

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

**zur Erlangung des Grades eines „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik**

**Thema: „Integration eines Kanalemulators in den Labormessplatz
für die Bewertung von industriellen Funksystemen“**

Eingereicht von: **Marc Rabsilber**

Angefertigt für: Institut für Automation und Kommunikation Magdeburg eV.

Matrikel: 2012 3191

Ausgabetermin: 29. Januar 2016

Abgabetermin: 23. März 2016

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr Dipl.-Ing. (FH) Marko Krätzig

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

I. Kopie der Aufgabenstellung

Hintergrund

Seit mehr als 15 Jahren kommen Funklösungen in industriellen Automatisierungsanwendungen zum Einsatz. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, ein optimales Zeit- und Fehlerverhalten unter bestimmten Einflussgrößen zu garantieren. Im Gegensatz zur kabelgebundenen Kommunikation ist bei der Funkkommunikation der Übertragungskanal zeitvariant und frequenzselektiv. Zudem ist der Funkübertragungskanal externen Beeinflussungen ausgesetzt. Daher besteht ein großes Interesse, das Zeit- und Fehlerverhalten der industriellen Funklösungen in der industriellen Zielumgebung zu bestimmen. Die Untersuchungen in der industriellen Zielumgebung sind aber sehr kostenintensiv, aufwendig und benötigen eine außerordentlich hohe organisatorische Vorbereitung. Aus diesem Grund kommt einem Labor- oder Referenzmessplatz eine herausragende Bedeutung zu, weil durch diesen reproduzierbare Messungen unter Laborbedingungen durchgeführt werden können. Um die Eigenschaften des Übertragungskanals der Zielumgebung in der Laborumgebung zu berücksichtigen, soll ein Kanalemulator zum Einsatz kommen.

Aufgabenstellung

In der Bachelorarbeit soll ein Kanalemulator in den vorhandenen Funk-Transfer-Tester, einen Labormessplatz für die Bewertung von industriellen Funksystemen, integriert werden. Dafür soll der vorhandene Kanalemulator in Betrieb genommen und dessen Herstellerangaben und Funktionen validiert werden. Zudem soll an einem praktischen Beispiel die Funktionsweise des Labormessplatzes evaluiert werden. Des Weiteren gehört eine detaillierte Dokumentation zur Aufgabenstellung.

II. Kurzreferat mit bibliografischer Beschreibung in deutscher und englischer Sprache

Rabsilber, Marc

Hochschule Magdeburg - Stendal

Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign

Bachelorarbeit Nummer: 2012 3191

60 Seiten, 2 Tabellen, 35 Abbildungen, 13 Quellen

Diese Arbeit befasst sich mit der Inbetriebnahme und Integration eines Kanalemulators in einen Versuchsaufbau zur Bewertung von industriellen Funksystemen. Hierzu wurde der Kanalemulator mithilfe definierter Kenngrößen charakterisiert, die Grenzen des Einsatzbereiches erfasst und darauf folgend einige Performancekenngrößen eines Funksystems mithilfe des Labormessplatzes gemessen.

The bachelor thesis addresses the integration of a channel emulator into a test assembly for benchmarking industrial wireless systems. The channel emulator has been evaluated and an operating range has been defined. A few parameters of a wireless system were measured.

III. Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift des Verfassers

IV. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
2	Stand der Technik / Grundlagen	12
2.1	Performancebewertung von industriellen Funksystemen	12
2.2	Performancekenngrößen.....	14
2.2.1	Einleitung	14
2.2.2	Zeitkenngrößen	14
2.2.3	Paketverlustrate	15
2.3	Einflussgrößen	17
2.3.1	Einleitung	17
2.3.2	Charakterisierung des Einsatzbereiches.....	17
2.3.3	Freiraumdämpfung.....	18
2.3.4	Mehrwegeausbreitung.....	18
2.3.5	Medienbelegung	20
2.3.6	Sendezeitintervall.....	20
3	Labormessplatz für die Performancebewertung von industriellen Funksystem	20
3.1	Aufgaben eines Labormessplatzes	20
3.2	Bestandteile des Labormessplatzes.....	21
3.2.1	Kanalemulator	21
3.2.2	Spektrumanalysator	24
3.2.3	Funk-Transfer-Tester	25
3.2.4	Data Quality Analyzer	26
3.2.5	Vektor Signalgenerator	27
3.2.6	Abschirmboxen	27
3.2.7	Aufbau des Labormessplatzes	27
4	Evaluierung des Kanalemulators	28

4.1	Inbetriebnahme QPER	28
4.1.1	Messkabel.....	28
4.1.2	Einfügedämpfung.....	29
4.1.3	Frequenzeinstellung der Antennen	31
4.1.4	Isolation.....	32
4.1.5	Einstellbare Dämpfung.....	34
4.1.6	Schaltzeit, Schaltintervall	42
4.1.7	Fast Fading Area.....	46
4.1.8	Phasenmessung	48
4.1.9	Auswertung	49
4.2	Evaluierung an einem praktischen Beispiel.....	50
4.2.1	Einleitung	50
4.2.2	RAD-2400	50
4.2.3	Genutzte Frequenzen	50
4.2.4	Sterntopologie.....	51
4.2.5	Baumtopologie	53
4.2.6	Medienbelegung	54
4.2.7	Übertragungszeit.....	56
5	Zusammenfassung und Ausblick	58

V. Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Benennung	Einheit
P_N	Rauschleistung	dBm
P_{PL}	Anzahl verlorener Pakete	-
P_{Rx}	Anzahl empfangener Pakete	-
P_{Rxs}	Anzahl korrekt empfangener Pakete	-
P_S	Sendeleistung	dBm
P_{Tx}	Anzahl gesendeter Pakete	-
P_e	Empfangsleistung	dBm
t_i	Zeitspanne eines Signals	ms
t_B	Belegungsdauer	ms
T	Betrachtetes Zeitintervall	ms
a_F	Freiraumdämpfung	dB
a_F	Freiraumdämpfung	dB
a_e	Einfügedämpfung	dB
f_N	Betriebsfrequenz	Hz
t_S	Sendezeitintervall	s
$NDI(p)$	Nutzdateninhalt des Paketes ist unverfälscht	-
PLR	Packet Loss Rate	%
$R(p)$	Paket in der richtigen Reihenfolge eingetroffen	-
$TT(p)$	Übertragungszeit des Paketes blieb unter TT_{Max}	-
a	Dämpfung	dB
r	Entfernung	m
d_{diff}	Dämpfungsdifferenz	dB
d_x	Dämpfung zur Dämpfungsstufe x	dBm
d_0	Einfügedämpfung	dBm

VI. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AIS	Air Interface Simulator
BTS	Base Tranceiver Station
CSV	Comma separated Values
DUT	Device under test
EIRP	Equivalent isotropically radiated power
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTT	Funk Transfer Tester
IP	Internet Protokoll
MIMO	Multiple Input Multiple Output
QPER	Qosmotec Propagation Effects Replicator
RSA	Realtime Spectrum Analyzer
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SUT	System under Test

VII. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtungsraum [1]	13
Abbildung 2: Darstellung der Kenngrößen	15
Abbildung 3: Prinzip Labormessplatz	21
Abbildung 4: Anschlüsse und Verbindungen des QPER	22
Abbildung 5: Beispiel QPER Software Interface.....	23
Abbildung 6: QPER Struktur.....	24
Abbildung 7: Funk-Transfer-Tester Aufbau	26
Abbildung 8: Aufbau Beispiel.....	28
Abbildung 9: Kabeldämpfung	29
Abbildung 10: frequenzabhängige Einfügedämpfung zwischen Port 1.2 und 2.2.	30
Abbildung 11: frequenzabhängige Einfügedämpfung zwischen Port 4 und 5.....	31
Abbildung 12: Frequenzabhängige Freiraumdämpfung	32
Abbildung 13: Dämpfungsverlauf Mehrantennenports bei 2,45 GHz.....	35
Abbildung 14: Dämpfung in Abhängigkeit zur Phase	36
Abbildung 15: Dämpfungsverlauf bei unterschiedlichen Phasen.....	37
Abbildung 16: Schaltdifferenz bei Mehrantennenports bei 2,45 GHz	37
Abbildung 17: Dämpfungsverlauf Einantennenports bei 2,45 GHz.....	38
Abbildung 18: Schaltdifferenz bei Einantennenports bei 2,45 GHz	39
Abbildung 19: Dämpfungsverlauf Einantennenports zu Mehrantennenports.....	40
Abbildung 20: Schaltdifferenz zum vorhergehenden Wert Port 1.2 zu Port 4.....	40
Abbildung 21: Dämpfungsverlauf Softwareinterface 500 MHz	41
Abbildung 22: Schaltdifferenz zum vorhergehenden Wert bei 500 MHz	41
Abbildung 23: Szenario "Schaltzeit"	42
Abbildung 24: Freiraumdämpfung bei 2,45 GHz	43
Abbildung 25: Messung Schaltintervall 1 s.....	44
Abbildung 26: Messung Schaltintervall 100 ms.....	45

Abbildung 27: Messung Schaltzeit	46
Abbildung 28: Messung Schaltintervall 100 ms mit Fading	47
Abbildung 29: Messung Schaltintervall 100 ms mit korrigierten Fading	47
Abbildung 30: Phasenmessung.....	48
Abbildung 31: Genutzte Frequenzen im 2,4 GHz ISM Band	51
Abbildung 32: Spektrogramm Sterntopologie	52
Abbildung 33: Spektrogramm Baumtopologie	54
Abbildung 34: Medienbelegung Sterntopologie 125 kbit/s.....	55
Abbildung 35: Übertragungszeit	56

VIII. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Isolation	33
Tabelle 2: Größe Dämpfungsintervall	34

1 Einleitung

Durch die zunehmende Verwendung von Funklösungen in Industrie, Verkehr und Heimbereich hat die Fähigkeit, verschiedene Funksysteme hinsichtlich ihrer Eignung für ein definiertes Umfeld beurteilen zu können, deutlich an Bedeutung zugenommen. Um diese Beurteilung unter Rücksichtnahme wichtiger Eigenschaften entsprechender Umgebungen durchführen zu können, bietet sich die Verwendung eines anpassbaren Anwendungsszenarios in einem Labor an. Aufbau, Inbetriebnahme und Test eines solchen Labormessplatzes werden in dieser Arbeit behandelt.

2 Stand der Technik / Grundlagen

2.1 Performancebewertung von industriellen Funksystemen

Damit Funklösungen aus Sicht der Automation bewertet werden können ist die Entwicklung einheitlicher, universeller und reproduzierbarer Standardtests notwendig. Die Vorgehensweise und Ergebnisdarstellung einer solchen Methodik muss in der automatisierungstechnischen Fachwelt akzeptiert werden, die zu ermittelnden Kenngrößen müssen geeignet sein, um die Funklösungen in Bezug auf die jeweilige Anwendung zu bewerten. Zudem muss die Methodik unabhängig von spezifischen Funktechnologien sein, so dass sie auch auf zukünftige Funklösungen anwendbar ist. Relevante Einflussgrößen sind zu erarbeiten, daraus resultierende Wertebereiche sind anzuwenden. [1]

Ausgangspunkt für die Performancebewertung von industriellen Funksystemen ist die abstrakte Beschreibung von Anwendungsbereichen und Einsatzfällen. Abbildung 1 zeigt diese Abstraktion als Betrachtungsraum für die weiteren Ausführungen [1].

Eine automatisierungstechnische Anwendung beinhaltet verteilte Anwendungsmodule, von denen einige das Funkübertragungsmedium zur Kommunikation verwenden. Je nach Übertragungstechnologie oder -standard können Infrastrukturkomponenten als Teil des Kommunikationssystems

erforderlich sein. Die Schnittstelle zwischen dem Funkgerät und dem verteilten Anwendungsmodul wird als Bezugsschnittstelle bezeichnet.

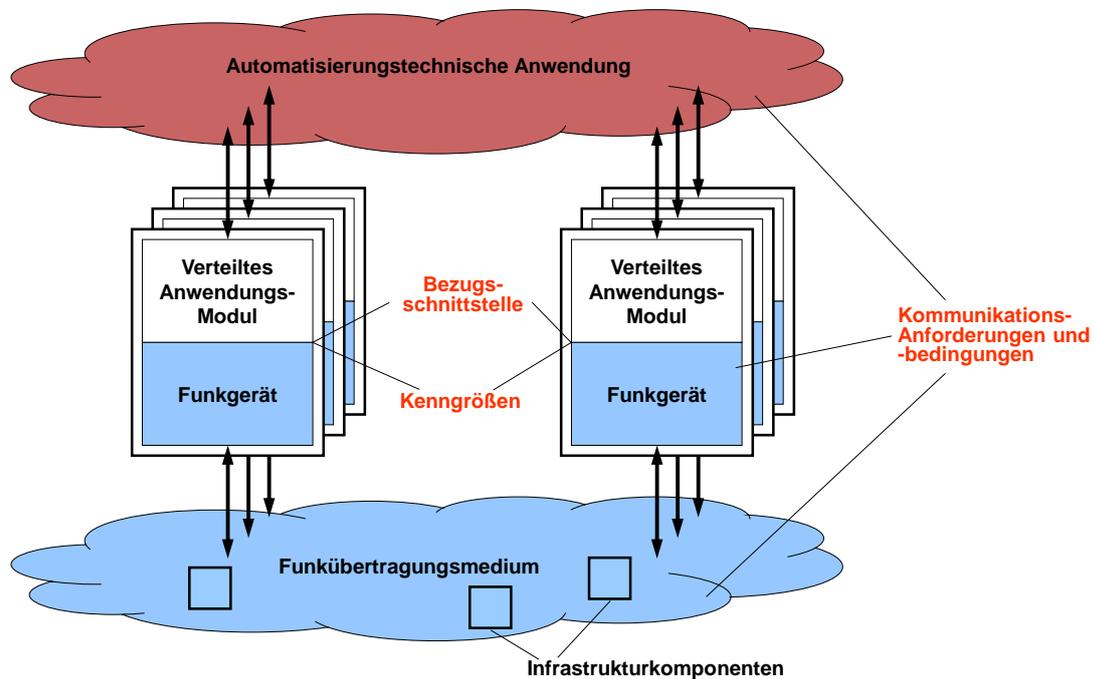


Abbildung 1: Betrachtungsraum [1]

Zur Bewertung der Eigenschaften des Kommunikationssystems sind Werte typischer Kenngrößen bezogen auf diese Bezugsschnittstelle zu ermitteln. Das Zeit- und Fehlverhalten der Funkkommunikation wird durch die Kommunikationsanforderungen der Anwendung, die Randbedingungen des Funkkommunikationssystems und die Übertragungsbedingungen beeinflusst. [1]

Daraus lässt sich ein allgemeines Bewertungskriterium ableiten, das eine Funklösung erfüllen muss, um in einem industriellen Automatisierungssystem eingesetzt werden zu können. Ein Wert muss bei definierten Bedingungen, Zeitpunkten und Schnittstellen fehlerfrei zur Verfügung stehen. Eine Methode, die diese Bewertung gewährleisten soll, muss also diese einzelnen Aspekte berücksichtigen. [1]

2.2 Performancekenngrößen

2.2.1 Einleitung

Die Kenngrößen Übertragungszeit, Aktualisierungszeit und Paketverlustrate werden als grundlegende Kenngrößen zur Bewertung von industriellen Funklösungen verwendet. Im Folgenden sind diese Kenngrößen definiert.

2.2.2 Zeitkenngrößen

2.2.2.1 Übertragungszeit

Die Übertragungszeit (Transmission time, t_{TT}) ist eine maßgebliche Kenngröße für die Bewertung von Echtzeitfähigkeit und Verfügbarkeit eines Funksystems. Diese kann zum Beispiel bei der Kommunikation in einem Regelkreis zwischen Sensor (Producer) und Steuerung (Consumer) relevant sein. Die Übertragungszeit ist definiert als Zeitintervall von der Übergabe des ersten Symbols eines Nutzdatenpaketes an die Bezugsschnittstelle des Producers bis zur Übergabe des letzten Symbols desselben Nutzdatenpaketes an die Bezugsschnittstelle des Consumers. Da es keine einheitliche Charakteristik der Schnittstelle gibt, sind relevante Kenngrößen im Zusammenhang mit der Schnittstelle anzugeben. [1]

2.2.2.2 Aktualisierungszeit

Die Aktualisierungszeit (update time, t_{UT}) entspricht im Idealfall dem Sendezeitintervall t_{TI} . Das heißt, die übertragenen Nutzdaten werden an der Bezugsschnittstelle des Consumers in denselben zeitlichen Abständen übernommen, wie sie an der Bezugsschnittstelle des Producers übergeben wurden. Die Aktualisierungszeit ist definiert als der Zeitabschnitt von der Übergabe des letzten Bestandteils der Nutzdaten eines Producers an der Anwendungsschnittstelle eines Consumers bis zur Übergabe des letzten Bestandteils der unmittelbar nachfolgend übertragenen Nutzdaten vom gleichen Producer. Die Aktualisierungszeit ist besonders für die Bewertung der Echtzeitfähigkeit von Anwendungen mit periodisch auftretenden Kommunikationsanforderungen geeignet. [1]

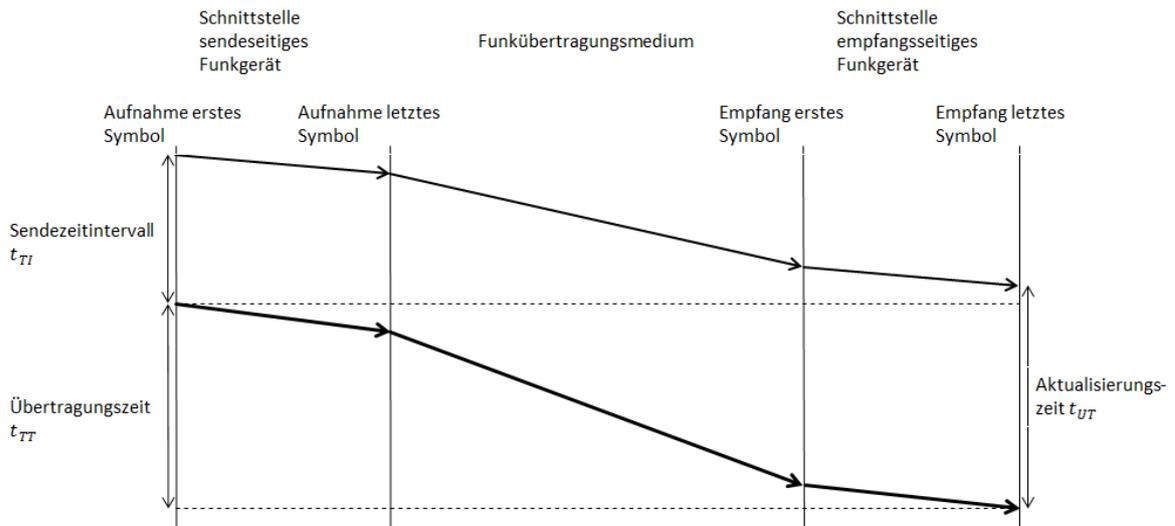


Abbildung 2: Darstellung der Kenngrößen

2.2.3 Paketverlustrate

2.2.3.1 Definition

In Abhängigkeit von der Anzahl korrekt empfangener und verlorener Pakete kann die Paketverlustrate PLR ermittelt und zur Bewertung eines Funksystems herangezogen werden. Diese berechnet sich als Anteil der verlorenen Pakete an den von der Anwendungsschnittstelle des Producers gesendeten Paketen [1]:

$$PLR = \frac{P_{Rx} - P_{Rxs}}{P_{Rx}}$$

2.2.3.2 Anzahl korrekt empfangener Pakete

Zur Bewertung der Paketverlustrate und Verfügbarkeit von Funksystemen wird die Anzahl korrekt empfangener Pakete einer Übertragung erfasst.

