

Untersuchungen zur Störfestigkeit und Übertragungssicherheit der Bluetooth-Technologie am Beispiel eines industriellen Sensor-Aktor-Systems

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

1. Einleitung

In vielen innovativen Applikationen der Automatisierungstechnik besteht zunehmend der Wunsch, Wireless-Technologien für die Übertragung von Automatisierungsinformationen einzusetzen. Der Vortrag betrachtet ein Sensor-Aktor-System auf Basis der Bluetooth-Funktechnologie und gibt Auskunft über die Störfestigkeit und Übertragungssicherheit der Bluetooth-Technologie im industriellen Umfeld. Dabei werden zum einen die Auswirkung passiver Störungen dargestellt, die sich durch das Umfeld in der Industrieumgebung ergeben. Zum anderen wird das Verhalten von Bluetooth bei direkter Beeinflussung durch weitere Funkssysteme, die in unmittelbarer Nachbarschaft existent sind, anhand von Messergebnissen erläutert.

2. Das Bluetooth basierte SAI-System

Sensor-Aktor-Interfaces (SAI's) sind Feldgeräte, die Sensorsignale erfassen oder Signale für Aktoren bereitstellen. 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

Um die Anwendungen im Bereich des feldbusbasierten – und damit kabelgebundenen – Prozessdatenaustausches auszudehnen, soll dieser auch per

Funk möglich sein. Hierbei ist anzumerken, dass dabei nicht der generelle Kabelersatz im Vordergrund steht, sondern die gezielte Erweiterung eines kabelgebundenen Feldbusses durch funkfähige SAI's.

In einer Mischstruktur, d.h. bei Verwendung von kabelgebundenen SAI's und funkbetriebenen Baugruppen findet die Funkkommunikation üblicherweise zwischen dezentral verteilten Funk-SAI's zu einem Gateway statt.

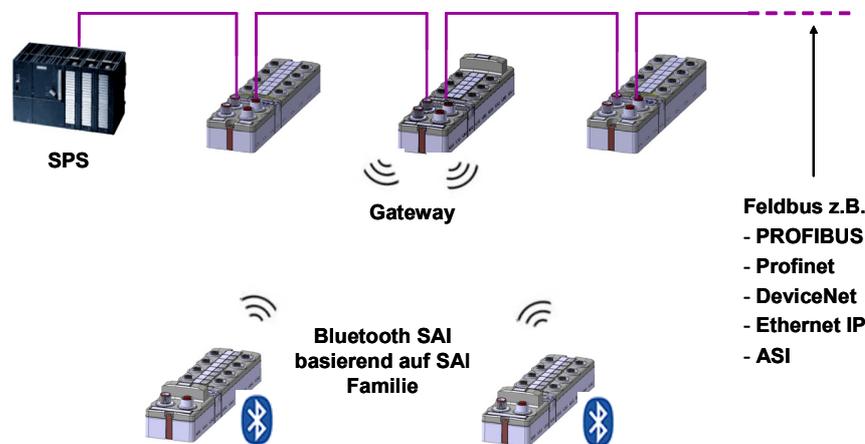


Abb. 3: Feldbus-System mit zusätzlichen Bluetooth-Funk-SAI's

Für die Auswahl der Funktechnologie standen Parameter wie die international lizenzfreie Nutzung des Funkkanals und eine weite Verbreitung durch eine standardisierte Technologie im Vordergrund. Auf Basis dieser Randbedingungen und wegen des deterministischen Kanalzugriffs wurde Bluetooth gewählt. Zur Anwendung für die Datenübertragung kommt das Bluetooth-Profil SPP (Serial Port Profile). 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 ersetzt (Abb. 2).

