweiligen Nachricht nicht im Stande ist, den Access-Code des empfangenen Paketes zu verarbeiten oder der betreffende Header als nicht korrekt eingestuft wird. Zu Wiederholungen führen ebenfalls Pakete die mehr Bitfehler enthalten als der Empfänger im Stande ist zu korrigieren.

3. 2 Wichtige Parameter aus Applikationssicht

Aus Applikationssicht sind für den Anwender die nachfolgend beschriebenen Parameter von entscheidender Bedeutung:

- **Paketverluste (PL_{SPP}):** Hiermit wird die Anzahl der verlorenen Pakete auf der obersten Protokollebene SPP angezeigt, die auch durch interne Mechanismen des Bluetooth-Systems (Fehlerkorrektur, Paketwiederholung) nicht aufgefangen worden sind. Paketverluste stellen somit einen unmittelbaren Bezug zur Zuverlässigkeit und Deterministik der Funkapplikation dar. Pro Zyklus werden im fehlerfreien Fall zwei SPP-Pakete zwischen Master und Slave gesendet.
- **Bitfehlerrate (BER_{SPP}):** Die Ermittlung dieser Bitfehler geschieht über das definierte Bitmuster in den Nutzdaten der Bluetooth-DM-1-Pakete.
- **Delay (DEL):** Das Delay bezieht sich auf die Zeit zwischen der Anfrage des Masters bis zum Eintreffen der Antwort des Slaves. Ein minimales Delay von $2 \times 0,625$ ms ergibt sich aus einer idealen, fehlerfreien Übertragung beider Bluetooth-Teilnehmer, wenn die Antwort einen Zeitschlitz nach der Abfrage erfolgt. Ebenfalls mit einbezogen werden muss die Zeit der Verarbeitung der Anfrage des Masters im Slave, sowie dessen Generierung der entsprechenden Antwort. Das Delay ist als Parameter bzgl. der Deterministik ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Systemverhaltens. Angegeben sind der Mittelwert DEL_{mean} , die Standardabweichung DEL_s und der Jitter (JIT), welcher als Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Delay die Schwankungen der Antwortzeiten angibt.

4. Messumgebungen

Folgende Umgebungen wurden für die Messungen ausgewählt:

- CAB 1** Leitungsgebunden mit entsprechender Dämpfung für eine 3-m-Distanz
- CAB 2** Leitungsgebunden mit entsprechender Dämpfung für eine 12-m-Distanz
- MR** Abgeschirmter, reflexionsarmer Messraum, Distanz Master ↔ Slave 3m
- LAB 1** Hochschullabor, Sichtverbindung (LOS), Distanz Master ↔ Slave 3m
- LAB 2** Hochschullabor, Sichtverbindung (LOS), Distanz Master ↔ Slave 12m
- IND 1** Industrielle Fertigungshalle, Funkstrecke 12 m, Sichtverbindung (LOS), Personenverkehr
- IND 2** Industrielle Fertigungshalle, Funkstrecke 12 m, keine Sichtverbindung wegen Drahtgitter im Funkfeld (NLOS), Personenverkehr (s. Abb. 5)
- IND 3** Industrielle Fertigungshalle, Funkstrecke 3 m, keine Sichtverbindung (NLOS), geringe Maschinenbewegung
- IND 4** Industrielle Fertigungszelle, Funkstrecke 3 m, Sichtverbindung (LOS), schnelle zyklische Maschinenbewegung (s. Abb. 5)

Störungen durch parasitäre Maschinenemissionen und durch andere Funksysteme waren in der Industrieumgebung im Frequenzbereich von Bluetooth nicht vorhanden.

