

# Entwurf und Auslegung eines Funksystems für dichte Netzwerke in der Fabrikautomatisierung

Armin Wulf<sup>1</sup>, Wolfgang Endemann<sup>1</sup> und Rüdiger Kays<sup>1</sup>

**Abstract:** In der Industrieautomatisierung gibt es eine beständige Entwicklung hin zu drahtlosen Kommunikationssystemen. Flächendeckende Funkversorgung, hohe Zuverlässigkeit und geringe Verzögerungszeiten sind die wichtigsten Eigenschaften von Kommunikationstechnologien für die Fabrikautomatisierung. Mit steigender Anzahl von vernetzten Maschinenteilen und Werkstücken steigt die Teilnehmerdichte der Automatisierungsnetzwerke stark an und wird eine entscheidende Größe für den Einsatz drahtloser Technologien. In diesem Paper wird ein Mehrzellsystem mit örtlicher Frequenzwiederverwendung vorgestellt und für die Fabrikautomatisierung ausgelegt. Dabei wird die systeminhärente Interferenz unter Annahme verschiedener Kanalmodelle analysiert. Die Auswertung zeigt, dass der verwendete Empfängertyp Einfluss auf den Netzwerkentwurf hat.

**Keywords:** dense networks, industrial communication, inter-channel interference, network design, wireless sensor networks

## 1 Einleitung

Die drahtlose Kommunikation in der Industrieautomatisierung bietet viele Vorteile gegenüber kabelgebundenen Alternativen. Gesteigerte Flexibilität, die Kommunikation mit mobilen Komponenten, Nachrüstbarkeit oder Verschleißarmut sind wichtige Eigenschaften, die im Zusammenhang mit dem Übergang zu Industrie 4.0 gefordert werden. Gleichzeitig müssen die drahtlosen Technologien den strengen Anforderungen der Fabrikautomatisierung entsprechen. Gefordert werden Verzögerungszeiten von weniger als 1 ms und Paketfehlerwahrscheinlichkeiten von höchstens  $10^{-9}$  [ZE08]. Aufgrund der Ausbreitungsbedingungen in industriellen Umgebungen stellen diese Anforderungen eine große Herausforderung für derzeit verfügbare drahtlose Technologien dar, wenn eine flächendeckende Versorgung von Produktionsbereichen erreicht werden soll. In [RSK13] konnte gezeigt werden, dass intelligente Frequenzsprung-Verfahren hierbei eine gute Performance aufweisen. Industrieautomatisierungsnetzwerke haben hohe Dichten von Funkknoten, die mit zunehmender Vernetzung von Werkstücken für Tests oder zur Koordination von Produktionsschritten weiter ansteigen. Zur Optimierung der Abdeckung empfiehlt sich eine kleinzellige Netzwerktopologie mit verteilten Access Points (APs), wobei die verfügbaren Frequenzressourcen örtlich möglichst dicht wiederverwendet werden sollen. Da diese Wiederverwendung Störungen durch Interferenz auf den gleichen bzw. benachbarten

---

<sup>1</sup> Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Kommunikationstechnik, Otto-Hahn-Str. 4, 44227 Dortmund, {armin.wulf | wolfgang.endemann | ruediger.kays}@tu-dortmund.de

Kanälen verursacht, muss der Gewinn durch die Wiederverwendung höher sein, als die Einbußen durch Interferenz. Dieser Gewinn kann durch Sendeleistungsregelung und durch auf die Umgebung angepasste Platzierung von APs optimiert werden. In diesem Paper wird von einer Platzierung in quadratischen oder hexagonalen Clustern ausgegangen. Damit ist eine Vielzahl von praktisch relevanten Fällen darstellbar. Insbesondere die Anordnung der Access Points in einem quadratischen Raster stellt für typische Fabriktopologien mit Fertigungszellen eine einfach umsetzbare Lösung dar.

## 2 Netzwerkkarchitektur

Um eine vollständige Abdeckung zu erreichen, wird im Fabrikbereich eine Anzahl  $N_{r_{AP}}$  von APs positioniert, die über ein kabelgebundenes Backbone miteinander vernetzt sind. Datenaustausch und Koordination der APs erfolgen über dieses Backbone. Die Netzwerkkarchitektur ist in Abb. 1 dargestellt. Während die APs fest installiert sind, können die Stationen (STAs) entweder ortsfest oder frei beweglich sein. STAs können Sensoren, Aktoren oder Prozessormodule in Produkten bzw. Werkstücken sein, mit denen über das Automatisierungsnetzwerk kommuniziert werden soll. Für die physikalische Schicht des Funksystems werden nachfolgend Parameter in Anlehnung an BLE (Bluetooth Low Energy) [BT14] und WSAN (Wireless Sensor and Actor Network) [WS12] übernommen. Die Übertragung erfolgt mittels GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) Modulation mit einer Datenrate  $R = 1 \text{ Mbit/s}$ , einem Bandbreiten-Zeit-Produkt  $BT = 0,5$  und einem Modulationsindex  $\eta = 0,5$ . BLE und WSAN verwenden Frequenzsprungverfahren (frequency hopping spread spectrum, FHSS) im 2,4 GHz ISM-Band (industrial, scientific, medical band). Die Systeme nutzen

