

Simulationsmodell für den Protokollentwurf von drahtlosen Sensor/Aktor – Netzwerken für die Fertigungsautomatisierung

Dipl.-Ing. Housam Wattar (wattar@hsu-hh.de), Dipl.-Ing. Timo Schröder (t.schroeder@hsu-hh.de),
 Dr.-Ing. Ralf Heynicke (ralf.heynicke@hsu-hh.de), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Scholl (gerd.scholl@hsu-hh.de)
 Professur für Elektrische Messtechnik, Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr,
 Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Kurzfassung

Die Robustheit und Zuverlässigkeit eines Funksystems hängt maßgeblich ab von dessen Auslegung im Hinblick auf die charakteristischen Eigenschaften des zeitvarianten und frequenzselektiven Funkkanals der potenziellen Zielanwendung. Neben den Eigenschaften des Funkkanals spielt auch die Koexistenzfähigkeit zu anderen Systemen eine entscheidende Rolle. Im Fokus dieser Abhandlung steht die Entwicklung eines Kanalmodells zur Auslegung eines drahtlosen Sensor/Aktor - Netzwerkes für Anwendungen in der Fertigungsautomatisierung, insbesondere für die Entwicklung des Medienzugriffs. Entscheidend für die Güte des Kanalmodells sind die jeweiligen Modellparameter mit Hilfe derer die physikalischen, d.h. elektromagnetischen Gegebenheiten in ein Simulationsmodell abgebildet werden. Am besten lassen sich diese direkt aus Messungen extrahieren, die in der Umgebung der Zielanwendung gewonnen wurden. Eine Schwierigkeit hierbei ist, dass sich die möglichen Anwendungen in der Automatisierungstechnik bezüglich der geometrischen und elektromagnetischen Gegebenheiten von Fall zu Fall unterscheiden, sodass die mit Hilfe einer Messung gewonnenen Modellparameter immer nur einen, wenn auch möglicherweise repräsentativen Spezialfall darstellen. Um möglichst alle Anwendungsfelder in ihrer Allgemeinheit zu beschreiben, wurde deshalb ein statistisches Kanalmodell entwickelt, bei dem die Modellparameter innerhalb charakteristischer Grenzen variiert werden. Auf Basis des entwickelten Modells werden verschiedene Möglichkeiten des Kanalzugriffs dargestellt und ihre Leistungsfähigkeit bezüglich Paketfehlerraten, d.h. Zuverlässigkeit, miteinander verglichen.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Funksystemen ist das Verständnis über das Verhalten des zeitvarianten und frequenzselektiven Funkkanals in der Zielumgebung entscheidend. Das statistische Kanalmodell, das in diesem Beitrag vorgestellt wird, zielt ab auf die Beschreibung der Funkausbreitung innerhalb von industriellen Fertigungsanlagen. Zudem soll dieses Modell dazu dienen, unterschiedliche Funkprotokolle im Hinblick auf deren Robustheit und Störfestigkeit zu beurteilen. Wie aus Bild 1 zu erkennen ist, unterscheidet sich eine Fertigungsanlage in Bezug auf ihre elektromagnetischen Eigenschaften erheblich von denen aus der Mobilfunktechnik oder einem Büro-Umfeld. Innerhalb einer Fertigungszelle, die hier typisch mit Abmaßen von $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ angenommen wird, sind wesentlich mehr Streuzentren vorhanden. Die Aufbauten sind in der Regel aus Metall und die relevanten Distanzen im Bereich von wenigen Metern, wobei es z. B. auch durchaus vorkommen kann, dass eine Fertigungsanlage innerhalb einer großen Halle aufgebaut ist, was bedeutet, dass es durchaus Pfade geben kann, bei denen die von einem Sender ausgestrahlte elektromagnetische Welle große Umwege nimmt, bevor sie an weit entfernten Hallenwänden reflektiert und vom Empfänger eines Sensor/Aktor-Knotens bzw. der Basisstation detektiert wird. Natürlich unterscheiden sich auch die einzelnen Fertigungsanlagen zum Teil erheblich voneinander. Die beste, aber zugleich auch aufwendigste Methode den Funkkanal zu charakterisieren sind Messungen vor Ort.



Bild 1 Foto einer typischen Fertigungszelle [1].