2.1 Das Kommunikationsprotokoll WIRELESSopen

Auch die Verwendung eines standardisierten Bluetooth-Profiles wie SPP erfordert die Definition eines geeigneten Kommunikationsprotokolls. Da diese Protokolle innerhalb von Bluetooth für den Prozessdatenaustausch nicht definiert sind, wurde ein Protokoll auf Basis des CANopen Standards - als WIRELESSopen - implementiert. Eine detaillierte Beschreibung des WIRELESSopen-Protokolls erfolgte in [1, 2]. Für diese Messungen wird das asynchrone Transportverfahren unter Verwendung des Pakettyps DM1 verwendet, welches eine Vorwärtsfehlerkorrektur FEC (forward error correction) und eine Rückwärtsfehlerkorrektur ARQ (automatic repeat request) verwendet.

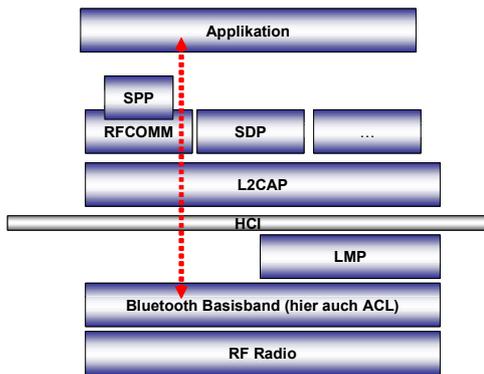


Abb. 4: Kommunikationspfad durch den Bluetooth Protokoll Stack

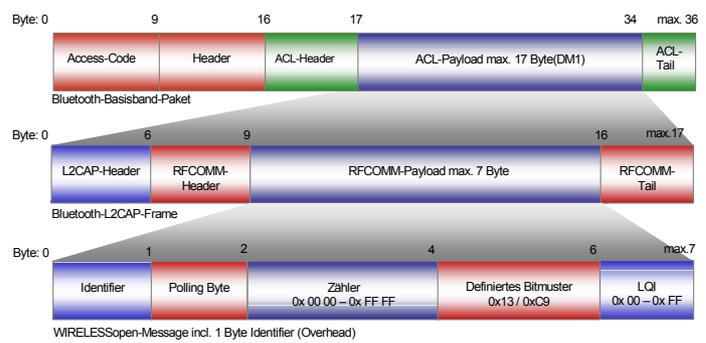


Abb. 5: Protokollaufbau der WIRELESSopen-Message (als Antwort des Slaves)

2.2 Auswahl und Auslegung der Antenne

Ein besonderes Augenmerk beim Aufbau der funkbasierten SAI's wurde auf das Design der Antenne gelegt. Hier galt es zu entscheiden, ob extern zu montierende Antennen, z. B. kommerziell verfügbare Stabantennen, einzusetzen sind, oder ob mit Rücksichtnahme auf die einfachere Handhabung und die ausrichtungsunabhängige Montagemöglichkeit eine integrierte Antenne zu verwenden ist. Beim vorliegenden SAI wurde aus diesen Gründen eine integrierte Antenne verwendet.

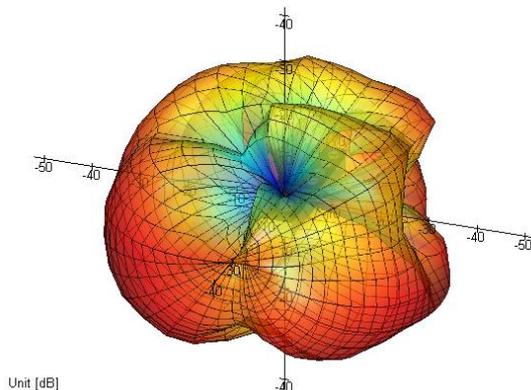


Abb. 6: Richtdiagramm SAI-Stabantenne für horizontale Polarisation (0 ... -40 dB)

