

Bachelorarbeit

Tim Meinhardt

Prüfstandkonzept für die Leistungsfähigkeit von
Sub-GHz Empfängern

Tim Meinhardt

Prüfstandkonzept für die Leistungsfähigkeit von Sub-GHz Empfängern

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Bachelor of Science Mechatronik
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Ralf Wendel
Zweitgutachter: Dr.-Ing. Horst Röhm

Eingereicht am: 24.09.2019

Tim Meinhardt

Thema der Arbeit

Prüfstandkonzept für die Leistungsfähigkeit von
Sub-GHz Empfängern

Stichworte

Empfindlichkeit, Blocking, Paketfehlerverhältnis, Bitfehlerverhältnis, Test Execution Engine, Signalgenerator, Prüfstand, Bit Error Rate

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeption eines Prüfstandes für die Leistungsfähigkeit von Sub-GHz Empfänger. Der Fokus liegt dabei auf einer einfachen Konfigurationsmöglichkeit und der automatisierten Erfassung der Messgrößen.

Tim Meinhardt

Title of Thesis

Test bench concept for evaluation of Sub-GHz receiver

Keywords

Sensitivity, Blocking, Frame Error Ratio, Bit Error Ratio, Test Execution Engine, Signal Generator, Test Bench, Bit Error Rate

Abstract

This thesis describes a concept of an RF-Test Bench for Sub-GHz Receiver. This includes a simple configuration of the Test Bench and an automated measurement process.

Inhaltsverzeichnis

Akronyme	v
Symbole	vii
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	2
1.2 Stand der Technik	3
2 Hauptteil	5
2.1 Messgrößen und Erfassung	5
2.1.1 Bitfehlerverhältnis	6
2.1.2 Empfindlichkeit	13
2.1.3 Blocken ungewollter Signale	18
2.1.4 Weitere Messgrößen	20
2.2 Prüfstand	20
2.2.1 Konzept	21
2.3 Prüfstandsanzwendung	28
2.3.1 Vergleich von verschiedenen Messunsicherheiten	28
2.3.2 Empfängervergleich	29
2.3.3 Messungen mit zwei veränderbaren Umgebungsparametern	30
3 Zusammenfassung und Ausblick	32
3.0.1 Zusammenfassung	32
3.0.2 Ausblick	32
Literatur	34
Selbstständigkeitserklärung	37

Akronyme

16-PSK 16 Phase-Shift Keying.

8-PSK 8 Phase-Shift Keying.

ASK Amplitude-Shift Keying.

BAT-Datei Stapelverarbeitungsskript.

BERate Bit Error Rate.

BERatio Bit Error Ratio.

BERT Bit Error Rate Tester.

BFH Bitfehlerhäufigkeit.

BFV Bitfehlerverhältnis.

BPSK Binary Phase-Shift Keying.

DECT Digital Enhanced Cordless Telecommunications.

DUT Device Under Test.

DVB-T Digital Video Broadcasting - Terrestrial.

ETSI European Telecommunications Standard Institute.

FER Frame Error Ratio.

FSK Frequency-Shift Keying.

GPIO General Purpose Interface Bus.

IERC European Research Cluster on the Internet of Things.

IoT Internet of Things.

ISM Industrial, Scientific and Medical.

ITU International Telecommunication Union.

PFV Paketfehlerverhältnis.

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying.

RKE Remote Keyless Entry.

SCPI Standard Commands for Programmable Instrumentation.

SPI Serial Peripheral Interface.

UART Universal asynchronous receiver-transmitter.

UHF Ultra High Frequency.

Symbole

$n_{\text{Bitfehler}}$ Anzahl der fehlerhaft übertragenen Bits.

$n_{\text{gesendete Bits}}$ Anzahl der gesendeten Bits.

$n_{\text{Fehlerpakete}}$ Anzahl der fehlerhaften Datenpakete.

$n_{\text{gesendete Pakete}}$ Anzahl der gesendeten Datenpakete.

E_b/N_0 Verhältnis von Energie pro Bit zu Rauschleistungsdichte.

σ Standardabweichung der Normalverteilung.

μ Erwartungswert der Normalverteilung.

$P(c)$ Statistische Sicherheit des Konfidenzintervalls mit c , dem vielfachen der Standardabweichung.

n_{sync} Anzahl der Bits im Synchronisationsmuster.

n_{payload} Anzahl der Payload Bits.

$n_{\text{verlorene Pakete}}$ Anzahl verlorengegangener Datenpakete.

1 Einleitung

1864 hat James Clerk Maxwell die theoretischen Grundlagen für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum gelegt (vgl. [Pel14]). Vierundzwanzig Jahre später erbrachte Heinrich Hertz den praktischen Nachweis (vgl. [SS01]). Ab 1898 haben Ferdinand Braun und Guglielmo Macroni die neu entdeckte Funkkommunikationstechnik für Telegrafeanwendungen weiterentwickelt und eingesetzt. Die noch kostspielige Technik wurde zunächst vom Militär und im zivilen Seefunk eingesetzt (vgl. [Woo19]). Durch ihre Pionierarbeit hatten die ersten Hersteller bereits eine marktbeherrschende Stellung erlangt und konnten beliebige Frequenzbänder allozieren.

Da Radiowellen nicht an Ländergrenzen halt machen und die ersten Anwendungen bereits interkontinental arbeiteten, war man sich schnell über die Notwendigkeit globaler Regelungen einig. Drei Jahre nach der Inbetriebnahme der ersten transatlantischen Funkstrecke tagte 1906 die internationale Funktelegrafiekonferenz in Berlin, welche später in die International Telecommunication Union (ITU) überging. Dort haben dreißig Nationen die ersten internationalen Regulierungen für die damalige Funkkommunikation bzw. die erste Version der Vollzugsordnung für den Funkdienst erarbeitet (vgl. [ITU16] und [Zha19]). Seitdem wächst die Zahl der Regulierungsorganisationen und Regulierungen zusammen mit den verfügbaren Funkkommunikationstechniken. Auch die Menge der aktiven Geräte, welche Funkkommunikation nutzen, wächst. Seit dem Beginn des Mobilfunks 1990 ist die Zahl der Teilnehmer auf über 7 Milliarden gestiegen (2016) (vgl. [ITU16]). Zusätzlich liegt in den Industrieländern der Anteil der Smartphone Nutzer zwischen 60% und 80%, was neben den Mobilfunkfrequenzen eine zusätzliche Nutzung des elektromagnetischen Spektrums im Bereich von WLAN und Bluetooth impliziert (vgl. [ITU16] und [Rep18]). Für den Internet of Things (IoT) Bereich werden laut einem Bericht der European Research Cluster on the Internet of Things (IERC) bis 2025 ca. 21 Milliarden Teilnehmer erwartet (vgl. [Ver+19]: 70). Diese Intensivierung der Nutzung des elektromagnetischen Spektrums führt in urbanen Regionen zu einer Erhöhung des Rauschpegels gegenüber dem Grundrauschen. Innerhalb der Industrial, Scientific and Medical (ISM)-Bänder konnte, in dicht besiedelten Gebieten der USA, bereits 2004 eine deutlich höhere Rauschleistung als

der natürliche thermische Rauschpegel gemessen werden [Eng+19]. Neben einer erhöhten Nutzung der Frequenzbänder gibt es weitere Störquellen. Sie finden sich in Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) Telefonen, Babyfonen, Funkkopfhörern und ähnlichen Geräten mit Funkschnittstellen. Ihre mangelhafte Implementierung fällt meist nach längerer Einsatzzeit durch Fehlfunktionen wie Sendeaktivitäten auf den falschen Frequenzbändern, senden mit zu großer Leistung oder das Senden eines Trägersignals, obwohl das Gerät nur für den Empfang von Funkwellen konstruiert wurde, auf. Solche Störquellen, wenn sie erst einmal in den Haushalten aktiv sind, müssen einzeln detektiert und deaktiviert werden, sofern sie ein anderes System stören (vgl. [Sch19]). Die beschriebenen Störungen können die Reichweite und Funktion bestehender Funkkommunikationssysteme bis zur Unbrauchbarkeit verringern. Globale und lokale Regulierungen sollen ein weitgehend störungsfreies Zusammenarbeiten von Funkkommunikationssystemen auf dem elektromagnetischen Spektrum ermöglichen. Da das elektromagnetische Spektrum ein geteiltes bzw. dessen sinnvolle Nutzung auf Kollaboration basierendes Medium ist, kann die Möglichkeit der störungsfreien Teilnahme nur wahrgenommen werden, wenn alle Teilnehmer die Regulierungen einhalten. Angesichts der zukünftigen Nutzung wird es wichtiger denn je die Vorgaben von Regulierungsorganisationen im Rahmen der Qualitätssicherung einzuhalten. Die Datenblätter der Empfänger sind an die Regulierungen angelehnt, enthalten jedoch nicht alle möglichen Parameterkombinationen. Damit eine Aussagen über die Funktionstüchtigkeit und Einhaltung der Regulierungen eines neuen Funkkommunikationssystems getroffen werden kann, muss dieses gegen das jeweils Datenblatt und gegen die lokalen Regulierungen getestet werden.

1.1 Aufgabenstellung

Heute kommen für die Funkkommunikation in Massenprodukten wie Autos (Autoschlüssel), Wetterstationen, Haustelevonen usw. integrierte Sender und Empfänger zum Einsatz. Da der Automobilbereich durch verschiedene Varianten von Funkschnittstellen gekennzeichnet ist, lassen sich die genutzten Sende- und Empfangs-ICs über einen großen Parameterraum konfigurieren. Am Beispiel eines aktuellen AEC-Q100¹ Empfängers der Firma NXP Semiconductors bedeutet dies u.a. eine Basisbandkonfiguration mit Trägerfrequenzen zwischen 310 MHz und 928 MHz, Datenraten zwischen 0,1 Bits/s und 200 Bits/s,

¹AEC-Q100: Stresstest-Qualifizierung für integrierte Schaltungen, AEC: Automotive Electronics Council

Frequency-Shift Keying (FSK) oder Amplitude-Shift Keying (ASK) Modulation mit jeweils variablen Parametern, sowie Versorgungsspannungen zwischen 2,85 V und 5,5 V (vgl. [Sem15]). In den Datenblättern der Empfänger ist nur eine Auswahl von Konfigurationen dokumentiert und vollständig vermessen. Eine neue Anwendung bei dem Kunden bedeutet meist auch eine neue Konfiguration, deren Eigenschaften und Verhalten sich nicht vollständig aus dem jeweiligen Datenblatt ablesen lassen. Insbesondere wenn neue Parametersätze unvorhergesehene Fehler verursachen, helfen die Leistungsdaten der Anwendungsfälle aus den Datenblättern nicht weiter. Um die Anforderungen der Anwendungsentwickler in Einklang mit den Regulierungen und einen zuverlässig arbeitenden Empfänger in das Feld bringen zu können, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Konzeption und dem Bau eines Prüfstandes für die Charakterisierung von Sub-GHz Empfängern. Dabei soll sowohl die Messung als auch die Konfiguration der verwendeten Laborinstrumente automatisiert werden. Im Vordergrund steht dabei eine einfache und intuitive Bedienung, um die Messungen mit geringerem Zeitaufwand als bisher realisieren zu können. Auch das Einbinden weiterer Laborinstrumente für zukünftige Messparameter soll einfach gestaltet sein. Eine Zusatzfunktion ist das Vergleichen unterschiedlicher Empfänger. Die hierzu nötige Schnittstelle für das Abrufen und Weitergeben der empfangenen Daten, sofern für den jeweiligen Empfänger noch nicht implementiert, muss trotz automatisiertem Teststand vom Anwender ergänzt werden. Die Durchführung der Konfiguration und Messung findet durch eine Test Execution Engine statt. Die Test Execution Engine ist eine Software, die rein ausführende Funktion hat. Informationen über den Testaufbau und den Testablauf müssen der Test Execution Engine vorgegeben werden. Für die Test Execution Engine muss eine Programmiersprache ausgewählt werden, mit der sich spätere Erweiterungen einfach implementieren lassen. Die Testparameter übergibt der Anwender mit Hilfe einer Bedienoberfläche. Die auszuwählende Bedienoberfläche muss eine einfache und strukturierte Eingabe der Testparameter ermöglichen. Die Hauptanwendung des Prüfstandes ist die Charakterisierung von Ultra High Frequency (UHF) Empfängern, welche einzelne Datenpakete empfangen.