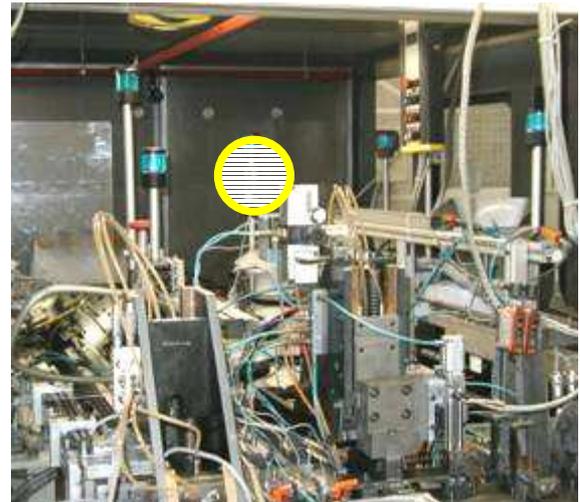


Abb. 5: Fotos der Industrieumgebungen (links IND2, rechts IND4) aus Sicht des Masters. Gelb markiert ist die Position des SAI's.

5. Darstellung der Messergebnisse

5.1 Messergebnisse der Hochfrequenz- und Basisbandebene

Die Vermessung der Hochfrequenzebene ergab die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse.

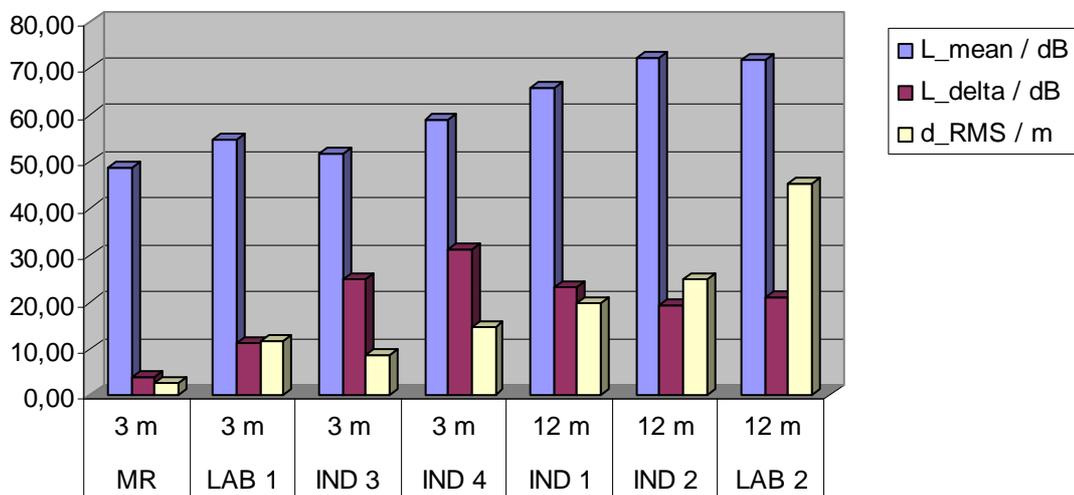


Abb. 6: Messergebnisse der Hochfrequenzebene

Die Ergebnisse des Messraumes (MR) können als Referenz für eine ideale Umgebung angesehen werden. Die realen 3-m-Kanäle weisen mittlere Dämpfungen L_{mean} von 52...59 dB und die 12-m-Kanäle 65..72 dB auf. Die frequenzselektiven Schwankungen L_{delta} der realen Funkkanäle variieren von 11 dB bis 31 dB. Im Wesentlichen ist mit einer Zunahme dieses Fadings auch ein Anstieg des Delay Spreads zu verzeichnen. Hier ergaben sich Werte von 8,8 m bis 45 m. Als schlechtester Funkkanal hat sich die 12-m-Strecke im Hochschullabor erwiesen. Ein

Funkkanal in der Industrieumgebung muss somit keineswegs schlechter sein als in einer Laborumgebung.

Zeitabhängige Effekte durch Personen- oder Maschinenbewegungen bewirkten keine signifikanten Verschlechterungen der Kanalqualität. Am stärksten waren die zeitabhängigen Schwankungen des Übertragungsfaktors in der Industrieumgebung IND 4 mit ihren schnellen zyklischen Maschinenbewegungen. Die Schwankungen der Signalpegel betragen aber selbst hier lediglich 2,5 dB und sind daher gegenüber den frequenzselektiven Schwankungen vernachlässigbar.

