

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

Bachelorarbeit

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

**Thema: Untersuchung von Funksystemen aus Sicht industrieller
Automatisierungsanwendungen**

Eingereicht von: Antonio Ashok Wodcke

Angefertigt für: Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg

Matrikel: E 2018

Ausgabetermin: 19.01.2022

Abgabetermin: 30.03.2022

Schulischer Betreuer: Herr Dr. techn. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr. Dipl.-Ing. (FH) André Gnad

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich sie zuvor an keiner anderen Hochschule und in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung eingereicht habe und dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Ziel und Bedeutung der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	1
1.4 WLAN im Short-Range-Device-Band.....	2
1.5 Theoretische Betrachtung der Einflüsse	3
1.5.1 Dämpfung.....	4
1.5.2 Reflexion	5
1.5.3 Streuung.....	5
1.5.4 Interferenz	5
1.5.5 Abschattung	6
1.5.6 Doppler-Verschiebung	6
1.5.7 Fading	7
2 Testkonzept	8
2.1 Einführung	8
2.2 Kenngrößen	8
2.2.1 Übertragungszeit.....	8
2.2.2 Aktualisierungszeit	9
2.2.3 Fehler- und Verlustraten	10
2.3 Modell des Testaufbaus	11
3 Systemarchitektur.....	13
3.1 Überblick über den gesamten Testaufbau	13
3.2 Komponenten des Fahrsystems	14
3.2.1 Fahrerloses Transportfahrzeug.....	14
3.2.2 Fahrzeugsteuerung	14
3.3 Komponenten des Funknetzwerks.....	16
3.4 Komponenten des Testsystems.....	17
3.4.1 FTT Manager	17
3.4.2 Multiface	17
3.4.3 Zeitsynchronisation	18
3.4.4 Kommunikation zwischen den Komponenten	19
4 Testdurchführung	21
4.1 Testumgebung	21
4.2 Testfälle.....	23
4.2.1 Statische Messungen.....	24
4.2.2 Messungen bei Bewegung des FTF	24
5 Messergebnisse und deren Bewertung.....	26
5.1 Messung der Kommunikation im Funkspektrum.....	26
5.2 Vergleich mit Messungen in den WLAN-Bändern	27
5.3 Vergleich zwischen statischer Messung und Messung bei Bewegung	31

5.4	Vergleich zwischen Hauptstrecke und Umleitung bei Nachrichtenlänge 60 Byte	36
5.4.1	Hauptstrecke	37
5.4.2	Umleitung	41
5.5	Messung mit Reflexionsflächen	43
6	Fazit und Ausblick	48
7	Nachwort	49
	Literaturverzeichnis	VI
	Anhang	VIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Übersicht der Nutzung vom Short-Range-Device-Band [2]	2
Abbildung 1.2:	5 GHz Kanäle [2]	3
Abbildung 1.3:	Streckenverlust in Abhängigkeit von der Entfernung für unterschiedliche Frequenzen der Welle [6]	4
Abbildung 1.4:	Kanaldämpfung im Bereich von 5,7 GHz bis 5,9 GHz	8
Abbildung 2.1:	Definition der Übertragungszeit [4]	9
Abbildung 2.2:	Definition der Aktualisierungszeit [4]	10
Abbildung 2.3:	Abstraktion des Betrachtungsraums [11]	11
Abbildung 2.4:	Architektur des Funk Transfer Testers [12]	12
Abbildung 3.1:	Hardware-Ansicht	13
Abbildung 3.2:	Fahrerloses Transportfahrzeug	14
Abbildung 3.3:	Systemarchitektur zur Steuerung des FTF	15
Abbildung 3.4:	Softwareelemente zur Steuerung des FTF	15
Abbildung 3.5:	Erstellte Beispielstrecke im Trackeditor [14]	16
Abbildung 3.6:	Client Funknetzwerk	16
Abbildung 3.7:	Access-Point Funknetzwerk mit Multiface	17
Abbildung 3.8:	Multiface auf dem FTF	18
Abbildung 3.9:	Architekturbild der Zeitsynchronisation	18
Abbildung 3.10:	Montage der SyncBox auf dem FTF	19
Abbildung 3.11:	Position des Access-Point Testnetzwerk [17]	20
Abbildung 3.12:	Access-Point Testnetzwerk	20
Abbildung 3.13:	Client Testnetzwerk	21
Abbildung 4.1:	Halle mit Messpositionen für statische Messungen [17]	22
Abbildung 4.2:	Hauptstrecke [17]	22
Abbildung 4.3:	Fahrstrecke mit Umleitung [20]	23
Abbildung 4.4:	Aufbau der Testspezifikation	23

Abbildung 4.5: Spezifikation für statischen Test	24
Abbildung 4.6: Spezifikation für Test mit Bewegung	25
Abbildung 4.7: Unterteilung der Messungen mit den Reflexionsflächen	26
Abbildung 5.1: Spektrum des SRD-Bandes während der Kommunikation	27
Abbildung 5.2: Vergleich der Übertragungs- und Aktualisierungszeiten	28
Abbildung 5.3: Vergleich der Übertragungszeiten	29
Abbildung 5.4: Vergleich der Aktualisierungszeiten	30
Abbildung 5.5: Sprung während der Messung	32
Abbildung 5.6: Statische Messungen mit Nachrichtenlänge 60 Byte	31
Abbildung 5.7: Statische Messungen mit maximaler Nachrichtenlänge	34
Abbildung 5.8: Statische Messungen Position1 Vergleich	36
Abbildung 5.9: Erster Burst in der CSV-Datei	37
Abbildung 5.10: Weiterer Burst	38
Abbildung 5.11: 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink Transmission Time	39
Abbildung 5.12: 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink Update Time	40
Abbildung 5.13: 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink Transmission Time	41
Abbildung 5.14: 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink Update Time	42
Abbildung 5.15: Reflexionsflächen links neben der Startposition [17]	43
Abbildung 5.16: Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen links	44
Abbildung 5.17: Reflexionsflächen rechts neben der Startposition [17]	45
Abbildung 5.18: Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen rechts	46
Abbildung 5.19: Reflexionsflächen auf beiden Seiten neben der Startposition [17]	47
Abbildung 5.20: Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen auf beiden Seiten	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Short-Range-Device-Band [1]	3
Tabelle 2: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink mit speed200	28
Tabelle 3: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink speed200	29
Tabelle 4: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink mit speed200	30
Tabelle 5: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink mit speed200	31
Tabelle 6: Statistische Werte für Statische Messungen mit Nachrichtenlänge 60 Byte	32
Tabelle 7: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Statische Messungen mit Nachrichtenlänge 60 Byte	33
Tabelle 8: Statistische Werte für Statische Messungen mit maximaler Nachrichtenlänge	34
Tabelle 9: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Statische Messungen mit maximaler Nachrichtenlänge	35

Tabelle 10: Statistische Werte für Statische Messungen Position1 Vergleich	36
Tabelle 11: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Statische Messungen Position1 Vergleich	36
Tabelle 12: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink	40
Tabelle 13: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink	41
Tabelle 14: Statistische Werte für 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink	42
Tabelle 15: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink	43
Tabelle 16: Statistische Werte für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen links	44
Tabelle 17: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen links	45
Tabelle 18: Statistische Werte für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen rechts	46
Tabelle 19: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen rechts	46
Tabelle 20: Statistische Werte für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen auf beiden Seiten	48
Tabelle 21: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen auf beiden Seiten	48

Abkürzungsverzeichnis

CSV	Comma Separated Value
FCC	Federal Communications Commision
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTT	Funk-Transfer-Tester
GNSS	Global Navigation Satellite System
MER	Messa Error Rate
MLR	Message Loss Rate
MIMO	Multiple Input Multiple Output
SRD	Short Rang Device
SUT	System Under Test
TT Min	Transmission Time Minimum
TT Mod	Transmission Time Modal
TT P95	Transmission Time Percent 95
UT Mean	Update Time Mean
UT Min	Update Time Minimum
UT SD	Update Time Standard Difference

Symbolverzeichnis

lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
c	Lichtgeschwindigkeit	mm/s
d	Durchmesser	m
f	Frequenz	Hz
f_{clock}	Synchronisationsfrequenz	Hz
f_D	Frequenzverschiebung	Hz
G_T	Gewinn der Sendeantenne	W
G_R	Gewinn der Empfangsantenne	W
G_{TdB}	Gewinn der Sendeantenne	dB
G_{RdB}	Gewinn der Empfangsantenne	dB
l	Länge	m
L_P	Freiraumdämpfung	W
L_{PdB}	Freiraumdämpfung	
MER	Nachrichtenverlustquote	keine Einheit
MLR	Nachrichtenverlustquote	keine Einheit
N_{FX}	Anzahl der inkorrekt empfangenen Nachrichten	keine Einheit
N_{LM}	Anzahl der verlorenen Nachrichten	keine Einheit
N_{TX}	Gesamtzahl der gesendeten Nachrichten	keine Einheit
P_T	Gesendete Leistung	W
P_R	Empfangene Leistung	W
r	Radius	m
t	Zeit	s
T_{clock}	Synchronisationsperiode	s
TI	Zykluszeit	s
TT	Übertragungszeit	s
TT_{Fehler}	maximal zulässige Übertragungszeit	s
U	Umfang	m
v	Geschwindigkeit	m/s

griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
Δ	Unterschied	
θ	Winkel	Grad
λ	Wellenlänge	m
φ	Phasenverschiebung	Grad

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Funkkommunikationsanwendungen in industriellen Umgebungen werden, neben vielen anderen Faktoren, auch durch die Bewegung von Funkgeräten beeinflusst. Zur gezielten Untersuchung dieser Einflüsse ist eine Testplattform zu entwickeln. Die Testplattform soll ein Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) beinhalten, auf dem Funkgeräte montiert werden können. Das FTF ist in den Funk-Transfer-Tester (FTT) zu integrieren, so dass die Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens der Funkkommunikation rechnergestützt geplant, durchgeführt und ausgewertet werden kann.

Im Einzelnen sind folgende Arbeiten durchzuführen:

- Spezifikation eines Fahrkurses für den FTF im Galileo-Testfeld Sachsen-Anhalt
- Implementierung verschiedener Fahrscenarien
- Erarbeitung eines Konzeptes zur Verbindung von FTF und FTT
- Spezifikation einer Testreihe bezogen auch die Einflussgröße "Bewegung"
- Durchführung exemplarischer Untersuchungen der Testreihe an einem WLAN-System

Wesentliche Arbeitsschritte, Ergebnisse und Empfehlungen sind zu dokumentieren.

1.2 Ziel und Bedeutung der Arbeit

Diese Arbeit soll zeigen, ob die Funkkommunikation im Short-Range-Device-Band (SRD-Band) für industrielle Automatisierungsanwendungen geeignet ist. Anlass dieser Untersuchungen ist der hohe Grad der Auslastung der bisher genutzten ISM- und für WLAN reservierten Bänder im Einsatzbereich der Industrie.

Das Ziel dieser Arbeit ist herauszufinden, ob die Bewegung Einfluss auf die auf die funkgestützte Kommunikation der Anwendungen hat und ob das SRD-Band von 5,725 GHz bis 5,850 GHz für die Funkkommunikation eine gute Alternative zu dem üblicherweise genutzten WLAN Kanälen im 5 GHz-Band ist. Hierzu werden Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse analysiert und bewertet werden. Aufgabe der Arbeit war es Messungen des Zeit- und Fehlerverhaltens aus Sicht der industriellen Anwendung durchzuführen. Die Untersuchung einzelner Effekte, die die Funkübertragung direkt beeinflussen, stand nicht im Fokus dieser Arbeit und hätten auch den zeitlichen Rahmen gesprengt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel wird das Thema eingeführt, die theoretische Betrachtung der Einflüsse und der Aufbau der Arbeit erklärt.

Das zweite Kapitel befasst sich mit dem Testkonzept. Darunter fallen die Kenngrößen Übertragungszeit, Aktualisierungszeit sowie die Fehler- und Verlustraten. Zudem wird auch das Modell des Testaufbaus näher betrachtet.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit der Systemarchitektur. Diese wird unterteilt in das Fahrsystem, das zu untersuchende Funksystem im 5 GHz-Band (Funknetzwerk) und das Funksystem zum Betrieb der Messungen (Testnetzwerk). Des Weiteren wird sich mit den jeweiligen Komponenten der Systeme, der Zeitsynchronisation und der Kommunikation zwischen den Komponenten beschäftigt.

Nachdem die Systemarchitektur beschrieben wurde, wird in Kapitel 4 auf die Testdurchführung eingegangen. In diesem Kapitel werden die Testumgebung, die verschiedenen Testfälle und die Hardware-Ansicht des Messsystems beschrieben.

Danach wird in Kapitel 5 auf Messergebnisse und deren Bewertung eingegangen. Dafür werden zwei Vergleiche gezogen. Als erstes erfolgt ein Vergleich zwischen den Messergebnissen, vom SRD-Band und dem

regulären genutzten 5 GHz-Band. Zweitens vergleicht man die Messergebnisse der statischen Messungen mit den Messungen der Bewegung.

In Kapitel 6 wird der gesamte Versuch abschließend betrachtet.

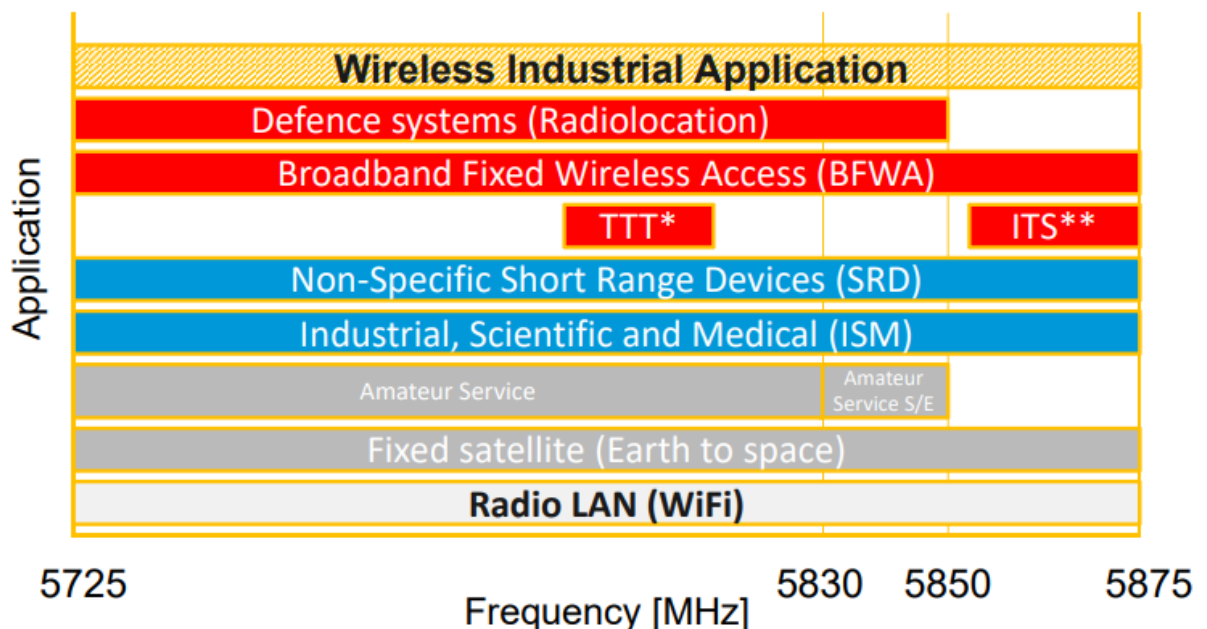
Das siebte Kapitel beinhaltet das Nachwort. Und der Anhang beinhaltet weiterführende Informationen, wie z. B. Bilder der Testumgebung, weitere Messergebnisse und die Prüfung zur Genauigkeit der Synchronisation.

1.4 WLAN im Short-Range-Device-Band

Die Produktionsumgebungen von Heute haben das Problem, das oftmals die für WLAN vorgegebenen Frequenzbänder schon für andere Zwecke genutzt wurden, z. B. im Büro. Deshalb wird nach Ausweichmöglichkeiten gesucht.

Eine mögliche Alternative, um diesem Problem entgegenzuwirken, ist das SRD-Band. Dieses Band ist für Geräte mit geringer Reichweite, die eine Kommunikation in einer Richtung oder in beiden Richtungen ermöglicht und mit niedriger Sendeleistung über eine kurze Entfernung empfängt oder sendet, vorgesehen. [1]

In Abbildung 1.1 sind die verschiedenen Anwendungen innerhalb des Frequenzbereiches dieses SRD-Bandes abgebildet.



* Transport & Traffic Telematics; ** Intelligent Transport Systems

Abbildung 1.1: Übersicht der Nutzung vom Short-Range-Device-Band [2]

Die Kompatibilität zu den anderen Funkanwendungen wurde im ECC Report 206 [3] nachgewiesen.

In der folgenden Abbildung sind die zugelassenen 5 GHz Kanäle in Deutschland dargestellt [4]. Da die Abbildung nicht den aktuellen Stand wiedergibt, sind die Kanäle des SRD-Bandes als vorgeschlagene neue Kanäle abgebildet. Diese Kanäle sind aber mittlerweile für die Nutzung von WLAN mit eingeschränkter Sendeleistung zugelassen. [1]

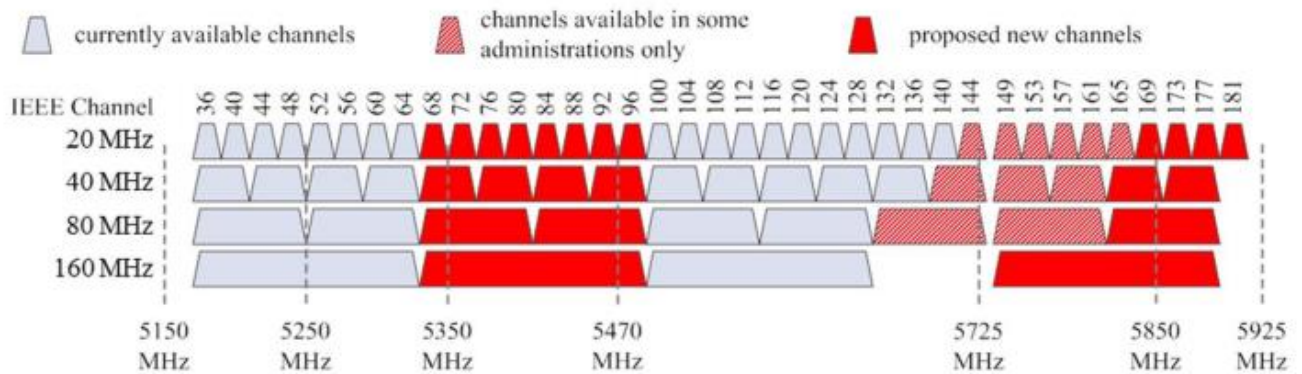


Abbildung 1.2: 5 GHz Kanäle [2]

Die folgende Tabelle zeigt den adressierten Frequenzbereich, der für Short Range Devices zugelassen ist. Die maximale äquivalente Strahlungsleistung beträgt 25 mW bzw. 14 dbm. Die Leistung ist begrenzt, damit Geräte, die mit dem regulären 5 GHz-Band funken, nicht beeinträchtigt werden. [1] [4]

Frequenzzugangs- und Störminderungstechniken müssen nicht angewendet werden, was für ein deterministisches Zeitverhalten der Kommunikation ein Vorteil gegenüber den für WLAN reservierten Frequenzen darstellt.

Frequenzbereich in GHz	Maximale äquivalente Strahlungsleistung/ Maximale spektrale Leistungsdichte (EIRP)	Zusätzliche Parameter / Frequenzzugangs- und Störminderungstechniken	Sonstige Nutzungsbestimmungen
5,725 - 5,875	25 mW		

Tabelle 1: Short-Range-Device-Band [1]

1.5 Theoretische Betrachtung der Einflüsse

Das FTF ist ein bewegliches Objekt und deshalb wirken sich verschiedene Einflüsse auf die Funkkommunikation aus, z.B. in einer großen Halle, wo sich mehrere Funkzellen eines Netzwerks befinden. Nun bewegt sich das Objekt und erreicht den Bereich, indem sich die Funkquellen der Zellen überlagern. Wenn nun die empfangene Leistung von der einen Zelle zu schwach ist, wird in die nächste Zelle gewechselt. Durch den Zellwechsel wird insbesondere, dass Zeitverhalten der Kommunikation der Anwendungen beeinflusst. [5]

Die Umgebungseinflüsse lassen sich in aktiv und passiv aufteilen. Aktive Umgebungseinflüsse sind Sender von elektromagnetischen Wellen in der Nähe des Funkkommunikationssystems. Dies können unter anderem Funkkommunikationssysteme sein, die im selben Frequenzbereich arbeiten. Andere Einflüsse haben auch Geräte, die Hochfrequenzstrahlung zum Trocknen oder Schweißen benutzen. Weitere Anwendungen sind Frequenzrichter, Funkenerodiermaschinen und elektrischen Antriebe. Allerdings sind diese Einflüsse verstärkt im Frequenzbereich kleiner als 1 GHz messbar und für den 5 GHz-Bereich nicht so relevant. [5]

Durch Gegenstände, Wände oder Personen werden passive Umgebungseinflüsse hervorgerufen. Dieser Fall tritt z. B. im Inneren eines Gebäudes auf, wenn keine Sichtverbindung zwischen den Antennen von Sender und Empfänger besteht. [5]

Bei bestehender Sichtverbindung (Line of Sight), d.h. in diesem Fall ist kein Hindernis zwischen Sender und Empfänger, breitet sich die vom Sender ausgestrahlte Welle nur auf einem Weg innerhalb der Funkstrecke aus. Aber befindet sich nun ein Hindernis zwischen den beiden Elementen, so besteht keine Sichtverbindung (Non-Line of Sight). Aber Funkanwendungen können dies tolerieren. Denn dies führt zu physikalischen Effekten wie Reflexion, Beugung und Brechung. Durch diese physikalischen Effekte entsteht ein Mehrwegeempfang, der zu einer Beeinträchtigung der Signalqualität führt. Aber durch neue Übertragungsverfahren mit Mehrantennen-

systemen (MIMO) wird aus der Mehrwegeausbreitung eines Signals, ein Vorteil gezogen. Denn durch die Nutzung dieser Systeme wird eine Erhöhung der Datenrate oder der Reichweite erzielt. [5]

Breitet sich das Signal über mehrere Wege mit unterschiedlichen Längen aus, so resultieren daraus unterschiedliche Laufzeiten. Dadurch kann das resultierende Empfangssignal entscheidend verzerrt sein. Außerdem kommen oft auch zeitabhängige Effekte bei solchen Funkkanälen dazu. Zum Beispiel, wenn Personen die Sichtlinie zwischen Sende- und Empfangsantenne kreuzen. [5]

Durch passive Einflüsse werden die folgenden Effekte verursacht:

1.5.1 Dämpfung

Einleitung

Verschiedene Größen haben Einfluss auf die Funkverbindung. Die Dämpfung der Atmosphäre hat auf Frequenzen im unteren GHz-Band einen geringen Einfluss. Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit entfallen die Einflüsse der Regendämpfung und der Durchgangsdämpfung, da die Kommunikation zwischen dem Access-Point und dem Client innerhalb einer Testhalle ohne getrennte Räume stattfindet. Da die Freiraumdämpfung immer einen Einfluss auf die Funkübertragung hat wird diese im folgenden Abschnitt näher beleuchtet. [6]

Freiraumdämpfung

Der Pfadverlust beschreibt den in einem Funkkanal auftretenden Verlust an Leistung. Dieser Verlust ist das Verhältnis von gesendeter zu empfangener Leistung. Mit der Formel $\lambda = c/f$ ergibt sich:

$$L_P = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi}{c}\right)^2 * \frac{f^2 d^2}{G_T G_R} \quad (1)$$

Das Ergebnis der Gleichung (1) ist die Freiraumdämpfung. Die Voraussetzung für diese Größe ist, dass sich keine Hindernisse miteingeschlossen der Erdboden im Weg befinden. Das Funksignal darf durch nichts in irgendeiner Art und Weise gestört oder beeinträchtigt werden. [6]

Aus der Formel zur Freiraumdämpfung wird ersichtlich, dass der Streckenverlust quadratisch mit der Entfernung ansteigt. Die gesendete Leistung verteilt auf einer mit der Entfernung quadratisch ansteigenden Fläche. Aber auch der Streckenverlust steigt mit der Frequenz quadratisch. In Abbildung 1.3 ist der Streckenverlust für Frequenzen dargestellt. [6]

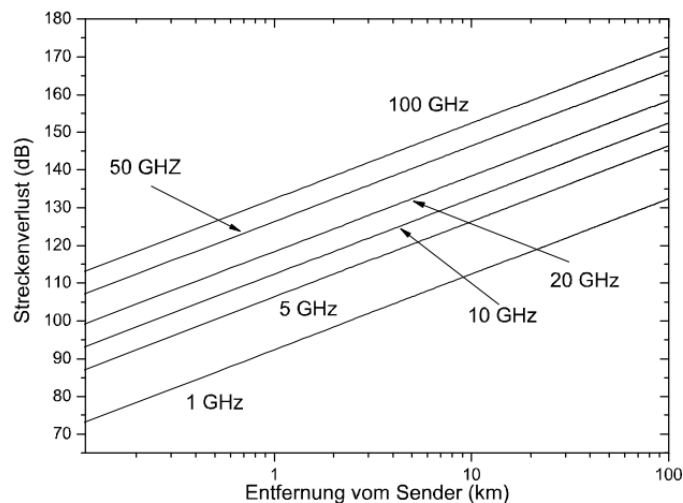


Abbildung 1.3: Streckenverlust in Abhängigkeit von der Entfernung für unterschiedliche Frequenzen der Welle [6]

In der folgenden Formel werden die Größen logarithmiert, um die Freiraumdämpfung in dB anzugeben:

$$10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) = 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right) + 20 \log f + 20 \log d - G_{TdB} - G_{RdB} \quad (1)$$

G_{TdB} und G_{RdB} stellen die Antennengewinne von Sende- und Empfangsantenne in dB dar. Setzt man die Frequenz f in MHz und die Entfernung d in km ein, so ergibt sich die folgende vereinfachte Formel:

$$L_{PdB} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d - G_{TdB} - G_{RdB} \quad (2)$$

1.5.2 Reflexion

Wenn eine Welle unter einem Winkel auf eine Grenzfläche zweier Materialien, deren Brechungsindex sich voneinander unterscheidet, trifft, so wird in den meisten Fällen die Welle unter dem Winkel reflektiert. Die Winkel der reflektierten und der einfallenden Welle sind gleich. Doch die Größe der Amplitude hängt vom Anteil der hinein gebrochenen Welle ab. Die Reflexion führt in der drahtlosen Kommunikation bzw. Funktechnik zu weiteren Kopien des drahtlosen Signals, die zum Empfänger gelangen. Das Signal-zu-Rauschverhältnis kann sich durch die Kopien aufgrund von Interferenz verschlechtern. [6]

Reflexionen können durch eine geschickte Signalverarbeitung die z. B. bei MIMO-Systemen angewandt wird, aber auch zu einer Vergrößerung der Übertragungskapazität des Funkkanals führen. Innerhalb einer Funkzelle tritt Reflexion auf, wenn sich die Wellen in der Luft ausbreiten und auf ein Hindernis mit größeren Abmessungen als die der Welle sowie einer ebenen Oberfläche stoßen (z. B. Häuserfassaden). [6]

In den meisten Fällen kommt es zu Reflexionen der Welle an der Erdoberfläche, obwohl sich kein Hindernis im Ausbreitungsweg zwischen Sender und Empfänger befindet. Der Grund ist die relative große Entfernung zwischen Sender und Empfänger und dass die Höhe des Empfängers mit ein bis zwei Meter relativ gering ist. [6]

1.5.3 Streuung

Die vorher beschriebene Reflexion tritt nur bei einer ideal ebenen Grenzfläche zwischen den Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes auf. In den meisten Fällen trifft dies nicht zu. [6]

Zum Beispiel trifft eine elektromagnetische Welle auf eine nicht vollständig glatte Oberfläche. Es besteht ein Unterschied zwischen den Brechungsindizes des ersten und zweiten Mediums. Durch diesen Unterschied wird an der Grenzfläche ein Teil der Wellenamplitude zurückgeworfen. Die einfallende Welle hat eine ebene Wellenfront. Trifft ein Teil der Wellenfront auf Erhebungen der Oberfläche wird dieser Teil eher gestreut. [6]

Ein Teil der Wellenfront tritt auf Erhebungen der Oberfläche und wird eher gestreut als der Teil, der von den Tälern der Oberfläche zurückgeworfen wird. Die einfallende Welle regt in der Oberfläche Dipole zu Schwingungen an. Diese Dipole schwingen mit derselben Frequenz wie die einfallende Welle. Ein schwingender Dipol ist seinerseits wieder Quelle einer elektromagnetischen Welle, die er mit der für einen Dipol typischen Strahlungscharakteristik, in den Raum abstrahlt. Die einzelnen Dipole werden durch die einfallende Wellenfront zu unterschiedlichen Zeiten angeregt und schwingen daher mit unterschiedlichen Phasenlagen. [6]

1.5.4 Interferenz

„Der Begriff Interferenz beschreibt einfach die Überlagerung zweier Wellen. Haben diese dieselbe Frequenz und Amplitude so hängt das Ergebnis der Überlagerung von der Phasenbeziehung der beiden Wellen zueinander ab. Haben die Wellenzahlvektoren beispielsweise einen Winkel zueinander, so findet man innerhalb der Überlagerung Orte an denen sich beide Wellen verstärken und andere an denen sie sich gegenseitig auslöschen. Im Mobilfunk gibt es meist keine direkte Sichtverbindung zwischen dem Sender und dem mobilen Teilnehmer. In Stadtgebieten überragt die Antenne der Basisstation meist die sie umgebenden Gebäude und

der Teilnehmer befindet sich beispielsweise in einer Straßenschlucht. Ein Teil des Signals wird dann über das Dach eines Gebäudes gebeugt, während ein anderer an einer Hausfassade reflektiert wird, ein dritter erreicht erst nach der Reflexion an der Straße den Teilnehmer usw. Das Signal breitet sich demnach auf mehreren Wegen zum Empfänger aus, die einzelnen Signalanteile werden dementsprechend Mehrwegekomponenten genannt. Am Ort des Empfängers überlagern sich die einzelnen Komponenten. Ob es nun zu einer Verstärkung oder gegenseitigen Auslöschung kommt hängt von der Phasenbeziehung der Komponenten zueinander ab. Diese verändert sich aber sowohl zeitlich als auch örtlich. Bei einem UMTS-Signal mit einer Frequenz von 2 GHz ergibt sich beispielsweise eine Wellenlänge von 15 cm. Demnach kann hier schon ein Ortswechsel von wenigen Zentimetern eine extrem starke Signaländerung ergeben.“ [6]

1.5.5 Abschattung

Die empfangene Leistung in bebauten Gebieten oder einer Halle mit verschiedenen darin enthaltenen Objekten, hängt besonders vom konkreten Standpunkt des Empfängers ab und nicht nur von der Entfernung zum Sender. Existiert keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger wirken diese Objekte dämpfend oder reflektierend. Dieser Effekt wird in Anlehnung an sichtbares Licht mit dem Oberbegriff Abschattung bezeichnet. [6]

Das FTF fährt in einer Halle, in der sich Pfeiler, Stühle, Tische und viele weitere Gegenstände befinden. Dadurch besteht zwischen dem Access-Point und dem Client keine direkte Sichtverbindung. Mehrere der Hindernisse besitzen eine höhere Position als der Client und eine ähnliche Position wie der Access Point. Die physikalische Ausbreitung der Welle wird dadurch behindert. [6]

1.5.6 Doppler-Verschiebung

Die Doppler-Verschiebung entsteht durch die Bewegung des FTF im Bezug zum Access-Point. Aus dieser Bewegung, resultiert eine Frequenzänderung und somit eine zeitliche Änderung des Kanals. Das FTF bewegt sich von einem bestimmten Punkt z. B. A zu einem anderen Punkt z. B. B mit der Geschwindigkeit v . Erreicht eine Welle den Access-Point, so ist der Weg vom Punkt A um Δl länger als vom Punkt B. Durch diesen Längenunterschied ändert sich die Phase der Welle zwischen den beiden Punkten. [6]

Die Phasenänderung wird folgt berechnet:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta l}{\lambda} \quad (3)$$

Das FTF fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit v . Dadurch ergibt sich der Wegunterschied wie folgt:

$$\Delta l = d \cos \theta = v\Delta t \cos \theta \quad (4)$$

Mit der Formel zur Phasenänderung folgt für die Phasenverschiebung:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{v\Delta t}{\lambda} \cos \theta \quad (5)$$

Die Frequenz einer Welle ist die zeitliche Änderung ihrer Phase. Demnach ist die Frequenzänderung der Welle die durch die Bewegung des Mobiles hervorgerufen wird:

$$f_d = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (6)$$

Laut der Gleichung der Frequenzänderung tritt die größte Frequenzänderung für $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 180^\circ$ auf. Bei einem Winkel von 0° bewegt sich das FTF mit dem Client direkt auf den Access-Point zu. Aus der Formel folgt, dass die Frequenz der Welle um $f_d = v/\lambda$ größer wird. Wenn sich das FTF mit dem Client direkt vom Access-Point fortbewegt, so wird die Frequenz der Trägerwelle um $f_d = -v/\lambda$ kleiner. [6]

Im Folgenden wird der Einfluss der Doppler-Verschiebung untersucht:

Als erstes wird die Wellenlänge bestimmt:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300\,000\,000\text{ m/s}}{5,805\text{ GHz}} = 0,052\text{ m} \quad (7)$$

Danach wird für die beiden Extremfälle die Frequenzverschiebung ausgerechnet:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} * \cos \theta = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,052\text{ m}} * \cos(0^\circ) = 19,23\text{ Hz} \quad (8)$$

$$f_d = \frac{v}{\lambda} * \cos \theta = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,052\text{ m}} * \cos(180^\circ) = -19,23\text{ Hz} \quad (9)$$

Da der Versuch im GHz-Bereich stattfindet, hat die Doppler-Verschiebung keinen aussagekräftigen Einfluss.

