Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign

Hochschule Magdeburg • Stendal

University of applied Sciences

B A C H E L O R A R B E I T

Thema:

Simulation von Koexistenzszenarien für die Automation mit SEAMCAT an einem Anwendungsbeispiel

vorgelegt von:

Stefan Ruzicka

geb. am: **18.03.1992**

DA-Nr. : **20112017**

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (FH)

Erstprüfer: **Prof. Olaf Friedewald**

Zweitprüfer: **Dr. Lutz Rauchhaupt**

Magdeburg, den 27.02.2015

I. Aufgabenstellung

Im Auftrag von Herstellern von Funkkommunikationsprodukten führt das ifak Untersuchungen von Koexistenzszenarien durch, damit notwendige Maßnahmen für die Entwicklung neuer Produkte abgeleitet werden können. Für diese Untersuchungen werden auch Simulationen mithilfe eines am ifak erarbeiteten Petri-Netz-Modells für Koexistenzuntersuchungen durchgeführt. Zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse sollen Funkausbreitungsbedingungen berücksichtigt werden. Dafür werden speziell für die Simulation von Koexistenzszenarien Kanalmodelle verwendet. Es soll nach Alternativen, die eine solche Simulation abbilden können, gesucht und eine qualitative Einschätzung für eine solche Nutzung abgegeben werden.

II. Abstract

This document deals with coexistence considerations of wireless technologies. For this, various simulation tools have been tested and evaluated. Special attention was paid to SEAMCAT. SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool) is a statistical simulation model that uses a method of analysis called “Monte Carlo” to assess the potential interference between different communication systems. This Tool uses propagation models to calculate the loss between different communication systems. This paper describes a SEAMCAT model of a wireless communication system which is called “X-System” and an external extension for SEAMCAT to get some information’s about the time response and error rate of these systems. The results are compared with measurements made by the ifak Magdeburg. Recommendations and views for wireless technologies in the automation are named at the end.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Koexistenzaussagen von Funktechnologien. Dafür wurden verschiedene Simulationstools auf ihre Eignung hin untersucht. Einen besonderen Schwerpunkt nimmt das Tool SEAMCAT ein. SEAMCAT, das steht für Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool, ist ein statistisches Simulationsmodel, welches die Monte Carlo Methode verwendet, um eine Interferenz zwischen verschiedenen Funksystemen zu beschreiben. SEAMCAT verwendet dafür Kanalmodelle, um den Verlust zwischen Funksystemen zu bestimmen. In der Arbeit wurde ein Modell ausgearbeitet, das für die Simulation mit SEAMCAT geeignet ist und beschreibt dabei eine Funktechnik, die hier als X-System bezeichnet wird. Außerdem wurde ein externes Tool erstellt, womit Zeit-und Fehlerverhalten von Funksystemen dargestellt werden können. Die Ergebnisse wurden mit Messungen verglichen, die das ifak Magdeburg für dieses System erstellt hat. Empfehlungen und Ausblicke für Funktechnologien in der Automation werden abschließend genannt.

III. Inhaltsverzeichnis

I. Aufgabenstellung ... 2

II. Abstract ... 3

III. Inhaltsverzeichnis ... 4

IV. Abbildungsverzeichnis ... 6

V. Tabellenverzeichnis ... 6

VI. Abkürzungsverzeichnis ... 7

1 Überblick ... 8

1.1 Koexistent bei Funk ... 8

1.2 Funk in der Industrie ... 9

1.3 Problemstellung und Herangehensweise ... 9

2 Grundlagen ... 10

2.1 ISM Band ... 10

2.2 Simulationssoftware ... 11

2.2.1 Simulationstools ... 12

2.3 Kolorierte Petri Netze ... 13

2.3.1 CPN Tools ... 13

2.4 SEAMCAT ... 14

2.4.1 Interferenzkriterium ... 15

2.5 Kanaleigenschaften ... 16

2.5.1 Ausbreitungseffekte ... 16

2.5.2 Kanalmodelle ... 17

2.5.3 Sendemaske ... 20

2.6 Funktechnologien ... 21

2.6.1 X-System ... 21

2.6.2 WLAN ... 24

3 Umsetzung ... 26

3.1 Simulationsmodelle ... 26

3.1.1 X-System ... 26

3.1.2 WLAN ... 29

3.2 Simulationsstruktur ... 30

3.2.1 SEAMCAT Datenauswertung ... 31

3.3 Simulationsszenarien ... 33

3.3.1 Voruntersuchungen ... 33

3.3.2 Szenarien 35
3.4 Simulation 36
3.4.1 Simulation von drei X-Systemen 36
3.4.2 Simulation von zwei X-Systemen und einem WLAN 38
3.5 Simulationsauswertung 41
3.5.1 Simulation von drei X-Systemen 41
3.5.2 Simulation von zwei X-Systemen und einem WLAN 41
3.5.3 Zusammenfassung 41

4 Analyse 43
4.1 SEAMCAT und Kolorierte Petri Netz 43
4.1.1 Rückblick 43
4.1.2 SEAMCAT und CPN Tools 43
4.1.3 Definition der Kommunikationsschnittstellen 44
4.1.4 Definition der Parameter: 49
4.1.5 Auswertung 50

5 Empfehlungen und Ausblick 51
5.1 Empfehlungen 51
5.1.1 WLAN 51
5.1.2 X-System 51
5.1.3 SEAMCAT und neue Simulationstools 51
5.2 Ausblick 52

VII. Literaturverzeichnis 53

VIII. Eidesstattliche Erklärung 55

IX. Anlagenverzeichnis 56

X. Anlagen 57

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Funkbeeinflussung Vergl. [1] 8
Abbildung 2, Petri Netz und Beschriftung aus CPN Tools, Vergl. [7] 13
Abbildung 3, Simulationsablauf von SEMACAT [5] 14
Abbildung 4, Übertragungssystem im Modell der Informationstheorie 16
Abbildung 5, Zeitverlauf und Kanalwahl der Frames des X-Systems, Vergl. [2] 22
Abbildung 6, Medienzugriffverfahren des X-Systems, Vergl. [2] 23
Abbildung 7, WLAN Frequenzband 24
Abbildung 8, Frequenzverteilung des X-Systems 26
Abbildung 9, Verteilung der Sendeleistung für das X-System 27
Abbildung 10, Frameverteilung für 1 Sekunde (Beispiel) 28
Abbildung 11, Sendemaske des X-Systems nach 802.15.4 28
Abbildung 12, 20 MHz Sendemaske von WLAN [15] 29
Abbildung 13, Simulationsstruktur 30
Abbildung 14, Messaufbau Voruntersuchung 33
Abbildung 15, X-System Sendemaske nach 802.15.4 [17] 35
Abbildung 16, Spektrum des Simulationsaufbaus 35
Abbildung 17, Simulationsszenarium für drei X-Systeme 36
Abbildung 18, Zeitverhalten für den Test Case 02.01.02 des ifak Magdeburg 37
Abbildung 19, Simulation der Koexistenz von drei X-System 37
Abbildung 20, Simulationsszenarium mit zwei X-Systemen und einem WLAN 38
Abbildung 21, Zeitverhalten für den Test Case 02.05.04 des ifak Magdeburg 39
Abbildung 22, Simulation der Koexistenz von zwei X-System mit einem WLAN 40
Abbildung 23, Schnittstellenbeschreibung 44

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis 7
Tabelle 2, nutzbare ISM Bänder für die Automation 10
Tabelle 3, Simulationstools 12
Tabelle 4, Messergebnisse für das X-System 34
Tabelle 5, Extended Hata Einstellungen 34
Tabelle 6, Simulationsergebnisse, Szenario I 38
Tabelle 7, Simulationsergebnisse, Szenario II 40
Tabelle 8, Parameter bei Schnittstelle 1 45
Tabelle 9, Parameter für Schnittstelle 2 46
Tabelle 10, Parameter für bewegte Funksysteme (kommen zu Schnittstelle 2 hinzu) 47
Tabelle 11, Parameter für Schnittstelle 3 47
Tabelle 12, Parameter für Schnittstelle 4 48

VI. Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

SEAMCAT	Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool
FH	Frequency Hopping
LOS	Sichtweite zwischen Sender und Empfänger
ACK	Acknowledge
IFS	Inter Frame Spaces
DIFS	Distributed Inter Frame Space
PIFS	Point Coordination Inter Frame Space
SIFS	Short Inter Frame Space
WSAN-FA	Wireless Sensor Actor Network – Factory Automation
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance
WLAN	Wireless Local Area Network
CR	Cognitive Radio
SIR	Signal to Interferer Ratio
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
dRSS	Desired Received Signal Strength
iRSS	Interfered Received Signal Strength
ECO	European Communications Office

1 Überblick

Die immer weiter zunehmende Mobilität von Kommunikationsgeräten und die stetig wachsende Anzahl von Mobilgeräten sorgen für einen enormen Aufschwung bei Nahbereichsfunksystemen. Unzählige Funkdienste und Standards befinden sich im Umlauf, jeder Einzelne mit Vor- und Nachteilen, ihrem Einsatzgebiet entsprechend ausgelegt. Eines verbindet all diese Funksysteme: Sie greifen auf ein gemeinsam genutztes Medium zu. Doch das Medium, in der Regel Luft, bietet nicht unendlich Kapazität für all diese Systeme.

1.1 Koexistent bei Funk

Im privaten Umfeld haben sich Nahbereichsfunksysteme, wie WLAN, längst durchgesetzt. Diese Systeme senden im ISM-Frequenzband[1] bei 2,4 GHz. Hier liegen aber auch eine Vielzahl von anderen Funksystemen wie zum Beispiel ZigBee, Bluetooth oder WSAN-FA[2]. Um eine zuverlässige Übertragung für alle Systeme zu gewährleisten, müssen die Funkdienste mit der knappen Ressource „Medium“ sorgfältig umgehen. Dafür sind Regeln notwendig, die zum Beispiel in der EN 300 328 [14] aufgeführt sind. Es kommt prinzipiell zu Beeinflussungen, wenn mindestens zwei Funkdienste am gleichen Ort zur selben Zeit auf ein Frequenzband zugreifen wollen (siehe Abbildung 1). Beeinflussungen können sich negativ auf die Datenrate, Zeit- und Fehlerverhalten auswirken. Diese sollten aber vermieden oder zumindest vermindert werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss für den Betrieb zahlreicher Geräte, ein Koexistenzmanagement betrieben werden. [1]

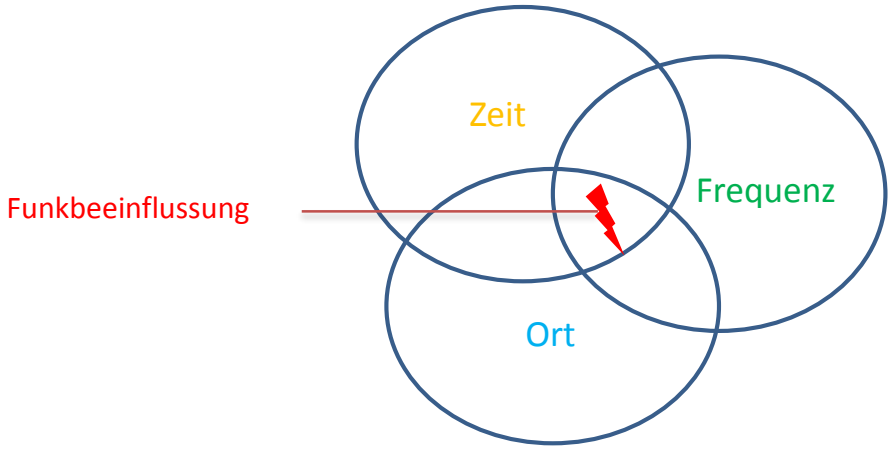


Abbildung 1, Funkbeeinflussung Vergl. [1]

[1] ISM-Band: Industrial, Scientific and Medical Band (Punkt 2.1)

[2] WSAN-FA: Wireless Sensor Actor Network – Factory Automation

1.2 Funk in der Industrie

Die Industrie fordert immer mehr Mobilität und Flexibilität. Funkdienste finden somit mehr und mehr den Weg in die Fertigung und Automation, um die starren kabelgebundenen Bussysteme zu ersetzen. Doch die Industrie besitzt andere Anforderungen an ein Funksystem, als das im privaten Umfeld der Fall ist. So spielt die Datenrate nicht unbedingt die Hauptrolle, stattdessen richtet sich der Blick auf Zuverlässigkeit und Zeitverhalten der Funksysteme, um eine Echtzeitkommunikation zu gewährleisten. Die genauen Anforderungen an funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik sind in der VDI/VDE 2185 [12] genauer definiert.

1.3 Problemstellung und Herangehensweise

Koexistenzbetrachtungen beim Funk in der Automation sind noch nicht lange von Bedeutung, sodass es im Hinblick auf für die Automation relevanten Anforderungen nur wenige Lösungsansätze gibt. Um Aussagen über neue Funktechniken oder aufgebaute Drahtlosnetze zu erhalten, soll eine Simulation die Koexistenzfähigkeit dieser Techniken abbilden. Die Dissertation von Dr.-Ing. Andre Schimschar und die Bachelorarbeit von Hannes Heinemann bilden dabei die Grundlage dieser Arbeit. In diesen Arbeiten wurden Funktechniken mit kolorierten Petri Netzen beschrieben und auf Koexistenz überprüft. Dieser Lösungsansatz erfordert jedoch ein hohes Maß an Programmierkenntnissen und kann deshalb nicht ohne eine gründliche Einarbeitung genutzt werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein einfacheres Lösungskonzept für die Simulation der Koexistenzbetrachtung zu erarbeiten. Existierende Simulationstools werden auf ihre Eignung getestet und untersucht. Das Tool SEAMCAT vom European Communications Office wurde anschließend genauer betrachtet. Es wurde überprüft, ob ein solches Tool für Koexistenzaussagen in der Automation geeignet ist. Zu diesem Zweck wurde in dieser Arbeit eine Koexistenzbetrachtung mit einem X-System[3] erstellt. Dieses System soll in einem industriellen Umfeld zum Einsatz kommen. Simulationsmodelle für das X-System und Fremdsysteme mussten erstellt werden. Der Funktionsumfang von SEAMCAT wurde durch ein selbst erstelltes externes Tool erweitert. In Punkt 4 wurde eine komplexere Erweiterung dieser Anwendung anhand eines Konzepts erarbeitet. SEAMCAT wird daraufhin für seine Eignung in der Automation bewertet und werden abschließend Empfehlungen für den Einsatz von SEAMCAT in der Automation vorgestellt. Allgemeine Empfehlungen zur Koexistenz in der Automation von Funklösungen werden ebenfalls benannt.

[3] X-System: steht hier Stellvertretend für ein Funksystem, dass vorerst nicht näher benannt wird, mehr in Punkt 2.4

2 Grundlagen

2.1 ISM Band

Nationale und internationale Regulierungsstellen regeln die Nutzung des Mediums. Ihre Aufgaben bestehen unter anderen darin, Ressourcen für Funkdienste zu reservieren. Die Nutzung von Frequenzen für eine Funkübertragung ist daher lizenzpflichtig. Ein Beispiel sind die Versteigerungen der Mobilfunkfrequenzen. Hier erwerben Netzbetreiber das Recht, auf den erworbenen Frequenzen Funkdienste zu betreiben. Dieser Frequenzbereich ist damit ausschließlich von diesem Betreiber nutzbar. Es gibt aber auch Bereiche, die lizenzfrei für jeden zugänglich sind. Diese Bereiche sind die ISM Bänder (Industrial, Scientific and Medical). Geräte, welche diese Bänder nutzen, können somit einschränkungsfrei in diesem Frequenzband funken, vorausgesetzt sie erfüllen die gesetzlichen Vorgaben. Aufgrund der Lizenzfreiheit werden diese Frequenzen jedoch oft von Geräten genutzt. Viele freie Lizenzbänder sind für die Automation nicht geeignet. Die ISM Bänder unterhalb von 400 MHz besitzen eine zu geringe Bandbreite, während es bei den Frequenzbändern oberhalb von 24 GHz aufgrund der frequenzabhängigen Dämpfung, zu kleinen Reichweiten kommt. Die Frequenzbänder, die für die Automation in Frage kommen, sind in der folgenden Tabelle aufgezeigt:

Tabelle 2, nutzbare ISM Bänder für die Automation

	von	bis	Nutzungsbedingungen
1	433,05 MHz	434,79 MHz	Ausgansleistung max. 10mW, 10% Medienauslastung
2	863 MHz	870 MHz	Ausgangsleistung bis 500mW, 25 kHz Kanalbandbreite, geringe Medienauslastung
3	2400 MHz	2483,5 MHz	Ausgangsleistung bis zu 100mW in Gebäuden, hohe Medienauslastung möglich
4	5150 MHz 5470 MHz	5350 MHz 5725 MHz	Ausgangsleistung bis zu 1W, teilweise Leistungsregelung und dynamische Frequenzwahl erforderlich

Die in dieser Arbeit betrachteten Funksysteme senden im ISM Band bei 2,4 GHz.

