

**Identifikation, Auswirkung und Simulation von Wellenausbreitungseffekten
in der Zug-Onboard-Kommunikation mithilfe realer Kanalcharakterisierung**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von

Johann Gerhard Lichtblau

aus Ingolstadt, Deutschland

2024



Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kölpin

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Tag der mündlichen Prüfung: 14.11.2024

Abstract

This thesis discusses the challenges of wireless train onboard communication in 5G frequencies below 6 GHz based on channel measurements in rail traffic. The typical wave propagation effects are identified, their impact is discussed and simulations are carried out on the basis of developed channel models. Theoretical considerations in combination with numerous empirical data reduce the significant research gap in train onboard communication and form the basis for the design of future communication systems in rail transport. Furthermore, the findings of the channel characterization are linked to the relevant standards in rail transport, from which the feasibility of safety-critical functions can be evaluated using wireless communication.

Zusammenfassung

Diese Arbeit diskutiert anhand von Kanalmessungen im Schienenverkehr die Herausforderungen der drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikation in 5G-Frequenzen unter 6 GHz. Es werden die typischen Wellenausbreitungseffekte identifiziert, deren Auswirkung behandelt und auf Basis von erarbeiteten Kanalmodellen Simulationen durchgeführt. Durch theoretische Überlegungen in Kombination mit zahlreichen empirischen Daten wird die signifikante Forschungslücke in der Zug-Onboard-Kommunikation reduziert und bildet die Basis für die Auslegung zukünftiger Kommunikationssysteme im Schienenverkehr. Des Weiteren werden die Erkenntnisse der Kanalcharakterisierung in Verbindung mit den einschlägigen Normen im Schienenverkehr gebracht, womit sich die Realisierbarkeit von sicherheitskritischen Funktionen mithilfe drahtloser Kommunikation bewerten lässt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Formeln	VIII
1 Motivation - Die Schienenfahrzeugtechnik im digitalen Wandel.....	1
1.1 Drahtlose Kommunikation und Kanalmodellierung in der Bahnbranche.....	3
1.2 Drahtlose Zug-Onboard-Kommunikationsszenarien	6
1.3 Problemstellung dieser Arbeit	10
1.4 Inhaltzusammenfassung.....	10
2 Grundlagen der drahtlosen Kommunikation.....	12
2.1 5G-Grundlagen und Verbindung mit drahtloser Zug-Onboard-Kommunikation	12
2.1.1 Kommunikation sicherheitskritischer Daten im Schienenverkehr	14
2.1.2 Ausgewählte Zug-Onboard-Kommunikationsszenarien im Betrieb und deren technische Herausforderungen	16
2.2 Physikalische Effekte bei Funkübertragung.....	17
2.3 Messbare und berechenbare Größen.....	22
3 Vorstudie: Kommunikationsmessungen im Hochgeschwindigkeitsverkehr	26
4 Theoretische Überlegungen zur Kanalmodellierung.....	27
5 Erzeugung einer Datenbasis für die Kanalmodellierung	29
5.1 Frequenzauswahl.....	29
5.2 Messaufbau und Ausrüstung	30
5.3 Übersicht über die Messkampagnen	34
5.4 Datenaufbereitung.....	35
6 Untersuchung ausgewählter Szenarien bezüglich Auffälligkeiten und Wellenausbreitungseffekten	37
6.1 Mobiles Arbeiten im ICE bei 5,6 GHz	37
6.2 Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen	39

6.3	Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz.....	41
6.4	Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen	44
6.5	Mobiles Arbeiten im ICE bei verschiedenen Frequenzen	47
6.6	Gegenüberliegende Steuerungen im Regionalzug bei 3,6 GHz	47
6.7	Zusammenfassung der Erkenntnisse von Kapitel 6	49
7	Kanalmodellbildung für ausgewählte, kritische Szenarien.....	50
7.1	Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz	51
7.2	Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz.....	52
7.3	Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz	54
7.4	Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz	56
7.5	Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz	57
7.6	Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz	59
7.7	Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz	60
7.8	Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz.....	61
7.9	Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz	62
7.10	Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz	64
7.11	Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz	66
7.12	Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz.....	67
7.13	Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz	69
7.14	Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung	70
7.15	Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz	72
8	Validierung und Anwendung der Modelle	74
8.1	Validierung der Überlandfahrten.....	76
8.2	Validierung der Tunnelfahrten.....	79
8.3	Validierung von Fahrten in Mischgebieten.....	83
8.4	Validierung statischer Messungen.....	87
8.5	Simulationen mit Hilfe der entwickelten Modelle und Vergleich der Ergebnisse	90
9	Diskussion	97
10	Fazit und Schlussfolgerungen	105



Literaturverzeichnis..... A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Höhe des Marktvolumens des weltweiten Schienenfahrzeugbaus im Jahr 2022 und Prognose für 2027 (in Milliarden US-Dollar) [2].....	1
Abbildung 2: Schematische Veranschaulichung der Bustopologie gemäß IEC 61375-1 nach [5].....	2
Abbildung 3: Netzwerke im Schienenverkehr.....	5
Abbildung 4: Drei Umgebungsbereiche der drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikation für die Szenariendefinition	7
Abbildung 5: Länge der betriebenen Hochgeschwindigkeits-Schiennetze nach Regionen [29].....	8
Abbildung 6: Länge des sich in Planung befindenden Hochgeschwindigkeits-Schiennetzes nach Regionen [30]	9
Abbildung 7: Beispiel für die orthogonale Anordnung von Subträgern eines OFDM-Signals im Frequenzbereich.....	13
Abbildung 8: Beispiel einer elektromagnetischen Welle im Raum.....	17
Abbildung 9: Spiegelnde (links) und diffuse (rechts) Reflexion einer elektromagnetischen Welle [47]	19
Abbildung 10: Verdeutlichung von Mehrwegeausbreitung am Beispiel elliptischer Reflexionen.....	20
Abbildung 11: Visualisierung des Dopplereffektes bei Zug-Onboard-Kommunikation während der Fahrt mit Reflexionen an ruhenden Objekten neben der Strecke	21
Abbildung 12: Visualisierung der möglichen Fourier-Transformationen und deren Ergebnisse ausgehend von der Kanalimpulsantwort und der Transformationsgröße (Zeit t , Verzögerungszeit τ) neben den Pfeilen abgeleitet von [58].	22
Abbildung 13: Visualisierung der möglichen inversen Fourier-Transformationen und deren Ergebnisse ausgehend von der Doppler-varianten Übertragungsfunktion und der Transformationsgröße (Frequenz f , ν Dopplerverschiebung) neben den Pfeilen abgeleitet von [58].	23
Abbildung 14: Beispiel eines Verzögerungsverlaufs am Empfänger auch im Englischen Power Delay Profile genannt mit vier verzögerten Pfaden aus [54]	24
Abbildung 15: Von der Idee eines Modells zur Modellnutzung für Kommunikationssimulationen.....	28
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Geräten, Antennen, Stativen sowie Bedienlaptop	31
Abbildung 17: Beispiel einer Zadoff-Chu Folge mit 205 Folgengliedern und einer Wurzel von 7 angelehnt an [77]	32

Abbildung 18: Antenneneigenschaften der VERT2450 aus dem Datenblatt [78].....	33
Abbildung 19: Antenneneigenschaften der FXUB66 Breitbandantenne aus dem Datenblatt [79]	34
Abbildung 20: Vergleich einer getriggerten (grün) und einer ungetriggerten (blau) Messreihe eines Szenarios.....	36
Abbildung 21: Aufnahme der Baureihe 412 der Deutschen Bahn von [87].....	37
Abbildung 22: Sender Tx (grün) und Empfänger Rx (rot) ohne Sichtverbindung bei 5,6 GHz in einem Mittelwagen der Baureihe 412 der Deutschen Bahn auf Basis von [87]	38
Abbildung 23: Mittelwerte aus 24 Kanalimpulsantworten mit visualisierter Standardabweichung und Rauschgrenze für das Szenario „Mobiles Arbeiten im ICE bei 5,6 GHz“	38
Abbildung 24: Szenario „Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen“	39
Abbildung 25: ICE S mit Einzelwagenerprobungsträger von [89] während einer Fahrt durch ländliches Gebiet	40
Abbildung 26: Layout des modifizierten ICE mit Sender (grün)- und Empfängerposition (rot).....	40
Abbildung 27: Kanalimpulsantworten für das Szenario „Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen“	41
Abbildung 28: Szenario „Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz“	42
Abbildung 29: Layout des Regionalzuges der Baureihe 462 mit Positionen von Sender und Empfänger	42
Abbildung 30: Aufnahme eines Desiro HC der Baureihe 462 von [90]	42
Abbildung 31: Kanalimpulsantworten für das Szenario „Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz“ ohne Menschen im Mittelgang	43
Abbildung 32: Kanalimpulsantworten für das Szenario „Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz“ mit Menschen im Mittelgang	44
Abbildung 33: Wasserfalldiagramm mehrere Kanalimpulsantworten mit Personen im Mittelgang	44
Abbildung 34: Szenario „Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen“	45
Abbildung 35: Layout U-Bahn Bangkok Blue Line mit Positionen von Sender und Empfänger	45
Abbildung 36: U-Bahn Bangkok Blue Line Fahrzeug von [91]	46
Abbildung 37: Kanalimpulsantworten „Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen“	46
Abbildung 38:Kanalimpulsantworten „Mobiles Arbeiten im ICE bei verschiedenen Frequenzen“	47