1.5.7 Fading

Als Fading (Schwund) angegeben, sind Schwankungen der Empfangsfeldstärke bei Funkübertragungen, verursacht durch Reflexion, Streuung, Interferenz, Abschattung und der Doppler-Verschiebung. [7]

Dieser Effekt entsteht dadurch, dass das Funksignal die Empfangsantenne auf mehreren Wegen phasenverschoben erreicht. Die Phasenverschiebung entsteht durch Brechung oder Reflexion an der Ionosphäre oder terrestrischen Objekten (Gebäuden, Bergen usw.). Diese Art von Fading wird als Slow-Fading bezeichnet. [7]

Das Fast-Fading tritt frequenzabhängig auf. Die Ursachen sind der Mehrwegeempfang und der Doppler-Effekt. Bei Fast Fading treten Signaleinbrüche immer periodisch in den Abständen von $\lambda/2$ auf. Da die Wellenlänge frequenzabhängig ist, sind die Signaleinbrüche beim Fast Fading, fortwährend von der verwendeten Frequenz abhängig. [7]

In der folgenden Abbildung ist die Kanaldämpfung über den Frequenzmesspunkten dargestellt. Diese Messung wurde bereits im Vorfeld der Arbeit in der genutzten Testumgebung an einer Position durchgeführt. Diese Abbildung deckt den Bereich von 5,7 GHz bis 5,9 GHz ab, indem sich auch das SRD-Band befindet. In Abbildung 1.4 sind mehrere Signaleinbrüche über den Frequenzbereich verteilt. Diese Signaleinbrüche entstehen durch Fast-Fading, welches durch den Mehrwegeempfang in der Testumgebung auftaucht. Messungen des Funksignals waren nicht Bestandteil der Aufgabenstellung und wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

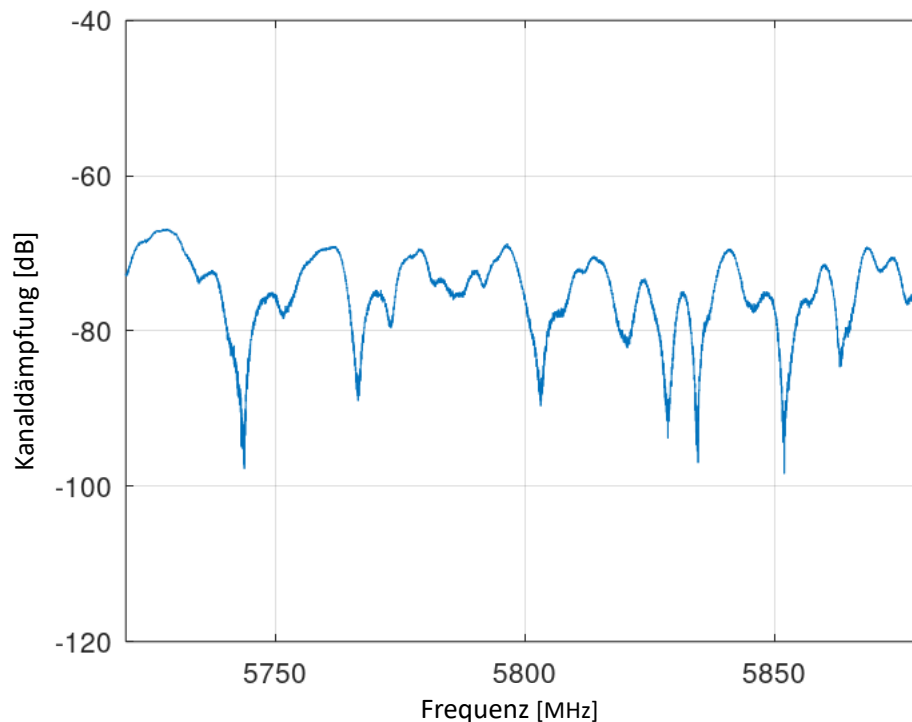


Abbildung 1.4: Kanaldämpfung im Bereich von 5,7 GHz bis 5,9 GHz

2 Testkonzept

2.1 Einführung

Da die Untersuchung der Einflüsse entsprechend der Aufgabenstellung aus Sicht der industriellen Automatisierungsanwendung erfolgen soll, ist zunächst zu klären, welche Kenngrößen hierfür relevant sind. Für diesen Einsatzbereich ist insbesondere das Zeit- und Fehlverhalten an der Schnittstelle zwischen Kommunikation und Anwendung von Interesse. Relevante Kenngrößen werden im Folgenden erläutert.

2.2 Kenngrößen

2.2.1 Übertragungszeit

„Die Übertragungszeit (Transmission Time) ist eine grundlegende Kenngröße, die zur Bewertung von Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit einer Funklösung herangezogen werden kann. Dabei ist von Interesse wie lange die Übertragung einer Nachricht von der Quelle (z. B. einem Sensor) bis zum Ziel (z. B. eine Steuerung) dauert. Ein einheitliches Verständnis dieser Zeitspanne erfordert die genaue Festlegung des Starts dieser Übertragung und deren Ende. Gemäß [8], [5] ist die Übertragungszeit der Zeitabschnitt von der Übergabe des ersten atomaren Bestandteils einer Nachricht, der Nutzdaten (Bit, Oktett), an der Schnittstelle zwischen Anwendung und Funkkommunikation eine Quelle und der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils derselben Nachricht an der Schnittstelle zwischen Funkkommunikation und Anwendung eines Ziels [Abbildung 2.1]. Die Art der Schnittstelle zwischen Funkkommunikation und Anwendung sowie deren Charakteristik ist bei der Veröffentlichung der Kenngrößenwerte immer mit anzugeben, da es keine einheitliche Bezugsschnittstelle gibt.“ [9]

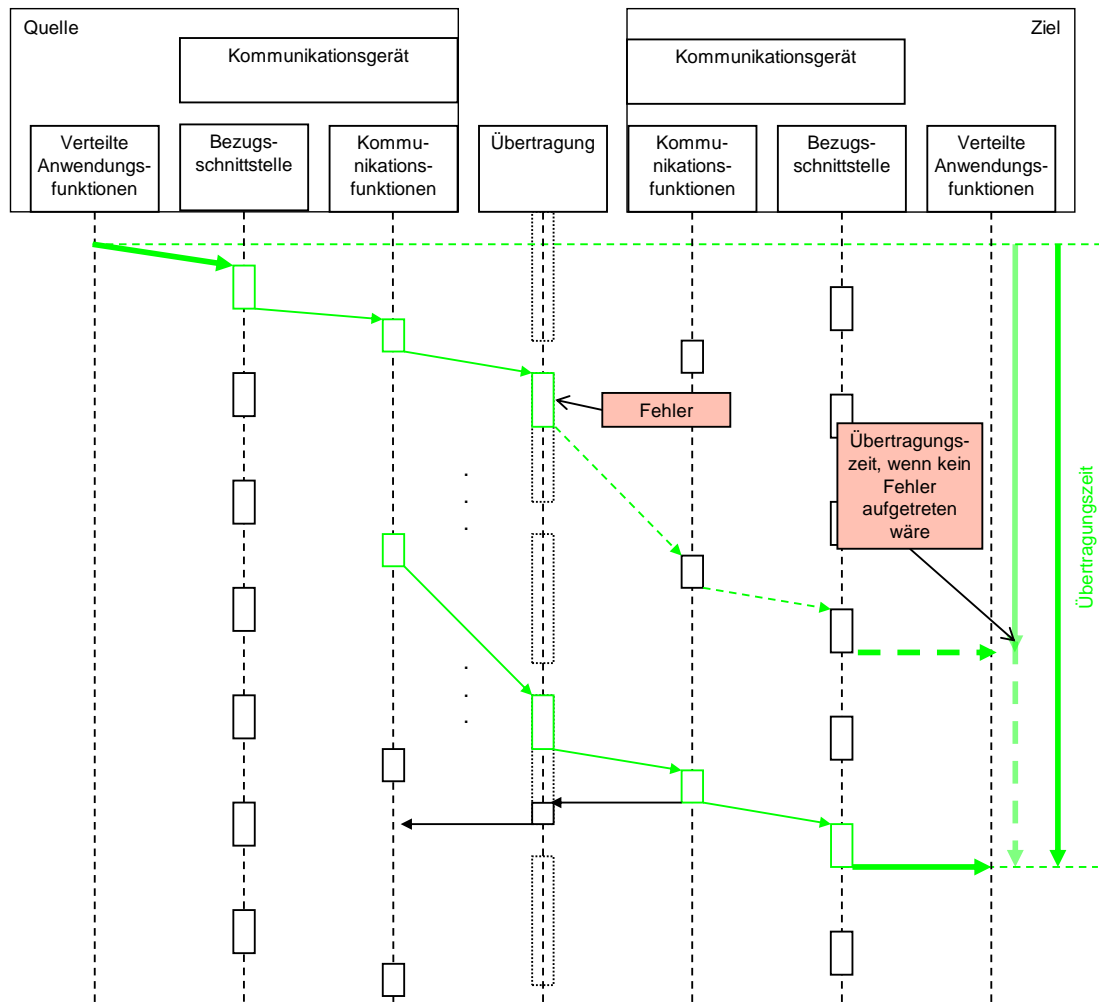


Abbildung 2.1: Definition der Übertragungszeit [4]

2.2.2 Aktualisierungszeit

„Die Aktualisierungszeit (Update time) entspricht im Idealfall dem Sendezeitabstand von Nachrichten einer logischen Verbindung. Das heißt, die übertragenen Nutzdaten einer Nachricht werden an der Bezugsschnittstelle des Ziels in denselben zeitlichen Abständen übernommen, wie sie an der Bezugsschnittstelle einer Quelle übergeben wurden. Die Aktualisierungszeit ist definiert als der Zeitabschnitt von der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der Nutzdaten einer Quelle an der Bezugsschnittstelle eines Ziels bis zur Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der unmittelbar nachfolgend übertragenen Nutzdaten der gleichen Quelle einer logischen Verbindung. In Abbildung 2.2 ist dargestellt, dass Information zum Teil nur zu bestimmten Zeiten bzw. in bestimmten Zeitintervallen weiter gegeben werden können. Daraus ergeben sich die Differenzen zwischen Sendezeitabstand und Aktualisierungszeit.“ [9]

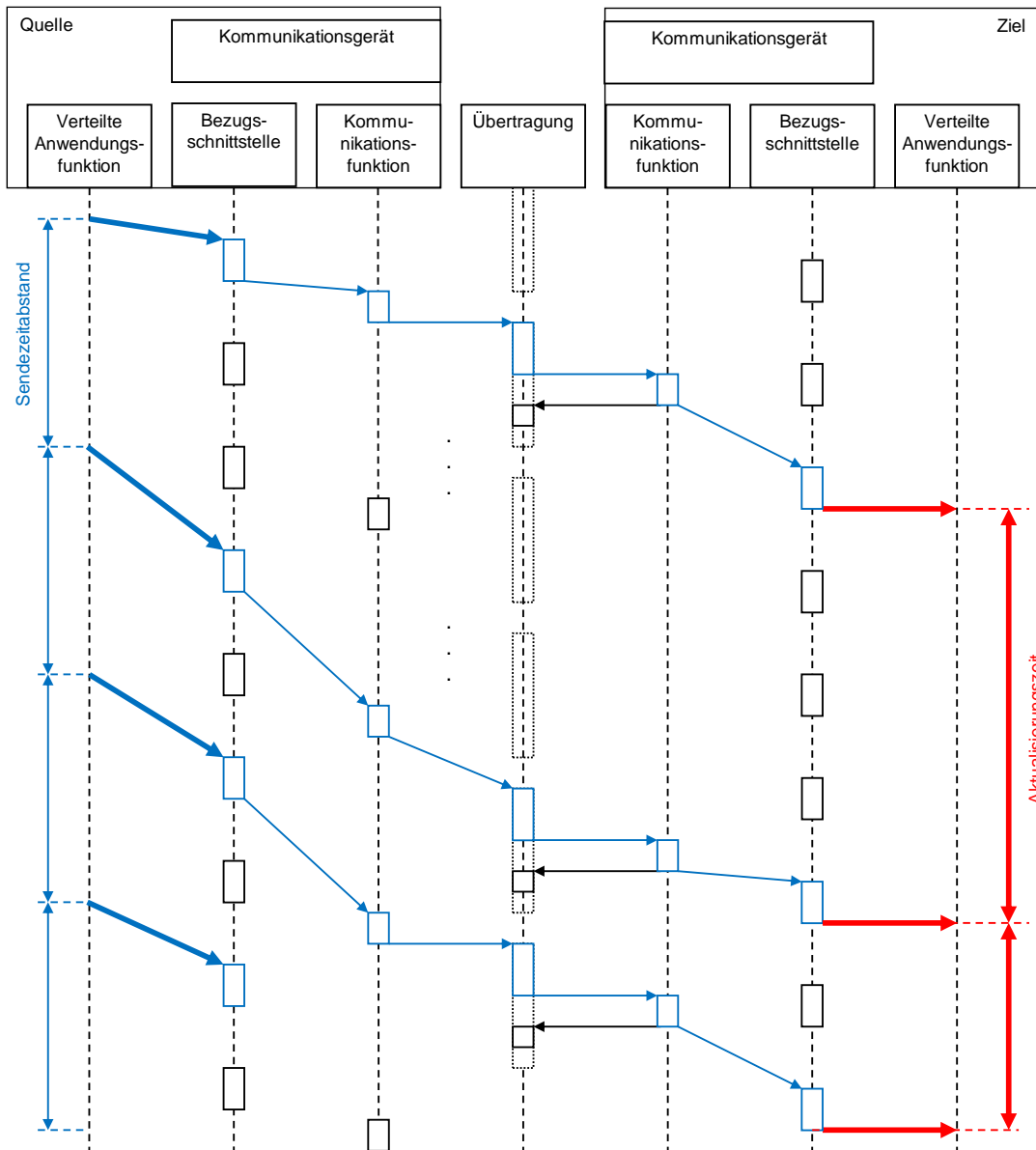


Abbildung 2.2: Definition der Aktualisierungszeit [4]

2.2.3 Fehler- und Verlustraten

„Die Nachrichtenfehlerquote (message error ratio: MER) ergibt sich aus dem Verhältnis der inkorrekt empfangenen Nachrichten N_{Fx} und den gesendeten Nachrichten N_{Tx} .

$$MER = \frac{N_{Fx}}{N_{Tx}} \quad (10)$$

Die Nachrichtenfehlerwahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die empfangene Nachricht, im Vergleich mit der entsprechenden gesendeten Nachricht, fehlerbehaftet und somit inkorrekt ist.

Die Nachrichtenverlustquote (Message Loss Rate - MLR) ist gemäß [10] IEV 371-08-07 das Verhältnis der Anzahl der verlorenen Nachrichten zur Gesamtzahl der gesendeten Nachrichten.“ [9]

$$MLR = \frac{N_{LM}}{N_{Tx}} \quad (11)$$

2.3 Modell des Testaufbaus

„Die Spezifikation der messtechnischen Performance-Bewertung soll ausgehend von einem Modell des Betrachtungsraumes räumlich verteilter industrieller Automatisierungsanwendungen mit drahtloser Kommunikation entwickelt werden.“

Abbildung 2.3 zeigt die wesentlichen Bestandteile des Betrachtungsraumes. Dargestellt ist eine industrielle Automatisierungsanwendung, zu der auch räumlich verteilte, ggf. mobile Anlagenbestandteile gehören. Diese räumlich verteilten Anlagenbestandteile beinhalten verteilte Automatisierungsfunktionen und Funkkommunikationsfunktionen, um miteinander kommunizieren zu können. Die Datenübertragung erfolgt über das Funkübertragungsmedium.“ [11]

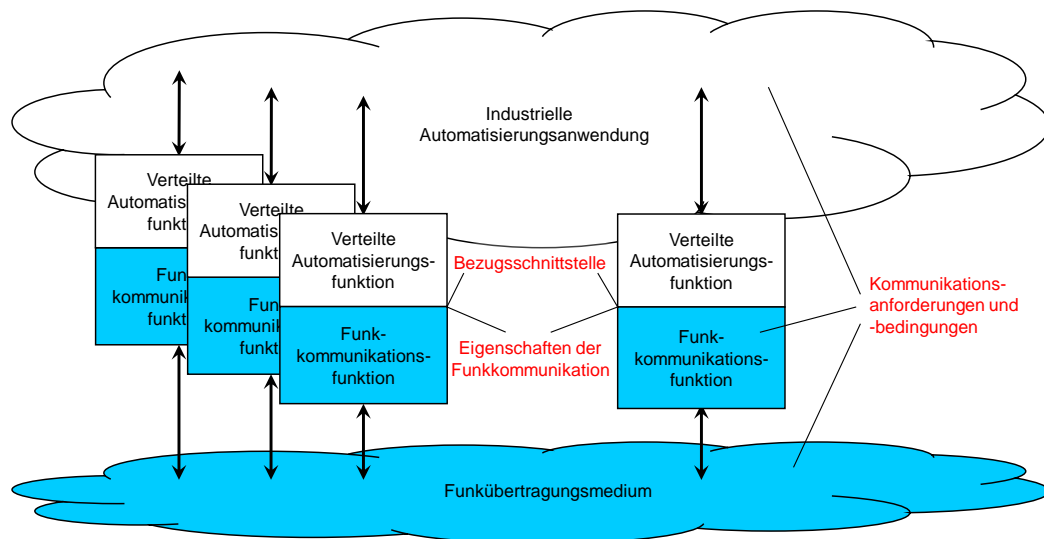


Abbildung 2.3: Abstraktion des Betrachtungsraums [11]

„Für die bestimmungsgemäße Funktion der Automatisierungsanwendung muss das Zeit- und Fehlerverhalten der Funkkommunikation Mindestanforderungen genügen. Diese Eigenschaften der Funkkommunikation sind für die Automatisierungsanwendung nur aussagekräftig, wenn sie sich auf die Schnittstelle zwischen Automatisierungsfunktion und Funkkommunikationsfunktion beziehen. Diese Schnittstelle wird als Bezugsschnittstelle bezeichnet. Das Zeit- und Fehlerverhalten der Funkkommunikation wird durch die Kommunikationsanforderungen der Anwendung, die Randbedingungen des Funkkommunikationssystems und die Übertragungsbedingungen beeinflusst.“ [11]

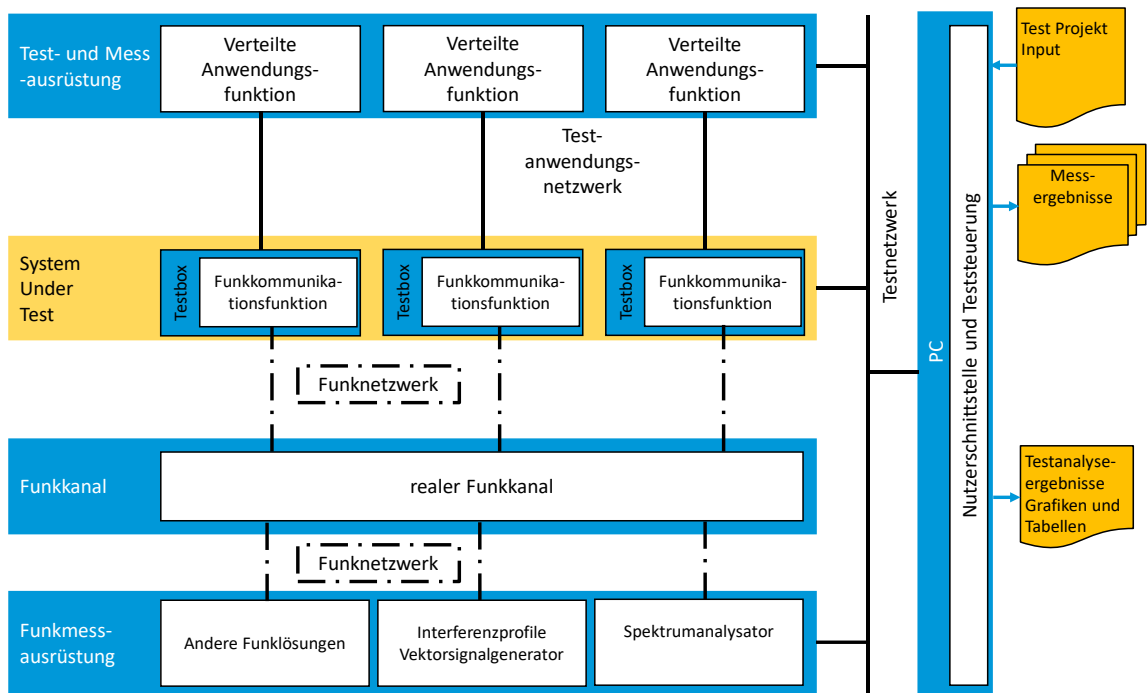


Abbildung 2.4: Architektur des Funk Transfer Testers [12]

Die verteilte Anwendungsfunktion hat die Eigenschaften, Nachrichten zu erzeugen und die Kenngrößen entsprechend der Testspezifikation zu messen. Um die Testanwendung zu realisieren, können ein oder mehrere Geräte erforderlich sein. [12]

Das System-Under-Test (SUT) wird aus Funkgeräten eines oder mehrerer Funkkommunikationssysteme gebildet. Diese Funkkommunikationssysteme können die gleiche oder andere Funktechnologien nutzen. [12]

Durch den Funkkanal werden die Eigenschaften der Funkübertragung beschrieben. [12]

Um passive und aktive Umgebungseinflüsse zu emulieren sowie die Funkausbreitung und Funkübertragung zu untersuchen, kann die Funkmessausrüstung verwendet werden. Diese umfasst z. B. ein Vektorsignalgenerator (für aktive Umgebungseinflüsse), ein Spektrumanalysator usw. [12]

Durch verschiedene Netzwerke werden die einzelnen Elemente der Architektur des Funk Transfer Testers miteinander verbunden. Diese verschiedenen Netzwerke werden im Folgenden erklärt:

Durch das Testnetzwerk werden alle Geräte des Testsystems miteinander verbunden. Es dient zu Parametrierung und zur Steuerung des Tests. Darüber hinaus werden die Testergebnisse über das Testnetzwerk übertragen. Das Testnetzwerk basiert i.d.R. auf Ethernet. [12]

Alle logischen Verbindungen, die zur Implementierung der verteilten Anwendungsfunktionen erforderlich sind, beinhaltet das Testanwendungsnetzwerk. Die relevanten logischen Verbindungen bilden eine Topologie der Testanwendung für jeden Testfall. Die Kommunikationsanforderungen werden definiert durch die anwendungsbezogenen Parameter einer logischen Verbindung. [12]

„Wenn zusätzlich zum SUT Testausrüstung verwendet wird, um Interferenzen zu erzeugen, bilden diese zusammen das Funknetzwerk. In den meisten Fällen beschreibt das Funknetz HF-Kabelverbindungen, die die Funkübertragung durch die Luft ersetzen. So können Umwelteinflüsse vermieden oder zielgerichtet eingespeist werden. Das Funknetzwerk verbindet in diesem Fall die Funkgeräte des SUT entsprechend einer

Funktechnologie. Geräte zur Emulation passiver und aktiver Umgebungseinflüsse können Teil des Funknetzwerks sein. Es ist zudem möglich Geräte zur Analyse des Mediums oder zum Protokollmonitoring hinzuzufügen.“ [12]

„Geräte, die das Verhalten der Anwendung realisieren oder zusätzliche Messgeräte erzeugen Messergebnisdateien, die Zeitmesswerte und nachrichtebezogene Messwerte enthalten. Außerdem können Funkmessgeräte zusätzliche Informationen über die Nutzung des Mediums liefern. Die Ergebnisse sind in erster Linie in CSV-Dateien oder ähnliche formatierte Textdateien gespeichert. Zur weiteren Verarbeitung sollten die Messergebnisdateien in das Fast Result Analysis and Display Tool (FRADT)-Dateiformat umgewandelt werden.

Basierend auf den Messergebnisdateien werden zur Testanalyseergebnisse relevante Grafiken und Tabellen generiert. Die Auswahl der relevanten Messergebnisdateien und die Konfiguration von Grafiken und Tabellen ist Teil der Testspezifikation. Grafiken werden im JPG- oder PNG-Format, Tabellen im CSV-Format gespeichert.“ [12]

3 Systemarchitektur

3.1 Überblick über den gesamten Testaufbau

In Abbildung 3.1 wird der gesamte Testaufbau gezeigt. Die meisten dieser Komponenten besitzen eine IP-Adresse, um miteinander kommunizieren zu können.

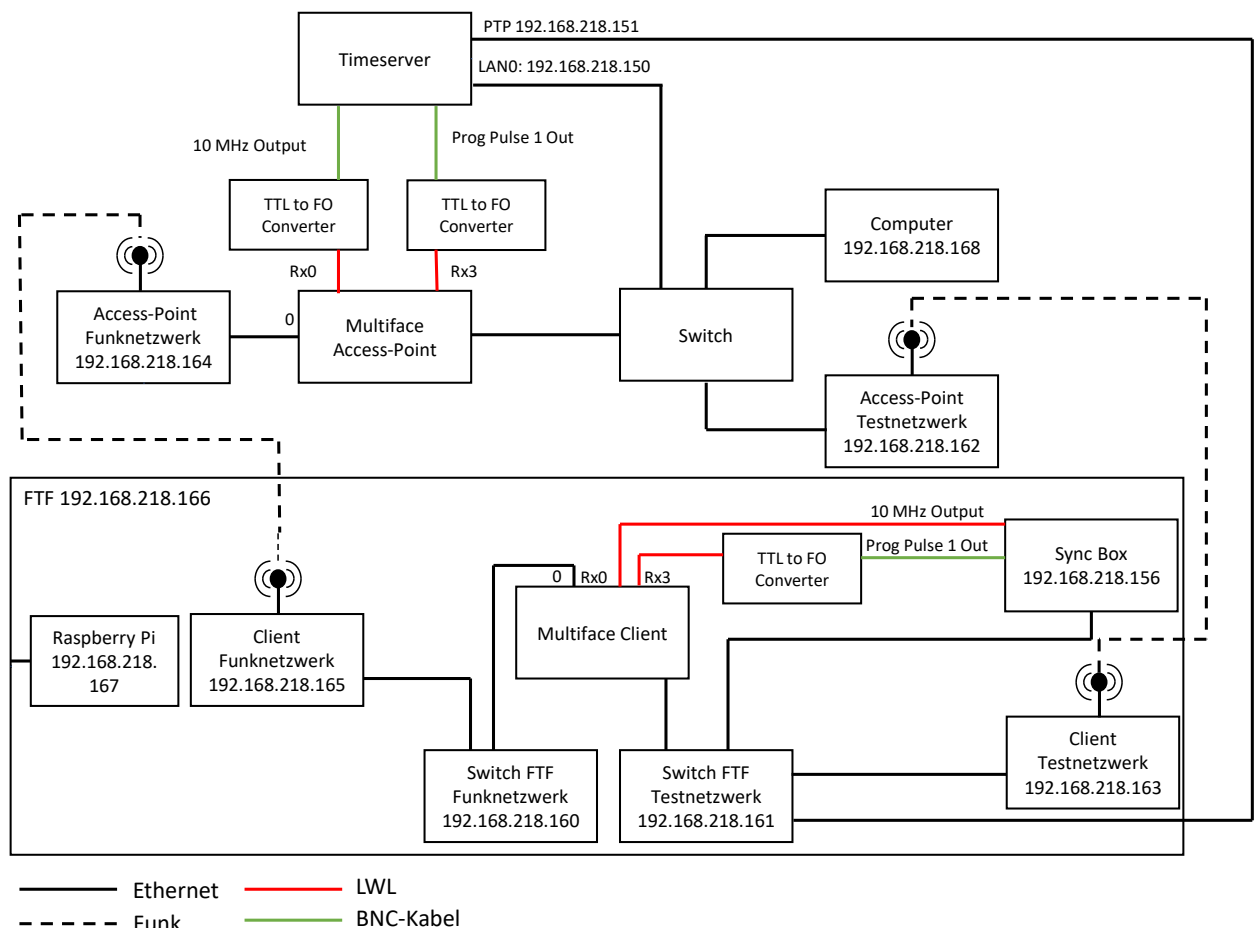


Abbildung 3.1: Hardware-Ansicht

Im Folgenden werden ausgewählte Komponenten des Testaufbaus beschrieben.

3.2 Komponenten des Fahrsystems

3.2.1 Fahrerloses Transportfahrzeug

Das fahrerlose Transportfahrzeug (s. Abbildung 3.2) dient als Fortbewegungsmittel des Clients des Funknetzwerks. In der Industrie werden fahrerlose Transportfahrzeuge verwendet. Aus diesem Grund wurde eines dieser Fahrzeuge für die Messungen ausgewählt. Man kann das Fahrzeug auf zwei Arten steuern. Die erste Möglichkeit ist über Funk. Dadurch lässt sich das FTF drahtlos über einen Computer mit Tastatur steuern. Die andere Möglichkeit ist das FTF über Ethernet zu steuern. Diese Möglichkeit wurde bei den Tests genutzt, damit die Funkmessungen nicht durch die Steuerung über Funk beeinträchtigt werden.

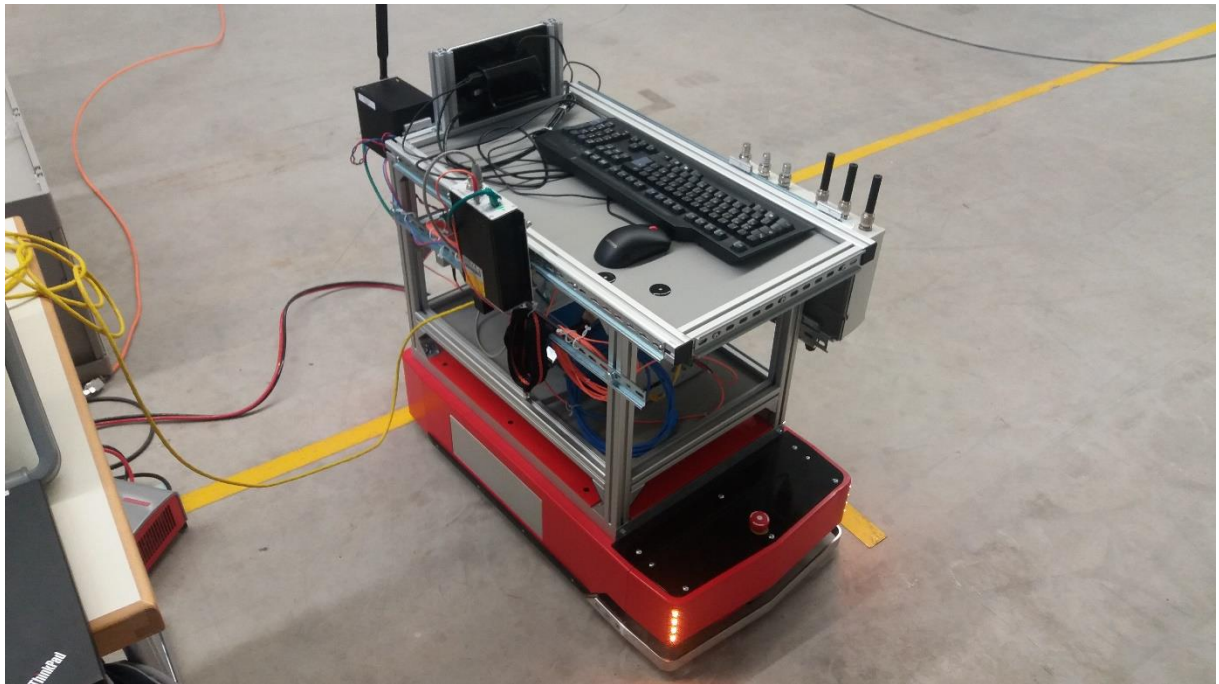


Abbildung 3.2: Fahrerloses Transportfahrzeug

3.2.2 Fahrzeugsteuerung

Die Fahrzeugsteuerung findet durch ein vom Autor erweitertes Python-Programm statt. Eingebettet in diesem Programm ist eine CSV-Datei (Comma Separated Value) [13]. Diese Datei wird Zeile für Zeile abgefahren. Wenn eine Spur erkannt wird, folgt das FTF dieser Spur. Bei beiden Modi ist es möglich, die Fahrt durch das Drücken der Leertaste zu stoppen. Der Raspberry Pi sendet eine Nachricht zum Kommunikationsmodul des FTF und empfängt eine Nachricht desselben Moduls. Diese empfangene Nachricht wird im Programm weiterverarbeitet. [14]

In Abbildung 3.3 wird die Systemarchitektur zur Steuerung des FTF gezeigt:

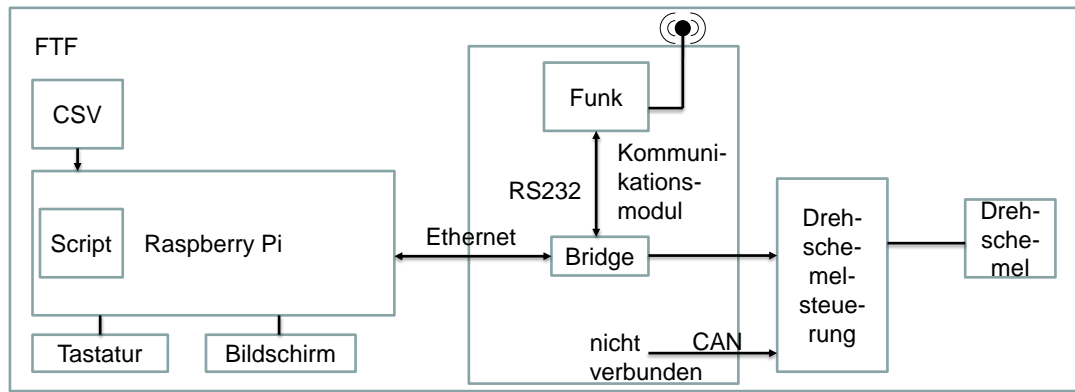


Abbildung 3.3: Systemarchitektur zur Steuerung des FTF

Die CSV-Datei, die eine Beschreibung des Bewegungsprofils enthält und das Steuerprogramm befinden sich auf dem Raspberry Pi. Dieser ist über Ethernet an das Kommunikationsmodul angeschlossen. Wenn das Steuerprogramm gestartet ist, kann man das FTF über eine angeschlossene Tastatur steuern. Drückt man auf die im Programm verwendeten Tasten werden diese Befehle an das Steuerprogramm und dann weiter über die Bridge an die Drehschemelsteuerung geleitet. Dort werden die Befehle verarbeitet, an den Drehschemel gesendet und die Antriebe gesteuert.