Ein Paket p gilt als empfangen, wenn es an der Anwendungsschnittstelle des Consumers eingegangen ist und an die Anwendung übergeben wurde. Damit ein Paket als korrekt empfangenes Paket gewertet wird, müssen zusätzlich folgende Bedingungen erfüllt sein [1]:

Der Nutzdateninhalt des Paketes ist unverfälscht, das heißt es treten keine Symbolfehler auf:

$$NDI(p) = \begin{cases} 1, & \text{wenn kein Symbolfehler auftritt} \\ 0, & \text{wenn mindestens ein Symbolfehler auftritt} \end{cases} \quad (2.1)$$

Das Paket p_i trifft in der richtigen Reihenfolge an der Anwendungsschnittstelle des Consumers ein, das heißt es wurde von einem nachfolgenden Paket nicht überholt:

$$R(p_i) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } SN(p_i) > SN(p_{i-1}) \\ 0, & \text{wenn } SN(p_i) < SN(p_{i-1}) \end{cases} \quad (2.2)$$

Das Paket p_i hat die maximal zulässige Übertragungszeit T_{TTMax} nicht überschritten:

$$TT(p_i) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } t_{TT} < T_{TTMax} \\ 0, & \text{wenn } t_{TT} > T_{TTMax} \end{cases} \quad (2.3)$$

Für die Anzahl korrekt empfangener Pakete P_{Rxs} gilt mit (2.1), (2.2) und (2.3) [1]:

$$P_{Rxs} = \sum_{i=1}^n NDI(p_i) \cdot R(p_i) \cdot TT(p_i) \quad (2.4)$$

2.2.3.3 Anzahl verlorener Pakete

Zur Bewertung der Paketverlustrate und Verfügbarkeit von Funksystemen wird die Anzahl verlorener Pakete einer Übertragung erfasst.

Ein Paket p gilt als verloren, wenn es an der Anwendungsschnittstelle des Consumers nicht eingeht. Es gilt außerdem als verloren, wenn es nicht korrekt empfangen wurde, also eine der folgenden Bedingungen erfüllt [1]:

- Der Nutzdateninhalt ist verfälscht (mindestens ein Symbolfehler) (siehe (2.1))
- Das Paket wurde von einem später gesendeten Paket überholt (siehe (2.2))
- Das Paket hat die maximal zulässige Sendezeit T_{TTMax} überschritten (siehe (2.3))

Für die Anzahl verlorener Pakete gilt nach (2.1), (2.2) und (2.3):

$$P_{PL} = P_{Rx} - P_{Rxs} + \sum_{i=1}^n (1 - NDI(p_i)) \cdot (1 - R(p_i)) \cdot (1 - TT(p_i))$$

2.3 Einflussgrößen

2.3.1 Einleitung

Umgebungsbezogene Einflussgrößen charakterisieren die Wirkung äußerer Gegebenheiten auf das Funksystem. Hierbei wird zwischen aktiven und passiven Einflüssen unterschieden. Unter aktive Einflussgrößen fallen durch weitere Funksysteme erzeugte Signale, die das Nutzsignal beeinflussen. Passive Einflussgrößen beziehen sich dagegen auf Eigenschaften der Umgebung, die das Funksignal durch Mehrwegeausbreitung und Abschattung verändern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur Bezug auf die passiven Einflussgrößen genommen, die vom Kanalemulator emuliert werden können.

2.3.2 Charakterisierung des Einsatzbereiches

Der Einsatzbereich gibt an, ob das Kommunikationssystem

- innerhalb von Gebäuden (Indoor)
- außerhalb von Gebäuden (Outdoor) oder
- teilweise innerhalb und teilweise außerhalb von Gebäuden (Indoor/Outdoor)

zum Einsatz kommt. Im Indoor-Bereich sind zusätzliche Angaben sinnvoll, ob die Kommunikation in einer Maschine, Fertigungszelle und/oder in einer Halle stattfindet. Auch Kombinationen sind möglich.

Mithilfe von technischen Zeichnungen, Skizzen oder Fotos kann mehr oder weniger genau die Ausgangsbasis zur Beurteilung der Ausbreitungsbedingungen bereitgestellt werden. Angaben zu Hindernissen und Reflexionsflächen sind ebenfalls hilfreich. [2]

2.3.3 Freiraumdämpfung

Als Freiraumdämpfung wird die entfernungsabhängige Dämpfung des Funksignals bezeichnet. Diese Einflussgröße ist im Kontext der Funkübertragung vor allem von der Entfernung r zwischen den Funkgeräten und der betrachteten Frequenz f abhängig. Zur Schätzung der zu erwartenden Dämpfung a_F kann ein Modell zur Berechnung der Freiraumdämpfung herangezogen werden [3].

$$a_F [db] = 20 \cdot \log_{10} \frac{4 \pi r f}{c}$$

Voraussetzung ist eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger.

2.3.4 Mehrwegeausbreitung

Das umgebungsabhängige Schwanken der Dämpfung in einem Funkkanal wird Fading genannt. Dazu wird abhängig von der Ursache und damit verbundenen Auswirkung auf den Funkkanal zwischen Slow Fading und Fast Fading unterschieden. Slow Fading umschreibt hierbei Veränderungen, die sich in Relation zur Übertragungszeit über einen längeren Zeitraum auf den Funkkanal auswirken [4]. Dagegen beschreibt Fast Fading sich sehr schnell ändernde Schwankungen, die beispielsweise durch Mehrwegeausbreitung an sich bewegenden Objekten entstehen [5].

Fading bzw. Schwund bezeichnet die Schwankungen der Amplitude des Empfangssignals, die durch ausbreitungsbedingte Störungen entstehen. Mehrwegeausbreitung durch Reflexion und Streuung von Funkwellen bewirkt, dass gesendete Signale über verschiedene lange Pfadphasen verschoben beim Empfänger ankommen und sich dort überlagern. Diese Interferenz kann das

empfangene Signal verstärken, verzerren oder sogar auslöschen. Es gibt viele Ursachen, die zum Schwund beitragen [6]:

1. In der realen Funkumgebung erreicht die Welle den Empfänger nicht nur auf direktem Weg, sondern auch über Umwege. Typisch für die Mehrwegeausbreitung sind (bei breitbandigen Signalen Frequenz selektive) Pegelbrüche und -anhebungen innerhalb der Kanalbandbreite, die u.U. unter die Empfindlichkeitsschwelle des Empfängers reichen oder ihn über seinen linearen Bereich hinaus aussteuern.
2. Die einzelnen Teilwellen können sich konstruktiv oder destruktiv überlagern und erzeugen näherungsweise einen ortsfesten, als Mehrwegeschwund (Multipath-Fading) bezeichneten Pegelverlauf, der bei Bewegung des Empfängers zu einem typischen Pegelverlauf entlang einer Strecke führt, dem sog. Kurzzeitschwund (Short-Term Fading).
3. Durch die unterschiedlichen Laufzeiten der Teilwellen ergibt sich eine Verbreiterung der Stoßantwort des Kanals. Diese Laufzeitspreizung (Dispersion bzw. Delay Spread) kann zu Interferenz zwischen übertragenen Symbolen führen (Intersymbol Interference).
4. Außerdem ergibt sich beim bewegten Empfänger, je nach Einfallsrichtung der Teilwelle, eine positive oder negative Dopplerverschiebung, die zu einer Verbreiterung des Frequenzspektrums führt.

2.3.4.1 Abschattung

Hindernisse in der Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger (Wände) verhindern eine direkte Wellenausbreitung und unterbinden so den kürzesten, häufig ungestörten Weg zwischen Sender und Empfänger und verursachen eine zusätzliche Dämpfung des Pegels, die sog. Abschattung (Shadowing). Man spricht beim bewegten Empfänger von Langzeitschwund (Longterm-Fading), weil er sich längere Zeit im Funkschatten aufhält. [4]

2.3.5 Medienbelegung

Die zeitliche Medienbelegung ergibt sich aus der Kommunikationslast, ist aber nicht mit ihr identisch. Neben der Mediennutzung, die vom Funkgerät aufgrund der Kommunikationslast erzeugt wird, gibt es auch Anteile von anderen Funk- oder Infrastrukturkomponenten, die vom Funkgerät weiter zu leiten sind. Neben der Kommunikationslast wird die zeitliche Mediennutzung insbesondere durch die Funktechnologie bzw. den Funkstandard bestimmt. Die zeitliche Mediennutzung ist nicht nur ein Maß für die Übertragungszeit, sondern insbesondere eine Größe, die Aussagen über die Behinderung der Übertragung anderer Funkgeräte zulässt. [7]

2.3.6 Sendezeitintervall

Als Sendezeitintervall wird die Zeitdifferenz bezeichnet, nach der die Anwendung Nutzdaten an die Bezugsschnittstelle übergibt. Bei zyklischer Übertragung kann man von einem Anwendungszyklus sprechen. Bei ereignisgesteuerter Übertragung ist der minimal mögliche Wert zwischen zwei Übertragungsanforderungen von Interesse. Erfolgt die Initiierung nach einem stochastischen Prozess, sind die entsprechenden Parameter der Verteilungsfunktion anzugeben. [2]

3 Labormessplatz für die Performancebewertung von industriellen Funksystem

3.1 Aufgaben eines Labormessplatzes

Die Aufgaben des Labormessplatzes lassen sich in zwei Teilgebiete aufteilen. Zum einen sollen umgebungsbedingte Einflussgrößen emuliert und dessen Wirkung auf das Funksystem getestet werden. Zum anderen sollen Kenngrößenwerte bezüglich des Zeit- und Fehlerverhaltens des Funksystems ermittelt werden. Um das Funkmedium weitestgehend ohne undefinierte Störeinflüsse emulieren zu können, steht ein Kanalemulator (QPER) zur Verfügung. Um die Funkgeräte vor äußeren Einflüssen abzuschirmen, werden für diesen Zweck konzipierte Abschirmboxen verwendet. Zur Messung der einzelnen Kenngrößen können entsprechende Messgeräte sowohl an den QPER als auch

an den Funkgeräten angeschlossen werden. Umgebungseinflüsse wie z.B. andere Funkssysteme können ebenfalls an den QPER angeschlossen werden.

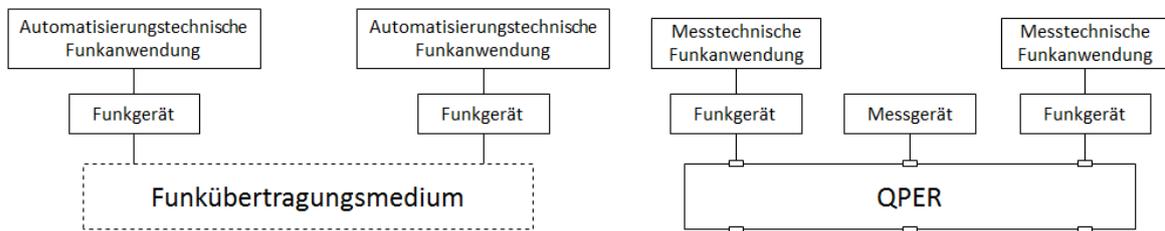


Abbildung 3: Prinzip Labormessplatz

3.2 Bestandteile des Labormessplatzes

3.2.1 Kanalemulator

Der Kanalemulator QPER (Qosmotec Propagation Effects Replicator) nimmt eine zentrale Rolle im Labormessplatz ein. Mithilfe des QPER wird das Funkkanalverhalten durch die Beeinflussung von Dämpfung und Phasenverschiebung emuliert. Zusätzlich zum zu testenden Funksystem (SUT) können noch weitere Funkssysteme zur Untersuchung von Koexistenzszenarien, sowie Messgeräte wie Spektrumanalysator und Vektor-Signal-Generator an den QPER angeschlossen werden. Insgesamt sind 9 Ports mit N-Stecker vorhanden, wovon die Ports 4 bis 6 für Funkssysteme mit einer Antenne und die Ports 1 bis 3 für Funkssysteme mit bis zu 2 Antennen vorgesehen sind. Der Frequenzbereich des QPER liegt zwischen 400 MHz und 6000 MHz. Die maximal eingekoppelte Sendeleistung der Funkgeräte darf 23 dBm nicht überschreiten. Intern verbindet der QPER die einzelnen Ports über Leistungsteiler, Phasenschieber und Dämpfungsglieder, die durch ein zugehöriges Software-Interface konfiguriert und gesteuert werden.

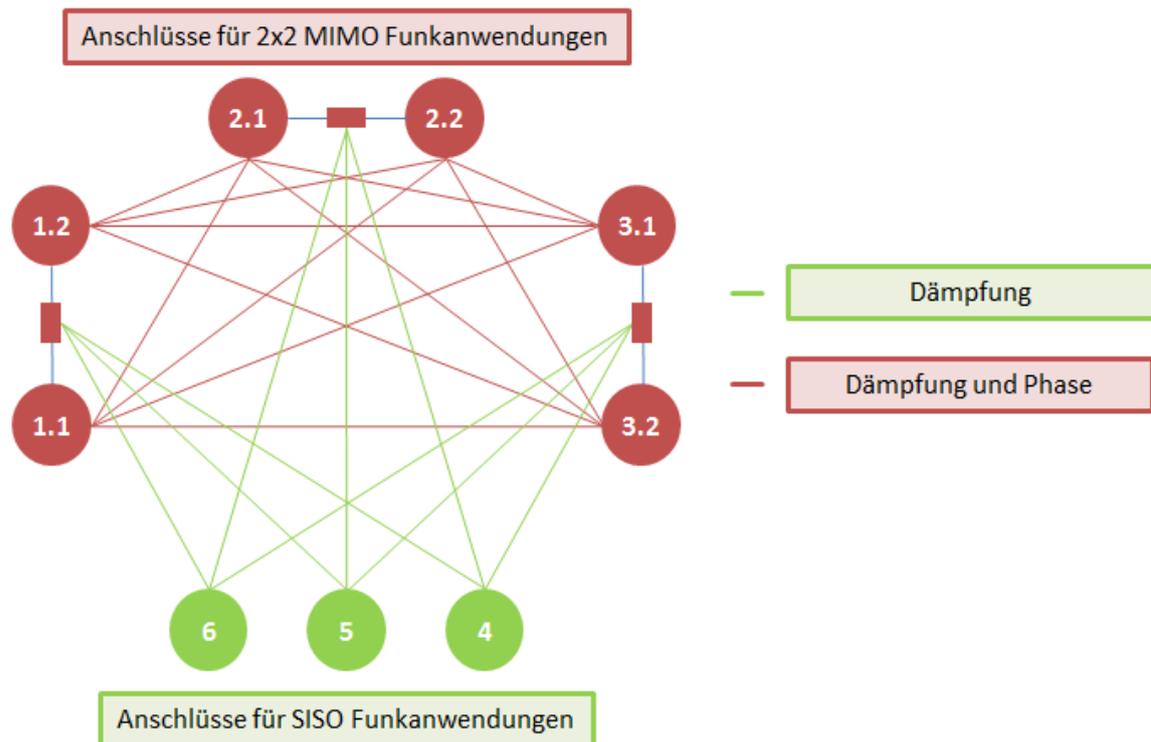


Abbildung 4: Anschlüsse und Verbindungen des QPER

Zur Einstellung des QPER findet eine grafische Bedienoberfläche Verwendung, welche sich über das AIS-Interface mit den Hardwarekomponenten synchronisiert [8]. Dazu können in einem Konfigurationsprogramm Funkgeräte verschiedener Typen (BTS, mobile Geräte) definiert und den einzelnen Ports des QPER zugeordnet werden [9]. Im Software-Interface kann daraufhin die zeitabhängige Veränderung der einzelnen Parameter vorgegeben werden.

Prinzipiell sieht das Programm dazu zwei Möglichkeiten vor. Zum einen kann ein sogenanntes "Table File" (Datei im Format .csv) erstellt werden. Mit Hilfe des "Table File" werden Dämpfungswerte zu definierten Zeitpunkten mit einer Auflösung von 1 ms zugewiesen. Wird das "Table File" im Softwareinterface geladen und gestartet, so stellt der QPER zwischen den jeweiligen Ports die in der Tabelle eingetragenen Dämpfungswerte zu den festgelegten Zeitpunkten ein. Alternativ dazu bietet das Software-Interface eine Bearbeitungsoberfläche (sogenannte „Scenery View“), auf der die definierten Funkgeräte per Drag-and-Drop platziert und an Bewegungsprofile gebunden werden können [9]. Durch ein OpenStreetMap-Feature, welches die Weltkarte im Hintergrund des erstellten

Szenarios anzeigt, können Bewegungsszenarien wie zum Beispiel sich bewegende und miteinander kommunizierende Fahrzeuge emuliert werden, die sich an existierenden Straßen orientieren. In Abbildung 5 ist ein Beispiel mit zwei Funkgeräten ohne Bewegungsprofil dargestellt. Platzierte Antennen werden in zwei Tabellen berücksichtigt, welche die Dämpfung und die Phasen zwischen den einzelnen Anschlüssen anzeigen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden die Szenarien mithilfe des Scenery View Features erstellt.

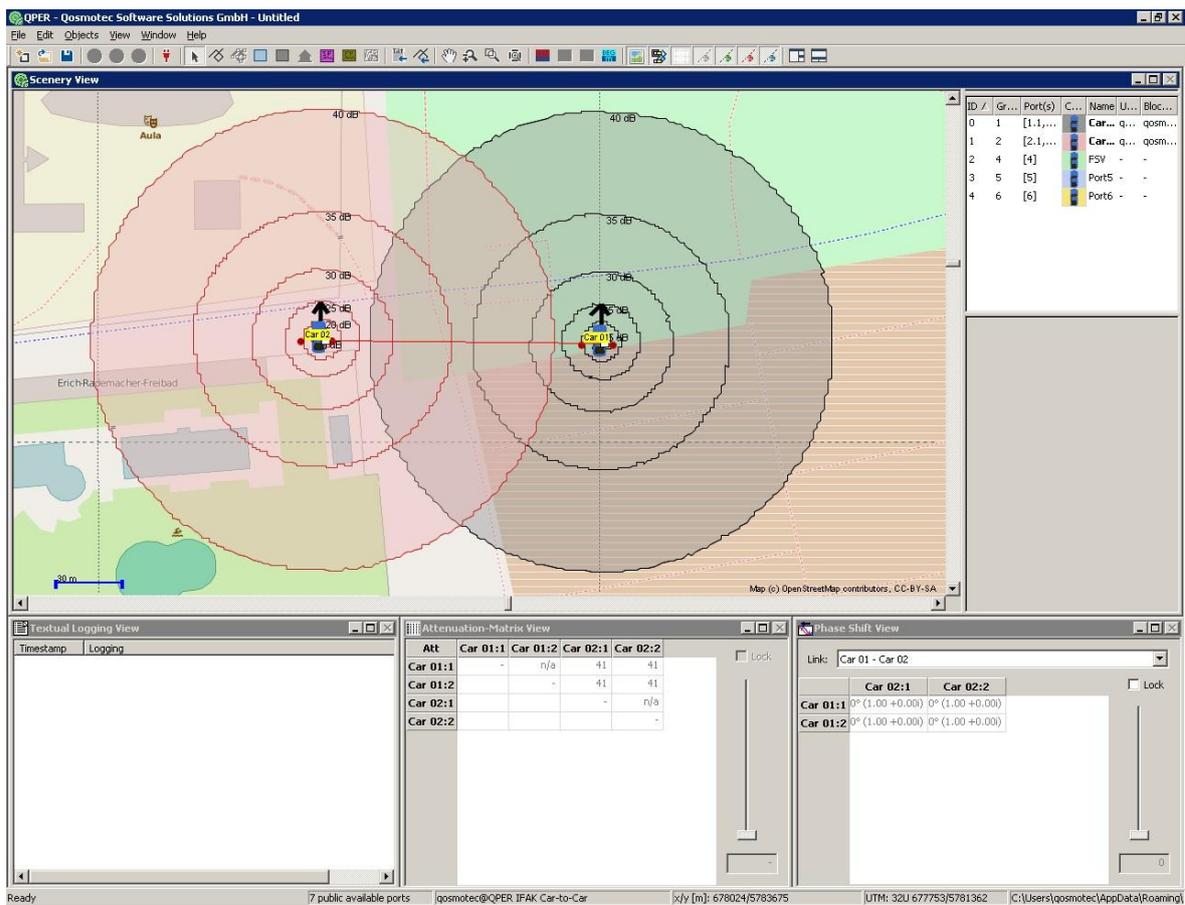


Abbildung 5: Beispiel QPER Software Interface

Je nach Verwendung der OpenStreetMap werden die Koordinaten der Bewegungsprofile und Funkgeräte entweder in Längen- und Breitengrad (bei Verwendung der Karte) oder in Meter (ohne Karte) angegeben. Intern rechnet der QPER mit einem kartesischen Koordinatensystem in Meter, die Auflösung beträgt für beide Achsen ebenfalls einen Meter.