Abbildung 39: Position von Sender und Empfänger gegenüberliegend im Regionalzug	48
Abbildung 40: Kanalimpulsantworten „Gegenüberliegende Steuerungen im Regionalzug bei 3,6 GHz“	48
Abbildung 41: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“	51
Abbildung 42: Kanalmodell „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“	52
Abbildung 43: Szenario „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“	52
Abbildung 44: Layout eines dreiteiligen Mireos mit eingezeichnetem Sender (grün) und Empfänger (rot) von der Herstellerwebsite [92]	53
Abbildung 45: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“	53
Abbildung 46: Kanalmodell „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“	54
Abbildung 47: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“	55
Abbildung 48: Kanalmodell „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“	55
Abbildung 49: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“	56
Abbildung 50: Kanalmodell „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“	57
Abbildung 51: Kanalimpulsantwort „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“	58
Abbildung 52: Kanalmodell „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“	58
Abbildung 53: Kanalimpulsantwort „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“	59
Abbildung 54: Kanalmodell „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“	60
Abbildung 55: Kanalimpulsantwort „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“	60
Abbildung 56: Kanalmodell „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“	61
Abbildung 57: Kanalimpulsantwort „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“	62
Abbildung 58: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“	62
Abbildung 59: Kanalimpulsantwort „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“	63
Abbildung 60: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“	63
Abbildung 61: Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“	64
Abbildung 62: Positionierung im Zug von Sender und Empfänger im Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“	64
Abbildung 63: Kanalimpulsantwort „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“	65
Abbildung 64: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“	65

Abbildung 65: „Kanalimpulsantwort Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“	66
Abbildung 66: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“	67
Abbildung 67: Kanalimpulsantwort „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“	68
Abbildung 68: Kanalmodell „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“	68
Abbildung 69: Kanalimpulsantwort „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz“	69
Abbildung 70: Kanalmodell „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz“	70
Abbildung 71: Seitenansicht des Zuglayouts mit Sende- und Empfangsposition	70
Abbildung 72: Kanalimpulsantwort „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“	71
Abbildung 73: Kanalmodell „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“	71
Abbildung 74: Kanalimpulsantwort „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“	72
Abbildung 75: Kanalmodell „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“	73
Abbildung 76: Beispiel einer Validierungsgrafik für ein erarbeitetes Modell	74
Abbildung 77: Validierung „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.1	76
Abbildung 78: Validierung „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.2	76
Abbildung 79: Validierung „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.3	77
Abbildung 80: Validierung „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.4	77
Abbildung 81: Erstmessung versus Kontrollmessung vergrößert von „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“	78
Abbildung 82: Validierung „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.5	79
Abbildung 83: Validierung „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.6	79
Abbildung 84: Extremwertanalyse „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.6	80
Abbildung 85: Alle Kanalimpulsantworten der Kontrollmessung zu „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“	81
Abbildung 86: Validierung „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“ Kapitel 7.7	82
Abbildung 87: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“ Kapitel 7.8	83
Abbildung 88: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.9	84
Abbildung 89: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.10	84
Abbildung 90: Alle Kanalimpulsantworten zu „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“	85

Abbildung 91: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“ Kapitel 7.11	86
Abbildung 92: Alle Kanalimpulsantworten zu „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“	87
Abbildung 93: Validierung „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.12	88
Abbildung 94: Standardabweichungen der Messreihen aus „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“	88
Abbildung 95: Validierung „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.13.....	89
Abbildung 96: Validierung „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“ Kapitel 7.14.....	89
Abbildung 97: Validierung „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.15	90
Abbildung 98: TDL-E parametrisiert versus „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“	91
Abbildung 99: Simulationsergebnis des Szenarios bei 3,6 GHz und ohne Sichtverbindung	92
Abbildung 100: Simulationsergebnis des Szenarios bei 5,6 GHz und ohne Sichtverbindung	93
Abbildung 101: Simulationsergebnisse der Szenarien bei 2,7 GHz mit Sichtverbindung	93
Abbildung 102: Simulationsergebnisse der Szenarien bei 3,6 GHz mit Sichtverbindung	94
Abbildung 103: Simulationsergebnisse der Szenarien bei 5,6 GHz mit Sichtverbindung	95
Abbildung 104: Zusammenhang der Kohärenzbandbreite und der Bitfehlerrate über alle 13 Szenarien	96
Abbildung 105: Dopplerverschiebung bei einer Messung auf dem ICE bei 5,6 GHz.....	97
Abbildung 106: Drei Grobausprägungen von Kanalimpulsantworten	98
Abbildung 107: Verteilung der 195 Messreihen bezüglich der gemittelten Kohärenzbandbreiten.....	99
Abbildung 108: Alle Messungen bei 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz mit den vier verschiedenen Zugumgebungen und deren ermittelter Kohärenzbandbreiten inklusive Standardabweichung	100
Abbildung 109: Maximal gefahrene Geschwindigkeit der schnellsten Züge der Welt (in Kilometer pro Stunde; Stand Dezember 2021 [98]	102
Abbildung 110: Konzept American Pioneer 220 von Siemens Mobility aus [99].....	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Suche auf IEEE Xplore nach Veröffentlichungen zur Kommunikation im Schienenverkehr ...	4
Tabelle 2: Kommunikationsanforderungen an Onboard-Zugnetzwerke [19, 22]	5
Tabelle 3: Stand der Technik bezüglich verfügbarer Funkstandards für die drahtlose Zugkommunikation [23]	6
Tabelle 4: Geforderte Sicherheitsanforderungsstufe und Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde nach IEC 61508 [40]	14
Tabelle 5: Geforderte Sicherheitsanforderungsstufe und Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung nach IEC 61508 [40]	15
Tabelle 6: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien	16
Tabelle 7: Mögliche Frequenzbänder um 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz für potenzielle Zug-Onboard- Kommunikation aus dem deutschen Frequenzplan der Bundesnetzagentur [68]	30
Tabelle 8: Übersicht der durchgeführten Fahrzeugmessungen	35
Tabelle 9: Statistische Werte über alle Simulationsergebnisse zu ausgewählten Signal- Rausch- Verhältnissen	95
Tabelle 10: Alle Messungen bei 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz mit den vier verschiedenen Zugumgebungen und deren ermittelter Kohärenzbandbreiten inklusive Standardabweichung	100
Tabelle 11: Einflussstärke der einzelnen Parameter auf die Varianz der Kohärenzbandbreite	101
Tabelle 12: Redundanzfaktoren für unterschiedliche Fehlerraten	104

Abkürzungsverzeichnis

Das Abkürzungsverzeichnis führt die Akronyme in dieser Arbeit auf. Da ein Großteil der internationalen Forschung über drahtlose Kommunikation in Englisch verschriftlich ist, werden auch englische Begriffe und Abkürzungen in dieser Arbeit verwendet.

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	Fünfte Generation des Mobilfunkstandards
BER	Bit error rate
BNC	Bayonet Neill Concelman
ca.	circa
FDM	Frequenzmultiplexverfahren
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway
ICE	Intercity-Express
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IOT	Internet of Things
LTE	Long Term Evolution / Vierte Generation des Mobilfunksstandards
MVB	Multifunction Vehicle Bus
NYUSIM	Eigenname des Simulators der NYU Tandon School of Engineering
OFDM	Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren
QAM	Quadratur-Amplituden-Modulation
RMS	Root mean square
Rx	Receiver/ Empfänger
SIL	Sicherheitsanforderungsstufe
SNR	Signal-to-noise ratio
TDL	Tapped Delay Line
Tx	Transceiver/ Sender
WLAN	Wireless Local Area Network
WTB	Wired Train Bus
z.B.	zum Beispiel

Formeln

Formel 1: Das Produkt aus Frequenz f und Wellenlänge im Vakuum/in der Luft λ ist immer konstant und wird durch die Lichtgeschwindigkeit c beschrieben [48].....	17
Formel 2: Definition der Freiraumdämpfung F in Abhängigkeit der Frequenz f und des Abstandes d zwischen Sender und Empfänger [48].....	18
Formel 3: Definition des Brechungsindex eines Stoffes i als Wurzel des Produktes aus seiner relativen Permittivität und relativen Permeabilität nach [47]	18
Formel 4: Brechungsgesetz von Snellius nach [50]	18
Formel 5: Berechnung der Dopplerfrequenz f_d auf Basis der Geschwindigkeitskomponente v in Fahrtrichtung des Zuges, des Winkels α zwischen der Richtung des Sendesignals und der Fahrtrichtung des Zuges, der Trägerfrequenz f_0 , sowie der Lichtgeschwindigkeit c [54]	21
Formel 6: Definition des Mittelwerts der Laufzeiten τ nach [54] in Abhängigkeit der Leistungen der Einzelpfade a_j und deren Laufzeiten τ_j	24
Formel 7: Definition der Laufzeitspreizung τ_{rms} oder aus dem Englischen RMS Delay Spread als Wurzel aus der Differenz des Mittelwerts der quadratischen Laufzeit τ^2 (zweites Moment) und des Quadrats des Mittelwertes der Laufzeiten τ^2 aus [54]	24
Formel 8: Definition nach [54] der Kohärenzbandbreite B_c als Quotient aus 1 und τ_{rms}	24
Formel 9: Berechnung des Redundanzfaktors zum Erreichen einer belastbaren sicherheitskritischen drahtlosen Kommunikation im Zug-Onboard-Bereich	103

1 Motivation - Die Schienenfahrzeugtechnik im digitalen Wandel

Die Schienenfahrzeugtechnik, eine Branche mit langer Tradition und Historie, zu Beginn angesiedelt im klassischen Maschinenbau, hat sich unter Einfluss von elektrotechnischen Neuerungen und digitalen Innovationen kontinuierlich zu einem multidisziplinären Wirtschafts- und Forschungszweig weiterentwickelt und bietet den Kontext in dem sich diese Dissertation bewegt.