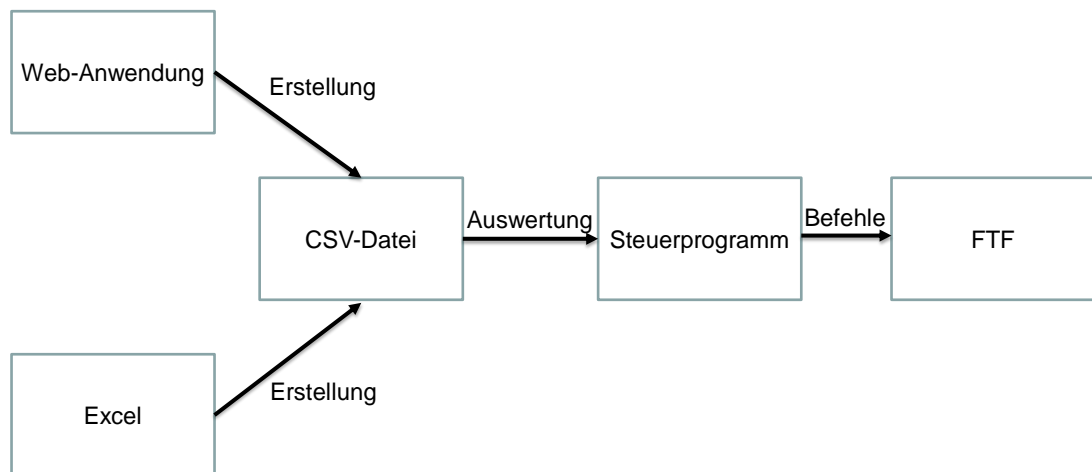


Abbildung 3.4: Softwareelemente zur Steuerung des FTF

In Abbildung 3.4 sind die Softwareelemente zur Steuerung des FTF dargestellt. Am Anfang wird eine CSV-Datei in Excel, im Texteditor oder mit der Web-Anwendung Trackeditor, welcher eine Strecke festlegt (s. Abbildung 3.5) generiert. Im Steuerprogramm wird die CSV-Datei eingelesen und kann somit auf verschiedene Art und Weise genutzt werden. Man nutzt die Parameter sowie ihre Werte für verschiedene Befehle, um dem FTF Anweisungen zu geben. Zum Beispiel ab der X-Position 500 mm soll das FTF eine Geschwindigkeit von 100 mm/s fahren.

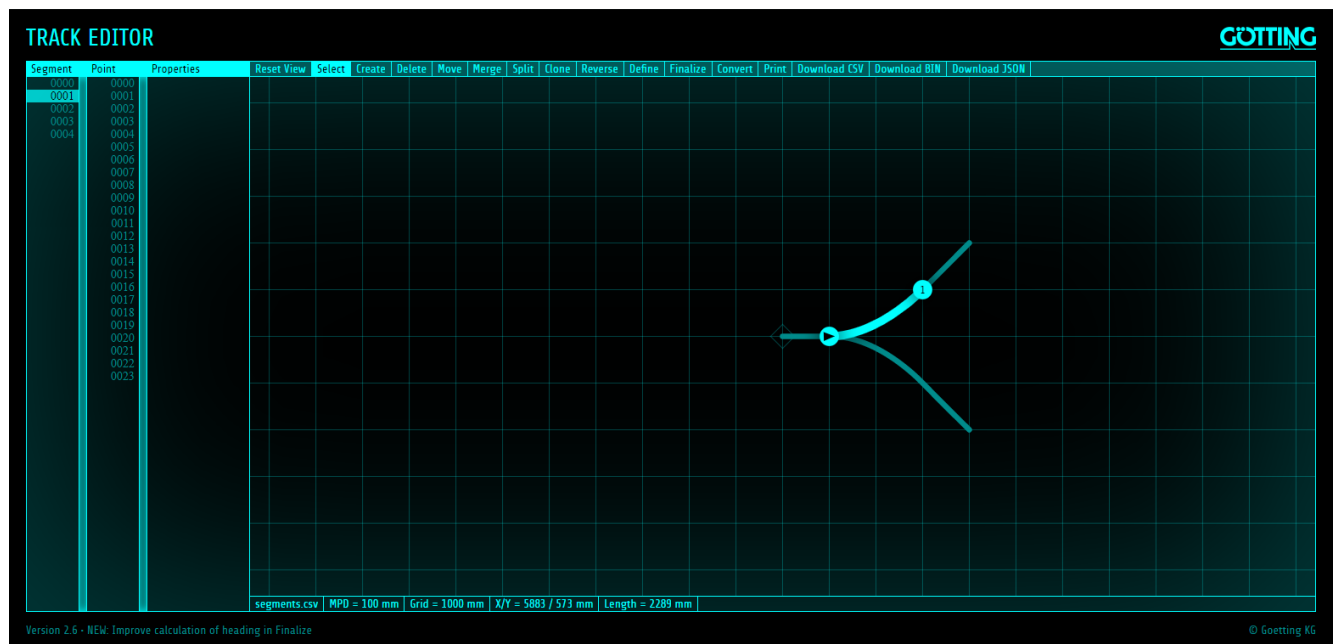


Abbildung 3.5: Erstellte Beispielstrecke im Trackeditor [15]

3.3 Komponenten des Funknetzwerks

Bei den WLAN-Komponenten handelt es sich um zwei Open-BAT Geräte der Firma Hirschmann (s. Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7). Beide Geräte lassen sich als Access-Point oder als Client einstellen. Die WLAN-Komponenten kommunizieren bei den meisten Messungen im SRD-Band und zum Vergleich bei einigen Messungen im regulären 5 GHz-Band.



Abbildung 3.6: Client Funknetzwerk

Damit man beide Geräte im SRD-Band betreiben kann, muss als Landeseinstellung 'USA-FCC' gewählt werden. Das liegt daran, dass die Geräte zu einem Zeitpunkt geliefert wurden, wo das SRD-Band für WLAN in Europa nicht erlaubt war bzw. nicht vorgesehen war. [16]



Abbildung 3.7: Access-Point Funknetzwerk mit Multiface

3.4 Komponenten des Testsystems

3.4.1 FTT Manager

Funk-Transfer-Tester (FTT) ist ein System zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens von drahtlosen Netzwerken. [17]

Der FTT-Manager dient zum Planen, Spezifizieren sowie zur Durchführung und Auswertung von Performance-Untersuchungen an Kommunikationssystemen. Diese Software parametriert den Testdatenverkehr und steuert den Testablauf. Darüber hinaus werden die Testergebnisse online visualisiert und gespeichert. Der Testdatenverkehr wird dann entsprechend der Parametrierung durch die Multifaces erzeugt und bewertet. Nach Beendigung des Tests können die gespeicherten Messwerte automatisiert statistisch bewertet werden. [17]

3.4.2 Multiface

„Beim Multiface handelt es sich um ein Testgerät, welches Datenverkehr generiert. Diese Nachrichtenfolge wird überwacht und auf Fehler oder Verluste geprüft. Zeitparameter wie Übertragungszeit und Aktualisierungszeit werden gemessen. Dadurch kann die Qualität der Funkkommunikation beurteilt werden.“ [14]

Zur Realisierung der Messungen werden zwei Multifaces benötigt. Eines von den beiden ist an den Access-Point des Funknetzwerks angeschlossen (s. Abbildung 3.7). Das andere Multiface befindet sich auf dem FTT und ist mit dem Client des Funknetzwerks verbunden (s. Abbildung 3.8). [17] [14]

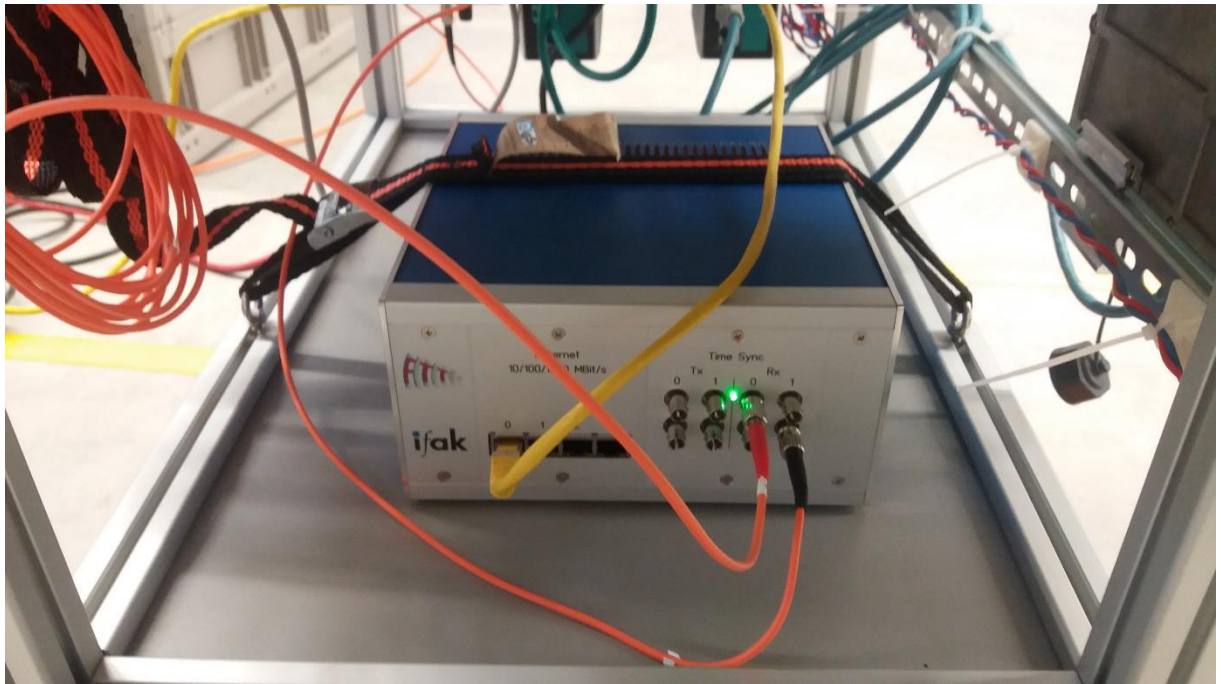


Abbildung 3.8: Multiface auf dem FTF

3.4.3 Zeitsynchronisation

Damit mit dem Testsystem die Übertragungszeit gemessen werden kann, ist eine Zeitsynchronisation zwischen der Quelle und dem Ziel der Testnachrichten notwendig. Zudem ist es erforderlich, die Messung auf beiden Seiten möglichst synchron zu starten. Abbildung 3.9 zeigt die Architektur der Synchronisation für die durchgeführten Messungen.

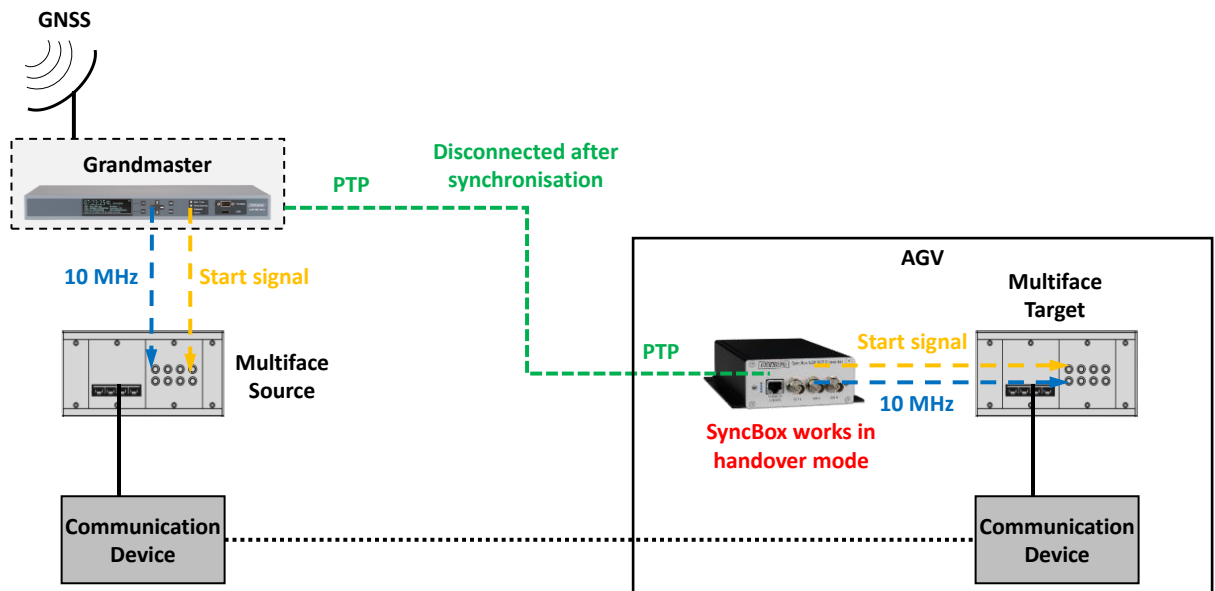


Abbildung 3.9: Architekturbild der Zeitsynchronisation

In Anwendungsfällen ohne bewegte Komponenten werden der Grandmaster und die Sync Boxen über eine kontinuierlich bestehende Leitungsverbindung synchronisiert. Die Abweichung der Zeiten ist am kleinsten, wenn eine Kabelverbindung zwischen diesen Komponenten verwendet wird. Allerdings ist das bei bewegten Messobjekten schwer zu realisieren.

Versuche zur Synchronisation über Funkverbindungen haben ergeben, dass sich hiermit keine hinreichend genaue Synchronisation erreichen lässt. Das liegt vor allem daran, dass die Hin- und Rückrichtung bei Funkkommunikation keine symmetrischen Verzögerungszeiten aufweisen, zudem sind die Zeiten auch starken Schwankungen unterlegen. Eine Regelung ist aus diesen Gründen schlecht möglich. Deshalb wurden im Vorfeld der Messungen untersucht, wie lange die Sync Box nach Trennung der der Leitungsverbindung zum Grandmaster den 10 MHz Takt stabil halten kann. Ergebnis dieser Untersuchungen war, je länger die Zeitsynchronisation vor der Trennung der Verbindung, desto länger sind die Messungen genauer und verursachen einen geringeren Messfehler. Für die Messungen war eine Abweichung der Übertragungszeit von 1 μ s akzeptabel. Diese Genauigkeit erreicht man sicher, wenn die leitungsgebundene Synchronisation mindestens 2 Stunden aufrechterhalten wird. Anschließend kann im sogenannten Hold Over Mode auch ohne erneute Synchronisation mindestens 4 Stunden gemessen werden (Berechnung s. Anhang A.4).

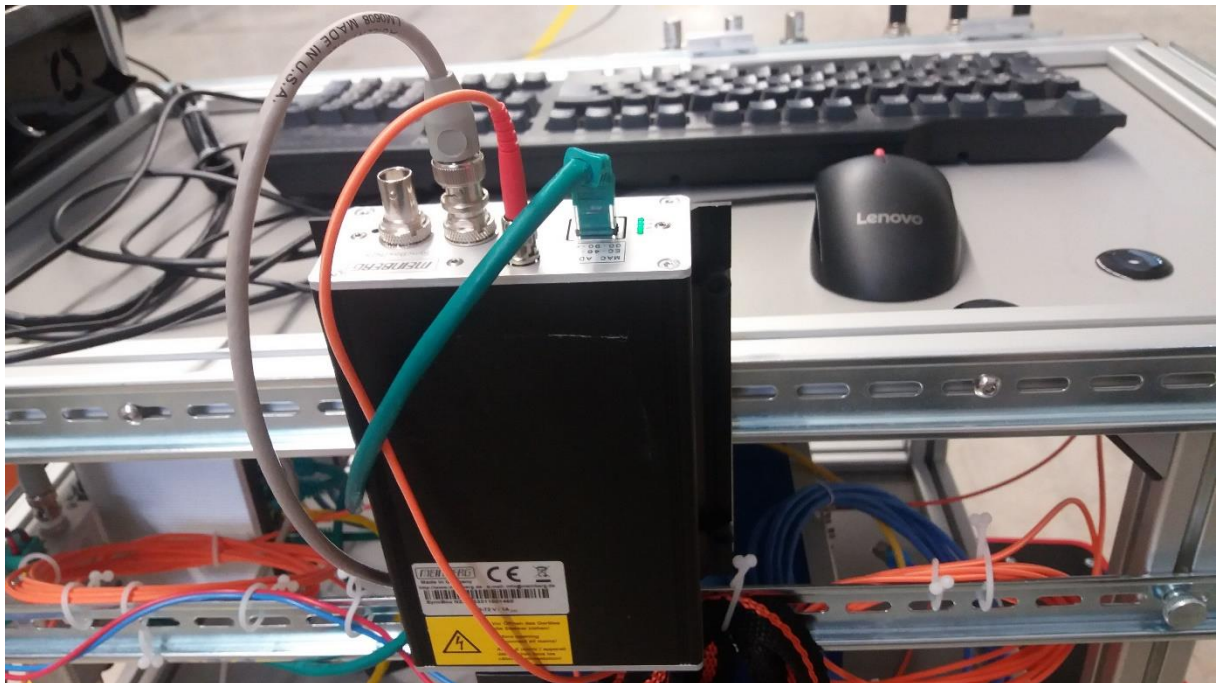


Abbildung 3.10: Montage der SyncBox auf dem FTF

3.4.4 Kommunikation zwischen den Komponenten

Für die Durchführung der Messungen ist eine Kommunikation zwischen dem FTT Manager und den Multifaces notwendig. Über diese Verbindung, Testnetzwerk genannt, werden die Multifaces parametrieren, der Test gesteuert und die ermittelten Testergebnisse von den Multifaces zum FTT Manager übertragen. Die Kommunikation zwischen den Komponenten wird über WLAN im 2,4 GHz-Band realisiert, damit das

Testnetzwerk nicht das Funknetzwerk während der Messungen beeinträchtigt.

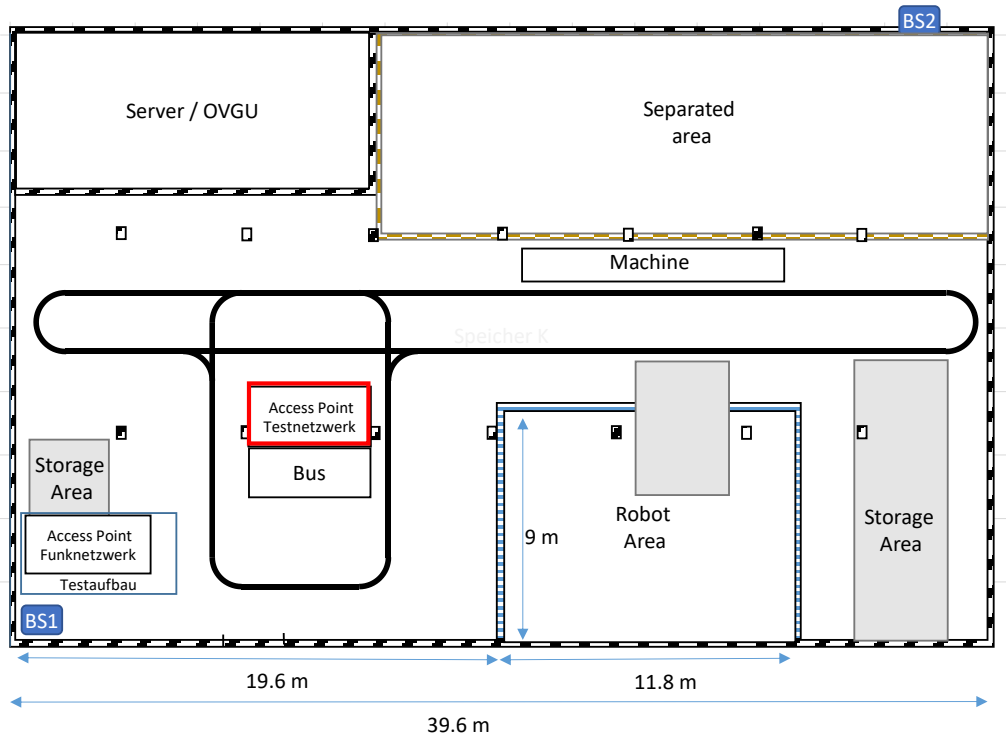


Abbildung 3.11: Position des Access-Point Testnetzwerk [18]

Der Access-Point für das Testnetzwerk (s. Abbildung 3.12) wurde zentral in der Testhalle positioniert, damit eine bessere Funkkommunikation zwischen dem Access-Point und dem Client des Testsystems (s. Abbildung 3.13) besteht und es somit zu keinen Verbindungsabbrüchen kommt (s. Abbildung 3.11).

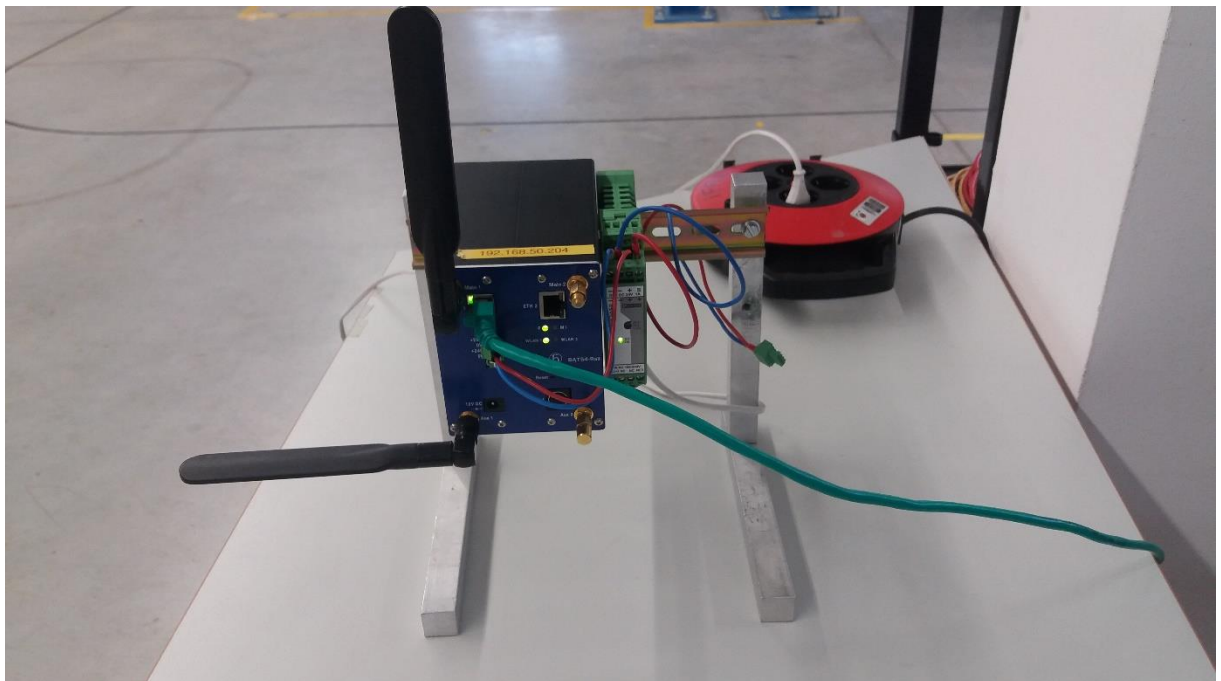


Abbildung 3.12: Access-Point Testnetzwerk

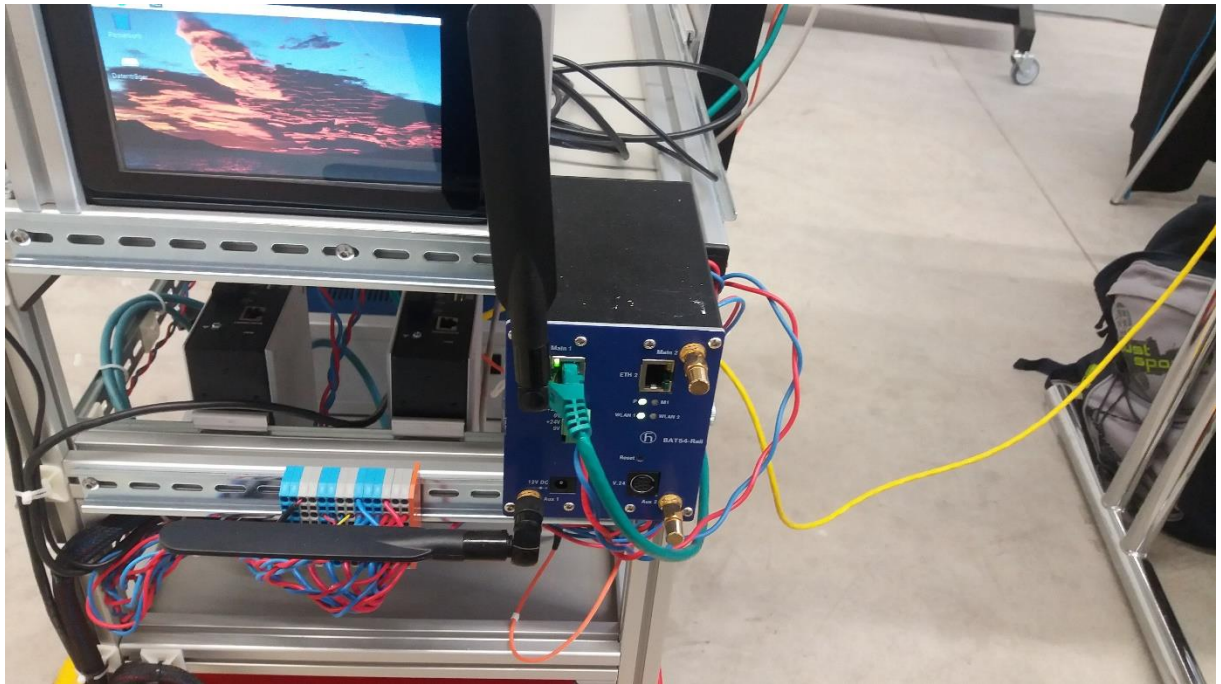


Abbildung 3.13: Client Testnetzwerk

4 Testdurchführung

4.1 Testumgebung

Die Testumgebung befindet sich im Galileo Testfeld Sachsen-Anhalt (s. Anhang A.1 Abbildung A.1 und Abbildung A.2). In Abbildung A.1 sind der Grundriss sowie die Maße der Halle abgebildet. Die Detailansichten der Halle sind in Abbildung A.2 abgebildet.

In Abbildung 4.1 sieht man die Fahrstrecke des FTF innerhalb der Halle. Diese Abbildung soll verdeutlichen, weshalb die Strecke in dieser Form angelegt wurde. Denn die Testhalle wird neben dem ifak, von anderen Institutionen und Firmen genutzt. Somit standen nicht alle Bereiche für die Funkmessungen zur Verfügung. Dies hatte zur Folge das die Teststrecke in ihrer derzeitigen Form angelegt wurde.

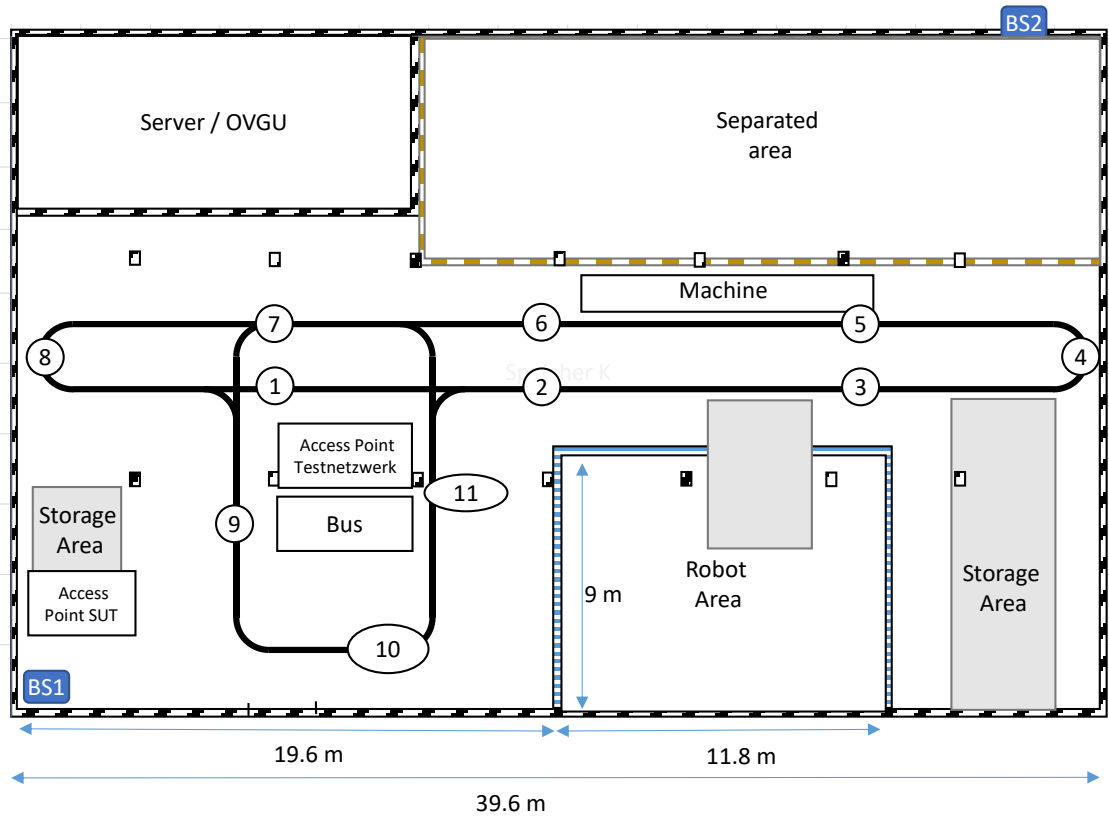


Abbildung 4.1: Halle mit Messpositionen für statische Messungen [18]

Die Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 zeigen die Maße der Fahrstrecke für das FTF. Der erste obere Teil bildet die Hauptstrecke (s. Abbildung 4.2). In Abbildung 4.3 ist die Fahrstrecke mit der Umleitung abgebildet. Das FTF fährt bei den Messungen auf diese zwei Arten die Fahrstrecke ab.

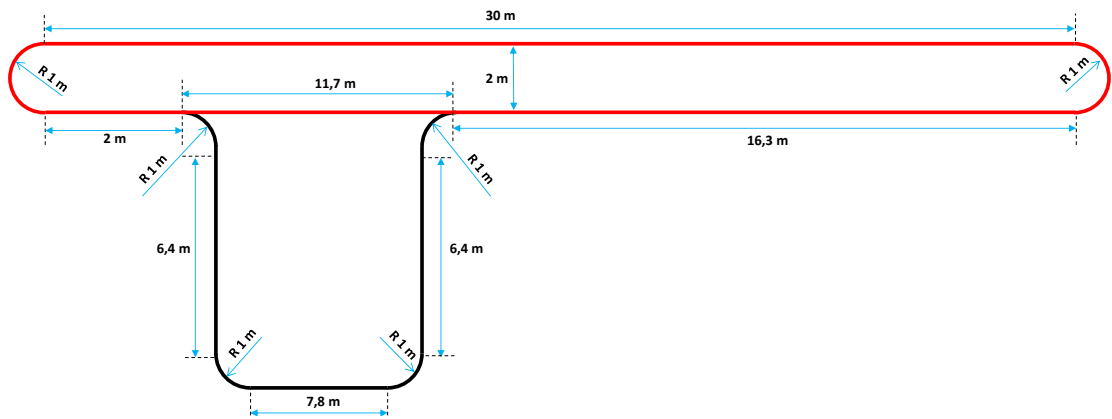


Abbildung 4.2: Hauptstrecke [18]

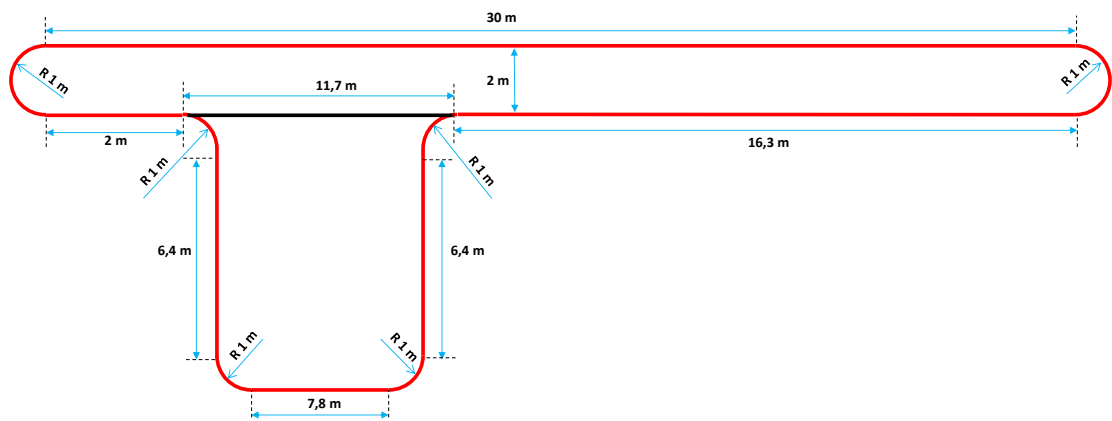


Abbildung 4.3: Fahrstrecke mit Umleitung [20]

4.2 Testfälle

Die Testfälle unterscheiden sich in mehreren Elementen. Der Aufbau in Abbildung 4.4, Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 basiert auf dem Aufbau eines Projekts im FTT-Manager. Alle Messungen wurden im Galileo Testfeld Sachsen-Anhalt durchgeführt. Diese Halle diente im ehemaligen Binnenhafen als Lagerhalle, weshalb der Name Speicher K erhalten geblieben ist. Abbildung 4.4 zeigt das in der Testspezifikation zwischen statischen Test und den Test mit Bewegung unterschieden wurde. Beide Testszenarien werden in den nächsten beiden Unterkapiteln näher beleuchtet.