Ein Vorteil hierbei ist, dass der Endanwender mit großer Sicherheit davon ausgehen kann, dass ein auf seine Bedürfnisse ausgelegtes Funksystem in der jeweiligen Umgebung fehlerfrei funktioniert. Diese Messungen sind unabdingbar und tragen unter anderem stark dazu bei, die Akzeptanz von Funksystemen in industriellen Fertigungsprozessen zu erhöhen. Allerdings stellt jede Messung vor Ort für sich einen Spezialfall dar und nur über eine Vielzahl von Messungen kann der komplette Parameterraum, den es abzudecken gilt, ermittelt werden. Für klassische Mobilfunk- und WLAN-Anwendungen wurden derartige Messkampagnen durchgeführt, für das industrielle Umfeld hingegen liegen vergleichsweise nur relativ wenige Messungen vor. Die Idee hinter der Entwicklung des

nachfolgend vorgestellten Modells ist, aufgrund von Plausibilitätsbetrachtungen, aus der Literatur bekannten Daten und Verhaltensweisen sowie von Messungen in industrieller Umgebung ein statistisches Kanalmodell zu entwickeln, anhand dessen die Auslegung eines drahtlosen Sensor/Aktor-Funkssystems für die Fertigungsautomatisierung bewertet werden kann, wobei hier davon ausgegangen wird, dass bei den zu betrachtenden Funkssystemen die drahtlos abgesetzten Sensor/Aktor-Knoten sternförmig an eine Basisstation bzw. ein Gateway angebunden werden [2]. Die zu untersuchenden Funkssysteme werden auf der untersten Ebene der Fertigungshierarchie eingesetzt und können als Ergänzung zu konventionellen drahtgebundenen Bussystemen angesehen werden. Ein typisches Beispiel hierfür ist das AS-Interface, mit dem bis zu 64 Sensoren bzw. Aktoren von einem Busmaster angesteuert werden können. Bei den nachfolgenden Überlegungen wird von einer Anzahl drahtlos abgesetzter Sensor/Aktor-Knoten in der gleichen Größenordnung innerhalb einer Fertigungszelle ausgegangen.

Im nächsten Abschnitt werden das Kanalmodell und dessen charakteristische Modellparameter beschrieben. Im dritten Abschnitt wird das Gesamtmodell, bestehend aus Kanalmodell und überlagertem Medienzugriffverfahren vorgestellt. An einen beispielhaften Protokollentwurf wird die Bestimmung der Paketfehlerrate demonstriert. Der Beitrag schließt mit einer kurzen Zusammenfassung.

2 Kanalmodell

Im Folgenden wird bei einer Fertigungszelle von Abmaßen von ca. $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ ausgegangen. In dieser Fertigungszelle sind unterschiedliche Sensoren und Aktoren aktiv. Da das Kanalmodell nicht auf einen speziellen Anwendungsfall angepasst sein soll, wird davon ausgegangen, dass z. B. 32 Sensor/Aktor-Knoten über den Raum verteilt sind, die als blaue Punkte in Bild 2 dargestellt sind.

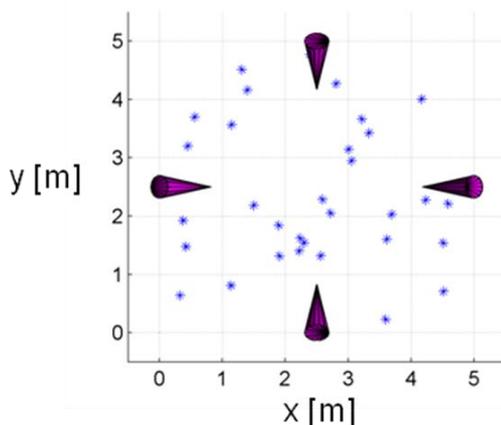


Bild 2 2D-Darstellung der räumlichen Verteilung der Sensor/Aktor-Module in einer Fertigungszelle. Die Antennen der Basisstation sind als Kegel eingezeichnet. Die Kegel symbolisieren die an den Rändern der Fertigungszelle angebrachten Antennen der Basisstation, wobei die Richtung der Kegelspitze die Richtung mit dem maximalen Antennengewinn repräsentiert. In Bild 3 ist dasselbe Szenario im dreidimensionalen Raum dargestellt.