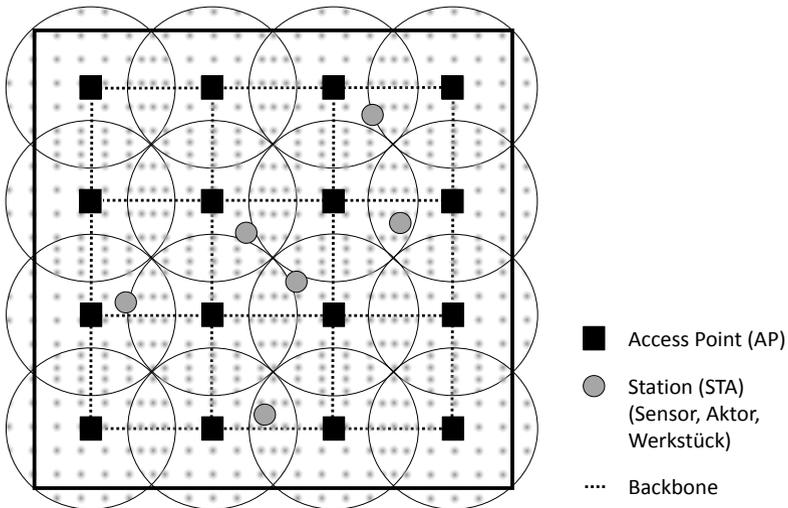


Abb. 1: Netzwerkkarchitektur mit quadratischer Clusterung

unterschiedliche Kanalraster, jedoch wird bei beiden ein Kanalabstand von 2 MHz zwischen den Mittenfrequenzen der zur Übertragung verwendeten Kanäle eingehalten [BT14, WS12]. Um eine geringe Verzögerung bei der Übertragung sicherzustellen, wird – wie in der Fabrikautomatisierung üblich – ein deterministisches Kanalzugriffsverfahren verwendet, sodass durch den Medienzugriff keine zufälligen Verzögerungen verursacht werden. Zudem wird jeder STA ein eigener Uplink- und Downlinkkanal zugesichert. Als Konsequenz müssen die APs jeweils gleichzeitig auf allen Kanälen senden bzw. empfangen können, die einer Zelle zugewiesen sind. Für APs und STAs werden isotrope Antennen angenommen. Somit wird, anders als in zellularen Mobilfunknetzen, keine Sektorisierung vorgenommen. Generell entstehen durch das Clustering Netzwerkarchitekturen, die Parallelen zur klassischen Mobilfunkplanung aufweisen [ST06]. Jedoch gibt es, bedingt durch die anwendungsbezogenen Anforderungen in der Industrieautomatisierung und die daraus resultierenden, wesentlich geringeren Zellgrößen, große Unterschiede für die Auslegung. Bei umgebungsspezifischer Betrachtung der Funkausbreitung werden diese Unterschiede besonders im Hinblick auf die Interferenz zwischen Zellen mit gleicher Frequenz deutlich, und es ergeben sich, bedingt durch die Kanaleigenschaften in industrieller Umgebung [MO05], kritische Interferenzsituationen zwischen APs und STAs.

Als Frequenzband empfiehlt sich das 5 GHz ISM-Band von 5725 - 5875 MHz. Mit 150 MHz steht dort eine große zusammenhängende Bandbreite zur Verfügung, die für Frequenzsprungverfahren genutzt werden kann. Die maximale Sendeleistung von 14 dBm EIRP ist zwar kleiner als die im 2,4 GHz ISM Band maximal mögliche, jedoch müssen hier keine Koexistenzmechanismen berücksichtigt werden. Lediglich eine maximale Verweildauer von 1 s auf einer gewählten Frequenz muss eingehalten werden [ET10]. Das 5 GHz ISM Band wird im industriellen Umfeld bisher relativ schwach genutzt. Daher muss nicht mit anderen Funksystemen, beispielsweise WLAN, um die Funkressourcen konkurriert werden. Im 2,4 GHz ISM Band wäre dieses hingegen praktisch unumgänglich. Ergänzungen wie das in WSA vorgesehene Blacklisting von ZigBee- und WLAN-Kanälen sind Schutzmechanismen, die durch die gemeinsame Nutzung des Bandes nötig werden, und deren Existenz die entstehenden Beschränkungen aufzeigt [WS12, ZE08]. Tab. 1 gibt einen Überblick über die in diesem Paper verwendeten Systemparameter.