1.2 Stand der Technik

Bisher wird das Messen der Leistungsmerkmale eines Empfängers für neue Konfigurationen manuell durchgeführt. Die manuelle Vermessung einer Empfängerkonfiguration bringt Nachteile mit sich. Um den Zeitaufwand der manuellen Messung zu reduzieren, werden statt aller relevanten Leistungsmerkmale nur Ausschnitte vermessen. So wird

die Empfindlichkeit bei Zimmertemperatur oder die Kanalfilterbandbreite nur an dessen Rändern überprüft. Dieses Vorgehen ist für die meisten Anwendungen ausreichend, betrachtet jedoch nicht das Gesamtverhalten des Empfängers und mögliches Fehlverhalten wird erst später entdeckt.

Indirekte Messgrößen unterliegen bei der manuellen Messung einer erhöhten Streuung, was die Reproduktion und den Vergleich der Messwerte erschwert. Indirekte Messgrößen sind z.B. Die Empfindlichkeit, welche über das Sichten von Stichproben des Paketfehlerverhältnisses ermittelt wird. Neben subjektiven Einflüssen unterliegt das manuelle Messen keinem konstanten zeitlichen Ablauf. Weiter muss der Messaufbau für den gewünschten Anwendungsfall konfiguriert werden. Die Konfiguration des Messaufbaus nimmt oft mehr Zeit in Anspruch als die Messung selbst.

Kommerzielle Lösungen für das Vermessen von Empfängern bietet der Messtechnikhersteller Keysight in Form von Bit Error Rate Tester (BERT) an (vgl. [Key19]). Diese modular aufgebauten Testautomaten decken Frequenzbereiche bis in das W-Band (Frequenzbereich von 75 GHz bis 110 GHz) ab und sind auf verschiedene Kommunikationsstandards (z.B. Mobilfunk) optimiert. Empfängerkonfigurationen im Automobilbereich sind weder standardisiert noch in den Vorkonfigurationen der erhältlichen Testautomaten vorhanden. Daher ist auch hier der Zeitaufwand für das Einrichten einer neuen Empfängerkonfiguration gleichzusetzen mit dem Zeitaufwand für das bisher genutzte Equipment (ein Vektor- und einem arbiträren Signalgenerator).

Für die Lösung der beschriebenen Probleme der manuellen Messung und der vorhandenen Prüfstandtechnik bedarf es ein neues Prüfstandkonzept. Das neue Konzept beinhaltet die automatisierte Prüfstandkonfiguration für neue Anwendungsfälle, ähnlich der Konfiguration für einen neuen Kommunikationsstandard.

2 Hauptteil

2.1 Messgrößen und Erfassung

Für die Evaluation der Charakteristiken eines Empfängers werden im Folgenden verschiedene Messgrößen beleuchtet. Die Auswahl der Messgrößen stammt aus regulatorischen Vorgaben und den Erfahrungen im Rahmen der Kundenhilfe. Am Beispiel von Europa wird der Zugang zum elektromagnetischen Spektrum durch das European Telecommunications Standard Institute (ETSI) genormt bzw. werden die Normen des ETSI von den Nationalen Regulierungsorganisationen übernommen. Die frei zugänglichen Normdokumente enthalten sowohl die geforderten Parametergrenzwerte als auch eine genaue Beschreibung wie die Parameter zu erfassen sind. Der Prüfstand ist ausschließlich für Sub-GHz Empfänger vorgesehen. Die passende Norm ist die ETSI EN 300 220-1 [ETS17b] (Geräte mit geringer Reichweite und Arbeitsfrequenzen zwischen 25 MHz und 1000 MHz, technische Charakteristik und Messmethoden), welche sowohl Empfänger als auch Sender betrachtet. Die für Empfänger und Prüfstand relevanten Charakteristiken sind:

- Receiver sensitivity (Empfindlichkeit des Empfängers)
- Behavior at high wanted signal level (Funktionsfähigkeit bei hoher Signalleistung)
- Blocking (Signalunterdrückung bei großem Abstand zur Mittfrequenz)
- Adjacent channel selectivity (Kleinsignalunterdrückung auf Nachbarkanälen)
- Receiver saturation at adjacent channel (Großsignalunterdrückung auf Nachbarkanälen)
- Spurious response rejection (Signalunterdrückung auf der Spiegelfrequenz¹)

Zunächst wird auf die Empfindlichkeit und das damit verbundene Bit Error Ratio (BERatio) eingegangen. Anschließend werden die Messungen mit Störsignalen behandelt.

¹Durch die Abwärtsmischung des empfangenen Signals bei Überlagerungsempfängern ist dieser, ohne zusätzliche Maßnahmen, auf der Spiegelfrequenz für Signale empfindlich.

2.1.1 Bitfehlerverhältnis

Die Übertragungsqualität von Funkkommunikationssystemen kann bei konstanten Umgebungsbedingungen auf unterschiedliche Art angegeben werden. Für Systeme mit kontinuierlichem Datenstrom, wie z.B. Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T), wird die Angabe der Bit Error Rate (Bit Error Rate (BERate), Deutsch Bitfehlerhäufigkeit (BFH)) verwendet (vgl. [Kel11]). Sie gibt die auftretenden Bitfehler pro Zeiteinheit an (vgl. Gleichung 2.1).

$$BERate = \frac{n_{\text{Bitfehler}}}{\text{Zeiteinheit}} \quad (2.1)$$

Andere Funkschnittstellen wie im Automobil- oder IoT Bereich zeichnen sich durch seltene Übertragungen aus. So können Schließereignisse bei Remote Keyless Entry (RKE) Systemen² zwischen Sekunden bis Wochen auseinander liegen. Diese Funkschnittstellen sind auf die Übertragung einzelner Nachrichten optimiert. Daher wird die Übertragungsqualität dieser Systeme mit dem Bit Error Ratio (BERatio, Deutsch Bitfehlerverhältnis (BFV)) bzw. mit dem Frame Error Ratio (FER) (Deutsch Paketfehlerverhältnis (PFV)) angegeben. Das BERatio gibt das Verhältnis der fehlerhaften zur Gesamtzahl der gesendeten Bits, welche innerhalb eines beliebigen Zeitraums gesendet werden (Gleichung 2.2).

$$BERatio = \frac{n_{\text{Bitfehler}}}{n_{\text{gesendete Bits}}} \quad (2.2)$$

Wird das BERatio auf die Datenmenge einer Nachricht hochgerechnet, erhält man das FER (vgl. 2.3, genaue Beschreibung wie ein BERatio äquivalentes FER berechnet wird in Abschnitt 2.1.1-Messverfahren am Prüfstand).

$$FER = \frac{n_{\text{Fehlerpakete}}}{n_{\text{gesendete Pakete}}} \quad (2.3)$$

²Ein RKE System ermöglicht den Zugang zum Auto mit Hilfe eines Funksenders. Keyless, da ein klassischer Metallschlüssel nicht mehr benötigt wird.

Ein fehlerhaft übertragenes Bit hat nach der Übertragung den entgegengesetzten Wert gegenüber dem vor der Übertragung. Bitfehler entstehen, wenn das Signal nicht mehr vollständig demoduliert werden kann. Damit der Demodulator eines Empfängers ein Signal demodulieren kann, darf ein Mindestabstand der Signalleistung zur Rausch- oder Störleistung (Rausch- oder Störabstand) nicht unterschritten werden. Dieser Mindestabstand wird unterschritten, wenn das Signal zu schwach und somit zu nahe am Rauschen ist oder ein zu starkes Störsignal innerhalb Funkkanals auftritt. Der Mindestabstand ist durch den Demodulatorschwellwert definiert (Abbildung 2.1). Die Größe des Demodulatorschwellwertes ist von der genutzten Modulation abhängig [Sem08]. Der Übergang

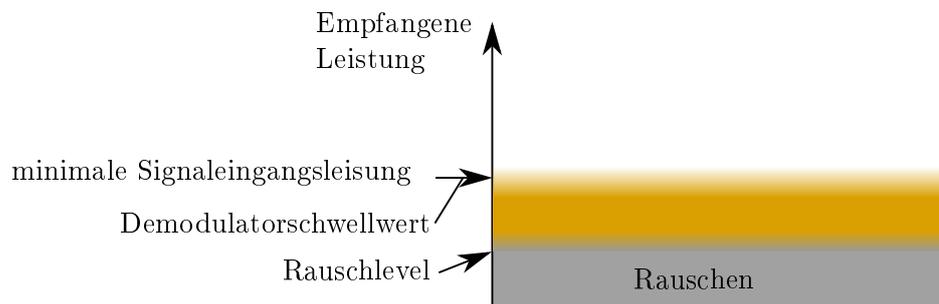


Abbildung 2.1: Qualitative Darstellung der Leistungsverhältnisse des Rauschens und der Empfindlichkeit am Empfängereingang. Der Gelbe Bereich zeigt den Demodulatorschwellwert gegenüber dem Rauschpegel.

zwischen fehlerfreiem Empfang und keinem Empfang ist nicht sprunghaft. Sowohl die BERate als auch die das BERatio sind von den Auftretswahrscheinlichkeiten der Bitfehler abhängig. Der zu erwartende qualitative Zusammenhang des BERatio mit dem Rauschabstand kann mit Abbildung 2.2 veranschaulicht werden. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen der BERate und dem normierten Rauschabstand für verschiedene Modulationen. Je schwächer das Nutzsignal gegenüber dem Rauschpegel ist, desto größer wird die BERate (sinkender E_b/N_0 Wert). Je größer die spektrale Effizienz [Bit pro Sekunde pro Hertz] desto größer ist die BERate bei gleicher Nutzsignalleistung. Dies spiegelt die Abhängigkeit des Demodulatorschwellwertes von der spektralen Effizienz wieder (vgl. [Kel11]).

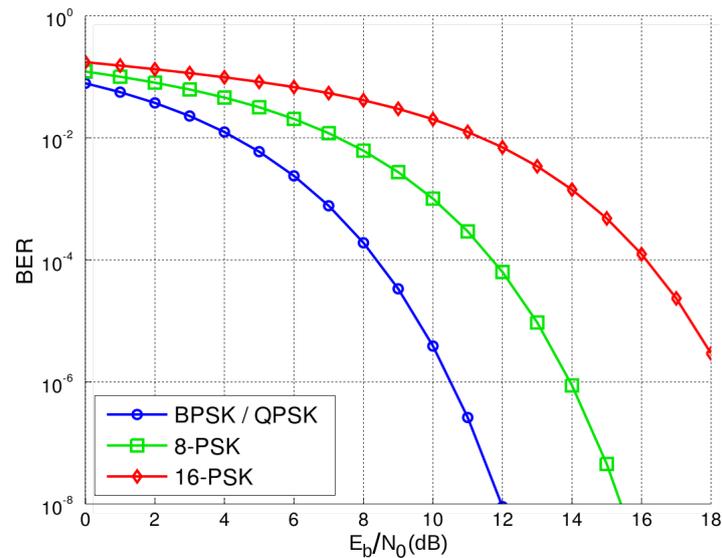


Abbildung 2.2: Zusammenhang zwischen BERate und E_b/N_0 (normierter Rauschabstand) für verschiedene Modulationen (Bildquelle: [Wik19a]). Die Modulationen mit steigender spektraler Effizienz von links nach rechts: Binarye Phase-Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), 8 Phase-Shift Keying (8-PSK), 16 Phase-Shift Keying (16-PSK).

Messung des Bitfehlerverhältnisses (BERatio)

Abbildung 2.3 zeigt das Blockschaltbild des allgemeinen Messaufbaus zur Bestimmung des BERatio. Die zu sendenden Daten werden von einem Vergleichsmodul an einen Signalgenerator gegeben. Der Signalgenerator moduliert die vorgegebene Daten und sendet sie an den zu untersuchenden Empfänger (Device Under Test (DUT)). Der Empfänger demoduliert das empfangene Signal und gibt die Daten an das Vergleichsmodul zurück. Dieses vergleicht die empfangenen mit den gesendeten Daten und berechnet das BERatio (vgl. Gleichung 2.2).

Die Messung des BERatio ist immer mit einer Messunsicherheit verbunden, da das Auftreten von Bitfehlern durch stochastisches Rauschen verursacht wird. Ein absoluter Wert des BERatio lässt sich pro Messung nur durch unendlich viele gesendete Bits ermitteln. Um das BERatio in endlicher Zeit ermitteln zu können, muss die Zahl der übertragenen Bits pro Messung begrenzt sein. Werden pro BERatio Messung endlich viele Bits verwendet, lässt sich das Messergebnis nur mit Abweichungen reproduzieren.