Hervorzuheben sind dabei die technischen Errungenschaften des letzten Jahrzehnts im Bereich der drahtlosen und drahtgebundenen Kommunikationstechnik. In diesem vielschichtigen Forschungsfeld konnten durch neue Software- und Hardwarearchitekturen sowie Netzwerktopologien branchenübergreifend disruptive Ansätze verfolgt werden. In der Bahntechnik manifestieren sich diese Innovationen anschaulich in Form kommunizierend vernetzter Komponenten, Fahrzeuge und Infrastrukturen. Somit bietet die Kommunikationstechnik eines modernen Zuges inzwischen Schlüsselfunktionen für alle Stakeholder. Sie ermöglicht den Austausch sicherheitskritischer Daten der Echtzeitsteuergeräte und gewährleistet somit den fehlerfreien Betrieb der Leistungselektronik und damit des Regelpassagierverkehrs. Sie ist zudem Unterstützung für die operative Planung der Betreibergesellschaft, welche auf Positions- und Diagnosedaten der Verschleißteile basiert und steigert des Weiteren den Komfort des Fahrgastes durch Medienangebote. Zusätzlich gewinnen öffentlicher Nah- und Fernverkehr, sowie Güterverkehr, in der Debatte um CO₂-Neutralität an Bedeutung. Digitalisierung und Vernetzung sind dabei Schlüsselbereiche aus Sicht der Bahnindustrie, um operativ in allen Bereichen weiter wachsen zu können. [1]

Insgesamt befindet sich der Wirtschaftszweig Bahntechnik in kontinuierlichem Wachstum und auch aktuelle Prognosen, wie in Abbildung 1 visualisiert, gehen zukünftig von weiteren Marktvolumensteigerungen aus.

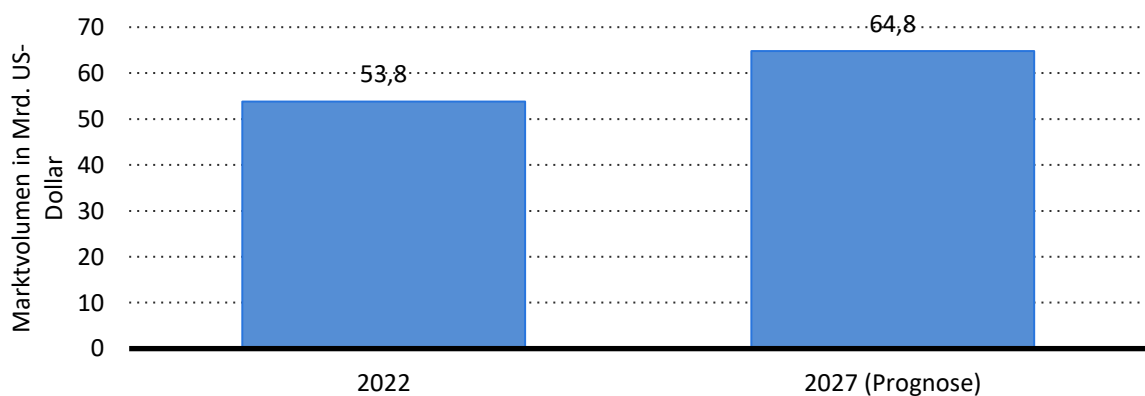


Abbildung 1: Höhe des Marktvolumens des weltweiten Schienenfahrzeugbaus im Jahr 2022 und Prognose für 2027 (in Milliarden US-Dollar) [2]

Die heutigen Kommunikationslösungen in dem Wachstumsmarkt Schienenfahrzeugtechnik sind meist drahtgebunden und basieren auf der Normenreihe IEC 61375, welche seit den 2000er Jahren kontinuierlich weiterentwickelt wird. Grundlage ist hierbei IEC 61375-1, welche die prinzipielle Kommunikationsarchitektur über zwei Ebenen definiert. Somit wird das übergeordnete Bussystem Wire Train Bus WTB genannt. Der WTB verbindet Fahrzeuge und Wagons und bindet das untergeordnete System ein. Dieses wird als Multifunction Vehicle Bus (MVB) bezeichnet und ist die Kommunikationsanbindung der verteilten Einzelgeräte wie beispielsweise Antriebs- oder Bremssteuergerät. [3, 4] Beispielhaft wird diese Bustopologie in einem zweiteiligen Regionalzug in Abbildung 2 dargestellt.

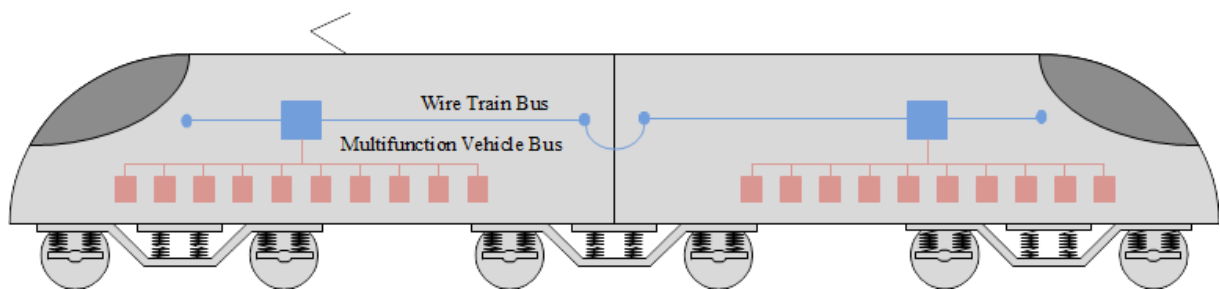


Abbildung 2: Schematische Veranschaulichung der Bustopologie gemäß IEC 61375-1 nach [5]

In den letzten beiden Jahrzehnten gab es auch vermehrt Ansätze, drahtgebundene Kommunikation durch drahtlose zu ersetzen. Diese Ansätze sind ebenfalls normativ festgehalten in beispielsweise der Norm IEC61375-2-7, welche eine drahtlose WTB-Realisierung für Güterzugkonfigurationen beschreibt oder IEC61375-2-6, die eine Zug – Landanbindung durch Mobilfunk definiert. [6, 7]

Für die Hersteller von Schienenfahrzeugen bringt die erfolgreiche Umstellung auf drahtlose Lösungen enorme Vorteile bei der Auf- und Umrüstung von Altfahrzeugen, aber auch bei der Entwicklung von Neufahrzeugen. Durch die Einsparung von Kabelkanälen und Kabeln wird wertvoller Einbauraum frei für andere Zwecke, die Flexibilität bei der Positionierung von Endgeräten wird erhöht, aber auch neue Angebote für den Betreiber oder den Passagier geschaffen. Ein klassisches Beispiel für den letztgenannten Punkt ist das WLAN-Angebot im Fernverkehr der Deutschen Bahn. Durch das Onboard-Netzwerk können Speisen bestellt und ein Entertainmentangebot wahrgenommen werden. [5, 8]

In der aufstrebenden Bahnindustrie ist der Trend zur drahtlosen Vernetzung vorhanden, jedoch ist die Umsetzung in der Praxis aktuell in verschiedensten Stadien, abhängig von der Applikation. So ist WLAN im Fernverkehr für Passagiere implementiert, fällt jedoch oft aus oder die Bandbreite für den einzelnen Nutzer ist stark limitiert. Darauf lassen zumindest zahlreiche Negativberichte in den sozialen Medien und auf Webseiten schließen [9]. Beispielsweise beschreibt Nils Raettig in einer Kolumne [10] seine

Erfahrung mit dem WLAN im Zug mit den Worten: „Die Hinfahrt ein Totalausfall, die Rückfahrt eine Enttäuschung.“

Zug-Zug Kommunikationslösungen werden aktuell erforscht, sind aber noch in einem frühen Stadium und nahezu nicht industrialisiert während über drahtgebundene Verbindung von Steuergeräten allgemein wenig in der Literatur zu finden ist. Diese unterschiedlichen Implementierungsstadien der drahtlosen Technik in Kombination mit den hohen Sicherheitsanforderungen in der Bahnindustrie und den kontinuierlichen Innovationen allgemein in der drahtlosen Kommunikation ergeben ein spannendes Feld, dass es zu erforschen gilt. [11–13]

1.1 Drahtlose Kommunikation und Kanalmodellierung in der Bahnbranche

Technologisch sind wie für andere Branchen auch die Frequenzen der 5ten Generation des Mobilfunks interessant. Hierbei werden vor allem Szenarien betrachtet, die Züge untereinander oder mit der Infrastruktur kommunizieren lassen. Ebenso werden Internet of Things (IOT) Ansätze durch den neuen Standard unterstützt, was diverse Geräte und Dinge untereinander drahtlos vernetzt. [14]

Bevor jedoch an eine kommerzielle Nutzung dieser Frequenzen im Schienenverkehr gedacht werden kann, müssen geeignete Kanalmodelle für die Auslegung solcher Systeme vorhanden sein. In den vergangenen Jahren hat es zahlreiche Forschungsvorhaben gegeben, die umfangreiche Kanalmodelle erstellt haben. Gerade im Zuge des Umstiegs von LTE auf 5G im Mobilfunksektor sind Untersuchungen, Simulationen und Messungen durchgeführt worden. Einen guten Überblick zeigt die Studie [15]. In dieser wurden speziell Kanalmodelle und Messungen für Hochgeschwindigkeitszüge ausgewertet. Es handelt sich um Szenarien aus dem Zug-Zug und Zug-Infrastruktur Kommunikationsbereich.