Durch die Vielfachnutzung eines Frequenzbandes von mehreren Funksystemen kann es zu Interferenzen kommen. Müssen Funksysteme trotz vieler Geräte zuverlässig funktionieren, ist ein Koexistenzmanagement notwendig. Dort kann man mit einer geeigneten Kanalwahl, der Reduzierung unnötig hoher Sendeleistungen oder die Verwendung von Richtantennen, die Systeme vor Interferenzen schützen.

[1]

2.2 Simulationssoftware

Da ein Koexistenzmanagement mit realen Funksystemen zu unwirtschaftlich ist, gibt es Simulationstools, die eine solche Umgebung virtuell abbilden. Da es aber noch keine direkten Tools für eine industrielle Umgebung gibt, muss geprüft werden, welches Tool in der Lage ist, die Anforderungen entsprechend zu erfüllen. Die Software muss Zeit- und Fehlerverhalten darstellen können. Dies ist notwendig, da Aktoren und Sensoren besonders zuverlässig und reaktionsschnell arbeiten müssen. Medienzugriffsverfahren von vielen Technologien und realitätsnahe Kanalmodelle sind wichtig, weil diese reale Begebenheiten besser nachbilden. Die Simulationstools sollen außerdem eine gewisse Flexibilität mitbringen, um Simulationsparameter einfach und schnell zu ändern. Eine einfache Bedienung und Nutzung der Software ist ebenfalls von großem Vorteil.

Die 5 Entscheidungskriterien für die Simulationstools lauten:

1. Medienzugriffsverfahren von vielen Funktechnologien
2. Kanaleigenschaften
3. Auswertung von Zeit- und Fehlerverhalten
4. Flexibilität
5. Einfache Bedienung

Die Simulationstools werden anhand dieser Kriterien bewertet. Anschließend wird das Tool ausgewählt, welches am besten die Kriterien erfüllt. Diese soll Aussagen über die Koexistenzfähigkeiten von Funksystemen in der Industrie erstellen.

2.2.1 Simulationstools

Die untersuchten Simulationstools wurden auf ihre Funktionalitäten und in Hinsicht auf für die Automation relevanten Anforderungen aus [12] überprüft und werden folgend vorgestellt.

Tabelle 3, Simulationstools

Software	SEAMCAT	OMNET++	Quadriga/Matlab	CPN Tools
Technologien	WLAN, Bluetooth, IEEE 802.15.4, GSM	WLAN, Bluetooth, IEEE 802.15.4, GSM	eigene abbildbar	eigene abbildbar
Kenngrößen	Interferenz-wahrscheinlichkeit	Durchsatz, Verzögerung, Packet Loss	Verzögerung	Verzögerung, Packet Loss
Koexistenz-aussagen	ja	Ja, aber nur eine Technologie	nein	ja
Zeitverhalten	Extern	ja	ja	ja
Fehlerverhalten	Extern	nein	nein	ja
Medienzugriffs-techniken	teilweise	ja	ja	ja
Kanalmodell	ja	ja	ja	extern möglich

Diese Tools werden nun anhand der 5 Entscheidungskriterien bewertet. SEAMCAT und CPN Tools erfüllen alle Vorgaben und werden in den folgenden Punkten genauer vorgestellt. Stärken und Schwächen beider Tools werden gezeigt und abgewogen.

[3],[5],[6],[8]

2.3 Kolorierte Petri Netze

Petri Netze sind diskrete Systeme. Sie sollen bestimmte Sachverhalte mit simplen mathematischen Darstellungen beschreiben. Für die Darstellung werden gerichtete Graphen verwendet. Es gibt mehrere Arten von Knoten, die Plätze und die Transitionen. Ein Knoten kann immer nur ein Platz oder eine Transition sein. Diese Plätze und Transitionen sind durch Kanten miteinander verbunden. An den Plätzen liegen sogenannte Marken. Eine Marke entspricht einem vorhandenen Ereignis. Eine Transition wird dann aktiviert, wenn genügend Marken im direkten Vorbereich der Transition vorhanden sind. Eine Transition kann so als Bedingungsprüfer verwendet werden. Kolorierte Petri Netze haben nun noch die Eigenschaft, dass den Marken bestimmte Informationen zugewiesen werden können. Dies geschieht über einen Color Set. Man kann sich den Color Set als eine Art von Dateityp vorstellen. Die nachfolgende Grafik zeigt ein in CPN Tools erstelltes Petri Netz mit deren Elementen und Beschriftungen. [7]

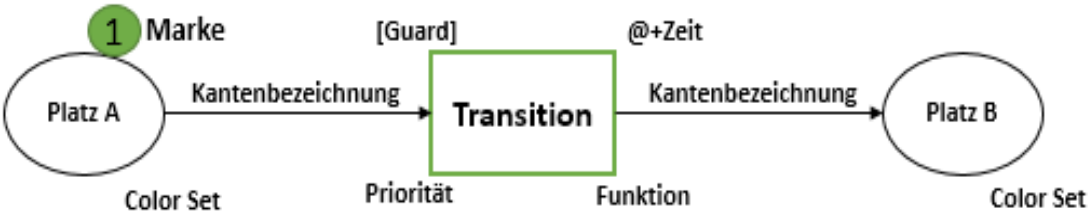


Abbildung 2, Petri Netz und Beschriftung aus CPN Tools, Vergl. [7]

2.3.1 CPN Tools

CPN Tools ist ein offenes und einfach erweiterbares Tool. Es erstellt kolorierte Petri Netze (siehe Punkt 2.3) und bildet damit Medienzugriffe ab. Zeit- und Fehlerverhalten können ausgewertet werden. Ein klarer Vorteil dieser Software ist die realitätsgetreue Nachbildung des Medienzugriffs einzelner Funktechnologien. Die gute Erweiterbarkeit ist ebenfalls positiv zu erwähnen. In den Grundlagenarbeiten [7] und [10] wurden bereits eine Simulationsumgebung und ein externes Kommunikationsmodul geschaffen. Dieses externe Modul bildet in einer Java Applikation ein Kanalmodell ab. Der aktuelle Stand der Technik für dieses Tool sieht jedoch noch eine aufwändige und unübersichtliche Benutzung und Erstellung der Simulation vor. Für komplexe Funktechniken nehmen diese Petri Netze schnell viel Arbeit und Zeit in Anspruch. Das Tool arbeitet derzeit noch sehr nahe an einer Softwareprogrammierumgebung.

[3],[7], [8]

2.4 SEAMCAT

SEAMCAT steht für Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool und ist für Koexistenzuntersuchungen von der European Conference of Postal and Telecommunication Administrations (CEPT) entwickelt worden. SEAMCAT besitzt umfangreiche Kanalmodelle und kann Ereignisse durch Zufallsgrößen erzeugen. Es betrachtet für die Entscheidung der Interferenz gewollte Leistungen des Senders (dRSS[4]) und vergleicht sie mit zum selben Zeitpunkt auftretenden, ungewollten Leistungen (iRSS[5]) von störenden Systemen.

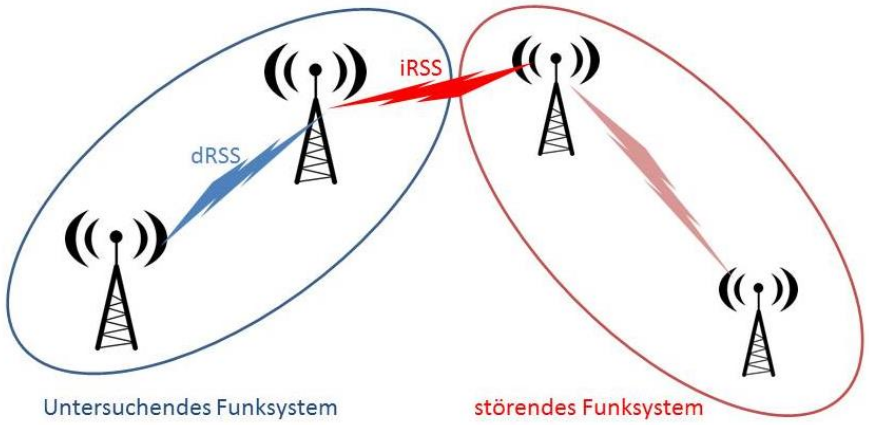


Abbildung 3, Simulationsablauf von SEMACAT [5]

Eine einfache, schnelle sowie flexible Arbeitsweise mit diesem Tool sorgen für einen guten Umgang mit dieser Software. SEAMCAT selbst besitzt jedoch gravierende Mängel in der Betrachtung von Zeit- und Fehlerverhalten. In dieser Arbeit wird durch externe Tools versucht die Mängel zu beheben. Ein benötigter Datenexport ist bereits vorhanden. SEAMCAT besitzt außerdem eine entwicklungsfreundliche, grafische Oberfläche und ist daher ohne Programmierkenntnisse bedienbar. Sender und Empfänger sind fest definiert, sie können also ihre Rolle als Transmitter oder Receiver nicht tauschen. Bei realen Funksystemen ist dies jedoch oft der Fall. Außerdem kann immer nur ein Funksystem in einer Simulation auf Koexistenz untersucht werden. Die übrigen Systeme werden lediglich als Störer betrachtet. Für eine Aussage von allen Systemen müssen noch mehrere Simulationen durchgeführt werden. SEAMCAT besitzt ebenfalls die Möglichkeit der Erweiterung. So können durch Plug-Ins gewisse Funktionen oder Kanalmodelle nachgerüstet werden. Der Code dieses Tools ist offen und anpassbar.

[5], [10]

[4] dRSS: desired Received Signal Strength

[5] iRSS: interfered Received Signal Strength

2.4.1 Interferenzkriterium

Damit eine Interferenz festgestellt werden kann, muss eine Entscheidungsgrundlage getroffen werden. Die Standardeinstellung für das Interferenzkriterium bei SEAMCAT lautet:

$$\frac{C}{I} < 19dB \qquad (1.1)\ [5]$$

C ist das gewollte Signal, während I das Interferenzsignal darstellt. Erst wenn der Wert des C/I erreicht ist, rechnet das Tool die Sequenz als gestört an. [5]

Auswertung:

Da SEAMCAT vom European Communications Office stammt, ist die Chance der Anerkennung von Simulationen sehr groß. Einfache Bedienung und umfangreiche Einstellmöglichkeiten für Kanalmodelle und Antennenparameter bieten umfangreiche Features. Dafür müssen Abstriche im Systemverhalten von Funktechniken und externe Auswertungen hingenommen werden. Durch den offenen Code ist dieses Tool in der Lage, an gewisse Bedingungen angepasst zu werden. Die angesprochene externe Auswertung wird später genauer vorgestellt. Im Punkt 4 wird ein Konzept vorgestellt, dass es SEAMCAT ermöglicht, mit dem CPN Tools zusammen zu arbeiten. Hierbei werden in SEAMCAT nur noch die Kanaleigenschaften für die Simulation abgebildet.

2.5 Kanaleigenschaften

Kommunikation findet über ein Übertragungssystem statt. Ein Sender überträgt Energie an ein Medium. Ein Empfänger detektiert einen Teil dieser Energie und kann daraus die Informationen wieder ableiten.

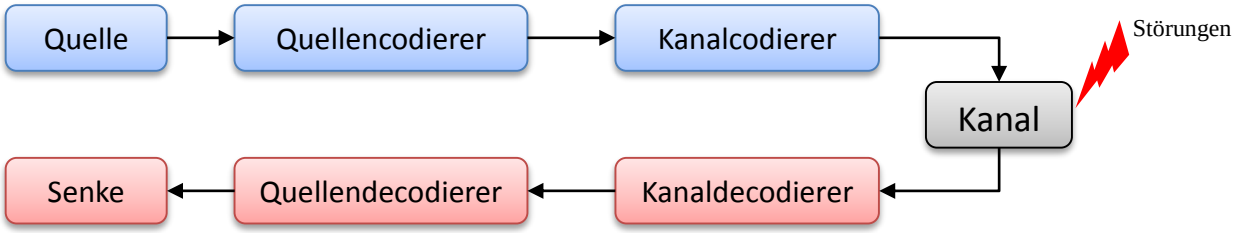


Abbildung 4, Übertragungssystem im Modell der Informationstheorie

Der Kanal kann von anderen Funkdiensten, dem Rauschen oder durch Ausbreitungseffekte (siehe Punkt 2.5.1) beeinflusst werden. In der Arbeit werden Beeinflussungen auf den Kanal und die damit verbundenen Auswirkungen im Hinblick auf die Koexistenz untersucht und später durch eine Simulation nachgebildet.

2.5.1 Ausbreitungseffekte

Das Durchdringen eines Mediums ist für elektromagnetische Wellen verlustbehaftet. Effekte wie Dämpfung, Brechung, Beugung, Reflexion, Absorption und Streuung beeinflussen die Welle bei ihrer Ausbreitung im Raum. Die zurückgelegte Strecke und Eigenschaften der Welle, wie die Frequenz, beeinflussen die Intensität des Verlustes.

Bei einer Freiraum-Übertragungsstrecke, bei der sich der Empfänger im Fernfeld des Senders im Abstand r befindet, erhält man am Ort des Empfängers folgende Leistungsdichte: [9], [13]

$$S = P_{Empfänger} = \frac{P_{Sender}}{4 \cdot r^2 \pi} \; in \frac{W}{m^2} \qquad (2.1)\ [13]$$

P: ist die Leistung, die eine Antenne sendet oder empfängt.

Die Freiraumdämpfung ist frequenzabhängig und wird in der folgenden Formel beschrieben:

$$L_F = 20 \cdot log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot r}\right) \qquad (2.2)\ [13]$$

λ: ist die Wellenlänge und 1/f definiert; f ist die Frequenz

Die Dämpfung eines Übertragungssystems kann allgemein in folgender Form angegeben werden:

$$a = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{Sender}}{P_{Empfänger}}\right) \; in \; dB \qquad (2.3)\ [13]$$

2.5.2 Kanalmodelle

Kanalmodelle wurden geschaffen, um Ausbreitungseffekte von elektromagnetischen Wellen vereinfacht darzustellen. Effekte wie Absorption, Reflexion, Brechung, Beugung und Streuung müssen nun nicht mehr einzeln betrachtet werden. Für eine praxisrelevante Betrachtung reichen diese Näherungslösungen in der Regel vollkommen aus. Für verschiedene Umweltbedingungen gibt es eine Ansammlung von Kanalmodellen. Simulationen profitieren daher von solchen Modellen. Folgend werden einige Kanalmodelle vorgestellt, die SEAMCAT standardmäßig unterstützt.

2.5.2.1 Free Space Loss

Dieses Modell ist das einfachste Kanalmodell. Es gilt ab einer Frequenz von über 30 MHz und die Entfernung ist nur durch die direkte Sichtweite (LOS) begrenzt. Indoor-indoor und outdoor-outdoor Betrachtungen sind möglich, vorausgesetzt eine Sichtverbindung besteht. Die Antennenhöhe spielt hier keine Rolle.

2.5.2.2 Extended Hata

Extended Hata ist für den Mobilfunk gedacht. Die Entfernung ist bis 40 km begrenzt und die Frequenzen liegen zwischen 30 MHz und 3 GHz. Die Antennenhöhen sind definiert für h_1=1 m bzw. 10 m und für h_2=30 m bzw. 200 m. Verluste an Objekten, wie zum Beispiel Maschinen oder Wände, im Ausbreitungsbereich, werden berücksichtigt. Eine direkte Sichtverbindung ist nicht zwingend notwendig, ist aber nur im Bereich von 2000 MHz bis 3000 MHz implementiert. Die Formeln zur Berechnung des Verlustes sind aus SEAMCAT [10] entnommen und lauten:

$$\boldsymbol{f_{propage}}(f, h_1, h_2, d, env) = \boldsymbol{L} + \boldsymbol{T}\big(\boldsymbol{G}(\boldsymbol{\sigma})\big) \qquad (2.4)\ [10]$$

Wobei:

- f: Frequenz in MHz
- h_1: Transmitter Antennenhöhe in m über den Boden
- h_2: Receiver Antennenhöhe in m über den Boden
- d: Distanz zwischen Transmitter und Receiver in km
- env: Umgebungsbedingung

Symbole:

- L = mittlerer Verlust (dB)
- H_m= min(h_1,h_2)
- H_b= max(h_1,h_2)

Da wir uns in einem festgelegten Frequenzbereich bei 2,4GHz befinden. Wird folgend nur noch dieser Fall betrachtet.