Den verwendeten Funkgeräten können Antennen zugeordnet werden, deren Richtcharakteristik in Form von Tabelle beschrieben werden. Dazu wird jeweils in horizontaler und vertikaler Richtung in 1° Schritten ein Dämpfungswert eingetragen. Die so verwendeten Antennen können nachträglich noch horizontal und vertikal geneigt werden. Die in Abbildung 5 dargestellten Antennen entsprechen einem isotropen Kugelstrahler, der standardmäßig eingestellt ist.

Die Steuerung des QPER erfolgt über einen Server. Als Betriebssystem verwendet der QPER Server eine Debian Linux 7 Distribution, unter welcher zwei virtuelle Maschinen laufen. Eine virtuelle Maschine verwendet als Betriebssystem Windows 7 und stellt den Zugriff auf das Software-Interface und die Konfigurationssoftware zur Verfügung. Die zweite virtuelle Maschine steuert über den Air Interface Simulator (AIS) die Hardwarekomponenten des QPER und verwendet als Betriebssystem eine Debian Linux 7 Distribution. Eine Skizze der QPER Struktur ist in Abbildung 6 dargestellt.

Der Zugriff auf das unter Windows laufende Nutzerinterface erfolgte in diesem Fall über eine Remote Desktopverbindung auf die fest konfigurierte IP-Adresse 192.168.225.121, sowohl der QPER Server mit der IP-Adresse 192.168.225.120 und der AIS mit der IP-Adresse 192.168.225.122 können vom Nutzerinterface aus erreicht und konfiguriert werden.

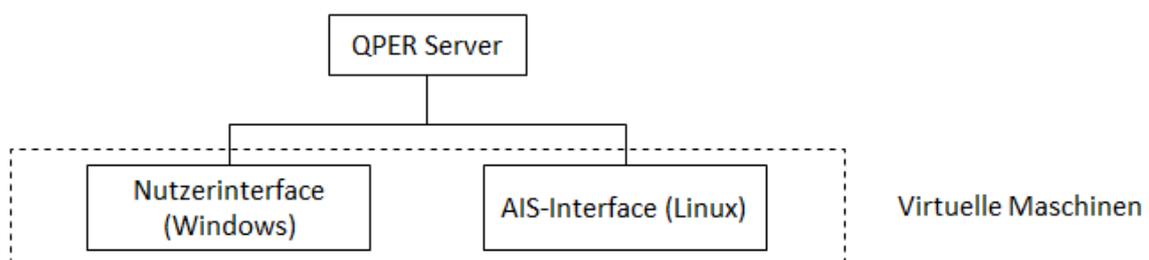


Abbildung 6: QPER Struktur

3.2.2 Spektrumanalysator

Der verwendete Echtzeitspektrumanalysator (RSA) von Textronix stellt mehrere Möglichkeiten zur Darstellung von Signalen zur Verfügung. Im Rahmen dieser

Arbeit werden insbesondere Spektrogramme wie in Abbildung 32, in denen die Signalleistung in konfigurierbaren Farben abhängig von der Frequenz und des Zeitpunktes innerhalb eines definierten Zeitfensters dargestellt werden kann. Die erfasste Bandbreite ist hierbei auf 110 MHz beschränkt.

Des Weiteren können Spektrogramme wie in Abbildung 31 verwendet werden, welche die Anzahl der aufgetretenen Messpunkte innerhalb eines definierten Zeitintervalls farblich darstellen. Eine weitere Darstellungsmöglichkeit ist die Erfassung einer einzelnen Frequenz, deren Leistungspegel in Abhängigkeit von der Zeit abgebildet wird. Diese Darstellung wird zum Beispiel in Abbildung 28 als direkte Aufnahme vom Spektrumanalysator und in Abbildung 26 als exportierte .csv Datei verwendet.

Zu messende Signale dürfen einen Leistungspegel von 30 dBm nicht übersteigen.

3.2.3 Funk-Transfer-Tester

Der Funk-Transfer-Tester (FTT) realisiert die Rahmenbedingungen der Performancebeurteilung des zu testende Funksystem SUT hinsichtlich der zu übertragenden Datenmenge. Die dazu verwendeten Multifaces agieren dabei als eigenständige Paketquellen bzw. Paketsenken, die Datenverkehr über das SUT bzw. einen Störer erzeugen und die Performance-Kenngrößen wie z.B. Übertragungszeit und Aktualisierungszeit ermitteln. Konfiguriert werden die Multifaces über die Ethernet Schnittstelle und der grafischen Benutzeroberfläche "Direct Control und Configuration". Die ermittelten Messwerte werden als Comma-separated-Values Datei (Dateiendung .csv) gespeichert. Als Bezugsschnittstelle stehen in der Standardkonfiguration eine RS232-Schnittstelle und zwei RS485 Schnittstellen zur Verfügung.

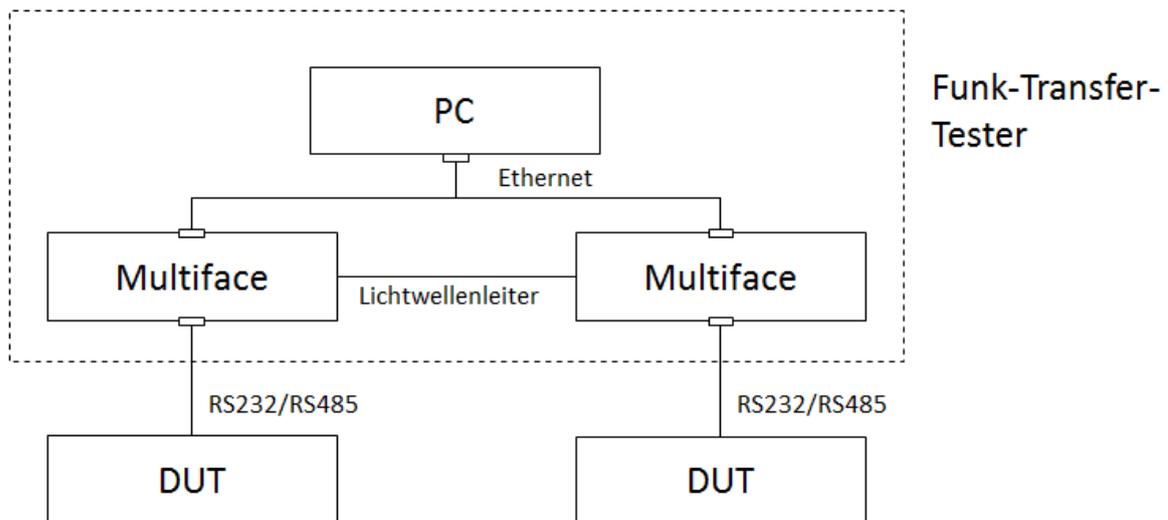


Abbildung 7: Funk-Transfer-Tester Aufbau

Die Verwendung der Multifaces setzt bestimmte Grenzen voraus, in denen sich der Test bewegen kann. Durch die physikalische Trennung der Paketquelle und Paketsenke ist eine Synchronisierung notwendig, in diesem Fall wird die Synchronisation zwischen den Multifaces über Lichtwellenleiter realisiert.

3.2.4 Data Quality Analyzer

Mithilfe des Data Quality Analyzer von Anritsu können die Eigenschaften des Datenverkehrs in Ethernet- und IP-Netze analysiert werden. Dazu stehen 24 Ethernetports zur Verfügung. Von jedem Port können definierte Datenpakete generiert, empfangen und analysiert werden. Im Zusammenhang mit dem Messplatz übernimmt der Analyzer die Aufgaben des FTT (siehe 3.2.3), wenn Funkssysteme mit Ethernetschnittstelle betrachtet werden. Als Schnittstellen werden im Gegensatz zum Multiface die Ethernet-Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Durch die gemeinsame Realisierung von Paketsenke und Paketquelle in einem Gerät ist es nicht notwendig, die Zeit zwischen diesen beiden Endpunkten zu synchronisieren.

3.2.5 Vektor Signalgenerator

Der Vektor Signalgenerator wird zur Generierung von gezielten Störungen verwendet. Dazu können im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz digital modulierte Signale mit einem Signalpegel von bis zu 20 dBm und einer Signalbandbreite bis 80 MHz erzeugt werden um die Kommunikation zwischen zu testenden Funkgeräten definiert zu stören.

3.2.6 Abschirmboxen

Zur Abschirmung der zu testenden Funkgeräte (DUT) werden spezielle, für den Bereich von 400 MHz bis 6000 MHz vorgesehene Abschirmboxen verwendet. Als Schnittstellen stehen vier SMA-Anschlüsse, zwei USB-Anschlüsse, ein M12 X-kodierter 8-poliger Steckverbinder und ein 4-poliger Steckverbinder für die Stromversorgung des DUT zur Verfügung.

3.2.7 Aufbau des Labormessplatzes

Je nach SUT und zu messenden Kenngrößen kann der Aufbau des Labormessplatzes variiert werden. Abbildung 8 zeigt einen möglichen Aufbau mit dem Funk-Transfer-Tester, welcher über RS232 mit den DUT verbunden ist. Neben den DUT sind noch ein Spektrumanalysator, ein Vektorsignalgenerator und ein weiteres Funkssystem angeschlossen.

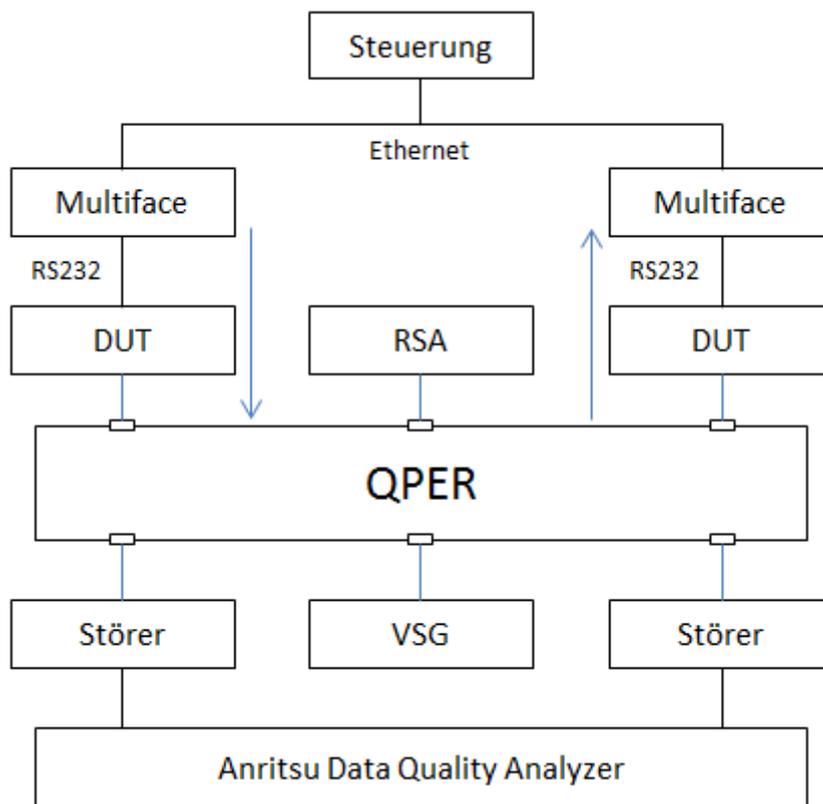


Abbildung 8: Aufbau Beispiel

4 Evaluierung des Kanalemulators

4.1 Inbetriebnahme QPER

Ein wesentlicher Aspekt in der Evaluierung des Messplatzes ist das Verhalten des QPER hinsichtlich vorgegebener Herstellerangaben. Daraus folgend lassen sich Rahmenbedingungen für die Verwendung des durch den QPER emulierten Funkkanals ableiten. Die Ergebnisse zur Messung der Dämpfung, der Phase und der Schaltzeiten sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.1.1 Messkabel

Die in den Messungen verwendeten Messkabel weisen eine Dämpfung auf, die im Rahmen der Auswertung berücksichtigt werden muss.

Dazu wurde mit einem Netzwerkanalysator der Transmissionsparameter S_{21} der Messkabel in einem Frequenzbereich von 400 MHz bis 6 GHz aufgenommen und

in Abbildung 9 dargestellt. Im Folgenden sind insbesondere die Messpunkte bei 500 MHz mit -1,1 dBm für die Messreihe des Dämpfungsverlaufes bei 500 MHz und bei 2,45 GHz mit -1,6 dBm für die Messreihe des Dämpfungsverlaufes bei 2,45 GHz von Bedeutung.

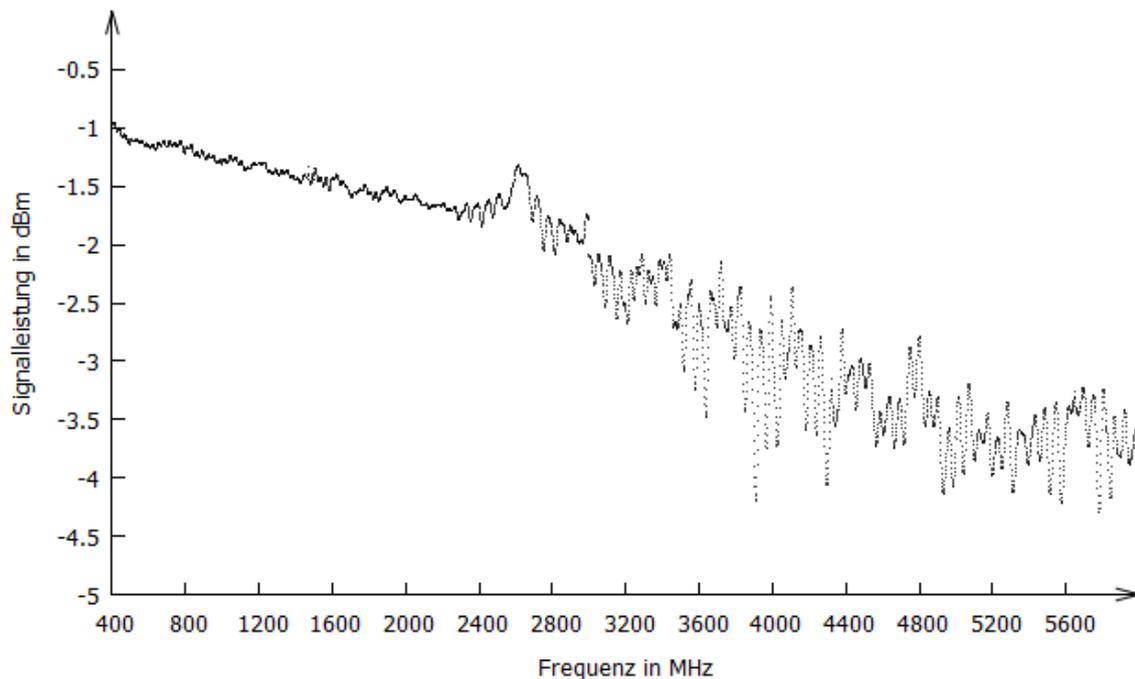


Abbildung 9: Kabeldämpfung

4.1.2 Einfügedämpfung

Die Einfügedämpfung stellt das Minimum der durch den QPER einstellbaren Dämpfung zwischen zwei Anschlüssen und daher eine wesentliche Begrenzung in der Emulation des Funkübertragungsmediums dar.

Zur Erfassung der Einfügedämpfung wurde ein Netzwerkanalysator an die jeweils zu messenden Ports angeschlossen und auf den vom Hersteller des QPER angegebenen Frequenzbereich von 400 MHz bis 6000 MHz eingestellt. Im Software-Interface des QPER befanden sich die jeweils zu messenden Ports mit einer eingestellten Dämpfung von 0 dB. Am Netzwerkanalysator wurden die Transmission in Vorwärtsrichtung (S21) und Rückwärtsrichtung (S12) als .csv Dateien mit 4000 gleichmäßig verteilten Messpunkten erfasst. Durch die Anzahl

der Messpunkte und die Breite des vorgegebenen Frequenzbereiches ergibt sich eine Auflösung von 14 MHz.

In Abbildung 10 ist die Transmission von Port 1.2 zu Port 2.2 dargestellt. Durch Hardwarekomponenten wie Leitungen, Leistungsteiler und Phasenschieber stellt sich eine Einfügedämpfung ein, die sich abhängig von der betrachteten Frequenz zwischen 32 dB und 50 dB bewegen kann.

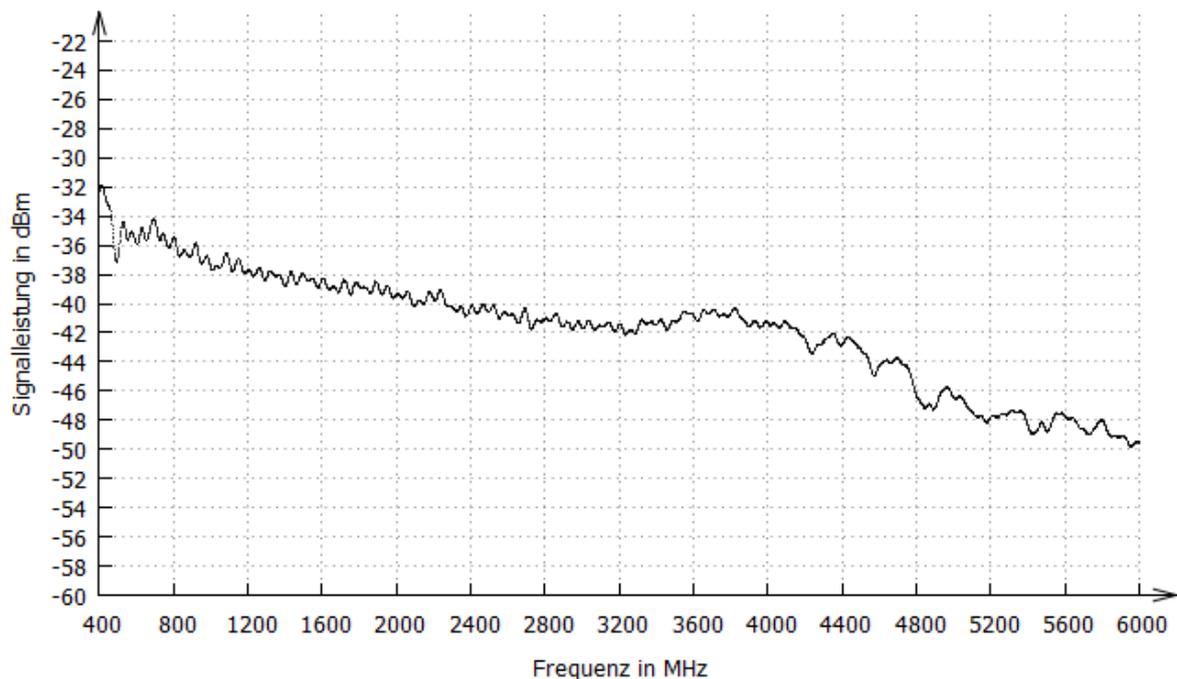


Abbildung 10: frequenzabhängige Einfügedämpfung zwischen Port 1.2 und 2.2

Die S₂₁-Parameter zwischen den Mehrantennenports sind in einem Frequenzbereich von 550 MHz bis 5,1 GHz mit Unterschieden von maximal 3 dB weitestgehend deckungsgleich, über den kompletten Frequenzbereich weichen die Werte um bis zu 6 dB ab. Betrachtet man die Differenz zum jeweils vorangegangenen Wert einer Messung, so weicht dieser bei einem Frequenzunterschied von 14 MHz im Schnitt um 0,035 dB und maximal um 0,23 dB ab. Für die weiteren Messungen ist insbesondere der Messpunkt bei 2,45 GHz mit 40,46 dB relevant.

Abbildung 11 zeigt die Vorwärts-Transmission (S₂₁) zwischen den Ports 4 und 6, der abgebildete Verlauf entspricht mit einer Abweichung von maximal 1,3 dB der

Transmission von Port 5 zu Port 6. Die Messung zwischen den Ports 4 und 5 unterscheidet sich in der Charakteristik von den anderen beiden Messungen, bewegt sich allerdings in denselben Grenzen.