Parameter	Wert
Modulationsverfahren	GFSK
Systembandbreite $B$	150 MHz
Gaußfilter $B_{3dB}T$	0,5
Modulationsindex $\eta$	0,5
Kanalabstand $\Delta f$	2 MHz
Sendeleistung $P_S$	-20 ... 10 dBm
Brutto-Datenrate $R$	1 Mbit/s

Tab. 1: Wichtige Systemparameter

### 3 Funkabdeckung mit verteilten Access Points

Ziel eines Funksystems in der Fabrikautomatisierung der Zukunft ist die Maximierung der Teilnehmerdichte unter der Bedingung, dass strikte Anforderungen an Datenrate, Paketfehlerwahrscheinlichkeit und Verzögerungszeit eingehalten werden. Ausgehend von einem festen Kommunikationszyklus und einem exklusiven Kanal für jede STA lässt sich die maximale Anzahl nutzbarer STAs  $Nr_{STA}$  im Netzwerk mit (1) aus der Anzahl der APs  $Nr_{AP}$ , der verfügbaren Bandbreite  $B$  und dem Kanalabstand  $\Delta f$  berechnen.

$$Nr_{STA} = \frac{B}{\Delta f} \cdot \frac{1}{K} \cdot Nr_{AP} \quad (1)$$

Der Wiederverwendungsfaktor  $K$  entspricht der Anzahl an benachbarten APs, die nicht dieselbe Frequenz verwenden dürfen. In zellularen Mobilfunknetzen ist  $K$  üblicherweise 3 oder 7 [GK10].

In der Fertigungstechnik ist ein Produktionsbereich meist in einzelne Fertigungszellen unterteilt, die Sensor- und Aktor-STAs enthalten. Ein Großteil der Kommunikation dieser STAs läuft innerhalb dieser Fertigungszelle ab. Aus dieser Fertigungstopologie ergibt sich auch die Aufteilung der APs für das Automatisierungsnetzwerk. Während ein quadratisches Cluster heute verbreiteten Fertigungszellen von z.B. 10 m x 10 m entspricht, ist ein hexagonales Raster im funktechnischen Sinne mit dem Ziel einer flächendeckenden Versorgung die günstigste Lösung, die man auch in Mobilfunknetzen anstrebt. Im Folgenden werden daher beide Clusterformen untersucht. Für das in Abb. 1 gegebene Beispiel einer AP-Verteilung mit quadratischen Clustern lässt sich die Anzahl  $Nr_{AP}$  der APs und damit die Anzahl  $Nr_{STA}$  der Teilnehmer pro Fläche  $A$  direkt aus dem Abstand  $d_{AP}$  der APs bestimmen.

$$Nr_{AP} = \frac{A}{d_{AP}^2} \quad (2)$$

Um die Anforderungen an die Paketfehlerwahrscheinlichkeit zu erfüllen, muss bei geeignetem Zellabstand eine Frequenzzuweisung durchgeführt werden, die hohe Fehlerraten durch Interferenz mit benachbarten APs vermeidet.

### 4 Interferenzbetrachtung bei Frequenzwiederverwendung

Der Wiederverwendungsfaktor  $K$ , der entscheidend für die Kapazität des Netzwerks ist, wird maßgeblich durch Interferenz mit benachbarten Zellen beschränkt. Um  $K$  zu bestimmen, wird zunächst angenommen, dass STAs bis zu einem maximalen Abstand  $r$  von einem AP mit diesem verbunden sein können. Daraus ergibt sich im schlechtesten Fall die in Abb. 2 dargestellte Interferenzsituation. Wenn die Sendezyklen im Netzwerk

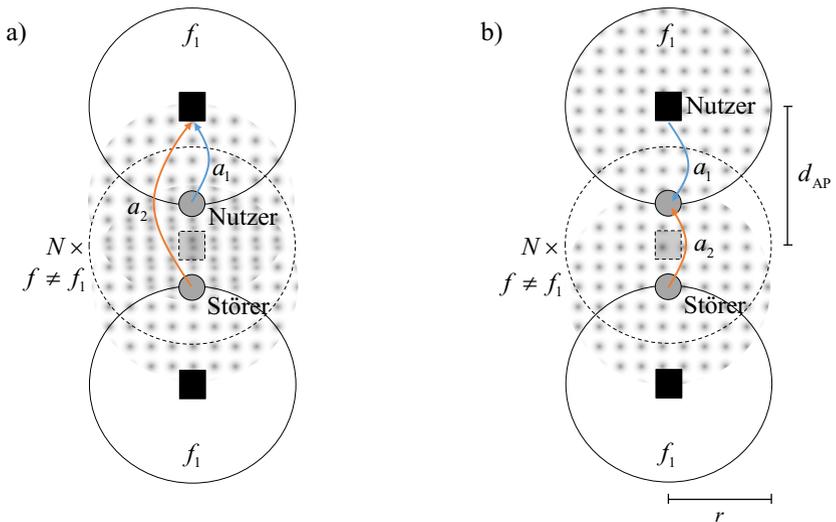


Abb. 2: Ungünstigste Interferenzsituation a) synchronisierter Sendezyklus, b) ohne Synchronisierung

synchronisiert sind, können entweder nur die APs oder nur die STAs senden. Dabei erhält man den in Abb. 2 a) aufgezeigten Fall für den Empfang an einem AP und äquivalent für den Empfang an einer STA. Besteht diese Synchronisation nicht, ergibt sich für den Empfang an einer STA die in Abb. 2 b) dargestellte Situation.