Ein etabliertes und immer wieder erweitertes Kanalmodelle ist außerdem WINNER II. Das Szenario D2 „Moving Networks“ behandelt dabei eine Hochgeschwindigkeitsfahrt in ländlichem Gebiet, jedoch nur mit dem Fokus Zug-Infrastruktur-Kommunikation [16]. Auch diverse weitere Kanalmodelle, von Forschungsgruppen und -zusammenschlüssen, wie NYUSIM oder 3GPP behandeln Zugkommunikationsthemen, jedoch lediglich als Randthema und immer mit dem Fokus Mobilfunkanbindung des Zuges bzw. der schienenseitigen Infrastruktur. [17]

Die Standardisierungsmaßnahmen im Rahmen von 5G zielen auf die mobilfunkseitige Einbindung des Schienenverkehrs. Zug-Onboard-Kommunikation ist ein untergeordnetes Thema [18, 19]. Es überlappen sich damit zwei Effekte. Zum einen sind im Rahmen von 5G neue Frequenzbänder und neue Bandbreiten in Planung bzw. schon beschlossen und bestehende Kanalmodelle für vorherige Funkstandards sind nicht mehr aufwandsarm erweiterbar oder übertragbar. Zum anderen ist die Bahnbranche

generell in Sachen Digitalisierung am Aufholen und wurde auch in Bezug auf vorherige Mobilfunkstandards zwar mit z.B. GSM-R bedacht, aber nicht intensiv erforscht. [20, 21]

Faktisch existiert nach Auswertung der aktuellen Literatur eine Forschungslücke um den Themenkomplex drahtlose Zug-Onboard-Kommunikation. Diese Aussage wird auch quantitativ durch die Suche auf IEEE Xplore unterstützt. In Tabelle 1 ist die Anzahl der Suchtreffer innerhalb des Suchclusters „Railway communication“ dargestellt. Lediglich 48 bzw. 167 Suchtreffer werden im Themenbereich Zug-Onboard-Kommunikation gefunden, während Zug-Zug Kommunikation 2690 Treffer liefert.

Suchbegriffe https://ieeexplore.ieee.org/ am 11.07.2023	Anzahl der Suchergebnisse
Railway communication	5715
Railway communication & train to train	2690
Railway communication & train to ground	268
Railway communication & train to infrastructure	215
Railway communication & train to x	33
Railway communication & intra	48
Railway communication & onboard	167

Tabelle 1: Suche auf IEEE Xplore nach Veröffentlichungen zur Kommunikation im Schienenverkehr

Diese identifizierte Forschungslücke gilt es jedoch nur zu schließen, wenn aktuelle Funkstandards die Anforderungen an die Onboard-Kommunikation nicht erfüllen können und folglich Kanalmodelle für die Weiterentwicklung dieser Standards benötigt werden. Um diese Überprüfung durchzuführen, müssen die Anforderungen beschrieben und gegen den Status Quo verglichen werden, was nun folgt.

Im Schienenverkehr existieren drei Kommunikationsnetzwerke auf den heutigen Fahrzeugen. Wie Abbildung 3 darstellt, sind dies das Entertainmentnetzwerk für die Passagiere, das Betreibernetzwerk, das beispielsweise zur Fahrgastinformation oder operativen Planung dient, und das Steuerungsnetzwerk, das die unterschiedlichen Steuereinheiten der Bremsen, des Antriebs oder auch der Türen verbindet. Im Netzwerk der Steuerung und des Betreibers dominiert die kabelgebundene Kommunikation.

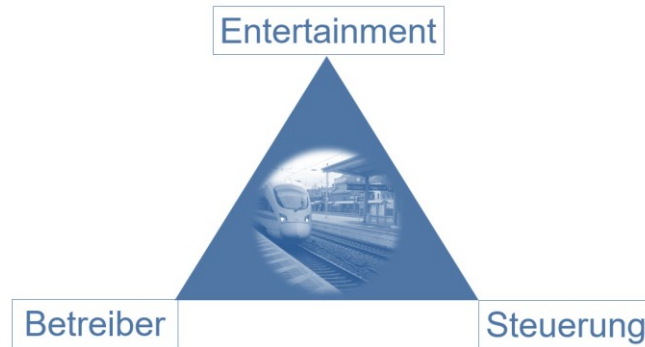


Abbildung 3: Netzwerke im Schienenverkehr

An diese Netzwerke werden unterschiedliche Anforderungen gestellt, die stark von den Funktionen abhängen, die durch das jeweilige Netzwerk unterstützt bzw. durchgeführt werden sollen. Im Grunde sind es die Kernkriterien maximale Latenzzeit, maximale Datenrate und Bitfehlerrate, die jeweils unterschiedlich priorisiert werden. Es folgt eine tabellarische Auflistung der Anforderungen (siehe Tabelle 2), die im Zuge der 5G-Entwicklung abgeleitet werden können.

Netzwerk	Anforderungen für Anwendungen
Entertainment	Videostreaming: <ul style="list-style-type: none"> • Latenzzeit unter 100 ms • Datenraten von 5-10 Mbit/s pro Stream. • 100-300 Nutzer pro Zug die insgesamt 500 Mbit/s - 1 Gbit/s benötigen
Betreiber	CCTV: <ul style="list-style-type: none"> • Hochauflösende Videoqualität der CCTV-Kameras • Latenzzeit unter 150 ms • Bitrate von 3-15 Mbit/s Passagierinformationssystem: <ul style="list-style-type: none"> • Echtzeit-Informationen über Zugstatus und Sitzplatzverfügbarkeit • Konnektivität für drahtlose Displays • Videodurchsagen auf verschiedenen Endgeräten
Steuerung	Sehr hohe Zuverlässigkeit von kritischen Diensten von 99,99 % bis zu 99,9999 %

Tabelle 2: Kommunikationsanforderungen an Onboard-Zugnetzwerke [19, 22]

Gemäß Literatur existieren noch weitere Kriterien an Netzwerke, wie beispielsweise die Wahrscheinlichkeit eines Funkabbruchs [23] oder prozessuale Anforderungen, wie die Software für das Netzwerk auf dem Schienenfahrzeug entwickelt werden soll [24, 25]. Im Kontext der Datenintegrität steht jedoch die genannte Bitfehlerrate im Fokus. Bei Gegenüberstellung mit dem Stand der Technik, sind laut Literatur folgende Funkprotokolle gemäß Tabelle 3 im Zugbereich etabliert.

Bezeichnung	Maximale Übertragungsrate	Latenzzeit	Quellen
GSM-R	10 Kbit/s	400 ms	[26]
LTE-R	50 Mbit/s	50 ms	[26]
IEEE 802.11ax	9,6 Gbit/s	20 ms	[27]

Tabelle 3: Stand der Technik bezüglich verfügbarer Funkstandards für die drahtlose Zugkommunikation [23]

Es zeigt sich bereits anhand der zwei Kriterien Übertragungsrate und Latenzzeit, dass die aktuellen Funklösungen im Schienenverkehrsbereich für Zug-Onboard-Kommunikation limitiert sind und die zukünftigen Anforderungen nicht oder nur eingeschränkt erfüllt werden können. Lediglich der WLAN-Standard IEEE 802.11ax bietet in der Theorie ausreichende Performanz für den Einsatz im Betreiber- oder Entertainmentnetzwerk. Abgesehen davon ist unklar, ob aufgrund der Spezifikation eines Funkstandards tatsächlich die maximalen Werte im Betrieb erreicht werden können. Ebenso ist die bedeutende Fehlerrate in Tabelle 3 nicht aufgeführt. Diese ist immer von den Einsatzbedingungen abhängig und nicht universell erhebbar. Sie ist jedoch signifikant für die den Einsatz im Steuerungsnetzwerk. Die 5G-Entwicklung will zum einen eine Antwort auf höhere Marktanforderungen und Bedarfe geben, treibt allerdings auch das Anforderungsprofil der Zugnetzwerke selbst und gibt einen Ausblick, was technologisch in Zukunft möglich sein könnte, auch wenn die Lösung heute noch nicht existiert. Nichtsdestotrotz fehlen für diese spezielle Sparte der 5G-Entwicklung im Zug-Onboard-Bereich die nötigen Kanalmodelle, um neuentwickelte Funklösungen zunächst im Labor durch Emulatoren und Simulationen zu optimieren und bezüglich Performanzkriterien bewerten zu können. [22]

1.2 Drahtlose Zug-Onboard-Kommunikationsszenarien

Kanalmodelle unterstützen bei der Entwicklung neuer Funkstandards und geben Entwicklern die Möglichkeit, ohne komplizierte und kostenintensive Messaufbauten ihre Lösung in einer simulierten Realität zu testen. Dieses Kapitel legt dar, für welche Kommunikationsszenarien, ausgehend von den

genannten Netzwerken und deren Anforderungskatalog, ein Kanalmodell signifikanten Forschungsfortschritt bedeutet.

Analysiert man die wenigen drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikationsszenarien in der Literatur, lassen sich in Bezug auf die Umgebung drei Bereiche unterscheiden. Der erste Umgebungsbereich befindet sich im Zuginneren. Es wird festgelegt wo Sende-, Empfangsgeräte und Antennen angeordnet sind. Außerdem beeinflusst die Innenausstattung, die Anzahl und Verortung der Passagiere und deren Gepäck das Szenario. Einen zweiten Bereich bildet der Zug selbst und welcher Bauart der Zug entspricht. Je nach Typ ist der genannte Innenausbau ein anderer aber auch die Wagenkästen an sich und wie diese verbunden sind variieren stark typenabhängig. Ebenso ist bedeutsam wie viele Türen und Fenster existieren und wo diese integriert sind. Auch die mögliche Höchstgeschwindigkeit ist vom Zugtyp abhängig. Der dritte und letzte Umgebungsbereich beschreibt die Umwelt neben oder auch über den Gleisen. Durch dichte Wälder, über ländliche Gegenden bis zu Großstädten und Schienenverkehr neben Straßen, sind zahlreiche Möglichkeiten und Umgebungen denkbar und können über ihre Absorptions- und Reflexionseigenschaften die Signalqualität als Teil des Funkkanals beeinflussen. In Abbildung 4 werden die drei Umgebungsbereiche und deren Variabilität visualisiert und die Vielfältigkeit dieses Themas schnell greifbar veranschaulicht.