Jeder Bitfehler tritt mit derselben Wahrscheinlichkeit auf. „Entsteht ein zufälliger Mess-

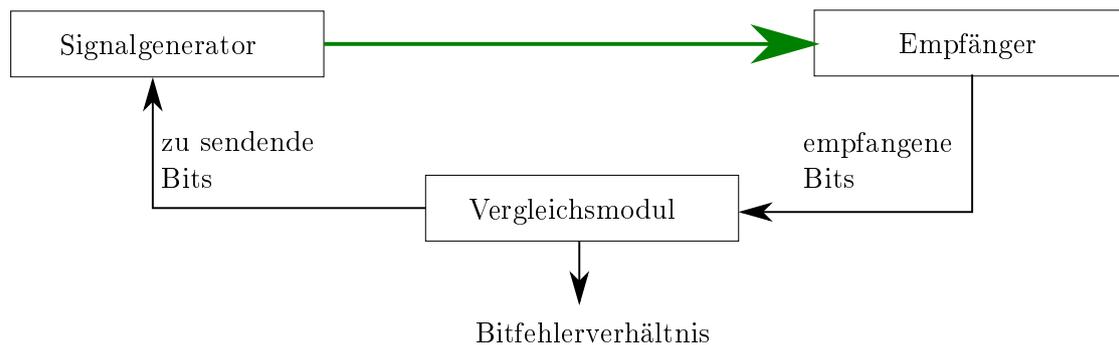


Abbildung 2.3: Prinzipskizze zur Messung des BERatio eines Empfängers. Grün: UHF Signal, schwarz: digitale Daten

fehler durch die Überlagerung mehrerer unabhängiger Zufallsereignisse, so kann für den Fehler eine Normalverteilung angenommen werden.“ (vgl. [LK12]: 142). Die Dichtefunktion der Gaußschen Normalverteilung ist mit Gleichung 2.4 gegeben (vgl. [Wik19b]). Die Standardabweichung σ für die Normalverteilung des Messergebnisses ist mit der Quadratwurzel des Erwartungswertes zu bestimmen (vgl. [Sem08]: 25). Der Erwartungswert μ entspricht der Anzahl der zu erwartenden Bitfehler und berechnet sich aus der Anzahl der gesendeten Bits $n_{gesendete\ Bits}$ und des angestrebten BERatio (Gleichung 2.5). Da die Anzahl der zu erwartenden Bitfehler immer positiv ist, wird nur der positive Teil der Quadratwurzel für die Standardnormalabweichung $f(x)$ verwendet (Gleichung 2.6).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.4)$$

$$\mu = n_{gesendete\ Bits} \cdot BERatio \quad (2.5)$$

$$\sigma = |\sqrt{\mu}| \quad (2.6)$$

Ist die Zahl der übertragenen Bits pro Messung begrenzt, wird die Messunsicherheit des Messergebnisses mit Hilfe des Konfidenzintervalls (auch Vertrauensintervall vgl. [LK12]) angegeben. Das Konfidenzintervall berechnet sich aus dem Vielfachen Standardabweichung:

$$\text{Konfidenzintervall} : \mu \pm c \cdot \sigma$$

Das Konfidenzintervall gibt die Messunsicherheit mit einer statistischen Sicherheit $P(c)$ an (vgl. [LK12]: 149). Die statistische Sicherheit wird durch die Variable c bestimmt

(abgelesen aus [LK12]: Tabelle A.1):

$$P(c = 1) = 68,27\%$$

$$P(c = 2) = 95,45\%$$

$$P(c = 3) = 99,73\%$$

Das Beispiel $P(c = 3)$ sagt aus, dass 99,73% der Messergebnisse einer BERatio Messung innerhalb des Konfidenzintervalls $\mu \pm 3 \cdot \sigma$ liegen. Abbildung 2.4 zeigt die Abhängigkeit der Messunsicherheit von der $n_{\text{gesendete Bits}}$ pro BERatio Messung. Mit wachsender

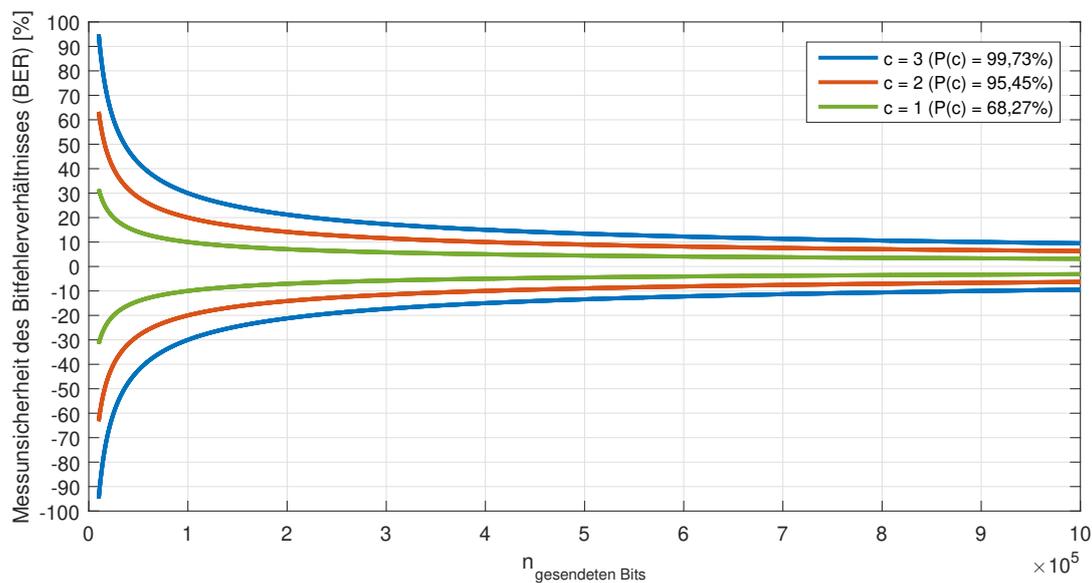


Abbildung 2.4: Konfidenzintervall bzw. Messunsicherheit des BERatio in Abhängigkeit der $n_{\text{gesendete Bits}}$ pro Messung bei einem erwartetem BERatio von 10^{-3} (eins von tausend übertragenen Bits ist fehlerhaft) für verschiedene statistische Sicherheiten. Eine statistische Sicherheit von 95% ($c = 3$, orange) ist von der ETSI für die Messunsicherheit bei Empfindlichkeitsmessungen vorgegeben.

$n_{\text{gesendete Bits}}$ wird die Messunsicherheit kleiner. Je kleiner das Konfidenzintervall gewählt wird desto weniger Bits müssen pro Messung gesendet werden. Nach den Vorgaben der ETSI darf ein Empfänger unter normalen Bedingungen als funktionierend bezeichnet werden, wenn ein BERatio von 10^{-3} nicht überschritten wird (vgl. [ETS17b]: 15). Der Wert der statistischen Sicherheit für den Bereich der Messunsicherheit wird von der ETSI

mit $P(c = 2) = 95,45\%$ vorgegeben (vgl. [ETS17b]: 25). Zu einer BERatio Messung muss sowohl die $n_{gesendete\ Bits}$ pro Messung als auch ihre statistische Sicherheit angegeben werden.

Messverfahren am Prüfstand

Der Prüfstand ist nicht in der Lage das BERatio direkt zu messen. Da die untersuchten Empfänger nur die Übertragung einzelner Datenpakete erlauben, kann nur das FER gemessen werden. Die ETSI schreibt in diesem Fall ein zum BERatio äquivalentes FER vor (Gleichung 2.7, vgl. [ETS17b]: 16).

$$FER = 1 - (1 - BERatio)^{n_{gesendete\ Bits}} \quad (2.7)$$

Bei dem BERatio äquivalenten FER wird angenommen, dass ein fehlerhaft übertragene Paket genau einen Bitfehler enthält, was für die Empfindlichkeitsgrenze mit wenigen auftretenden Bitfehlern realistisch ist. Die $n_{gesendete\ Bits}$ ist nicht nur von den Nutzdaten abhängig, sondern auch von dem anwendungsabhängigem Overhead³. Im Folgenden wird am Beispiel eines RKE Systems der Overhead bei der Kommunikation zwischen Autoschlüssel und Auto erläutert.

Für das Öffnen oder Schließen eines Autos genügt jeweils die Übertragung eines Datenpaketes. Der Empfänger im Auto muss daher permanent in der Lage sein, ein Datenpaket des Autoschlüssels empfangen zu können. Für die Anwendung eines RKE Systems im Automobilbereich wird eine geringe Stromaufnahme gefordert. Um diese erreichen zu können ist der Empfänger die meiste Zeit ausgeschaltet und wird mit einem definierten Abfragezyklus (Pollingcycle siehe Abbildung 2.5) eingeschaltet, um den Funkkanal auf Nachrichten abzufragen. Die Dauer des Abfragezyklus richtet sich nach dem angestrebten Stromverbrauch und der Datenrate. Wird der Empfänger aktiv und registriert anschließend eine Aufwachsequenz (Wakeup), bleibt er aktiv und wartet auf ein bekanntes Synchronisationsmuster (Sync). Das Ende des Synchronisationsmusters markiert den Beginn der Nutzdaten (Payload). Tritt ein Bitfehler innerhalb des Synchronisationsmusters auf, geht die Nachricht verloren. Eine Nachricht gilt als vollständig und richtig, wenn sowohl das Synchronisationsmuster als auch der Nachrichteninhalte fehlerfrei übertragen

³Als Overhead werden Daten bezeichnet, die nicht zu den Nutzdaten gehören, sondern als Zusatzinformation für die Übermittlung benötigt werden.

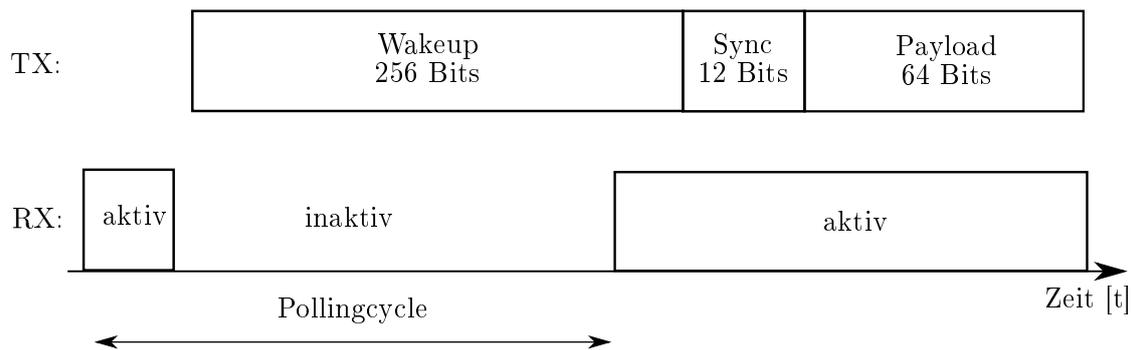


Abbildung 2.5: Beispielaufbau einer Nachricht am Beispiel eines drahtlosen Kfz Zugangssystems. Die Länge und Anzahl der Nachrichtenabschnitte kann variieren. TX zeigt die Aktivitäten des Senders, RX zeigt die Aktivitäten des Empfängers.

wird. Die Wakeup-Sequenz gehört zwar zum Overhead, muss jedoch nicht fehlerfrei übertragen werden. Sie dient der Synchronisation der Phasenlage der modulierten Daten und wird vom Empfänger nicht auf ihren Inhalt überprüft. Die $n_{gesendete\ Bits}$ pro Datenpaket wird nach Gleichung 2.8 bestimmt.

$$n_{gesendete\ Bits} = n_{sync} + n_{payload} \quad (2.8)$$

Unter der Berücksichtigung, dass ein Bitfehler im Sync Muster auftreten und zu einer verlorengegangenen Nachricht führen kann, ergibt sich das FER aus Gleichung 2.9.

$$FER = \frac{n_{Fehlerpakete} + n_{verlorene\ Pakete}}{n_{gesendete\ Pakete}} \quad (2.9)$$

Für die Ermittlung des FER wird derselbe Messaufbau wie in Abbildung 2.3 verwendet. Der Unterschied zu dem Messen des BERatio ist, dass das Vergleichsmodul mehrere Bits bzw. ein gesamtes Datenpaket auf einmal vergleichen muss.