Abb. 7 zeigt die entsprechenden und um Störer erweiterten Messergebnisse in der Basisbandebene. Die Umgebungen sind erstens nach zunehmender Entfernung und zweitens nach zunehmender Anzahl der Störer geordnet.

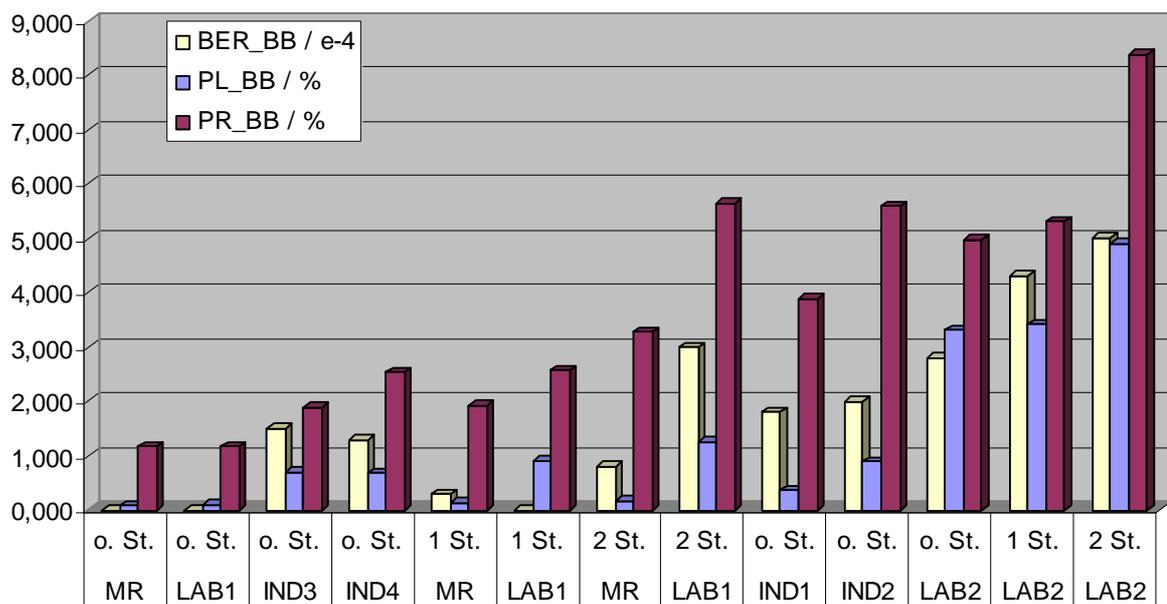


Abb. 7: Messergebnisse der Basisbandebene
(St. = Störer. Hinweis: Die Bitfehlerrate BER_{BB} ist mit 10.000 multipliziert)

Beim besten Funkkanal (Messraum MR, ohne Störer) wurden keine Bitfehler im Basisband gemessen und die Paketverluste lagen bei 0,09 %. Für die schlechtesten Funkkanäle (IND 4, LAB 2) ergaben sich ohne Störer die Bitfehlerraten $BER_{BB} = 1,3...2,8 \cdot 10^{-4}$ und die relativen Paketverluste $PL_{BB} = 0,68...3,3 \%$. Werden ein oder zwei WLAN-Störer mit dem Signal-Störabstand 0 dB zugeschaltet, so verschlechtern sich die Parameter des Basisbandes. Im schlimmsten Fall mit zwei Störern ergaben sich in der Laborumgebung bei der 12-m-Strecke (LAB 2) die Werte $BER_{BB} = 5 \cdot 10^{-4}$ und $PL_{BB} = 4,9 \%$. Die Anzahl der Paketwiederholungen ist erwartungsgemäß im Messraum am niedrigsten ($PR_{BB, \min} = 1,2 \%$) und nimmt mit Verschlechterung der Kanalqualität durch Abstandsvergrößerung, Zunahme des Delay Spreads und Hinzufügen von WLAN-Störern maximal um den Faktor 7 zu ($PR_{BB, \max} = 8,4 \%$). Diese Basisband-Ergebnisse können als sehr gut bezeichnet werden. Selbst im Fall von zwei zugeschalteten sehr starken WLAN-Störern, ergibt sich nur eine moderate Verschlechterung der Übertragungsparameter. Somit zeichnet sich Bluetooth als außerordentlich robustes Übertragungsverfahren aus.