Bei LOS (Line Of Sight) Szenarien zwischen APs und STAs lässt sich die Funkfelddämpfung  $a$  durch die Freiraumausbreitung annähern. Diese ergibt sich nach (3) abhängig von Trägerfrequenz  $f$  und Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger. Dabei wird angenommen, dass kein Antennengewinn erzielt wird.

$$\frac{a}{\text{dB}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{f}{\text{Ghz}}\right) + 20 \cdot \lg\left(\frac{d}{\text{m}}\right) + 32,44 \quad (3)$$

Im Standard Bluetooth LE gelten Anforderungen an die minimale Empfindlichkeit der Receiver sowie die Auswirkungen darauf durch Interferenz auf dem gleichen oder auf benachbarten Kanälen. Die Empfindlichkeit der Empfänger muss abhängig von der verwendeten Paketlänge mindestens -70 dBm betragen bei einer Bitfehlerwahrscheinlichkeit von höchstens 10 %. Bei Interferenz auf dem gleichen Kanal darf bis zu einem Verhältnis von Signal- zu Interferenzleistung (signal to interference ratio, SIR) von 21 dB diese Empfindlichkeit um nicht mehr als 3 dB schlechter werden. Bei benachbarten Kanälen in 2 MHz Abstand darf der SIR-Wert bei -17 dB liegen [BT14]. Wählt man  $r$  so, dass eine vollständige Abdeckung entsteht, die Bereiche der APs sich

aber minimal überlappen, berechnet sich  $r$  für eine quadratische Clusterung als

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot d_{AP} \tag{4}$$

Für eine hexagonale Anordnung der APs kann  $r$  bei vollständiger Abdeckung kleiner gewählt werden. Der maximale Abstand  $r$  berechnet sich dann wie in (5) gegeben.

$$r = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot d_{AP} \tag{5}$$

Im Fall eines synchronisierten Sendezyklus ergibt sich der SIR im schlechtesten Fall der Funkfelddämpfung gemäß (3) zu (6).

$$\frac{SIR}{dB} = a_1 - a_2 = 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{N \cdot d_{AP} - r}\right) \tag{6}$$

Bei asynchronem Sendezyklus ergibt sich der SIR im schlechtesten Fall zu

$$\frac{SIR}{dB} = a_1 - a_2 = 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{N \cdot d_{AP} - 2r}\right) \tag{7}$$

Wertet man die Fälle mit und ohne synchronisierten Sendezyklus für die jeweils kritische Interferenzsituation für quadratische und hexagonale Clusterung aus, ergibt sich  $N$  wie in Tab. 2 angegeben, wobei  $(N + 1) \cdot d_{AP}$  der Abstand zwischen zwei APs mit der gleichen Frequenz ist. Die berechneten Abstände  $N$  sind nicht vom Abstand  $d_{AP}$  der APs abhängig, jedoch wird die Zellgröße durch die maximal zulässige Sendeleistung limitiert.

Kanal	Zulässiger SIR	Sync.	Clusterung	
			Quadratisch	Hexagonal
Gleicher Kanal	21	Ja	N = 8	N = 7
		Nein	N = 9	N = 7
	10	Ja	N = 2	N = 2
		Nein	N = 3	N = 2
	6	Ja	N = 2	N = 1
		Nein	N = 2	N = 2
Nachbarkanal	-17	Ja	N = 0	N = 0
		Nein	N = 0	N = 0

Tab. 2: Abstände von APs mit gleicher Frequenz, abhängig vom zulässigem SIR und der Art der Clusterung