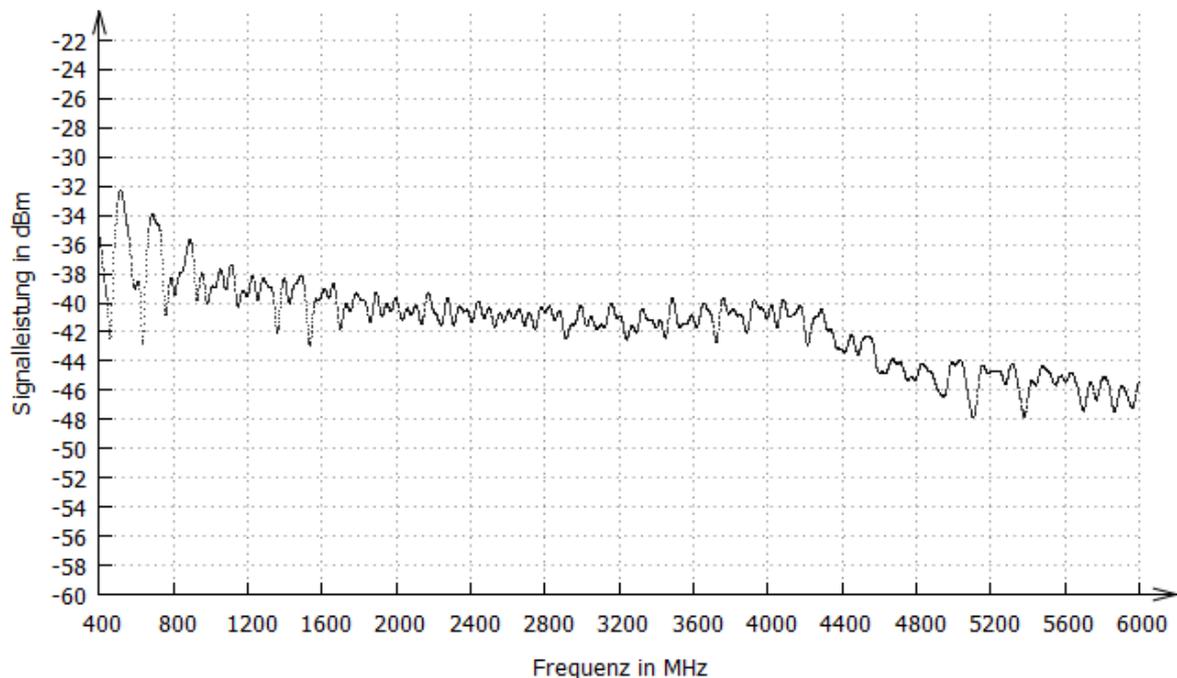


Abbildung 11: frequenzabhängige Einfügedämpfung zwischen Port 4 und 5

Die Unterschiede zum vorangegangenen Wert liegen durchschnittlich bei 0,064 dB und maximal bei 0,845 dB, diese Differenz muss in entsprechenden Frequenzbereichen berücksichtigt werden.

4.1.3 Frequenzeinstellung der Antennen

In der Konfigurationssoftware des QPER kann der Frequenzbereich, bei welchem die verwendeten Funkgeräte in der Emulation betrieben werden, eingestellt werden. Die so konfigurierte Betriebsfrequenz f_N nimmt, abhängig von der Entfernung der Funkgeräte im Scenery View, Einfluss auf die vom QPER berechnete Dämpfung. Betrachtet man die Freiraumdämpfung bei einer festen Entfernung $r = 100\text{ m}$ und einer variablen Betriebsfrequenz f_N im Bereich von 400 MHz bis 6 GHz, so ergibt sich die in Abbildung 12 als gestrichelte rote Linie dargestellte Dämpfung.

$$a_F(f_N) = 20 \cdot \log_{10} \frac{4 \pi r f_N}{c} = 20 \cdot \log_{10} \frac{4 \pi \cdot 100 \text{ m} \cdot f_N}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

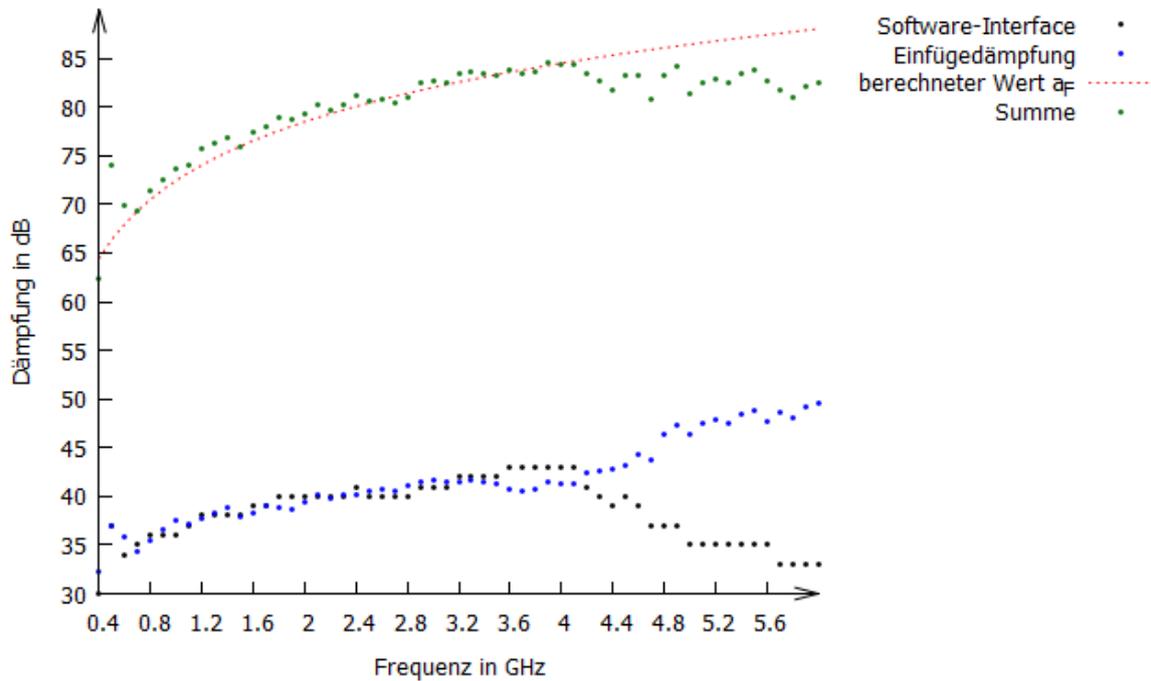


Abbildung 12: Frequenzabhängige Freiraumdämpfung

Die blau dargestellte Messreihe entspricht der Einfügedämpfung des Ports 1.2 zu Port 2.2, in schwarz ist die vom Software-Interface berechnete Dämpfung. Die aus Einfügedämpfung und Softwareinterface resultierende Dämpfung ist als Summe in grün dargestellt. Bis zu einer Frequenz von 4 GHz weicht die Summe um maximal 2 dB von der berechneten Dämpfung ab, ab 4 GHz durch die Kompensation des Kanalemulators beträgt die Abweichung bis zu 6,73 dB.

Die an den Anschlüssen des QPER zu messende Dämpfung ist neben der in dieser Messung erfassten Berechnung des QPER im Software-Interface noch von der Genauigkeit der eingestellten Dämpfung abhängig, diese wird in Abschnitt 4.1.5.1 behandelt.

4.1.4 Isolation

Sobald ein Port vom QPER im Software-Interface nicht verwendet wird, wird die Dämpfung des Ports auf einen maximalen Wert gesetzt. Zur Ermittlung der maximal erreichbaren Dämpfung wurde die Isolation zwischen den einzelnen

Ports gemessen. Die Isolation zwischen den Ports ist insbesondere wichtig, sobald mehrere Tests parallel durchgeführt werden.

Als Sender wurde ein Vektorsignalgenerator verwendet, welcher ein Sinussignal mit der Frequenz von $f = 2,45 \text{ GHz}$ und einer Sendeleistung von $P_S = 20 \text{ dBm}$ generiert. Im Software-Interface wurde ein Szenario ohne platzierte Funkgeräte erstellt, die empfangene Leistung P_e wurde mit einem Spektrumanalysator gemessen. Für die Darstellung in Tabelle 1 wurde die in 4.1.1 gemessene Kabeldämpfung a_k bei 2,45 GHz und die Sendeleistung $P_S = 20 \text{ dBm}$ berücksichtigt:

$$a = P_e - a_k + P_S = P_e + 18,4 \text{ dB}$$

Tabelle 1: Isolation

Sender	Empfänger								
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4	5	6
1.1	-	-45.4	-98.4	-113.4	-111.4	-103.4	-104.4	-108.4	-113.4
1.2	-45.4	-	-110.4	-110.4	-106.4	-101.4	-101.4	-101.4	-106.4
2.1	-98.4	-111.4	-	-52.4	-101.4	-104.4	-98.4	-100.4	-105.4
2.2	-113.4	-110.4	-52.4	-	-104.4	-118.4	-118.4	-104.4	-108.4
3.1	-112.4	-106.4	-101.4	-104.4	-	-49.4	-110.4	-108.4	-105.4
3.2	-103.4	-102.4	-105.4	-118.4	-49.4	-	-99.4	-109.4	-110.4
4	-104.4	-101.4	-98.4	-118.4	-112.4	-99.4	-	-102.4	-116.4
5	-109.4	-101.4	-100.4	-104.4	-108.4	-109.4	-102.4	-	-108.4
6	-114.4	-106.4	-105.4	-108.4	-105.4	-110.4	-116.4	-107.4	-

Unter Einbeziehung der in 4.1.2 gemessenen Einfügedämpfung bei 2,45 GHz kann die Intervallbreite der durch den Kanalemulator einstellbaren Dämpfung berechnet werden.

$$a = P_e - a_k + P_S - a_e$$

Tabelle 2: Größe Dämpfungsintervall

Sender	Empfänger								
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4	5	6
1.1	-	3.271872	58.34864	73.24934	70.94314	62.65904	63.10767	66.96191	71.79948
1.2	3.26467	-	69.95821	70.00099	66.01561	60.72672	59.72259	59.62447	64.52349
2.1	58.34268	70.9202	-	6.906473	60.72647	64.17174	56.79872	58.78278	63.77702
2.2	73.19456	69.99916	6.90704	-	63.7197	77.73269	76.87026	62.91154	66.70404
3.1	71.98907	66.03053	60.69398	63.73222	-	5.296805	68.90471	67.044	64.21851
3.2	62.64257	61.70003	65.14474	77.73962	5.244408	-	57.76965	67.84798	69.05457
4	63.09101	59.75815	56.8186	76.85927	70.92005	57.76055	-	62.6136	76.32152
5	67.99106	59.60052	58.74001	62.9059	66.99655	67.85257	62.59792	-	68.20391
6	72.82427	64.51577	63.65356	66.7249	64.198	69.04471	76.30587	67.1714	-

4.1.5 Einstellbare Dämpfung

Die im Softwareinterface einstellbare Dämpfung stellt für den QPER den Raum dar, in dem Eigenschaften wie zum Beispiel Entfernung zwischen Antennen und Fading emuliert werden. Das Softwareinterface gibt dazu die Möglichkeit, die Dämpfung zwischen den einzelnen Ports in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen den Funkgeräten auf dem Scenery View zu berechnen oder unabhängig davon festzulegen. Mit Hilfe der Software kann die Dämpfung innerhalb des Wertebereiches von 0 bis 95 dB eingestellt werden.

4.1.5.1 Dämpfung bei 2,45 GHz

In der folgenden Messreihe wurde die Dämpfung zwischen den Ports des QPER in Abhängigkeit zur im Software-Interface eingestellten Dämpfung gemessen. Die Messungen lassen sich in die Anwendungsfälle Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO), Single-Input-Single-Output (SISO) und Multiple-Input-Single-Output (MISO) unterteilen. Durch einen Vektorsignalgenerator wurde ein Signal mit einer Leistung von 20 dBm und einer Frequenz von 2,45 GHz erzeugt und an den ersten zu messenden Port angeschlossen. Der zweite zu messende Port wurde an einen Spektrumanalysator angeschlossen, dessen Auflösungsbandbreite auf 500 Hz konfiguriert war. Daraus resultierend befand sich der Rauschpegel bei -118 dBm.

Die Dämpfung im Software-Interface wurde von 0 dB bis 95 dB in 1 dB Schritten manuell erhöht und die Empfangsleistung am Spektrumanalysator aufgenommen.

Abbildung 13 zeigt den Dämpfungsverlauf zwischen den Mehrantennenports 1.2, 2.2 und 3.2. Der Wert d_0 bezeichnet die Einfügedämpfung zwischen den jeweiligen Ports und dient als Bezugswert zur gemessenen Dämpfung d_x .

Zu erwarten ist eine Differenz zwischen der gemessenen Dämpfung und der Einfügedämpfung $d_{diff} = d_0 - d_x$, welche dem im Software-Interface eingestellten Wert entspricht (als gestrichelte, rote Linie dargestellt). Bis zu einer eingestellten Dämpfung von 45 dB weichen die Werte um maximal 2 dB ab. Wird im Software-Interface ein höherer Dämpfungswert konfiguriert, nähert sich die Differenz der Isolationsdämpfung an. (Beispiele: Port 1.2 zu Port 2.2: 71,5 dB, Port 2.2 zu Port 3.2: 80,2 dB).

Der Dämpfungsverlauf zwischen den Ports 1.2 und 3.2 zeigt ein deutlich abweichendes Verhalten. Die Differenz weist bei einer eingestellten Dämpfung von 60 dB ein lokales Maximum auf, welches mit 71,75 dB Differenz die Isolationsdämpfung von 60,5 dB übersteigt. Dieses Verhalten wird maßgeblich durch den entsprechenden Phasenschieber beeinflusst, welcher zum Zeitpunkt der Messung auf eine Phasenverschiebung um 29° eingestellt war.

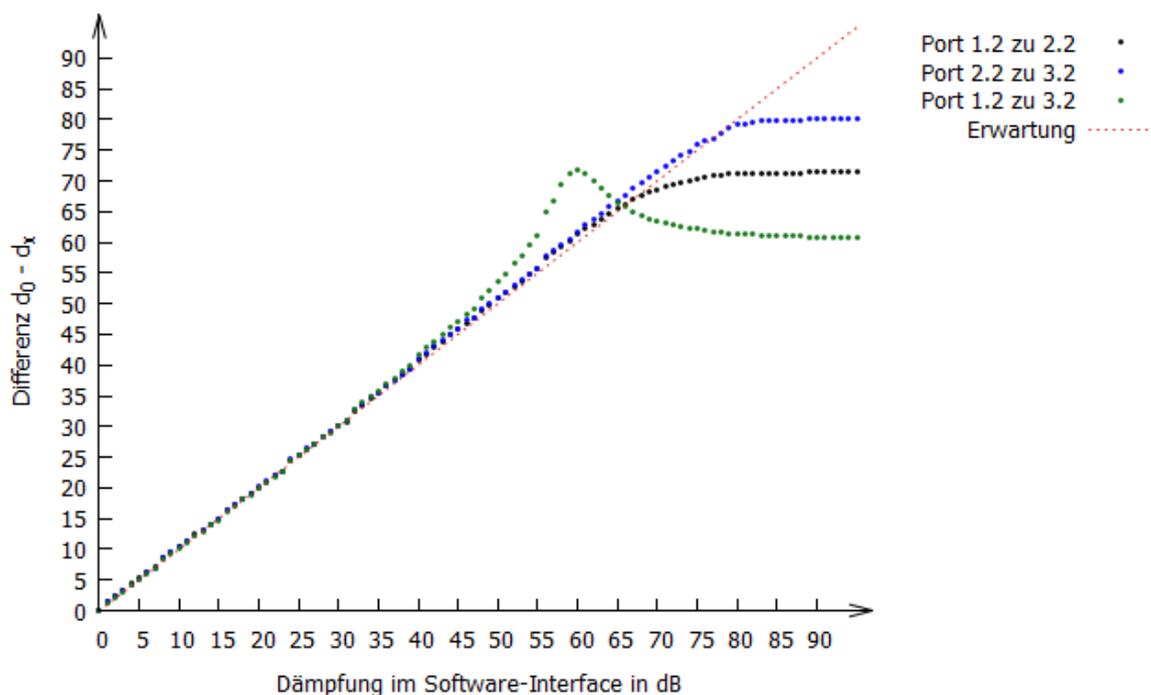


Abbildung 13: Dämpfungsverlauf Mehrantennenports bei 2,45 GHz

Die Abhängigkeit der Differenz d_{diff} von der eingestellten Phase ist in Abbildung 14 dargestellt. Bei einer konfigurierten Phasenverschiebung von 180° stellt sich eine minimale Differenz von 60,65 dB ein, was mit einer Abweichung von 1,15 dB dem Verlauf der anderen Mehrantennenportverbindungen entspricht. Ein Maximum der Differenz stellt sich bei 360° Phasenverschiebung mit 93,25 dB ein.

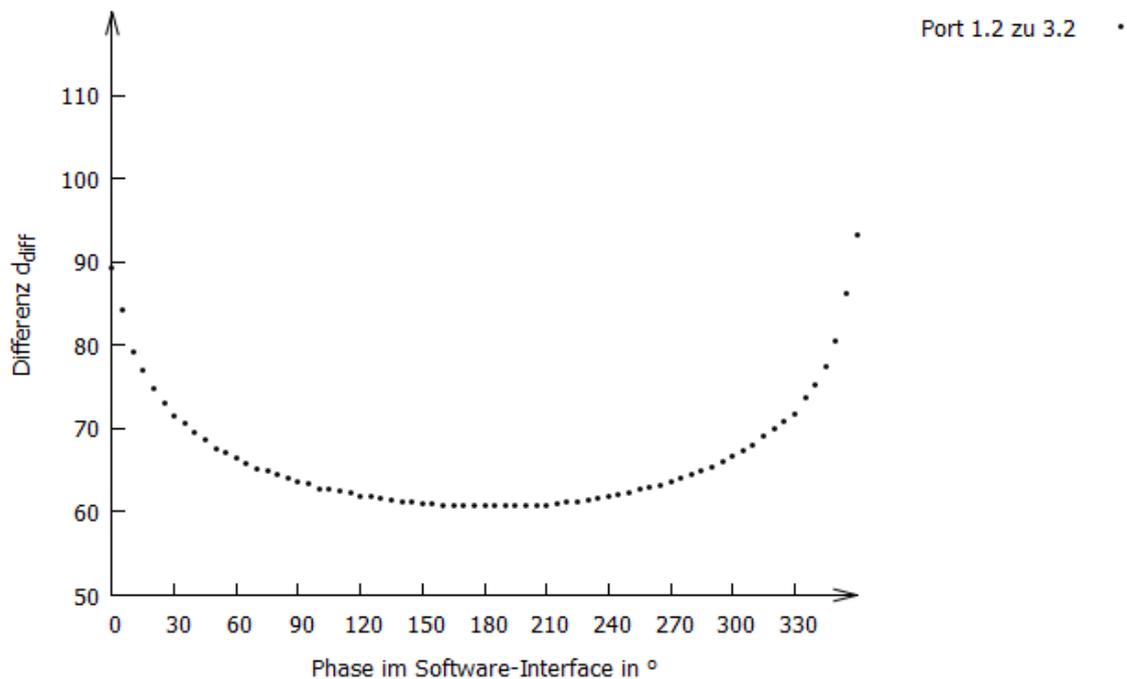


Abbildung 14: Dämpfung in Abhängigkeit zur Phase

Wird die Phasenverschiebung im Software-Interface auf $\varphi_{max} = 360^\circ$ beziehungsweise auf $\varphi_{min} = 180^\circ$ konfiguriert, ergibt sich der in Abbildung 15 dargestellte Dämpfungsverlauf. Die Begrenzung durch Minimum und Maximum bezieht sich hierbei auf d_{diff} bei 60 dB eingestellter Dämpfung. Der Dämpfungsverlauf bei φ_{min} ist mit dem Verhalten der anderen Messreihen an den Mehrantennenports vergleichbar.