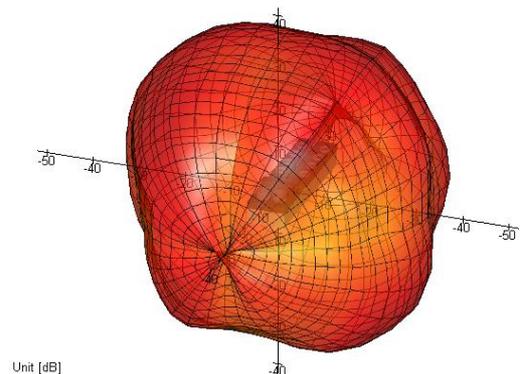


Abb. 7: Richtdiagramm SAI mit integrierter Antenne für horizontale Polarisation (0 ... -40 dB)

Während das SAI mit Stabantenne mehrere ausgeprägte Nullstellen aufweist, zeigt das Richtdiagramm der integrierten Antenne relativ gleichmäßige Verläufe. Dies bedeutet eine weitestgehende Richtungsunabhängigkeit bzgl. der Positionierung/Montage der SAI-Interfaces in der späteren Applikation, bei nur geringfügig niedrigerem Gewinn.

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 von ca. 17 min abgefragt (Abb. 8). Dies entspricht ca.

20.000 Zyklen. Das SAI antwortet mit einem SPP-Protokoll (Abb. 5), 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.

Das verwendete asynchrone Transportverfahren mit DM1-Paketen verwendet eine Vorwärtsfehlerkorrektur FEC und ein ARQ-Schema, bei dem hier maximal 5 Telegrammwiederholungen zugelassen wurden. Ein Protokoll-Analysator erfasst und protokolliert sämtliche Bluetooth bezogenen Kommunikationsparameter auf der Luftschnittstelle.

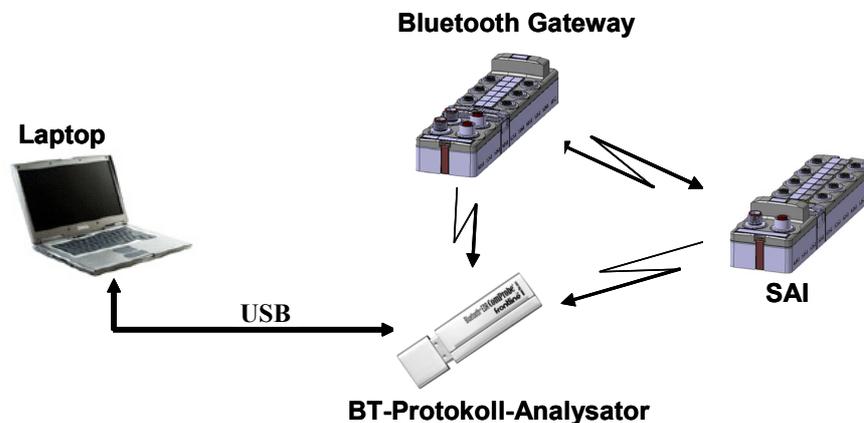


Abb. 8: Messaufbau mit Bluetooth-SAI-System und Protokoll-Analysator

3.1 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 (Abb. 4), 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 (Abb. 5) 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.

Jitter (JIT): Der Jitter einer Datenübertragung stellt als Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Delay die Schwankungen zwischen den Antwortzeiten dar. Bei der Übertragung von Prozessdaten wird ein möglichst kleiner Jitter und damit eine konstante Antwortzeit des Systems gewünscht.

3.2 Zusätzliche Parameter des Bluetooth-Basisbands

Für die weitere Beurteilung der Kanalqualität sind ferner Parameter des Bluetooth-Basisbandes (BB) von Interesse:

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}): Dieser Parameter wird aus dem vom Bluetooth-Chip ausgegebenen LQI-Wert abgeleitet (siehe Abb.5), der im direktem Bezug zur Bitfehlerrate BER_{BB} steht. Der hier ausgewertete Parameter BER_{BB} ist vom SAI ermittelt.

Telegrammwiederholungen (TW): Dieser Parameter beschreibt die Anzahl der erneut gesendeten Pakete im Bluetooth Basisband. Telegrammwiederholungen 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 Telegrammwiederholungen führen ebenfalls Pakete die mehr Bitfehler enthalten als der Empfänger im Stande ist zu korrigieren.