Einflussgrößen

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 besprochen, wird das BERatio am Prüfstand von der Nutzsignalleistung, dem Eigenrauschen des Empfängers (und damit auch von der Temperatur des Empfängers), der verwendeten Modulation (Demodulatorschwellwert siehe Abbildung 2.1) und von Störsignalen beeinflusst. Die Temperatur wird innerhalb des Labors durch Klimatisierung konstant gehalten. Nutzsignalleistung und Modulation sind

bekannt und lassen sich steuern. Ungewollte Störsignale sind bei einer BERatio Messung nicht erwünscht. Um die Störsignaleinflüsse bei einer BERatio Messung kontrollieren zu können muss das DUT für den relevanten Frequenzbereich elektromagnetisch abgeschirmt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den relevanten Frequenzbereich mit einem Spektrumanalysator zu beobachten und die Messung bei auftretenden Störsignalen zu wiederholen.

2.1.2 Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit ist eine wichtige Charakteristik des Empfängers. Sie bestimmt, bei konstanter Sendeleistung des Senders, die Reichweite eines Funkkommunikationssystems. Die Empfindlichkeit ist die Signalleistung am Empfängereingang, bei der sich ein definiertes BERatio bzw. FER einstellt. Dies macht die Empfindlichkeit zu einer indirekten Messgröße.

Die ETSI beschreibt ein BERatio von höchstens 10^{-3} als generelles Leistungskriterium eines Empfängers. Für das Messen der Empfindlichkeit eines Empfängers wird der Messaufbau zur Erfassung des BERatio aus Abbildung 2.3 verwendet. Der Signalgenerator wird passend zur Empfängerkonfiguration konfiguriert. Die Sendefrequenz ist auf die Mittenfrequenz des Empfängers einzustellen. Die Nutzsignalleistung wird, beginnend mit der höchstmöglichen Eingangsleistung des Empfängers (deckt den Test für: „Behavior at high wanted signal level“ ab, vgl. [ETS17b]), stufenweise reduziert. Für jede Stufe der Nutzsignalleistung wird eine FER Messung durchgeführt. Der Abstand der Leistungsstufen stellt die Auflösung der Empfindlichkeitsmessung dar. Die ETSI schreibt für Empfindlichkeitsmessungen eine, aus Messunsicherheit des BERatio resultierende, Messunsicherheit von $\pm 1,5 \text{ dBm}$ (3 dB Schritte) vor (vgl. [ETS17b]: Tabelle 5).

Abbildung 2.7 zeigt eine Messung des FER in Abhängigkeit von der Nutzsignalleistung. Bei 76 übertragenen Bits pro Nachricht lässt sich unter Beachtung von Gleichung 2.3 und 2.8 die Empfindlichkeit der untersuchten Empfängerkonfiguration bei einem FER von 7,3% einzeichnen (grüne Linie vgl. Abbildung 2.7). Die Empfindlichkeitsmessung in Abbildung 2.7 hat eine Auflösung von 0,5 dB Schritten und liegt bei -111,2 dBm. Wird der mittlere prozentuale Abstand des FER zu den zwei nächsten Messpunkte ermittelt (orangene und rote Linie), erhält man die nötige Mindestmessunsicherheit des FER von $\pm 30\%$. Bei einer statistischen Sicherheit von 95% (Vorgabe der ETSI) lässt sich die nötige Anzahl der zu übertragenen Bits pro FER Messung von ca. 42.000 Bits aus Abbildung 2.6 ablesen. Bei 76 übertragenen Bits pro Nachricht und 42.000 zu übertragenen Bits, ergibt

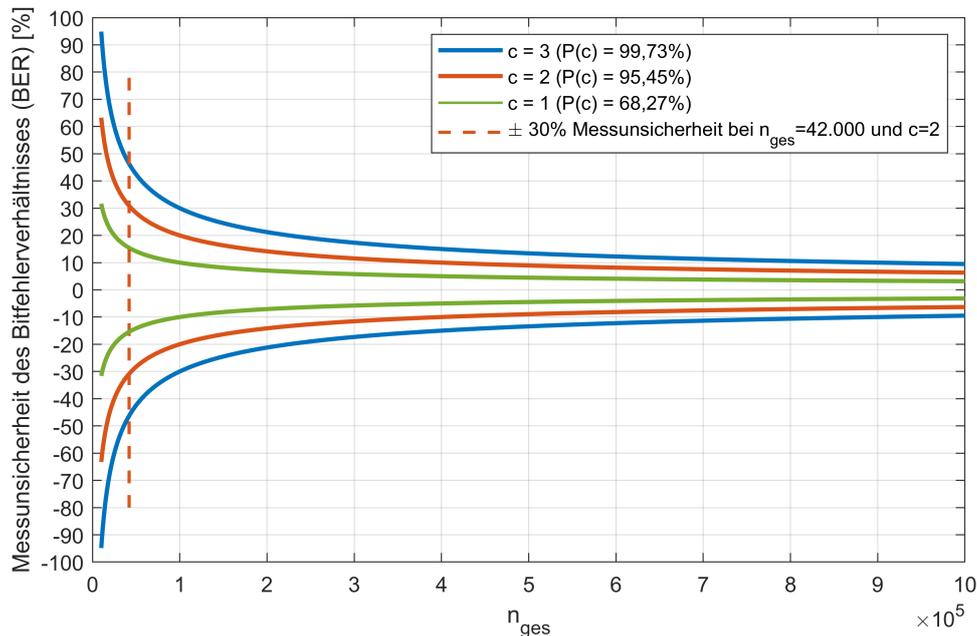


Abbildung 2.6: Messunsicherheit des BERatio (vgl. Abbildung 2.4) bei 42.000 gesendeten Bits pro Messung (orange gestrichelte Linie).

dies 553 Nachrichten, die für eine ausreichende Messunsicherheit pro Messpunkt übertragen werden müssen. Die Anzahl der Nachrichten pro Messpunkt wird von dem Prüfstand ermittelt und dem Anwender vorgeschlagen.

Das für die Empfindlichkeit geltende BERatio bzw. FER eines Empfängers ist nicht standardisiert und kann je nach Hersteller oder Anwendung variieren. Die Empfindlichkeit muss zusammen mit dem BERatio angegeben werden. In den Datenblättern der verfügbaren Automobilempfänger der Firma NXP Semiconductors wird die Empfindlichkeit der jeweiligen Konfiguration mit einem FER von 10%, bei einem äquivalenten BERatio von $2 \cdot 10^{-3}$, angegeben (vgl. [Sem17]).

Erfassung am Prüfstand

Bei dem beschriebenen Messverfahren werden für das Finden der Empfindlichkeit viele FER Messungen durchgeführt. Eine einzelne FER Messung kann bei hoher Auflösung der Signalleistungsschritte mehrere Minuten benötigt. Um die Gesamtzeit für eine Empfindlichkeitsmessung zu verkürzen, kann ein Iterationsverfahren angewendet werden.

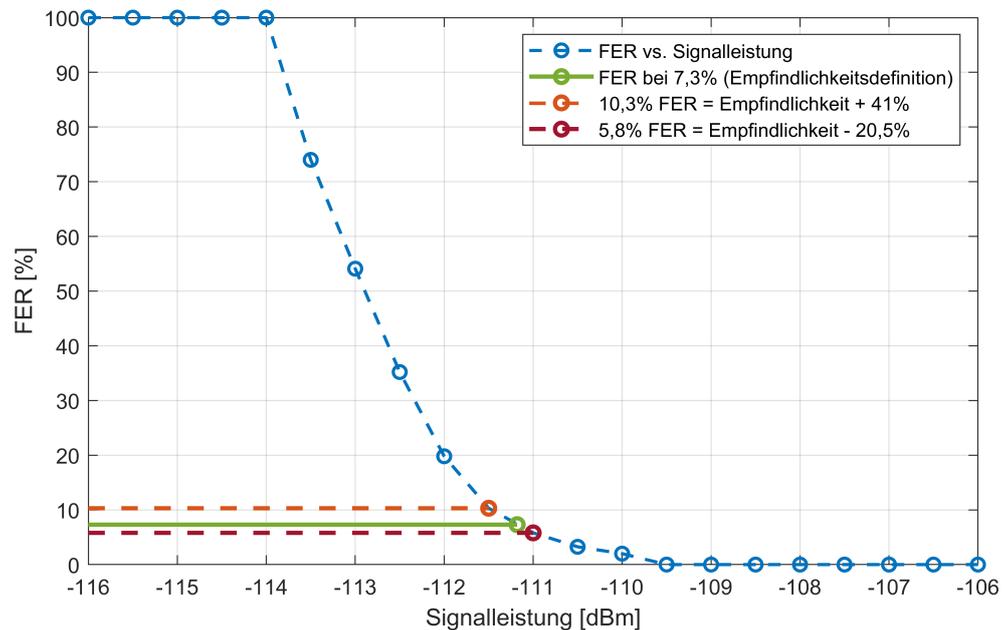


Abbildung 2.7: Messung des FER in Abhängigkeit von der Nutzsignalleistung. Die $n_{\text{gesendete Bits}}$ pro Nachricht beträgt 76 und die Signalleistung wird in 0,5 dBm Schritten variiert. Nach Gleichung 2.7 ergibt sich für ein BERatio von 10^{-3} ein FER von 7,3% (grüne Linie). Die Steigung des FER-Graphen gibt in diesem Bereich eine FER Messunsicherheit von $\pm 30\%$ vor (mittlerer prozentualer Abstand der beiden Messpunkte, die der Empfindlichkeit am nächsten sind, orange und rote Linie).

Abbildung 2.8 zeigt den Ablauf eines möglichen Iterationsverfahrens. Es wird sowohl mit steigender Auflösung (kleinere Signalleistungsschritte) als auch mit sinkender Messunsicherheit (mehr gesendete Bits pro Messpunkt) iteriert. Für das in Abbildung 2.8 beschriebene Iterationsverfahren werden die vier Auflösungsschritte 20 dB, 10 dB, 5 dB und 2 dB verwendet. Die dazugehörige Anzahl der zu sendenden Nachrichten, um das FER zu messen, sind 3, 6, 12 und 20. Abbildung 2.9 zeigt den simulierten Ablauf des in Abbildung 2.8 beschriebenen Verfahrens. Jeder Punkt kennzeichnet eine gesendete Nachricht. Von rot über orange und gelb bis grün steigt die verwendete Auflösung der Nutzsignalleistung. Zusätzlich wird mit steigender Auflösung der Nutzsignalleistung die Messunsicherheit der FER Messung verkleinert, indem die Anzahl der gesendeten Nachrichten pro FER Messung erhöht wird. Auf der x-Achse lässt sich die Gesamtanzahl der gesendeten Nachrichten für die Empfindlichkeitsmessung ablesen. Zur Veranschauli-

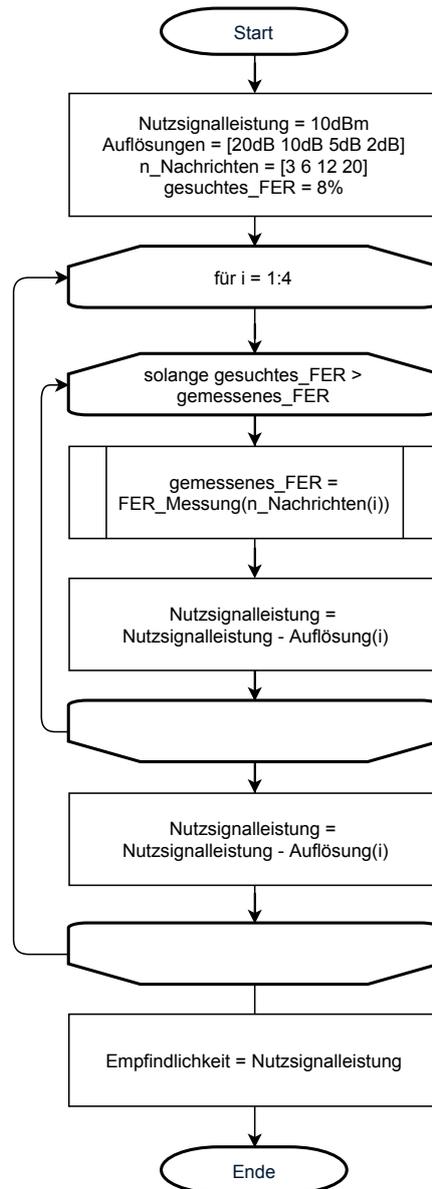


Abbildung 2.8: Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Iterationsverfahrens für die Annäherung der Nutzsignalleistung an die Empfindlichkeit eines Empfängers.