## 5 Einfluss von Interferenz auf die Receiverempfindlichkeit

Zur genaueren Betrachtung der Empfindlichkeit von FSK-Empfängern bezüglich Interferenz wurden zwei verschiedenartige inkohärente 2FSK-Empfängertypen untersucht. In Abb. 3 ist ein Blockschaltbild des äquivalenten Basisbands des Korrelationsempfängers dargestellt. Das komplexe Eingangssignal  $s(t)$  wird zunächst mit den komplex konjugierten Symbolformen  $s_1^*(t)$  bzw.  $s_2^*(t)$  korreliert. Anschließend wird der Absolutbetrag der Korrelationen bestimmt, bevor durch Finden des Maximums der Bitwert entschieden wird. Beim Limiter-Diskriminator Empfänger (vgl. Abb. 5) erfolgt eine Amplitudenbegrenzung des komplexen Eingangssignals  $s(t)$ , dessen Phasenänderung anschließend durch den Diskriminator bestimmt wird. Der anschließende I&D-Block (integrate-and-dump) dient zur Rauschmittelung. Der Bitwert bestimmt sich direkt aus dem Vorzeichen der Phasenänderung. Beide Receiver Typen können GFSK Signale ohne Phasensynchronisation demodulieren und sind damit gut geeignet für FHSS-Verfahren. Die Eigenschaften dieser Empfänger wurden mit zwei verschiedenen Interferenz-Modellen bei einer Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 1 % ausgewertet. Beim SINR-Modell wird die Interferenz als weißes gaußverteiltes Rauschen modelliert, während beim Selbst-Interferenz-Modell ein weiteres GFSK Signal mit den gleichen Modulationsparametern überlagert wird. Abb. 4 zeigt die Verschlechterung  $\gamma$  der Receiverempfindlichkeit für beide Empfänger im SIR-Bereich von 0 – 20 dB. Während das SINR-Modell für beide Empfängertypen einen linearen Anstieg von  $\gamma$  für niedrige SIR zeigt, ergibt sich beim Selbst-Interferenz-Modell eine vertikale Asymptote bei  $\text{SIR} = 0$  dB, wenn empfangenes Nutzsignal und interferierendes Signal die gleiche Leistung haben. Vergleicht man beide Modelle, zeigt sich, dass das SINR-Modell für große SIR die Verschlechterung  $\gamma$  der Receiverempfindlichkeit zu hoch abschätzt. Für niedrige SIR erweist sich das einfache SINR-Modell als ungeeignet. Wie in Abb. 4 dargestellt, zeigt sich unabhängig vom Empfängertyp, dass der im BLE Standard zulässige SIR für Interferenz auf dem gleichen Kanal mit 21 dB sehr vorsichtig gewählt ist. Ausgehend vom realistischeren Selbst-Interferenz-Modell mit Limiter-

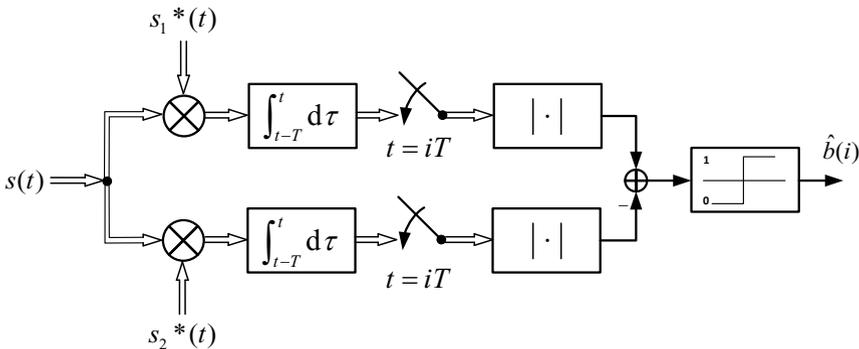


Abb. 3: Blockschaltbild des Basisbandäquivalents des Korrelationsempfängers im inkohärenten Betrieb

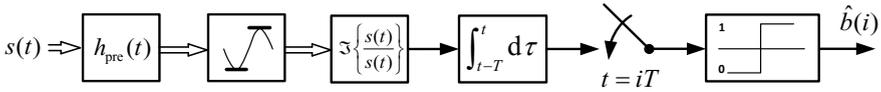


Abb. 5: Basisband-Blockschaltbild des Limiter-Diskriminator Empfängers

Diskriminator Empfänger wird die vorgegebene Verschlechterung der Empfindlichkeit um 3 dB noch bei einem SIR = 10 dB eingehalten.

Aktuelle BLE Chips haben eine Empfänger-Empfindlichkeit, die deutlich besser als die im Standard vorgegebene Mindestempfindlichkeit von -70 dBm ist. Derzeit verfügbare BLE Transceiver Chips sind beispielsweise mit Empfindlichkeiten von bis zu -97 dBm für eine Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 0,1 % spezifiziert [TI15, DS15]. Dieses zusätzliche Linkbudget kann genutzt werden, um höhere Interferenzleistungen zuzulassen. Dies zeigt auch die in [TI15] angegebene zulässige Interferenz auf dem gleichen Kanal von 6 dB SIR bei einer Verschlechterung der Empfängerempfindlichkeit  $\gamma$  von weniger als 30 dB. Eine Reduktion des Linkbudgets durch Interferenz beschränkt natürlich die Reichweite der einzelnen APs, in der eine Abdeckung mit der vorgegebenen Fehlerrate eingehalten werden kann. Ein verbleibendes Linkbudget von 77 dB limitiert den Abstand der AP bei Annahme von Freiraumausbreitung mit einer