Der mittlere Verlust ist frequenz- und abstandsabhängig. Für verschiedene Abstände ergeben sich für L folgende Formeln:

- Für d ≤ 0,04 km:

$$L = 32{,}4 + 20\log(f) + 10log\left[d^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6}\right] \tag{2.5}$$

- Für 0,04km < d < 0,1 km:

$$L = L(0{,}04) + \frac{[\log(d) - \log(0{,}04)]}{[\log(0{,}1) - \log(0{,}04)]} \cdot [L(0{,}1) - L(0{,}04)] \tag{2.6}$$

- Für d ≥ 0,1 km:
  - Urban (für 2000 MHz – 3000 MHz):

$$\begin{aligned} L = {} & 46{,}3 + 33{,}9\log(2000) + 10log\left(\frac{f}{2000}\right) - a(H_m) - b(H_b) \\ & - 13{,}82\log(max\{30, H_b\}) \\ & + [44{,}9 - 6{,}55\log(max\{30, H_b\})](\log(d))^{\alpha} \end{aligned} \tag{2.7}$$

  - Suburban

$$L = L(urban) - 2\left[log\left(\frac{\min\{\max\{105; f\}; 2000\}}{28}\right)\right]^2 - 5{,}4 \tag{2.8}$$

  - Rural

$$\begin{aligned} L = {} & L(urban) - 4{,}78[\log(\min\{\max\{105; f\}; 2000\})]^2 \\ & + 18{,}33\log(min\{\max\{105; f\}; 2000\}) - 40{,}94 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Mit:

$$a(H_m) = -(1{,}56\log(f) - 0{,}8) + max\left\{0{,}20\ log\left(\frac{H_m}{10}\right)\right\} + 1{,}1\log(f) - 0{,}7) \cdot min\{10; H_m\} \quad (2.10.1)$$

$$b(H_b) = min\left\{0; 20\ log\left(\frac{H_m}{30}\right)\right\} \quad (2.10.2)$$

und

$\alpha = 1$; $d \leq 20$ km

Sollten sich Sender und Empfänger nicht jeweils indoor oder outdoor befinden, muss zusätzlich ein Verlust betrachtet werden. Eine elektromagnetische Welle wird an einer Wand zusätzlich abgeschwächt. In der folgenden Arbeit wird dieser Wert (L_{we}[6]) mit 10dB angenommen. Wenn mehrere Wände durchdrungen werden, muss der Verlust L_{we} entsprechend der Anzahl dazu addiert werden.

2.5.2.3 Extended Hata SRD

Extended Hata SRD ist ein Spezialfall zum normalen Extended Hata. Es bildet besondere Eigenschaften der Kurzstreckenverbindung ab, darunter geringere Antennenhöhen von maximal 3 m. Bei Extended Hata SRD wird lediglich für $b(H_b)$ (2.10.2) folgende Gleichung in die Extended Hata Formel (2.4ff) eingesetzt:

$$b(H_b) = 1{,}1 \cdot \log(f) - 0{,}7) \cdot min\{10, H_b\} - (1{,}56\log 10(f) - 0{,}8) + max\left\{0; 20 \cdot\ log\left(\frac{H_b}{10}\right)\right\} \quad (2.11)$$

Die Kanalmodelle sind ein fester Bestandteil von SEAMCAT. Extended Hata besitzt dort noch eine Reihe von Einstellmöglichkeiten. Betrachtungen zwischen Stockwerken und unterschiedlichen Raumgrößen sind realisierbar. Außerdem kann die Umgebung der Funksysteme angegeben werden. Rural steht für eine Umgebung ohne große Hindernisse zwischen Sender und Empfänger. Bei Suburban können bereits Gegenstände mittlerer Größe die Funkverbindung beeinflussen. Während bei Urban viele und große Hindernisse zwischen Sender und Empfänger angenommen werden.

[6] L_{we}: ist der zusätzliche Verlust in dB, den eine Welle an einer Außenwand erfährt

An den Kanalmodellen werden keine Änderungen vorgenommen. Die Zusatzverluste und die Umgebung werden für die Automation entsprechend eingerichtet. (z.B. Wandverlust in einer Werkshalle)

[5], [7], [10]

2.5.3 Sendemaske

Die Sendemaske gibt die spektrale Leistungsverteilung einer Antenne an. Antennen geben nicht über die gesamte Bandbreite eine konstante Leistung ab, bzw. besitzen keine unendlich hohe Flankensteilheit. Sie können also ihre Sendeleistung zu einer bestimmten Frequenz nicht schlagartig ändern. Die Sendemaske wird meist durch einen Filter realisiert. Sie ist wichtig für die Aussagefähigkeit von Koexistenz, da ungewollte Leistungen auch außerhalb der beschriebenen Bandbreite abgestrahlt werden können.

2.6 Funktechnologien

Die hier vorgestellten Funktechnologien sind ein Auszug von Funklösungen, die für die Automation und Fertigung geeignet sind. Sie arbeiten im ISM Band bei 2,4 GHz (siehe Punkt 2.1).

2.6.1 X-System

Das X-System soll, wie bereits beschrieben, in einem industriellen Umfeld zum Einsatz kommen und dabei die Bedingungen für eine Echtzeitkommunikation bestmöglich erfüllen. Das System wurde so ausgelegt, dass es gute Zeit- und Fehlerverhalten aufweisen soll. Es wird in diesem Punkt näher beschrieben. Das X-System sendet im Frequenzbereich von 2405 bis 2480 MHz, aufgeteilt in 16 Kanäle, mit einer Kanalbreite von 5 MHz. Die Bandbreite des Senders beträgt 2,8 MHz und die Signale sind mit Offset QPSK[7] moduliert. Die Datenrate spielt hier keine große Rolle, da nur Steuerinformationen übertragen werden müssen. Verwendet werden außerdem Frequenzspreizung und Frequency Hopping (FH). FH ist das ständige Wechseln des Kanals. Bei der Frequenzspreizung wird ein Symbol in eine Folge von Chips gesendet. Ein Chip ist ein Impuls, der zur Übertragung von Symbolen dient. Dadurch wird das schmalbandige Signal aufgespreizt.

Die Systeme bestehen aus einem Sender (Control Unit) und einem Empfänger (Receiver Unit). Die Verbindung findet Punkt zu Punkt statt. Die Control Unit sendet alle 50ms einen Frame. Jedes Frame wechselt den Kanal, wie in Abbildung 5 zu erkennen ist. Nach jedem vierten Frame antwortet die Receiver Unit mit einer Acknowledge (ACK[8]), wobei diese auch erstellt wird, wenn der vierte Frame verloren geht. Sender und Empfänger sind miteinander synchronisiert. Werden Frames nicht bestätigt, werden Sie nicht erneut gesendet.

[7] Offset QPSK: siehe Anlagen, Quadrature Phase Shift Keying

[8] ACK: Acknowledge

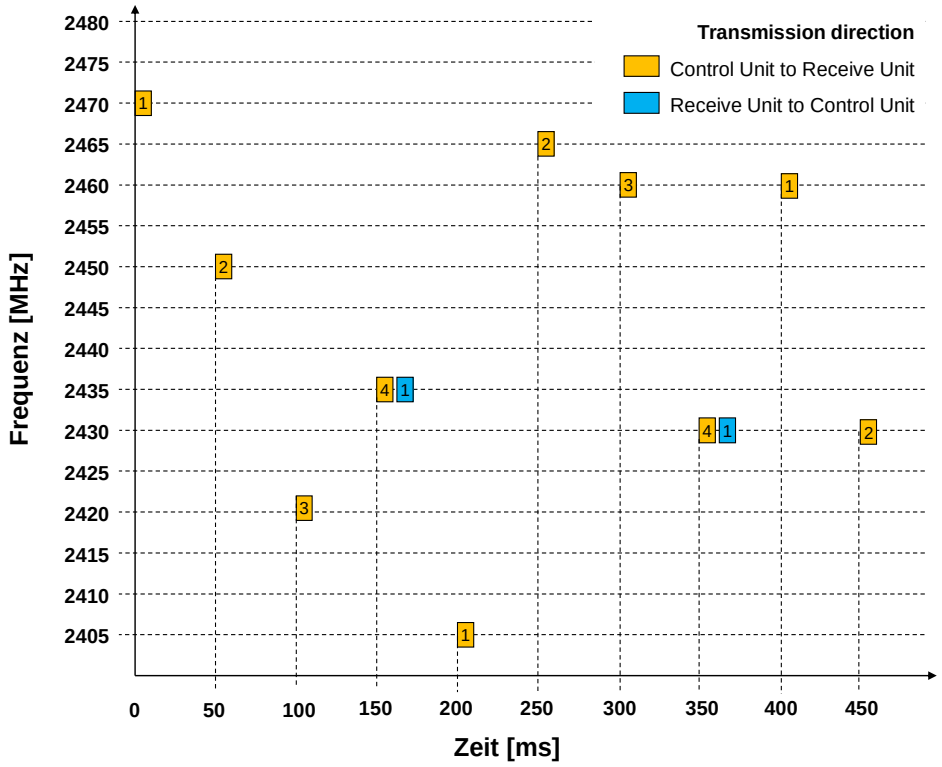


Abbildung 5, Zeitverlauf und Kanalwahl der Frames des X-Systems, Vergl. [2]

Die Control Unit überprüft das Medium vor dem Senden eines Frames, ob es frei oder belegt ist. Ist das Medium belegt, wird so lange gewartet, bis das Medium als frei erkannt wird oder die maximale Zeit T_{CCA_max}[9] erreicht ist. T_{CCA_max} kann maximal 10ms groß sein. Ist T_{CCA_max} erreicht, wird der Frame gesendet (Abbildung 6). Dies ist notwendig, da der nächste Frame erst gesendet wird, wenn der vorherige Frame abgeschickt wurde. Da der folgende Frame aber einen anderen Kanal wählt, welcher womöglich frei ist, kommt es so nicht zu langen Wartezeiten, welche gezielt vermieden werden sollen. Die vier Frames, die bis zu einer ACK gesendet werden, besitzen dieselbe Information. Auf diese Weise wird eine hohe Erfolgsquote erreicht. Die Frequenzspreizung macht die Signale störfester gegenüber schmalbandigen Störquellen.

[9] T_{CCA_max}: Ist die maximale Carrier Sense Zeit.

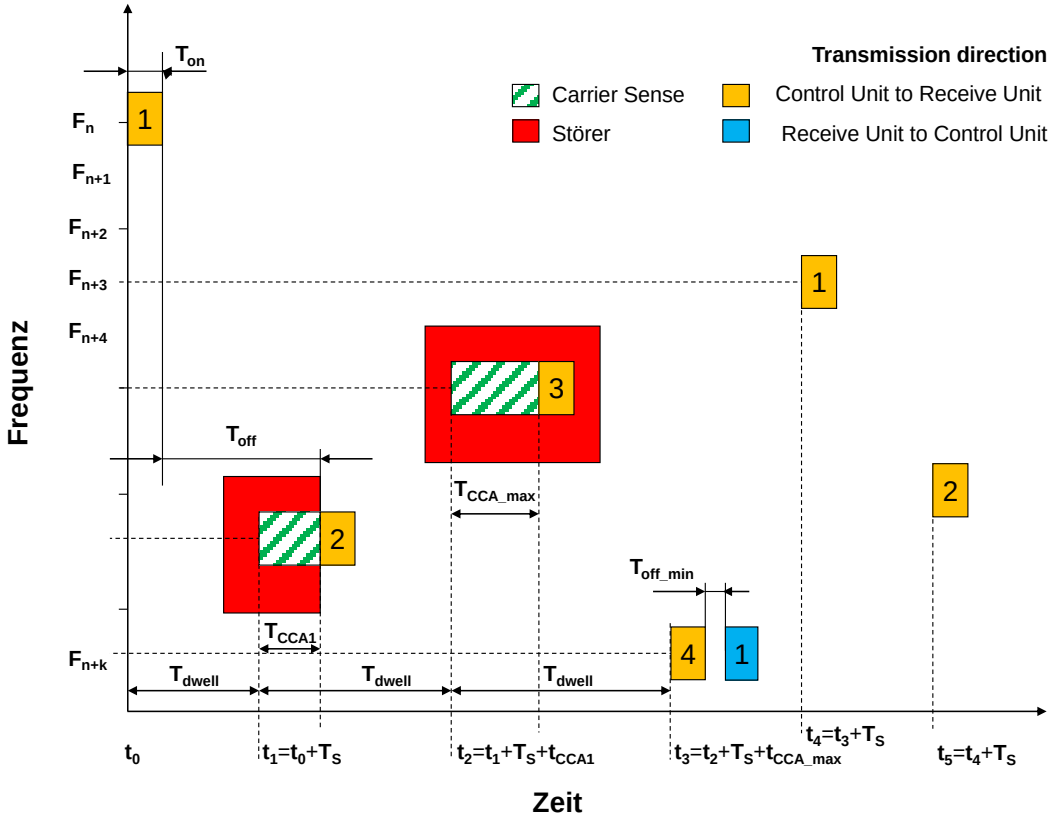


Abbildung 6, Medienzugriffverfahren des X-Systems, Vergl. [2]

Die Kombination aus den oben genannten Techniken, macht das X System in der Theorie extrem störsicher. In der folgenden Arbeit soll dies durch die Simulation und anschließenden Vergleich mit Messungen am realen Funksystem überprüft werden. Das X-System basiert auf den IEEE 802.15. Standard, damit liegt es in der gleichen Familie wie Bluetooth oder WSAN-FA.

In Abbildung 15 im Punkt 3.3.2 sind die 16 Kanäle mit ihrer Sendemaske gezeigt.

[1], [2], [17]

2.6.2 WLAN

WLAN[10] ist die am weitesten verbreitete Funktechnik und von der IEEE im Standard 802.11 definiert. Es ist die drahtlose Realisierung von Ethernet, einer kabelgebundenen Netzwerktechnik, die auch in der Industrie vorhanden ist. Die 802.11 Spezifikation besitzt mehrere Ausführungen, a/b/g/n und ac. Aufgrund dessen, das einige Ausführungen wie ac nur im 5 GHz Band anzutreffen sind, werden zukünftig nicht mehr alle Spezifikationen berücksichtigt. Vielmehr konzentrieren wir uns auf den g-Standard, also explizit auf den 2,4 GHz Frequenzbereich. Dieser Standard verfügt über einen ausreichenden Durchsatz und weist eine Kanalbandbreite von 20 MHz auf. Größere Bandbreiten wären bei der begrenzten Kapazität des Mediums nicht sinnvoll. In Europa sind 13 Übertragungskanäle mit einer Bandbreite von 5 MHz zugelassen. Sie reichen von einer Frequenz von 2412 MHz (Kanal 1) bis 2472 MHz (Kanal 13). In Europa können so nur drei 20 MHz Übertragungskanäle gleichzeitig genutzt werden ohne eine Beeinflussung festzustellen. Abbildung 7 veranschaulicht anhand der Sendemaske eines 20 MHz WLANs, die Medienbelegung. [3]

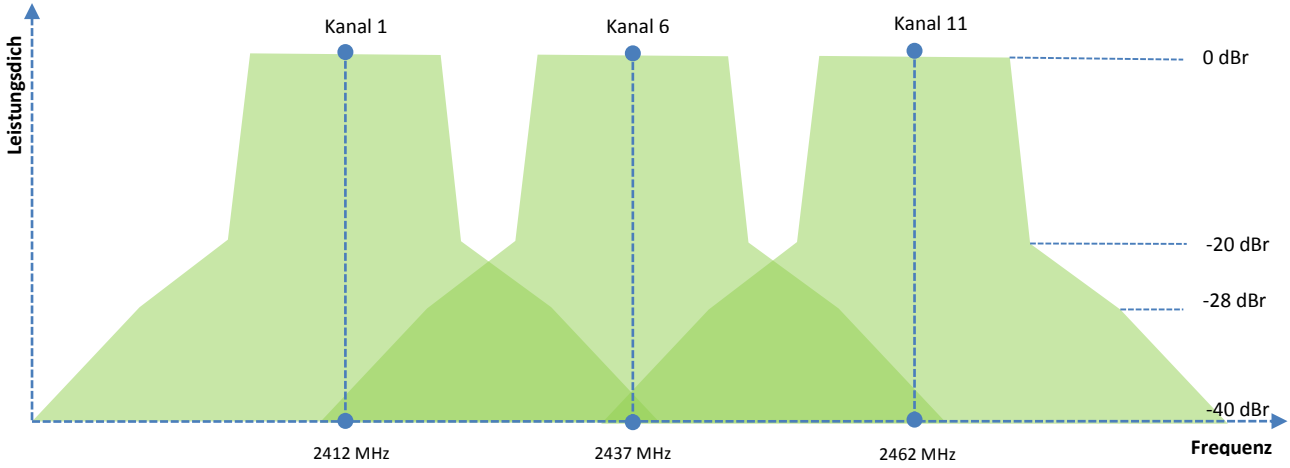


Abbildung 7, WLAN Frequenzband

[10] WLAN: Wireless Local Area Network

Grundlage für den Kanalzugriff im WLAN ist das CSMA/CA[11]. Es dient zur Kollisionsvermeidung, indem es das Medium vor dem Senden abhört. Ist ein festgelegter Energiepegel erreicht, wird das Medium als belegt erkannt. Ist das Medium wieder als frei erkannt worden, so muss das Medium eine gewisse Zeit ungenutzt bleiben bevor gesendet wird. Dafür sind in CSMA/CA verschiedene Zeitintervalle, die Inter Frame Spaces (IFS), definiert. Diese lauten:

- **SIFS**: Short Inter Frame Space ist der kürzeste Abstand zwischen zwei Paketen, er tritt überwiegend bei der ACK-Übertragung auf.