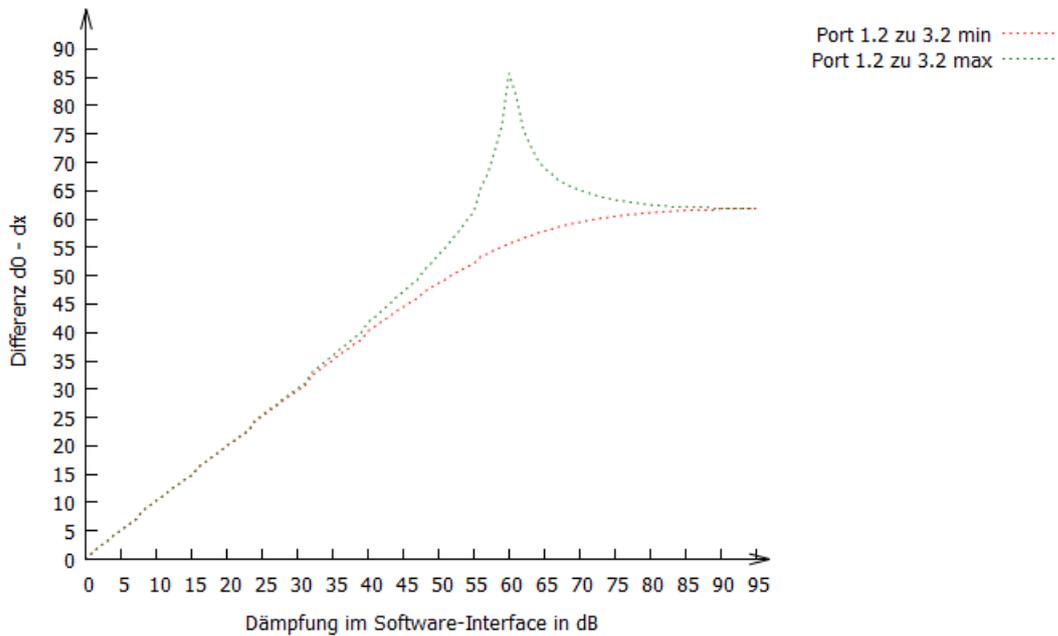


Abbildung 15: Dämpfungsverlauf bei unterschiedlichen Phasen

Betrachtet man die Differenz der einzelnen Dämpfungswerte d_n zum jeweiligen Vorgängerwert d_{n-1} , so zeigen sich im Bereich bis 45 dB eingestellter Dämpfung zwei verschiedene Stufen. Für Dämpfungswerte d_n mit $n \not\equiv_8 0$ erhöht sich die Dämpfung um durchschnittlich 0,91 dB. Der sich so aufaddierende Fehler wird bei Dämpfungswerten d_n mit $n \equiv_8 0$ durch einen größeren, durchschnittlich 1,76 dB betragenden Schaltschritt korrigiert.

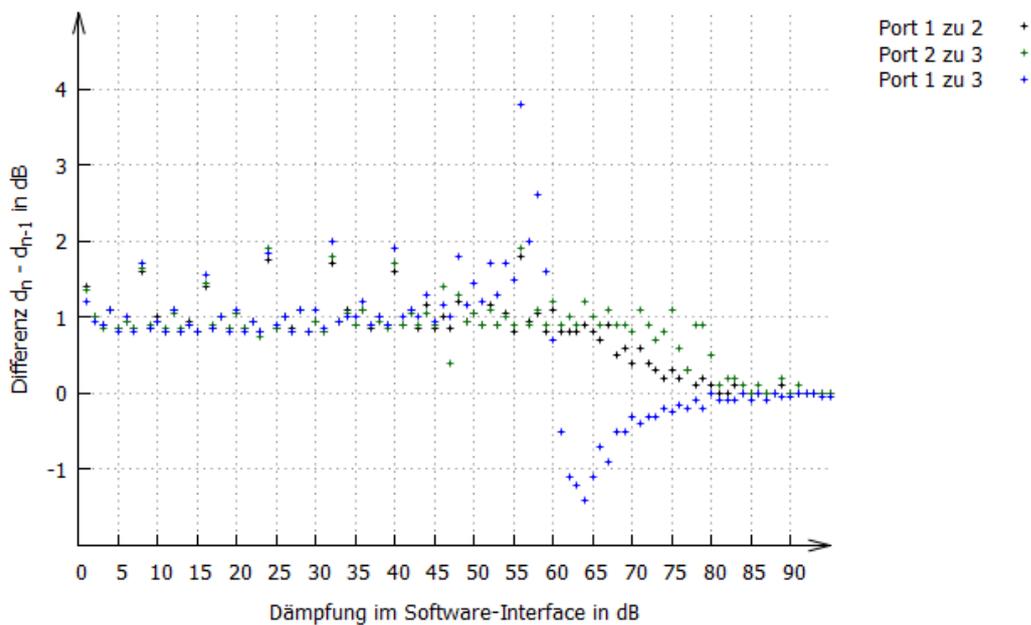


Abbildung 16: Schaltdifferenz bei Mehrantennenports bei 2,45 GHz

Analog zu Abbildung 13 wurde der Dämpfungsverlauf zwischen den Einantennenports aufgenommen und in Abbildung 17 dargestellt. Bis zu einer eingestellten Dämpfung von 52 dB weichen die Messwerte um maximal 1,05 dB von der zu erwartenden Dämpfung ab und nähern sich ab 52 dB der jeweiligen Isolationsdämpfung an. Da zwischen den Einantennenports keine Phasenverschiebung konfiguriert werden kann, ist das lokale Maximum der Ports 4 und 6 bei 80 dB eingestellter Dämpfung nicht wie bei den Mehrantennenports in Abhängigkeit zur eingestellten Phasenverschiebung zu setzen. Der Verlauf bis zum Maxima ist annähernd linear und weicht höchstens um 4,5 dB vom erwarteten Wert ab.

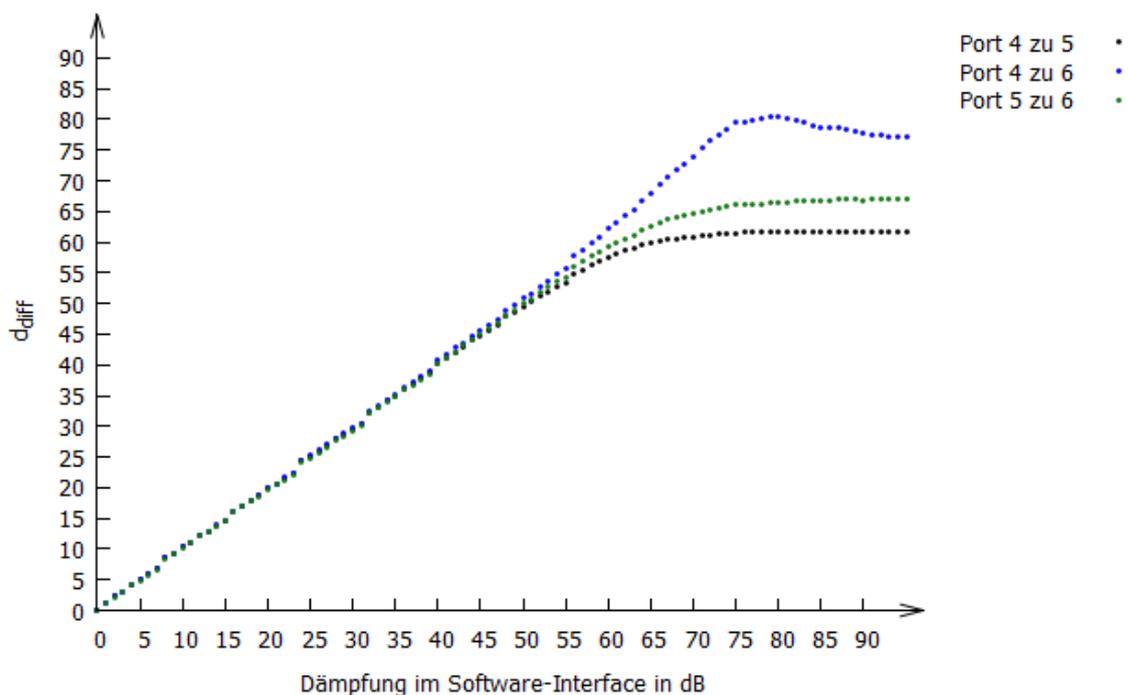


Abbildung 17: Dämpfungsverlauf Einantennenports bei 2,45 GHz

Wie bei dem in Abbildung 16 dargestellten Schaltverhalten sind die größeren Schaltschritte in Abständen von 8 dB in Abbildung 18 wiederzuerkennen. Aufgrund des Maximums bei 80 dB eingestellter Dämpfung und der daraufhin monoton fallenden Folge an Messwerten sind die Differenzwerte der Messreihe Port 4 zu 5 analog zu den Werten der Messreihe Port 1 zu 3 negativ.

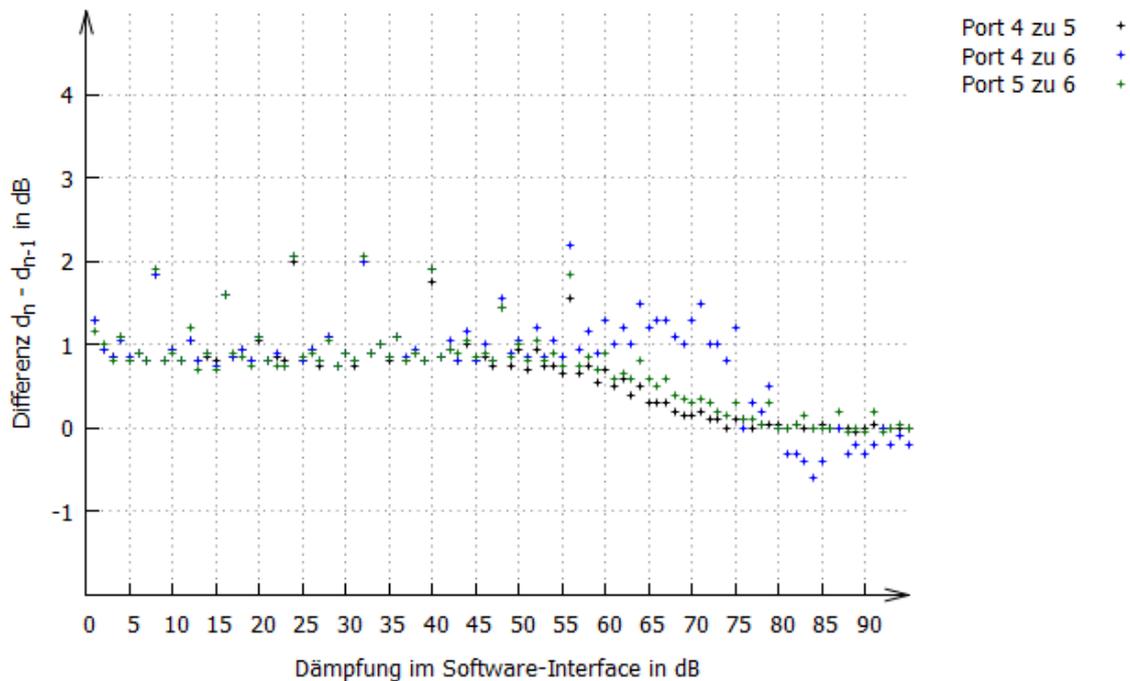


Abbildung 18: Schaltdifferenz bei Einantennenports bei 2,45 GHz

Neben MIMO und SISO Verbindungen sind noch Verbindungen zwischen Mehrantennenports und Einantennenports vorhanden, die Anschlüsse der Mehrantennenports sind hierbei über einen Leistungsteiler und ein verstellbares Dämpfungsglied verbunden. In Abbildung 19 sind vier Dämpfungsverläufe dargestellt, die signifikant von dem zu erwartenden Verlauf abweichen. Bis zu einer konfigurierten Dämpfung von 45 dB weicht die zu messende Dämpfung um maximal 3 dB von dem erwarteten Wert ab.

In der Messreihe Port 2 zu Port 4 und Port 2 zu Port 6 sind deutliche Maxima bei 66 dB und 75 dB zu erkennen.

Das in Abbildung 20 dargelegte Schaltverhalten zwischen Port 1 und 4 weicht von dem Schaltverhalten der anderen Messungen ab. Bei Schaltvorgängen auf Dämpfungsstufen n mit $n \equiv_4 2$ nimmt die gemessene Dämpfung um typischerweise 0,10 bis 0,15 dB zu, bei Dämpfungsstufen n mit $n \equiv_4 0$ wird dem so entstehenden Fehler entgegengesteuert.

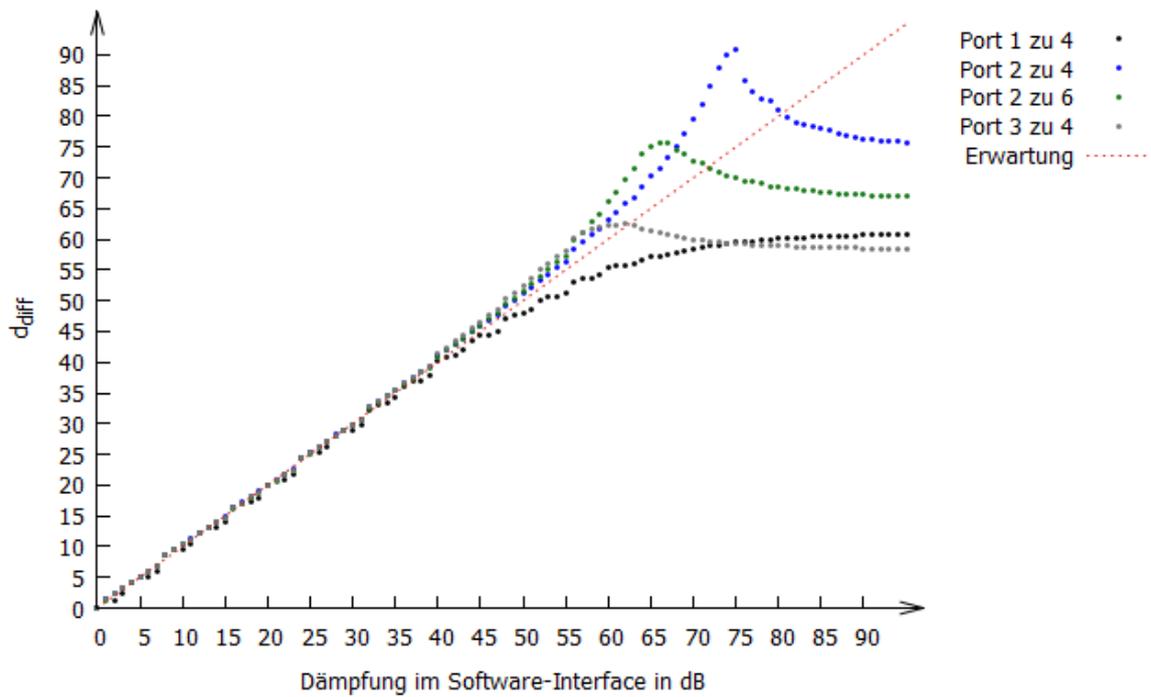


Abbildung 19: Dämpfungsverlauf Einantennenports zu Mehrantennenports

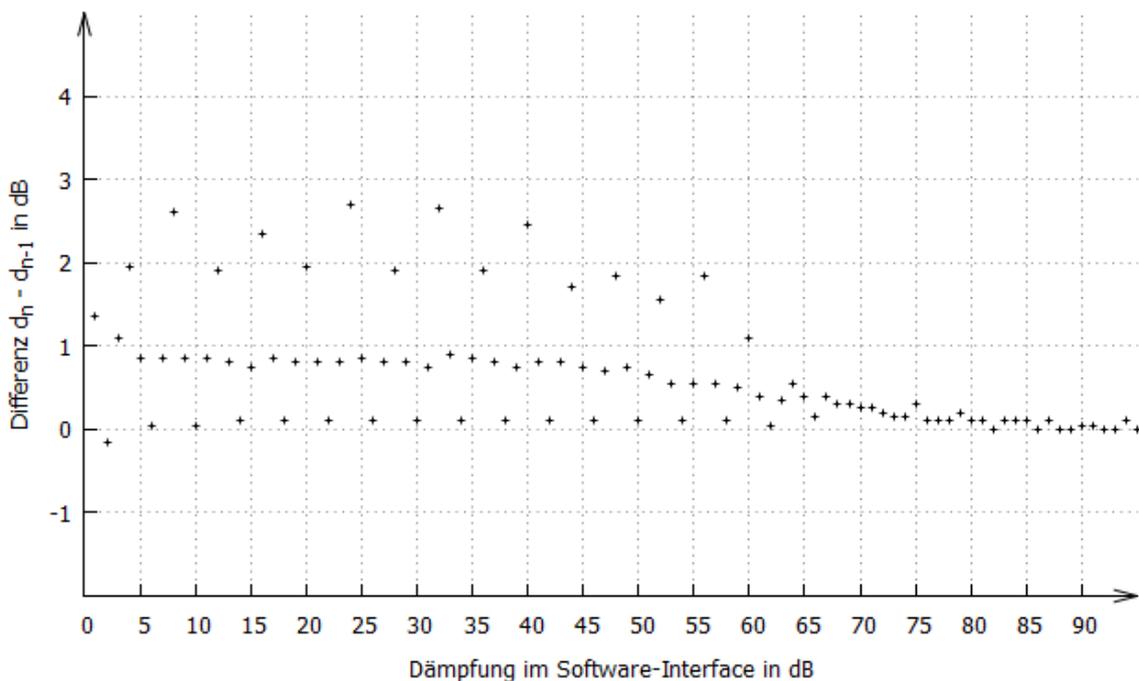


Abbildung 20: Schaltdifferenz zum vorhergehenden Wert Port 1.2 zu Port 4

4.1.5.2 Dämpfung bei 500 MHz

Eine weitere Messreihe bei einer Frequenz von 500 MHz ist in Abbildung 21 dargestellt. Verglichen mit der Messung bei 2,45 GHz ist ein nahezu ideales

Verhalten bis 75 dB eingestellter Dämpfung zu sehen, die Dämpfungswerte weichen maximal um 1,25 dB vom Idealwert ab. Sprünge wie in Abbildung 16 sind nicht zu erkennen (Abbildung 22)

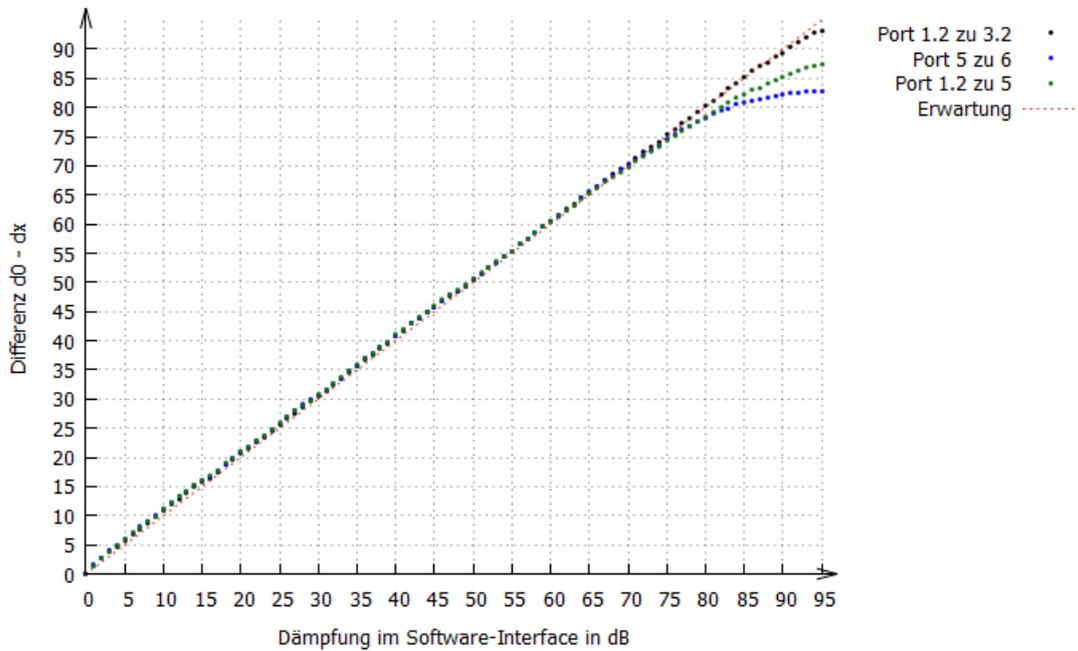


Abbildung 21: Dämpfungsverlauf Softwareinterface 500 MHz

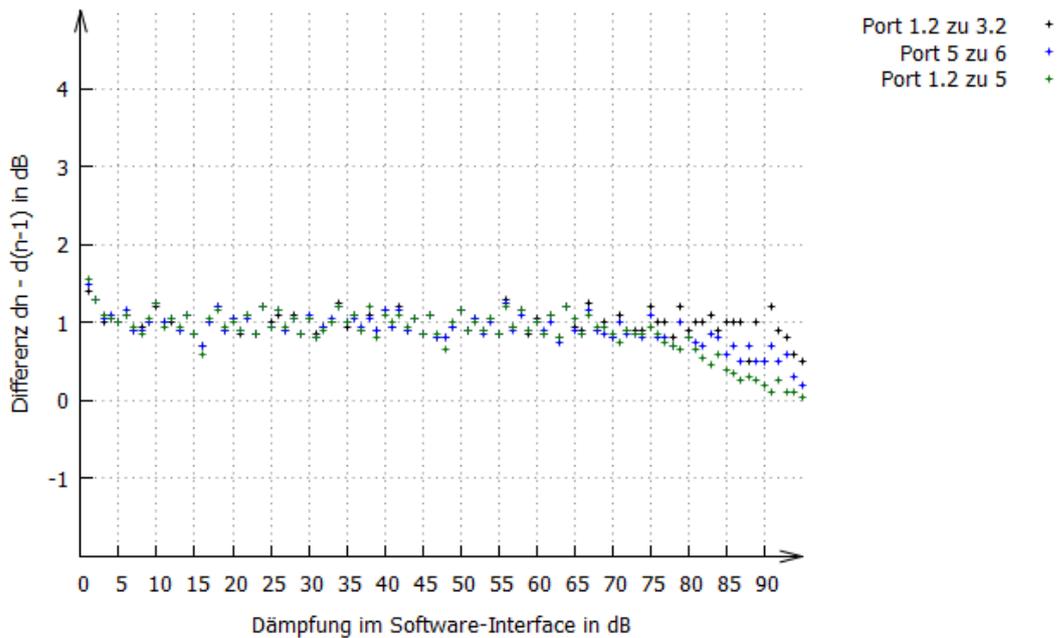


Abbildung 22: Schaltdifferenz zum vorhergehenden Wert bei 500 MHz

4.1.6 Schaltzeit, Schaltintervall

Insbesondere für die Emulation von bewegten Funksystemen spielt die Schaltzeit des QPER eine wichtige Rolle. Zur Messung der Schaltzeit soll ein Szenario angenommen werden, in dem sich ein empfangendes Funkgerät mit konstanter Geschwindigkeit von einem sendenden Funkgerät entfernt und somit die vom Softwareinterface eingestellte Dämpfung ändert. Das in Abbildung 23 dargestellte Szenario emuliert ein entsprechendes Verhalten, dabei bewegt sich das Funkgerät "Car 1" mit einer Geschwindigkeit von 126 km/h (35 m/s) auf einer geraden Strecke von 700 m hin und zurück. An einem Ende der Strecke befindet sich das Funkgerät "Car 2", wodurch sich der Abstand der beiden Funkgeräte zwischen 0 m und 700 m bewegt. Die vom Softwareinterface eingestellte Dämpfung variiert dadurch zwischen 0 dB und 57 dB.