5.2 Messergebnisse der Applikationsebene

Bei der Vermessung der Applikationsebene wurden in keinem Fall Bitfehler gemessen, es galt also stets $BER_{SPP} = 0$. Paketverluste PL_{SPP} traten lediglich in 5 der 19 Messumgebungen auf (siehe Tab. 1). Erneut war die 12-m-Laborstrecke mit zwei zusätzlichen WLAN-Störern die schlechteste Umgebung. Doch lediglich 4 fehlerhafte Messzyklen von insgesamt 9.451 können von den meisten Applikationen toleriert werden.

Tabelle 1: Nur bei diesen Messungen traten Paketverluste auf

Umgebung	Messzyklen	Fehlerhafte Zyklen	relative Zyklusfehler
CAB 2, 2 Störer	33.356	1	$3,0 \cdot 10^{-5}$
IND 4	9.416	1	$1,1 \cdot 10^{-4}$
LAB 1, 2 Störer	17.795	3	$1,7 \cdot 10^{-4}$
LAB 2, 1 Störer	15.293	5	$3,3 \cdot 10^{-4}$
LAB 2, 2 Störer	9.451	4	$4,2 \cdot 10^{-4}$

Abb. 8 zeigt die gemessenen Übertragungszeiten. Die mittlere Antwortzeit DEL_{mean} lag stets im Bereich 16...21 ms. Lediglich die gemessenen Werte der Standardabweichung und des Jitters weisen auf eine kanalabhängige Beeinflussung hin. Die Standardabweichung des Delays variierte von 4,13 ms (Messraum, ohne Störer) bis 37,55 ms (LAB 2, 2 Störer). Der minimale Jitter ergab 18,2 ms (CAB 2, ohne Störer) und der maximale Jitter 41,7 ms (LAB 2, zwei Störer).