3.3 Parameter der Hochfrequenzebene

Einen direkten Zugang zu den physikalischen Einflussgrößen des Funkkanals erhält man durch die Messung in der HF-Ebene.

Ein Netzwerkanalysator mit einer durchstimmbaren, unmodulierten Sinusquelle erlaubt die Messung des frequenzabhängigen Übertragungsfaktors. Mit einer inversen Fourier-Transformation wird die Impulsantwort abgeleitet. Deren wichtiger Parameter ist das Delay Spread τ_{RMS} , welches ein Maß für die Verbreiterung der Impulsantwort durch Mehrwegeausbreitung angibt.

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.

4 Leitungsgebundene Messungen

Um den Einfluss verschiedener fremdartiger Funkssysteme ohne Umgebungseffekte erfassen zu können, empfehlen sich Messungen, bei denen das Bluetooth-SAI-System und Störsysteme (hier WLAN) leitungsgebunden über Koppler miteinander verbunden sind. 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. Der Protokoll-Analysator wird über Richtkoppler drahtlos angebunden.

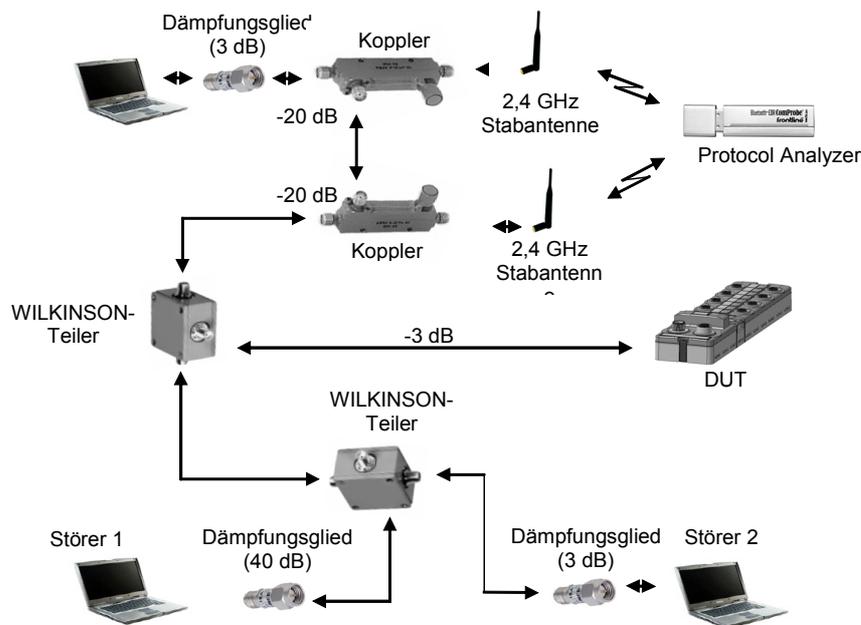


Abb. 9: Leitungsgebundener Messaufbau mit WLAN-Störer

5 Strahlungsgebundene Messungen

Alle strahlungsgebundenen Messungen wurden in folgenden Umgebungen durchgeführt:

- Messungen im abgeschirmten und reflexionsarmen Messraum (MR)
- Messungen im Labor (LAB) mit zusätzlichen WLAN-Störern
- Messungen in Industrieumgebungen (IND)

Um die Messwerte vergleichen zu können, kamen Funkstrecken von 3 m und 12 m zum Einsatz.