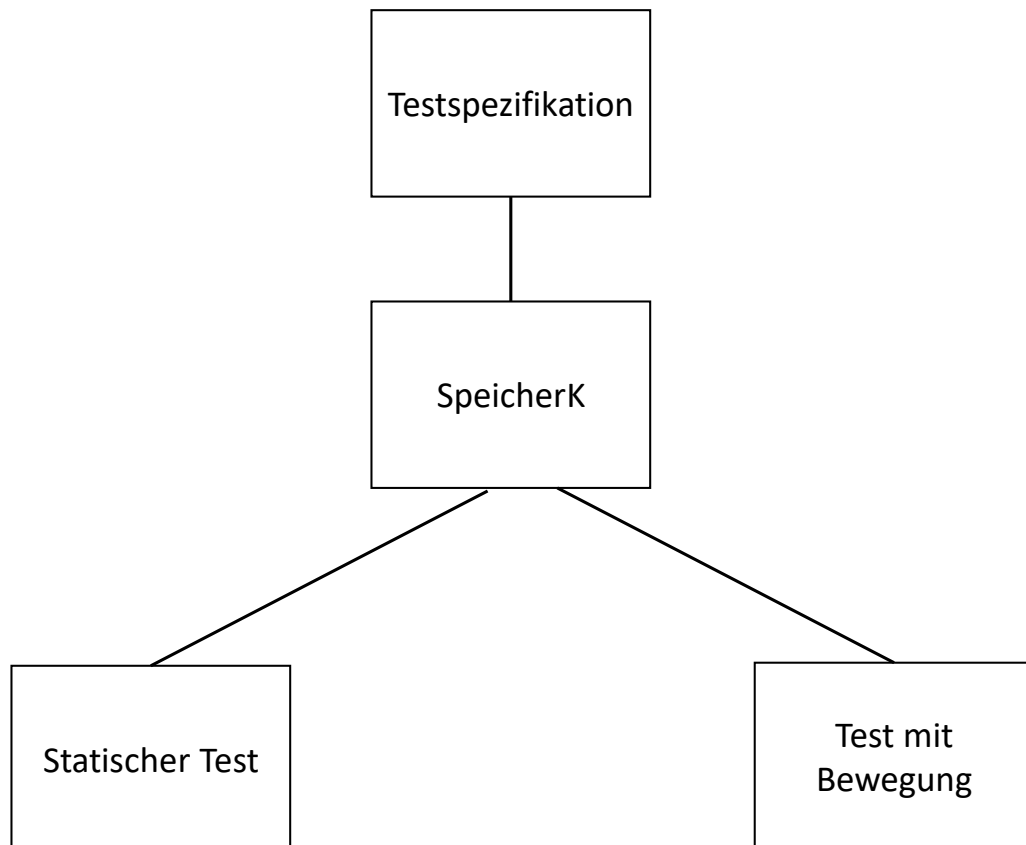


Abbildung 4.4: Aufbau der Testspezifikation

4.2.1 Statische Messungen

Die statischen Messungen wurden an elf verschiedenen Positionen durchgeführt (s. Abbildung 4.1), um die Eigenschaften der Kommunikation bei den jeweiligen Stellen der Fahrstrecke ohne Bewegung zu ermitteln.

Die Untergliederung der statischen Messungen ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Bei jeder Position wurde einmal mit der Mindestnachrichtlänge von 60 Byte und einmal mit der Maximalnachrichtlänge von 1514 Byte die Funkkommunikation gemessen. Da eine Zykluszeit von 7 ms eingestellt wurde und es 100 000 Nachrichten zu übertragen gilt, ergibt sich eine Messdauer von 11 Minuten und 40 Sekunden. Um festzustellen, ob die Stichprobe von 100.000 Nachrichten womöglich nicht ausreicht, um relevante Effekte aufzudecken wurde ein Test mit der Mindestnachrichtlänge von 60 Byte eine Million Nachrichten durchgeführt. Da die Maximalgeschwindigkeit des FTF 1000 mm/s beträgt, wurden Messungen bei fünf verschiedenen Geschwindigkeiten (200 mm/s, 400 mm/s, 600 mm/s, 800 mm/s und 1000 mm/s) durchgeführt.

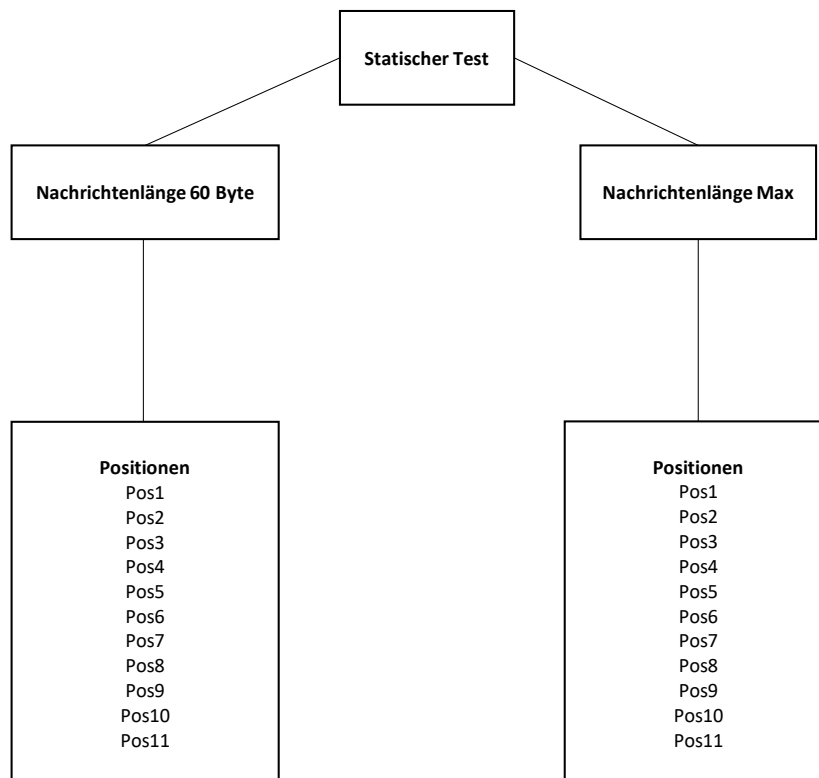


Abbildung 4.5: Spezifikation für statischen Test

4.2.2 Messungen bei Bewegung des FTF

Nach den statischen Messungen sind die Messungen bei Bewegung des FTF auszuführen. Innerhalb des FTT-Managers wurde die Aufteilung der verschiedenen Messungen wie in Abbildung 4.6 vorgenommen. Als erstes wurde jeweils eine Testgruppe mit der Hauptstrecke und eine Testgruppe mit der Umleitung erstellt. Bei der Hauptstrecke ist die Startposition 1 und bei der Umleitung die Position 7 (s. Abbildung 4.1). Unter diesen zwei Testgruppen wird zwischen einer Nachrichtenlänge von 60 Byte und der maximalen Nachrichtenlänge von 1514 Byte unterschieden. Die beiden Testgruppen benennen die Größe der übertragenen Nachricht pro Zyklus. Danach wurden drei Testgruppen mit den Namen Downlink, Uplink sowie Downlink und Uplink erstellt. Downlink bedeutet in diesem Fall vom Access-Point zum Client und bei Uplink in die andere Richtung. Im Fall Downlink und Uplink senden und empfangen der Access-Point und Client gleichzeitig. Innerhalb der Testgruppen wurden die Testfälle mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen 200 mm/s und 1000 mm/s mit entsprechendem Namen angelegt.

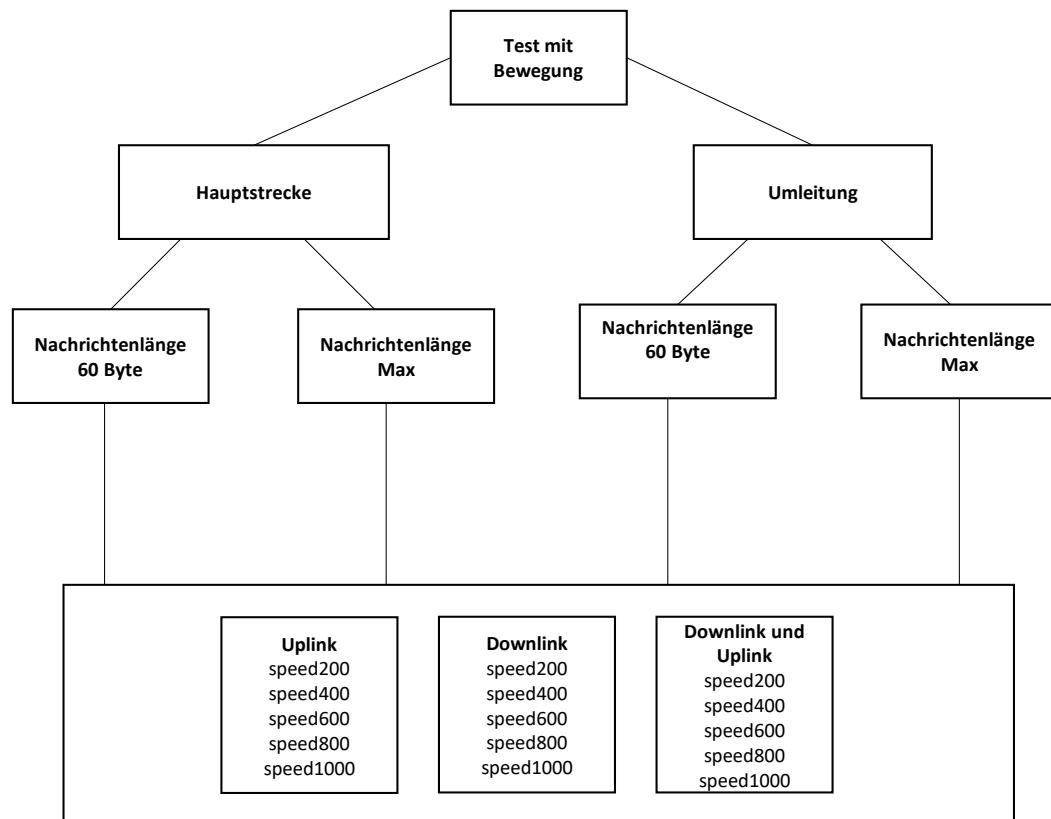


Abbildung 4.6: Spezifikation für Test mit Bewegung

Beim letzten Testszenario befinden sich mehrere Reflexionsflächen (s. Anhang A.2 Abbildung A.3 bis Abbildung A.7) zwischen dem Access-Point und dem Client des Funknetzwerks. In Abbildung 4.7 ist die Unterteilung der Testgruppen mit den Reflexionsflächen dargestellt. Da das FTF während der Messungen fährt, gehören diese Testgruppen zum Test mit Bewegung. Die Nachrichtenlänge beträgt 60 Byte und die Fahrt findet auf der Hauptstrecke statt. Aus Zeitgründen wurden die maximale Nachrichtenlänge und die Umleitung nicht mit einbezogen. Die Messungen wurden entsprechend der Aufstellung der Reflexionsflächen unterteilt. Jeweils für eine Testgruppe stehen die Reflexionsflächen auf der rechten Seite, linken Seite oder auf beiden Seiten. Aus Zeitgründen wurden drei statt fünf Testfälle pro Testgruppe durchgeführt. Die Namen der Testfälle stehen für die Geschwindigkeiten, z. B. speed200 bei 200 mm/s, speed600 bei 600 mm/s und speed1000 bei 1000 mm/s.



Abbildung 4.7: Unterteilung der Messungen mit den Reflexionsflächen

5 Messergebnisse und deren Bewertung

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse näher betrachtet und bewertet. Es wurden mehr Messungen als in den Abbildungen ersichtlich durchgeführt (s. Anhang A.3). Aufgrund von Platzgründen wurden nicht alle Abbildungen zu den jeweiligen Testfällen in den Hauptteil der Bachelorarbeit übernommen. Diese sind im Anhang zu finden.

5.1 Messung der Kommunikation im Funkspektrum

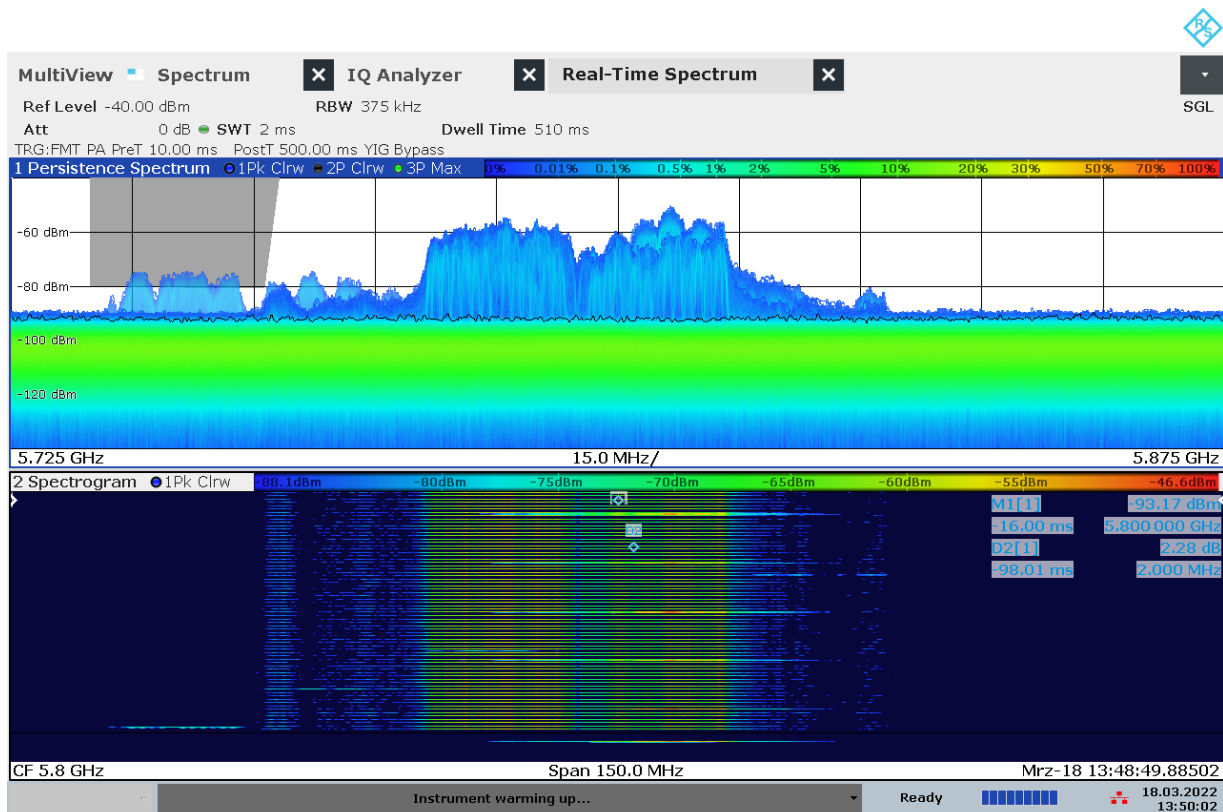
In der folgenden Abbildung ist das Spektrum des SRD-Bandes während einer Kommunikation dargestellt. Als Frequenzbereich wurde 5,725 bis 5,875 GHz eingestellt.

Die Kommunikation findet zum größten Teil um den Bereich von 5,8 GHz statt. Da andere Signale im 5,7 GHz-Band zu sehen sind, ist anzunehmen, dass andere Anwendungen in diesem Band funken.

Das in der unteren Hälfte der Abbildung 5.1 zeigt in der oberen Hälfte ein Spektrum und in der unteren Hälfte ein Spektrogramm einer Messung während der Durchführung eines Tests. Das Spektrum zeigt den Leistungspegel des empfangenen Signals im Frequenzbereich von 5,725 GHz bis 5,875 GHz. Im Moment dieser Aufnahme fand eine Kommunikation statt. Das graue Feld kennzeichnet den Bereich, in dem ein auftretendes Signal den Start der Messung auslöst (Trigger). Die Skala im oberen Bereich zeigt in Form von Farben die zeitliche Häufigkeit eines Signals an. Da das Signal innerhalb von Millisekunden wiederkehrt, ist es blau. Wäre es ein permanentes Trägersignal, würde das Signal in roter Farbe dargestellt werden. In Abbildung 5.1 sieht man rechts in der Mitte die Angaben zu den Markern. Da die zeitliche Skala nach unten hin in den negativen Bereich zeigt, sind die Werte negativ. Der erste Marker wurde auf ein Signal mit der Frequenz 5,8 GHz gesetzt. Der Delta-Marker D2 bezieht sich auf den Marker M1, um die zeitliche Skalierung des Spektrogramms festzustellen. Der zeitliche Unterschied zwischen den beiden Markern beträgt 98 ms und die Anzahl der Übertragungen 14.

$$\frac{98 \text{ ms}}{14 \text{ Übertragungen}} = 7 \text{ ms/Übertragung} \quad (12)$$

Es ergibt sich eine Zeit von 7 ms je Übertragung. Dieser Wert entspricht dem während der Messung eingestellten Sendezeitabstand.



13:50:03 18.03.2022

Abbildung 5.1: Spektrum des SRD-Bandes während der Kommunikation

5.2 Vergleich mit Messungen in den WLAN-Bändern

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messungen aus den beiden Frequenzbändern betrachtet. Für die Messungen mit dem regulären 5 GHz-Band wird der Frequenzkanal 52 mit 5,26 GHz eingestellt. Aber für die weiteren Messungen im SRD-Band wurde der Frequenzkanal 161 mit 5,805 GHz eingestellt. Die Messungen wurden mit einer Nachrichtenlänge von 60 Byte und einer Geschwindigkeit von 200 mm/s durchgeführt.

Die folgenden vorgestellten Größen stellen die statischen Werte der jeweiligen Messung dar. Die minimale Übertragungszeit (Transmission Time Minimum, TT Min) ist die kürzeste gemessene Übertragungszeit während des Tests. Der Modalwert der Übertragungszeit (Transmission Time Modal, TT Mod) steht für die Übertragungszeit, die während des Tests am häufigsten gemessen wurde. Die Übertragungszeit P95 (Transmission Time P95, TT P95) steht für die Zeit in der 95 Prozent aller Nachrichten angekommen sind. Die minimale Aktualisierungszeit (Update Time Minimum, UT Min) steht für die kürzeste gemessene Aktualisierungszeit während des Tests. Der Durchschnitt der Aktualisierungszeit (Update Time Mean, UT Mean) beschreibt die durchschnittliche Aktualisierungszeit während des Tests.

Und die Standard-Abweichung der Aktualisierungszeit (Update Time Standard Difference, UT SD) beschreibt die Standardabweichung der Aktualisierungszeit. Alle genannten Größen werden in der Einheit Millisekunden angegeben.

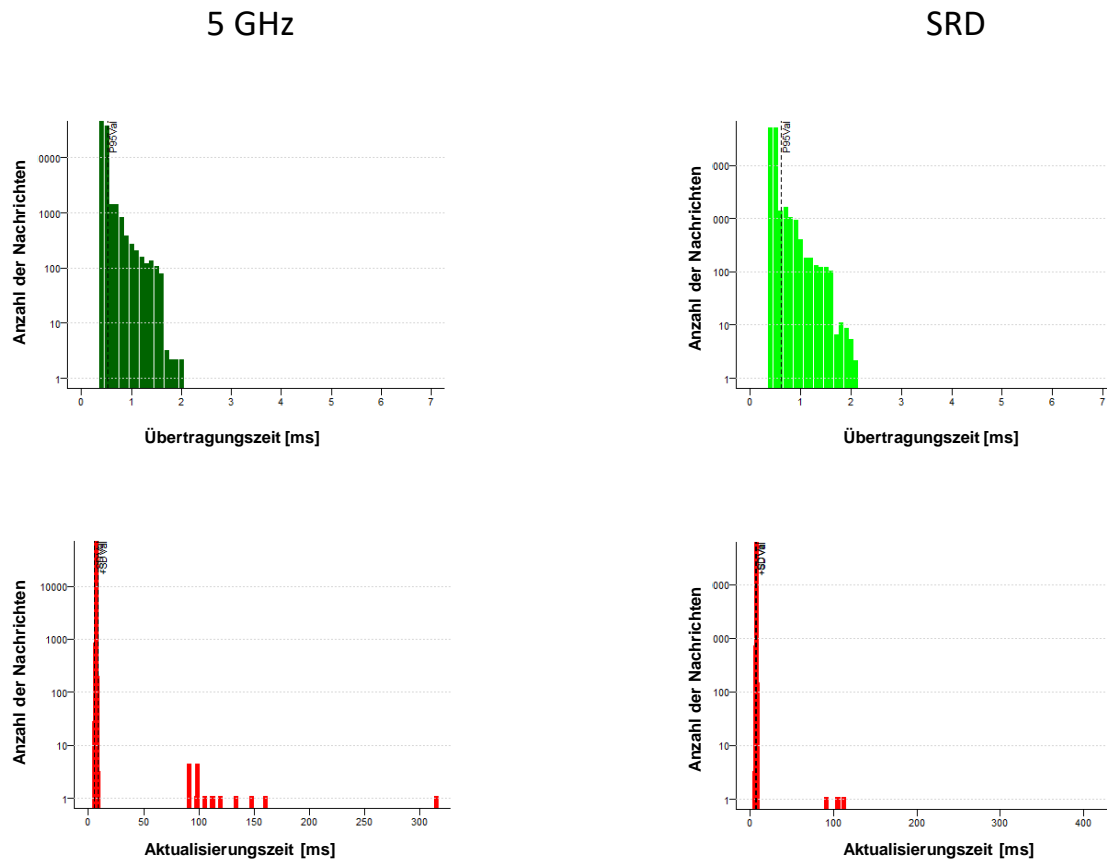


Abbildung 5.2: Vergleich der Übertragungs- und Aktualisierungszeiten

Als erstes wurde der Downlink näher untersucht. In Abbildung 5.2 erkennt man höhere Aktualisierungszeiten im regulären 5 GHz-Band als im SRD-Band. Die statistischen Werte in Tabelle 2 zeigen, außer bei der Standardabweichung der Aktualisierungszeit, keine auffälligen Unterschiede.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
5GHz	0,4	0,4	0,5	5,5	7	1,9
SRD	0,4	0,4	0,6	5,3	7	0,7

Tabelle 2: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink mit speed200

Transmit X (TX) steht für die Anzahl gesendeten Nachrichten. Receive X (RX) steht für die empfangenen Nachrichten. Die Nachrichtenverlustquote (MLR) steht für das Verhältnis der verlorenen zu den gesendeten Nachrichten [9] [10]. Aufeinanderfolgende inkorrekte Nachrichten (Consecutive Invalid Message, CIM) stehen für die aufeinanderfolgenden verlorenen Nachrichten während der Kommunikation.

Aber in Tabelle 3 ist zu sehen das die Nachrichtenverlustquote und die inkorrekten Werte im SRD-Band geringer als im regulären 5 GHz-Band sind.

	TX	RX	MLR	CIM
5GHz	99998	99568	4.30e-03	44
SRD	99997	99928	6.90e-04	15

Tabelle 3: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink speed200

Als nächstes wird die Kommunikation während des gleichzeitigen Uplinks und Downlinks untersucht. In Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 sind im Vergleich zum SRD-Band höhere Übertragungs- und Aktualisierungszeiten im 5 GHz-Band zu erkennen.

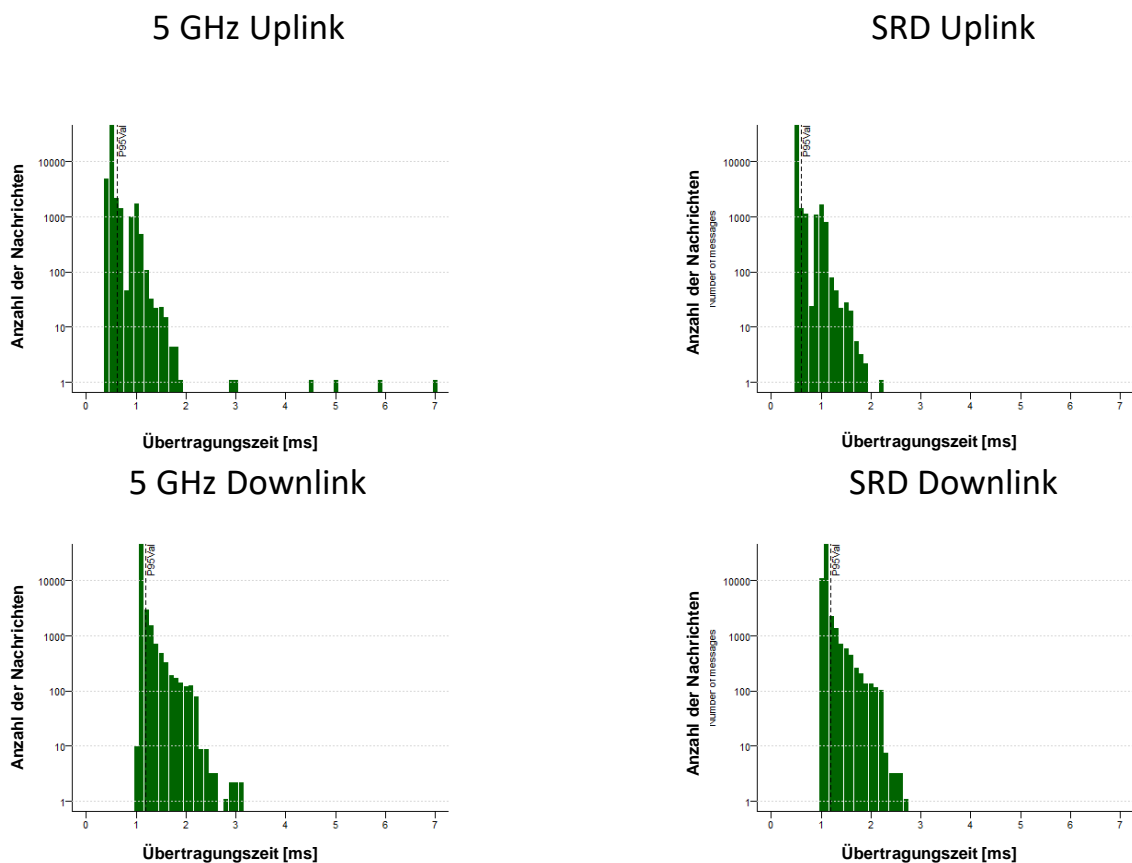


Abbildung 5.3: Vergleich der Übertragungszeiten

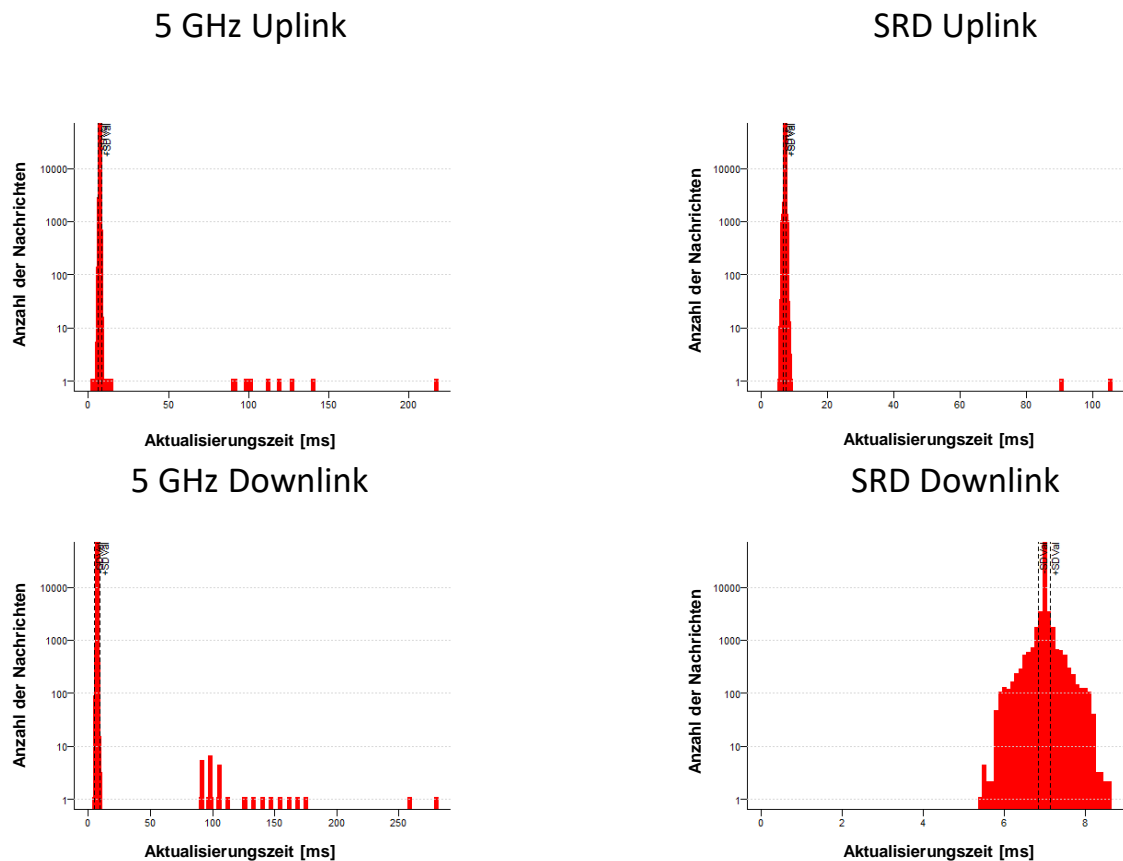


Abbildung 5.4: Vergleich der Aktualisierungszeiten

Die Übertragungszeiten in Tabelle 4 sind beim Downlink größer als beim Uplink. Wenn nur die Werte derselben Richtung (Downlink oder Uplink) verglichen werden, sind außer bei der Standardabweichung der Aktualisierungszeit keine nennenswerten Unterschiede festzustellen. Die Nachrichtenverlustquote in Tabelle 5 des SRD-Bandes ist in beiden Richtungen kleiner als die des regulären 5 GHz-Band.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
5GHz Uplink	0,4	0,5	0,6	2,8	7	1,2
5GHz Downlink	1	1,1	1,2	5	7	2,5
SRD Uplink	0,5	0,5	0,6	5,3	7	0,4
SRD Downlink	1	1,1	1,2	5,4	7	0,1

Tabelle 4: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink mit speed200

	TX	RX	MLR	CIM
5GHz Uplink	99998	99818	1.80e-03	30

5GHz Downlink	99998	99313	6.85e-03	39
SRD Uplink	99998	99970	2.80e-04	14
SRD Downlink	99998	99996	2.00e-05	0

Tabelle 5: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink mit speed200

5.3 Vergleich zwischen statischer Messung und Messung bei Bewegung

In der folgenden Abbildung sind die Übertragungszeit und Aktualisierungszeit der Positionen 1, 3 und 4 dargestellt. Die Positionsbezeichner können Abbildung 4.1 entnommen werden. Anhand der Abbildung 5.5 erkennt man je weiter der Client vom Access-Point entfernt ist, desto mehr Nachrichten haben eine längere Übertragungszeit.

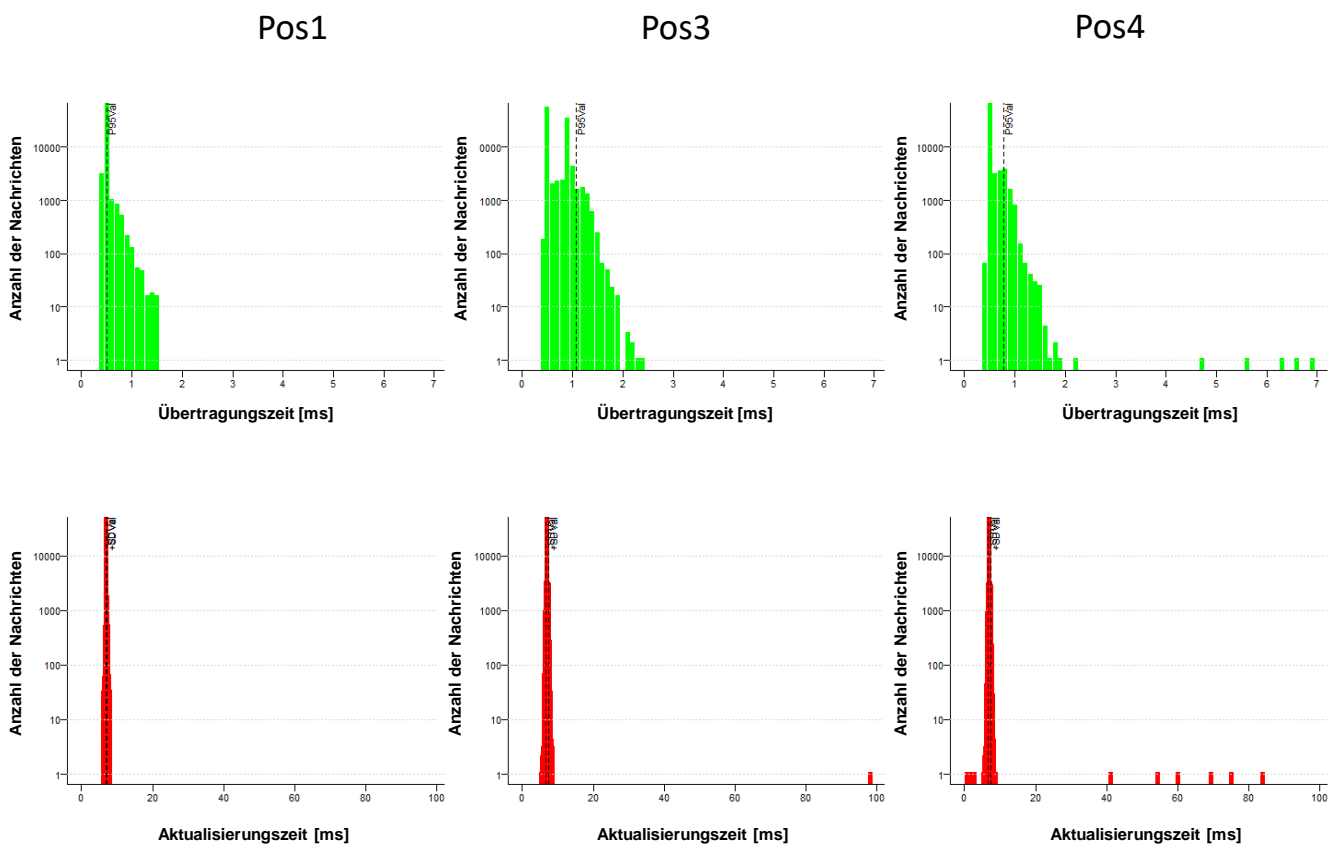


Abbildung 5.5: Statische Messungen mit Nachrichtenlänge 60 Byte

Bei Position 3 erkennt man das eine Nachricht eine Aktualisierungszeit von fast 100 ms hat. Die zyklischen Prozesse der Messung sowie der beiden Hirschmann-Geräte des Funknetzwerks (Access-Point und Client) könnten der Grund sein. Die Zykluszeit der Messung beträgt 7 ms, aber die Zykluszeiten innerhalb der Geräteimplementierungen des Access-Points und des Clients zum Datentransfer zwischen der Ethernetschnittstelle und dem Funkmedium sind nicht bekannt. Als Folge der Asynchronität dieser Zyklen während der Übertragung kommt es zu einem konstanten Anstieg der Übertragungszeit. Erreicht die Summe der Zeitverschiebungen eines Zyklus, die Gesamtzeit des zweiten Zyklus kommt es zu einem Sprung der gemessenen Zeit. Daraus ergibt sich bei längerer Messung ein sägezahnförmiger Verlauf der Übertragungszeit. Nicht bei jeder Messung kann dieser in Abbildung 5.6 dargestellte Vorgang beobachtet werden, da die Summe

der Zeitverschiebungen zwischen beiden zyklischen Prozessen größer war als die Messdauer für einen Testfall mit 100 000 Nachrichten. Aber bei Position 4 sind mehrere Nachrichten mit größerer Übertragungs- und auch Aktualisierungszeit. Position 4 ist am weitesten vom Access-Point des Funknetzwerks entfernt.