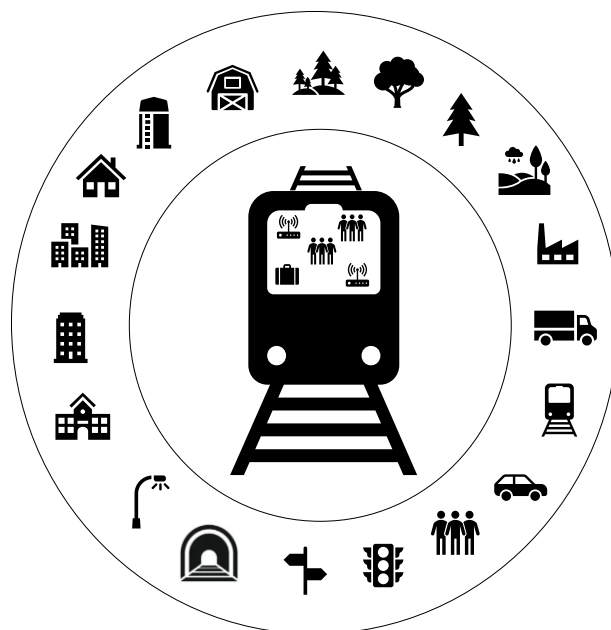


Abbildung 4: Drei Umgebungsbereiche der drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikation für die Szenariendefinition

Im Zentrum von Abbildung 4 befindet sich der Zug. Für die Szenariendefinition ist insbesondere der Zugtyp relevant. Statistisch gesehen sticht der Hochgeschwindigkeitsverkehr auf der Schiene heraus. Trotz Pandemie sind in Bezug auf die Gleiskilometer Wachstumsraten von ca. 40 % zwischen 2020 und 2022 zu verzeichnen und auch die Nachhaltigkeitsdebatten in unserer Gesellschaft forcieren einen

stärkeren Einsatz von Hochgeschwindigkeitszügen als Alternative zum Flug- und Individualverkehr. Hochgeschwindigkeitszüge verbinden dabei Städte und verkehren auch grenzübergreifend. Insbesondere auf langen Strecken über mehrere hundert Kilometer, können aufgrund der vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten kürzere Reisezeiten als mit dem Auto oder Bus realisiert werden. Die Prognosen bezüglich Infrastrukturausbau zeigen auch ein zukünftiges, massives Wachstum der Gleiskilometer für den Hochgeschwindigkeitsverkehr weltweit. Aktuell (Stichtag 01.09.2022) sind 58839 Hochgeschwindigkeitsgleiskilometer verfügbar, was Abbildung 5 visualisiert. Geplant und behördlich genehmigt sind weitere 19643 km. Langfristig geplant, jedoch noch nicht final genehmigt, sind gemäß Abbildung 6 nochmals 43935 km. [28–30]

Die beiden Grafiken (Abbildung 5 und Abbildung 6) prognostizieren damit ein Wachstum über 30 % in den kommenden Jahren und etabliert damit Hochgeschwindigkeitsszenarien als besonders relevant für die weitere Forschung, da zum einen neue Züge für diese neuen Strecken entwickelt bzw. beschafft werden müssen und damit auch Kommunikationssysteme bzw. Zugnetzwerke, aber zum anderen auch in Regionen Züge fahren werden, die davor zugtechnisch unerschlossen waren. Des Weiteren ist der Pendler- und urbane Zugverkehr bereits heute von kritischer Bedeutung für Großstädte und städtische Umgebungen. Heute leben über 50 % der Weltbevölkerung in der Stadt oder stadtnah. Das führt dazu, dass ca. 80 % aller Zugreisenden Pendler sind oder in städtischen Einzugsgebieten unterwegs sind. [31]

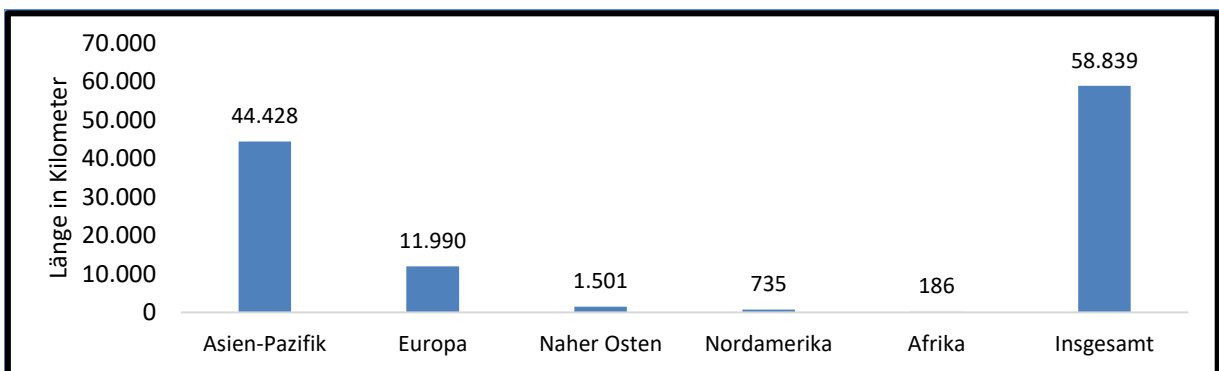


Abbildung 5: Länge der betriebenen Hochgeschwindigkeits-Schienenetze nach Regionen [29]

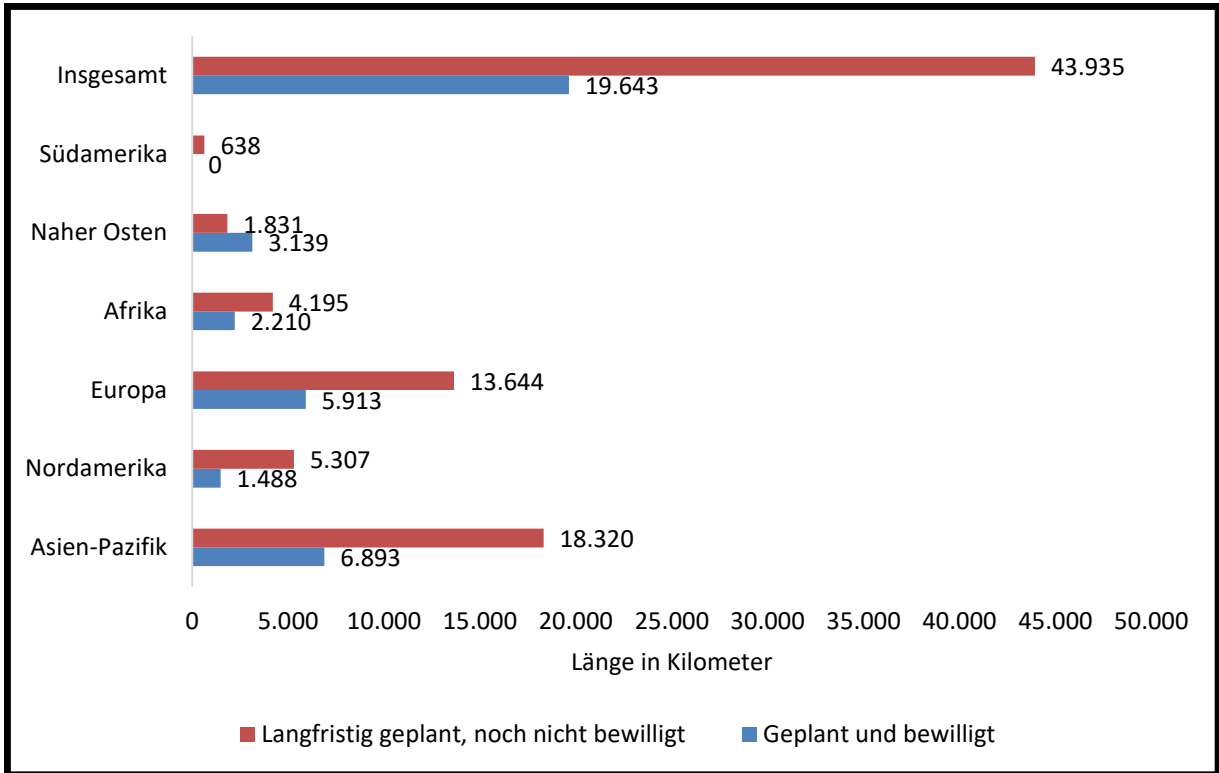


Abbildung 6: Länge des sich in Planung befindenden Hochgeschwindigkeits-Schienennetzes nach Regionen [30]

50 % aller Zugpassagierkilometer werden von Regional- oder Pendlerzügen abgeleitet. Die Bauweise dieser Züge unterscheidet sich extrem von denen der Hochgeschwindigkeitszüge und sind auf die Bedürfnisse der Pendler und der Betreiber optimiert. Allein aufgrund des bereits hohen Marktanteiles müssen Szenarien aus dieser Zugverkehrssparte berücksichtigt werden. Damit gilt es, neben Hochgeschwindigkeitszügen auch Regional-, bzw. Pendlerzüge zu betrachten. [31]

Der äußere Ring von Abbildung 4 stellt die Vielzahl der möglichen Umgebungen neben den Gleisen dar. Stellvertretend für diese unendlichen Kombinationsmöglichkeiten werden folgende vier Umgebungen für diese Arbeit als relevant festgehalten.