In der Industrieumgebung wurden Messungen an vier charakteristischen Orten vorgenommen (IND 1... IND 4). Dabei unterscheiden sich die industriellen Messorte wie folgt:

- IND 1** Fertigungshalle, Funkstrecke 12 m, Sichtverbindung (LOS), Personenverkehr
- IND 2** Fertigungshalle, Funkstrecke 12 m, keine Sichtverbindung wegen Drahtgitter im Funkfeld (NLOS), Personenverkehr (s. Abb. 10)
- IND 3** Fertigungshalle, Funkstrecke 3 m, keine Sichtverbindung (NLOS), geringe Maschinenbewegung
- IND 4** Fertigungszelle, Funkstrecke 3 m, Sichtverbindung (LOS), schnelle zyklische Maschinenbewegung (s. Abb. 10)

Störungen durch parasitäre Maschinenemissionen und durch andere Funkssysteme waren im Frequenzbereich von Bluetooth nicht vorhanden.

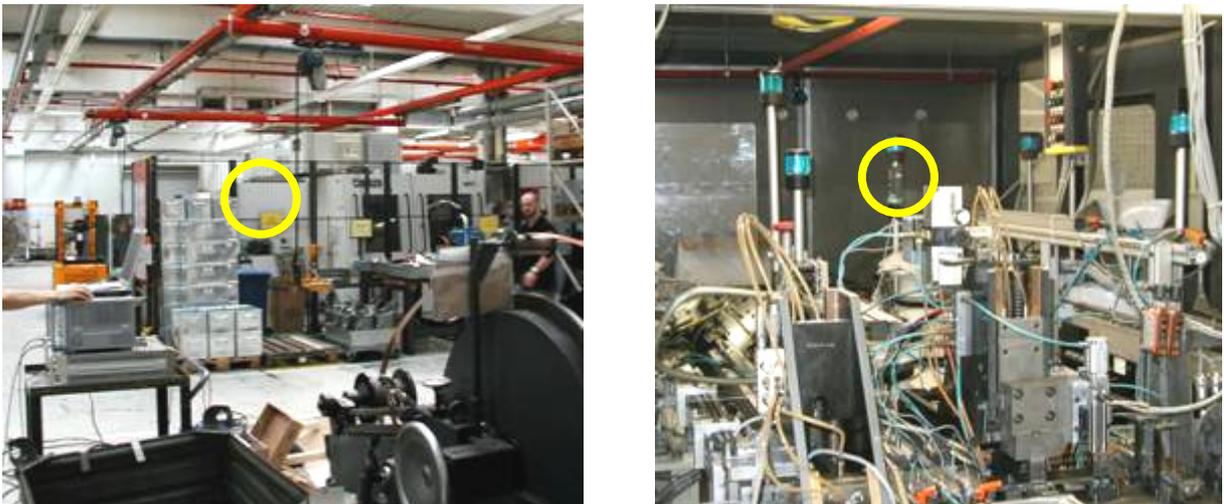


Abb. 10: Fotos der Industrieumgebungen (links IND2, rechts IND4) aus Sicht des Masters. Gelb markiert ist die Position des SAI's.

6 Darstellung der Messergebnisse

6.1 Messergebnisse der leitungsgebundenen Messungen

Bei diesen Messungen nach Abb. 9 konnten keine Beeinträchtigungen der Applikationsparameter auf der SPP-Schicht festgestellt werden: Selbst bei zwei WLAN-Störern traten keine Paketverluste ($PL_{SPP} = 0$) und keine Bitfehler ($BER_{SPP} = 0$) auf.

Auswirkungen ergaben sich lediglich im Bluetooth-Basisband. Die Messwerte in Abb. 11 zeigen, dass die Koexistenz weiterer Funkssysteme einen entscheidenden Einfluss auf die Bluetooth-Kommunikation hat. Bitfehler, Paketverluste und Telegrammwiederholungen nehmen unter Einfluss der WLAN-Störer deutlich zu. Die durch Dämpfung variierte Reichweite als Einflussfaktor zeigt dagegen lediglich einen geringen Einfluss.

Deutlich wird hiermit, dass die internen Korrekturmechanismen FEC und ARQ von Bluetooth greifen, da auf SPP-Ebene keine Fehler auftraten. Bei den Messungen konnte ein minimales Delay zwischen 5,6 ms und 8,1 ms gemessen werden. Der Durchschnittswert betrug 10,3 ms.