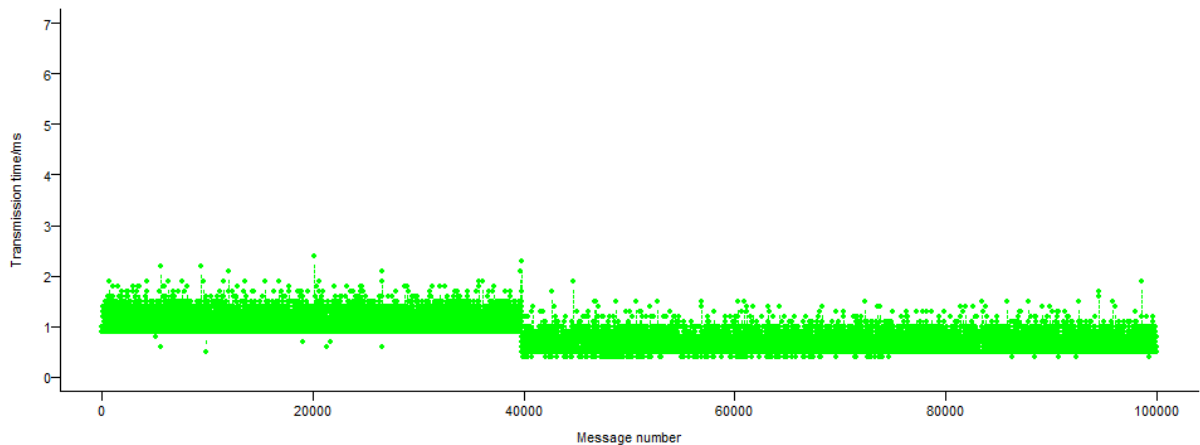


Abbildung 5.6: Sprung während der Messung

An allen elf Positionen betrug die Mindestübertragungszeit 0,4 ms. An Position 8 kamen die meisten Nachrichten mit einer Übertragungszeit von 0,9 ms an. Dies lässt sich dadurch erklären, dass zwischen dieser Position und dem Access-Point des Funknetzwerks Hindernisse (Schränke und Pfeiler) stehen und dementsprechend die Funkverbindung beeinflusst haben. Von Position 3 bis Position 8 ist die Übertragungszeit der meisten Nachrichten größer. An diesen Stellen besteht keine direkte Sichtverbindung zwischen dem Access-Point und dem Client des Funknetzwerks. Die Mindestaktualisierungszeit ist an den meisten Positionen ähnlich, aber bei Position 4 gering. Obwohl diese gering ist, sind die Aktualisierungszeiten mehrerer Nachrichten größer 40 ms (s. Abbildung 5.5). Das heißt in dieser Zeit sind keine korrekten Nachrichten beim Empfänger eingetroffen.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Pos1	0,4	0,5	0,5	6	7	0,1
Pos2	0,4	0,4	0,5	6	7	0,1
Pos3	0,4	0,5	1,1	5,2	7	0,3
Pos4	0,4	0,5	0,8	0,6	7	0,5
Pos5	0,4	0,5	0,8	5,8	7	0,1
Pos6	0,4	0,5	0,6	4,9	7	0,3
Pos7	0,4	0,5	0,5	5,6	7	0,1
Pos8	0,4	0,9	1	5,4	7	0,1
Pos9	0,4	0,5	0,5	5,9	7	0,1
Pos10	0,4	0,5	0,5	5,5	7	0,1
Pos11	0,4	0,5	0,5	5,3	7	0,1

Tabelle 6: Statistische Werte für Statische Messungen mit Nachrichtenlänge 60 Byte

Bei den Positionen 3, 4 und 6 kamen nicht alle Nachrichten am Access-Point an. Alle drei Positionen sind Stellen, an den keine Sichtverbindung zwischen dem Access-Point und dem Client besteht. Bei Position 4 ist die Nachrichtenverlustquote am größten. Dies bedeutet bei der Kommunikation an dieser Stelle sind die meisten Nachrichten verloren gegangen. Ein Grund ist, dass der Abstand zwischen Access Point und Client an dieser Position und damit auch die Freiraumdämpfung am größten sind. Die Freiraumdämpfung wird nach Gleichung (1) berechnet:

$$L_{pdB} = 20 \log \left(\frac{4\pi}{300\,000\,000 \frac{m}{s}} \right) + 20 \log(5,805 \text{ GHz}) + 20 \log(37,5 \text{ m}) - 2 \text{ dBi} - 2 \text{ dBi} = 75,2 \text{ dB} \quad (13)$$

[19]

	TX	RX	MLR	CIM
Pos1	99997	99997	0	0
Pos2	99997	99997	0	0
Pos3	99997	99984	1.3e-04	13
Pos4	99997	99952	4.5e-04	11
Pos5	99997	99997	0	0
Pos6	99997	99985	1.2e-04	12
Pos7	99997	99997	0	0
Pos8	99997	99997	0	0
Pos9	99997	99997	0	0
Pos10	99997	99997	0	0
Pos11	99997	99997	0	0

Tabelle 7: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Statische Messungen mit Nachrichtenlänge 60 Byte

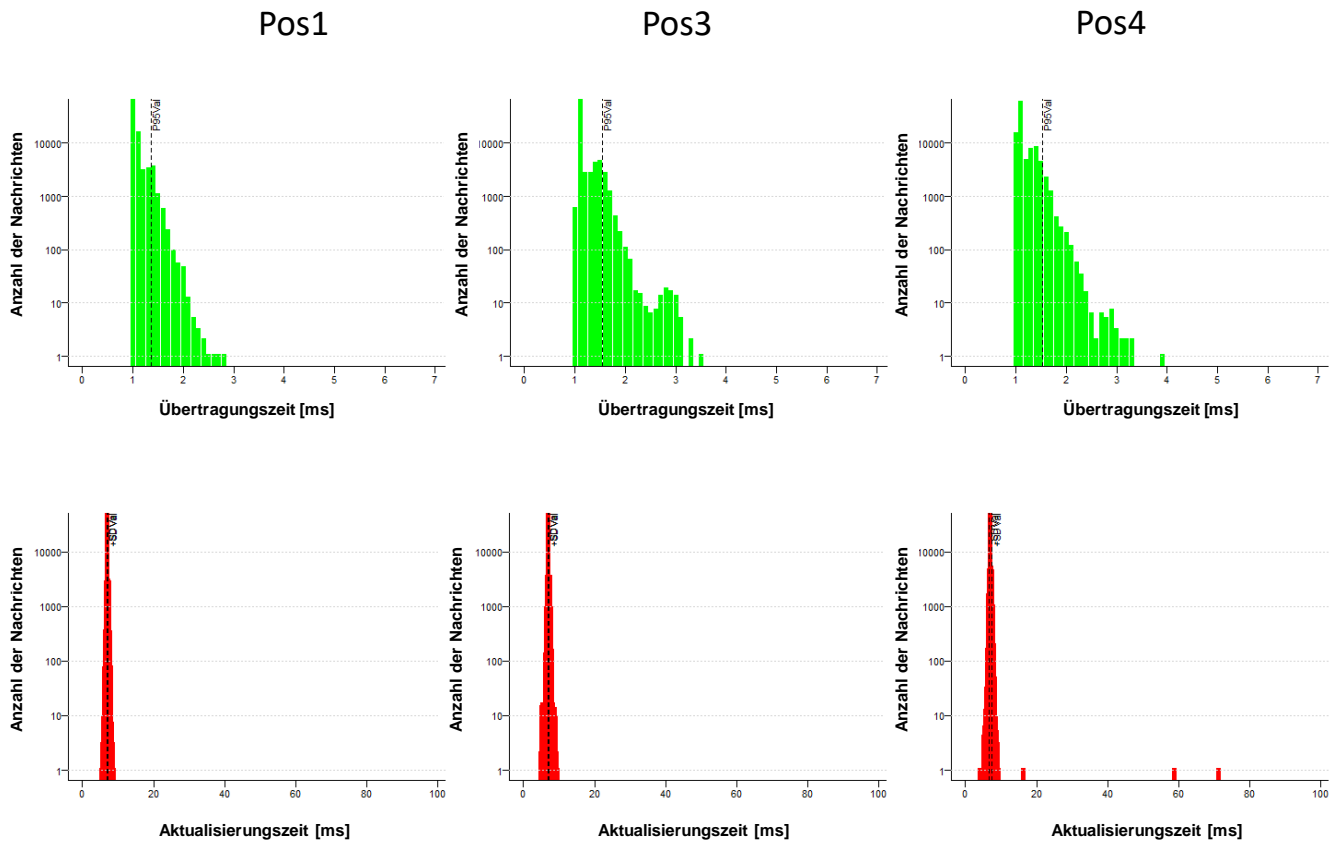


Abbildung 5.7: Statische Messungen mit maximaler Nachrichtenlänge

Im Vergleich zu der Kommunikation mit der Nachrichtenlänge von 60 Byte ist die Übertragungszeit aufgrund der größeren Nachrichtenlänge von 1514 Byte nun höher. Dies liegt daran, dass mehr Informationen pro Nachricht versendet werden. Die Aktualisierungszeit ist an einigen Positionen trotz der größeren Nachrichtenlänge kleiner als bei dem Versuch mit 60 Byte.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Pos1	1	1	1,4	5,4	7	0,2
Pos2	1	1	1,4	5,1	7	0,2
Pos3	1	1,1	1,5	4,8	7	0,2
Pos4	1	1,1	1,5	4,1	7	0,3
Pos5	1	1,1	1,4	3,5	7	0,2
Pos6	1	1,1	1,5	4,8	7	0,2
Pos7	1	1	1,3	5,2	7	0,1
Pos8	1	1,1	1,1	3,4	7	0,1
Pos9	1	1	1,2	5,2	7	0,1
Pos10	1	1	1,4	2,8	7	0,2
Pos11	1	1	1,4	4,8	7	0,2

Tabelle 8: Statistische Werte für Statische Messungen mit maximaler Nachrichtenlänge

Obwohl die Nachrichtenlänge größer ist als beim vorherigen Versuch, ist die Nachrichtenverlustquote an einer Position größer null und nicht wie vorher bei allen dreien. Dies könnte darauf hindeuten, dass andere Einflüsse mit den verlorenen Nachrichten zu tun haben. Von Position 4 aus sind wieder einige Nachrichten nicht zum Access-Point gelangt. Aber die Nachrichtenverlustquote ist kleiner als zuvor und das bedeutet, es sind mehr korrekte Nachrichten beim Access-Point angekommen.

	TX	RX	MLR	CIM
Pos1	99997	99997	0	0
Pos2	99997	99997	0	0
Pos3	99997	99997	0	0
Pos4	99997	99980	1.7e-04	9
Pos5	99997	99997	0	0
Pos6	99997	99997	0	0
Pos7	99997	99997	0	0
Pos8	99993	99993	0	0
Pos9	99997	99997	0	0
Pos10	99997	99997	0	0
Pos11	99997	99997	0	0

Tabelle 9: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Statische Messungen mit maximaler Nachrichtenlänge

In Abbildung 5.8 sind die Übertragungszeit und Aktualisierungszeit der beiden Messungen dargestellt. Beide Messungen wurden bei Position 1 durchgeführt, jeweils einmal mit 100 000 und 1 Million übertragenen Nachrichten. Die Kommunikationsrichtung war vom Client zum Access-Point (Uplink). An der Übertragungszeit erkennt man, dass bei mehr übertragenen Nachrichten auch mehr Nachrichten mit längerer Übertragungszeit vorhanden sind, d.h. dass bei Messungen mit kleinerer Stichprobe Nachrichten mit längeren Übertragungszeiten nicht in jedem Fall erfasst wurden. Bei der Aktualisierungszeit zeigt sich kein großer Unterschied.

Pos1 mit 100000 übertragenen Paketen

Pos1 mit 1000000 übertragenen Paketen

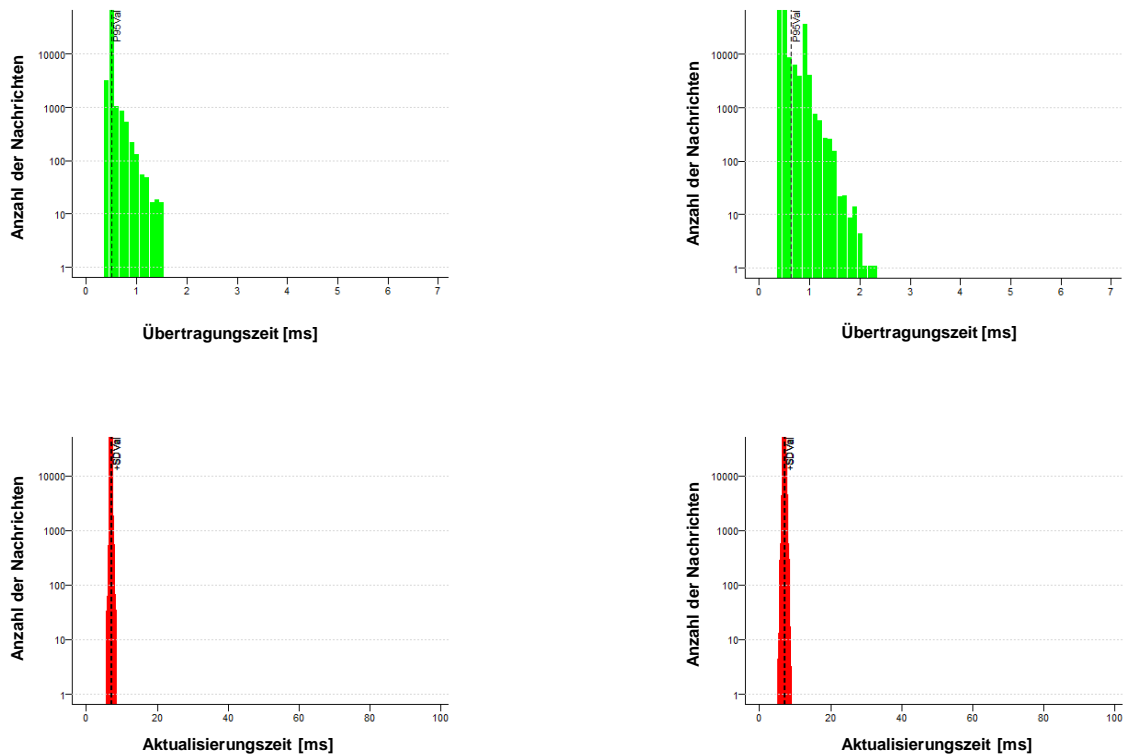


Abbildung 5.8: Statische Messungen Position1 Vergleich

Die Werte in den folgenden zwei Tabellen zeigen keinen großen Unterschied zwischen den Messungen.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Pos1	0,4	0,5	0,5	6	7	0,1
Pos1-1-Million	0,4	0,5	0,6	5,5	7	0,1

Tabelle 10: Statistische Werte für Statische Messungen Position1 Vergleich

	TX	RX	MLR	CIM
Pos1	99997	99997	0	0
Pos1-1-Million	999986	999986	0	0

Tabelle 11: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Statische Messungen Position1 Vergleich

5.4 Vergleich zwischen Hauptstrecke und Umleitung bei Nachrichtenlänge 60 Byte

In diesem Unterkapitel wird untersucht, ob das Fahren auf der Hauptstrecke und der Strecke mit Umleitung einen Einfluss auf die Kommunikation wie z. B. Uplink und Downlink hat. Außerdem wird die Fahrgeschwindigkeit betrachtet.

5.4.1 Hauptstrecke

Die Übertragungszeit in Abbildung 5.11 ist beim Uplink und Downlink ähnlich. Die meisten Nachrichten mit längerer Übertragungszeit sind bei der Geschwindigkeit von 200 mm/s aufgetreten. Bei den höheren Geschwindigkeiten sind die Übertragungszeiten kürzer.

Der Grund für die meisten verlorenen Nachrichten bei 200 mm/s, ist das die Funkverbindung positionsabhängig ist. In Abbildung 5.9 ist eine vom FTT-Manager generierte CSV-Datei zum Uplink bei 200 mm/s mit Werten aus der Messung dargestellt. Anhand dieser Datei ist die Positionsabhängigkeit zu erkennen.

Ab Zeile 21517 sind mehrere Nachrichten mit Fehlermeldung zu sehen. Die Fehlermeldung "0x00000020" bedeutet das die Nachricht fehlerhaft ist und "0x00000040" das die Nachricht zu spät ankam. Da es mehrere fehlerhafte Nachrichten hintereinander sind, handelt es sich um einen Burst. Dieser könnte durch die Pfeiler als Hindernisse entstanden sein.

21514	SN	TX	RM	RX	TL	LC	MM	LI	CC	SC	SA	TA	TI	TT	UT	RT	P1	P2	P3	P4	P5	ST
21515	21500	21501	43007	21501	0	0	1	5	0	0	0	21501	7000	512	6995	0	0	0	0	0	0	0x00000000
21516	21501	21502	43009	21502	0	0	1	5	0	0	0	21502	7000	939	7427	0	0	0	0	0	0	0x00000000
21517	21502	0	43010	21502	0	0	2	5	0	0	0	21503	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21518	21503	0	43011	21502	0	0	3	5	0	0	0	21504	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21519	21504	0	43012	21502	0	0	4	5	0	0	0	21505	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21520	21505	0	43013	21502	0	0	5	5	0	0	0	21506	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21521	21506	0	43014	21502	0	0	6	5	0	0	0	21507	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21522	21507	0	43015	21502	0	0	7	5	0	0	0	21508	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21523	21508	0	43016	21502	0	0	8	5	0	0	0	21509	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21524	21509	0	43017	21502	0	0	9	5	0	0	0	21510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21525	21510	0	43018	21502	0	0	10	5	0	0	0	21511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21526	21511	0	43019	21502	0	0	11	5	0	0	0	21512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21527	21512	0	43020	21502	0	0	12	5	0	0	0	21513	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21528	21513	0	43022	21502	0	1	11	5	0	1	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21529	21513	0	43023	21502	0	2	10	5	0	2	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21530	21513	0	43024	21502	0	3	9	5	0	3	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21531	21513	0	43025	21502	0	4	8	5	0	4	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21532	21513	0	43026	21502	0	5	7	5	0	5	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21533	21513	0	43027	21502	0	6	6	5	0	6	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21534	21513	0	43027	21502	0	6	7	5	0	6	0	21514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
21535	21514	0	43029	21502	0	7	6	5	0	7	0	21515	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21536	21514	0	43030	21502	0	8	5	5	0	8	0	21515	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21537	21514	0	43031	21502	0	9	4	5	0	9	0	21515	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21538	21514	0	43032	21502	0	10	3	5	0	10	0	21515	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21539	21514	0	43033	21502	0	11	2	5	0	11	0	21515	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
21540	21514	21515	43034	21503	0	11	2	5	0	11	0	21515	7000	827	90888	0	0	0	0	0	0	0x00000000
21541	21515	21516	43036	21504	0	11	2	5	0	11	0	21516	7000	510	6683	0	0	0	0	0	0	0x00000000

Abbildung 5.9: Erster Burst in der CSV-Datei

Die Geraden der Hauptstrecke sind jeweils 30 m lang (Abbildung 4.2). Der Umfang des Kreises, aufgeteilt in zwei Halbkreise ergibt sich wie folgt:

$$U = 2 * \pi * r \quad (14)$$

$$U = 2 * \pi * 1 \text{ m} = 6,283 \text{ m} \quad (15)$$

Mit dem Umfang kann nun die Länge der Hauptstrecke bestimmt werden:

$$2 * 30 + 6,283 \text{ m} = 66,283 \text{ m} \quad (16)$$

Demnach ist die Hauptstrecke 66,283 m lang. Als nächstes wird die Position, während der ersten Fehlermeldung des Bursts berechnet (s. Abbildung 5.9). Dafür wird erst die Fahrzeit bestimmt, indem man die Zeilennummer der CSV-Datei der ersten Fehlermeldung des Bursts mit dem Sendezeitabstand multipliziert:

$$\text{Fahrzeit} = \text{Zeilennummer der CSV - Datei} * \text{Sendezeitabstand} \quad (17)$$

$$21517 * 7 \text{ ms} = 150,619 \text{ s} \quad (18)$$

Danach kann die Position während des Bursts bestimmt werden durch das Multiplizieren der Fahrzeit mit der Geschwindigkeit v:

$$\text{Position} = \text{Fahrzeit} * v \quad (19)$$

$$150,619 \text{ s} * 200 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 30,1 \text{ m} \quad (20)$$

In Abbildung 5.10 ist ein weiterer Burst abgebildet, für den nochmal die gleiche Berechnung durchgeführt wird.

69112	SN	TX	RM	RX	TL	LC	MM	LI	CC	SC	SA	TA	TI	TT	UT	RT	P1	P2	P3	P4	P5	ST	
69113	69062	69063	138140	69025	0	36	3	16	0	36	0	69063	7000	509	6993	0	0	0	0	0	0	0	0x00000000
69114	69063	69064	138142	69026	0	36	3	16	0	36	0	69064	7000	1094	7585	0	0	0	0	0	0	0	0x00000000
69115	69064	0	138143	69026	0	36	4	16	0	36	0	69065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69116	69065	0	138144	69026	0	36	5	16	0	36	0	69066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69117	69066	0	138145	69026	0	36	6	16	0	36	0	69067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69118	69067	0	138146	69026	0	36	7	16	0	36	0	69068	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69119	69068	0	138147	69026	0	36	8	16	0	36	0	69069	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69120	69069	0	138148	69026	0	36	9	16	0	36	0	69070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69121	69070	0	138149	69026	0	36	10	16	0	36	0	69071	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69122	69071	0	138150	69026	0	36	11	16	0	36	0	69072	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69123	69072	0	138151	69026	0	36	12	16	0	36	0	69073	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69124	69073	0	138152	69026	0	36	13	16	0	36	0	69074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69125	69074	0	138153	69026	0	36	14	16	0	36	0	69075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69126	69075	0	138154	69026	0	36	15	16	0	36	0	69076	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69127	69076	0	138155	69026	0	36	16	16	0	36	0	69077	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69128	69077	0	138156	69026	0	36	17	16	0	36	0	69078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69129	69078	0	138157	69026	0	36	18	16	0	36	0	69079	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69130	69079	0	138158	69026	0	36	19	16	0	36	0	69080	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69131	69080	0	138160	69026	0	37	18	16	0	37	0	69081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69132	69080	0	138161	69026	0	38	17	16	0	38	0	69081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69133	69080	0	138162	69026	0	39	16	16	0	39	0	69081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69134	69080	0	138163	69026	0	40	15	16	0	40	0	69081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69135	69080	0	138164	69026	0	41	14	16	0	41	0	69081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69136	69080	0	138164	69026	0	41	15	16	0	41	0	69081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000020
69137	69081	0	138166	69026	0	42	14	16	0	42	0	69082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69138	69081	0	138167	69026	0	43	13	16	0	43	0	69082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69139	69081	0	138168	69026	0	44	12	16	0	44	0	69082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69140	69081	0	138169	69026	0	45	11	16	0	45	0	69082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69141	69081	0	138170	69026	0	46	10	16	0	46	0	69082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040
69142	69081	0	138171	69026	0	47	9	16	0	47	0	69082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0x00000040

Abbildung 5.10: Weiterer Burst

$$69115 * 7 \text{ ms} = 483,805 \text{ s} \quad (21)$$

$$483,805 \text{ s} * 200 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 96,8 \text{ m} \quad (22)$$

$$96,8 \text{ m} - 30,1 \text{ m} = 66,7 \text{ m} \quad (23)$$

Die Differenz der beiden Positionen ergibt 66,7 m. Dies würde einer Umrundung der Hauptstrecke entsprechen und beweist damit eine Positionsabhängigkeit der Funkübertragung. An diesen Positionen, die in der Nähe von Position 4 liegen, ist der Abstand zwischen Access Point und Client mit am Größten.

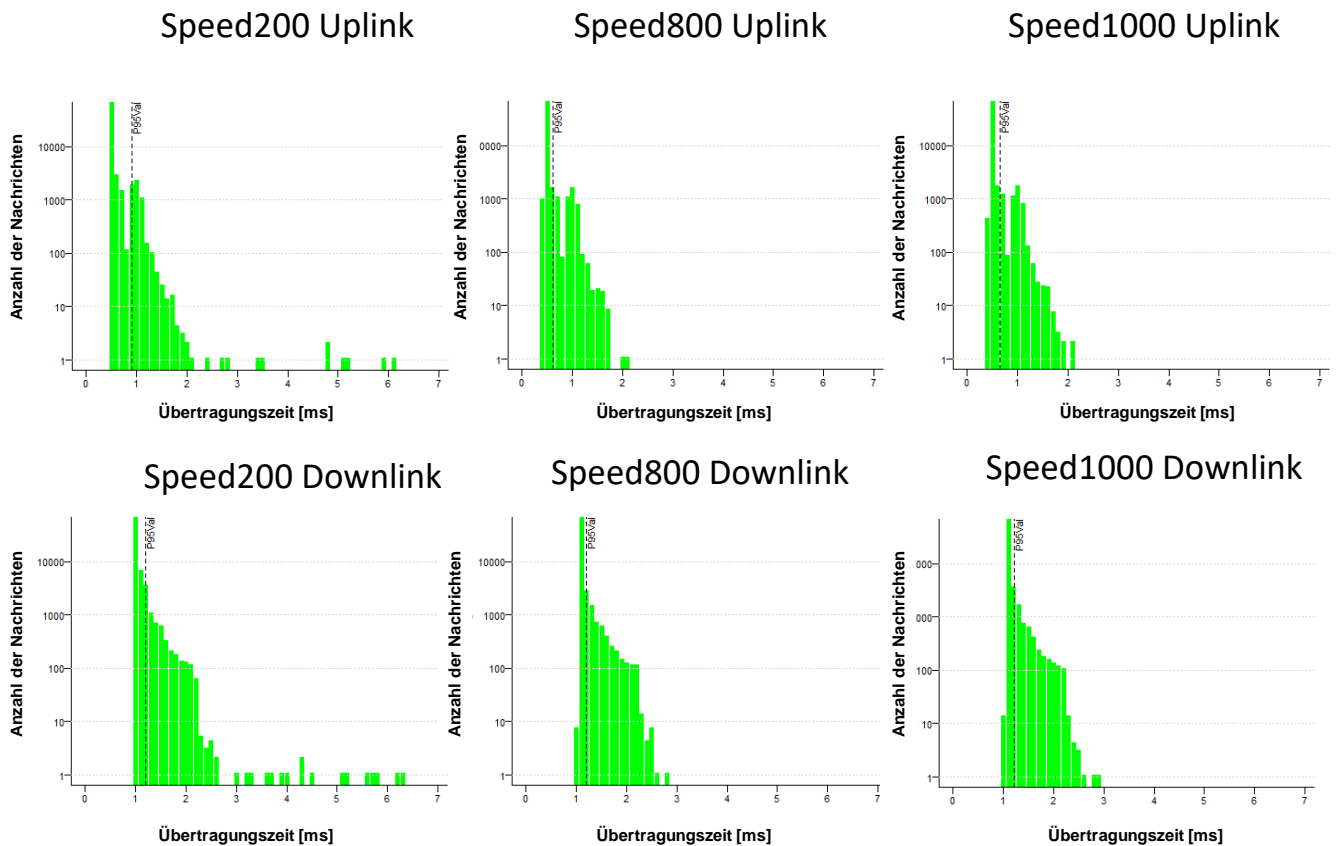


Abbildung 5.11: 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink Transmission Time

Die Nachrichten bei der niedrigsten Geschwindigkeit weisen den maximalen Wert von ca. 120 ms der Aktualisierungszeit beim Uplink auf. Aber beim Downlink treten die Maximalwerte von fast 100 ms der Aktualisierungszeit bei 1000 mm/s auf.

Der Maximalwert bei niedriger Geschwindigkeit kann dadurch erklärt werden, dass sich das Fahrzeug am längsten an den zuvor ermittelten kritischen Positionen aufhält. Der Grund für den maximale Wert bei 1000 mm/s für den Downlink ist noch nicht bekannt. Es wäre durch Wiederholung der Messung zu prüfen, ob dieses Verhalten reproduzierbar ist.

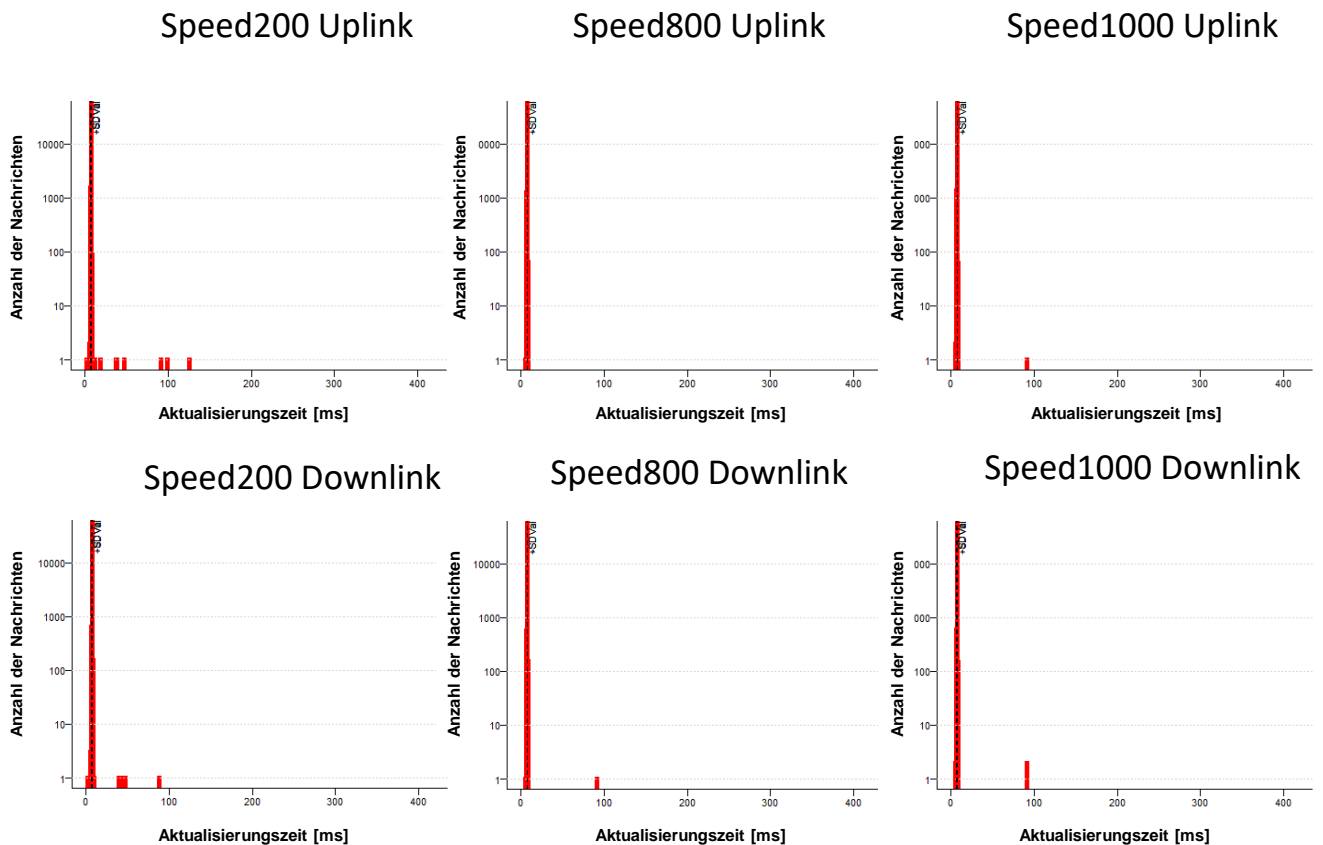


Abbildung 5.12: 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink Update Time

Aus Tabelle 12 wird ersichtlich das die Übertragungszeit in der Richtung vom Access-Point zum Client (Downlink) größer ist.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200 Uplink	0,5	0,5	0,9	1,7	7	0,7
Speed200 Downlink	1	1	1,2	1,7	7	0,7
Speed400 Uplink	0,4	0,5	1,1	5,3	7	0,3
Speed400 Downlink	1	1,1	1,6	2,8	7	0,1
Speed600 Uplink	0,4	0,5	0,6	5,4	7	0,1
Speed600 Downlink	1	1,1	1,2	5,2	7	0,1
Speed800 Uplink	0,4	0,5	0,6	5,4	7	0,1
Speed800 Downlink	1	1,1	1,2	5,3	7	0,3
Speed1000 Uplink	0,4	0,5	0,6	5,4	7	0,3
Speed1000 Downlink	1	1,1	1,2	5,2	7	0,4

Tabelle 12: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink

Die Nachrichtenverlustquote in Tabelle 13 ist in der Richtung vom Access-Point zum Client (Uplink) größer. Dies ist bei den Geschwindigkeiten 200 mm/s und 400 mm/s der Fall. Nachdem bei 600 mm/s keine Nachrichtenverluste auftreten steigen diese bei den höheren Geschwindigkeiten beim Downlink an.