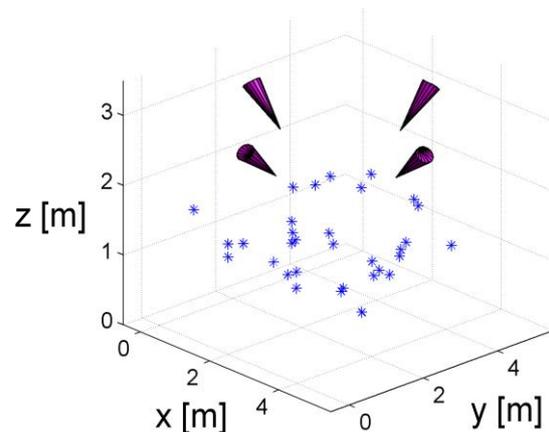


Bild 3 der räumlichen Verteilung der Sensor/Aktor-Module in einer Fertigungszelle.

Bei der Verteilung der Sensor/Aktor-Knoten wird davon ausgegangen, dass sich die meisten auf einer Arbeitshöhe von 1 m – 1,3 m befinden. Deshalb wird in vertikaler Richtung eine Gaußsche-Normalverteilung und in horizontaler Richtung eine Gleichverteilung angenommen. Bei den Sensor/Aktor-Knoten wird davon ausgegangen, dass deren Antennen eine ideale Rundstrahlcharakteristik aufweisen, bei den Antennen der Basisstationen wurden die jeweiligen Richtcharakteristika berücksichtigt, die entweder mit Hilfe von Antennenmessungen bestimmt oder Datenblättern entnommen wurden. Mit Hilfe dieses geometrischen Modells lässt sich gemäß Friis die Dämpfung für jeden Pfad zwischen Basisstationsantenne und Sensor/Aktorknoten, d.h. die Pfadverluste bestimmen:

$$P_2 = P_1 + G_1 + G_2 + 20 \log \left(\frac{\lambda / 4\pi}{R} \right) + 10 \cdot n \cdot \log \left(\frac{1 \text{ m}}{R} \right) \quad (1)$$

Hierin kennzeichnen P_1 und P_2 die Sende- und Empfangsleistungen, angegeben in dBm, G_1 und G_2 den Antennengewinn der Sende- und Empfangsantenne, angegeben in dBi, und λ die elektromagnetische Wellenlänge, angegeben in Meter. R ist der Abstand der Sensor/Aktor-Knoten von der jeweiligen Basisstationsantenne in Metern. Der Parameter n kennzeichnet den Ausbreitungskoeffizienten und wird im klassischen Friisschen-Modell zu $n = 2$ gewählt [3].

Aufgrund von z.B. metallischen Aufbauten, Rohren für Medienzuführungen, sich bewegenden Robotern und umgebenden Wänden ist die elektromagnetische Ausbreitung innerhalb einer Fertigungszelle durch eine starke Mehrwegeausbreitung geprägt. Besteht zwischen der Basisstation und den abgesetzten Sensor/Aktor-Knoten nur eine eingeschränkte Sichtverbindung, lässt sich, wenn man davon ausgehen kann, dass sich viele Streukomponenten mit ungefähr gleicher Amplitude überlagern, die Wahrscheinlichkeitsdichte der lokal verteilten Feldstärke $E(x,y,z)$ näherungsweise mit Hilfe der Rice-Verteilung [4] beschreiben

$$\text{pdf}_{\text{Rice}}(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad 0 \leq r < \infty. \quad (2)$$

Hierbei charakterisiert die Zufallsvariable r den Betrag der elektrischen Feldstärke und σ deren Standardabweichung. Mit $2\sigma^2$ als der mittleren Empfangsleistung der Streukomponenten ist der Rice-Faktor