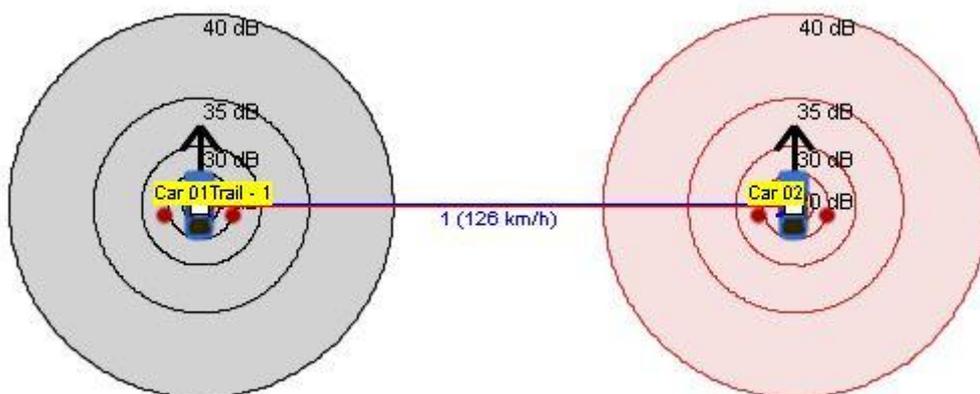


Abbildung 23: Szenario "Schaltzeit"

Um eine Annäherung für das zu erwartende Ergebnis zu erhalten, kann die Freiraumdämpfung angenommen werden. Dabei erfolgt die Berechnung der Freiraumdämpfung für eine Frequenz von $f = 2,45 \text{ GHz}$ mit folgender Formel:

$$F(r) = 20 \cdot \log_{10} \frac{4\pi \cdot r \cdot f}{c} = 20 \cdot \log_{10} \frac{4\pi \cdot r \cdot 2,45 \text{ GHz}}{c}$$

In Abbildung 24: Freiraumdämpfung bei 2,45 GHz ist die Freiraumdämpfung in dB in Abhängigkeit zur Entfernung r dargestellt, die Entfernung r ist hierbei in dem vom Szenario vorgegeben Intervall von 0 bis 700 m dargestellt.

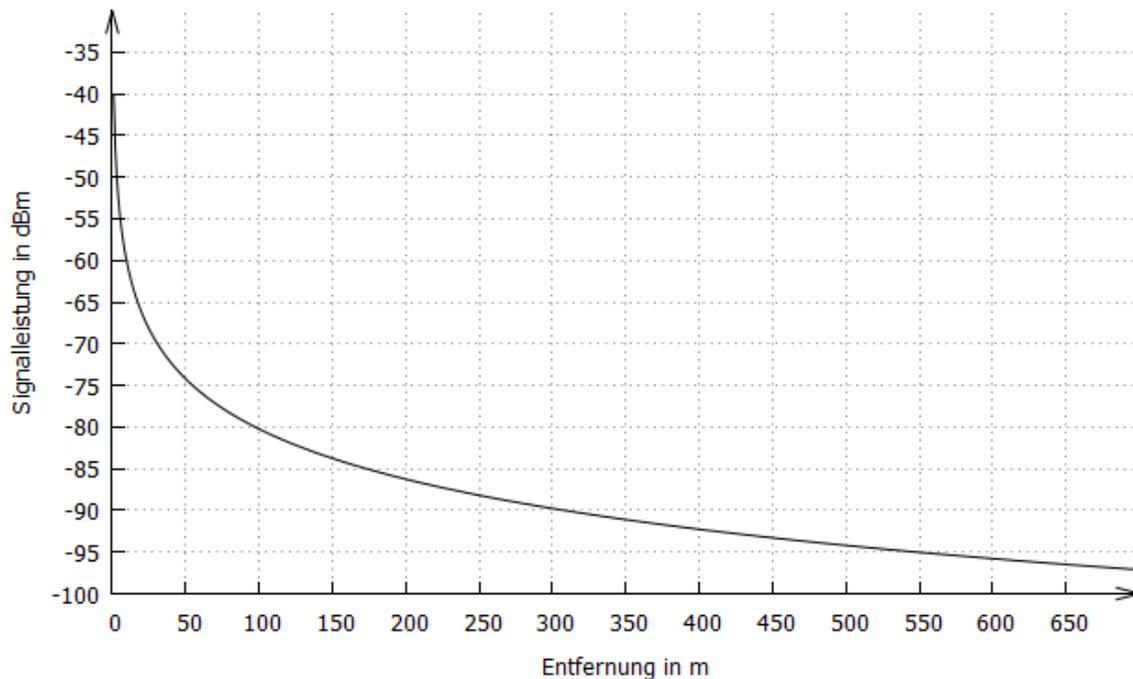


Abbildung 24: Freiraumdämpfung bei 2,45 GHz

Zur Messung der Schaltzeit wurde mithilfe des Vektorsignalgenerators ein Sinussignal erzeugt, welches bei $f = 2,45 \text{ GHz}$ und einer Sendeleistung von 0 dBm in den QPER an Port 1.2 eingespeist wurde. Mit dem Spektrumanalysator wurde die empfangsseitige Leistung gemessen. Dazu wurde ab der höchsten zu messenden Empfangsleistung (entspricht 0 dB Dämpfung) bei 2,45 GHz der Signalverlauf in Abhängigkeit von der Zeit gemessen.

In der Konfiguration des QPER Servers beeinflusst die Variable "sleep_int" die betrachtete Schaltzeit. Mit der Variablen "sleep_int" wird ein Zeitintervall im QPER Server für bestimmte Prozesse (z.B. Aktualisierung der Parameter, Berechnungen) festgelegt. Der standardmäßig konfigurierte Wert von 1 000 000 bedeutet, dass der QPER Server im Zeitintervall von 1 000 000 Mikrosekunden die Prozesse zur Berechnung und Einstellung der Dämpfungswerte aktualisiert.

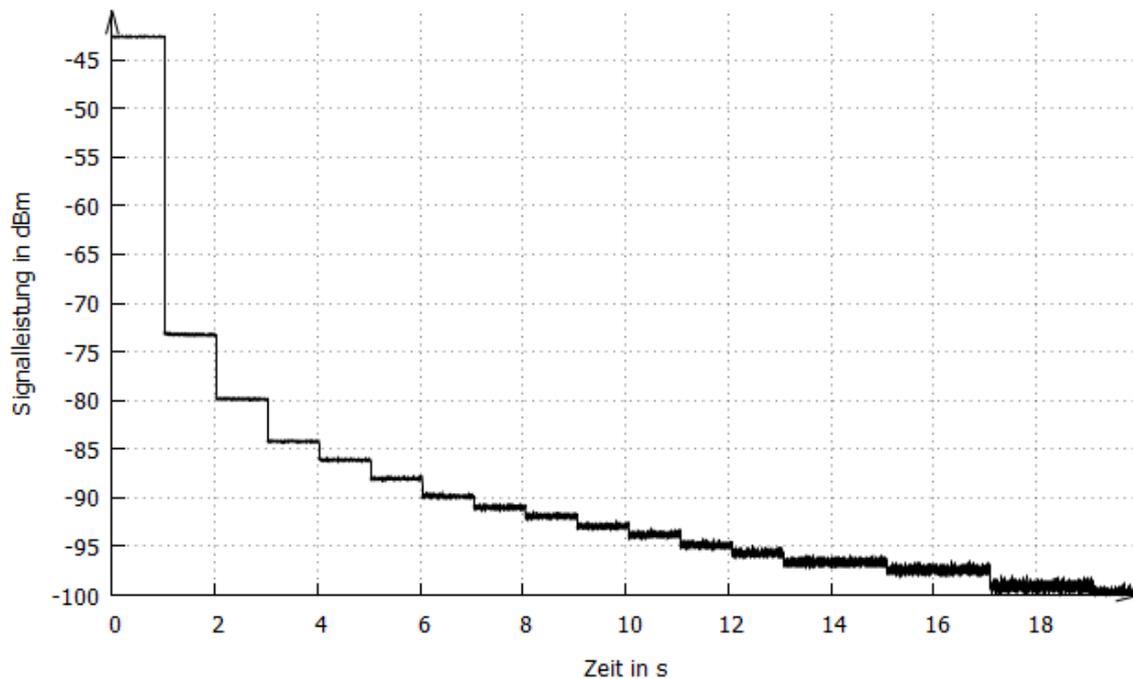


Abbildung 25: Messung Schaltintervall 1 s

Eine Änderung des Variable `sleep_int` auf 100 000 bewirkt, dass der QPER Server im Intervall von 100 000 Mikrosekunden die Prozesse zur Berechnung und Einstellung der Dämpfungswerte aktualisiert. Der Dämpfungsverlauf für das Intervall `sleep_int=100 000` ist in Abbildung 26 dargestellt.

Zur Messung der Schaltzeit musste im Software-Interface ein Szenario erstellt werden, welches in regelmäßigen Abständen zwischen zwei benachbarten Dämpfungsstufen schaltet. Im Scenery View wurde dazu eine kurze Strecke mit zwei Messpunkten erstellt, auf der sich das empfangende Funkgerät bewegt. Das so konfigurierte Szenario bewirkt eine Schaltung zwischen 17 dB und 18 dB, was einem Schaltvorgang von -57,5 dBm auf -58,8 dBm entspricht.

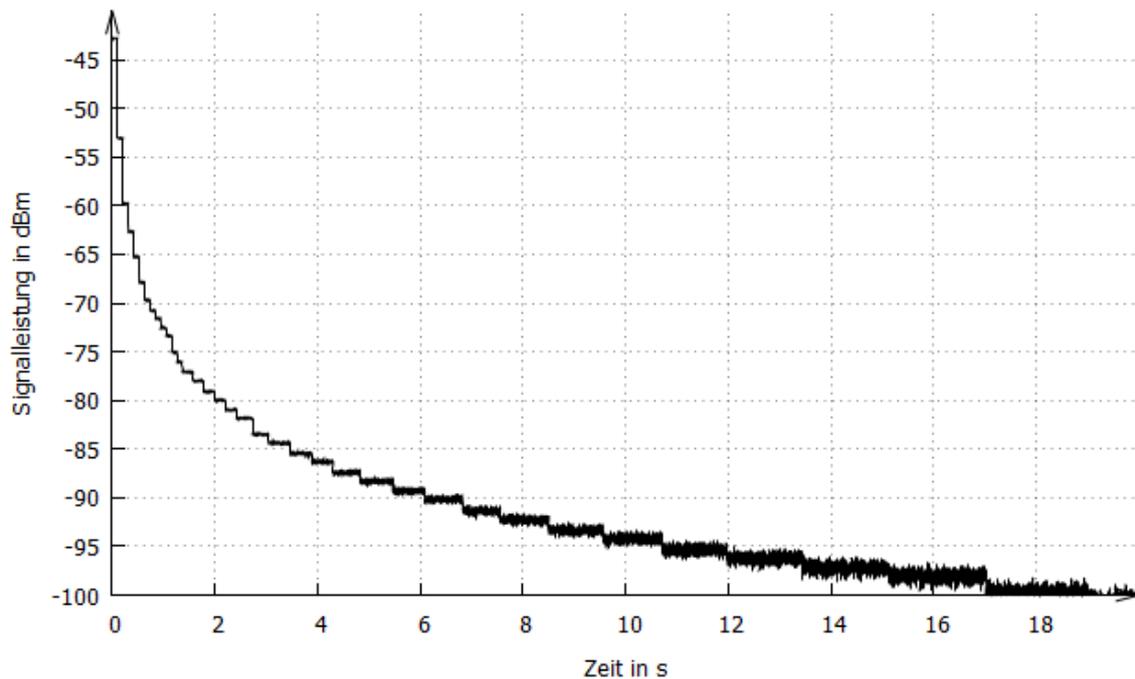


Abbildung 26: Messung Schaltintervall 100 ms

Mithilfe des Spektrumanalysators wurde der Schaltvorgang in einem Zeitfenster von $T = 10 \text{ ms}$ mit $N = 32000$ Messpunkten aufgenommen, was zu einer Auflösung von $0,3125 \mu\text{s}$ führt.

$$\frac{T}{N} = \frac{10 \text{ ms}}{32000} = 0,3125 \mu\text{s}$$

Damit der Schaltvorgang zuverlässig in diesem Zeitfenster zu sehen ist, wurde auf eine vor dem Schaltvorgang auftretende steigende Flanke getriggert und die Messung um 100 ms verzögert. Um die Zeitpunkte des zu messenden Zeitintervalls einheitlich festzulegen, wurden die Mittelwerte $P_{17\text{dB}}$ und $P_{18\text{dB}}$ der jeweiligen Empfangsleistungsstufen innerhalb des Zeitfensters gebildet und durch folgende Formeln verrechnet:

$$P_{95\%} = P_{17\text{dB}} - \frac{P_{17\text{dB}} - P_{18\text{dB}}}{20}$$

$$P_{5\%} = P_{18\text{dB}} + \frac{P_{17\text{dB}} - P_{18\text{dB}}}{20}$$

Die Schnittpunkte mit den Werten $P_{95\%}$ und $P_{5\%}$ stellen die Grenzen für das zu messende Intervall dar, für die erste Messreihe ergibt sich die in Abbildung 27 gezeigte Darstellung.

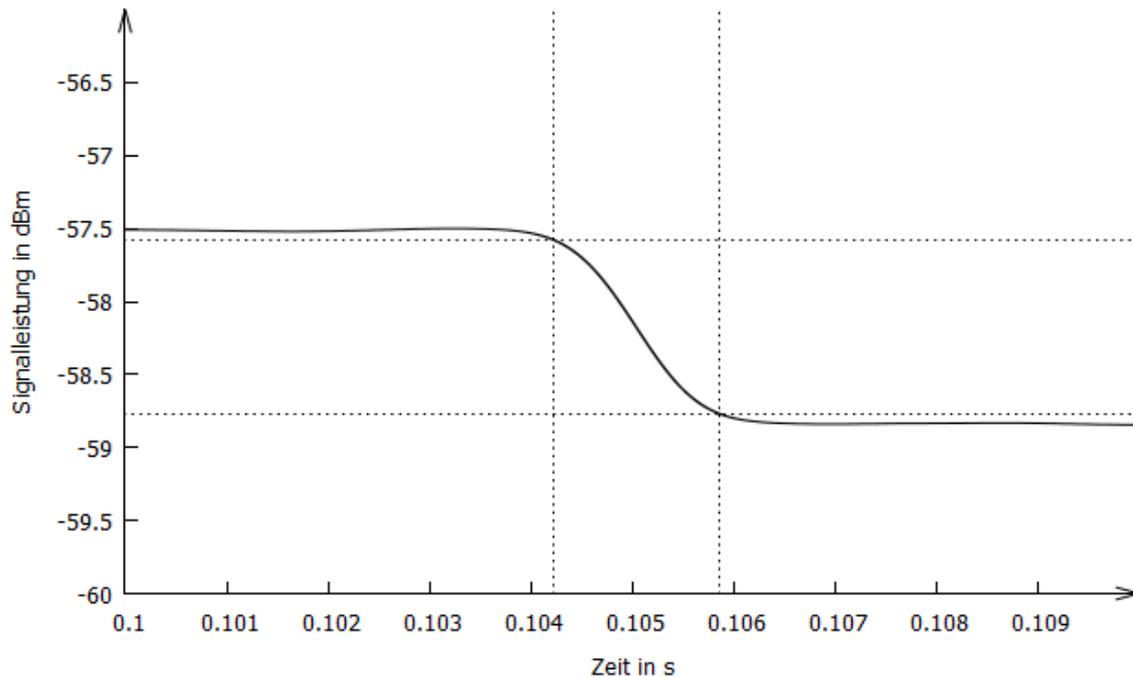


Abbildung 27: Messung Schaltzeit

Diese Messreihe beinhaltet 20 Messwerte, die Länge des so definierten Zeitfensters beträgt in Durchschnitt 1,696 Millisekunden.

4.1.7 Fast Fading Area

Ein Feature des QPER ist die Berücksichtigung von Fading-Effekten durch die Rayleigh- und Rician-Verteilung. Bei der entsprechenden Messung wurden dabei Schwankungen um einige dB von der unbeeinflussten Dämpfung erwartet. Gemessen wurde mithilfe der Konfiguration zur Messung der Schaltzeit (siehe 4.1.6). Es stellte sich nicht das erwartete Bild ein, sondern eine maximal eingestellte Dämpfung, sobald sich eines der beiden Funkgeräte im Software-Interface innerhalb der Fast Fading Area (FFA) befand. Durch Schaltvorgänge erkennbare Peaks waren im Verlauf der Messung weitestgehend deckungsgleich mit dem Leistungspegel vergleichbarer Messungen (siehe Abbildung 26 (ohne Fading) und Abbildung 28(mit Fading)).