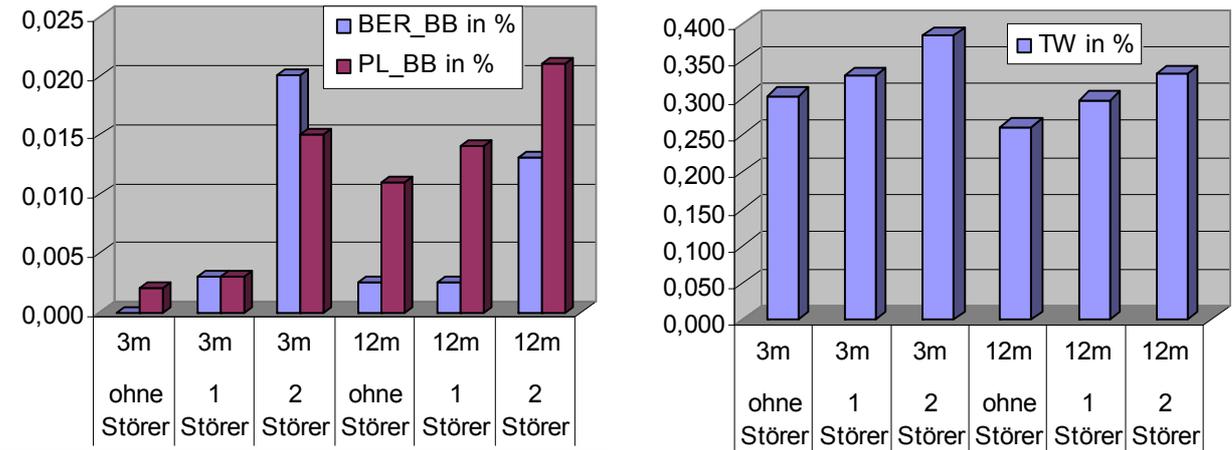


Abb. 11: Kabelgebundene Messwerte ohne / mit WLAN Störer

6.2 Messergebnisse der strahlungsgebundenen Messungen

Bei sämtlichen strahlungsgebundenen Messungen konnten auf der SPP-Schicht erneut keine Bitfehler ($BER_{SPP} = 0$) festgestellt werden. Das mittlere Delay betrug 10,14 ms bis 10,39 ms. Im Messraum und bei der 3-m-Strecke im Labor traten ebenfalls keine Paketverluste auf. Diese ergaben sich jedoch in der Industrieumgebung oder mit zusätzlichen WLAN-Störern im Labor (Abb. 12). Telegrammwiederholungen hingegen traten unter allen Bedingungen auf, sogar im idealen Messraum.