$$K_{\text{Rice}} = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (3)$$

das Verhältnis der Leistung der direkt empfangenen Signalkomponente A^2 zur mittleren Leistung der Streukomponenten $2\sigma^2$. I_0 ist die modifizierte Besselfunktion nullter Ordnung. Aus der Literatur [5] sind auch andere Verteilungen bekannt. Unsere Messungen in typischen industriellen Umgebungen haben jedoch gezeigt, dass dieses relativ einfache Modell sehr gut mit den tatsächlichen Gegebenheiten übereinstimmt. Je mehr das Hochfrequenzsignal zwischen Sender und Empfänger an (meist metallischen) Gegenständen gestreut wird, desto mehr Energie wird der direkten Signalkomponente entzogen und desto mehr Energie steckt in den Streukomponenten. Dies bedeutet, dass der Rice-Faktor K_{Rice} und der Dämpfungskoeffizient n letztlich den gleichen physikalischen Effekt charakterisieren und daher im Modell ineinander überführt werden. Dieser Ansatz setzt allerdings voraus, dass der Energieverlust in der direkten Signalkomponente nicht aus dielektrischen bzw. ohmschen Verlusten resultiert, sondern eben durch Streuzentren hervorgerufen wird, was bei industriellen Umgebungen mit vielen metallischen Hindernissen zumindest in erster Ordnung eine gute Näherung ist. Ein Ausbreitungskoeffizient von $n=2$ kennzeichnet eine direkte Sichtverbindung (engl.: Line Of Sight, LOS) ohne Mehrwegeausbreitung, so dass $2\sigma^2=0$. Für $n=3,5$ empfängt der Sensor/Aktorknoten das Hochfrequenzsignal eigentlich nur noch über Streukomponenten (engl.: Obstructed Line Of Sight, OLOS bzw. No Line Of Sight, NLOS), d.h. $K_{\text{Rice}} \rightarrow 0$, was einer klassischen Rayleigh-Verteilung entspricht.

Die zeitvariante frequenzselektive Übertragungsfunktion des Funkkanals kann durch einen zweidimensionalen stochastischen Prozess beschrieben werden, der ohne Einschränkung der Allgemeinheit durch eine vierdimensionale Korrelationsfunktion

$$R_{HH}(t_1, t_2, f_1, f_2) = E[H^*(t_1, f_1) \cdot H(t_2, f_2)], \quad (4)$$

repräsentiert wird, wobei in Gl. (4) E die Erwartungswertbildung kennzeichnet und $H(t_1, f_1)$ die komplexwertige zeitvariante Übertragungsfunktion zur Zeit t_1 bei der Frequenz f_1 charakterisiert. Entsprechend steht $H(t_2, f_2)$ für die zeitvariante Übertragungsfunktion zur Zeit t_2 und der Frequenz f_2 . Mit der Annahme, dass sowohl die unterschiedlichen Streukomponenten (engl.: Uncorrelated Scatterers, US) als auch die verschiedenen Dopplereffekte (engl.: Wide-Sense Stationary, WSS) nicht korreliert sind, lässt sich die Korrelationsfunktion in die zweidimensionale Form

$$R_{HH}(\Delta t, \Delta f) = E[H^*(t_1, f_1) \cdot H(t_1 + \Delta t, f_1 + \Delta f)] \quad (5)$$

überführen, die nur noch abhängig ist von der Zeitdifferenz Δt und der Frequenzdifferenz Δf . D.h., dass im Folgenden ein WSSUS-Kanal vorausgesetzt wird [6].

Über die zweidimensionale Fourier-Transformation der Autokorrelationsfunktion $R_{HH}(\Delta t, \Delta f)$ erhält man die sog. Streufunktion $S(f_D, \tau)$, die von der Dopplereffekte f_D und der Verzögerungszeit τ abhängt. Diese wird in dem hier vorgestellten Kanalmodell für die Generierung der zeitvarianten frequenzselektiven Übertragungsfunktion $H(t, f)$ genutzt. Hierzu wird ein komplexes weißes gaußsches Rauschen (KWGR) mit der Streufunktion $S(f_D, \tau)$ spektral geformt. Mit der Annahme der Separierbarkeit [7], [8] der Streufunktion

$$S(f_D, \tau) = P_D(f_D) \cdot PDP(\tau). \quad (6)$$

kann diese wiederum mit Hilfe des Dopplerleistungsdichtespektrums $P_D(f_D)$ und des Verzögerungsleistungsdichtespektrums (engl.: Power Delay Profile) $PDP(\tau)$ dargestellt werden. Dies hat zur Folge, dass zur spektralen Formung (Filterung) des KWGR zwei eindimensionale Filter anstatt eines zweidimensionalen Filters zum Einsatz kommen können.