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200 Uplink	99997	99929	6.80e-04	17
Speed200 Downlink	99997	99892	1.05e-03	11
Speed400 Uplink	99997	99985	1.20e-04	12
Speed400 Downlink	99997	99996	1.00e-05	1
Speed600 Uplink	99997	99997	0	0
Speed600 Downlink	99997	99997	0	0
Speed800 Uplink	99997	99997	0	0
Speed800 Downlink	99997	99985	1.20e-04	12
Speed1000 Uplink	99997	99985	1.20e-04	12
Speed1000 Downlink	99997	99973	2.40e-04	12

Tabelle 13: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink

5.4.2 Umleitung

Beim Fahren der Umleitung bleiben die Übertragungszeiten der Nachrichten ähnlich. Aber die Zeiten sind beim Downlink höher als beim Uplink.

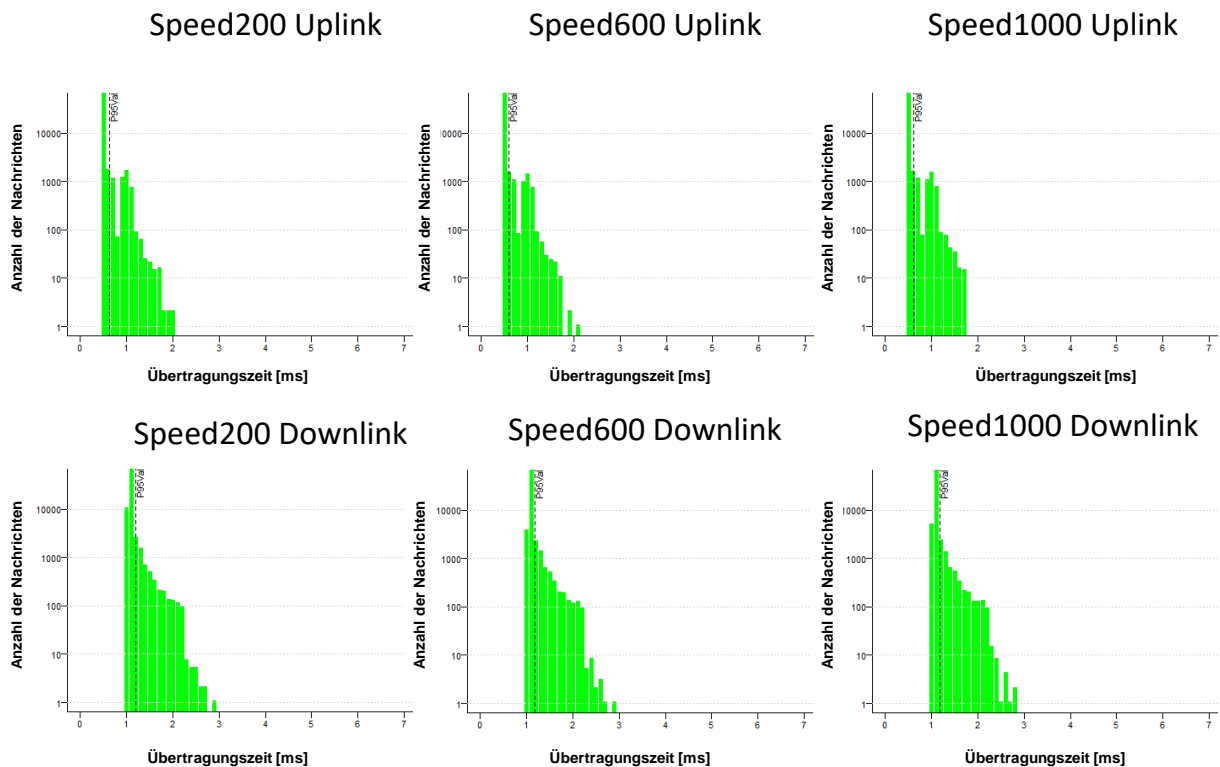


Abbildung 5.13: 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink Transmission Time

Die Aktualisierungszeiten in Abbildung 5.14 verschlechtern sich beim Fahren mit höheren Geschwindigkeiten nur geringfügig. Aber beim Downlink ist festzustellen, dass die meisten Nachrichten mit längeren Aktualisierungszeiten bei 600 mm/s auftreten.

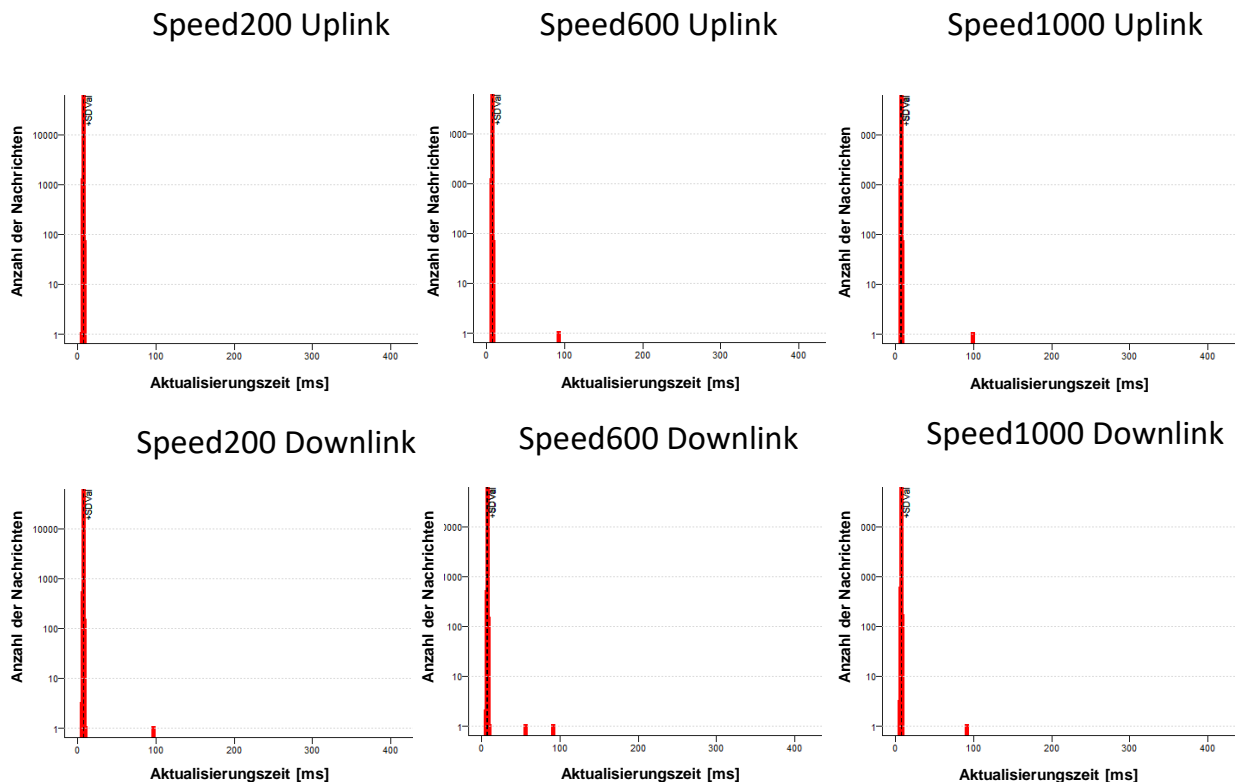


Abbildung 5.14: 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink Update Time

In Tabelle 14 wird ersichtlich, dass die Übertragungszeiten beim Downlink größer als beim Uplink sind.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200 Uplink	0,5	0,5	0,6	5,5	7	0,1
Speed200 Downlink	1	1,1	1,2	5,3	7	0,3
Speed400 Uplink	0,5	0,5	0,6	5,8	7	0,3
Speed400 Downlink	1	1,1	1,2	5,4	7	0,1
Speed600 Uplink	0,5	0,5	0,6	5,6	7	0,3
Speed600 Downlink	1	1,1	1,2	5,1	7	0,3
Speed800 Uplink	0,5	0,5	0,6	5,2	7	0,3
Speed800 Downlink	1	1,1	1,2	4,2	7	0,3
Speed1000 Uplink	0,5	0,5	0,6	5,7	7	0,3
Speed1000 Downlink	1	1,1	1,2	5,2	7	0,3

Tabelle 14: Statistische Werte für 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200 Uplink	99990	99990	0	0
Speed200 Downlink	99990	99977	1.30e-04	13
Speed400 Uplink	99991	99978	1.30e-04	13
Speed400 Downlink	99991	99991	0	0
Speed600 Uplink	99991	99979	1.20e-04	12
Speed600 Downlink	99991	99972	1.90e-04	12
Speed800 Uplink	99997	99985	1.20e-04	12
Speed800 Downlink	99997	99984	1.30e-04	13
Speed1000 Uplink	99997	99984	1.30e-04	13
Speed1000 Downlink	99997	99985	1.20e-04	12

Tabelle 15: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Umleitung Downlink und Uplink

5.5 Messung mit Reflexionsflächen

Bei diesem Messversuch wurden Reflexionsflächen in der Nähe der Startposition des FTF aufgestellt (s. Abbildung 5.15, Abbildung 5.17 und Abbildung 5.19). Die Nachrichten mit einer Nachrichtenlänge von 60 Byte wurden vom Client zum Access-Point übertragen (Uplink).

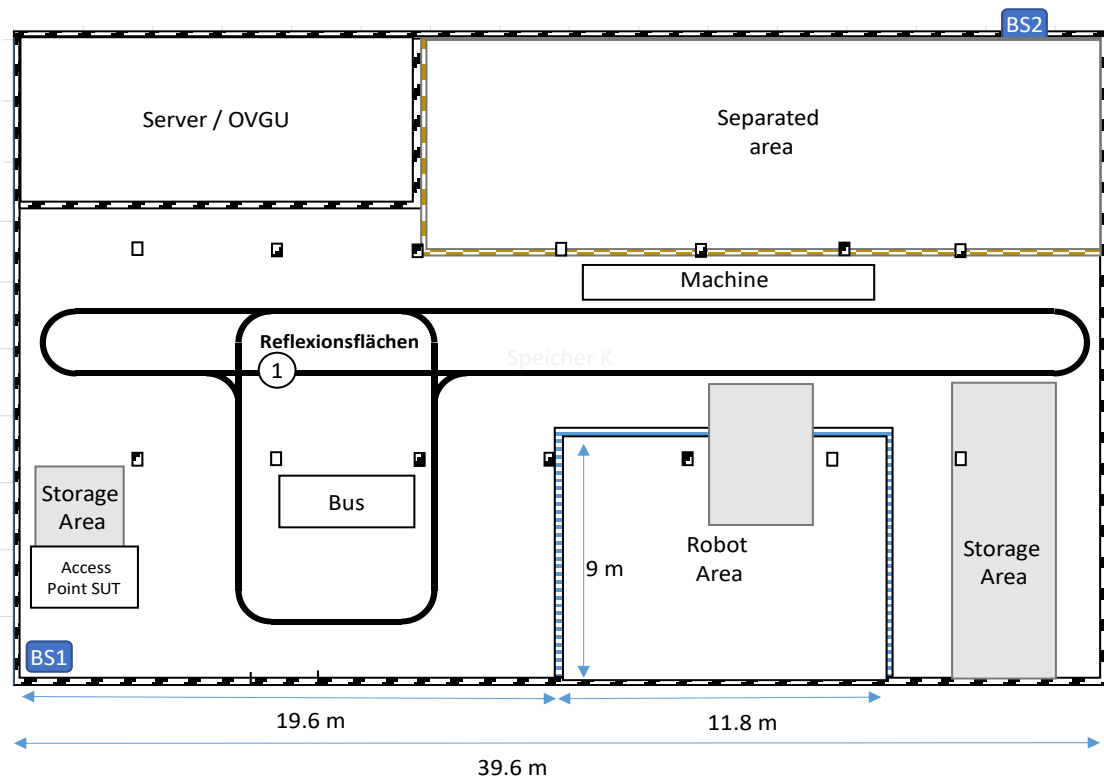


Abbildung 5.15: Reflexionsflächen links neben der Startposition [18]

In Abbildung 5.16 ist zu erkennen, dass größere Geschwindigkeiten keinen großen Einfluss auf die Übertragungszeit und Aktualisierungszeit haben. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen im SRD-Band sind die Aktualisierungszeiten größer, durch verschiedene Effekte wie der Reflexion.

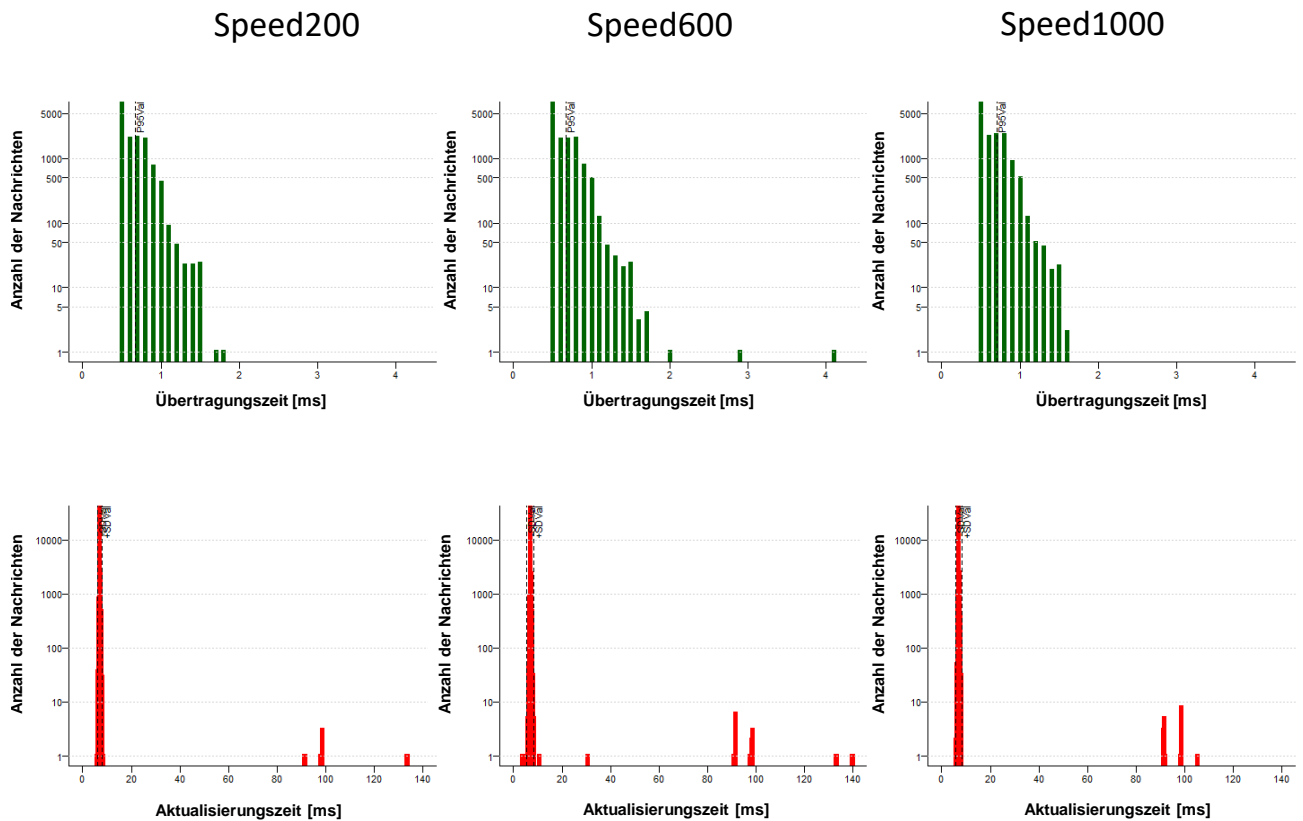


Abbildung 5.16: Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen links

Die Tabellen 16 und 17 zeigen, dass die Erhöhung der Geschwindigkeit keinen aussagekräftigen Einfluss hat. Die Mindestaktualisierungszeit ist bei Speed600 zwar kleiner, aber hat dafür Nachrichten mit längeren Aktualisierungszeiten. Außerdem gehen die meisten Nachrichten bei 600 mm/s verloren und nicht bei der höheren Geschwindigkeit von 1000 mm/s.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,5	0,5	0,7	5,8	7	1,1
Speed600	0,5	0,5	0,7	3,4	7	1,5
Speed1000	0,5	0,5	0,7	5,9	7	1,3

Tabelle 16: Statistische Werte für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen links

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99998	99842	1.56e-03	18
Speed600	99998	99698	3.00e-03	19
Speed1000	99998	99709	2.89e-03	14

Tabelle 17: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen links

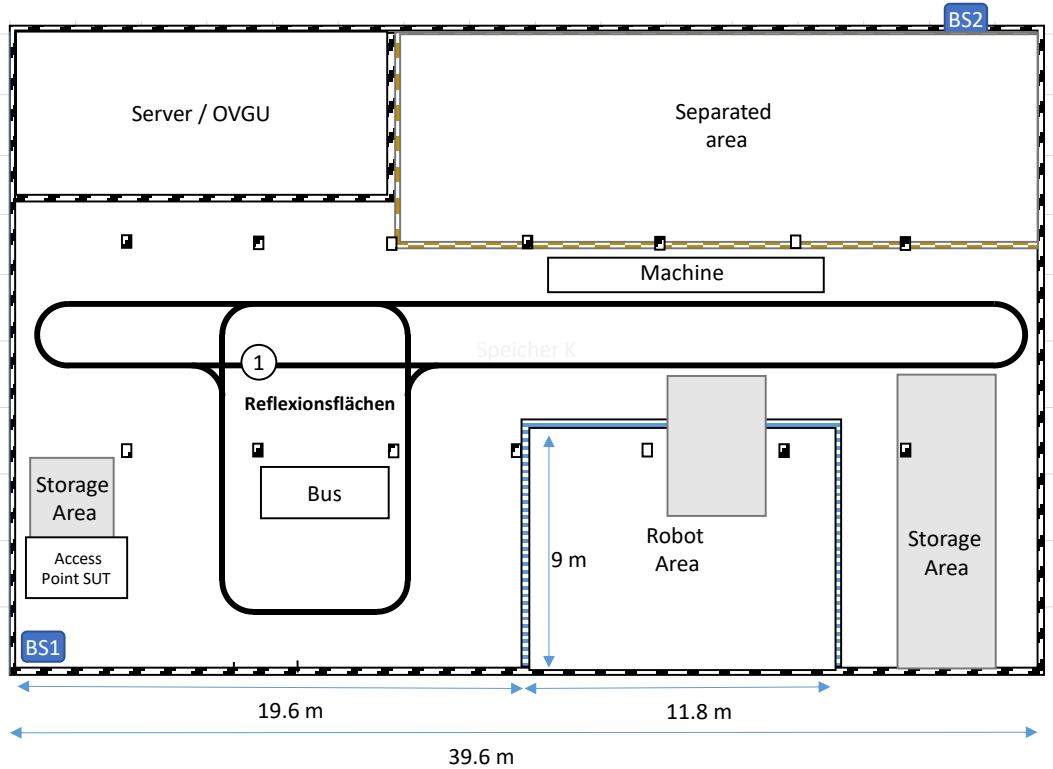


Abbildung 5.17: Reflexionsflächen rechts neben der Startposition [18]

In Abbildung 5.18 ist die Aktualisierungszeit bei der Geschwindigkeit von 200 mm/s am auffälligsten. Es sind zwar weniger Nachrichten mit längeren Aktualisierungszeiten als bei den höheren Geschwindigkeiten, aber dafür sind bei 200 mm/s Nachrichten mit Aktualisierungszeiten bis zu 140 mm/s aufgetreten. Die höchste Aktualisierungszeit bei 600 mm/s und 1000 mm/s beträgt 100 ms.

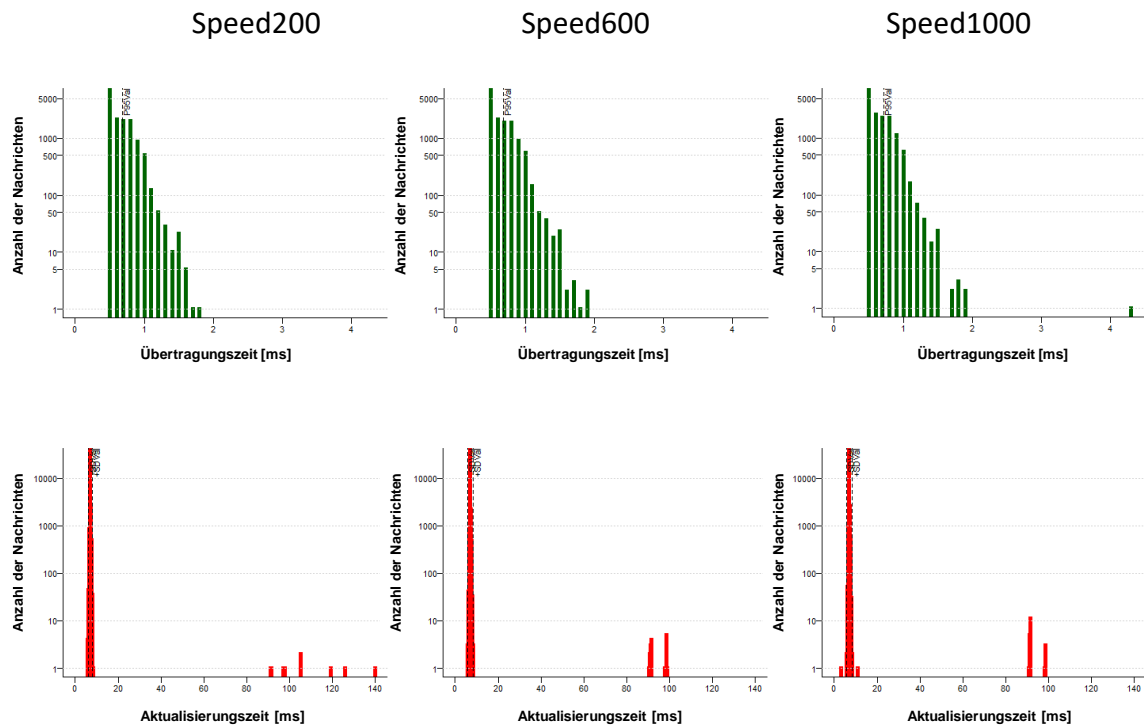


Abbildung 5.18: Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen rechts

In Tabelle 19 ist zu sehen das bei der Geschwindigkeit von 200 mm/s die häufigsten verlorenen Nachrichten vorkommen. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Funkverbindung nicht von der Geschwindigkeit, sondern von der Position abhängig ist. Aber die MLR ist bei 1000 mm/s am größten.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,5	0,5	0,7	5,7	7	1
Speed600	0,5	0,5	0,7	5,6	7	1,3
Speed1000	0,5	0,5	0,7	3,2	7	1,3

Tabelle 18: Statistische Werte für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen rechts

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99998	99854	1.44e-03	19
Speed600	99998	99739	2.59e-03	13
Speed1000	99998	99705	2.93e-03	13

Tabelle 19: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen rechts

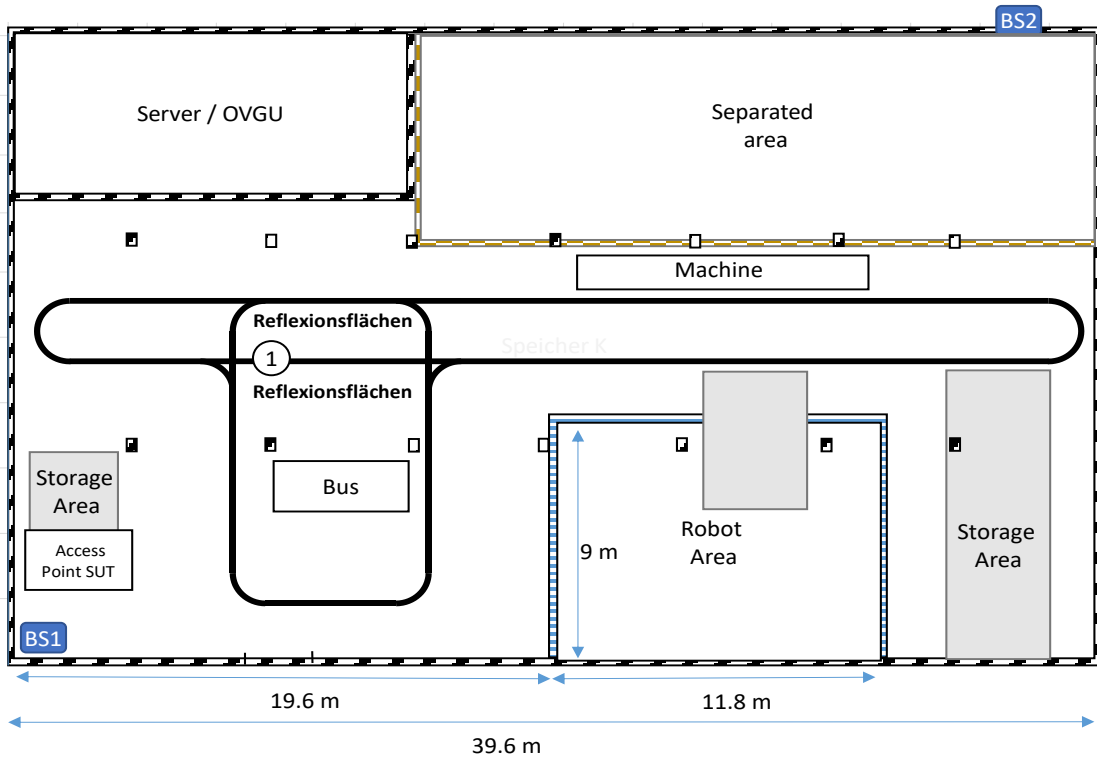


Abbildung 5.19: Reflexionsflächen auf beiden Seiten neben der Startposition [18]

In der folgenden Abbildung ist ersichtlich, dass die Übertragungs- und Aktualisierungszeit bei 600 mm/s größer sind als bei 200 mm/s. Außerdem haben mehrere Nachrichten eine längere Aktualisierungszeit. Aber beim Vergleich zwischen den Geschwindigkeiten 600 mm/s und 1000 mm/s ist keine deutliche Verschlechterung zu erkennen.

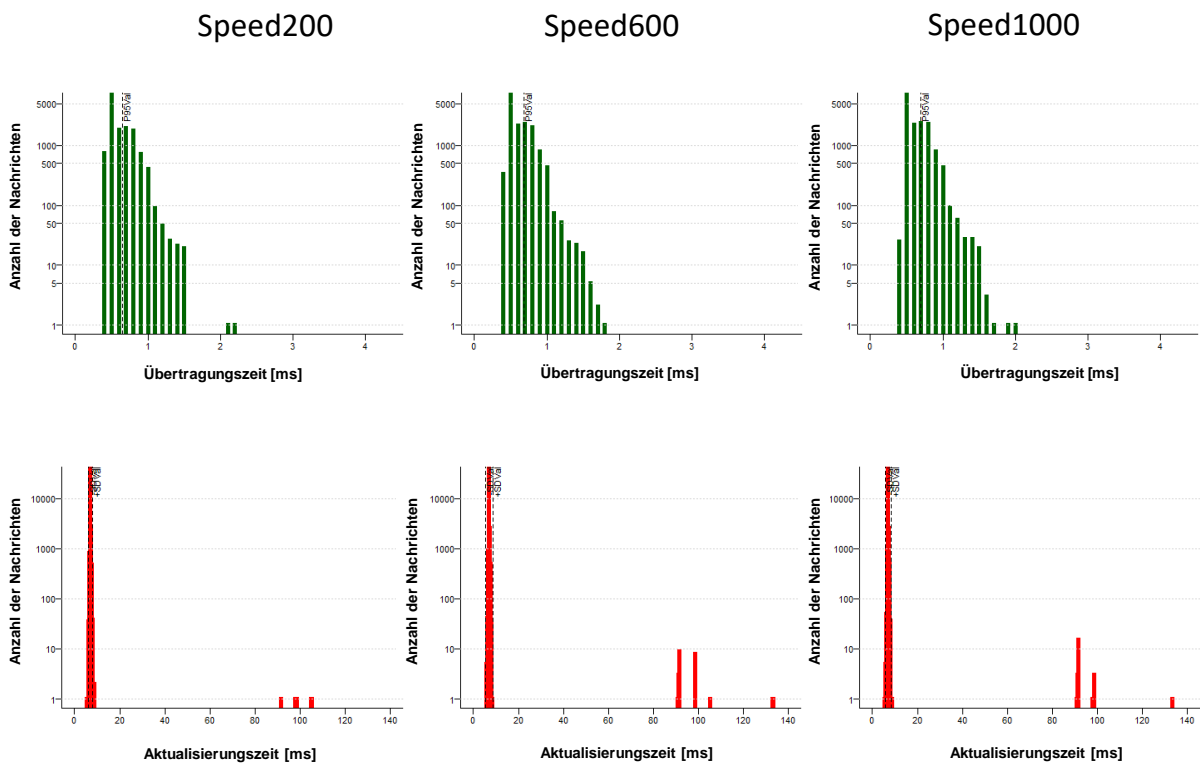


Abbildung 5.20: Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen auf beiden Seiten

Die statistischen Werte in Tabelle 20 zeigen keine Auffälligkeiten gegenüber den beiden vorherigen Versuchen.

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,4	0,5	0,7	5,3	7	0,8
Speed600	0,4	0,5	0,7	5,7	7	1,5
Speed1000	0,4	0,5	0,7	5,5	7	1,4

Tabelle 20: Statistische Werte für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen auf beiden Seiten

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99998	99891	1.07e-03	14
Speed600	99998	99651	3.47e-03	18
Speed1000	99998	99675	3.23e-03	18

Tabelle 21: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für Nachrichtenlänge 60 Byte mit Reflexionsflächen auf beiden Seiten

6 Fazit und Ausblick

Durch die Messungen wurden verschiedene Erkenntnisse gewonnen. Die Geschwindigkeit hat keinen bedeutsamen Einfluss auf die Messwerte, da die Geschwindigkeit zu gering ist. Bei späteren Versuchen müssten höhere Geschwindigkeiten genutzt werden, um Effekte, wie z. B. die Dopplerverschiebung nachzuweisen. Als weiteres wurden wenig Nachrichtenverluste oder verspätet angekommene Nachrichten für die gesamte Testreihe nachgewiesen. Bei der Nachrichtenlänge lässt sich ein Einfluss erkennen. So werden lange Nachrichten mit weniger Fehlern übertragen als kurze Nachrichten. Der Grund hierfür konnte nicht ermittelt werden, es wird aber vermutet, dass hier die Implementierungen der Komponenten des Funknetzwerkes eine große Rolle spielen.

Im Vergleich zu den anderen Messungen zeigt der Versuch mit den Reflexionsflächen größere Aktualisierungszeiten. Dies bedeutet, es sind mehr Nachrichten in Folge gestört. Solche Störungen entstehen durch verschiedene Effekte wie Fast-Fading, Abschattung und Reflexionen.

Durch größere Entfernung oder Hindernisse entstehen eher störende Einflüsse und führen zu positionsabhängigen Beeinträchtigungen. Diese Effekte wirken sich oft stärker bei langsamen Geschwindigkeiten aus, weil das FTF sich länger an diesen kritischen Stellen aufhält. Bei der Funkkommunikation lässt sich erkennen, dass Störungen häufiger als Bursts, also direkt hintereinander erscheinen. Dies lässt sich gut an den zumeist langen Aktualisierungszeiten erkennen.

Trotz der geringeren Sendeleistung von 25 mW ist das SRD-Band eine gute Alternative zu den vorgegebenen regulären WLAN-Bändern. Außerdem hat man den Vorteil gegenüber anderen WLAN-Bändern, keine Störminderungstechniken verwenden zu müssen. Das bedeutet der Sender muss den Kanal vor der Übertragung nicht abhören und gegeben falls warten. Einer der Gründe dafür ist, dass das SRD-Band nicht so ausgiebig wie die regulären WLAN-Bänder genutzt wird.

Zu berücksichtigen ist das im Speicher K parallel zu den Messungen weitere Versuche stattfanden und mehrere Personen sich in der Umgebung aufhielten. Durch diese Faktoren waren die Bedingungen nicht konstant. Außerdem wurden in einem abgegrenzten Bereich Werkstattarbeiten ausgeführt, was auch zur Beeinflussung der Messergebnisse geführt haben kann.

7 Nachwort

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinem Betreuer André Gnad, der mir bei Fragen mit Rat und Tat zur Seite stand und meiner Familie bedanken.

Das Schreiben dieser Arbeit war für mich sehr lehrreich. Dadurch konnte ich Erfahrungen im wissenschaftlichen Arbeiten sammeln und die Arbeit eines Ingenieurs besser kennenlernen.

Der von mir im Januar erstellte Plan, hat sich im Laufe dieses Prozesses nach hinten verschoben. Durch die vielen Messungen wurde die Zeit knapp. So würde ich beim nächsten Mal darauf achten, die gesamte Messung besser durchzuplanen und dementsprechend nicht zu viele Messungen zu einer Messreihe durchzuführen. Die aus den Messungen gewonnenen Ergebnisse des Versuchs sind für das ifak erkenntnisreich. Auch die Arbeit am FTF nutzt dem ifak.

Die Erkenntnisse aus den Messungen, das FTF sowie das Steuerprogramm werden für weitere Untersuchungen genutzt.