chung des Verfahrens ist die wahre Empfindlichkeit von $-77,5$ dBm gewählt. Da die finale Messauflösung (grün) ± 1 dB ist, ist die durch das Iterationsverfahren ermittelte Empfindlichkeit 77 dBm ± 1 dB. Bei typischen 50 bis 100 übertragenen Bits pro Nachricht ist

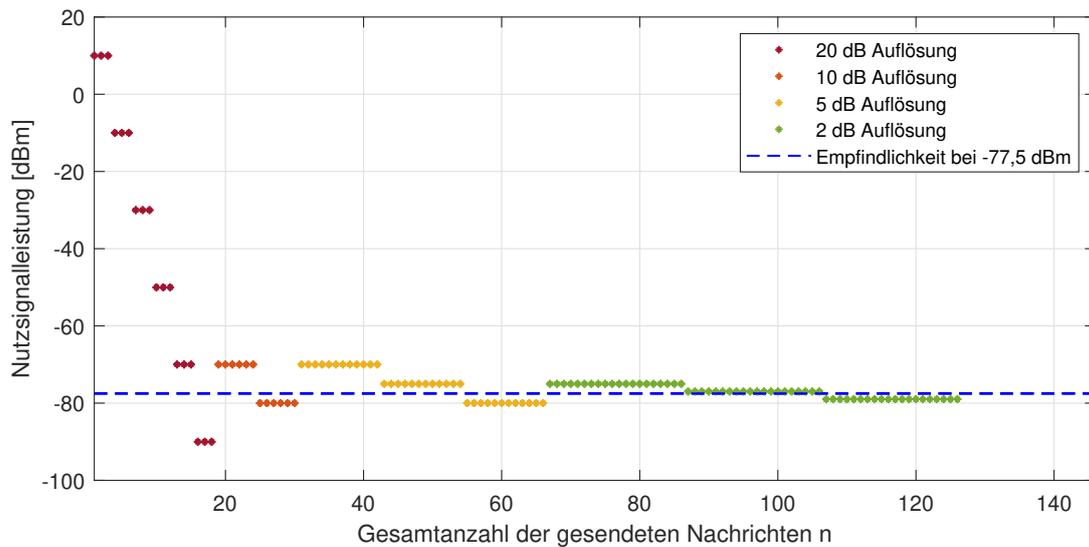


Abbildung 2.9: Simulierter Ablauf des Iterationsverfahrens aus Abbildung 2.8 für das Finden der Empfindlichkeitsgrenze. Die Anzahl der gesendeten Nachrichten entsprechen nicht einer realen Messung und dient nur der Anschauung des Iterationsverfahrens.

die Messunsicherheit des grünen Abschnitts für die verwendete Signalleistungsauflösung zu groß und nicht praxisrelevant (vgl. Abbildung 2.4) und dient hier nur der Anschaulichkeit des Iterationsverfahrens. Für eine praktisch relevante Empfindlichkeitsmessung muss die Anzahl der übertragenen Nachrichten der verwendeten Signalleistungsauflösung angepasst werden (vgl. Abbildung 2.7).

Am Prüfstand werden die Empfindlichkeitsmessungen mit dem digitalen Signalgenerator SMJ100A (vgl. [Roh16]) durchgeführt. Der Signalgenerator beinhaltet einen Basisbandgenerator um digitale Daten modulieren zu können. Dabei wird eine Nachricht (Abbildung 2.5) vor der Messung definiert und in dem Signalgenerator gespeichert. Dieses Gerät ist bereits im Labor vorhanden und kommt daher zum Einsatz für den Prüfstand.

Einflussgrößen

Da die Empfindlichkeit durch das gemessene BERatio definiert ist, gelten dieselben Einflussgrößen wie für das BERatio. Zusätzlich ist bei einer Empfängeranwendung die Leiterplatte, auf die der integrierte Empfänger aufgelötet ist, zu beachten. Die Empfindlichkeit

eines Empfängers wird zusammen mit den Verlusten der Signalpfade auf der verwendeten Leiterplatte gemessen. Die Qualität der Signalpfade hat entscheidenden Einfluss auf die Empfindlichkeit, da z.B. durch nicht optimal angepasste Leitungen ein beliebig großer Teil der Signalenergie noch vor dem eigentlichen Empfänger reflektiert werden kann.

2.1.3 Blocken ungewollter Signale

Neben der Empfindlichkeit ist die Fähigkeit des Blockens ungewollter Signale (engl. Blocking) ein weiteres Empfängermerkmal, welches sich nur indirekt über das FER messen lässt. Blocking beschreibt die Fähigkeit der Unterdrückung eines Störsignals bei gleichzeitigem problemlosen Empfang eines Nutzsignals (vgl. [ETS17b]). Die Unterdrückung von Störsignalen, insbesondere auf den Nachbarkanälen der Anwendung, erlaubt eine effiziente Ausnutzung von Frequenzbändern. Sie gehört daher zu den regulierten Merkmalen eines Empfängers. Die ETSI schreibt verschiedene Messungen zur Störsignalunterdrückung vor:

- Blocking
- Adjacent channel selectivity
- Receiver saturation at adjacent channel
- Spurious response rejection

Sie lassen sich zu einem Messaufbau für die Untersuchung des Empfängerverhalten bei vorhandenen Störsignalen zusammenfassen. Die genannten Merkmale beschreiben die Empfindlichkeit des Empfängers gegenüber Störungen innerhalb und in der Nähe des genutzten Funkkanals. Sie unterscheiden sich im Frequenzbereich, der Modulation des Störers und in der Nutzsignalleistung (vgl. Tabelle 2.1). Im Folgenden bezieht sich der Begriff „Blocking“ auf alle Messarten, bei denen der Empfänger einem Störsignal ausgesetzt ist.

Erfassung am Prüfstand

Abbildung 2.10 zeigt den Messaufbau einer Blocking Messung. Für das Messen des Blocking wird das Nutzsignal und das Störsignal getrennt voneinander erzeugt und mit Hilfe eines Richtkopplers kombiniert. Das Nutzsignals wird dabei auf der Mittenfrequenz des Empfängers erzeugt und mit unterschiedlichen Leistungen oberhalb der Empfängerempfindlichkeit (Empfindlichkeit +3 dB, +40 dB, vgl. 2.1) festgelegt. Das Blocking wird

Merkmal	Störfrequenz/Modulation	Nutzsignalleistung
Adjacent channel selectivity	Nachbarkanäle der Anwendung / CW, AM, FM	Empfindlichkeitslevel +3 dB
Receiver saturation at adjacent channel	Nachbarkanäle der Anwendung / CW, AM, FM	Signal liegt 43 dB über Empfindlichkeitslevel
Spurious response rejection	Spiegelfrequenz / CW	Empfindlichkeitslevel +3 dB
Blocking	Ausgehend von der Mittenfrequenz ± 2 MHz, ± 10 MHz, ± 5 % / CW	Empfindlichkeitslevel +3 dB , +40 dB

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der ETSI Vorschriften für Interferenzmessungen an Empfängern (ETSI EN 300 220-1 V3.1.1 (2017-02) und ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01) entnommen)

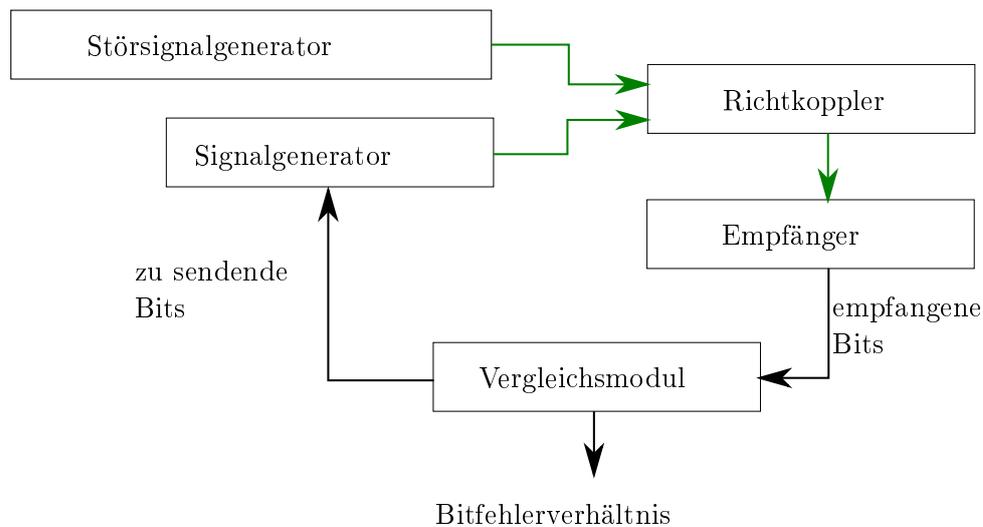


Abbildung 2.10: Allgemeiner Aufbau einer Messung zur Bestimmung der Fähigkeit ungewollte Signale zu unterdrücken. Der Richtkoppler kombiniert zwei UHF Signale zu einem Signal. Grüne Pfeile: UHF Signal, schwarze Pfeile: digitales Signal

ermittelt, indem die Störleistung, kommend aus dem Rauschen, schrittweise erhöht wird. Für jeden Störleistungsschritt wird eine FER Messung durchgeführt. Die Störsignalleistung wird solange erhöht, bis das FER dem generellen Leistungskriterium für Empfänger entspricht ($BERatio = 10^{-3}$, vgl. [ETS17b]). Diese Vorgehensweise entspricht der Empfindlichkeitsmessung aus Abschnitt 2.1.2 mit dem Unterschied, dass die Störsignalleistung statt der Nutzsignalleistung variiert wird. Daher kann hier für eine kürzere Messzeit dasselbe Iterationsverfahren, wie bei der Empfindlichkeitsmessung (Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9) für die Messung des Blockings verwendet werden. Das Blocking kann als Differenz zwischen Nutz- und Störsignal (vgl. Gleichung 2.10, [ETS17a]) oder als absoluten Wert der Störleistung (vgl. [ETS17b]) angegeben werden.

$$Blocking[dB] = Nutzsignalleistung[dBm] - Störsignalleistung[dBm] \quad (2.10)$$

Das Blocking ist für jede Änderung der Frequenz und Modulation des Störsignals sowie für jede Änderung der Nutzsignalleistung neu zu bestimmen. Als Störsignalgenerator kommt für den Prüfstand der vorhandene Signalgenerator IFR 2023B [Aer09] zum Einsatz. Er beherrscht verschiedene Modulationsverfahren und deckt den Frequenzbereich bis 2 GHz ab.

2.1.4 Weitere Messgrößen

Außer der für die Regulierungsvorschriften notwendigen Messgrößen kommen für den Prüfstand weitere Messgrößen wie Spannung, Temperatur oder Stromfluss in Frage. Sie sind für die Fehlersuche und das Testen des DUT in besonderen Umgebungsbedingungen hilfreich.

2.2 Prüfstand

Anforderungen

Der Zweck des Teststandes ist die Automatisierte Vermessung von ISM-Band Empfängern. Der mögliche Empfängerfrequenzbereich beschränkt sich auf den Sub-GHz Bereich. Der zu testende Empfänger muss mit einem Koaxialkabel an das Testequipment angeschlossen werden können. Dabei soll sowohl die Konfiguration des Messaufbaus (Konfiguration von Signalgeneratoren und anderer Laborinstrumente über General Purpose In-

terface Bus (GPIB)) als auch die Messungen automatisiert durchgeführt werden können. Der Benutzer gibt dabei die Empfänger- bzw. Basisbandkonfiguration und die Randbedingungen der Messung durch eine Konfigurationsdatei vor. Diese werden von einer Test Execution Engine (vgl. [Wik19c]) entgegengenommen. Die Test Execution Engine dient ausschließlich der Testdurchführung und hat selbst keine Informationen über den Testablauf oder den Randbedingungen. Des weiteren soll der Prüfstand einfach zu bedienen und leicht um neue Laborinstrumente erweiterbar sein.