Für das Power Delay Profile wird ein exponentieller Verlauf in Abhängigkeit der Verzögerungszeit τ und der Abklingzeitkonstante τ_{PDP} gemäß

$$PDP(\tau) = \exp\left[-\left(\tau/\tau_{PDP}\right)\right] \quad (7)$$

angenommen [9]. Mit einer Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle von $3 \cdot 10^8$ m/s legt diese in 1 ns einen Weg von 30 cm zurück. Setzt man Dimensionen im Bereich von einigen Metern voraus, klingen die reflektierten Echos typischerweise in einem Zeitraum weit unter einer Mikrosekunde ab. Gemäß

$$\left|P_F(\Delta f)\right| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} PDP(\tau) e^{j2\pi f \tau} d\tau \right| = \frac{\tau_{PDP}}{\sqrt{(2\pi \Delta f \cdot \tau_{PDP})^2 + 1}} \quad (8)$$

lässt sich die Frequenz-Korrelationsfunktion $P_f(\Delta f)$ aus dem Power Delay Profile berechnen. Die 3dB-Bandbreite der Frequenz-Korrelationsfunktion kennzeichnet die Korrelationsbandbreite B_c des Funkkanals, die über

$$B_c = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot \tau_{PDP}} \quad (9)$$

mit der Abklingzeitkonstanten τ_{PDP} zusammenhängt. Sowohl B_c als auch τ_{PDP} sind über entsprechende Hochfrequenzmessungen relativ leicht zu bestimmende Parameter. Alternativ können diese der Literatur entnommen oder für das entsprechende Applikationsszenario abgeschätzt werden.

Das Dopplerleistungsdichtespektrum $P_D(f_D)$ kann näherungsweise nach Jakes [10] gemäß

$$P_D(f_D) = \frac{k_D}{\pi f_{D\max} \sqrt{1 - \left(\frac{f_D}{f_{D\max}}\right)^2}} \quad (10)$$

dargestellt werden. Hierin kennzeichnet $f_{D\max}$ die maximal auftretende Dopplerverschiebung aufgrund einer Eigenbewegung oder von Bewegungen im Raum und f_D die jeweilige Dopplerkomponente. Die Proportionalitätskonstante k_D ist abhängig von der gewählten Antennen-Richtcharakteristik und der mittleren Leistung, der auf die Antenne treffenden Dopplerkomponenten. Aus Gl. (10) ergibt sich über die inverse Fourier-Transformation die Zeit-Korrelationsfunktion

$$P_T(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_D(f_D) e^{-j2\pi f_D \Delta t} d\Delta t \sim J_0(2\pi f_{D\max} \Delta t), \quad (11)$$

wobei J_0 die Besselfunktion erster Art nullter Ordnung kennzeichnet. Die 3dB-Bandbreite der Zeit-Korrelationsfunktion T_c kennzeichnet die Kohärenzzeit des Funkkanals und ist näherungsweise über

$$T_c \approx \frac{1}{2 \cdot f_{D\max}} \quad (12)$$

mit der maximal auftretenden Dopplerfrequenz verknüpft. Die Kohärenzzeiten und Dopplerfrequenzen können wiederum aus Messungen gewonnen werden oder mit Hilfe von Überschlagsrechnungen bestimmt werden.

Neben kleinskaligen Effekten (schneller Schwund) sollen im Modell auch langsame Änderungen (langsamer Schwund) im Funkkanal durch z.B. Abschattungseffekte berücksichtigt werden. Diese werden typischerweise durch eine Zufallsvariable mit einer Lognormal-Verteilung beschrieben [11]. Wenn der langsame Schwund im logarithmischen Maßstab betrachtet wird, kann dieser über eine mittelwertfreie normalverteilte Zufallsvariable mit der Standardabweichung σ_L modelliert werden. Der Wert von σ_L hängt von der Abschattungstiefe

der Umgebung ab. Bei Messungen in unterschiedlichen Fabrikhallen ergab sich hierfür ein Wert von beispielsweise 7,1 dB [12].

3 Gesamtmodell

Zur Simulation eines kompletten drahtlosen Sensor/Aktor-Netzwerkes wird dem Kanalmodell ein Modell für den Kanalzugriff (engl.: Medium Access Control, MAC) überlagert (Bild 4). Für die Fertigungsautomatisierung bieten sich für den Medienzugriff klassische F/TDMA-Verfahren an. Unterschiedliche Protokollvarianten werden über entsprechende Zeit- und Frequenztabellen definiert.