Antonio Ashok Wodcke

März 2022

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesnetzagentur, *Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen geringer Reichweite (SRD)*, Bundesnetzagentur, 2020.
- [2] D. L. R. André Gnad, *Consulting zum Einsatz von industriellem WLAN im 5-GHz-Band im*, Magdeburg, 2018.
- [3] ECC, „ECC Report 206 Compatibility studies in the band 5725-5875 MHz between SRD equipment for wireless industrial applications and other systems,“ ECC, 2014.
- [4] Freifunk-Franken, „Freifunk-Franken,“ 21 Juli 2021. [Online]. Available: https://wiki.freifunk-franken.de/w/WLAN_Frequenzen. [Zugriff am 14 März 2022].
- [5] VDI/VDE, *VDI/VDE 2185 Blatt1 / Part 1 Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik Anforderungen und Grundlagen*, August 2020.
- [6] T. Schneider, *Unternehmensintegrierter Masterstudiengang Informations- und Kommunikationstechnik Modul Systeme der Funktechnik*, 2006.
- [7] „Wikipedia,“ 27 Mai 2020. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Fading_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Fading_(Elektrotechnik)). [Zugriff am 29 03 2022].
- [8] IEC, *IEC: Industrial communication networks - Wireless communication networks - Part 2: Coexistence management, IEC 62657-2*.
- [9] S. Willman, *Fachgruppe 1 "Anwendungen, Anforderungen und Validierung" im BMBF-Förderprogramm "IKT 2020 - Zuverlässige drahtlose Kommunikation in der Industrie" (BZKI) Aspekte der Zuverlässigkeitsbewertung in ZDKI*, Magdeburg, 2018.
- [10] DKE, „dke.de,“ DKE Wörterbuch, [Online]. Available: <https://www2.dke.de/de/Online-Service/DKE-IEV/Seiten/IEV-Woerterbuch.aspx>. [Zugriff am 01 März 2022].
- [11] VDI/VDE, *VDI/VDE 2185 Blatt 4 Entwurf Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik Messtechnische Performancebewertung von Funklösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen*, VDI/VDE, 2016.
- [12] D. L. R. S. W. T. O. André Gnad, *Verteiltes Testsystem zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Kommunikationssystemen für Industrie 4.0 Anwendungen*, Magdeburg, 2017.
- [13] J. Gunreben, „Was ist CSV? Einfach erklärt,“ Chip, 22 08 2015. [Online]. Available: https://praxistipps.chip.de/was-ist-csv-einfach-erklart_42907. [Zugriff am 04 März 2022].
- [14] D. L. R. Antonio Ashok Wodcke, *Spezifikation zum Test der Funkkommunikation mit fahrerlosen Transportfahrzeugen*, Magdeburg, 2021.
- [15] „Trackeditor,“ Götting, [Online]. Available: <https://www.goetting.de/trackeditor/>. [Zugriff am 3 Februar 2022].
- [16] Hirschmann, *Anwender-Handbuch Konfigurationsleitfaden OpenBAT-Familie*, Hirschmann, 2014.
- [17] D. L. R. André Gnad, *Funk-Transfer-Tester Overview*, Magdeburg, 2021.

- [18] ifak, *Spezifikation zum Test der Funkkommunikation mit fahrerlosen Transportfahrzeugen*, Magdeburg, 2021.
- [19] Hirschmann, „BAT-ANT-N-3AGN-IP67 (10pcs) Technical Data Sheet,“ 2021.
- [20] A. Tamas, *Grundrisszeichnung Halle Grundriss*, Magdeburg, 2009.
- [21] A. Tamas, *Grundrisszeichnung Halle Detailansichten*, Magdeburg, 2009.
- [22] python-lernen.de, „python-lernen.de,“ [Online]. Available: <https://www.python-lernen.de/csv-datei-einlesen.htm>. [Zugriff am 21 Februar 2022].
- [23] T. Ito, „Funkkommunikationssystem für mobile Objekte und in dem System verwendete Funkkommunikation-Mobilstation“. Japan Patent DE19843664A1, 1997.
- [24] A. G. A. W. Christian Hoene, „Measuring the Impact of Slow User Motion on Packet Loss and Delay over IEEE 802.11b Wireless Links,“ in *28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2003. LCN '03. Proceedings*, Bonn/Königswinter, Deutschland, 2003.
- [25] M. H. S. C. H.-K.-R. J. L. Y. L. S. B. M. Keon Jang, „3G and 3.5G wireless network performance measured from moving cars and high-speed trains,“ *MICNET '09: Proceedings of the 1st ACM workshop on Mobile internet through cellular networks*, pp. 19-24, 21 September 2009.
- [26] Götting, *Gerätebeschreibung HG G-08230YA FLM01*.
- [27] D. Bastert, „Focus.de,“ [Online]. Available: https://praxistipps.focus.de/umfang-berechnen-kreis-rechteck-quadrat-dreieck-formel_130199. [Zugriff am 30 März 2022].

Anhang

Anhangsverzeichnis

A.1	Bilder der Halle.....	VIII
A.2	Bilder der Reflexionsflächen	X
A.3	Messergebnisse	XIII
A.4	Prüfung der Genauigkeit der Synchronisation	XXVII

A.1 Bilder der Halle

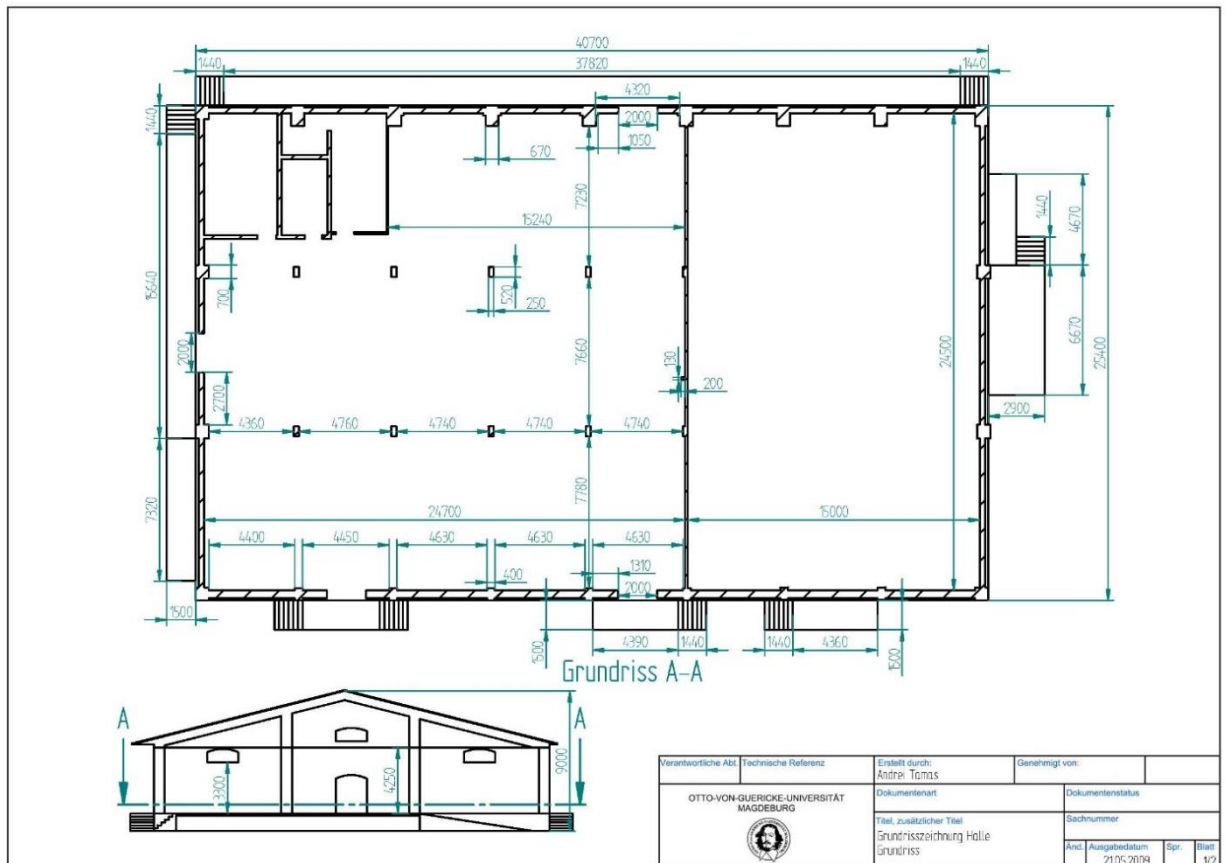


Abbildung A.1: Maße der Halle [20]

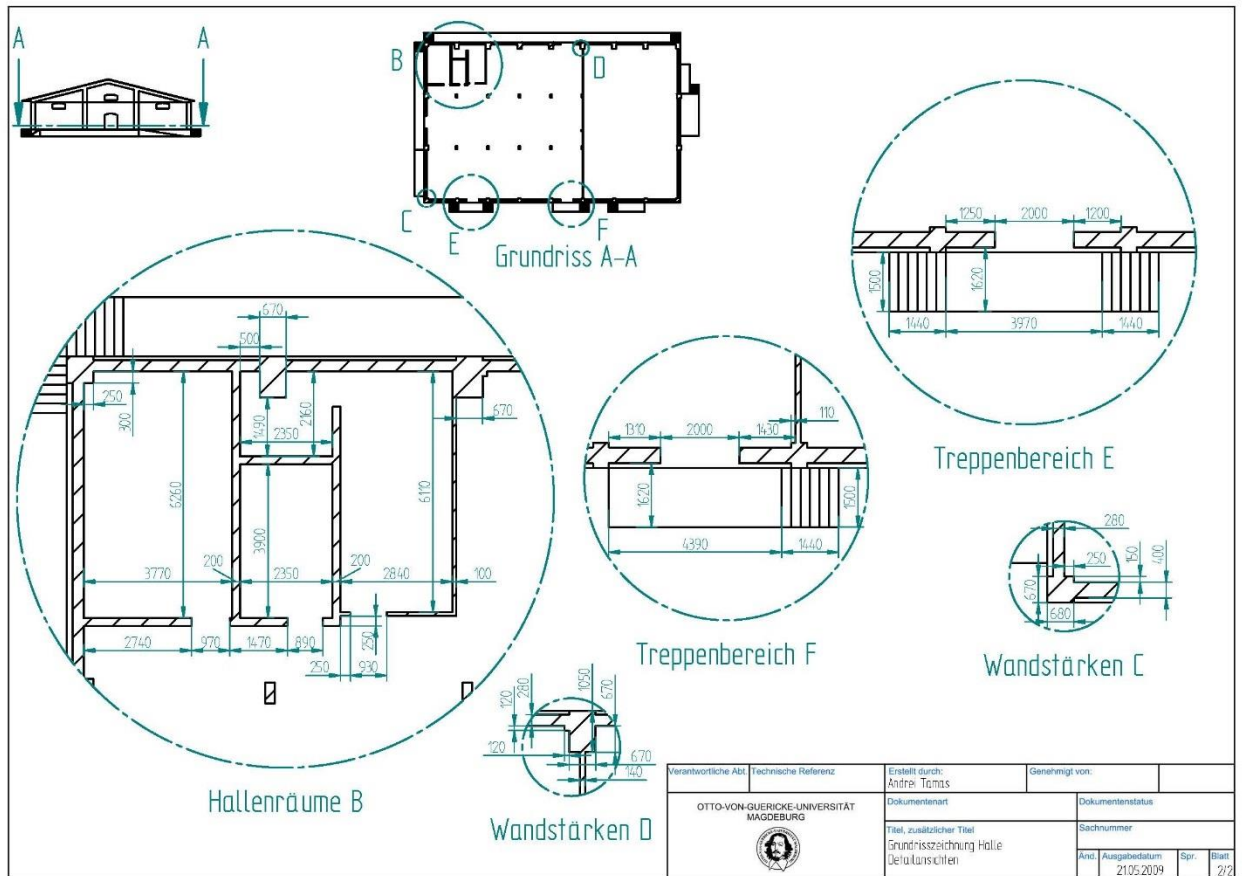


Abbildung A.2: Detailansichten der Halle [21]

A.2 Bilder der Reflexionsflächen



Abbildung A.3: Aufbau der Reflexionsflächen auf beiden Seiten



Abbildung A.4: Aufbau der Reflexionsflächen auf beiden Seiten 2



Abbildung A.5: Aufbau der Reflexionsflächen auf beiden Seiten mit dem FTf



Abbildung A.6: Aufbau der Reflexionsflächen auf der rechten Seite des Startpunktes



Abbildung A.7: Aufbau der Reflexionsflächen auf der linken Seite des Startpunktes

A.3 Messergebnisse

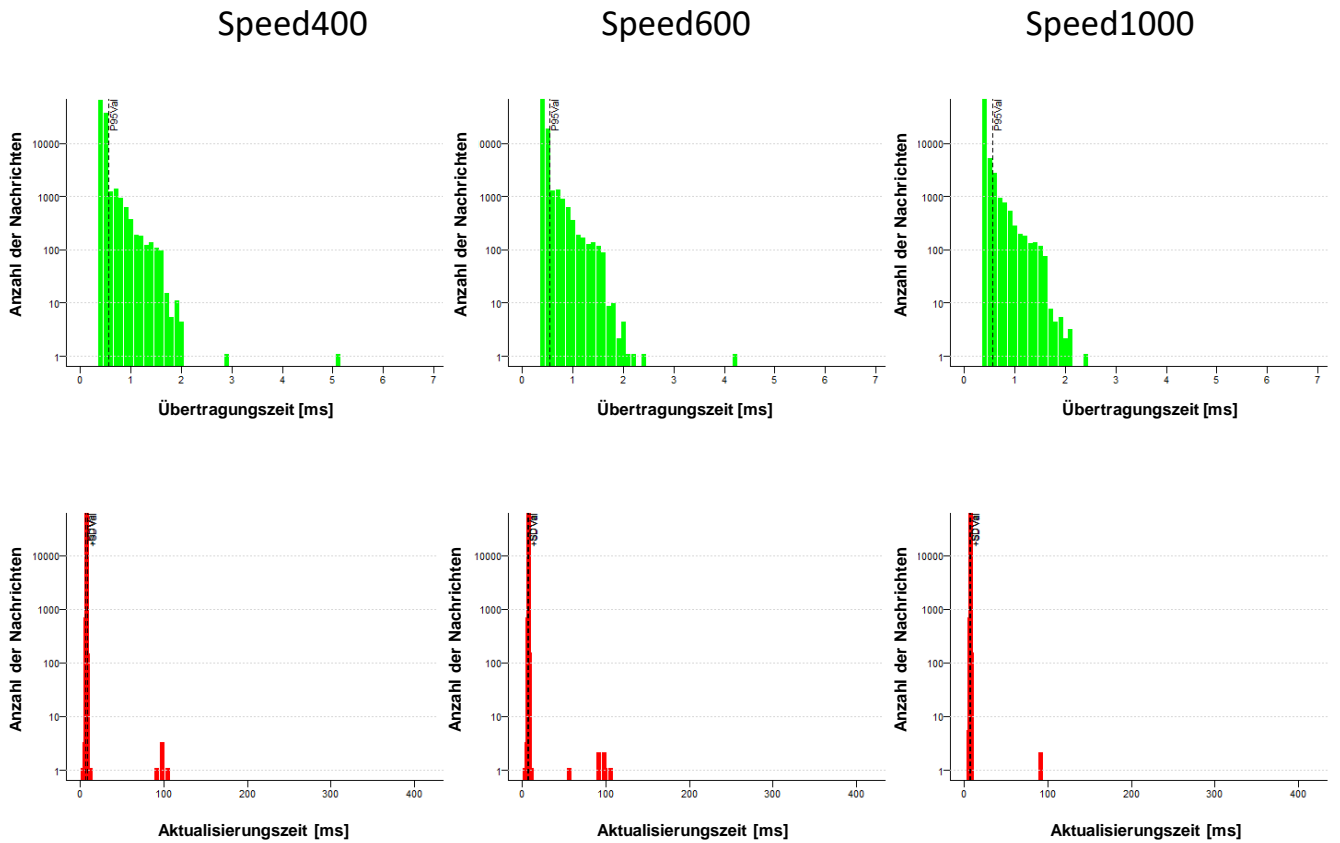


Abbildung A.8: 60 Byte Hauptstrecke Downlink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,4	0,4	0,6	5,3	7	0,7
Speed400	0,4	0,4	0,6	2,3	7	0,8
Speed600	0,4	0,4	0,5	3,3	7	0,7
Speed1000	0,4	0,4	0,6	5,2	7	0,5

Tabelle A.1: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99997	99928	6.90e-04	15
Speed400	99997	99895	1.02e-03	14
Speed600	99997	99913	8.40e-04	14
Speed1000	99997	99961	3.60e-04	12

Tabelle A.2: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink

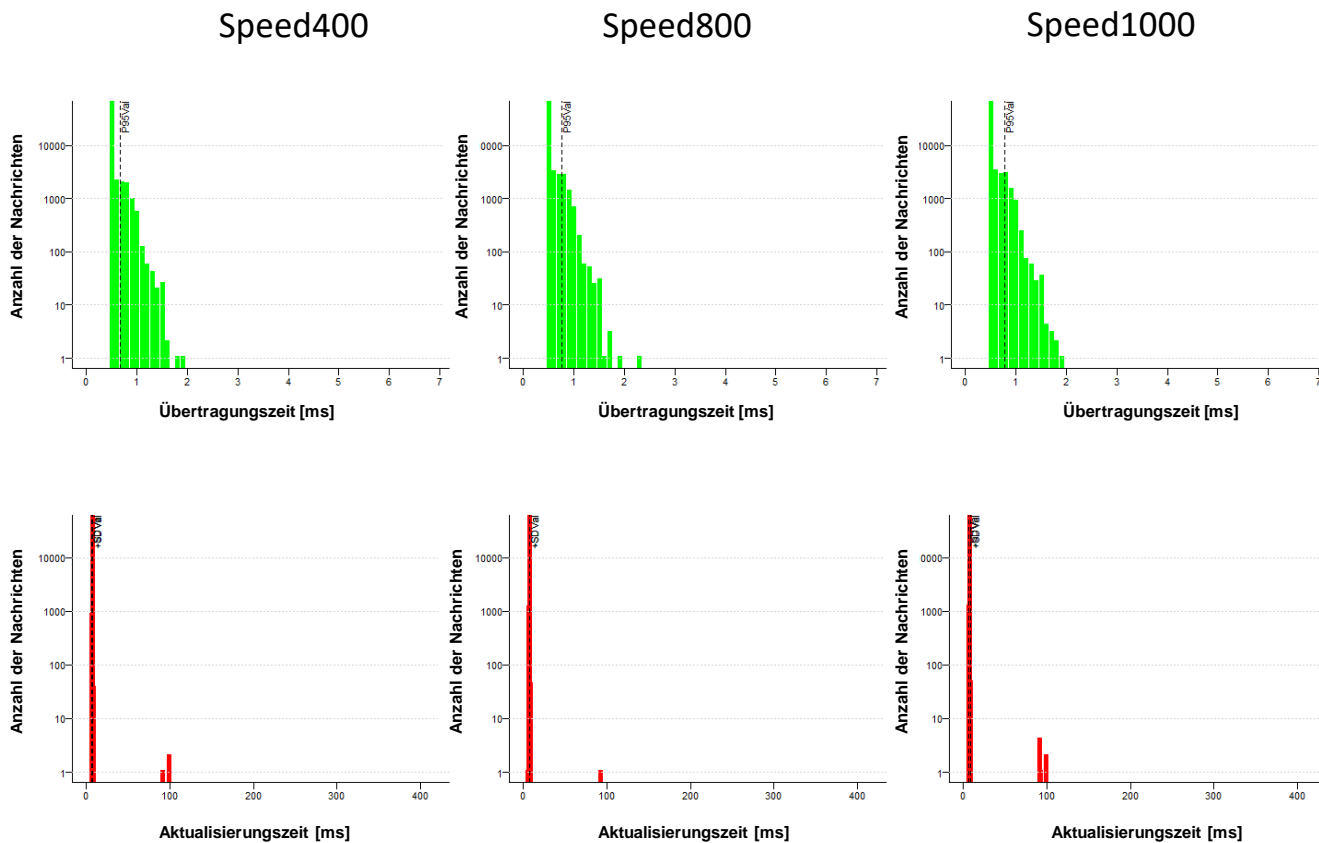


Abbildung A.9: 60 Byte Hauptstrecke Uplink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,5	0,5	0,7	5,6	7	0,6
Speed400	0,5	0,5	0,7	5,6	7	0,5
Speed600	0,5	0,5	0,7	3,4	7	0,5
Speed800	0,5	0,5	0,8	5,2	7	0,3
Speed1000	0,5	0,5	0,8	5,6	7	0,8

Tabelle A.3: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99997	99934	6.30e-04	13
Speed400	99997	99959	3.80e-04	13
Speed600	99997	99959	3.80e-04	13
Speed800	99997	99985	1.20e-04	12
Speed1000	99997	99887	1.10e-03	13

Tabelle A.4: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Uplink

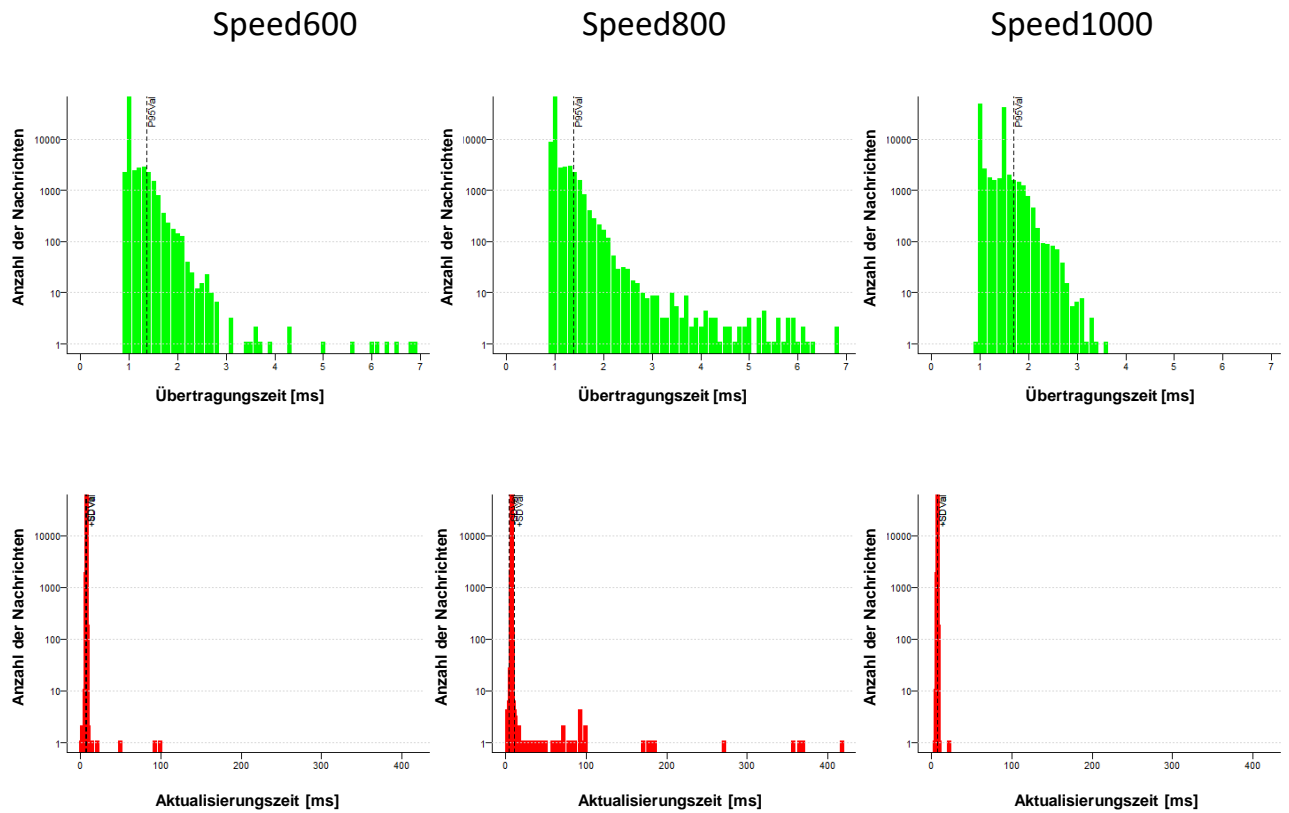


Abbildung A. 10: MAX Hauptstrecke Downlink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,9	1	1,3	4,8	7	0,3
Speed400	0,9	1	1,3	4,8	7	0,4
Speed600	0,9	1	1,4	1	7	0,6
Speed800	0,9	1	1,4	1,2	7	3,1
Speed1000	0,9	1	1,7	4,4	7	0,2

Tabelle A.5: Statistische Werte für MAX Hauptstrecke Downlink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99997	99985	1.20e-04	12
Speed400	99997	99971	2.60e-04	13
Speed600	99990	99929	6.10e-04	13
Speed800	99990	99297	6.93e-03	58
Speed1000	99997	99995	2.00e-05	2

Tabelle A.6: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für MAX Hauptstrecke Downlink

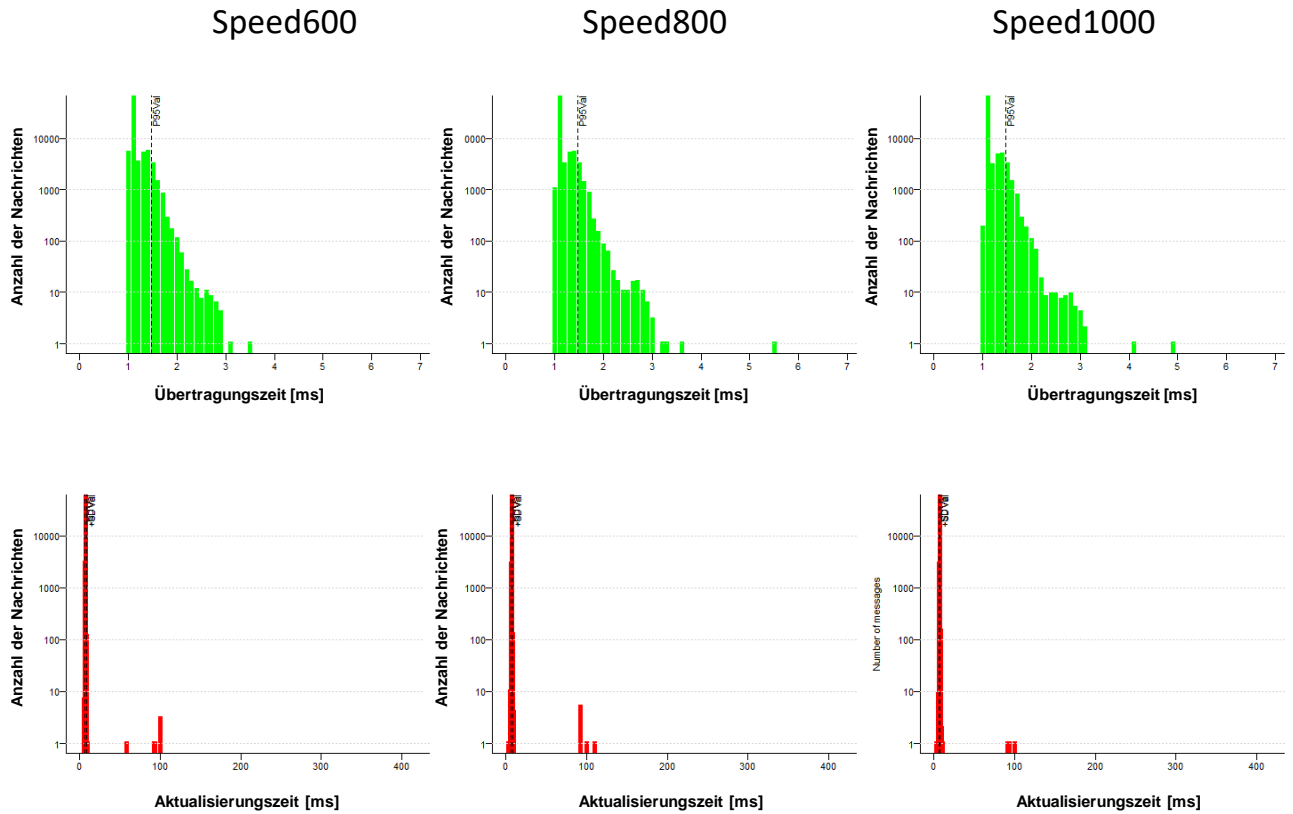


Abbildung A.11: MAX Hauptstrecke Uplink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	1	1	1,6	5	7	0,6
Speed400	1	1,1	1,5	4,8	7	0,8
Speed600	1	1,1	1,5	4,8	7	0,8
Speed800	1	1,1	1,5	2,6	7	0,8
Speed1000	1	1,1	1,5	3,2	7	0,5

Tabelle A.7: Statistische Werte für MAX Hauptstrecke Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99997	99957	4.00e-04	15
Speed400	99997	99922	7.50e-04	23
Speed600	99997	99902	9.50e-04	13
Speed800	99997	99897	1.00e-03	14
Speed1000	99997	99960	3.70e-04	13

Tabelle A.8: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für MAX Hauptstrecke Uplink

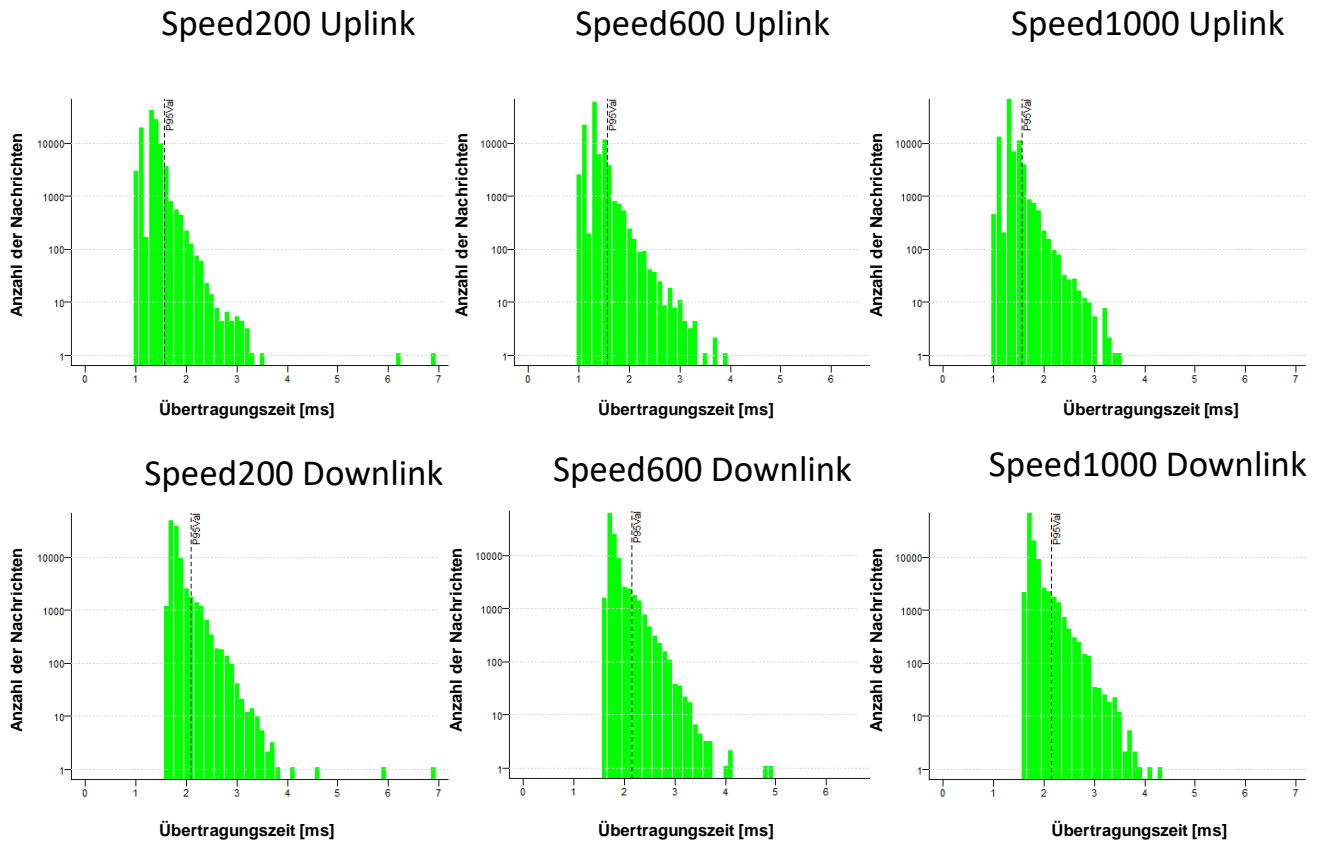


Abbildung A.12: MAX Hauptstrecke Downlink und Uplink Transmission Time

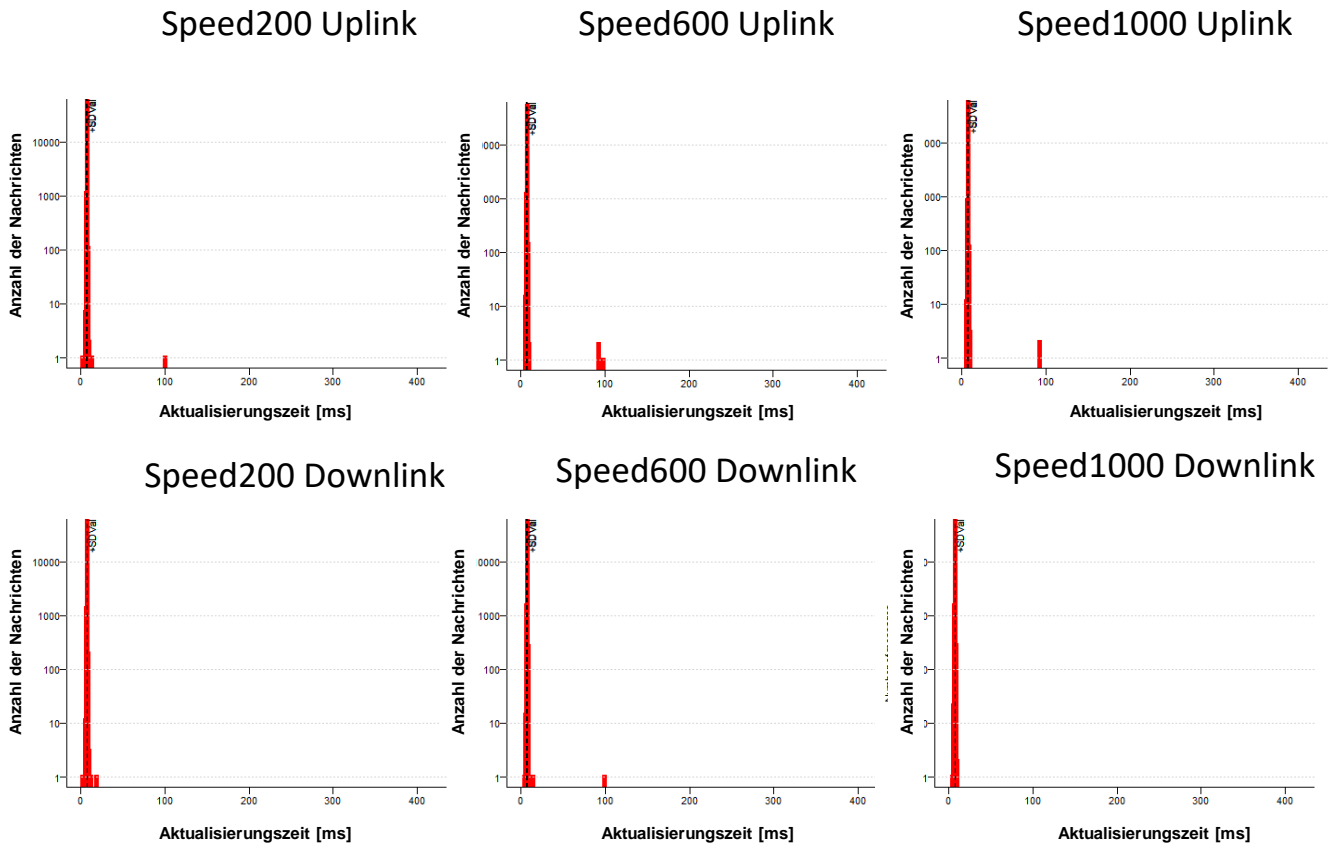


Abbildung A.13: MAX Hauptstrecke Downlink und Uplink Update Time

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200 Uplink	1	1,3	1,6	1,2	7	0,4
Speed200 Downlink	1,6	1,7	2,1	1,9	7	0,2
Speed400 Uplink	1	1,1	1,6	2,3	7	0,5
Speed400 Downlink	1,6	1,7	2,1	3,5	7	0,2
Speed600 Uplink	1	1,1	1,6	4,6	7	0,5
Speed600 Downlink	1,6	1,7	2,1	4	7	0,4
Speed800 Uplink	1	1,3	1,6	3,6	7	0,3
Speed800 Downlink	1,6	1,7	2,1	3,3	7	0,2
Speed1000 Uplink	1	1,3	1,6	4,8	7	0,4
Speed1000 Downlink	1,6	1,7	2,1	4,4	7	0,2