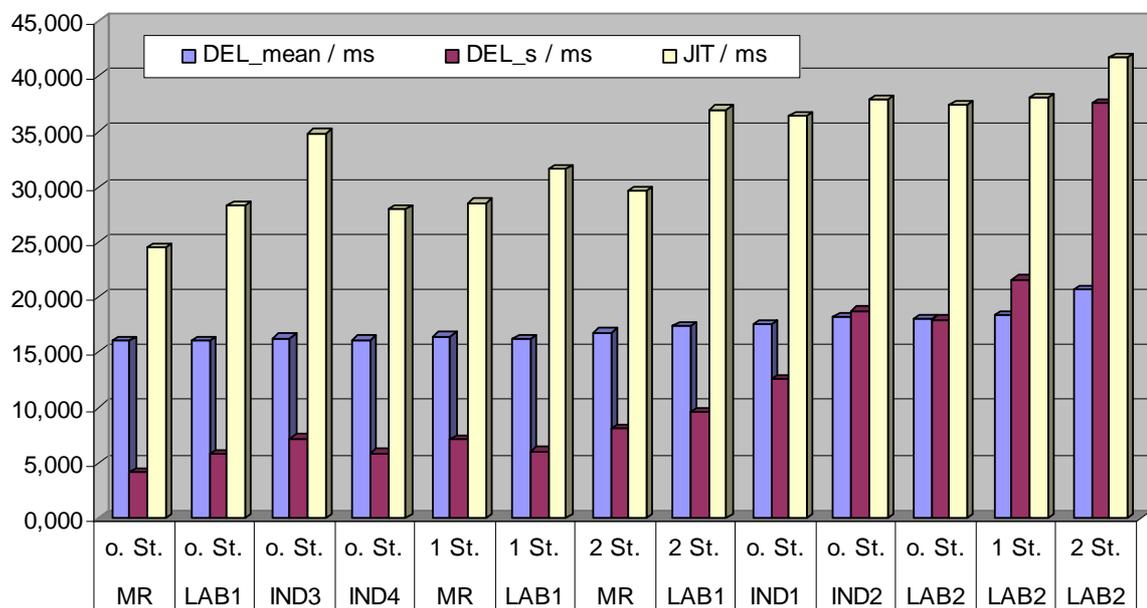


Abb. 8: Gemessenes Zeitverhalten der applikationsspezifischen Prozessdaten

Als "raueste Industrieumgebung" hat sich somit die 12-m-Laborstrecke der Hochschule unter Zuschaltung von zwei sehr starken WLAN-Störern erwiesen. Doch selbst hierbei kann bezüglich der Applikation von hervorragenden Übertragungseigenschaften gesprochen werden.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Die stärksten Beeinträchtigungen wurden festgestellt, wenn ein oder zwei WLAN-Störer auftraten und deren Störpegel in die Größenordnung des Nutzpegels fällt. Passive Umgebungseinflüsse durch Mehrwegeausbreitung und Bewegungen ergaben bei Abständen bis zu 12 m hingegen nur geringere Beeinträchtigungen.

Die bei diesen Messungen verwendeten Gateway- und SAI-Module verwendeten jeweils integrierte Antennen mit nahezu isotroper Charakteristik, was zu folgenden Systemeigenschaften führt:

- Vereinfachte Montage, weil keine Richtungsabhängigkeit besteht;
- Abschattungseffekte gering, weil insbesondere in der Industrieumgebung stets redundante Signalwege vorliegen;
- Ungünstigeres Störverhalten, weil Störer nicht über die Antennenrichtwirkung ausgeblendet werden können.

Auf Grund der überwiegend positiven Systemeffekte einer integrierten Antenne, die sich insbesondere durch eine sehr unproblematische Handhabung auszeichnet und damit eine richtungsunabhängige und einfache Positionierung der Sensor-Aktor-Systeme ermöglicht, kann bewusst ein geringfügig ungünstigeres Störverhalten akzeptiert werden, da Bluetooth selbst in rauen Industrieumgebungen auch für Prozessdaten mit Echtzeitanforderungen ein sehr geeignetes Kommunikationssystem ist. Die inhärenten Systembestandteile adaptives Frequency Hopping, FEC und ARQ führen selbst bei schlechter Kanalqualität zu sehr guten Übertragungsergebnissen.

Bluetooth-basierte Sensor-Aktor-Systeme können somit leitungsgebundene Systeme sinnvoll ergänzen, ohne jedoch die konventionellen Feldbuskabel komplett aus der Automatisierung zu verbannen.

7. Literatur

- [1] M. Schnüchel, S. Witte: Keine neuen Drähte - Drahtlose Kommunikation von Automatisierungskomponenten, ELEKTRONIK 1/2005, S. 38 - 44
- [2] S. Witte, S. Pape: Bluetooth-Kommunikation unter JAVA - Ein System zur Konfiguration funkbasierter Automatisierungssysteme, ELEKTRONIK 7/2005 S. 56 – 60
- [3] M. Höing, K. Helmig, U. Meier: Untersuchungen zur Störfestigkeit und Übertragungssicherheit der Bluetooth-Technologie am Beispiel eines industriellen Sensor-Aktor-Systems, 8. Wireless Kongress, September 2006, Dortmund

Die Autoren danken Herrn Dipl.-Ing. M. Schnüchel und Herrn Dipl.-Ing. T. Ginzel von OWITA GmbH sowie Herrn Dipl.-Ing. H. Krause, Weidmüller Interface GmbH & Co, für grundlegende Entwicklungsarbeiten und konstruktive Diskussionen. Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 1769X05 gefördert.