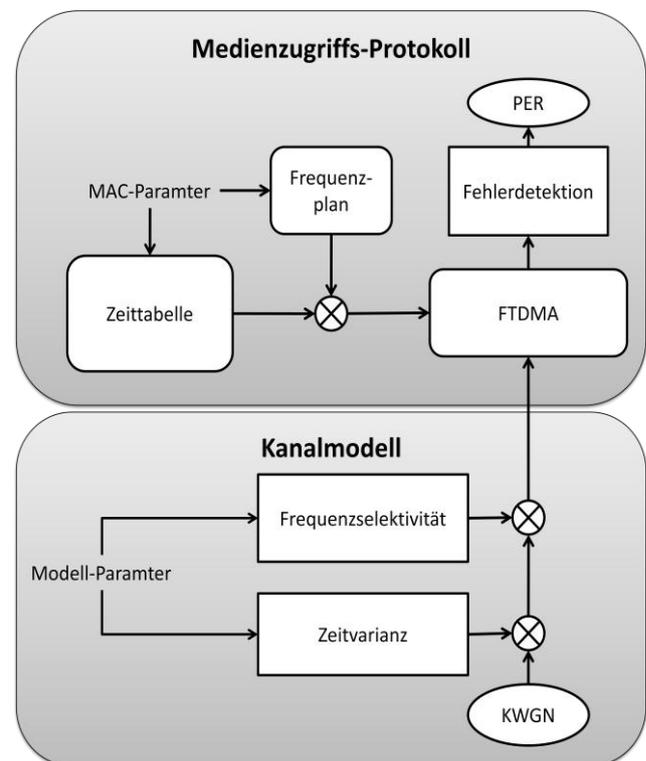


Bild 4 Schema des Simulationsmodells, bestehend aus dem Kanalmodell und dem Medienzugriffs-Protokoll.

In diesen Tabellen werden beispielsweise die Rahmenlängen im Down- und Uplink, die Kanalnummern und Zeitschlitze sowie Hopping-Sequenzen festgelegt. Zudem ist es möglich, bestimmte Kanäle auszublenden (Black-listing).

Ist das MAC-Protokoll vollständig in der Simulationsumgebung abgebildet, kann jedem Paket ein Dämpfungswert zugeordnet werden. In Bild 5 wurden die einzelnen Pakete, die in vier Frequenzspuren übertragen werden, dem simulierten Funkkanal überlagert (dunkel markierte Punkte). Im Fertigungsumfeld werden häufig drei WLAN-Systeme parallel auf den Kanälen 1, 7 und 13 betrieben. In dem im Bild 5 dargestellten Szenario werden, um Inter-

ferenzen der WLAN-Systeme mit dem drahtlosen Sensor/Aktor-Netzwerk zu vermeiden, die Lücken zwischen den WLAN-Bändern genutzt.

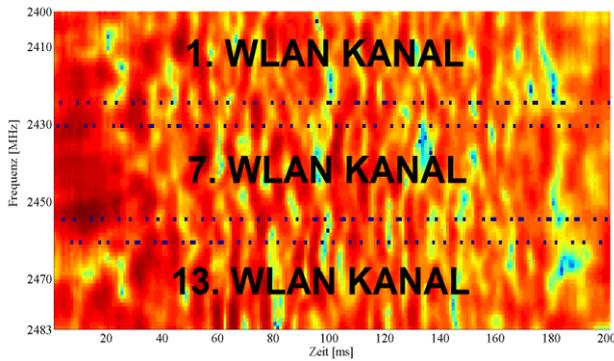


Bild 5 Überlagerung der Kommunikationspakete eines Sensor/Aktor-Knotens mit dem zeitvarianten frequenzselektiven Funkkanal. Mit über die Zeit (horizontale Achse) zu- und wieder abnehmender Kohärenzzeit.

Die Ermittlung der Paketfehlerrate wird im Folgenden anhand zweier MAC-Protokolle beispielhaft erläutert. Es wird von einer Sterntopologie ausgegangen.

Bei dem ersten Protokoll handelt es sich um eine einfache Anwendung des F/TDMA – Verfahrens. Jedem Sensor/Aktor-Knoten wird jeweils ein Zeitschlitz bei fester Frequenz zugeteilt (Bild 6). Das zweite MAC-Protokoll wurde um einen Frequenzwechsel-Algorithmus erweitert. Die notwendige Zeit zur Übertragung der Up- und Downlink-Pakete (Superframe) beträgt für 16 Sensor/Aktor-Knoten bei der ersten Protokollvariante 4,2 ms, bei der zweiten Protokollvariante inklusive Frequenzwechsel 4,4 ms.