Tabelle A 9: Statistische Werte für MAX Hauptstrecke Downlink und Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200 Uplink	99996	99983	1.30e-04	13
Speed200 Downlink	99996	99995	1.00e-05	1
Speed400 Uplink	99994	99968	2.60e-04	13
Speed400 Downlink	99994	99994	0	0
Speed600 Uplink	99992	99955	3.70e-04	13
Speed600 Downlink	99992	99978	1.40e-04	13
Speed800 Uplink	99997	99985	1.20e-04	12
Speed800 Downlink	99997	99996	1.00e-05	1
Speed1000 Uplink	99989	99965	2.40e-04	12
Speed1000 Downlink	99997	99997	0	0

Tabelle A.10: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für MAX Hauptstrecke Downlink und Uplink

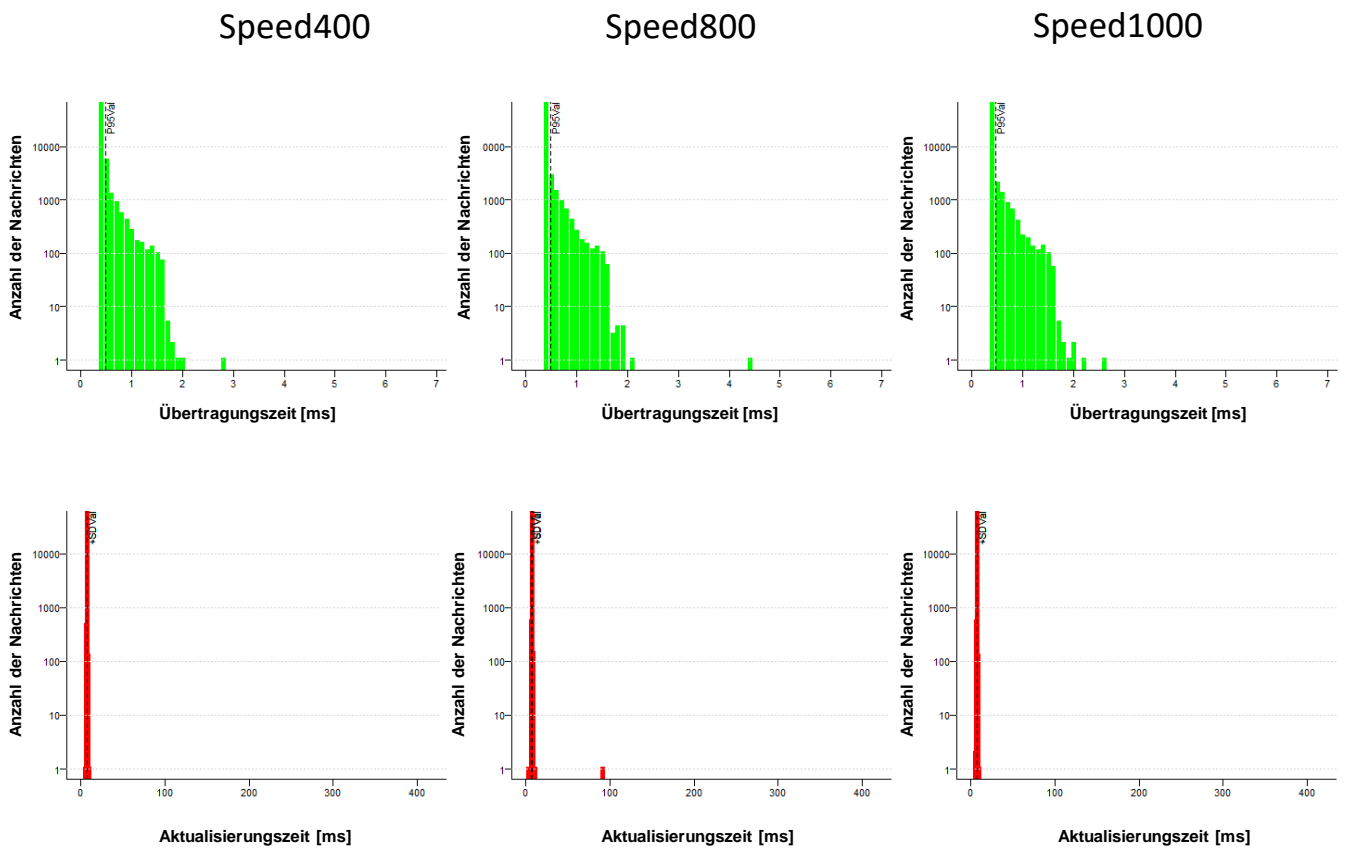


Abbildung A.14: 60 Byte Umleitung Downlink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,4	0,4	0,9	2,6	7	0,1
Speed400	0,4	0,4	0,5	4,7	7	0,1
Speed600	0,4	0,4	0,5	3,8	7	0,1
Speed800	0,4	0,4	0,5	3	7	0,4
Speed1000	0,4	0,4	0,5	4,8	7	0,1

Tabelle A.11: Statistische Werte für 60 Byte Umleitung Downlink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99997	99997	0	0
Speed400	99997	99997	0	0
Speed600	99997	99997	0	0
Speed800	99997	99973	2.40e-04	12
Speed1000	99987	99987	0	0

Tabelle A.12: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Umleitung Downlink

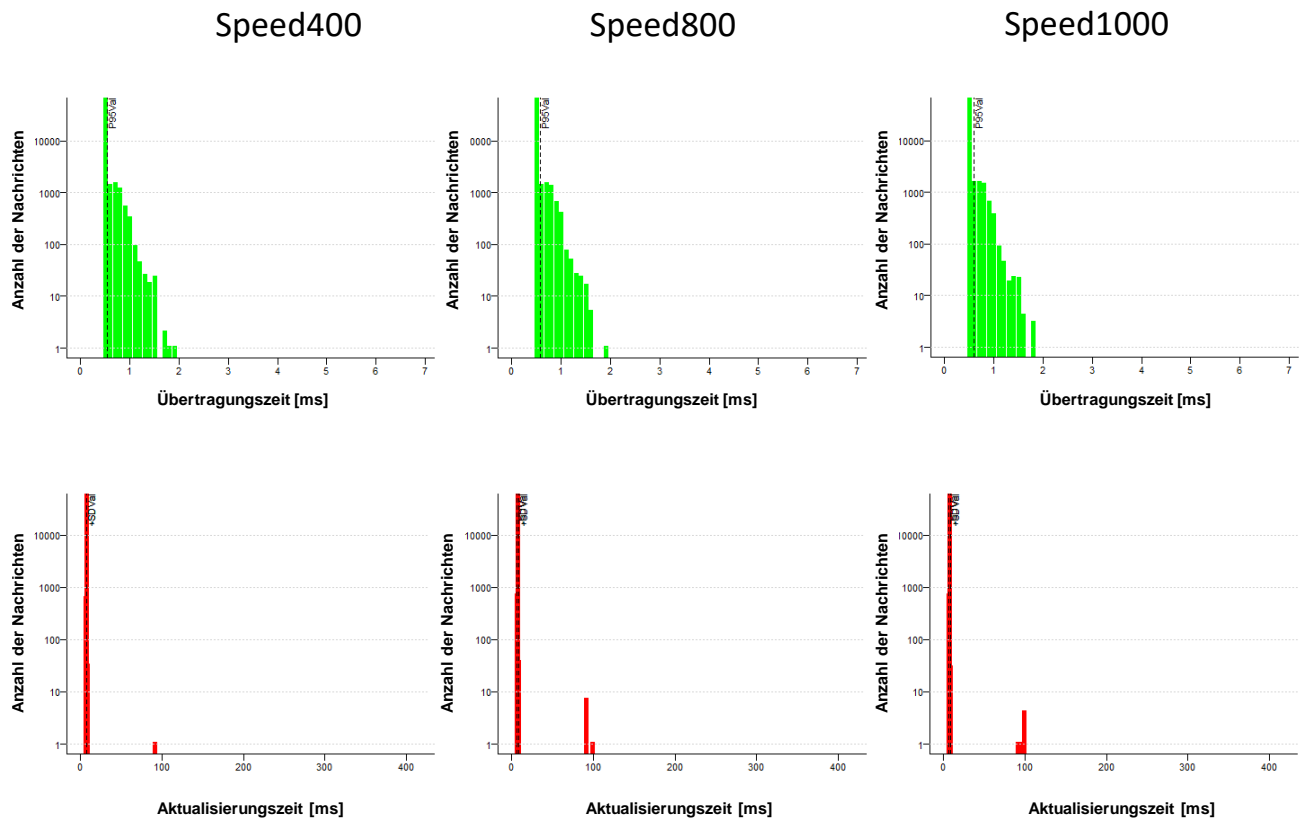


Abbildung A.15: 60 Byte Umleitung Uplink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,5	0,5	0,6	5,6	7	0,3
Speed400	0,5	0,5	0,5	5,6	7	0,3
Speed600	0,4	0,5	0,9	5,6	7	0,5
Speed800	0,5	0,5	0,6	5,6	7	0,9
Speed1000	0,5	0,5	0,6	5,6	7	0,8

Tabelle A.13: Statistische Werte für 60 Byte Umleitung Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99994	99982	1.20e-04	12
Speed400	99997	99985	1.20e-04	12
Speed600	99997	99961	3.60e-04	12
Speed800	99997	99864	1.33e-03	13
Speed1000	99997	99884	1.13e-03	13

Tabelle A.14: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Umleitung Uplink

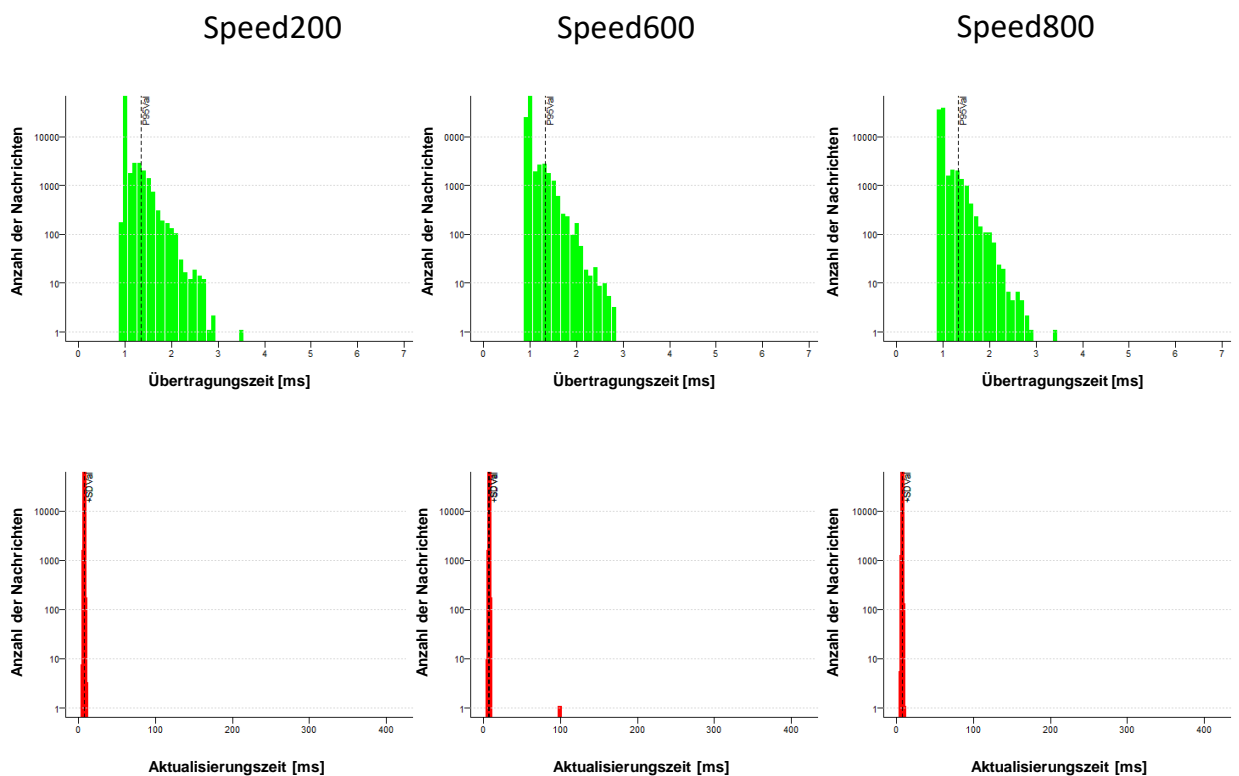


Abbildung A.16: MAX Umleitung Downlink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	0,9	1	1,3	5,1	7	0,2
Speed400	0,9	1	1,3	4,4	7	0,2
Speed600	0,9	1	1,3	5,2	7	0,3
Speed800	0,9	0,9	1,3	5,1	7	0,2

Tabelle A.15: Statistische Werte für MAX Umleitung Downlink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99997	99997	0	0
Speed400	99997	99997	0	0
Speed600	99990	99977	1.30e-04	13
Speed800	76305	76305	0	0

Tabelle A. 16: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für MAX Umleitung Downlink

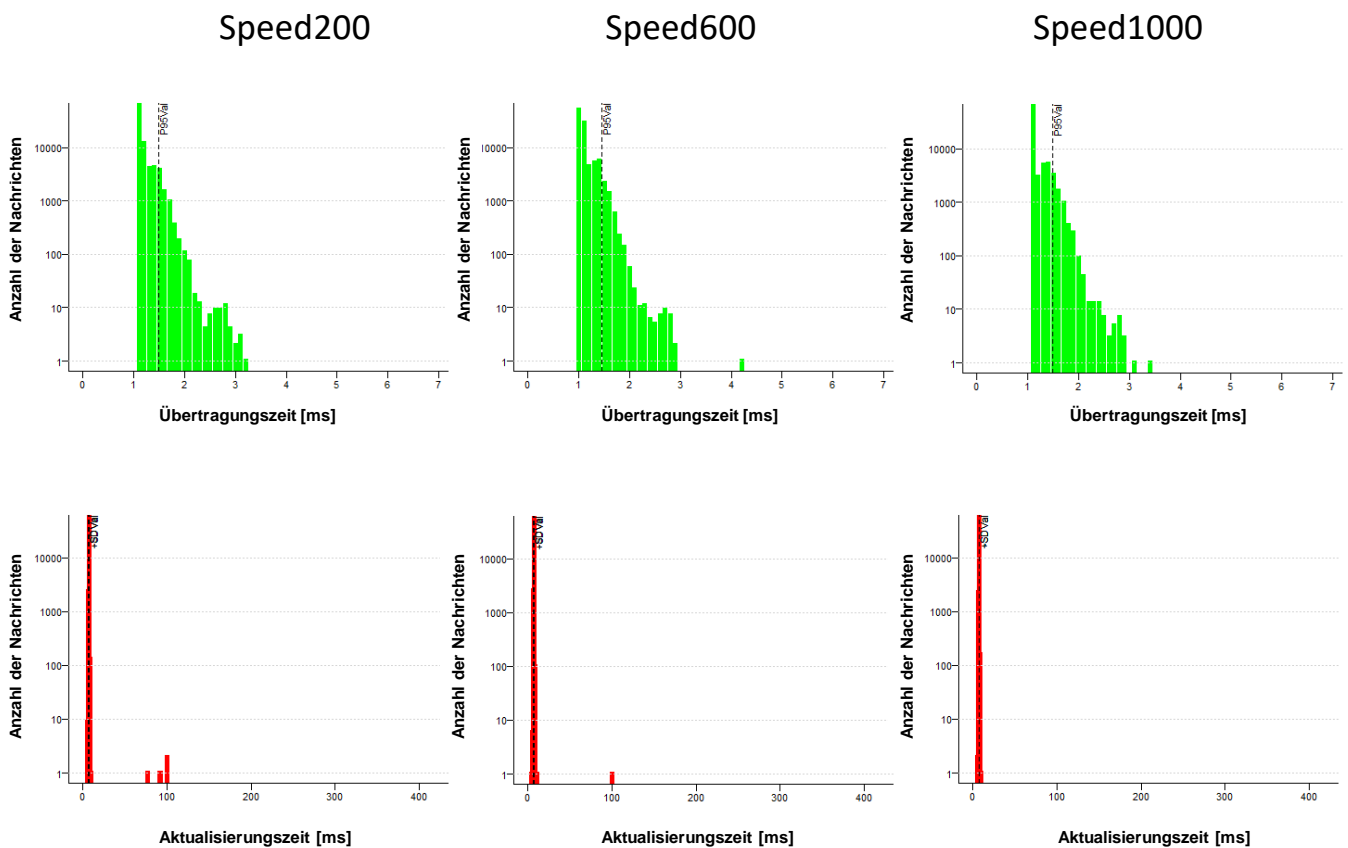


Abbildung A.17: MAX Umleitung Uplink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200	1,1	1,1	1,5	5,1	7	0,7
Speed400	1,1	1,1	1,5	3,4	7	0,7
Speed600	1	1	1,4	3,9	7	0,3
Speed800	1	1	1,5	5	7	0,3
Speed1000	1,1	1,1	1,5	5	7	0,2

Tabelle A.17: Statistische Werte für MAX Umleitung Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200	99987	99915	7.20e-04	13
Speed400	99997	99923	7.40e-04	13
Speed600	99997	99984	1.30e-04	13
Speed800	99997	99984	1.30e-04	13
Speed1000	99997	99997	0	0

Tabelle A.18: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für MAX Umleitung Uplink

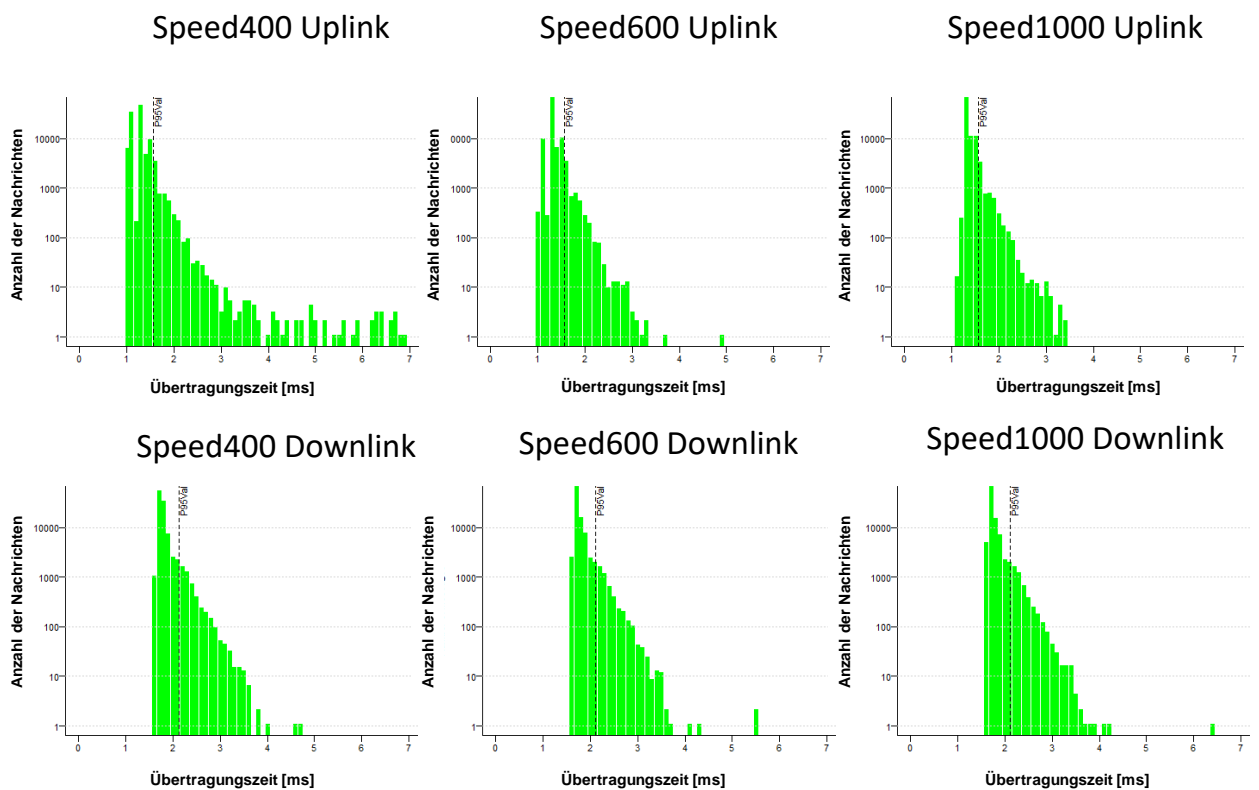


Abbildung A.18 MAX Umleitung Downlink und Uplink Transmission Time

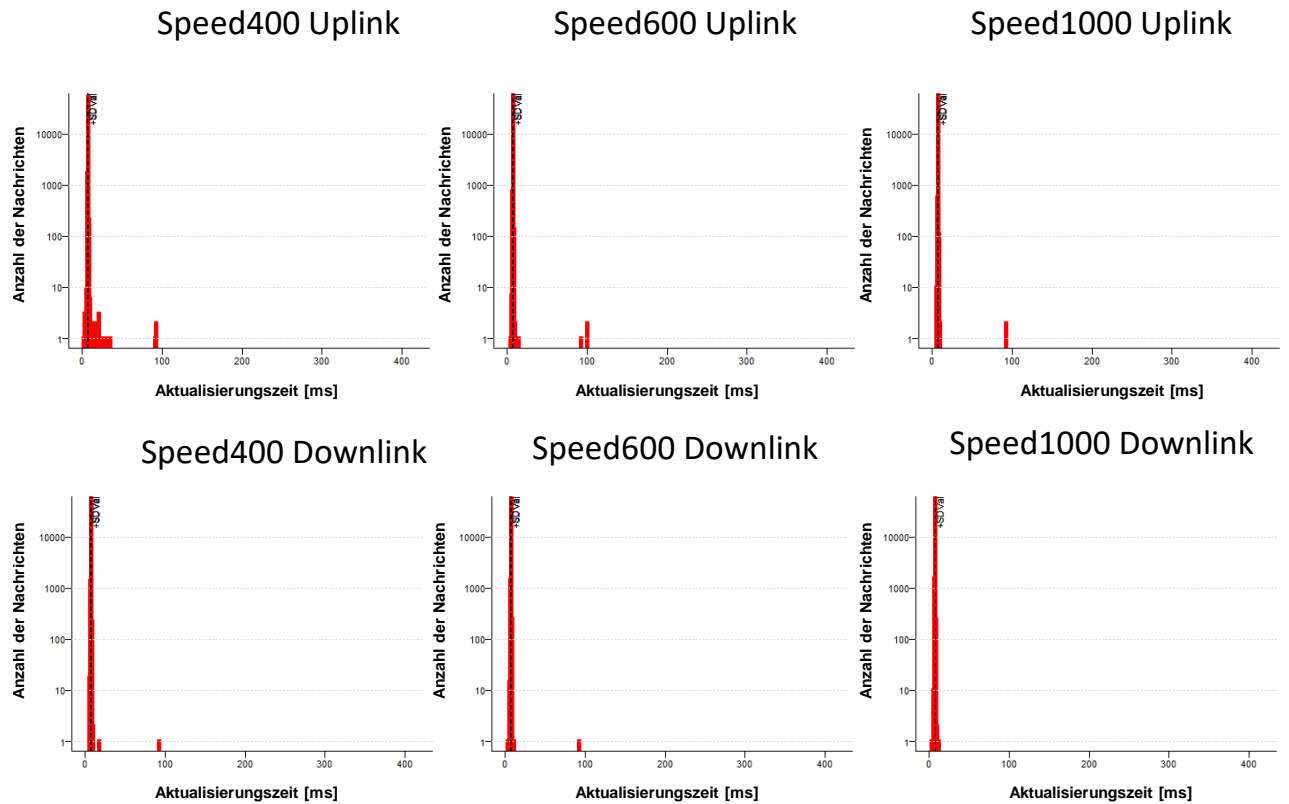


Abbildung A.19: MAX Umleitung Downlink und Uplink Update Time

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Speed200 Uplink	1	1,1	1,8	4,5	7	0,6
Speed200 Downlink	1,6	1,8	2,2	4,7	7	0,2
Speed400 Uplink	1	1,1	1,6	1,3	7	0,6
Speed400 Downlink	1,6	1,7	2,1	4,5	7	0,4
Speed600 Uplink	1	1,3	1,6	3,4	7	0,7
Speed600 Downlink	1,6	1,7	2,1	3,2	7	0,4
Speed800 Uplink	1	1,3	1,6	4,5	7	0,6
Speed800 Downlink	1,6	1,7	2,1	3,9	7	0,2
Speed1000 Uplink	1,1	1,3	1,6	5,1	7	0,6
Speed1000 Downlink	1,6	1,7	2,1	2,4	7	0,2

Tabelle A.19: Statistische Werte für MAX Umleitung Downlink und Uplink

	TX	RX	MLR	CIM
Speed200 Uplink	99997	99946	5.10e-04	13
Speed200 Downlink	99997	99997	0	0
Speed400 Uplink	99991	99897	9.40e-04	12
Speed400 Downlink	99991	99966	2.50e-04	12
Speed600 Uplink	99997	99920	7.70e-04	13
Speed600 Downlink	99996	99972	2.40e-04	12
Speed800 Uplink	99997	99936	6.10e-04	13
Speed800 Downlink	99997	99997	0	0
Speed1000 Uplink	99997	99949	4.80e-04	12
Speed1000 Downlink	99997	99997	0	0

Tabelle A.20: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für MAX Umleitung Downlink und Uplink

Mit einer Antenne

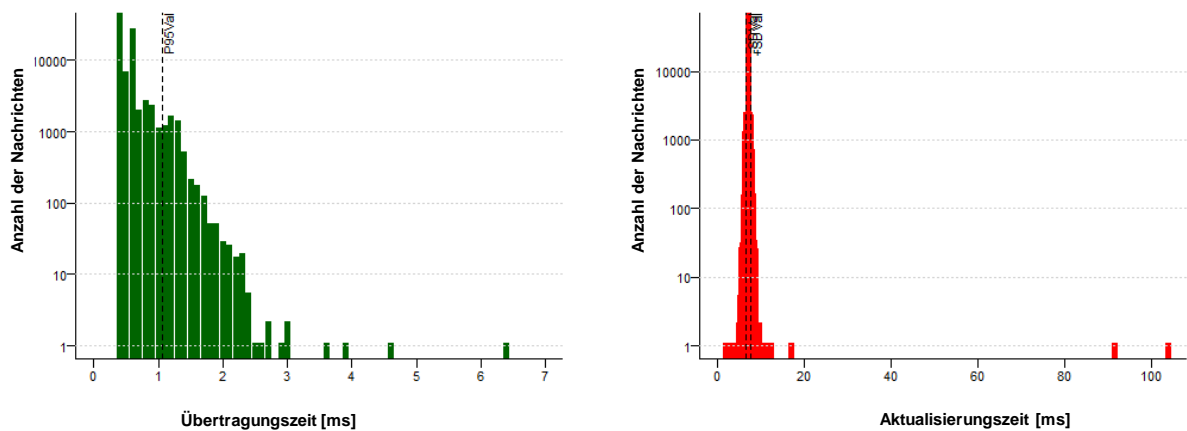


Abbildung A.20: Übertragungs- und Aktualisierungszeit bei Messung mit einer Antenne

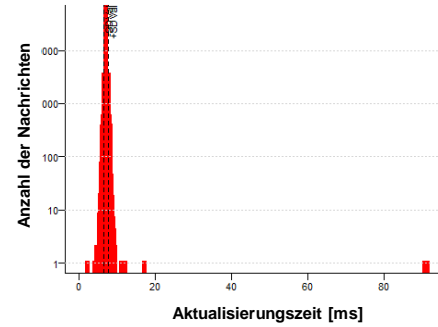
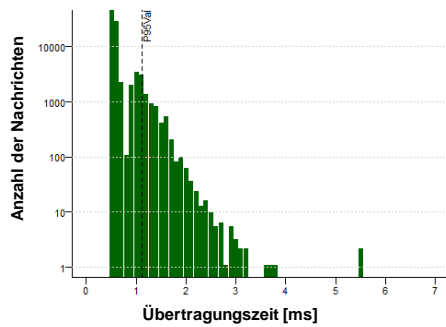
	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Mit einer Antenne	0,4	0,4	1,1	1,8	7	0,5

Tabelle A.21: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink mit speed200

	TX	RX	MLR	CIM
Mit einer Antenne	99987	99960	2.70e-04	14

Tabelle A.22: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink mit speed200

Mit einer Antenne Uplink



Mit einer Antenne Downlink

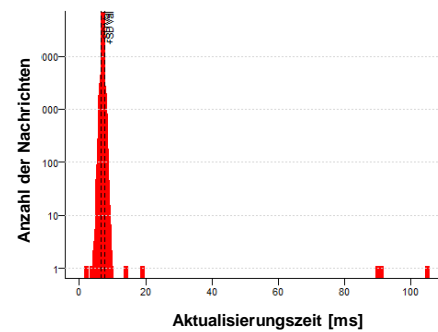
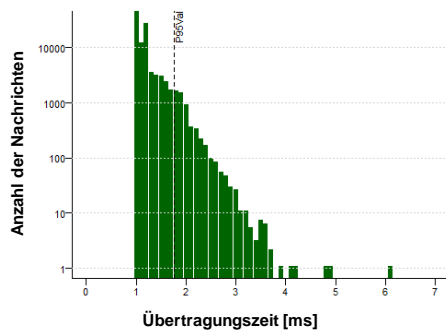


Abbildung A.21: Übertragungs- und Aktualisierungszeit bei gleichzeitigem Down- und Uplink

	TT Min [ms]	TT Mod [ms]	TT P95 [ms]	UT Min [ms]	UT Mean [ms]	UT SD [ms]
Mit einer Antenne Uplink	0,5	0,5	1,1	2	7	0,5
Mit einer Antenne Downlink	1	1	1,8	2	7	0,6

Tabelle A.23: Statistische Werte für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink mit speed200

	TX	RX	MLR	CIM
Mit einer Antenne Uplink	99998	99959	3.90e-04	12
Mit einer Antenne Downlink	99998	99956	4.20e-04	14

Tabelle A.24: Zählwerte und Nachrichtenverlustquote für 60 Byte Hauptstrecke Downlink und Uplink mit speed200

A.4 Prüfung der Genauigkeit der Synchronisation

Wichtig: Die Startimpulse dürfen nicht mehr als 1 μs auseinanderliegen! Dieser Fehler ist nicht korrigierbar.

$$TT_{\text{Fehler}} = 1 \mu\text{s} \quad (24)$$

Die Übertragungszeit (TT) muss kleiner als die Zykluszeit (TI) sein:

$$TT \leq TI \quad (25)$$

Die Zykluszeit (TI) beträgt 7 ms:

$$TI = 7 \text{ ms} \quad (26)$$

Als Frequenz zur Synchronisation wurden 10 MHz eingestellt:

$$f_{\text{clock}} = 10 \text{ MHz} \quad (27)$$

Dementsprechend ist die Zeitperiode 100 ns:

$$T_{\text{clock}} = \frac{1}{f_{\text{clock}}} \quad (28)$$

$$T_{\text{clock}} = 100 \text{ ns} \quad (29)$$

Die maximal zulässige Übertragungszeit wird durch die Zeitperiode geteilt:

$$\frac{TT_{\text{Fehler}}}{T_{\text{clock}}} = \frac{1 \mu\text{s}}{100 \text{ ns}} = 10 \text{ Perioden} \quad (30)$$

Es sind 10 Perioden alle 7 ms erlaubt.

Nach 3 Stunden wurde eine halbe Periode alle 10 Sekunden durchlaufen:

$$\Delta T_{\text{clock}} = \frac{0,5 \text{ Perioden}}{10 \text{ s}} \quad (31)$$