- **PIFS**: Point Coordination Inter Frame Space; in dieser Zeit hat der Access Point das Vorrecht auf das Medium zu zugreifen.

- **DIFS**: Distributed Inter Frame Space ist die Zeit, die vor jeder neuen Übertragung abgewartet werden muss.

Aufgrund dieser Wartezeiten und dem Warten auf Medienfreiheit, ist WLAN nicht für Echtzeitkommunikationen in der Industrie geeignet.

Bei WLAN handelt es sich um ein System, das seine Frequenz dauerhaft beibehält. Die Sendeleistung ist auf max. 20 dBm begrenzt. Wird ein Paket gestört oder geht verloren, so wird es noch einmal gesendet. Überprüft wird dieser Vorgang durch die ACK. Ein Paket mit einer Sequenznummer wird von einem Transmitter verschickt, der Receiver wertet das Paket aus und bestätigt das empfangene Paket mit einer ACK. Der Transmitter hat nun das gesendete Paket als erfolgreich empfangen bestätigt bekommen und kann nun mit dem Senden weiterer Pakete fortfahren. Der Verlust der ACK, obwohl das gesendete Paket richtig übertragen wurde, führt ebenfalls zum erneuten senden eines Paketes.

[11], [3], [18]

[11] CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance

3 Umsetzung

Für die Simulation mussten Simulationsmodelle für SEAMCAT entworfen werden. Das X-System und das Fremdsystem WLAN wurden hierbei erstellt und werden nun vorgestellt.

3.1 Simulationsmodelle

3.1.1 X-System

Die Simulation soll Aufschluss darüber geben, wie sich das X-System mit anderen Funksystemen verhält. Dafür musste ein Modell des X-System für die Simulation entworfen werden. Um Aussagen über Zeit und Fehlerverhalten zu bekommen, wurden die Simulationsergebnisse extern, hier in Excel, exportiert und bewertet. Diese Simulation ist jedoch nur eine schemenhafte Abbildung des X-Systems, da Medienzugriffe nicht direkt erstellt werden können. SEAMCAT ist dafür auch nicht ausgelegt worden, weshalb man an bestimmten Parametern einige Kniffe anwenden muss, um zumindest teilweise den Medienzugriff darzustellen. Folgend wird erläutert, wie das X-System dargestellt wird.

Das Frequenzverhalten stellt glücklicherweise keine großen Probleme dar. Es ist möglich einen Frequenzbereich anzugeben und in welchem Abstand die Frequenzen erzeugt werden sollen. In diesem Fall ist die untere Frequenz 2400 MHz, die obere 2480 MHz und der Frequenzabstand beträgt 5 MHz. Dadurch ergibt sich folgende Konstellation:

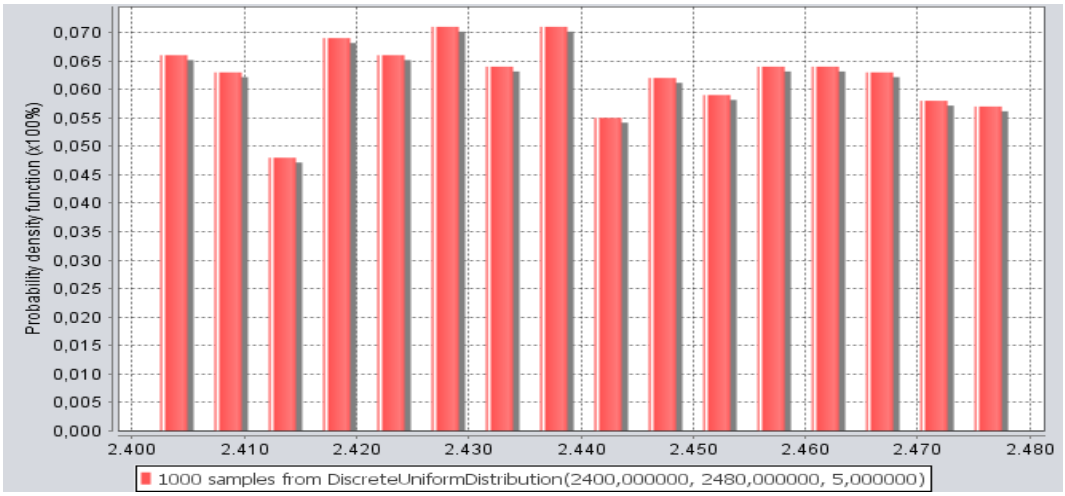


Abbildung 8, Frequenzverteilung des X-Systems

SEAMCAT erstellt daraus 16 Kanäle, die Wahrscheinlich für das Auftreten einer Frequenz ist über alle 16 Kanäle annähernd gleich verteilt. In dieser Grafik wurden 1000 Ereignisse erstellt, mit höherer Ereignisrate nimmt die Gleichverteilung zu. Die Wahrscheinlichkeit für eine Frequenz beträgt ca. 1/16 (0,0625). Dies entspricht dem realen System.

Bei der Medienbelegung steht man dagegen vor einem Problem. Das X-System sendet alle 50 ms einen Frame. SEAMCAT besitzt jedoch keinen Zeitverlauf und kann keine einzelnen Frames erzeugen. Hier muss also eine Lösung gefunden werden um annähernd das geforderte Verhalten zu erreichen, denn SEAMCAT lässt alle betrachteten Systeme dauerhaft senden.

Um dieses Problem zu lösen wurde eine variable Ausgangsleistung definiert. Es ist möglich eine prozentuale Verteilung von Sendeleistungen anzugeben. Der Sender des X-Systems sendet alle 50 ms einen 1 ms langen Frame. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für das Senden eines Frames mit der angegeben Sendeleistung (20dBm) 2% beträgt. Die restlichen 98% werden mit einer geringen Sendeleistung von -80dBm definiert. Bei dieser Frequenz ergibt sich durch die Dämpfung ein auf der Rauschebene befindliches Signal und kann daher als „nicht Senden“ interpretiert werden. Eine Sendeleistung von 0mW in absoluter Form ist nicht möglich, dies würde bedeuten, dass man -∞ dBm in SEAMCAT einstellen müsste, dies ist jedoch nicht möglich.

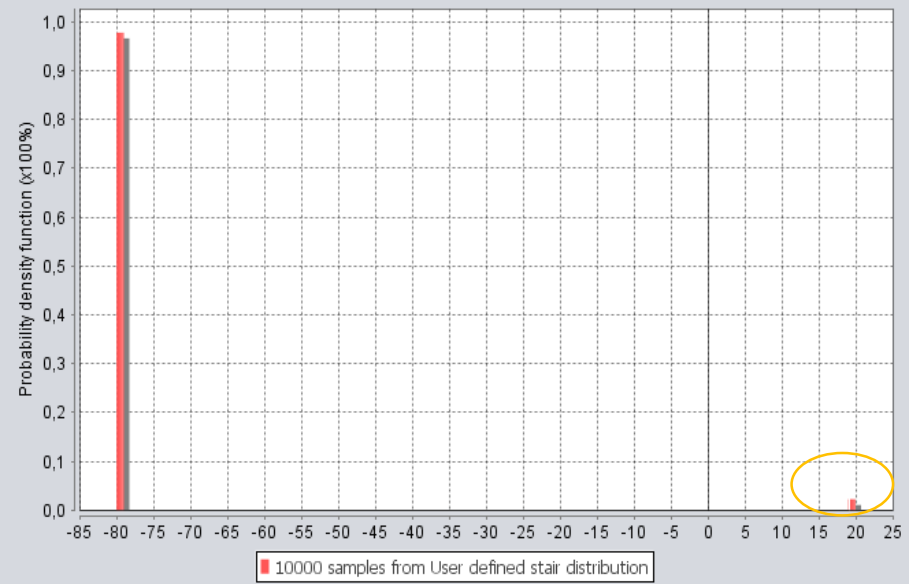


Abbildung 9, Verteilung der Sendeleistung für das X-System

An dieser Stelle muss gesagt werden, dass diese Lösung kein Ersatz für den Medienzugriff bedeutet, denn statistisch bewegen sich die Frames zwar alle 50 ms auseinander. Aber nur bei einer großen Stichprobe. Es kann also passieren, dass zwei Frames auch 1 ms bzw. bis zu 250 ms auseinander liegen können. Durch diese Methode

ergeben sich aber auch Vorteile. Wegen des Verhältnisses von 1:50 kann ein Zeitverhalten abgeleitet werden.

Da ein Event mit einem Frame nun 1 ms dauern soll, kann durch das Verhältnis von 1:50 angenommen werden, dass in 1000 Event, 20 Frames mit einer Länge von 1ms erzeugt werden. Die Simulation von 1000 Events ergäbe also eine Sekunde bei einem realen System. Im nachfolgenden Bild ist zu erkennen, dass die Erzeugung von Frames zufällig verläuft.

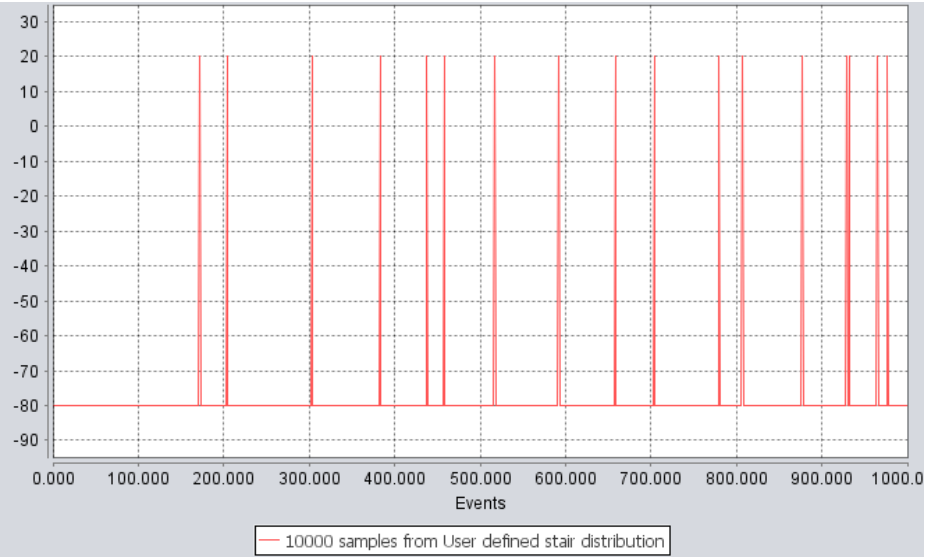


Abbildung 10, Frameverteilung für 1 Sekunde (Beispiel)

Bandbreite, Sensitivity und Antennengewinn sind aus den realen Systemen übernommen. Die Emissionsmaske wurde für die SEAMCAT Simulation angepasst. Für das Tool müssen sich alle Systeme sehen können. Das heißt ein System auf Kanal 1 muss auch Leistungsanteile von einem System auf Kanal 16 bekommen. Wie stark dieser Anteil ist, wird in der Emissionsmaske festgelegt. Das X-System basiert auf dem von der IEEE definierten Standard 802.15.4. Die Emissionsmaske für diese Systeme ist somit folgende:

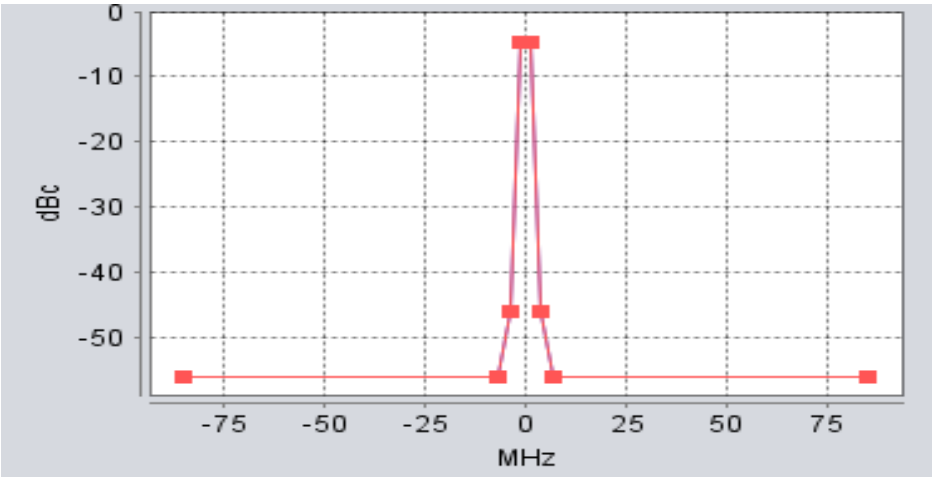


Abbildung 11, Sendemaske des X-Systems nach 802.15.4

Die -75 MHz bis +75 MHz kommen daher zu Stande, da wir uns in einem Frequenzbereich von 2405 bis 2480 MHz befinden, also eine Bandbreite von 75MHz. So kann jedes System von allen anderen „gesehen“ werden. Nach einem 5 MHz Abstand jedoch nur noch einem 400.000 Anteil der eigentlichen Empfangsleistung. Die Emissionsmaske wird durch einen Filter im Empfänger realisiert. Der Filter hat einen Durchlassbereich von 3 MHz, eben die Bandbreite des X-Systems.

Zu den nicht in diesem Modell realisierbaren Punkten gehört unter anderem die Frequenzspreizung. SEAMCAT besitzt für dieses Verfahren keinerlei Realisierungsmöglichkeiten. Auch eine vom Empfänger erzeugte Acknowledge (ACK) ist nicht implementiert. Da aber bei einem X-System keine Pakete aufgrund von Fehlübertragungen erneut gesendet werden, ist dieser Mechanismus auch vernachlässigbar. Das Abhören des Mediums stellte sich bei dieser Simulation als nicht sinnvoll heraus. Während das reale System einen kurzen Augenblick den Sendevorgang verzögert, sollte das Medium als belegt erkannt werden. So erzeugt das SEAMCAT in diesem Fall einfach kein Ereignis. Somit würde die Simulation keine Kollisionen von Frames erzeugen und würde daher keine Aussage über ein Koexistenzverhalten ergeben.

3.1.2 WLAN

Anders als beim X-System handelt es sich bei WLAN um ein System, das seine Frequenz dauerhaft beibehält. Für die Untersuchungen wurde sich für eine zentrale Frequenz entschieden. Die Frequenz beträgt 2437 MHz und ist somit auf Kanal 6. Die Bandbreite beträgt 20 MHz. Damit überlagert das WLAN System mindestens 4 Kanäle des X-Systems. Die Sendeleistung beträgt auch hier 20 dBm. Die Medienbelegung kann variiert werden. Sie sollte zwischen 20 und 40% liegen. Die Sendemaske für einen 20 MHz Kanal ist nach der IEE 802.11 abgeleitet. (Abbildung 12) Eine Zeit- und Fehlerbetrachtung für das WLAN ist nicht vorgesehen.

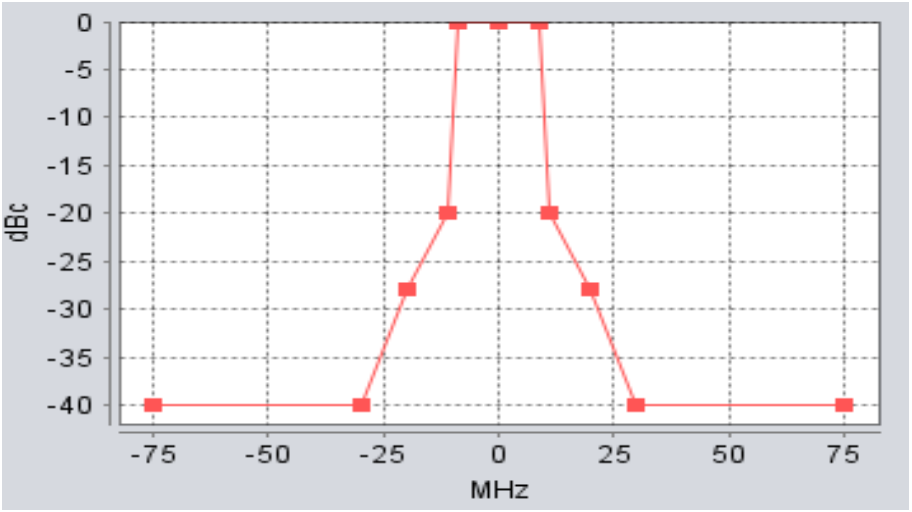


Abbildung 12, 20 MHz Sendemaske von WLAN [15]

3.2 Simulationsstruktur

Abbildung 13 zeigt die Struktur der Simulation. Es besteht aus einem SEAMCAT und einem Excel Teil. Im SEAMCAT Teil sind die Eigenschaften der Funksysteme und die Kanalmodelle implementiert. Hier findet auch die Frameerzeugung statt.