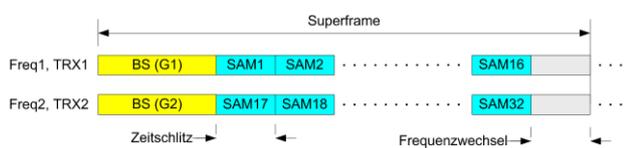


Bild 6 Schematische Abbildung des Protokolls mit Frequenz-Wechsel.

Bei einer fehlerhaften Paketübertragung wird das Paket im folgenden Superframe wiederholt (Mehrfachfehler). Zur Bestimmung der Paketfehlerrate (engl.: Packet Error Rate, PER) wird die einem Kommunikationspaket zugeordnete Dämpfung bewertet. Ist diese größer als eine vorgegebene Schranke, liegt ein Paketfehler vor und das Paket wird verworfen. Diese Schranke wurde den handelsüblichen Schmalband-Transceivern angepasst. Als Alternative hierzu stehen unterschiedliche Soft-Decision-Algorithmen zur Beurteilung von Paketfehlern zur Verfügung. Des weiteren wurde der einfachen ungestörten Übertragung Bluetooth- und WLAN-Störer überlagert, wobei beim WLAN-Störer davon ausgegangen wurde, dass dieser seine Arbeitsfrequenz bei 2,442 GHz nicht wechselt. Bei dem gewählten Frequenzwechsel-Algorithmus wird über das gesamte Band gesprungen, so dass es mitunter zu Über-

lagerungen mit den störenden WLAN- bzw. Bluetooth-Sendern kommt. Die gesamte Simulationsdauer betrug 600 Sekunden. Während dieser Zeit wurden 238000 Frames übertragen. Die durchschnittlichen Paketfehlerraten unterscheiden sich bei beiden Protokollvarianten (Vergleich der Bilder 7 und 8) im ungestörten Fall nicht signifikant, was zunächst deutet, dass der Einsatz des Frequenzwechsel-Verfahrens in unserm Beispiel keine Verbesserung bringt (ohne Frequenz-Wechsel $6,77 \cdot 10^{-4}$, mit Frequenz-Wechsel $6,89 \cdot 10^{-4}$). Jedoch ist eine Reduzierung der Anzahl notwendiger Wiederholungen für eine erfolgreiche Datenübertragung mit Frequenzwechsel festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Falle eines Übertragungsfehlers durch den Frequenzwechsel die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass der nächste Zeitschlitz ebenfalls einer hohen Dämpfung ausgesetzt ist. D.h. im Idealfall ist der Hopping-Algorithmus der Kohärenzzeit des Funkkanals anzupassen. Im Ergebnis führt das dazu, dass mittels eines Frequenzwechselverfahrens ein Paket innerhalb kürzerer Zeit erfolgreich übertragen werden kann. Beim zweiten Protokoll kann die PER bei Störung durch WLAN durch den Einsatz von Blacklisting reduziert werden.

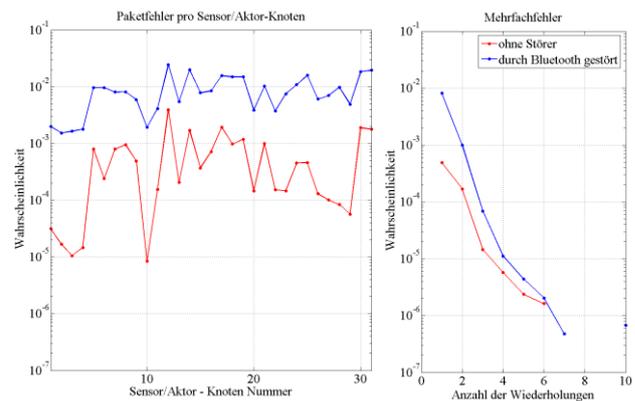


Bild 7 Ausgewertete Paketfehlerrate des einfachen F/TDMA-Protokolls ohne Frequenz-Wechsel. PER ohne Störung (rot) und mit Störung durch Bluetooth (blau).