1. Bahnhof: Jeder Zug hält regelmäßig zum Passagierwechsel, zur Wartung oder um abgestellt zu werden. Diese statisch scheinende Umgebung birgt aufgrund der Vielzahl von Menschen eine sehr absorbierende Umgebung.
2. Mischgebiete: Bestehend aus urbanen Anteilen und Vegetation. Nahe von Stadtzentren, Industriegebieten und in den Vororten ist die Umgebung bebaut oder die Gleise von Lärmschutzmauern oder Natur umgeben. Es wird meist mit niedrigen Geschwindigkeiten gefahren.

-
3. Ländliche Umgebung: Die Vernetzung von Städten ist eine Hauptaufgabe des Zugverkehrs. Hierfür müssen viele Kilometer an ländlichen Landstrichen durchquert werden. Die Reisegeschwindigkeit wird möglichst hoch gewählt.
 4. Tunnel: Tunnel bieten eine homogene Umgebung bei der Durchfahrt. Die Tunnelwand reflektiert bei Durchfahrt elektromagnetische Wellen und erzeugt so einzigartige Bedingungen für die drahtlose Kommunikation.

1.3 Problemstellung dieser Arbeit

Jedes Fahrzeugkommunikationsszenario ist durch individuelle Eigenschaften von Strecke, Fahrzeug, Passagieren und Kommunikationssystemaufbau einzigartig definiert. Wiederkehrende Kanalausprägungen erlauben die Annahme vereinfachter Kanalmodelle und Erarbeitung branchenweiter Standards. Ein Szenario im Bereich der Onboard-Kommunikation im Schienenverkehr ist so hochgradig speziell, dass existierende und standardisierte Kanalmodelle (beispielsweise aus dem Mobilfunk- oder Automobilbereich) die auftretenden Kommunikationsszenarien nicht valide und geeignet für die Kommunikationssystemauslegung abbilden. Die Leitfragen dieser wissenschaftlichen Arbeit ergeben sich daher wie folgt:

Ist es möglich, die existierende Forschungslücke im Bereich der drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikation durch empirische, szenarienspezifische Kanalmodelle im Sub-6-GHz-Bereich des 5G-Standards zu reduzieren, extreme Wellenausbreitungseffekte in den typischen Onboard-Kommunikationsszenarien zu identifizieren und deren Auswirkungen auf sicherheitskritische Funktionen in der Schienenfahrzeugtechnik einzuordnen?

1.4 Inhaltzusammenfassung

Diese Dissertation unterteilt sich in 10 Kapitel. Kapitel 1 führt an das Thema heran, ordnet es ein und legt schließlich die Forschungsthese dar. Kapitel 2 behandelt Grundlagen zur drahtlosen Kommunikation und der sicherheitskritischen Kommunikation im Schienenverkehr. Ebenso wird in diesem Kapitel die physikalische Basis der Kanalcharakterisierung mit berechenbaren Größen vorgestellt. Es folgt Kapitel 3 mit einer veröffentlichten Vorstudie, die Messungen für Zug-Onboard-Kommunikation erläutert. In Kapitel 4 und Kapitel 5 wird neben der Theorie zur Kanalvermessung auf deren praktische Umsetzung zur Erzeugung einer Datenbasis eingegangen. Kapitel 6 stellt einzelne Messszenarien vor, aus denen jedoch keine Kanalmodelle abgeleitet werden, sondern Effekte der Wellenausbreitung

identifiziert werden. Kapitel 7 stellt sowohl Kanalmessungen als auch abgeleitete Kanalmodelle vor, die anschließend in Kapitel 8 validiert und simuliert werden. Abschließend folgt die Diskussion in Kapitel 9 und ein Fazit in Kapitel 10.

2 Grundlagen der drahtlosen Kommunikation

Als Geburtsstunde der drahtlosen Kommunikation wird mitunter der Nachweis der elektromagnetischen Wellen im Jahr 1886 durch Heinrich Rudolf Hertz in Karlsruhe angesehen. Damit hat er die Theorie von Maxwell bestätigt und die Basis für die zukünftigen drahtlosen Technologien wie WLAN oder Mobilfunk gelegt. [32]

Ein drahtloses Kommunikationssystem besteht aus drei grundlegenden Teilen. Dem Sender, dem Empfänger und dem Funkkanal [33]. Die ausgesendete elektromagnetische Welle trifft zeitverzögert beim Empfänger ein und wird durch die Eigenschaften des Funkkanals beeinflusst. Diese Eigenschaften manifestieren sich in den sogenannten Wellenausbreitungseffekten. Dies sind vor allem Streuung, Beugung, Reflexion, schneller, langsamer Schwund, Dopplerverschiebung und Freiraumdämpfung. [34]

2.1 5G-Grundlagen und Verbindung mit drahtloser Zug-Onboard-Kommunikation

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Funktechnik kontinuierlich weiterentwickelt, sodass inzwischen erste 5G-Anwendungen im Einsatz sind. 5G bezeichnet die fünfte Generation des Mobilfunkstandards, welcher der Nachfolger für LTE ist. Mit den Neuerungen wird die klassische Mobilfunktechnik weiterentwickelt, um alle möglichen Kommunikationsteilnehmer zu verbinden, darunter auch Maschinen, mobile Endgeräte und Fahrzeuge. Auch der 5G-Standard verwendet wie der Vorgänger das Orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) als Modulationsverfahren. Durch dieses Verfahren und einhergehende Innovationen sind höhere Datenraten, geringere Latenzzeiten, größere Bandbreiten und effizientere Frequenznutzung möglich. Von der Idee existiert OFDM bereits mehrere Jahrzehnte als Forschungsthema und wird ständig optimiert und weiterentwickelt. Eine gute Zusammenfassung der Historie und die Entwicklung vom Frequenzmultiplexverfahren (FDM) zu OFDM bis 2009 bietet hierbei [35]. [36]

Die Anwendung von OFDM fokussiert dabei zwei klassische Herausforderungen in der drahtlosen Kommunikation. Die begrenzte verfügbare Bandbreite und die Fehleranfälligkeit dieser. Bei einer drahtlosen, breitbandigen und dabei datenintensiven Übertragung von Signalen mithilfe eines Übertragungsträgers, kann die kleinste Störung innerhalb der Übertragungsbandbreite die Gesamtkommunikation vereiteln und Nutzdaten könnten unbrauchbar werden. An dieser Stelle setzt OFDM an. Statt eines breitbandigen Trägers, wird das Übertragungsspektrum in eine Vielzahl von Unterträger unterteilt, wie bei FDM. Anders als bei FDM, überlappen sich jedoch die Subträger, was zu einer besseren Nutzung der Bandbreite und damit höheren Datenraten führt. Hinzukommt, dass benachbarte Unterträger

orthogonal zueinanderstehen und sich daher nicht gegenseitig beeinflussen. Das bedeutet im Frequenzbereich, dass die spektralen Leistungen der Nachbarunterträger an der Mittenfrequenz eines anderen Unterträgers Null sind (siehe Visualisierung in Abbildung 7). Bei einer kleinen Störung im Übertragungskanal (frequenzselektiver Schwund), fallen so einzelne Informationen von Unterträgern weg, nicht aber die Gesamtinformation. Die einzelnen Unterträger mit kleinen Bandbreiten werden beispielsweise mit der Quadraturamplitudenmodulation (QAM) moduliert. Diese Aufteilung der gesamten Bandbreite auf viele schmalbandige Unterträger ermöglicht auch bei stark frequenzselektiven Kanälen eine erfolgreiche Übertragung. Durch OFDM ist somit eine Parallelisierung des Datenstroms bei gleichzeitiger Steigerung der Robustheit möglich. [37, 38]

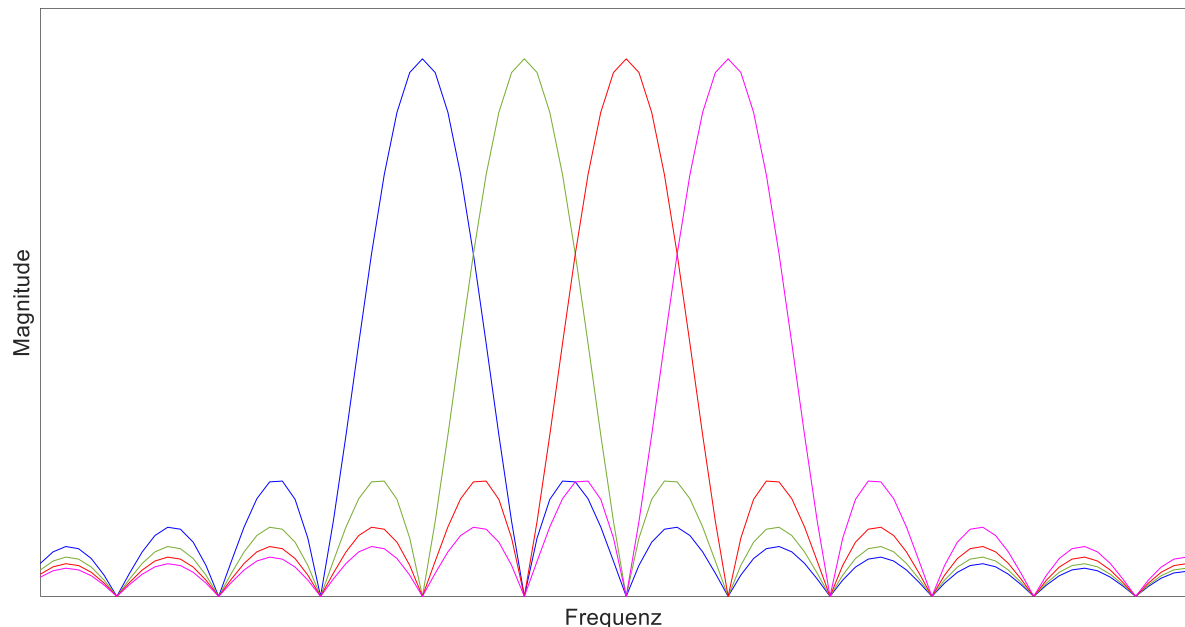


Abbildung 7: Beispiel für die orthogonale Anordnung von Subträgern eines OFDM-Signals im Frequenzbereich