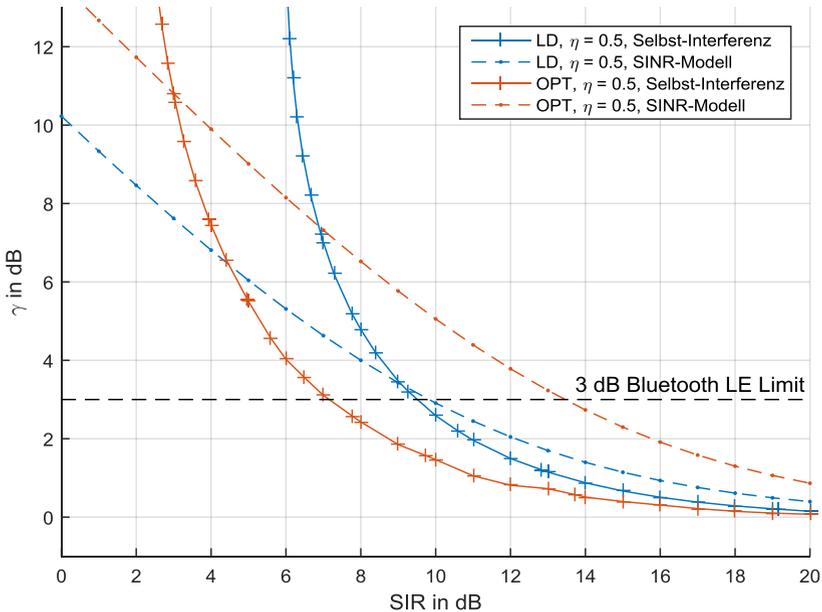


Abb. 4: Performanceeinbuße als Funktion des SIR für verschiedene GFSK Empfänger bei BER = 1 %

maximalen Sendeleistung von 10 dBm und einer Zielbitfehlerwahrscheinlichkeit von  $10^{-8}$  und Verwendung des Limiter-Diskriminator Empfängers auf ca. 30 m bei quadratischer und auf ca. 40 m bei hexagonaler Clusterung.

## 6 Frequenzselektiver Kanal

Zur Berücksichtigung der Frequenzselektivität des Funkkanals in industriellen Umgebungen wird dem Pfadverlustmodell frequenzabhängiges Fast Fading überlagert. Das Fast Fading hat eine Kohärenzbandbreite, die groß gegenüber der Bandbreite einzelner Kanäle ist, sodass deren Übertragungsfunktion als frequenzunabhängig betrachtet werden können. Dem gegenüber ist das FHSS-System als Ganzes von der Frequenzselektivität betroffen. Abb. 6 zeigt die Verteilungsdichtefunktion des Übertragungsfaktors von 75 Kanälen mit 2 MHz Kanalabstand im 5 GHz ISM Band, die nach dem IEEE 802.15.4a Kanalmodell für industrielle LOS Umgebungen generiert wurden [MO05]. Als Referenz sind zusätzlich eine Rayleigh Verteilung mit einer mittleren Leistung von  $\sigma^2 = 1$  und eine gefittete Rice-Verteilung mit Rice-Faktor  $K = 0.22$  angegeben. Überlagert man die aus dem Fast Fading resultierende Verteilung der Übertragungsfaktoren der Einzelkanäle dem Pfadverlustmodell, das hier mit

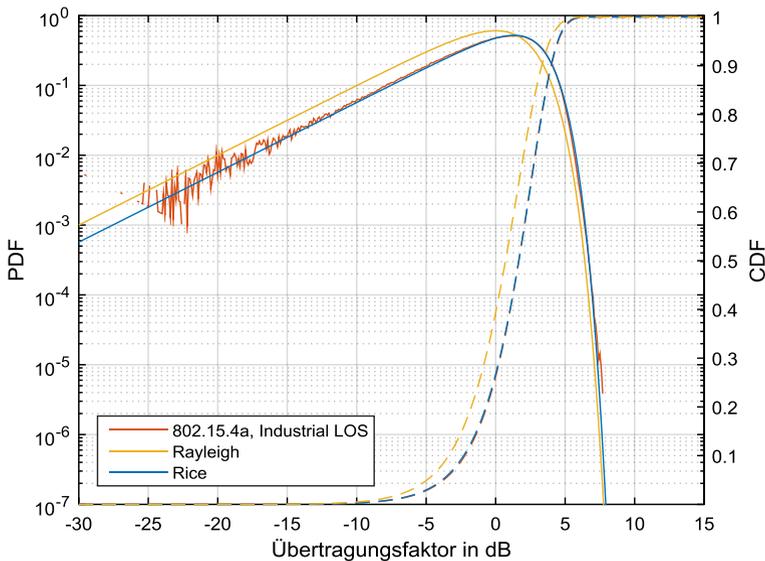


Abb. 6: Verteilungsdichtefunktion und Verteilungsfunktion des Übertragungsfaktors bei Rice, Rayleigh und 802.15a Kanalmodell