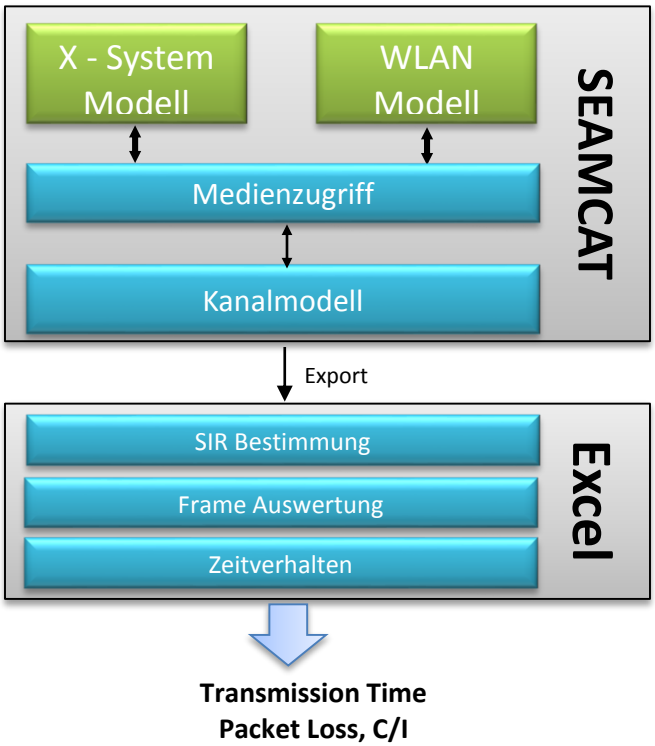


Abbildung 13, Simulationsstruktur

Die Simulationsdaten werden nun exportiert und in ein Kalkulationstool eingebettet. Zur besseren Übersicht wurde hier das Tool Microsoft Excel ausgewählt. Dieses kann später durch andere Tools wie z.B. Matlab, LabVIEW oder eigens geschriebene Programme oder Plug-Ins abgelöst werden. Aus den ausgegebenen Werten von SEAMCAT wird nun ein Zeitverlauf interpretiert. Die dRSS und iRSS (siehe Grundlagen - SEAMCAT), bei bestimmten Zeitpunkten, werden zu einem Signal-Störverhalten (SIR) pro Event berechnet. Aus der abgegebenen Signalleistung kann ein Frame bestimmt werden. Durch das SIR kann nun eine Aussage über die Störung des Frames getroffen werden. Dabei wurden Kanaleigenschaften, Sendemasken und Antennenparameter berücksichtig.

Aus den gestörten Frames kann dann wiederum ein Zeitverhalten des Systems abgeleitet werden. Die Ausgabe der Simulationsergebnisse erfolgt in Tabellenform und als Diagramm.

3.2.1 SEAMCAT Datenauswertung

3.2.1.1 Post Processing Plug-In

SEAMCAT selbst besitzt die Möglichkeit Plug-Ins zu laden und auszuführen. Diese müssen jedoch in Java entwickelt werden. Mit diesen Plug-Ins kann eine Zeit- und Fehlerauswertung erstellt werden.

3.2.1.2 Excel Tool

Es gibt auch die Möglichkeit, die Simulationsdaten manuell zu exportieren. Die Excel Auswertung kann jederzeit eingesehen und angepasst werden und benötigt keine Java Kenntnisse. Für das X-System wurde ein Makro Verlauf voreingestellt. Dabei werden die exportierten Werte aus SEAMCAT aus dem Exportordner automatisch eingelesen. Anschließend kann die Auswertung manuell gestartet werden, der nötige Ablauf wird automatisch durchlaufen.

Ablauf des Excel Tool für Zeitbetrachtung des X-Systems:

Nach dem Datenimport werden alle Werte bei der kein Frame erzeugt wurde herausgefiltert. Übrig bleiben die Zeilen, bei der SEAMCAT mit der angegeben Sendeleistung ein Frame erzeugt hat. Der dRSS und iRSS werden nun verglichen bewertet. Der dRSS wird zunächst überprüft, ob er oberhalb des Threshold des Receivers liegt. Ist dies nicht der Fall, gilt dieser Frame als verloren gegangen. Andernfalls wird nur der Signal Störabstand (SIR) berechnet. Der SIR ist die Differenz aus dem dRSS und dem iRSS. Nun wird der SIR betrachtet, liegt dieser über dem Interferenzkriterium, so wird der Frame als erfolgreich transmittiert angesehen. Das Excel Tool erzeugt eine Spalte, bei der eine erfolgreiche Übertragung eines Frames mit einer „1“ und im negativen Falle als „0“ bezeichnet wird. Nun besitzt man genügend Informationen, um über das Zeitverhalten des X-System Aussagen zu treffen. Vier Frames werden als ein Befehl zusammengefasst. Jeder Befehl bekommt eine zufällig erzeugte Zeit zwischen 7 und 56 ms. Dieser bestimmt sich durch die Wartezeit zwischen zwei Frames. Entweder der Transmitter hat beim Tastendruck gerade ein Frame erzeugt und muss 50 ms bis zum Senden des Nächsten warten oder es kann sofort gesendet werden. Hinzu kommen hier Verzögerungen, die die Geräte erzeugen bzw. die Ausbreitungsverzögerung der Funkstrecke. Dieser Zusatz, hier als „z“ bezeichnet, beträgt aus Messungen ca. 7 ms. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Zufallszahlerzeugung in Excel:

$$x = Zufall\big(\, z : (z + 49)\big) \tag{3.1}$$

x= Verzögerung pro Befehl (gibt die allgemeine Verzögerung an)

Nachdem diese Zufallszahl als Verzögerung pro Befehl erstellt wurde, muss nun noch überprüft werden, welche Frames zerstört wurden. Dabei muss unterschieden werden, an welcher Stelle von den vier Frames ein Zerstörtes ist. Wird das erste Frame erfolgreich transmittiert und das zweite wiederum nicht, hat dies keine Auswirkungen auf das Zeitverhalten, da der Befehl bereits beim ersten Frame, also zu einem früheren Zeitpunkt als bei Frame 2, erfolgreich übermittelt wurde. Die zusätzliche Verzögerung pro zerstörtem Befehl beträgt die Wartezeit zwischen zwei Frames, also 50 ms. Die Anzahl der zerstörten Frames bis ein Frame erfolgreich übertragen wurde wird hier als „n“ bezeichnet. „n“ kann maximal 4 sein. Ist n=4 so ist der Befehl nicht übertragen worden. Excel signalisiert dies durch den Befehl „Error“. Danach wird ein neuer Befehl gesendet, für den der Wert n wieder erneut erstellt wird. Die berechnete Verzögerung für das X-System aus den SEAMCAT Daten lautet:

$$x = Zufall\big(z\colon (z + 49)\big) + n \cdot 50 \quad [\text{ms}] \tag{3.2}$$

Die Auflösung für die Verzögerung beträgt 1 ms. Zum Abschluss zählt Excel die Häufigkeit der aufgetretenen Verzögerungen. Außerdem können noch einige Simulationsergebnisse angezeigt werden. Dazu zählen die mittlere Verzögerung, Anzahl der zerstörten Befehle bzw. Frames und deren prozentualer Anteil an der Gesamtanzahl der Befehle/Frames.

Eine Auswertung ob eine ACK erfolgreich übertragen wurde, ist beim X-System nicht notwendig. CCA Wartezeiten, die maximal 10 ms pro Frame betragen können, finden hier keine Berücksichtigung, da keine Informationen darüber vorliegen, wie lange auf die Medienfreiheit gewartet wurde. Außerdem ist der CCA Check für das X-System nicht implementiert (siehe 3.1.1)

3.3 Simulationsszenarien

3.3.1 Voruntersuchungen

Bevor die Simulationsszenarien geschaffen wurden, mussten noch gewisse Simulationsparameter durch Messungen bestimmt werden, da es sich bei dem X-System um noch keine frei zugängliche Funktechnik handelt. Diese Messungen beinhalten den maximalen Abstand zweier Funksysteme, für eine störungsfreie Übertragung, und den maximalen Signal-Störabstand. Diese Werte wurden unter Laborbedingungen bestimmt.

Zwischen Transmitter und Receiver wurden einstellbare Dämpfungsglieder verwendet. Diese bilden den Verlust des Mediums (Path Loss) ab. Aus dieser Dämpfung kann eine Entfernung errechnet werden (Formel 2.4ff). Protokolliert wurde der Path Loss, ab wann die Kollisionen so häufig waren, dass Befehle verloren gingen. Dies ist der minimale C/I Wert.

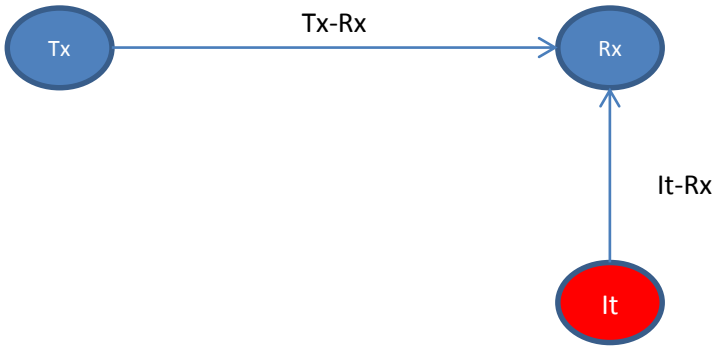


Abbildung 14, Messaufbau Voruntersuchung

In Abbildung 14 sind alle Funkmodule dargestellt. Der Transmitter Tx, der Receiver Rx und der Störsender It. Die Funkstrecken zum Receiver Tx-Rx und It-Rx sind durch die Dämpfungsglieder abgebildet.

Die in Tabelle 4 dargestellten Ergebnisse wurden genutzt, um Simulationsparameter in SEAMCAT einzustellen bzw. anzupassen.

Tabelle 4, Messergebnisse für das X-System

Strecke Tx-Rx	Dämpfung	dB	42	50	60	70	80
	Entfernung	m	1	3,1	10	31	100
Strecke It-Rx	Dämpfung	dB	47,7	57	67	77	87
	Entfernung	m	2,4	7	22	70	220
Auswertung	C	dBm	-26,8	-34,7	-45,1	-55	-65
	I	dBm	-27,7	-37	-47	-57	-67
	C/I	dB	0,9	2,3	1,9	2	2

Anhand Tabelle 4 wurde festgestellt, dass das minimale Carrier-zu-Interferer-Verhältnis (C/I) mindestens 2 dB betragen muss, um unter den geforderten 250 ms Verzögerungszeit zu liegen. Für die SEAMCAT Simulation wurde für eine Interferenz ein C/I von 3dB gesetzt. Für die Praxis ließ sich ableiten, dass wenn die Entfernung vom Interferer zum Receiver (It-Rx) mindestens 2,4-mal so groß ist wie die Entfernung vom Transmitter zum Receiver (Tx-Rx), keine gravierenden Beeinflussungen vom Störer auftreten werden. Bei einer Antennenhöhe von 1.5 m ergibt sich sowohl für den Transmitter als auch dem Receiver mit der Extended Hata Formel (2.4ff) für einen maximalen Path Loss von 108 dB eine maximale Entfernung von 220 m.

Die genauen Messwerte und Grafiken sind im Anhang zu finden.

Für die Simulationen wurden folgende Extended Hata Einstellungen vorgenommen:

Tabelle 5, Extended Hata Einstellungen

Wall Loss (indoor indoor)	5 dB
Wall Loss (indoor outdoor)	10 dB
Size of the Room	200 m
High of Each Floor	5 m
C/I	3 dB
Tx Höhe	1,5 m
Rx Höhe	1.5 m
Antenne	Dipol 0 dBi

3.3.2 Szenarien

Szenario I: Drei X-Systeme

Im ersten Szenario werden drei X-Systeme aufgestellt. Die schmalbandige Sendemaske erlaubt theoretisch bis zu 16 solcher Systeme. Die Sendemaske des X-Systems ist in 16facher Ausführung im 2,4 GHz ISM Band gezeigt. Da es sich um ein Frequency Hopping Verfahren handelt, werden alle Kanäle für einen gewissen Zeitraum belegt.

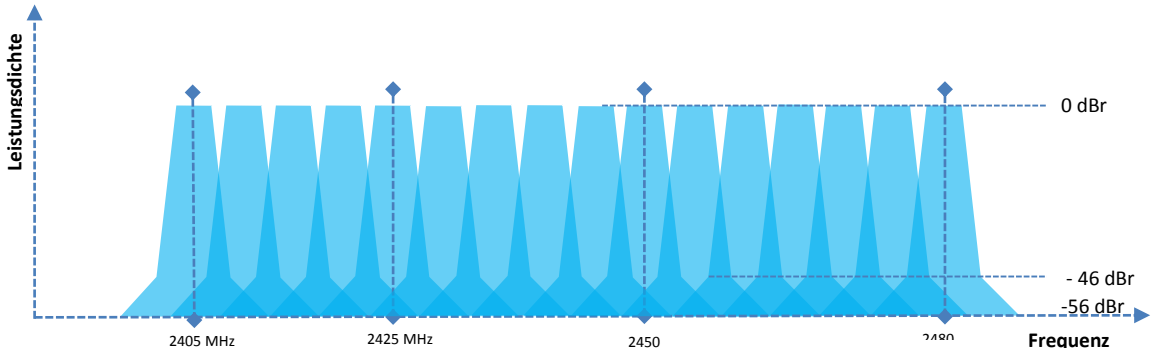


Abbildung 15, X-System Sendemaske nach 802.15.4 [17]

Szenario II: Zwei X-Systeme und ein WLAN System

Im zweiten Szenarium wurde statt eines dritten X-Systems ein breitbandigerer Störer betrachtet. In diesem Fall handelt es sich um ein WLAN System mit einer Bandbreite von 20 MHz [18].

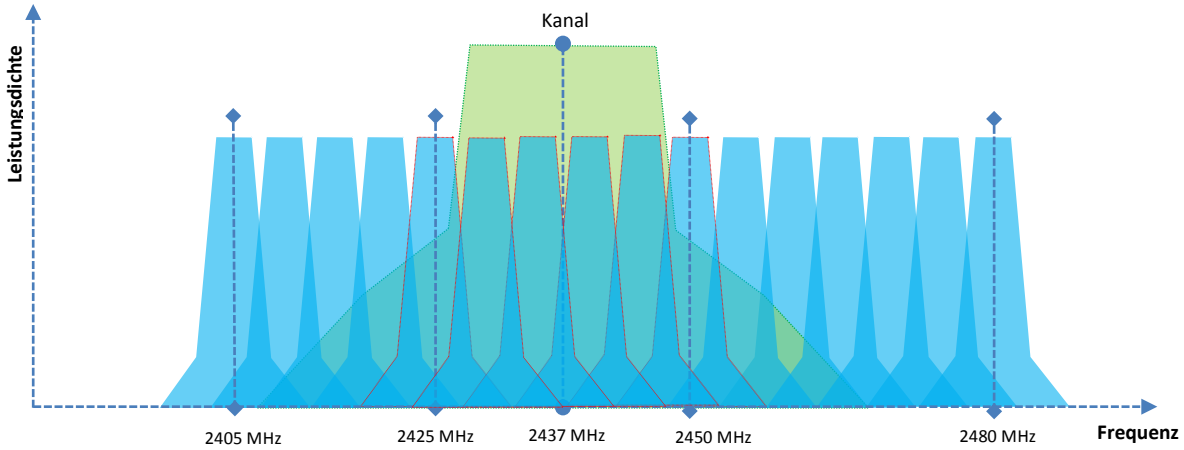


Abbildung 16, Spektrum des Simulationsaufbaus

3.4 Simulation

Nach der Überführung der oben genannten Messergebnisse in relevante Simulationsparameter wurden die Simulationsumgebungen nachgestellt. Das ifak Magdeburg machte bereits Untersuchungen zum Zeitverhalten des X-Systems (siehe Anlage).