2.2.1 Konzept

Abbildung 2.11 zeigt ein Blockschaltbild mit Datenflüssen des entwickelten Prüfstandskonzeptes. Den Kern stellt eine Test Execution Engine dar. Für die Umsetzung des Prüfstandskonzeptes wird die Test Execution Engine mit MATLAB programmiert. MATLAB ist in der Industrie weit verbreitet und bietet mit Hilfe der Instrument Control Toolbox (vgl. [Mat19]) eine einfache Möglichkeit Laborinstrumente über GPIB anzusprechen. Auch die Visualisierung von Messergebnissen und die Einbindung externer Skripte (Windows Stapelverarbeitungsskript (BAT-Datei)) sind durch die vorhandenen Programmierwerkzeuge von MATLAB einfach möglich. Neben MATLAB kann für die Realisierung der Test Execution Engine auch eine andere Programmiersprache verwendet werden. Das Excel Dokument dient als Schnittstelle zwischen Benutzer und der Test Execution Engine. Sie entnimmt die Testspezifikationen dem Excel Dokument (Konfiguration der einzelnen Laborgeräte sowie den Ablauf der Messung). Der Vorteil für die Parameterübergabe durch Excel statt durch ein Textdokument, ist die Möglichkeit Parameter strukturiert darstellen und ablegen zu können. Ein weiterer Vorteil von Excel ist, dass die Messergebnisse nach der Messung in dem Dokument abgelegt und durch Excel visualisiert werden können, was die Dokumentation und spätere Nachvollziehbarkeit der Messergebnisse vereinfacht.

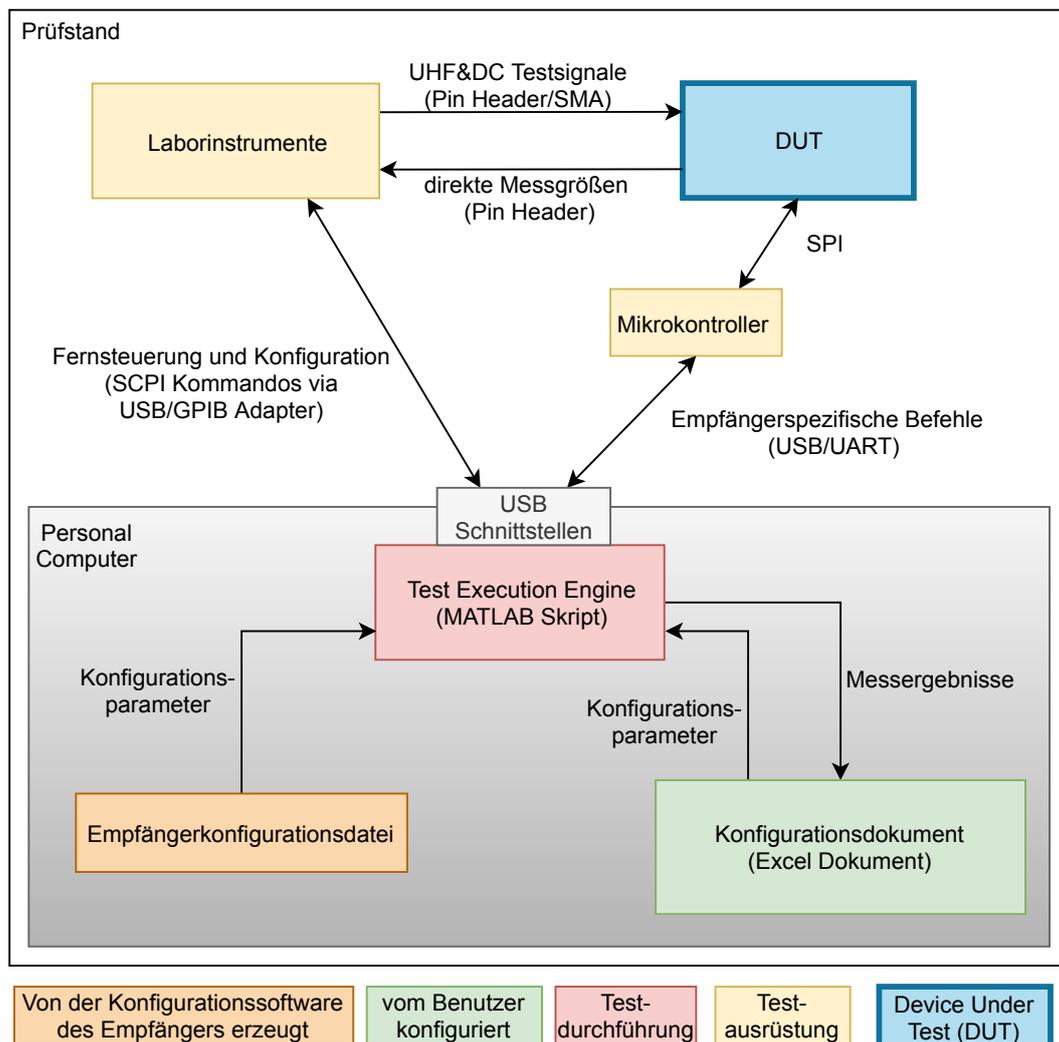


Abbildung 2.11: Blockschaltbild des Prüfstandes. Pfeile stehen für Datenflüsse und Schnittstellen. Möglich Software für die Umsetzung des Testausführung (rot) und der Konfigurationsoberfläche (grün) sind in Klammern.

Neben den Testparametern kann die Empfängerkonfiguration von dem MATLAB Skript entgegen genommen und an den Empfänger weitergeleitet werden. Sofern vorhanden, wird die Konfiguration über eine Datei, die von einer empfängerspezifischen Konfigurationssoftware generiert wird, gelesen. Die Datei enthält Serial Peripheral Interface (SPI) Befehle die von dem MATLAB Skript über Universal asynchronous receiver-transmitter (UART) an einen Mikrokontroller gesendet werden. Der Mikrokontroller sendet die Befeh-

le über eine SPI Schnittstelle an den Empfänger. Empfängt der Empfänger eine Nachricht über seinen UHF-Eingang, wird diese über die SPI Schnittstelle von dem Mikrokontroller ausgelesen und zurück an das MATLAB Skript gesendet. Die Dateien der Empfängerkonfigurationssoftware können auch für die Konfiguration des Nutzsignalgenerators verwendet werden. Das MATLAB Skript liest hierzu die Basisbandkonfiguration und die Nachrichtenstruktur aus der Konfigurationsdatei und sendet diese über die GPIB Schnittstelle an den Nutzsignalgenerator.

Die Soft- und Hardwarelösungen sind zwischen den Herstellern von UHF Empfängern unterschiedlich. Daher muss sowohl das Skript zum Auslesen der Empfängerkonfigurationsdatei als auch die Mikrokontrollersoftware für die UART-SPI Kommunikation für jeden Hersteller einzeln angepasst werden.

Parameterarten

Für die Konfiguration der Laborinstrumente wird bei dem Prüfstandkonzept zwischen direkten und indirekten Messgrößen, sowie zwischen konstanten- und sequenziellen Umgebungsparametern unterschieden. Abbildung 2.12 zeigt die verwendeten Parameter und ihre Typen. Indirekte Messgrößen lassen sich nicht direkt von einem Messgerät ablesen und benötigen zusätzliche Parameter. So ermittelt eine Empfindlichkeitsmessung Empfindlichkeit eines Empfängers über den Zwischenschritt des Bit- oder Paketfehlerverhältnisses ermitteln und benötigt zusätzliche Angaben zur Anzahl der zu sendenden Nachrichten und der Signalleistungsaufösung (vgl. Abbildung 2.7).

Umgebungsparameter beeinflussen bzw. stimulieren das DUT und werden in konstante und sequenzielle Parameter eingeteilt. Sequenzielle Umgebungsparameter werden über einen Parameterraum (von:Inkrement:bis) definiert und während des Tests sequenziell abgearbeitet. Konstante Umgebungsparameter bleiben während des gesamten Tests konstant. Die, für eine Messung definierten, Messparameter werden nach jeder Änderung der Umgebungsparameter neu erfasst.

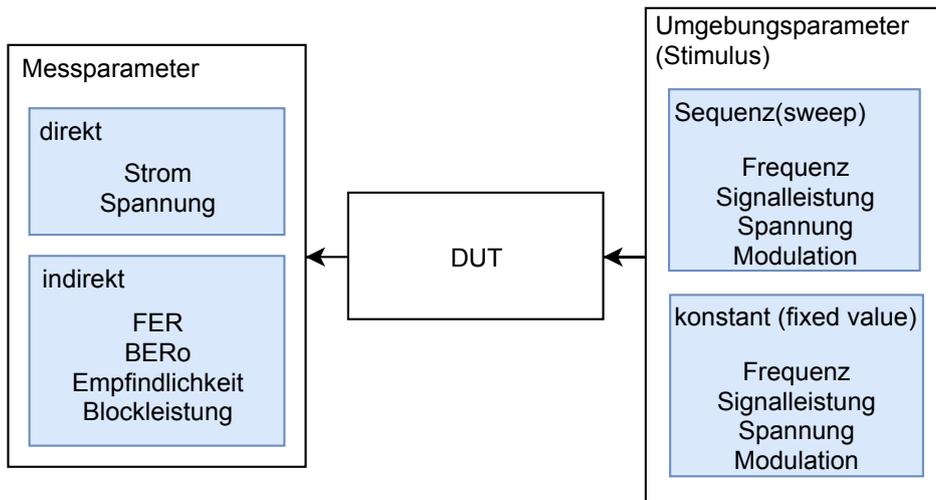


Abbildung 2.12: Parametertypen des Prüfstands und deren Zusammenhang mit dem DUT.

Benutzerschnittstelle

In Abbildung 2.13 ist die Struktur des Excel Dokumentes aus Abbildung 2.11 visualisiert. Die Parameter sind innerhalb des Exceldokumentes auf mehrere Reiter (Excelsheets) aufgeteilt (grün). Innerhalb eines Excelsheets gibt es verschiedene Tabellen (blau). Innerhalb einer Tabelle können Parameter gesetzt oder neu definiert werden.

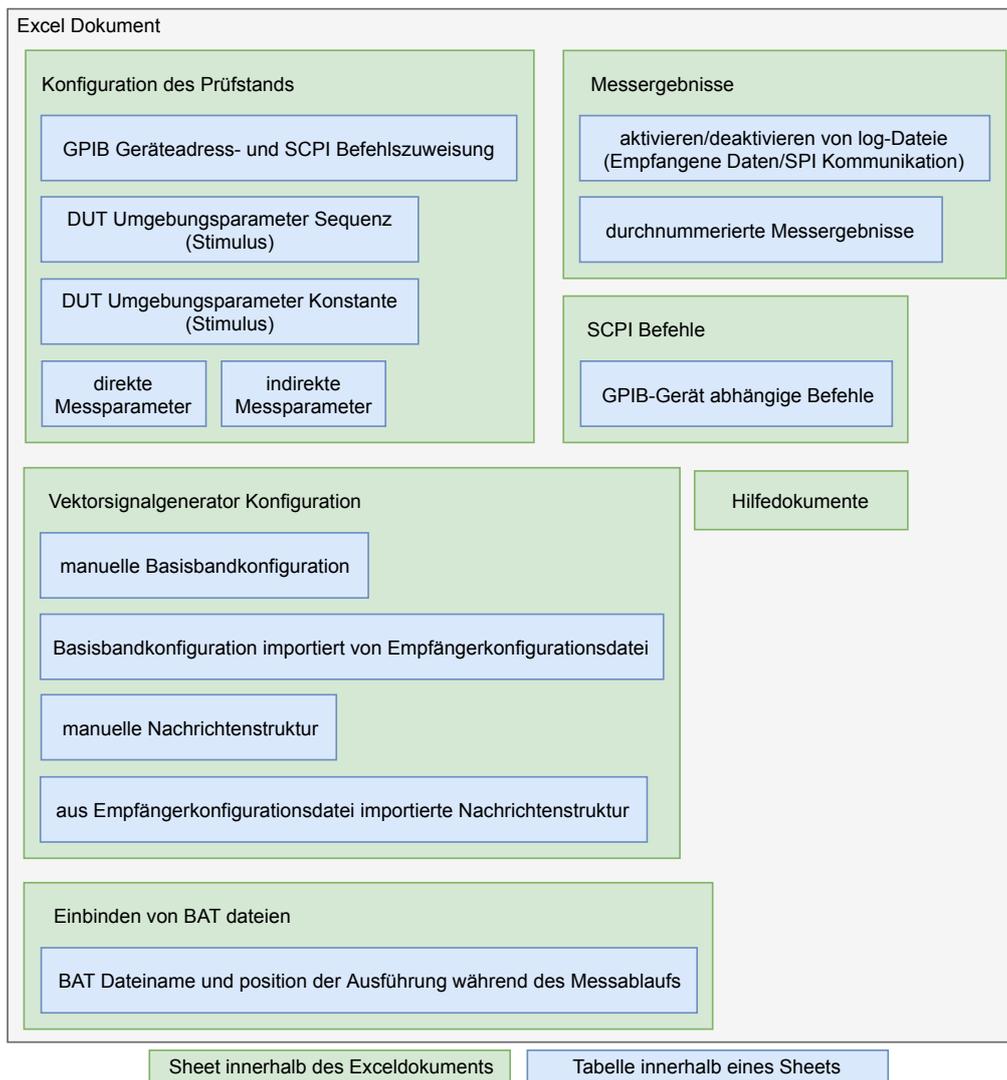


Abbildung 2.13: Visualisierte Struktur des Excel Dokuments.