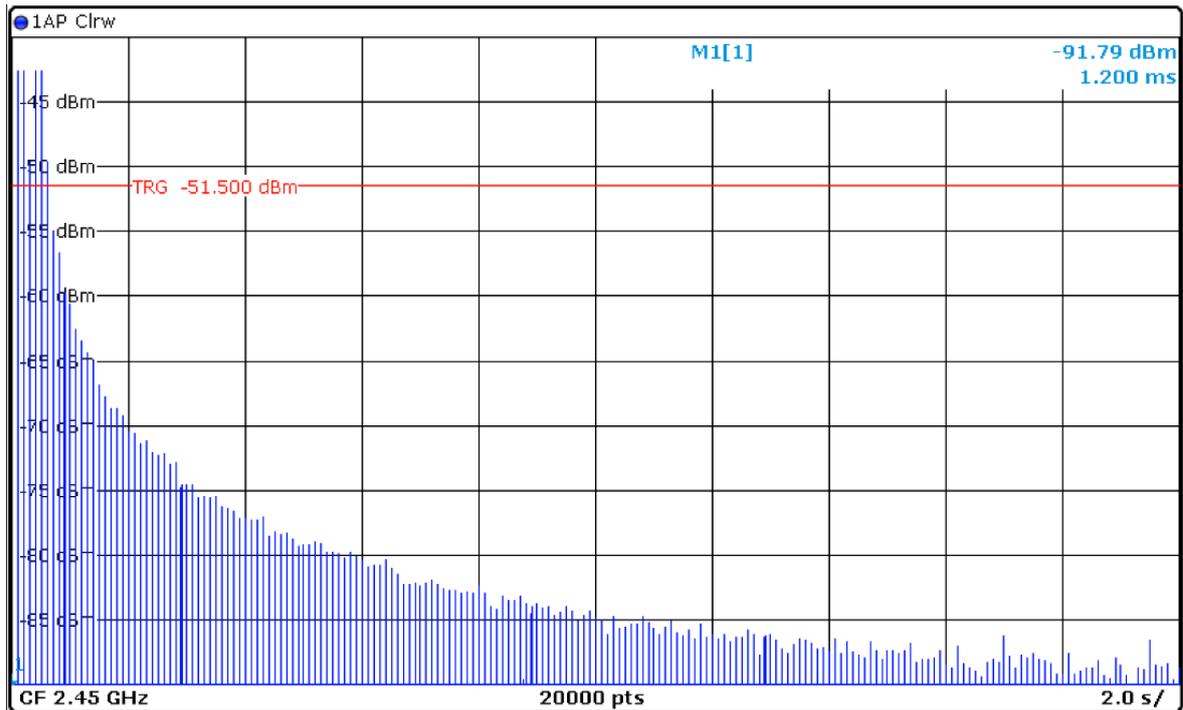


Abbildung 28: Messung Schaltintervall 100 ms mit Fading

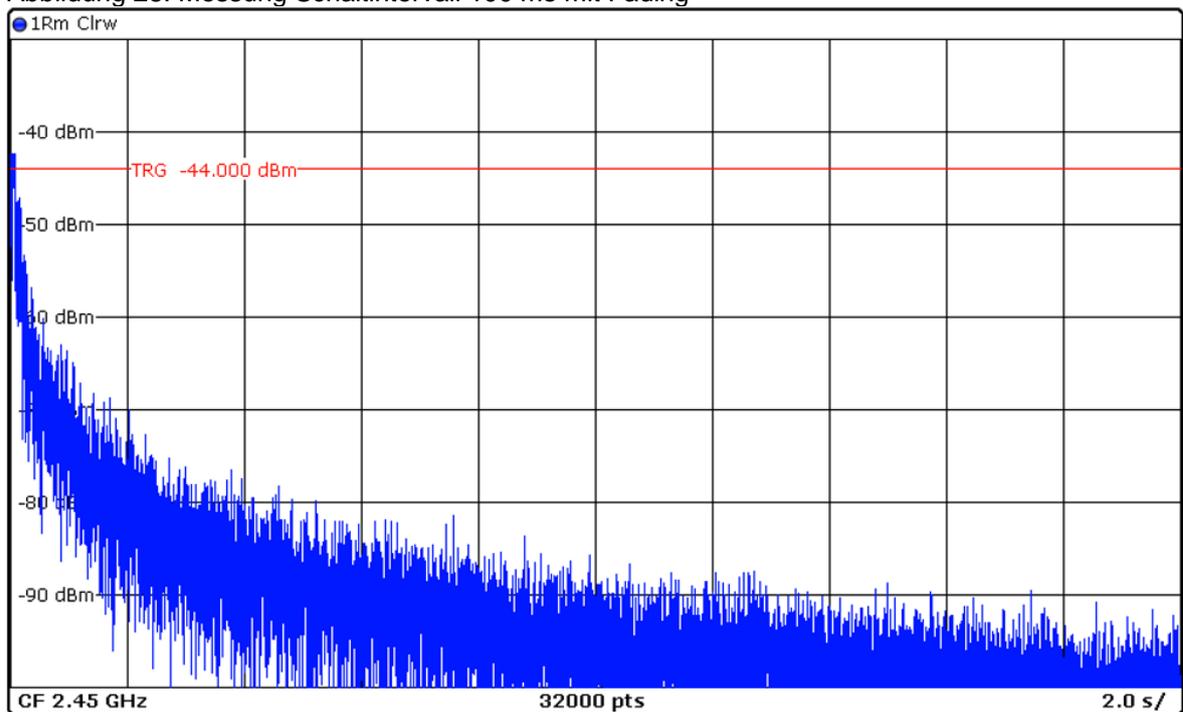


Abbildung 29: Messung Schaltintervall 100 ms mit korrigierten Fading

Nach einem Softwareupdate durch den Hersteller änderte sich das Verhalten dahingehend, dass zusätzlich zum ursprünglichen Signal (vgl. Abbildung 28) Leistungsschwankungen auftreten, die dem erwarteten Fading entsprechen (siehe

Abbildung 29). Geht die einstellbare Dämpfung gegen 0 dB wird die Leistung unabhängig vom Fast Fading durch die Einfügedämpfung begrenzt.

4.1.8 Phasenmessung

Eine weitere Funktion des QPER ist das Verschieben der Phase in einem Bereich von 0° bis 359° in 1° -Schritten. Dazu wird im Software Interface (vgl. Abbildung 5: Beispiel QPER Software Interface, unten rechts) eine Übersicht über die bestehenden und festgelegten Phasenverschiebungen zwischen den Ports 1 bis 3 angezeigt. Im Gegensatz zu den Dämpfungsgliedern können die Phasenschieber für jeden einzelnen Anschluss der Mehrantennenports separat eingestellt werden.

Da die Phasenlage frequenzabhängig ist, muss in der Konfiguration des Software-Interfaces die betrachtete Frequenz eingetragen werden.

Die Messung erfolgte mithilfe des Netzwerkanalysators für die Frequenzen 500 MHz, 2,45 GHz und 5,9 GHz jeweils von 0° bis 360° in 5° -Schritten zwischen den Ports 1.2 und 2.2.

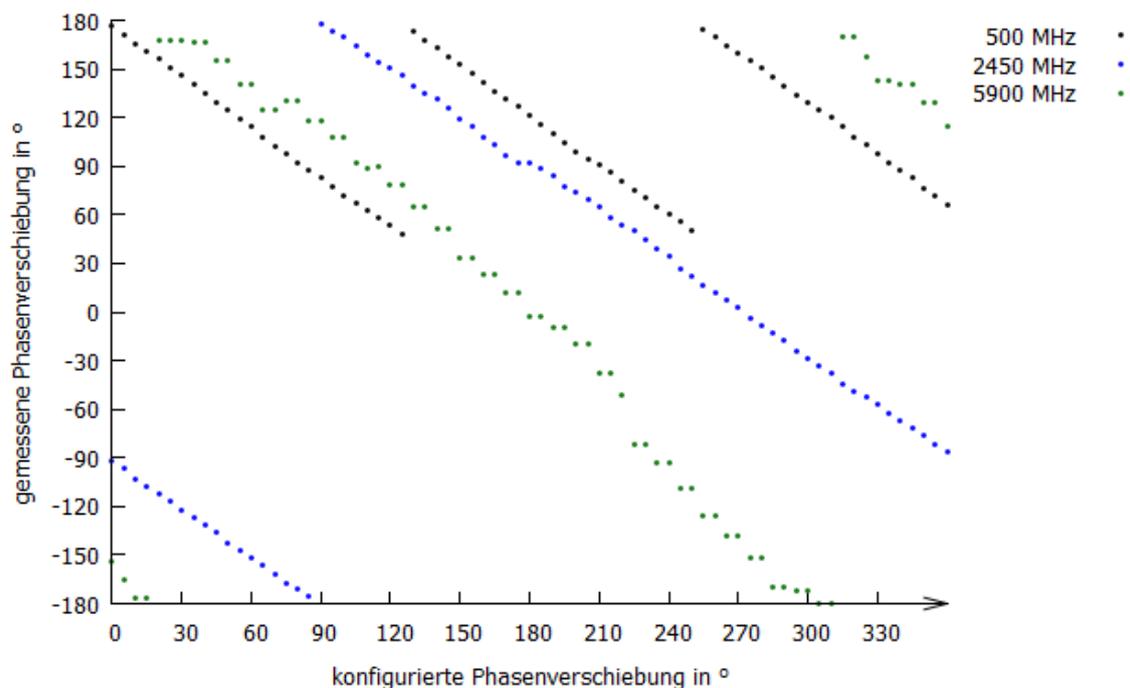


Abbildung 30: Phasenmessung

Die Messung bei 2,45 GHz zeigt annähernd das zu erwartende Ergebnis, bei 5,9 GHz reagiert der QPER alle 10° mit einer Phasenverschiebung zwischen den Ports. Bei 500 MHz springt der Phasenversatz nach einer Phasenverschiebung um $\varphi_d = 127^\circ$ wieder zurück auf den Wert des Messpunktes 0°. Eine Erhöhung der Betriebsfrequenz um 100 MHz führt zu einer Verschiebung des Punktes φ_d um durchschnittlich 25°. Bei Frequenzen über 1500 MHz ist eine vollständige Phasendrehung möglich.

Werden höhere Frequenzen verwendet, so nimmt die Auflösung der Schaltschritte linear ab. Bei 2,45 GHz schaltet die Phase nach einer Änderung im Software-Interface um 5 Grad, bei 5,9 GHz nach einer Änderung um 10 Grad.

4.1.9 Auswertung

Die in den Abschnitten 4.1.2 bis 4.1.8 durchgeführten Messreihen stellen die Grundlage zur Beurteilung des QPER als Kanalemulator dar. Wesentliche Begrenzungen sind hierbei in dem verwendbaren Frequenzspektrum, der einstellbaren Dämpfung und der Verschiebung der Phase gegeben.

Das in den Abschnitten 4.1.2 und 4.1.3 erfasste frequenzabhängige Verhalten zeigt bis 4 GHz einen nahezu idealen Verlauf, ab 4 GHz muss die Einfügedämpfung und die vom QPER berechnete Dämpfungsstufe berücksichtigt werden.

Ausgehend von den Messreihen des Dämpfungsverlaufes bei 2,45 GHz kann in einem Bereich von 0 dB bis 45 dB nahezu ideales Verhalten angenommen werden. Unter Einbeziehung der Freiraumdämpfung von 40,46 dB können damit Dämpfungen zwischen 40,46 dB bis 85,46 dB zuverlässig bereitgestellt werden. Bezogen auf die Freiraumdämpfung entspricht dies einer Entfernungsspanne von einem Meter bis 182,57 Meter.

$$a_F = 20 \cdot \log_{10} \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{c} \Rightarrow r = \frac{10^{\frac{a_F}{20}} \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot f}$$

Für Emulationen, die Entfernungen außerhalb dieser Spanne enthalten, müssen dazu geeignete Ports verwendet werden.

4.2 Evaluierung an einem praktischen Beispiel

4.2.1 Einleitung

Zur Evaluierung des Labormessplatzes wurden Funkgeräte des Trusted Wireless Funksystemes RAD-2400 von Phoenix Contact verwendet. Neben dem Einfluss des durch den QPER emulierten Funkkanals auf das Zeit- und Fehlverhalten des Funksystems wurde die Medienbelegung bei verschiedenen Konfigurationen des Funksystems gemessen.

4.2.2 RAD-2400

Das Trusted Wireless Funksystem ist ein industrielles Funksystem, welches auf die Kommunikation über Strecken von bis zu mehreren Kilometern ausgelegt ist. Dazu ist in der Konfiguration eine Option zur Festlegung der verwendeten Datenrate gegeben, welche die Empfängerempfindlichkeit beeinflusst. Die Datenrate kann wahlweise 16 kbit/s, 125 kbit/s oder 250 kbit/s eingestellt werden und es ergibt sich laut Herstellerangaben eine Empfängerempfindlichkeit von jeweils -106 dBm, -96 dBm oder -93 dBm.

Die Funkgeräte werden generell als Master beziehungsweise Slaves verwendet. Als Slaves konfigurierte Funkgeräte können als Repeater verwendet werden, um Baumtopologien aufzubauen und so die Reichweite weiter zu erhöhen. Zur Funkübertragung wird das Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) Verfahren in einem Bereich von 2,4 GHz bis 2,48 GHz genutzt.

Als Bezugsschnittstellen steht eine RS232-Schnittstelle und eine RS485-Schnittstelle zur Verfügung. [10]

4.2.3 Genutzte Frequenzen

Das FHSS Verfahren setzt die Nutzung einer endlichen Anzahl von festgelegten Frequenzen voraus, die zur Übertragung von Signalen genutzt werden können. Die vom Trusted Wireless verwendeten Frequenzen lassen sich mithilfe des Spektrumanalysators darstellen. Dazu wurden zwei Funkgeräte als Master und Slave jeweils an ein Multifaces angeschlossen, welche in einem Anwendungszyklus von 50 ms Pakete mit einer Nutzdatenlänge von 5 Byte übertragen haben. Die Funkgeräte wurden an die Ports 1.2 und 2.2 des

Kanalemulators angeschlossen. In Abbildung 31 ist das Spektrogramm im Bereich 2,4 GHz bis 2,48 GHz dargestellt. Zu sehen sind Signale des als Slave arbeitenden Funkgerätes bei -45 dBm und Signale des Masters ab -35 dBm.

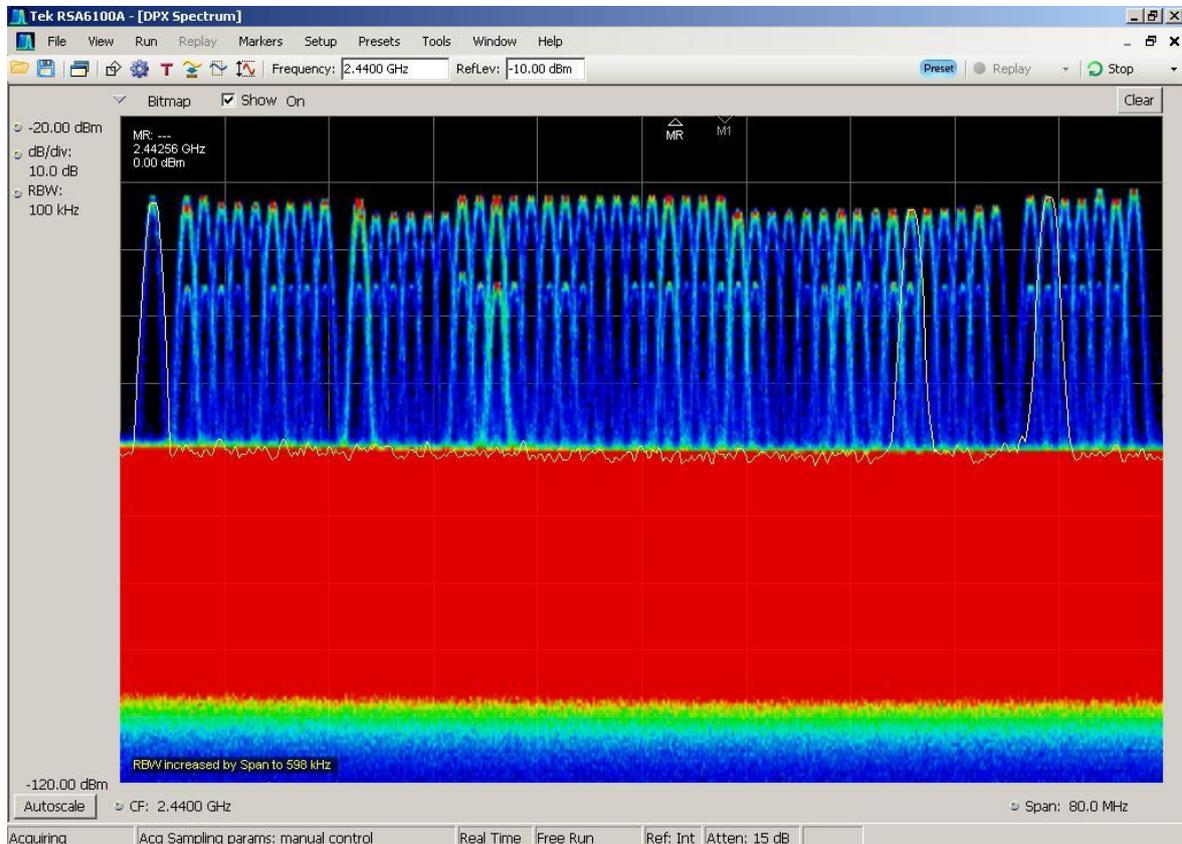


Abbildung 31: Genutzte Frequenzen im 2,4 GHz ISM Band

Das Trusted Wireless System verwendet insgesamt 55 verschiedene Frequenzschlitze, welche einen minimalen Abstand von 1,32 MHz zueinander haben. Die gemessene Signalleistung liegt abhängig vom betrachteten Kanal zwischen -31,5 dBm und -34,5 dBm. Eine Übersicht der Frequenzkanäle und ihrer Frequenzen befindet sich im Anhang auf der DVD unter Messwerte/4.2.3 Genutzte Frequenzen.

4.2.4 Sterntopologie

Zur Darstellung des Sendeverhaltens des Trusted Wireless Funksystems wurden 2 Funkgeräte so konfiguriert, dass sie als Master und Slave in einer Sterntopologie Daten mit einer Datenrate von 250 kbit/s übertragen. Das sendeseitige Multiface generierte in einem Sendezeitintervall von 100 ms Datenpakete mit einer Größe

von 5 Byte, welche über die RS-232 Schnittstelle an das Funkgerät übertragen wurden. Der Spektrumanalysator erfasste ein 500 ms langes Zeitfenster dieser Übertragung.

Definiert man als Grundrauschniveau den Mittelwert der zu messenden Rauschleistung, so stellt sich durch die Verwendung des QPER ein Grundrauschniveau von -79 dBm ein. Mit einer Einfügedämpfung von 40,46 dB bei 2,45 GHz und einer durch die Funkgeräte vorgegebenen maximalen Sendeleistung von 20 dBm ergibt sich ein Signal-Rausch-Abstand von 58 dB [11]. Daher kann zur Unterscheidung der durch den Master beziehungsweise den Slave gesendeten Signale die Dämpfung im Software-Interface auf unterschiedliche Werte gesetzt werden. In dieser Messung wurde die Dämpfung des Masters zum Spektrumanalysator auf 10 dB und vom Slave zum Spektrumanalysator auf 20 dB eingestellt.