3.4.1 Simulation von drei X-Systemen

Die Messumgebung wurde nun in der Simulation nachgestellt. Es handelt sich um drei X-Systeme mit folgender Anordnung:

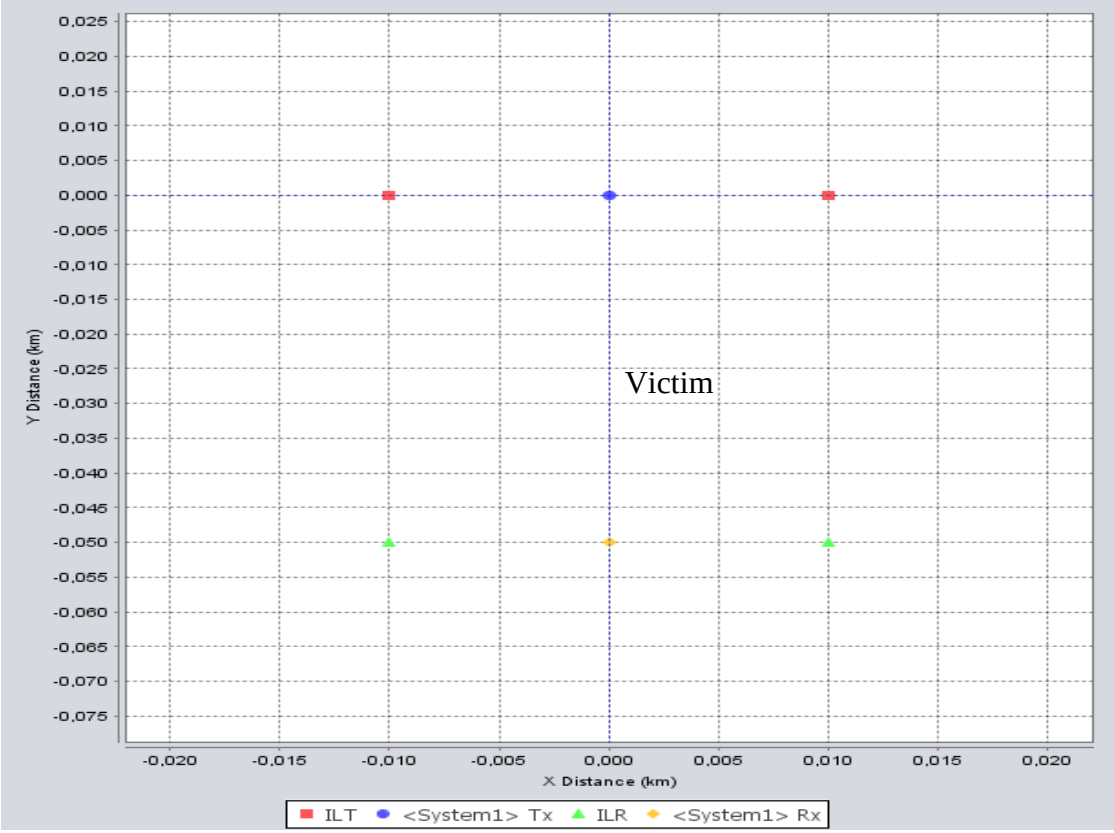


Abbildung 17, Simulationsszenarium für drei X-Systeme

Die Funkstrecke jedes Systems beträgt 50 m. Die beiden Störsysteme sind 10 m links bzw. 10 m rechts vom untersuchten System entfernt und parallel angeordnet. Diese Anordnung entspricht dem Test Case 02.01.02 (siehe Anlage), den das ifak Magdeburg erstellt hatte. Die Anzahl der Befehle sind gleich.

Das Zeitverhalten für diesen Test Case ist in Abbildung 18 gezeigt. Die Simulation soll nun nach Möglichkeit zu einem ähnlichen oder gleichen Ergebnis kommen.

Die Transmission Time liegt hauptsächlich zwischen 5 und 60 ms. Die Ausreißer größer 60 ms sind Framekollisionen. Dabei wird das Paket erst im nächsten Frame, 50 ms später, transmittiert. Transmissionszeiten kleiner 5 ms sind nicht typisch, da das Gerät eine Verarbeitungszeit aufweist und Ausbreitungszeiten des Signals hinzukommen.

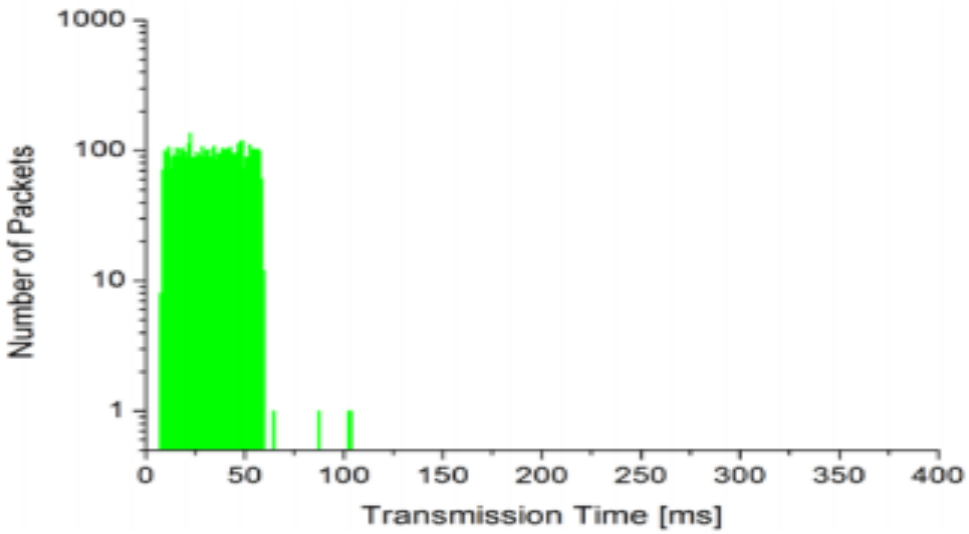


Abbildung 18, Zeitverhalten für den Test Case 02.01.02 des ifak Magdeburg

Die Simulation ergab folgendes Zeitverhalten für den Victim Link:

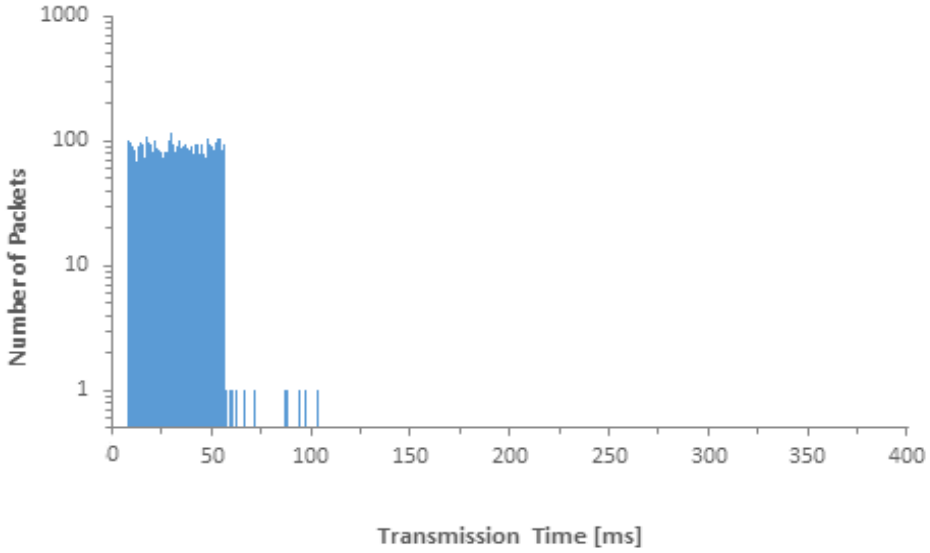


Abbildung 19, Simulation der Koexistenz von drei X-System

Tabelle 6, Simulationsergebnisse, Szenario I

Anzahl Events	900000	Events
Mittlere Slotlänge	49,83	ms
Mittlere Transmission Time	24,84	ms
Anzahl Frames	18205	Frames
Anzahl zerstörter Frames	30	Frames
	0,16	%
Fehlgeschlagene Übertragung	0	Befehle
	0,00	%
Anzahl Befehle	4551	Befehle
Befehlshäufigkeit	303,4	Befehle/min

3.4.2 Simulation von zwei X-Systemen und einem WLAN

Ein X-System wurde 10 m weiter entfernt vom Victim Link durch ein WLAN ersetzt.

Die Anordnung zeigt Abbildung 20:

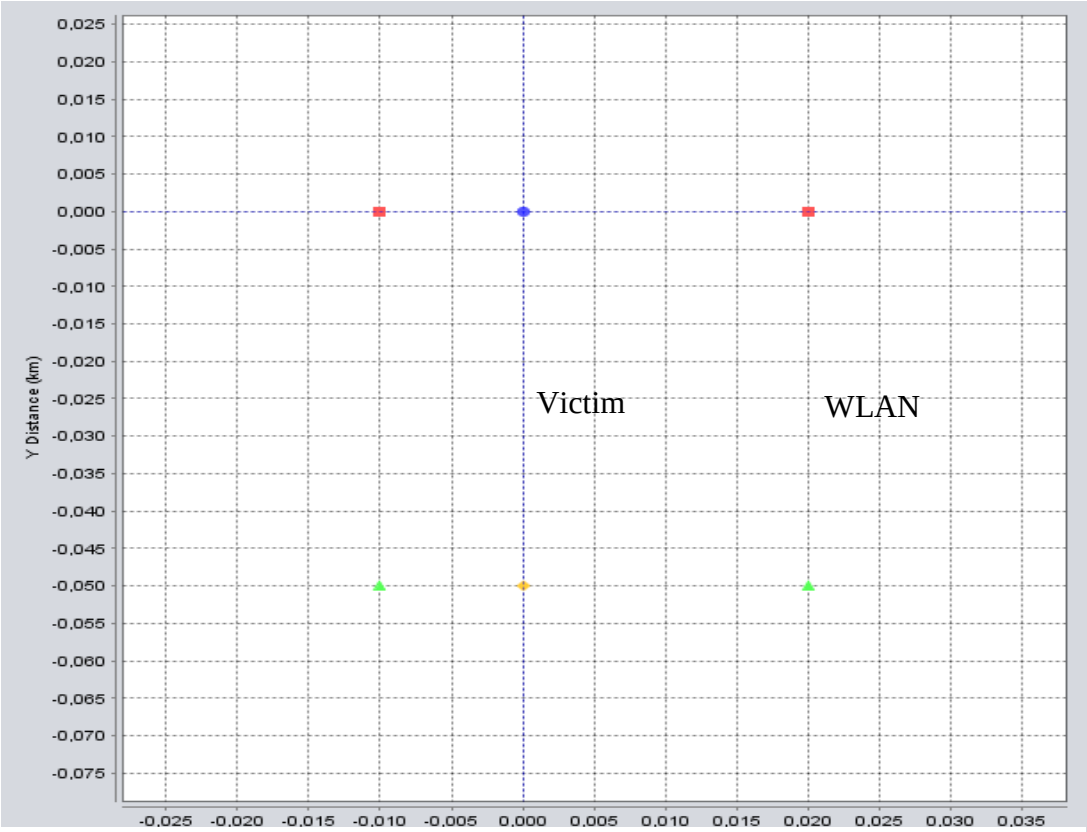


Abbildung 20, Simulationsszenarium mit zwei X-Systemen und einem WLAN

Die Funkstrecke jedes Systems beträgt 50 m. 10 m Links vom Victim Link befindet sich ein weiteres X-System. 20m vom untersuchten System entfernt wurde ein WLAN Link angeordnet. Auch hier sind alle Funkstrecken parallel zueinander ausgerichtet. Diese Anordnung entspricht dem Test Case 02.05.04 (siehe Anlage), den das ifak Magdeburg erstellt hatte.

Aufgrund der deutlich höheren Medienbelegung durch WLAN im Gegensatz zu einem X-System, kommt es sehr viel häufiger zu Kollisionen. Dies hat auch Auswirkungen auf das Zeitverhalten der X-Systeme. Die Verteilung der Transmissionszeiten liegt zwischen 5 und ca. 200 ms. Sie nimmt in 50 ms Schritten treppenförmig ab (Abbildung 21).

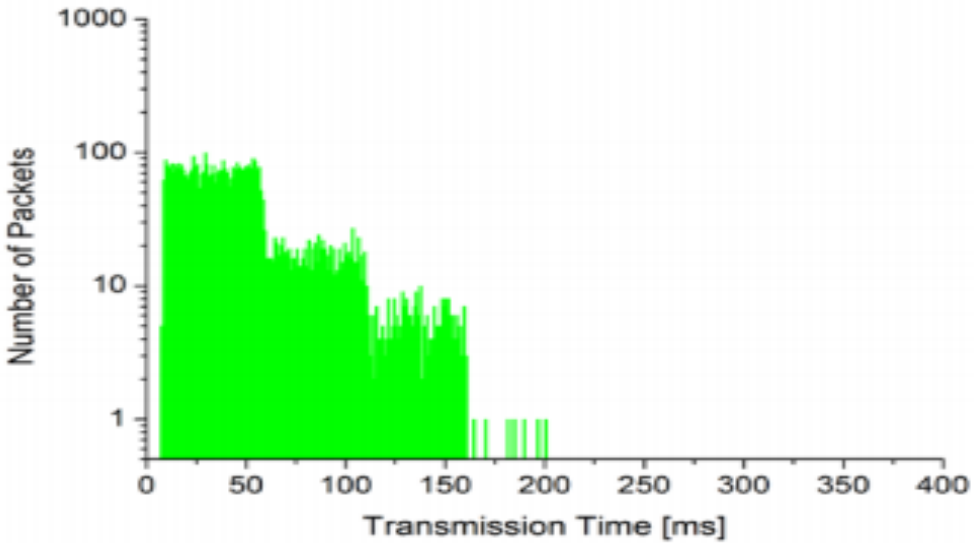


Abbildung 21, Zeitverhalten für den Test Case 02.05.04 des ifak Magdeburg

Die Simulation ergab folgendes Zeitverhalten für den Victim Link:

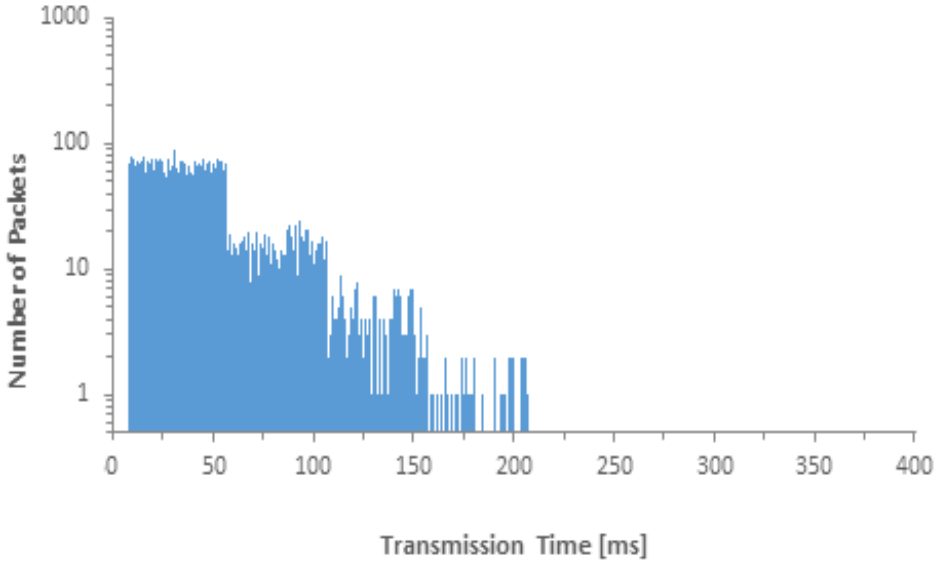


Abbildung 22, Simulation der Koexistenz von zwei X-System mit einem WLAN

Tabelle 7, Simulationsergebnisse, Szenario II

Anzahl Events	900000	Events
Mittlere Slotlänge	49,48	ms
Mittlere Transmission Time	45,90	ms
Anzahl Frames	17898	Frames
Anzahl zerstörter Frames	4181	Frames
	23,36	%
Fehlgeschlagene Übertragung	7	Befehle
	0,16	%
Anzahl Befehle	4474	Befehle
Befehlshäufigkeit	298,27	Befehle/min

3.5 Simulationsauswertung

3.5.1 Simulation von drei X-Systemen

Die Simulation zeigt große Übereinstimmungen mit den Messergebnissen. Die Transmissionszeit liegt zwischen ca. 5 und 60 ms und es gibt einige Kollisionen. Es treten in der Simulation lediglich einige mehr auf als in den Messungen. Dies liegt unter anderen daran, dass zum Beispiel keine Frequenzspreizverfahren simuliert werden können bzw. der Carrier Sense in der Simulation nicht implementiert ist. Doch die Simulation zeigt auch, dass das Vernachlässigen dieser Techniken keine gravierenden Unterschiede zur Folge hat.

3.5.2 Simulation von zwei X-Systemen und einem WLAN

Auch in dieser Simulationen sind große Übereinstimmungen zu erkennen. Die Treppenform ist zu erkennen, jedoch treten auch hier mehr Kollisionen auf, die auf den fehlenden CCA Check zurückzuführen sind. Der Effekt ist mit einem WLAN sogar noch verstärkt aufgetreten. Begründen lässt sich dies durch eine häufige, kurz andauernde, Medienbelegung eines WLAN Netzes. Kurze Medienbelegungen können durch den CCA Check des X-Systems abgewartet werden und Kollisionen somit vermieden werden. Allgemein lässt sich sagen, dass breitbandige Störquellen einen gravierenden Effekt auf das Zeitverhalten mit sich bringen.