Die Funktionsweise der Exceltabelle wird im Folgenden anhand der notwendigen Bedienschritte für ein Beispiel erläutert. Ein Störsignalgenerator und ein Nutzsinalgenerator sind über einen Richtkoppler an den UHF-Eingang eines Empfängers angeschlossen. Die verwendeten Geräte sind wie in Abbildung 2.11 verbunden. Der Nutzsinalgenerator ist bereits für das Senden von Nachrichten, die der Empfänger auf seiner Mittenfrequenz empfangen soll, konfiguriert. Die Sendeleistungen der Signalgeneratoren ist bereits eingestellt und sollen während der Messung konstant bleiben. Der Prüfstand soll nun genutzt

werden um das Störsignal schrittweise in seiner Frequenz zu ändern und nach jeder Änderung eine FER Messung durchzuführen. Als Störsignalgenerator kommt ein IFR2023A zum Einsatz. Der Nutzsinalgenerator ist ein SMJ100A. Folgende Schritte müssen für die Automatisierung des Messablaufs durchgeführt werden:

1. In der Tabelle „GPIB Geräteadress- und SCPI Befehlszuweisung“:
 - a) Die GPIB Adresse des verwendeten Laborgerätes eingetragen.
 - b) Den Gerätenamen aus einer vordefinierten Liste auswählen.
 - c) Die Gerätenummer zuweisen/eintragen.
2. In der Tabelle „DUT Umgebungsparameter Sequenz“:
 - a) Die gewünschte Gerätenummer eintragen (das Gerät, welches die Umgebung des DUT beeinflussen soll).
 - b) Die gewünschte Prüfstandfunktion auswählen (hier `set_frequency`).
 - c) Den gewünschten Parameterraum definieren (von:Inkrement:bis).
 - d) Die gewünschte Einheit des Umgebungsparameters auswählen (muss vom Gerät unterstützt werden, siehe jeweiliges Handbuch).
 - e) Eine Verzögerungszeit zwischen den Parameterschritten kann optional definiert werden.
3. Die gewünschte Messgröße auswählen (hier: FER) und die Gerätenummer des, für die Messgröße, verwendeten Laborinstrumentes aus Tabelle „GPIB Geräteadress- und SCPI Befehlszuweisung“ in die Tabelle „indirekte Messparameter“ eintragen. Die Auflösung [dB] und die Anzahl der übertragenen Nachrichten pro Messpunkt ist hier ebenfalls einzutragen.
4. Das MATLAB Skript starten.

Die GPIB Adressen für Schritt 1.a) sind über die Bedienelemente der Laborgeräte herauszufinden. Eine Liste der Gerätenamen befindet sich in Tabelle „GPIB-Gerät abhängige Befehle“. Durch die Zuordnung der GPIB Adresse zu einem Gerätenamen in Schritt 1.b) wird jeder Adresse automatisch ein Standard Commands for Programmable Instrumentation (SCPI) Befehlssatz zugeordnet. SCPI Befehle werden über die GPIB Schnittstelle

an ein Instrument gesendet und lassen die vollständige Fernsteuerung des Laborinstruments zu. Die SCPI Befehle sind herstellerepezifisch und befinden sich in der Tabelle „GPIB-Gerät abhängige Befehle“. Hier wird der Gerätenamen und ein SCPI Befehl zusammen mit einer universellen Prüfstandfunktion verknüpft. Am Beispiel der Prüfstandfunktion „set_frequency“ lautet der SCPI Befehl für den IFR2023A Signalgenerator „CFRQ“. Die SCPI Befehle sind den Handbüchern der Geräte entnommen. Gerätenamen und zugehörige SCPI Befehle bzw. „universelle Prüfstandfunktionen“ können in der Tabelle beliebig ergänzt werden.

Abbildung 2.14 zeigt die Verknüpfungen der eingegebenen Parameter für den Störsignalgenerator und der daraus generierten GPIB Befehle.

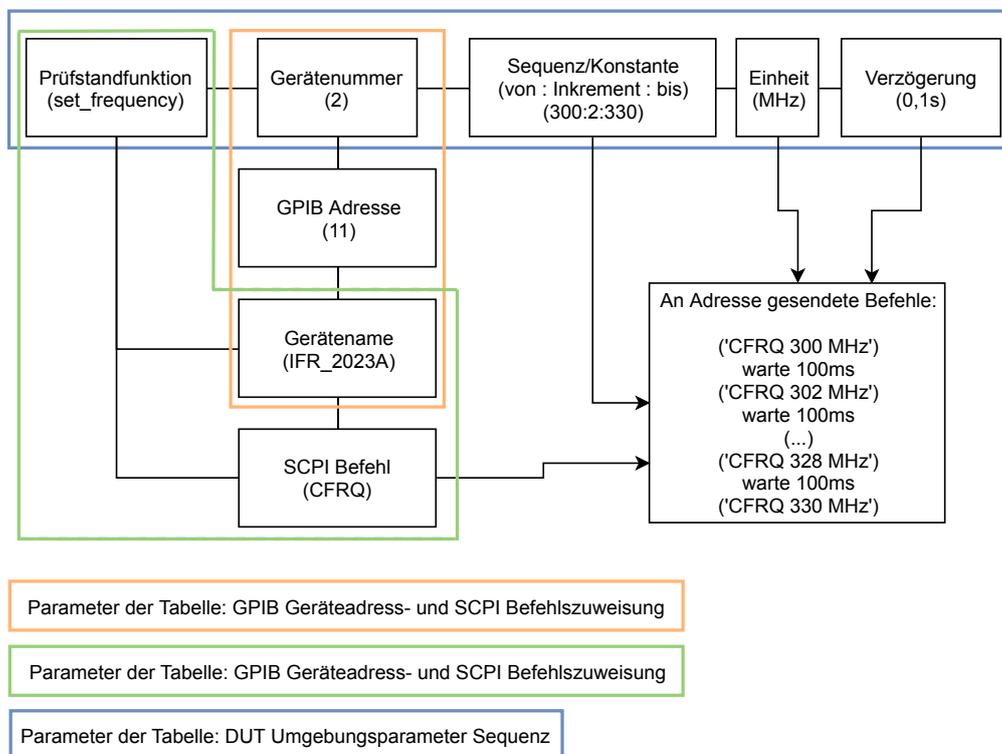


Abbildung 2.14: Parameterverknüpfung am des oben erläuterten Beispiels für den Störsignalgenerator.

Eine Möglichkeit den Prüfstand individuell und ohne Programmierkenntnisse in MATLAB zu erweitern ist die Einbindung externer BAT-Dateien. Diese können in Tabelle

„BAT Dateiname und position der Ausführung während des Messablaufs“ an verschiedenen Punkten im Messablauf platziert werden. Mögliche Positionen der BAT-Dateien sind vor oder nach der Prüfstandkonfiguration und vor oder nach der Veränderung von Umgebungsparametern.

Die Basisbandkonfiguration und Nachrichtenstruktur für die Konfiguration des SMJ100A kann im Sheet „Vektorsignalgenerator Konfiguration“ entweder manuell vorgegeben oder durch eine von der Konfigurationssoftware des Empfängers erzeugte Konfigurationsdatei importiert werden.

In dem Sheet „Messergebnisse“ werden die Messergebnisse im Rohformat von dem MATLAB Skript abgelegt. Des Weiteren kann hier das Mitschreiben der Empfängerkommunikation mit dem Mikrokontroller (vgl. Abbildung 2.11) de- oder aktiviert werden.

2.3 Prüfstandsanzwendung

Im Folgenden werden die Anwendungsmöglichkeiten des Prüfstandes an verschiedenen Beispielmessungen veranschaulicht.

2.3.1 Vergleich von verschiedenen Messunsicherheiten

Abbildung 2.15 zeigt zwei Messung des Signalleistungsabhängigen FER derselben Empfängerkonfiguration mit jeweils unterschiedlichen Messunsicherheiten. Sie veranschaulicht den Einfluss einer, in Bezug auf die Auflösung der Signalleistung, zu groß gewählten Messunsicherheit des FER bei einer Empfindlichkeitsmessung. Ist die Messunsicherheit des FER gegenüber der Auflösung der Empfindlichkeitsmessung zu groß, unterliegen die Messergebnisse einer größeren Streuung als der Abstand der Messpunkte. In diesem Fall können mehrere Ergebnisse für die Empfindlichkeit vorliegen (roter Graph).

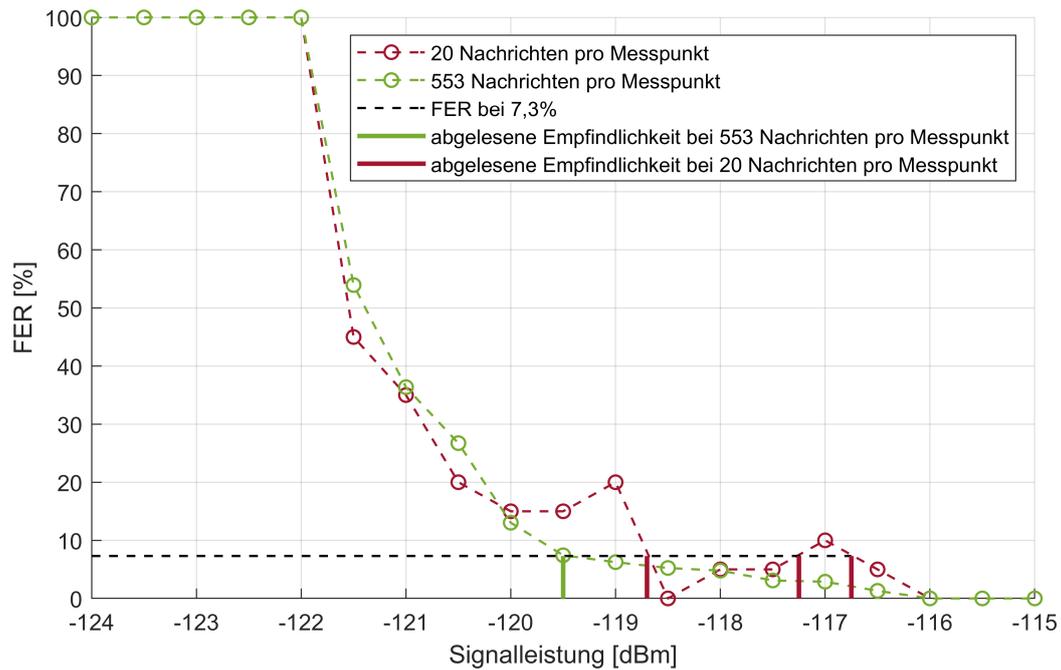


Abbildung 2.15: Zwei Messungen des Signalleistungsabhängigen FER mit unterschiedlichen Messunsicherheiten derselben Empfängerkonfiguration. Zusätzlich ist die resultierende Empfindlichkeit der jeweiligen Messung eingezeichnet (durchgehende Linien). Die Signalleistung wird in 0,5 dB Schritten abgetastet.

2.3.2 Empfängervergleich

Abbildung 2.16 zeigt das Signalleistungsabhängige FER derselben Basisbandkonfiguration von zwei verschiedenen UHF Empfängern. Das unterschiedliche Verhalten resultiert u.a. aus unterschiedlichen Zusatzeinstellungen für die Detektion von Signalen.