Freiraumausbreitung angenähert ist, gelten die in Tab. 2 angegebenen Zellabstände nur noch mit einer gewissen Auftrittswahrscheinlichkeit. Nur wenn der Kanal des Nutzsignals einen geringeren Pfadverlust durch das Fast Fading erleidet als die Kanäle der interferierenden Signale, ist eine Verbindung möglich. Die Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet sich dann nach (8), wobei  $V_n$  der Übertragungsfaktor des Nutzkanals ist und  $V_i$  der Übertragungsfaktor des Kanals des  $i$ ten Störers ist. Die Anzahl der Störer hängt von der Frequenzverteilung ab und ergibt sich bei Vernachlässigung der mehr als  $(N+1) \cdot d_{AP}$  entfernten APs für hexagonale Cluster üblicherweise zu 6 und für quadratische Cluster zu 4.  $\Delta\text{SIR}$  ist der zusätzliche Abstand vom zulässigen SIR, der benötigt wird um die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

$$P_{\text{err}} = 1 - \prod_i \Pr(V_n > V_i - \Delta\text{SIR}) \quad (8)$$

Ausgehend von einem zulässigen SIR von 6 dB und synchronisiertem Sendzyklus, ergibt sich bei Erhöhung von N um 1 für die quadratische Clusterung eine SIR-Reserve von  $\Delta\text{SIR} = 7,3$  dB und bei hexagonaler Clusterung ein  $\Delta\text{SIR} = 9,4$  dB. Nimmt man an, dass Fehler nur durch die Interferenz entstehen, während das Rauschen vernachlässigt werden kann, ergibt sich für die mittlere Paketfehlerwahrscheinlichkeit 11,1 % für quadratische und 6,5 % für hexagonale Cluster. Bei zufälliger Kanalwahl sind somit bis zu 10 Kanalwechsel und Paketwiederholungen erforderlich, um die Anforderungen an Funkssysteme in der Industrieautomatisierung zu erfüllen. Beim Kanalwechsel muss dabei der neue Kanal mindestens um die Kohärenzbandbreite vom alten entfernt sein, um statistische Unabhängigkeit zu erreichen. Gelingt es jedoch, durch intelligente Kanalwahl den Nutzkanal so zu wählen, dass dieser einen überdurchschnittlichen Übertragungsfaktor aufweist, ist unabhängig von der Clusterung eine SIR-Reserve von  $\Delta\text{SIR} = 7$  dB ausreichend, um die in der Fabrikautomatisierung erforderlichen Paketverlustraten zu erfüllen.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ausgehend davon, dass das Selektionsverhalten der FSK-Receiver unabhängig vom verwendeten Frequenzband (2,4 GHz bzw. 5 GHz) ist, zeigt Tab. 2, dass bei einem Kanalabstand von  $\Delta f = 2$  MHz keine Beeinträchtigung von Nachbarkanälen zu erwarten ist. Für Übertragungen auf dem gleichen Kanal hingegen sind nach den Anforderungen des BLE Standards sehr große Abstände zwischen APs mit gleicher Frequenz von bis zu neun APs erforderlich, um den vorgegebenen SIR von 21 dB einzuhalten. Eine Verwendung von Off-The-Shelf-Empfängern, die die Receiveranforderungen des BLE Standards nur knapp erfüllen, scheidet somit aus. Eine Untersuchung der Empfindlichkeitseinbußen von sehr einfachen GFSK Empfängern zeigt jedoch, dass Limiter-Diskriminator Empfänger und inkohärenter Optimum Empfänger die geforderte maximale Verschlechterung von 3 dB bis zu einem SIR von etwa 10 dB einhalten. Mit

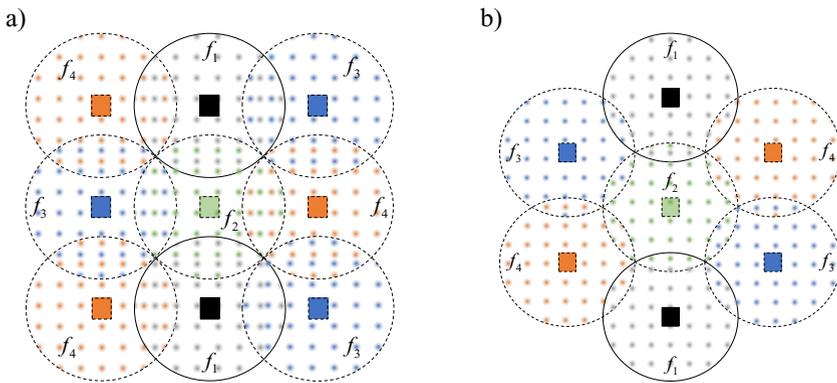


Abb. 7: Mögliche Frequenzverteilung für  $N = 1$  mit a) quadratischen Clustern, b) hexagonalen Clustern