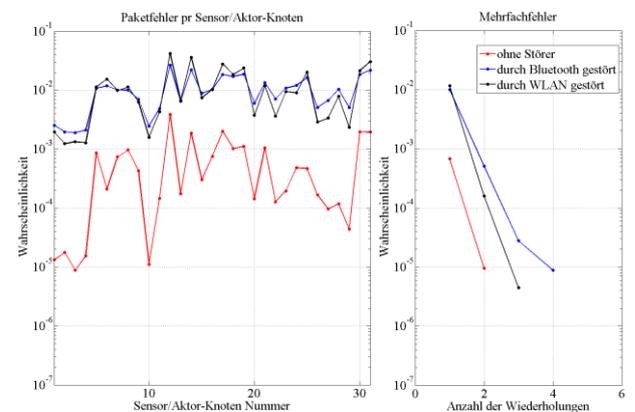


Bild 8 Ausgewertete Paketfehlerrate des zweiten F/TDMA – Protokolls mit Frequenz-Wechsel. PER ohne Störung (rot), mit Störung durch Bluetooth (blau) und mit Störung durch WLAN (schwarz).

Ein konkurrierendes Bluetooth- bzw. WLAN-System erhöht die Paketfehlerraten um ca. 1 – 2 Größenordnungen.

4 Zusammenfassung

Für die Auslegung von drahtlosen Sensor/Aktor-Funkssystemen für die Fertigungsautomatisierung wurden unterschiedliche Medienzugriffsverfahren untersucht und an zwei einfachen Beispielen dargelegt. Für diese Betrachtungen wurde ein statistisches Kanalmodell entwickelt, welches den Funkkanal einer Fertigungszelle hinsichtlich dessen Zeitvarianz und Frequenzselektivität gut nachbildet. Das Kanalmodell basiert auf den typischen geometrischen Gegebenheiten einer Fertigungszelle. Aus dem geometrischen Abstand der Sensor/Aktor-Knoten wird die mittlere Pfaddämpfung errechnet. Sowohl der langsame als auch der schnelle Schwund werden über einen stochastischen Prozess modelliert. Die Modellparameter wurden soweit möglich mit Hilfe von Messungen, die in industriellen Fertigungsanlagen durchgeführt wurden, ermittelt. Wo dies nicht möglich war wurden die Modellparameter aus der Literatur entnommen bzw. mit Hilfe von Plausibilitätsüberlegungen abgeleitet.

5 Danksagung

Die Autoren möchten sich für die Unterstützung bei Ihren Studenten, Herrn Miekley und Frau Harmening herzlich bedanken. Ebenfalls bedanken möchten sich die Autoren auch bei der FESTO AG, insbesondere bei Herrn Kärcher, für die immerwährende gute Unterstützung.

6 Literatur

- [1] Festo AG, *Homepage(www.festo.de)*
- [2] Körber, H. J.; Wattar, H; Scholl, G.: Modular Wireless Real-Time Sensor/Actuator Network for Factory Automation Applications. *IEEE Transactions on industrial informatics*, Vol. 3, No. 2, 2007, S.111-119
- [3] Sheikh, A.U.H.: *Wireless Communications: Theory and Techniques*. Norwell: Kluwer, 2004
- [4] David, K.; Benkner, T.: *Digitale Mobilfunksysteme*. Stuttgart: Teubner, 1996
- [5] Hashemi, H.: The indoor radio propagation channel. *IEEE Proceeding of IEEE*, Vol. 81, No. 7, 1993, S. 943-968
- [6] Bello, P. A.: Characterization of randomly time-variant linear channels. *IEEE Trans. Comm. Syst.*, Bd. CS-11, Nr. 4, S. 360- 393, 1963
- [7] Tranter, W.H.; Shanmugan, K.S.; Rappaport, T.S.; Kosbar, K.L.: *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 2004
- [8] Fleury, B.: Modelling the time fluctuations of the indoor channel. *Digital mobile radio towards future generation systems - COST 231 Final Report*, European Communities, 1999
- [9] Molisch, A.F.: *Wireless Communications*. John Wiley & Sons Ltd, 2005
- [10] Jakes, W.C.: *Microwave Mobile Communications*. J.Wiley, 1974
- [11] Seidel, S.Y.; Rappaport, T.S.: 914MHz path loss prediction models for indoor wireless communication in multifloored buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 2, 1992, S. 207–217
- [12] Rappaport, T.S.; McGillem, C.D.: UHF fading in factories. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, Vol. 7, No. 1, 1989, S. 40-48