3.5.3 Zusammenfassung

Die Simulationen haben gezeigt, dass die stochastische Betrachtung von SEAMCAT in der Lage ist, über die Koexistenz von mehreren Funkdiensten eine Aussage zu treffen. Obwohl einige Technologien nicht angewendet werden können, gibt es gute Übereinstimmungen mit realen Messungen. Jedoch findet die Zeitauswertung in einem externen Tool statt und es kann immer nur ein System betrachtet werden. Um mehrere Systeme in einem Szenario zu untersuchen, muss die Verteilung von Victim und Interferer in jeder Simulation neu vergeben werden bis jedes System einmal ein Victim Link war. Dieser Weg bietet zwar keinen unmittelbar direkten Zusammenhang der Medienbelegung der Funksysteme, doch in den Testsimulationen deutete sich an, dass aufgrund der stochastischen Betrachtung eine nacheinander ablaufende Simulation für die einzelnen Funkdienste ausreicht und gute Simulationsergebnisse liefert. Das externe Tool muss außerdem für jede Funktechnik angepasst oder entworfen werden, um das Zeitverhalten darstellen zu können. In dieser Arbeit wurde nur die Zeitbetrachtung des X-Systems angestrebt. Für die Simulation in der Automation, bei der viele verschiedene Funksysteme arbeiten, über die eine Auskunft des Zeitverhaltens wichtig ist, zeigte sich das SEAMCAT an seine Grenzen stößt. Prinzipiell ließe sich jedes Funksystem in seiner

Umgebung einzeln Simulieren, doch diese Methode würde bei vielen Einzelsystemen vom Aufwand keinen Mehrgewinn gegenüber anderen Simulationstools mit sich bringen. In dem folgendem Punkt wird daher ein Weg vorgestellt, wie sich die Schwächen von SEAMCAT kompensieren lassen. Die getestete Version 4.1 von SEAMCAT sollte daher noch nicht für Koexistenzuntersuchungen für Zeit- und Fehlerverhalten in der Automation angewendet werden.

4 Analyse

Im Punkt 3 konnte nun gezeigt werden, dass SEAMCAT mit seiner stochastischen Herangehensweise recht genaue Simulationsergebnisse liefern kann. Doch es sind auch die Grenzen von SEAMCAT offen gelegt worden.

4.1 SEAMCAT und Kolorierte Petri Netz

4.1.1 Rückblick

SEAMCAT und CPN Tools besitzen individuelle Vor- und Nachteile. CPN Tools kann ein sehr genaues Systemverhalten wiedergeben, besitzt aber derzeit nur eine schwierige Umsetzung auf einer Programmieroberfläche. CPN Tools fehlen Eigenschaften eines Übertragungskanals, die durch eine einfache Erweiterbarkeit ergänzt werden können. SEAMCAT besitzt zahlreiche Kanalmodelle und eine einfache grafische Oberfläche, außerdem können Funksysteme leicht im Raum verteilt werden. SEAMCAT fehlt aber das genaue Systemverhalten der Funksysteme und die Mehrfachbetrachtung von Funksystemen.

4.1.2 SEAMCAT und CPN Tools

Eine Kombination aus beiden Tools würde dagegen die Schwächen des jeweils anderen ausgleichen. Eine Erweiterung des CPN Tools ist für diesen Weg meiner Meinung nach nicht notwendig. Es kann bereits mit beispielsweise Java-Anwendungen kommunizieren. Dies wurde bereits in der Arbeit von Herrn Heinemann [7] 2013 erfolgreich nachgewiesen. SEAMCAT ist ein Simulationstool, das auf Java basiert. Der Quellcode konnte bereits in eine Programmierumgebung eingebunden werden und kann somit manipuliert und bearbeitet werden. Eine Kommunikation zwischen SEAMCAT und CPN Tools sollte daher keine Probleme mit sich bringen. Im externen Tool, das von Herrn Heinemann ausgearbeitet wurde, mussten die Simulationsszenarien jedoch im Quellcode konfiguriert werden und konnten im Laufe einer Simulation nicht verändert werden. Auch Frequenzsprung Funktechniken konnten nicht erstellt werden.

SEAMCAT sollte zukünftig in der Lage sein, kolorierte Petri Netze zu importieren oder mit ihnen über eine Schnittstelle zu kommunizieren. Diese Funktion würde den gesamten Bereich der Medienzugrifftechniken wie FH, CCA und Framebildung abdecken. Die Kanaleigenschaften werden dann wieder von SEAMCAT übernommen. Auch die Synchronisation und Konfiguration der Petri Netze sollten hier von SEAMCAT durchgeführt werden. Wichtig ist zukünftig die Bewertung von mehreren Funksystemen in einer Simulation. Dies sollte durch den offen stehenden Quellcode implementierbar sein.

Die Auswertung des Zeit- und Fehlerverhaltens findet dann wieder ganz normal im CPN Tool statt. Die Zufallsgrößen, die SEAMCAT beherrscht, sind vom großen Vorteil bei der Konfiguration einiger Größen. Parameter für die eine zufällige Erzeugung von Vorteil ist:

- Zeit der Frameerzeugung
- Zufällige Verteilung von Sende- und Empfangsposition
- Zufällige Frequenzwahl bei FH Systemen
- Erzeugen von Zufallszahlen bei Wartezeiten

Feste Simulationsparameter wie der CCA Threshold oder die maximale Sendeleistung zum Beispiel lassen sich auf der grafischen Oberfläche einstellen. Damit steuert SEAMCAT die Medienzugriffe, die im CPN Tool definiert sind. Das Kanalmodell muss dann mit dem Medienzugriff kommunizieren um CCA Checks und Interferenz Checks durchzuführen, da einige Funktechniken auf Medienfreiheit warten, oder gestörte Frames erneut übertragen werden. Im Untenstehenden Bild werden die Zusammenarbeit der beiden Simulationstools und deren Schnittstellen gezeigt.

4.1.3 Definition der Kommunikationsschnittstellen

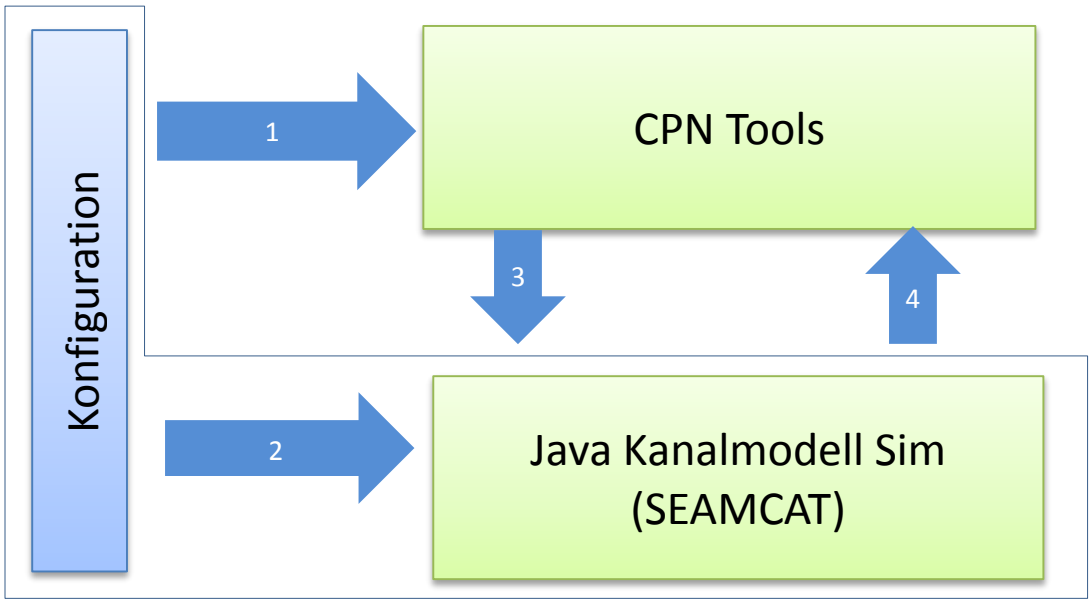


Abbildung 23, Schnittstellenbeschreibung

Für die Übergabe von Parametern sind Schnittstellen notwendig. Für die Verwendung werden mindestens 4 Übergabepunkte benötigt (siehe Abbildung). An diesen Schnittstellen müssen einzelne Werte oder Arrays übergeben werden.

Die Kolorierten Petri Netze, die das Systemverhalten der Funktechnologien beschreiben, müssen als Receiver und als Transmitter in einem Netz erstellt werden. Dazwischen liegt das Medium das Extern in SEAMCAT dargestellt wird. Im Petri Netz müssen außerdem Eigenschaften genannt werden, die den Medienzugriff definieren. Handelt es sich um ein Listen Bevore Talk System (LBT) muss eine Anfrage an das SEAMCAT gestellt werden, ob das Medium bereits belegt ist oder nicht. Hierbei muss die Schwelle vorher definiert werden, ab wann das Medium als „belegt“ erkannt wird. Ebenso ist zu beschreiben, ob es einen Rückkanal geben muss, bzw. was passiert, wenn keine Bestätigung von der Gegenseite eines Senders erkannt wurde. Paketlängen, Wartezeiten und Medienbelegung können bereits im Petri Netz enthalten sein.

Die Synchronisation aller Funksysteme muss extern erfolgen, da man sonst Gefahr läuft, dass eines oder mehrere Funksysteme nicht mehr denselben Zeittakt verwenden. Dies sollte vermieden werden, da sonst falsche Interferenzen oder Medienfreiheiten übergeben werden könnten. Wie eine solche Synchronisation auszusehen hat, wurde bereits in [7] dargestellt. Der Austausch der Daten erfolgt über die Schnittstelle 1. Es muss jeweils eine Verbindung für jedes Petri Netz existieren.

Tabelle 8, Parameter bei Schnittstelle 1

Parameter	**Variable**	**Erläuterung**	**Einheit**
CCA Threshold	CCA_thres_n	Für die Entscheidung der Medienfreiheit	dBm
Sensitivity	sensitivity_n	Für die Erkennung von Paketen	dBm
Zeit	time	Für die Vergabe von einheitlichen Zeitstempeln	µs
Frequenz / Kanal	freq_n	Übergabe an das Kanalmodell, zu Berechnung des Verlustes	MHz
Frequenzband	f_range_n	Bereich der Kanäle (für FHSS Systeme)	MHz
Kanalabstand	f_distance_n	Abstand zweier Kanäle	MHz

SEAMCAT benötigt für das Kanalmodel einige Parameter, um den Verlust der abgestrahlten Leistung im Raum zu berechnen. Diese werden von der Konfiguration übergeben. Der Austausch dieser Daten erfolgt über die Schnittstelle 2.

Tabelle 9, Parameter für Schnittstelle 2

Parameter	**Variable**	**Erläuterung**	**Einheit**
Sendemaske _n	mask_n	Leistungsverteilung des Senders	dBc/MHz
Bandbreite _n	B_n	Bandbreite eines Systems	kHz
Sendeleistung _n	Pout_n	Sendeleistung eines Systems	dBm
Ort Sender		Koordinaten zum Bezugssystem (Tx)	-
Tx _x _n	tx_x_n	X Koordinate	km
Tx _y _n	tx_y_n	Y Koordinate	km
Ort Empfänger		Koordinaten zum Bezugssystem (Rx)	
Rx _x _n	rx_x_n	X Koordinate	km
Rx _y _n	rx_y_n	Y Koordinate	km
Antennenhöhe		Höhe der Antenne pro Antenne (Tx/RX)	-
Tx _h _n	tx_h_n	Für Transmitter	m
Rx _h _n	rx_h_n	Für Receiver	m
Ort (indoor/outdoor)	door	Für das Hinzufügen von Wandverlusten	-
Antennenparameter		Ausbreitung der EMV durch Antenne	-
Azimuth _Tx _n	azi_tx_n	Azimuth Richtchar. Transmitter	deg
Elevation _Tx _n	ele_tx_n	Elevation Richtchar. Transmitter	deg
Azimuth _Rx _n	azi_rx_n	Azimuth Richtchar. Receiver	deg
Elevation _Rx _n	ele_rx_n	Elevation Richtchar. Receiver	deg
Antennengewinn _Tx _n	G_tx_n	G von Transmitter	dBi
Antennengewinn _Rx _n	G_rx_n	G von Receiver	dBi
max. C/I _n	CI_n	Interferenzkriterium	dB
Kanalmodell	PM	Art des Kanalmodells	-

Für eine Bewegung von Funksystemen sind weitere Parameter notwendig, die über dieselbe Schnittstelle übermittelt werden können.

Tabelle 10, Parameter für bewegte Funksysteme (kommen zu Schnittstelle 2 hinzu)

Parameter	Variable	Erläuterung	Einheit
Schutzzone	r_safe	Gebiet um dem Victim, wo keine Antenne zufällig erzeugt wird	km
Simulationsradius	r_sim	Radius für die zufällige Verteilung der Antennenpositionen	km
Azimuth _Verteilung	Az_vtl	Polare Beschreibung der Verteilungsrichtung (360=Kreisförmig)	deg
Distance	d	Mittlerer Abstand zweier Antennenpositionen	km

Nun erfolgt die Interaktion zwischen dem kolorierten Petri Netz und dem Kanalmodel. Das CPN Tool gibt Parameter an das Kanalmodell weiter. Der Austausch dieser Daten erfolgt über die Schnittstelle 3. Es muss jeweils eine Verbindung für jedes Petri Netz existieren.

Tabelle 11, Parameter für Schnittstelle 3

Parameter	Variable	Erläuterung	Einheit
Sendezeitpunkt	t_send_n	Zeitpunkt bei Sendebedarf	ms
Frequenz / Kanal	f_send_n	Auf Welchen Kanal wird gesendet	MHz
Belegungsdauer	send_length_n	das Medium wird (eventuell) für diese Zeit reserviert	ms
Status	Status_n	Gibt den Zustand des Senders/Empfängers an	-

Nachdem das Kanalmodell angewandt wurde, müssen Parameter an das CPN Tools wieder zurück übergeben werden. Das Kanalmodell trifft die Aussage über eine Medienfreiheit oder einer Interferenz. Dafür berechnet es den dRSS und den iRSS. Der Austausch dieser Daten erfolgt über die Schnittstelle 4. Es muss jeweils eine Verbindung für jedes Petri Netz existieren.

Tabelle 12, Parameter für Schnittstelle 4

Parameter	Variable	Erläuterung	Einheit
Medienfreiheit an Position von n	iRSS_n	Statuswert für Leistung an Position von n	dBm
Interferenz	collision_n	Statuswert für eine vorliegende Interferenz	-

Abschließend kann das CPN Tools nun die weiteren Schritte einleiten. Muss eine Sequenz wiederholt werden oder wird sie als gestört oder als erfolgreich transmittiert bewertet. Die Auswertung von Verzögerung und Fehlerverhalten werden ebenfalls dort vorgenommen.

Die Frameerzeugung, die derzeit noch durch einstellbare Stochastikgrößen rein zufällig erzeugt werden, können durch eine externe Kommunikationseinheit ersetzt werden. Das CPN Tools übergibt den Wunsch einer Framebildung über die Schnittstelle 3 an SEAMCAT. Diese Methode könnte auf das gleichzeitige Berechnen von mehreren Funkstrecken verzichten, wenn für die Berechnungszeit des Kanalmodels das CPN Tools in einen Wartemodus übergeht. Dadurch kann SEAMCAT die Kanalmodelle jedes Funksystems nacheinander abhandeln. Die Übergabe der Ergebnisse zu einem Frame erfolgt anschließend über die Schnittstelle 4.

Einstellungen, die die Propagation Models betreffen, sind direkt in der Konfiguration unter SEAMCAT einzustellen. Diese müssen jedoch zu keinem Zeitpunkt übergeben bzw. synchronisiert werden, weshalb diese nicht als Parameter hier definiert werden.

4.1.4 Definition der Parameter:

Parameter können verschiedene Größen oder Informationen beinhalten, die das Verhalten von einigen Funksystemen beeinflussen. Diese Parameter werden als Variablen übergeben und werden nun genauer spezifiziert.

Variable	Datentyp	Einheit	Erläuterung
n	int	-	interne Nr. eines Funksystems
CCA_thres_n	double	dBm	Schwellwert zur Erkennung von Medienbelegung
sensitivity_n	int	dB	Schwellwert zur Erkennung eines Frames
time	long	µs	Laufende Zeit
freq_n	int	MHz	Frequenz
f_range_n	int	kHz	genutzes Frequenzband für FH
f_distance_n	int	kHz	Abstand zweiter Kanäle
mask_n	double	dBc/MHz	Sendemaske eines Systems in MHz-Schritten
B_n	double	kHz	Bandbreite
Pout_n	int	dBm	Ausgangsleistung
tx_x_n	Float	km	Antennenposition
tx_y_n	Float	km	Antennenposition
rx_x_n	Float	km	Antennenposition
rx_y_n	Float	km	Antennenposition
tx_h_n	Float	m	Antennenhöhe des Transmitters
rx_h_n	Float	m	Antennenhöhe des Receivers
azi_tx_n	Float	Deg	Azimuth Winkel
ele_tx_n	Float	Deg	Elevation Winkel
azi_rx_n	Float	Deg	Azimuth Winkel
ele_rx_n	Float	Deg	Elevation Winkel
G_tx_n	Float	dBi	Antennengewinn
G_rx_n	Float	dBi	Antennengewinn
CI_n	float	dB	CI_n=C_n / I_n

Door_n	char	-	Umgebung des Funksystems
		-	indoor
		-	outdoor
PM	char	-	Art des Kanalmodels
		-	Extended Hata
		-	Free Space
t_send_n	long	µs	Sendezeit
f_send_n	int	MHz	Sendefrequenz
send_length_n	int	µs	Sendedauert
iRSS_n	double	dBm	Ungewollte Sendeleistung
colision _n	Boolean	-	Auftreten von Kollisionen
		-	Wahr
		-	Falsch
Status_n	char	-	Status eines Funksystems
		-	Wartezustand
		-	Am Senden/Empfangen
		-	Carrier Sense
		-	Sendebeginn
C_n =dRSS(n)	Double	dBm	Gewollte Sendeleistung
I_n = iRSS(n)	double	dBm	Ungewollte Sendeleistung

4.1.5 Auswertung

Im Punkt 4 wurde offengelegt, dass SEACAMT, da es sich um ein offen stehendes Java Programm handelt, in einigen Funktionen angepasst werden kann. Diese Anpassungen sind notwendig, um genauere Zeit- und Fehlerbetrachtungen durchführen zu können. Die Automation verlangt eine solche Zeitbetrachtung. Dafür sind genaue Systemverhalten und direkte Medienbelegungen der Funksysteme wichtig. Um diese mit SEAMCAT zu bekommen, müssen noch eine Reihe von Anpassungen vorgenommen werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist SEAMCAT jedoch noch nicht in der Lage, die gewünschten und geforderten Ansprüche voll und ganz zu erfüllen.