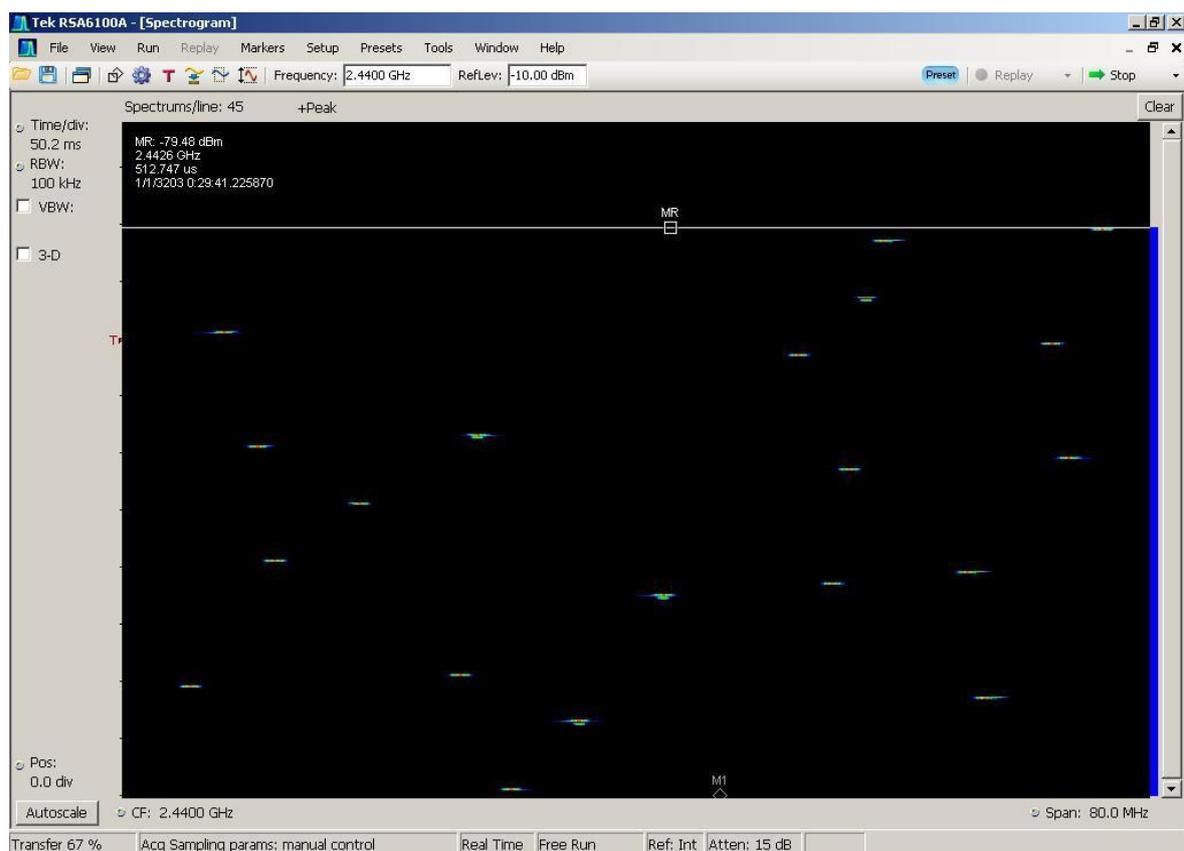


Abbildung 32: Spektrogramm Sterntopologie

Signale mit einer Leistung $P_e > -40 \text{ dBm}$ werden in Abbildung 32 rot dargestellt und wurden vom Master gesendet, Signale mit einer Leistung $P_e < -40 \text{ dBm}$ stammen vom Slave. In diesem Fall diente das am Master angeschlossene Multiface als Producer und das am Slave angeschlossene Multiface als Consumer.

Der Master sendete in einem Zeitintervall von 10,03 ms Signale mit einer Länge von 1,025 ms. Das Funksystem war bei der Messung nicht voll ausgelastet, wodurch nicht alle Zeitschlitze belegt wurden (Messwerte siehe Anhang). Die durch den Slave gesendeten Pakete folgten einem 0,77 ms langen Signal des Masters nach 1,7 ms und wiederholten sich mit den hier verwendeten Einstellungen in einem Zeitbereich von 100 ms bis 120 ms nach dem letzten vom Slave gesendeten Paket.

4.2.5 Baumtopologie

Zu der Konfiguration aus 4.2.4 kam ein weiteres Funkgerät hinzu, welches als Repeater agierte. Die Dämpfung des Kanalemulators wurde dahingehend verändert, dass der Repeater auf 20 dB und der Slave auf 30 dB Dämpfung zum Port des RSA eingestellt wurde. Da bei einer Sendeleistung von 20 dBm und einer Empfängerempfindlichkeit von -93 dBm die Isolationsdämpfung der Ports am Kanalemulator schon erreicht wird, musste die Sendeleistung der Funkgeräte auf 0 dBm reduziert werden.

Das in Abbildung 33 dargestellte Spektrogramm zeigt einen 500 ms langen Ausschnitt des Spektrums im Bereich von 2,4 GHz bis 2,48 GHz. Signale mit einer Signalleistung $P_e > -40 \text{ dBm}$ sind dem Master zuzuordnen, Signalleistungen $-50 \text{ dBm} < P_e < -40 \text{ dBm}$ deuten auf den Repeater hin. Signale mit Signalleistungen $P_e < -50 \text{ dBm}$ wurden vom Slave erzeugt.

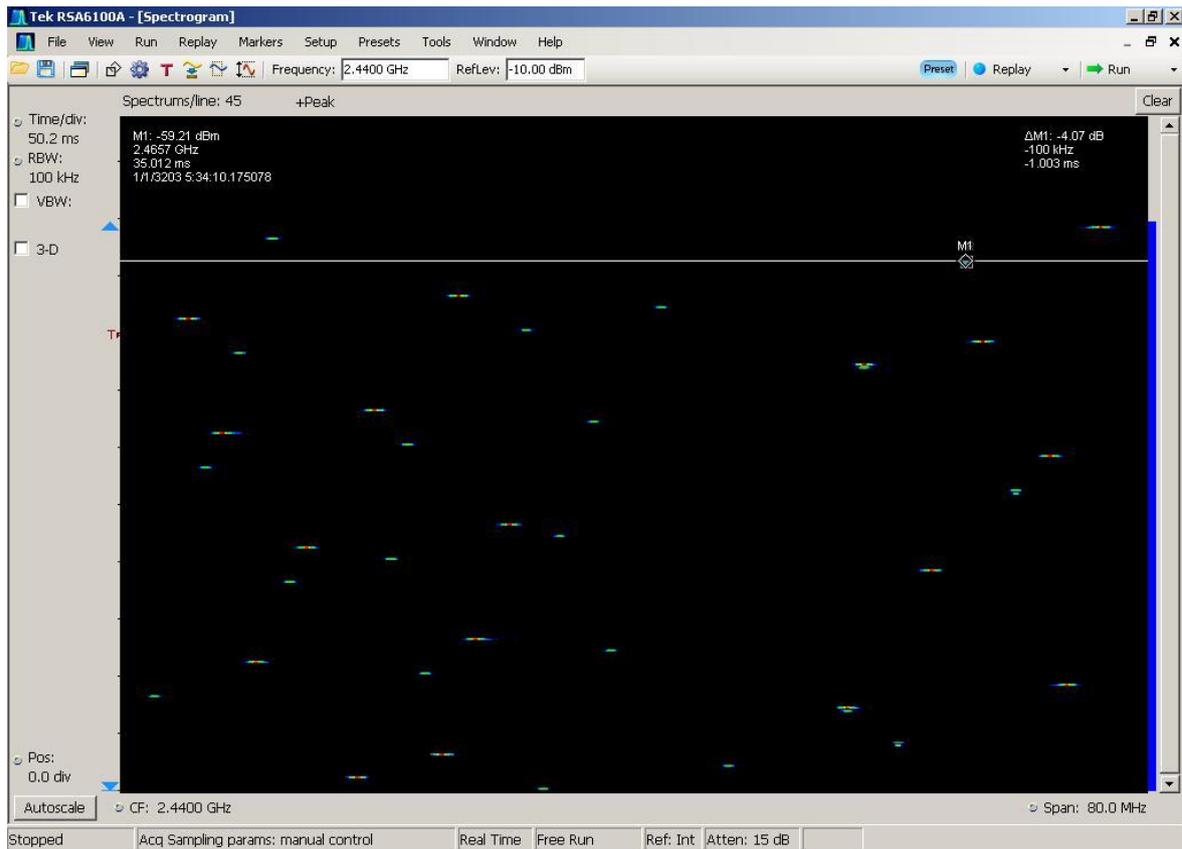


Abbildung 33: Spektrogramm Baumtopologie

4.2.6 Medienbelegung

Zur Messung der Medienbelegung bei einem Funksystem, welches das FHSS Verfahren verwendet, muss ein zu betrachtender Frequenzbereich definiert werden [7]. Dazu soll in diesem Fall das Frequenzband von 2401 MHz bis 2448 MHz betrachtet werden, was nach IEEE 802.11 [12] den WLAN Kanälen 1 bis 6 entspricht [13].

Der Versuchsaufbau ist hierbei abgesehen von einer Übertragungsrate von 125 kbit/s statt 250 kbit/s wie in 4.2.4 konfiguriert. Das Frequenzband von 2401 bis 2448 MHz wird von den Kanälen 1 bis 33 des Trusted Wireless Systems beeinflusst. In Abbildung 34: Medienbelegung Sterntopologie 125 kbit/s ist der betrachtete Ausschnitt dargestellt. Von den 20 erfassten Signalen fallen 13 in den betrachteten Frequenzbereich. Die rot dargestellten Signale des Masters nehmen ohne ein direkt folgendes Signal des Slaves eine Zeitspanne von 2,05 ms im betrachteten Frequenzbereich ein, mit einer Beteiligung des Slaves beträgt die

Zeitspanne 1,55 ms. Das auf ein Signal des Masters folgende Signal des Slaves umfasst 2,24 ms.

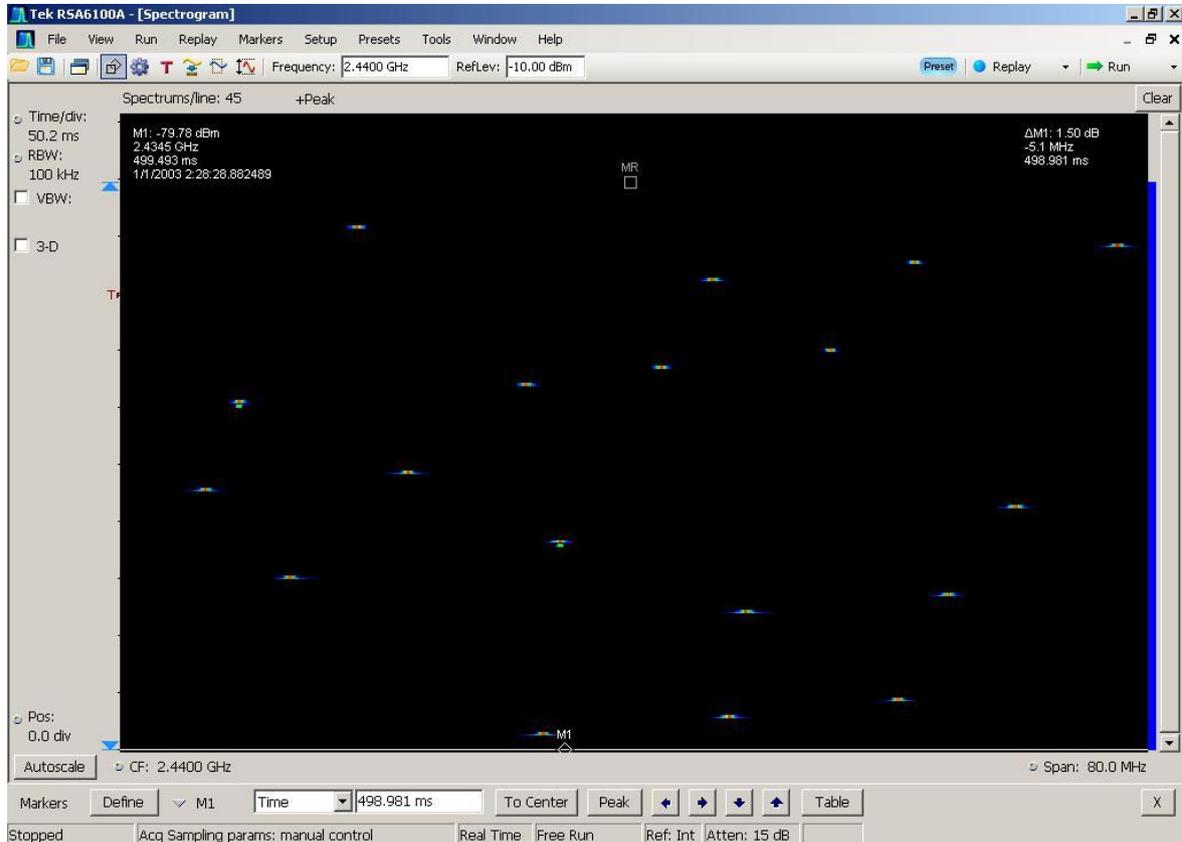


Abbildung 34: Medienbelegung Sterntopologie 125 kbit/s

Der betrachtete Frequenzbereich gilt als belegt, wenn von einem der Trusted Wireless Funkgeräte Leistung in das Übertragungsmedium gegeben wird. Es sei n die Anzahl dieser Signale. Durch Addition der Zeitspannen entsprechender Signale t_i ergibt sich dann eine Belegungsdauer von $t_B = 26,03 \text{ ms}$.

$$t_B = \sum_{i=1}^n t_i$$

Wird die Belegungsdauer ins Verhältnis mit der Länge des betrachteten Zeitintervalls gesetzt, so ergibt sich eine Medienbelegung von 5,2 %.

$$\frac{2,6 \text{ ms}}{500 \text{ ms}} = 0,052$$

4.2.7 Übertragungszeit

Um die Übertragungszeit des Trusted Wireless Systems zu messen, wurden zwei Funkgeräte eines als Master und eines als Slave angeschlossen. Durch den deutlich geringeren Abstand der Funkgeräte und der Multifaces bei Verwendung des Kanalemulators musste die Zeitsynchronisierung über eine kürzere Verbindung realisiert werden, in diesem Fall über einen Lichtwellenleiter.

Die Funkgeräte wurden in der ersten Messreihe bei einer Datenrate von 250 kbit/s betrieben. Das sendeseitige Multiface generierte in einem Sendezeitabstand von 50 ms Datenpakete mit einer Länge von 5 Byte. Die Übertragungszeit der Bezugsschnittstelle RS232 beträgt bei dieser Datenlänge 2,6 ms.

Die Messung umfasst 10000 gesendete Datenpakete, der in Abbildung 35 dargestellte Abschnitt zeigt die ersten 1000 Werte der Messung.

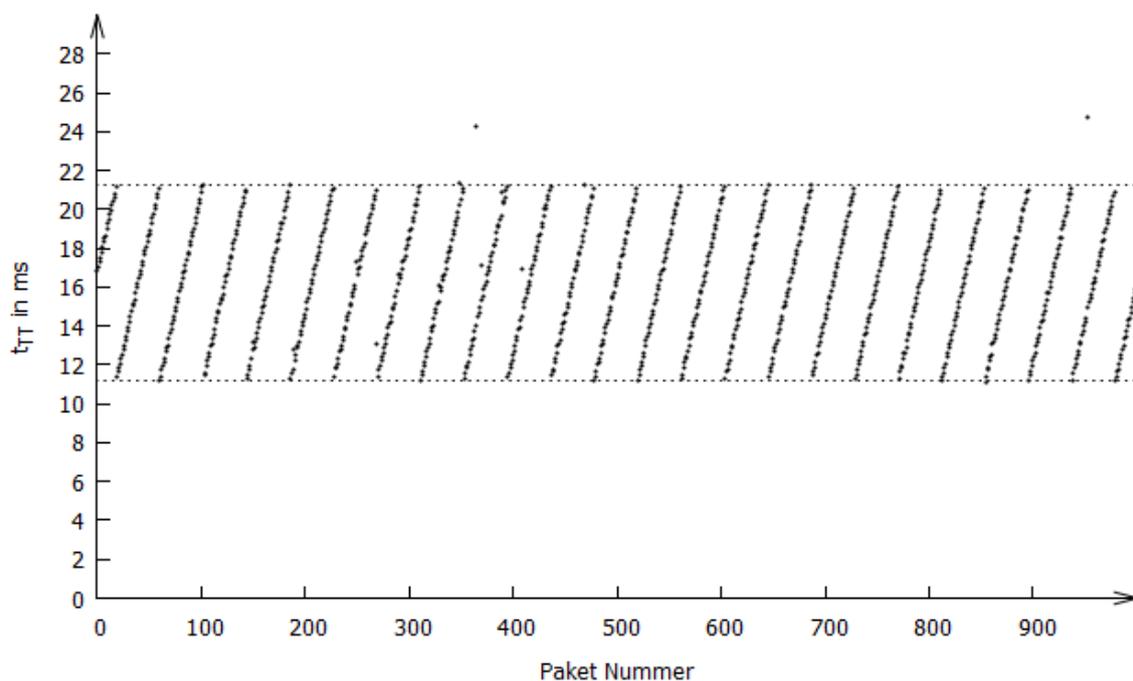


Abbildung 35: Übertragungszeit

Die von dem Multiface gemessene Übertragungszeit beträgt durchschnittlich $\bar{t}_{TT} = 16,232 \text{ ms}$, die Zeit zwischen zwei Signalen des Masters ist nach 4.2.4 $t_Z = 10,03 \text{ ms}$. Definiert man dazu ein Zeitintervall mit der oberen Grenze

$t_{TT0} = \overline{t_{TT}} + \frac{t_z}{2}$ und der unteren Grenze $t_{TTu} = \overline{t_{TT}} - \frac{t_z}{2}$, so befinden sich 99% der übertragenen Pakete in dem Intervall $[t_{TTu}, t_{TT0}]$.

Je nach Zeitpunkt des Eintreffens der Datenpakete von der Bezugsschnittstelle des TW Masters verzögert sich die Übertragung bis zum nächsten Signal, also um maximal 10,03 ms.

Betrachtet man die Menge M an Messpunkten $t_{TT(n)}$ mit

$$M = \{t_{TT(n)}: t_{TT(n)} - t_{TT(n-1)} > -9 \text{ ms}, n \in [2, 10000]\}$$

so ist die Übertragungszeit $t_{TT(n)}$ zum Vorgängerwert $t_{TT(n-1)}$ um durchschnittlich 0,26 ms versetzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zielen vor allem auf die Eignung des QPER als Kanalemulation des Funkübertragungsmediums ab. Aus den Unterschieden in der grundsätzlichen Art der Signalübertragung unter Verwendung von Antennen und der Luft als Übertragungsmedium im Gegensatz zu der leitungsgebundenen Signalübertragung mit elektronischen Komponenten zeichnen sich deutliche Vor- und Nachteile ab.

Die Eigenschaften des QPER sind insbesondere im Hinblick auf Herstellerangaben und Grenzen in der Verwendbarkeit als Bestandteil des Versuchsaufbaus erfasst worden. Unter Verwendung des QPER ist ein Funksystem getestet worden, auffällige Unterschiede zu dem Testaufbau und der Testdurchführung ohne Kanalemulator wurden genannt.

In den Begrenzungen, die in dieser Arbeit festgestellt wurden, lässt sich der QPER im Versuchsaufbau zur Performancebewertung von industriellen Funksystemen einsetzen und ermöglicht Messungen an Funkgeräten, deren Kennwerte innerhalb dieser Grenzen liegen.

Der Labormessplatz lässt die Erweiterung um Messgeräte, die direkt an den Kanalemulator angeschlossen werden können und in dieser Arbeit nicht genannt wurden, zu. Dadurch können zusätzliche Merkmale, die in dieser Arbeit nicht behandelt wurden, bewertet werden.

IX. Quellenverzeichnis

- [1] Meier, U.; Rauchhaupt, L.: Bewertung industrieller Funklösungen - Standardtests und Performance-Klassen. atp edition - Automatisierungstechnische Praxis 55(9):44-56, 2013.
- [2] Rauchhaupt, L.; Meier, U.; Neufeld, P.; Schimschar, A.: Forschungsbericht 29/2012: Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS). Mitarbeit am Forschungsbericht, Frankfurt, DFAM, 2012, ISBN 978-3-8163-0629-0.
- [3] U. S. Jürgen Detlefsen, Grundlagen der Hochfrequenztechnik, Oldenbourg Verlag, ISBN 3-486-57866-9, 2009.
- [4] M. D. Yacoub, Foundations of Mobile Radio Engineering, CRC Press, ISBN 0849386772, 1993.
- [5] H.-J. W. Volker Jung, Handbuch für die Telekommunikation, Springer-Verlag, ISBN 3642554504, 2013.
- [6] B. Walke, Mobilfunknetze und ihre Protokolle 1, Springer-Verlag, ISBN 3663059081, 2013.
- [7] ETSI TS 103 060 (V1.1.1) (all parts): " Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Method for a harmonized definition of Duty Cycle Template (DCT) transmission as a passive mitigation technique used by short range devices and related conformance test methods "
- [8] T. Schröder, „Analyse und Redesign-Vorschläge für den Qosmotec Air Interface Simulator,“ 01 2013. DVD.
- [9] Qosmotec, „QPER_UserGuide,“ DVD, 2010, UG-2009-038-R6.2.5
- [10] Phoenix Contact Datenblatt, Art.-Nr. 104835: DB DE RAD-2400-IFS, Stand 04.02.2016
- [11] K. W. Bonfig, Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung, expert Verlag, ISBN 9783816914273, 1996.
- [12] IEEE, „IEEE Standard 802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks,“ 2012..
- [13] J. Bogdan M. Wilamowski, Industrial Communication Systems, CRC Press, ISBN 1439802823, 2011.

X. Anlagenverzeichnis

DVD mit Messwerten und einzelnen Quellen