hexagonaler Clusterung ist damit, unabhängig von der Synchronisierung der Sendezyklen, ein Abstand von zwei APs zwischen den Frequenzwiederverwendungen möglich. Für den Wiederverwendungsfaktor ergibt sich damit  $K = 9$ . Lässt man hingegen eine größere Einbuße der Empfängerempfindlichkeit zu, wie es mit aktuellen Transceiverchips möglich wäre, lassen sich mit synchronisiertem Sendezyklus und hexagonaler Clusterung Abstände von einem AP und somit ein  $K = 4$  erreichen. Dies ermöglicht große Netzwerkdichten, die durch die Abstände der APs nach wirtschaftlichen Aspekten unter den gegebenen Randbedingungen skalierbar sind. Abb. 7 zeigt beispielhaft die Frequenzverteilung für hexagonale und quadratische Cluster für  $N = 1$ . Für beide Cluster resultiert  $K = 4$ . Durch eine weitere Reduzierung des Abstands um  $2/\sqrt{3}$  lässt sich der Wiederverwendungsfaktor bei hexagonaler Clusterung auf  $K = 3$  reduzieren. Dadurch ergibt sich die bei Sendernetzen im Mobilfunk übliche Aufteilung.

Die vorrangegangenen Überlegungen sind für ein typisches Pfadverlustmodell mit quadratischem Abfall mit der Distanz durchgeführt worden. Dies übersteigert die Interferenz durch weit entfernte Störer, da diese in realen Umgebungen stärker als hier angenommen gedämpft würden. Dies lässt darauf schließen, dass die Auswirkungen bei hohen SIR-Grenzen zu groß abgeschätzt werden. Bei realitätsnäherer Betrachtung der Kanäle in industrieller Umgebung sind diese stark frequenzselektiv, sowie zeit- und ortsvariant [RSK13, MO05]. Das bedeutet, dass ein interferierendes Signal zufällig durch den Funkkanal begünstigt werden kann, während das Nutzsignal im ungünstigsten Fall bis zu 30 dB abgeschwächt werden kann. Durch intelligente Frequenzsprungverfahren können diese ungünstigen Kanäle gemieden werden, und bei Kenntnis des Übertragungskanal können durch intelligente Frequenzverteilung, selektiv die bevorzugten Kanäle ausgewählt werden, wodurch die Robustheit signifikant erhöht werden kann. In weiterführenden Arbeiten erfolgt eine Analyse mit genaueren

Kanalmodellen und unterschiedlichen Optimierungsverfahren für die Frequenzvergabe.

Die angestellten Untersuchungen zeigen, dass eine Frequenzmehrfachnutzung in dichten Industrieautomatisierungsnetzwerken mit aktuell verfügbarer Receiverhardware möglich ist. Für eine geeignete Zuverlässigkeit müssen jedoch sehr hohe SIR-Reserven und somit sehr geringe Wiederverwendungsfaktoren eingeplant werden. Eine statistische Untersuchung zeigt jedoch, dass bei intelligenter Frequenzwahl die Effizienz und mögliche Dichte des Netzwerks deutlich gesteigert werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [ZE08] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.: Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik, Frankfurt am Main, November 2008.
- [RSK13] Reinhold, R.; Schaefer, F.-M.; Kays, R.: Performance Evaluation of an Enhanced Frequency Hopping Transceiver in 5 GHz Band for Wireless Sensor Networks. In Proc. 10th Int. Symp. on Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), S. 1-5, Ilmenau, August 2013
- [WS12] PROFIBUS Project Group PG11: WSA Air Interface Specification, Version 1.0, PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Karlsruhe, Juni 2012
- [BT14] Bluetooth SIG: BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.2, Specification Volume 6: Core System Package [Low Energy Controller volume], Dezember 2014
- [ST06] Stallings, W.: Wireless Communications and Networks Second Edition. Pearson Prentice Hall, New York, 2006
- [MO05] A. F. Molisch et al.: IEEE 802.15.4a channel Model - Final report, Tech. Rep. Doc. IEEE 802.15-04-0662-02-004a, 2005.
- [ET10] ETSI EN 300 440-1 V1.6.1: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short range devices; Radio equipment to be used in the 1 GHz to 40 GHz frequency range; Part 1: Technical characteristics and test methods. August 2010
- [GK10] Ghaffar, R.; Knopp, R.: Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks. In Proc. 8th Int. Symp. on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), S. 273 – 277, Avignon, Juni 2010
- [TI15] Texas Instruments: CC2640 SimpleLink Bluetooth Smart Wireless MCU. CC2640 Bluetooth V. 4.1 Transceiver Datasheet, Februar 2015
- [DS15] Dialog Semiconductors: DA14580 Low Power Bluetooth Smart SoC. DA14580 Bluetooth V. 4.2 Transceiver Datasheet, January 2015