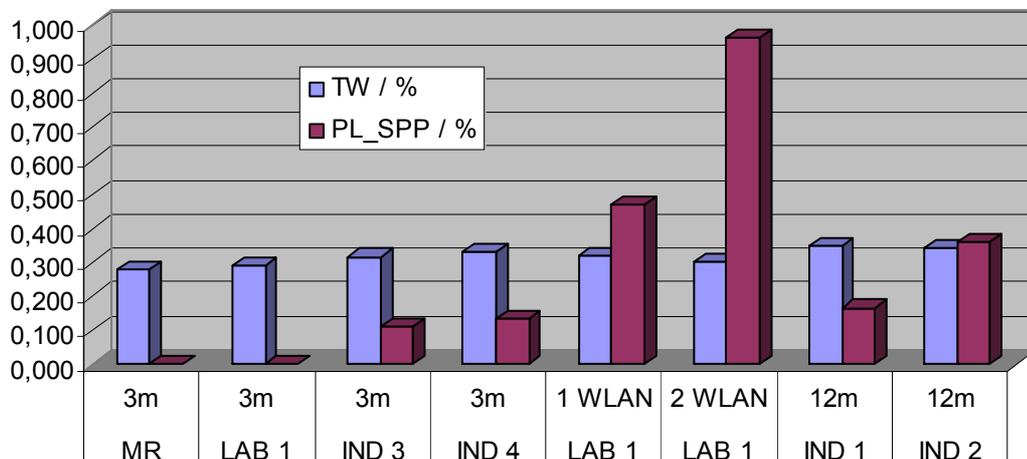


Abb. 12: Paketverluste SPP und Telegrammwiederholungen im Basisband

Abb. 13 vermittelt ergänzende Informationen zur Kanalqualität dieser Umgebungen. Im Bluetooth-Basisband zeigen sich wie auf der SPP-Schicht entsprechende Effekte bei den Paketverlusten. Überraschend gut erscheinen teilweise die Werte der Bitfehlerrate BER_{BB} . Doch die vom Bluetooth-Chip ermittelte Bitfehlerrate im Basisband ergibt nur dann sinnvolle Werte, wenn die Paketverluste nicht zu hoch sind. Dieses Problem erkennt man bei den Messungen mit den WLAN-Störern. Die Bitfehlerrate - und damit der LQI-Wert - weisen hier auf eine gute Kanalqualität hin, die aber leider nicht vorliegt.

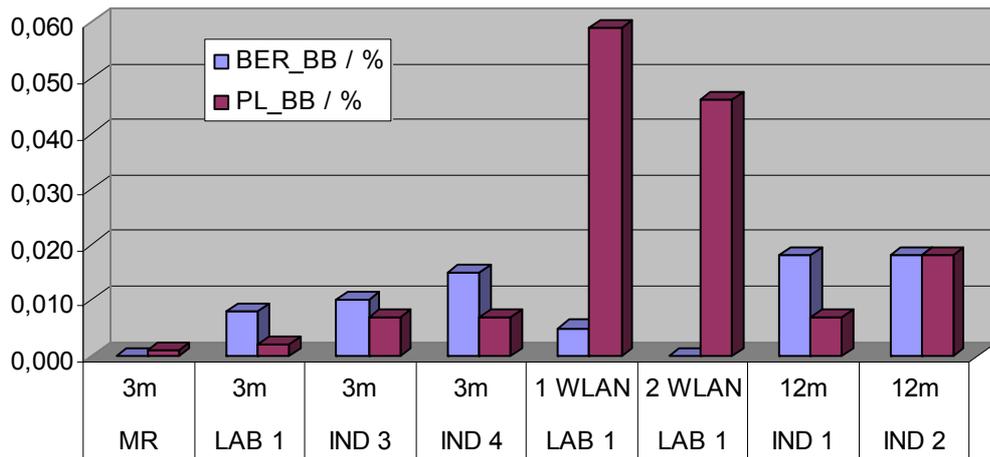


Abb. 13: Paketverluste und Bitfehlerrate im Basisband

Abb. 14 kann die mittlere Dämpfung L_{mean} der Funkkanäle entnommen werden. Die realen 3-m-Kanäle weisen Dämpfungen um 60 dB und die 12-m-Kanäle bis zu 70 dB auf. Bezüglich der mittleren Dämpfung ist ein Funkkanal in der Industrieumgebung nicht schlechter als in einem Laborraum mit Sichtverbindung. Unterschiede lassen sich hingegen bei den frequenzselektiven Schwankungen bzw. bei der Impulsantwort feststellen. Exemplarisch zeigt Abb.15 die Impulsantwort der Industrieumgebung IND 4. Das Delay Spread τ_{RMS} betrug hier 79,0 ns, was einer Wegstrecke von $d_{\text{RMS}} = 23,7$ m entspricht. Bei der 3-m-Laborstrecke waren die Werte mit 41,4 ns bzw. 12,4 m nur etwa halb so groß.