OFDM wird ebenso im Kommunikationsstandard IEEE 802.11 verwendet, der die drahtlose Kommunikation in lokalen Netzwerken regelt. Den meisten Menschen in Deutschland ist dies unter dem englischen Akronym WLAN bekannt, das für „Wireless Local Area Network“ steht. Auch dieser Standard entwickelt sich kontinuierlich weiter und führt weitere Frequenzen und Optimierungen ein. Im Jahr 2024 wird die Version 802.11be ausgerollt und von den ersten Geräten unterstützt. In der Zugumgebung sind vorherige WLAN-Versionen bereits als Komfortfunktion für die Passagiere etabliert. [39]

2.1.1 Kommunikation sicherheitskritischer Daten im Schienenverkehr

Schienenfahrzeuge und deren Betriebsumgebungen sind komplexe Systeme, die für alle Stakeholder sicher funktionieren müssen. Aufgrund der gewachsenen Komplexität und der möglichen massiv negativen Auswirkung auf Gesundheit und Umwelt im Fehlerfall, müssen weltweit Standards in Bezug auf funktionale Sicherheit bei der Entwicklung und dem Betrieb von Schienenfahrzeugen eingehalten werden. Grundlage bei der Entwicklung ist hierbei die Normenreihe IEC 61508. Diese beinhaltet allgemeine Vorgaben zur funktionalen Sicherheit, welche dann durch branchenspezifischere Normen ergänzt werden. Für die Bahnbranche ist dies die Norm DIN EN 50126. Es werden grundlegende Prozesse während der Entwicklung von Schienenfahrzeugen und Schieneninfrastruktur definiert und Methoden vorgestellt, wie Risiken klassifiziert und verringert werden können. Dies führt dann bei systematischer Anwendung während der Entwicklung dazu, dass sogenannte Sicherheitsanforderungsstufen jeder Hardware- als auch Softwarefunktion zugeordnet werden können. Für jede Stufe steht ein Wahrscheinlichkeitsintervall eines gefahrbringenden Ausfalls. Je höher die Stufe, desto mehr Maßnahmen müssen ergriffen werden, um diesen Ausfall zu vermeiden bzw. die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zu reduzieren. Diese Ausfallwahrscheinlichkeit kann sich auf eine Anforderung oder eine Betriebsdauer beziehen. Anbei Tabelle 4 mit der Zuordnung der geforderten Sicherheitsanforderungsstufe über den Zeitraum von einer Stunde und in Tabelle 5 auf eine Anforderung bezogen. [40, 41]

Mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Stunde	Sicherheitsanforderungsstufe nach IEC 61508
$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-5}$	Keine Zuordnung/ Tolerierbares Risiko
$\geq 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$	SIL 1
$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$	SIL 2
$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$	SIL 3
$\geq 10^{-9}$ bis $< 10^{-8}$	SIL 4

Tabelle 4: Geforderte Sicherheitsanforderungsstufe und Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde nach IEC 61508 [40]

Mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Anforderung	Sicherheitsanforderungsstufe nach IEC 61508
$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$	SIL 1
$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$	SIL 2
$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$	SIL 3
$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$	SIL 4

Tabelle 5: Geforderte Sicherheitsanforderungsstufe und Ausfallswahrscheinlichkeit pro Anforderung nach IEC 61508 [40]

Die bahnspezifische Norm DIN EN 50126 [41] übernimmt Tabelle 4, nennt die mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls jedoch tolerierbare funktionale Ausfallrate und definiert für Ausfallraten geringer als 10^{-5} den Zusatz Basisintegrität. Auch Nicht-Sicherheitsfunktionen erhalten so Entwicklungsvorgaben. Verbindet man die vorgestellte Systematik der einschlägigen Normen mit dem Thema der drahtlosen Kommunikation im Schienenverkehr, so wird klar, dass es auf den funktionalen Zweck der Daten ankommt. Die Daten sind Teil einer Funktion des Schienenfahrzeuges oder der Schienenfahrzeugumgebung. Ein Ausfall der Datenkommunikation hätte gewisse Folgen und in dieser Konsequenz wird der Funktion eine Sicherheitsanforderungsstufe zugeordnet. Entsprechend hoch oder niedrig müssen anschließend die Maßnahmen sein, um die Daten fehlerfrei zu übertragen. Konkrete Bitfehlerraten einer Kommunikationsstrecke werden dann mit den geforderten Ausfallwahrscheinlichkeiten gemäß Sicherheitsanforderungsstufe verglichen und somit die Einsatzfähigkeit der drahtlosen Kommunikation für konkrete funktionale Zwecke bewertet. [24, 25, 40–43]

Zu beachten ist außerdem, dass alle Hardware- und Softwareanteile, die nötig sind, um eine Funktion zu erfüllen in die Bewertung einfließen. In [44] findet sich ein anschauliches Beispiel eines Achszählers. Hier wird mit zertifizierter SIL-3 Hardware ein SIL-4 Zählsystem für den Schienenverkehr aufgebaut. Dies funktioniert, da zwei Mikrocontroller unabhängig voneinander den Code ausführen und nur wenn beide das gleiche Ergebnis errechnen, die sicherheitskritische Funktion ausgeführt wird. Für die Betrachtung der drahtlosen Kommunikation ist dies ein äußerst relevanter Punkt, da unzureichende Ausfallwahrscheinlichkeiten durch mehrfache, unabhängige Ausführung, so genannte Redundanz, kompensiert werden können.

2.1.2 Ausgewählte Zug-Onboard-Kommunikationsszenarien im Betrieb und deren technische Herausforderungen

In Kapitel 1.2 wird erläutert wie ein Zug-Onboard-Kommunikationsszenario über 3 Definitionsschritte festgelegt werden kann und welche Szenarien aus Marktsicht von wissenschaftlicher Relevanz sind. In diesem Kapitel werden Szenarien final bestimmt und technisch definiert, sodass diese für die Kanalmodellierung weiterverwendet werden können. Dabei entsteht über Kombinatorik eine gewisse Komplexität, die es gilt möglichst akkurat abzubilden.

Es sollen Szenarien im Hochgeschwindigkeits-, Regional- und Pendlerzug untersucht werden. Die Zugarten sind im Inneren unterschiedlich aufgebaut. Ebenso existieren unterschiedliche Wagenreihungen mit verschiedensten Wagenanordnungen und Wagenanzahlen. Für die Vergleichbarkeit werden daher Szenarien unter 40 m als relevant identifiziert. Dies hat den Vorteil, dass es sich dabei um Kommunikation innerhalb eines Wagenkastens handelt oder von einem zum nächsten Wagenkasten. Diese Kommunikationstrecken existieren in allen Zugtypen. Egal, ob 12-teiliger Hochgeschwindigkeitszug oder zweiteiliger Regionalzug. Außerdem ist diese Arbeit, wie schon in der Problemstellung genannt, auf den Sub-6-GHz-Bereich eingeschränkt. Insbesondere für die Industrialisierung hat dies Vorteile, da viele Komponenten bereits in diesem Frequenzbereich standardisiert sind. Die letzten beiden Punkte sind die Geschwindigkeit der Szenarien und Passagiere. Hier wird der Bereich zwischen 0 km/h und 330 km/h abgedeckt und spiegelt das Geschwindigkeitsspektrum des deutschen Schienenverkehrs wider. Ebenso soll es Untersuchungen mit und ohne Passagiere geben, wobei diese sitzend oder sich bewegend im Zug aufhalten können (siehe Tabelle 6).

Umgebungsbereich 1: Das Zuginnere	Umgebungsbereich 2: Der Zugtyp	Umgebungsbereich 3: Die Zugumgebung
<ul style="list-style-type: none"> • Positionierung Sender und Empfänger unter 40 m und Frequenzen im Sub-6-GHz-Bereich • Geschwindigkeiten von 0 km/h bis 330 km/h • Keine, sitzende oder Passagiere in Bewegung 	<ul style="list-style-type: none"> • Regional-/ Pendlerzug • Hochgeschwindigkeitszug 	<ul style="list-style-type: none"> • Bahnhof • Mischgebiet • Ländliche Umgebung • Tunnel

Tabelle 6: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien

2.2 Physikalische Effekte bei Funkübertragung

Die elektromagnetische Welle besteht aus einem magnetischen und einem elektrischen Anteil. In Abbildung 8 ist beispielhaft eine elektromagnetische Welle abgebildet, die sich eben im Fernfeld in x-Richtung ausbreitet. Das elektrische Feld ist dabei in rot gehalten, das magnetische in gelb. In diesem Fall spricht man von linearer Polarisation, was die geometrische Ausbreitung der Schwingung in der Ebene einer Achse beschreibt. Durch Interaktion der Wellen mit Objekten können sich Richtung, Amplitude und Phase der Welle ändern. [45–47]