5 Empfehlungen und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, SEAMCAT für Koexistenzbetrachtungen in der Automation auf eine genaue Eignung zu untersuchen und Methoden zu entwickeln, wie sich der Funktionsumfang erweitern lässt. Dafür wurden Simulationen und Vergleiche mit realen Messungen erstellt. Eine externe Auswertung ergänzt SEAMCAT um Zeitbetrachtungen von Signalen.

5.1 Empfehlungen

Im Laufe der Arbeit sind Erkenntnisse über Funksysteme im Hinblick auf Ressourcenverbrauch und Effizienz aufgekommen.

5.1.1 WLAN

WLAN Systeme für die Automation sind kostengünstige Maßnahmen für die Drahtlosvernetzung von vielen Geräten. Für die Automation sind jedoch nur geringe Datenraten notwendig, wodurch sich eine gewisse Ineffizienz zwischen benötigter Bandbreite und Datenrate ergibt. Eine Empfehlung ist die weitere Reduzierung der Bandbreite von 20 MHz auf Beispielsweise 10 oder sogar 5 MHz. Dort sollte eine ausreichende Datenrate zur Verfügung stehen und die Anzahl von Funksystemen in 2,4 GHz Band kann deutlich erhöht werden. Für den Fall das doch große Datenraten übertragen werden sollen (etwa für Videoübertragungen) empfiehlt sich der Einsatz von WLAN im 5 GHz Band.

5.1.2 X-System

Das X-System zeigte sich in Messungen und Simulationen als robustes Funksystem. Gegenüber starren breitbandigen Störquellen sind Verbesserungen im Zeitverhalten durch adaptive Frequenzwahl realisierbar. Dadurch werden Bereiche in denen es häufig Kollisionen gibt, nicht mehr verwendet. Dies kann durch eine manuelle Einstellmöglichkeit oder durch einen automatischen Algorithmus ermöglicht werden.

5.1.3 SEAMCAT und neue Simulationstools

SEAMCAT lag für diese Arbeit in der Version 4.1 vor. Diese existiert derzeit nur in einer 32bit Version. Mit SEAMCAT 5.0, das vom ECO für das Jahr 2015 angekündigt wurde, steht eine Vielzahl an Verbesserungen bevor. So soll erstmals auch eine 64bit Version zur Verfügung stehen, die es erlaubt, mehr Funksysteme und weit mehr Events zu erzeugen. Die Anzahl der Events ist derzeitig noch auf ca. 1,2 Millionen für drei Systeme beschränkt.

Es werden auch Verbesserungen angestellt, dass Events mit besserem Systemverhalten erstellt werden können. Außerdem soll es leichter werden eigene Plug-Ins zu integrieren.

Eine Möglichkeit ist auch, die Arbeit von Herrn Heinemann[7] und Dr. Schimschar[3] weiter zu entwickeln. Dort sind FH Systeme und mehrere Sendemasken noch nicht implementiert. Sie kommen aber der Funktion von SEAMCAT sehr nahe. Da es sich bei diesem Tool noch um eine Java Entwicklungsumgebung handelt, konnte dieses entwickelte Tool nicht weiter berücksichtigt werden.

5.2 Ausblick

Funklösungen in der Automation werden in Zukunft eine immer größere Rolle spielen. Die im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 geforderte Informatisierung der Fertigungstechnik [Vergl.16] erfordert eine Kommunikationsmöglichkeit für zahlreiche Sensoren und Aktoren mit dem Internet. Aus Platz- und Kostengründen dürften immer mehr Funktechnologien diese Aufgabe übernehmen. Aufgrund der wachsenden Anzahl dieser Funksysteme in der Industrie, muss die Koexistenz dieser Funklösungen gewährleistet sein. Für diese Aussichten sind Simulationen für die Koexistenz eine Erleichterung für den Einsatz zuverlässiger Funksysteme.

VII. Literaturverzeichnis

[1] ZVEI – Fachverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. Fachverband Automation. „Koexistent von Funksystemen in der Automatisierungstechnik“ – November 2008

[2] Marco Krätzig, Lutz Rauchhaupt. SDI D3 Systemspezifikation. ifak e.V. Magdeburg – März 2014

[3] Dip. Ing. Andre Schimschar. Dissertation „Modellierung des Zeit und Fehlverhaltens industrieller Funklösungen zur Bewertung der Koexistenz“ – September 2013

[4] Martin Sauter. „Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme“. Vieweg & Sohn Verlag – 2008

[5] SEAMCAT Handbook, European Communications Office – 2010

[6] Fraunhofer Heinrich Hertz Institute: „Quadriga User Manual and Documentation” v1.2.3-307 – April 2014

[7] Hannes Heinemann. Bachelorarbeit. Umsetzung eines Kanalmodels für Petri-Netz modellierte Funksysteme. – Januar 2013

[8] CPN Dokumentation Website. http://cpntools.org/documentation/start - 24.09.2014

[9] Prof. Dr.-Ing Martin Bossert. „Einführung in die Nachrichtentechnik“. Oldenbourg Verlag München – 2012

[10] Information document for SEAMCAT-3 Wiki Help database. SEAMCAT implementation of Extended Hata and Extended Hata-SRD models. http://tractool.seamcat.org/wiki/Manual/PropagationModels/ExtendedHata. - 2014

[11] Ralf Gessler, Thomas Krause. „Wireless-Netzwerke für den Nahbereich”. Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden – 2009

[12] Verein Deutscher Ingenieure. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. „Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik“ VDI/VDE 2185 – Juni 2006

[13] Meinke, Gundlach. „Taschenbuch der Hochfrequenztechnik - Grundlagen, Komponenten und Systeme“. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg. Herausgegeben von Klaus Lange und Karl-Heinz Löcherer – 1992

[14] ETSI, EN 300 328 V1.8.1, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM), Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive – 2012

[15] RECOMMENDATION, ITU-R M.1450-4: Characteristics of broadband radio local area networks. 2010

[16] Wikipedia Artikel zu Industrie 4.0: http://de.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0: 15.01.2014

[17] IEEE Std 802.15.4 - Standards for Local and metropolitan area networks – Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). 2011

[18] IEEE 802.11 - Standards for Information technology – Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2012

VIII. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Stefan Ruzicka, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Simulation von Koexistenzszenarien für die Automation mit SEAMCAT an einem Anwendungsbeispiel“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Magdeburg, den 27.02.2015 _____

Ort, Datum Unterschrift

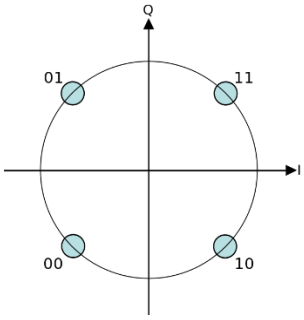
IX. Anlagenverzeichnis

- Offset QPSK
- ifak Magdeburg Ergebnisse zum X-System
- X-System Voruntersuchung Messung SIR

X. Anlagen

Offset QPSK

Offset QPSK (OQPSK) ist eine spezielle Form der Quadrature Phase-Shift Keying. Diese Form soll das Absenken der Amplitude vermeiden, die entsteht, wenn eine 180° Drehung erfolgt. Bei einer 180° Drehung muss man durch den Nullpunkt, sodass eine Änderung der Amplitude nicht vermieden werden kann. OQPSK bietet dabei eine Lösung. Dabei werden der Realteil und der Imaginärteil des komplexen Symbols um eine halbe Symboldauer zeitversetzt gesendet, sodass die maximale Änderung nur noch 90° statt wie bei der herkömmlichen QPSK 180° beträgt.

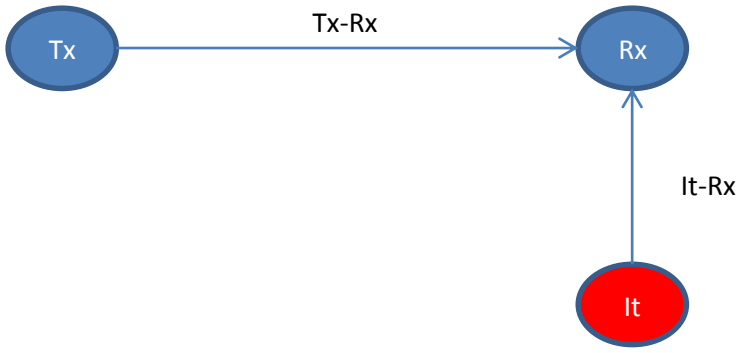


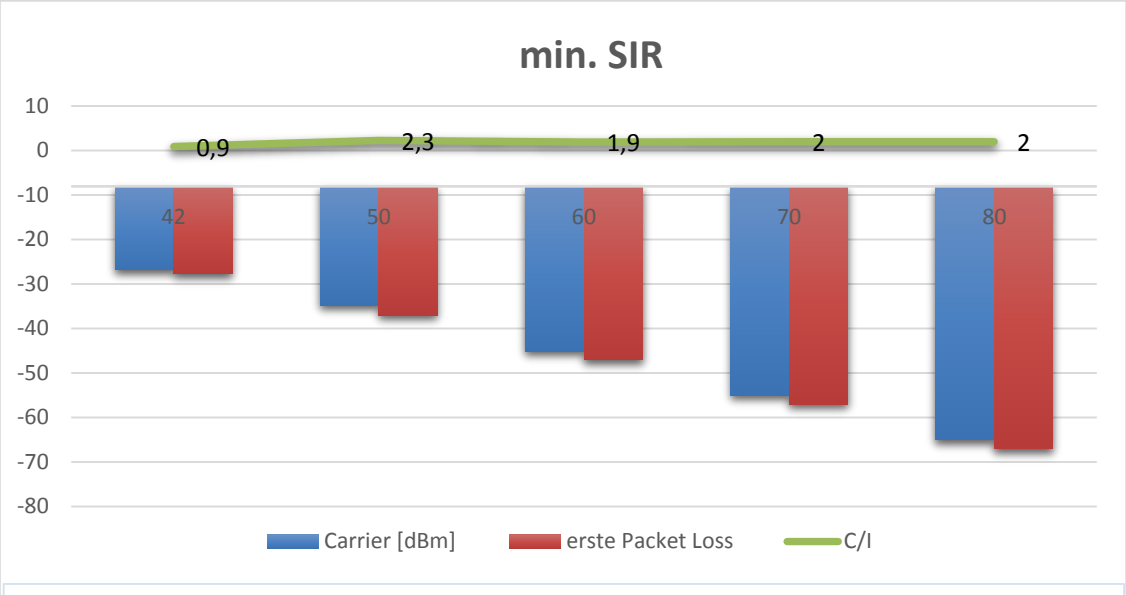
Anschaulich kann man sich vorstellen, dass der Verlauf der Zustandsübergänge der Form des von den vier Zuständen begrenzten Quadrates folgt und nicht mehr den diagonalen Weg durch den Nullpunkt nehmen kann. Das Konstellationsdiagramm von QPSK veranschaulicht diesen Sachverhalt. Mit einem Symbol können 4 Zustände auftreten, weshalb man 2 Bit pro Symbol kodieren kann.

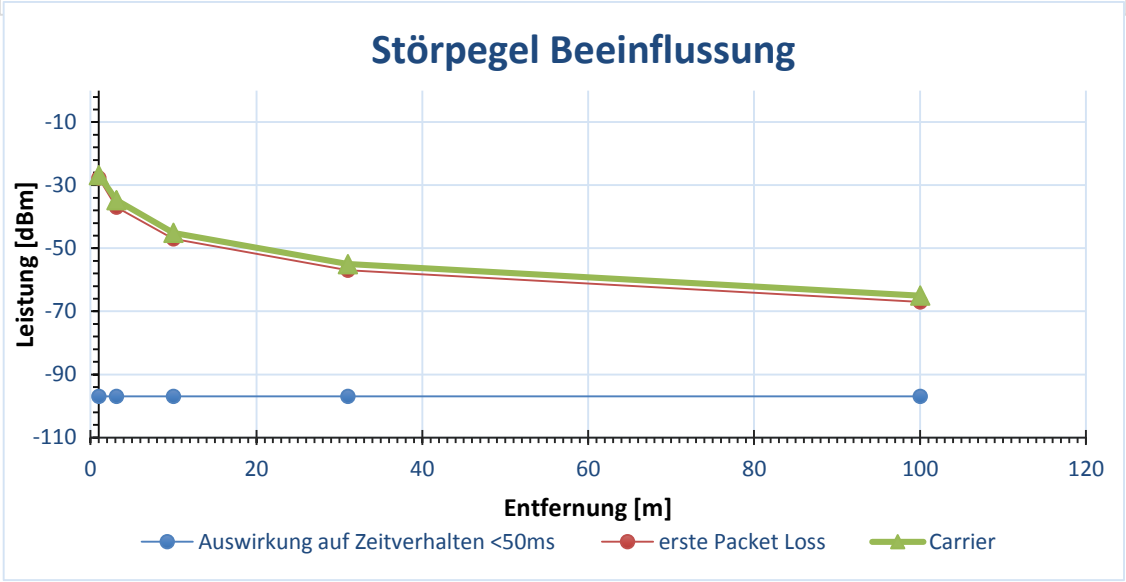
ifak Magdeburg Ergebnisse zum X-System

PDF Anhang (nur für intern)

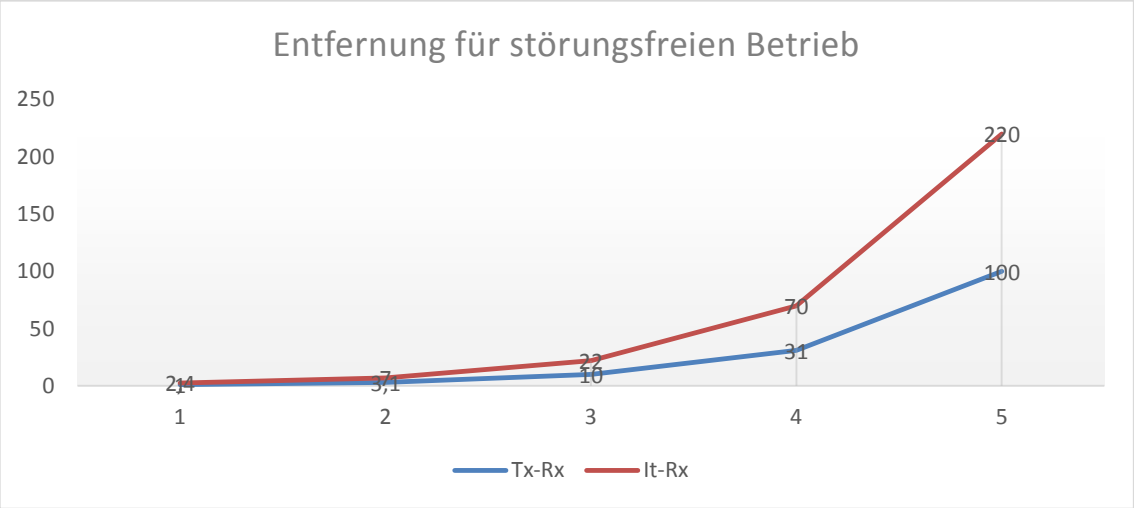
X-System Voruntersuchung Messung des SIR







Nach der Messung konnte gesagt werden, dass 2 Funksysteme mit gleicher Sendeleistung, ohne gravierenden Störeinflüsse senden können, wenn die Störstrecke (It-Rx) mindestens um den Faktor 2,4 mal so groß ist, wie die Sendestrecke (Tx-Rx).


Entfernung für störungsfreien Betrieb
250
200
150
100
50
0
1
2
3
4
5
220
100
70
31
22
10
7
3,1
2,4
1
Tx-Rx
It-Rx