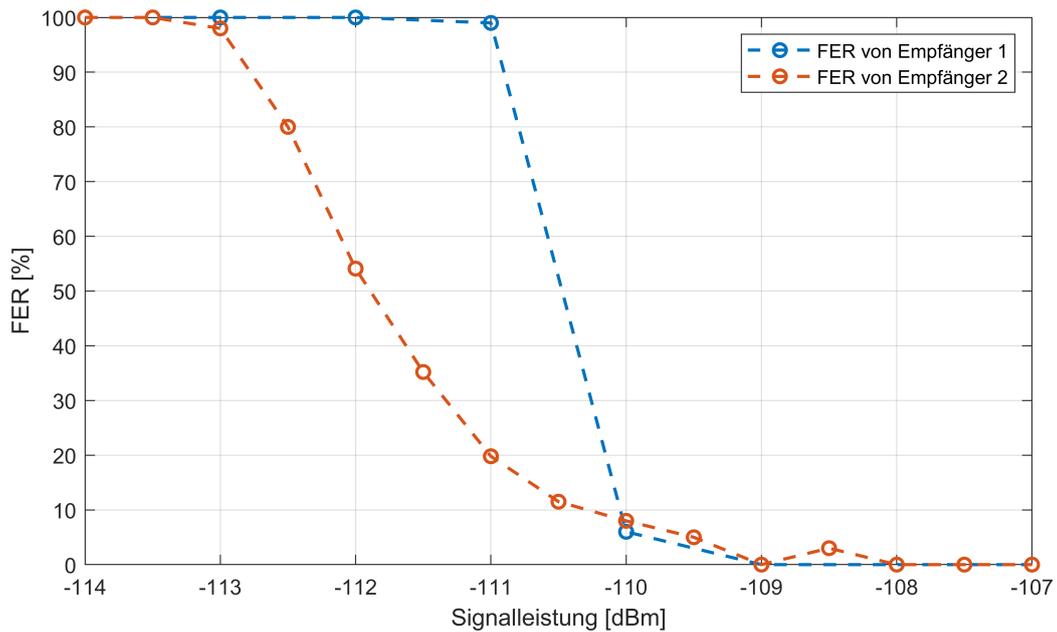


Abbildung 2.16: Vergleichsmessung unterschiedlicher UHF Empfänger mit derselben Basisbandkonfiguration.

2.3.3 Messungen mit zwei veränderbaren Umgebungsparametern

Werden bei einer Messung zwei statt, wie bei den vorigen Messbeispielen, einer veränderbaren Umgebungsvariablen verwendet, lässt sich eine Messgröße mit Hilfe unterschiedlicher Farben darstellen. Abbildung 2.17 zeigt ein Beispiel für eine Messung mit zwei veränderbaren Umgebungsparametern und einer Messgröße. Hier wird das Nutzsignal in seiner Leistung und in seinem Frequenzabstand zur Mittfrequenz des Empfängers verändert (Center Frequency Offset). Bei gleichzeitiger Messung des FER erhält man eine Veranschaulichung der signalleistungsabhängigen Kanalfilterbandbreite des Empfängers.

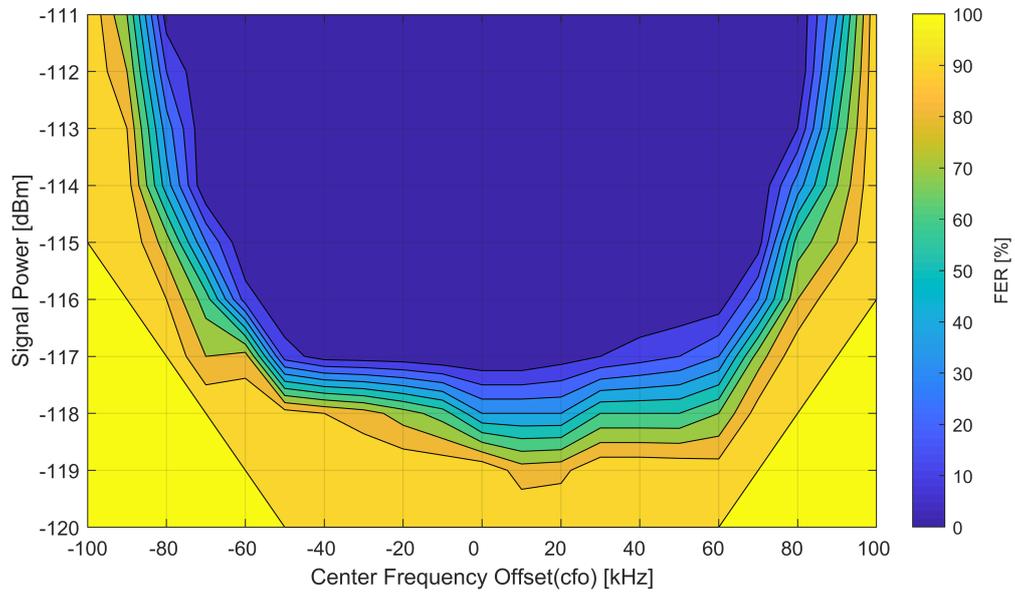


Abbildung 2.17: Messung des FER in Abhängigkeit der Signalleistung und der Trägerfrequenz des Signals. Die Trägerfrequenz wird in 10 kHz Schritten und die Signalleistung in 1 dB Schritten abgetastet.

3 Zusammenfassung und Ausblick

3.0.1 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde ein Prüfstandkonzept für das automatisierte Messen der regulierten Eigenschaften von Sub-GHz Empfängern entwickelt. Dazu wurden die Messgrößen und Messunsicherheiten des FER, der Empfindlichkeit und des Blockings von digitalen Empfängern erläutert. Auf die Möglichkeit einer einfachen Bedienung des Prüfstandes wurde durch die Verwendung des verbreiteten Tabellenprogramms Excel eingegangen. Durch die Erweiterungsmöglichkeiten von Tabellen steht eine einfache Möglichkeit für die Erweiterung des Prüfstandes um neue Laborinstrumente zur Verfügung. Die Automatisierung der Messabläufe konnte beispielhaft mit Hilfe der Programmiersprache MATLAB realisiert und angewendet werden. Für die Untersuchung von zwei Empfängern unterschiedlicher Hersteller wurde jeweils ein Mikrokontroller für die Kommunikation zwischen MATLAB Skript (UART schnittstelle) und integriertem Empfänger (SPI Schnittstelle) programmiert und in den Prüfstand eingebunden. Da die SPI Schnittstelle von jedem Empfängerhersteller unterschiedlich verwendet wird, muss die Anbindung eines Empfängers über einen Mikrokontroller Herstellerspezifisch programmiert werden. Anhand verschiedener Messbeispiele wurde nur ein Ausschnitt möglicher Messungen präsentiert, da das entwickelte Konzept die möglichen Messparameter und deren Kombination offen lässt.

3.0.2 Ausblick

Jede Konfiguration eines digitalen Empfängers lässt das detektieren von Nachrichten im Rauschen zu. Diese fälschlich detektierten Nachrichten können eine zusätzliche Messgröße darstellen und eine Aussage über die Qualität der Empfängerkonfiguration sein. Fälschlich empfangene Nachrichten werden bei dem entwickelten Prüfstand verworfen und nicht betrachtet. Ein mögliche Erweiterung des Prüfstandes kann die Messgröße der fälschlich

detektierten Nachrichten sein. Neben der Automatisierung des Messablaufs ist eine automatisierte Visualisierung der Messergebnisse für den Anwender interessant. Dies stellt eine weitere Erweiterungsmöglichkeit für den Prüfstand dar. Eine weitere praktische Erweiterung ist das automatische Kalibrieren der Signalverluste zwischen Signalgenerator und Empfängereingang mit Hilfe eines Spektrum-Analysators. Die Verluste der Signalfade müssen bei dem entwickelten Prüfstand bei der Parametereingabe bzw. bei der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt werden.

Literatur

- [Aer09] Aeroflex. *AM/FM SIGNAL GENERATORS 2023A, 2023B, 2025, Operating Manual*. 24. Feb. 2009. URL: <https://www.avionteq.com/document/2023A-2023B-operations-manual.pdf> (besucht am 18.06.2019).
- [Eng+19] Per Enge u. a. *Measurements of Man-Made Spectrum Noise Floor*. 18. Juni 2019. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050041714.pdf>.
- [ETS17a] ETSI. *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 1: Technical characteristics and test methods*. 3. Apr. 2017. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_40/en_30022001v020401o.pdf.
- [ETS17b] ETSI. *Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement*. 1. Feb. 2017. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/03.01.01_60/en_30022001v030101p.pdf (besucht am 12.08.2019).
- [ITU16] ITU. *Celebrating the Radio Regulations*. Hrsg. von Matthew Clark. 2016. URL: https://www.itu.int/en/itunews/Documents/2016-05/2016_ITUNews05-en.pdf (besucht am 10.06.2019).
- [Kel11] Andres Keller. *Breitbandkabel und Zugangsnetze*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. DOI: [10.1007/978-3-642-17631-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17631-9).
- [Key19] Keysight. *Product overview of Bit Error Ratio Testers*. Hrsg. von Keysight. 2019. URL: <https://www.keysight.com/de/de/products/bit-error-ratio-testers.html> (besucht am 15.08.2019).

- [LK12] Fernando Puente León und Uwe Kiencke. *Messtechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. DOI: [10.1007/978-3-642-30074-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30074-5).
- [Mat19] MathWorks. *Instrument Control Toolbox*. 2019. URL: <https://de.mathworks.com/products/instrument.html> (besucht am 03.09.2019).
- [Pel14] Giuseppe Pelosi. „A Tribute to James Clerk Maxwell on the 150th Anniversary of His Equations (1864–2014) [Historical Corner]“. In: *IEEE* 56.6 (Dez. 2014), S. 295–298. ISSN: 1045-9243. DOI: [10.1109/MAP.2014.7011074](https://doi.org/10.1109/MAP.2014.7011074).
- [Rep18] Newzoo’s Global Mobile Market Report. *List of countries by smartphone penetration*. 2018. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_smartphone_penetration (besucht am 02.08.2019).
- [Roh16] Rohde&Schwarz. *SMJ100A Vector Signal Generator, Data sheet*. 28. Jan. 2016. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/s/smj100a_1/SMJ100A_OperatingManual_en_14.pdf (besucht am 14.05.2019).
- [Sch19] Peter Schmidt. *Die verborgene Seite des Mobilfunks - HF-Störquellen im Uplink*. 18. Juni 2019. URL: https://media.ccc.de/v/35c3-9407-die_verborgene_seite_des_mobilfunks.
- [Sem08] Nordic Semiconductor. *RF Performance Test Guidelines, White Paper*. 2. Nov. 2008. URL: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nwp_006.pdf (besucht am 15.07.2019).
- [Sem15] NXP Semiconductors. *NCK2982AHN, MantraCS - UHF transceiver, Product data sheet*. 27. Feb. 2015.
- [Sem17] NXP Semiconductors. *AN-SCA1710 Lizard-HW V11, Manual*. 12. Dez. 2017.
- [SS01] D. L. Sengupta und T. K. Sarkar. „Maxwell, Hertz, the Maxwellians and the early history of electromagnetic waves“. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.01CH37229)*. Bd. 1. Juli 2001, 14–17 vol.1. DOI: [10.1109/APS.2001.958782](https://doi.org/10.1109/APS.2001.958782).

- [Ver+19] Ovidiu Vermesan u. a. *The Next Generation Internet of Things – Hyperconnectivity and Embedded Intelligence at the Edge*. 18. Juni 2019. URL: http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/The_Next_Generation_IoT_Hyperconnectivity_and_Embedded_Intelligence_at_the_Edge_Research_Trends_IERC_2018_Cluster_eBook_978-87-7022-007-1_P_Web.pdf.
- [Wik19a] contributors Wikipedia. *Bit error rate*. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate#Analysis_of_the_BER (besucht am 17.07.2019).
- [Wik19b] contributors Wikipedia. *Normalverteilung*. 2019. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung> (besucht am 12.08.2019).
- [Wik19c] contributors Wikipedia. *Test execution engine*. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Test_execution_engine (besucht am 14.08.2019).
- [Woo19] Joe Wood. *History of the Radio: From Inception to Modern Day*. Hrsg. von Joe Wood. 12. Juni 2019. URL: <https://www.techwholesale.com/history-of-the-radio.html>.
- [Zha19] Houlin Zhao. *Celebrating the Radio Regulations*. Hrsg. von Matthew Clark. 15. Juni 2019. URL: https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2016-05/2016_ITUNews05-en.pdf.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Prüfstandkonzept für die Leistungsfähigkeit von Sub-GHz Empfängern

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original