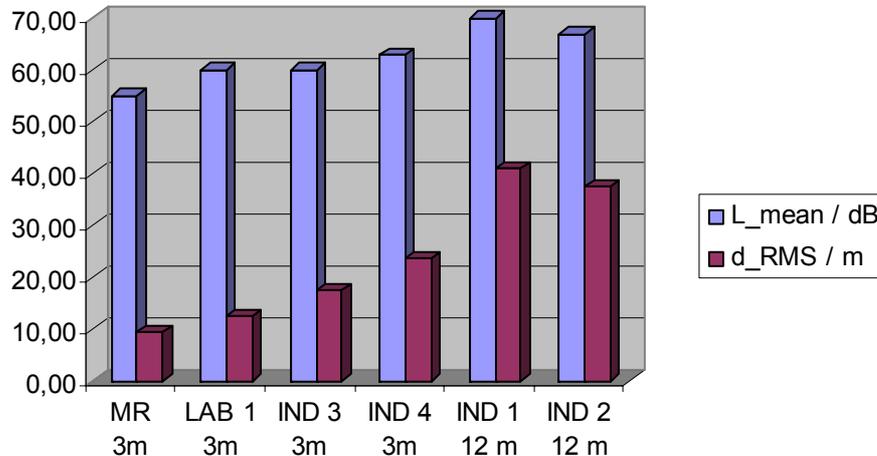


Abb. 14: Mittlere Dämpfung und Delay Spread

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. Aus dem Doppler-Spektrum in Abb. 16 können periodische Bewegungen mit 100 Hz erkannt werden, was ein Doppler-Spread von $B_D = 400$ Hz ergibt. Die Schwankungen der Signalpegel betragen hingegen nur 2,5 dB und sind gegenüber den frequenzselektiven Schwankungen vernachlässigbar.

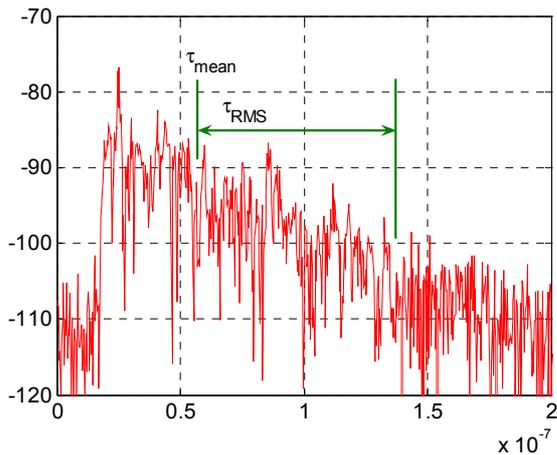


Abb. 15: Impulsantwort in dB für die Umgebung IND 4 von 0 ... 200 ns

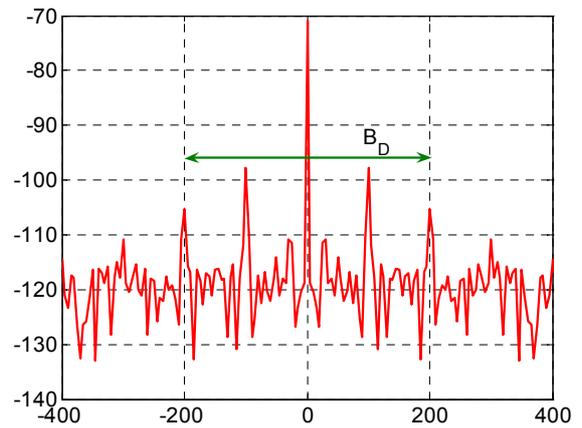


Abb. 16: Doppler-Spektrum in dB für die Umgebung IND 4 von -400 Hz ... 400 Hz

7. 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 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.

Zusammenfassend bestätigt sich, dass Bluetooth neben seiner Verwendung im kommerziellen Bereich auch in rauen Industrieumgebungen ein sehr geeignetes Kommunikationssystem ist. Die inherenten Systembestandteile adaptives Frequency Hopping, FEC und ARQ führen selbst bei schlechter Kanalqualität zu sehr guten Ergebnissen der Applikationsparameter.

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

8. 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

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.