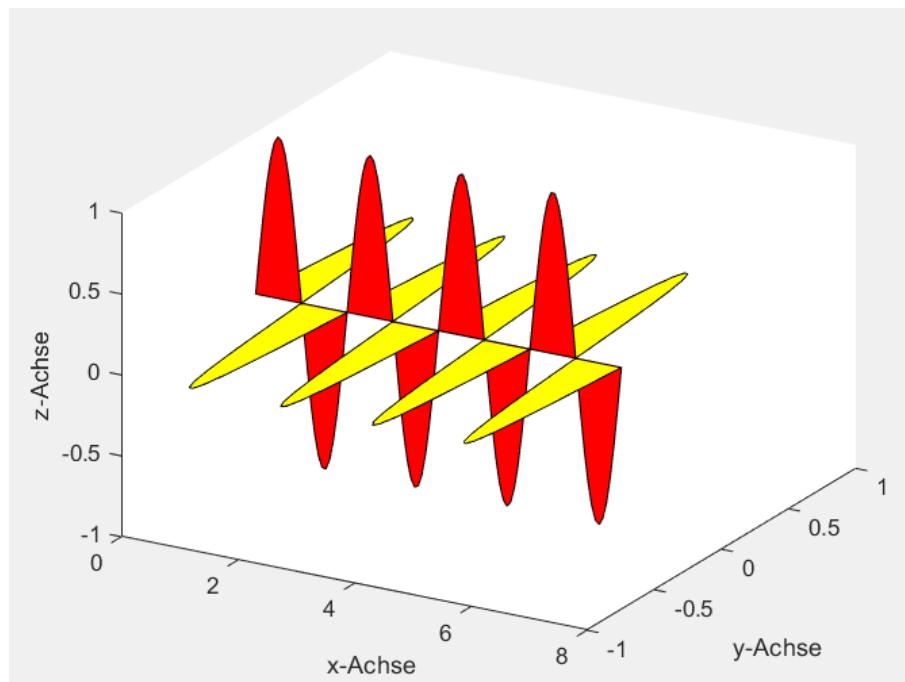


Abbildung 8: Beispiel einer elektromagnetischen Welle im Raum

Formel 1 beschreibt den Zusammenhang der Frequenz und der Wellenlänge einer elektromagnetischen Welle. Beim Durchqueren des Funkkanals vom Sender zum Empfänger ist diese den Eigenschaften des Kanals ausgesetzt. Am naheliegendsten ist dabei der Einfluss des Mediums, in diesem Fall Luft, das dämpfend auf die Funkwelle wirkt. Die sogenannte Freiraumdämpfung wird in Formel 2 beschrieben. Ein weiterer Effekt ist das Abschatten (im Englischen Shadowing). Es ist hauptsächlich ursächlich für den langsamen Schwund (im Englischen Slow Fading). [34]

Formel 1: Das Produkt aus Frequenz f und Wellenlänge im Vakuum/in der Luft λ ist immer konstant und wird durch die Lichtgeschwindigkeit c beschrieben [48]

$$c = f \cdot \lambda$$

Formel 2: Definition der Freiraumdämpfung F in Abhängigkeit der Frequenz f und des Abstandes d zwischen Sender und Empfänger [48]

$$F(dB) = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \right)$$

Zudem existieren in der Schienenfahrzeugumgebung diverse Objekte im Funkkanal, wie bereits in Kapitel 1.2 vorgestellt. Bei der Ausbreitung der Funkwellen interagieren die Wellen mit diesen Objekten. Die möglichen resultierenden Effekte sind von den Materialeigenschaften der Objekte abhängig. Zentral ist dabei die relative Permittivität ϵ_r des Mediums und dessen Leitfähigkeit. Diese Maßzahl gibt vereinfacht an in welcher Intensität ein Medium das elektrische Feld im Vergleich zum Vakuum beeinflusst (Polarisation). ϵ_r ist der Quotient der Permittivität des Mediums ϵ und der Permittivität des Vakuums ϵ_0 und ist dimensionslos. Für den nichtleitenden Kunststoff PVC ist das ϵ_r beispielsweise 6,1 gemäß [47]. Die relative Permittivität ist zudem richtungs-, temperatur- und frequenzabhängig. Den Einfluss des elektrischen Feldes – in unserem Fall einer elektromagnetischen Welle - auf ein Dielektrikum nennt man Polarisation. Es existieren vier generelle Arten der Polarisation in diesem Zusammenhang: Elektronische, Ionische-, Orientierungs- und Raumladungs-Polarisation. Eine ausführliche Erklärung ist in [49] beschrieben. Zudem ist die relative Permeabilität μ_r das Pendant zu ϵ_r bezüglich Magnetismus. Sie gibt an wie ein Material das magnetische Feld im Vergleich zum Vakuum verändert und ist der Quotient der magnetischen Permeabilität des Mediums μ und der Permeabilität des Vakuums μ_0 . Gemäß Formel 3 können aus der relativen Permittivität und der relativen Permeabilität eines Stoffes i sein Brechungsindex n_i berechnet werden. [47, 49]

Formel 3: Definition des Brechungsindex eines Stoffes i als Wurzel des Produktes aus seiner relativen Permittivität und relativen Permeabilität nach [47]

$$n_i = \sqrt{\epsilon_{ri} \mu_{ri}}$$

Der Brechungsindex ist wiederum ein Bestandteil des Snelliusschen Brechungsgesetzes, das in Formel 4 beschrieben wird. Es beschreibt das Verhalten der elektromagnetischen Welle an den Grenzflächen zweier Medien. Im Fall, dass die elektromagnetische Welle von einem optisch dünneren Medium 1 in ein optisch dichteres Medium 2 übergeht ($n_2 > n_1$), erfährt diese einen Phasensprung von 180° , was dem Versatz einer halben Wellenlänge entspricht. Liegt $n_2 < n_1$ vor, kommt es zu keiner Phasenverschiebung. [50]

Formel 4: Brechungsgesetz von Snellius nach [50]

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1}$$

Reflexionen entstehen, wenn Funkwellen auf eine Oberfläche eines Objektes treffen, deren Abmessungen im Vergleich zur Wellenlänge groß sind. Die Funkwelle wird von der Oberfläche mit einem ausfallenden Winkel reflektiert, der dem Einfallswinkel entspricht, wobei Amplitude und Phase der reflektierten Welle von den Oberflächeneigenschaften abhängen. Es wird zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion unterschieden, wobei in der Realität eine Mischung der beiden Reflexionsarten auftritt. Keine Oberfläche ist perfekt, sondern es existieren Unebenheiten beziehungsweise Rauigkeiten. In Abbildung 9 auf der linken Seite ist die Oberfläche bzw. deren Querschnitt wie in der Theorie perfekt eben. Alle einfallenden Wellen, hier vereinfacht als Pfeile dargestellt, werden gemäß Reflexionsgesetz parallel reflektiert. Im rechten Teil der Abbildung ist die Oberfläche realitätsnah und somit uneben. Auch hier entspricht der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel, die reflektierten Anteile sind jedoch aufgrund der Unebenheiten nicht mehr parallel sondern diffus. [51, 52]

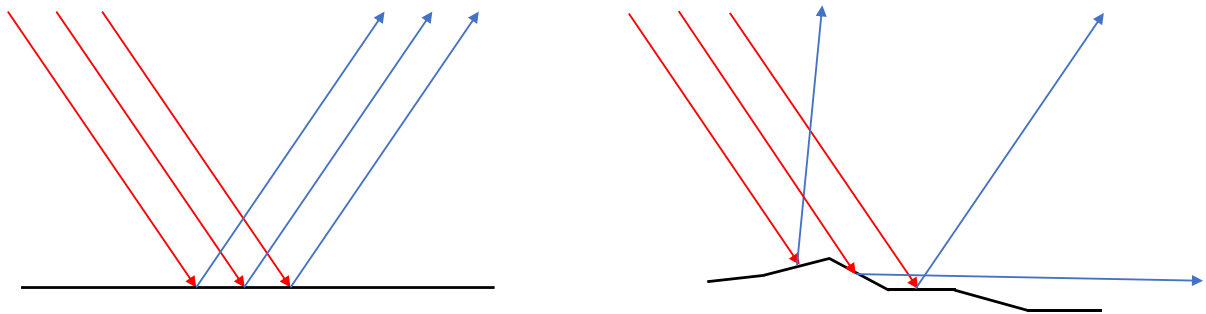


Abbildung 9: Spiegelnde (links) und diffuse (rechts) Reflexion einer elektromagnetischen Welle [47]

Ist die Abmessung des Objektes, auf das die Funkwelle trifft, hingegen in der Größenordnung unterhalb der Wellenlänge, so tritt Streuung auf. Die Energie wird hierbei in viele Richtungen abgelenkt [51]. Stellt man die Formel 1 entsprechend um, so erhält man für ein Frequenzband von 1 GHz bis 6 GHz Wellenlängen zwischen ca. 0,30 m und 0,05 m. Hier zeigt sich, dass Streuung und Reflexion als Effekte in der Kommunikationsauslegung nicht vernachlässigt werden können. [52]

Ebenso kann Beugung auftreten. Dies ist ein Effekt, der an den Kanten von Objekten stattfindet. Sie erfolgt nach dem Huygens-Fresnel-Prinzip, wenn sich ein Objekt zwischen der Sende- und der Empfangsantenne befindet und hinter dem Hindernis Sekundärwellen erzeugt werden. [51]

Durch die drei Effekte an Oberflächen können neben dem ursprünglich ausgesendeten Kommunikationspfad zusätzliche Pfade entstehen (Mehrwegeausbreitung). Jeder Pfad besitzt eine Amplitude und Phase, welche von der Art und Häufigkeit seiner Interaktionen mit Objekten in der Umgebung sowie der Pfadlänge abhängen. In Abbildung 10 sind eine Sende- und Empfangsposition mit möglichen Mehrwegpfaden entlang einer elliptischen Bahn dargestellt. Dies soll die Problematik der Auflösung von Mehrwegeeffekten aufzeigen.

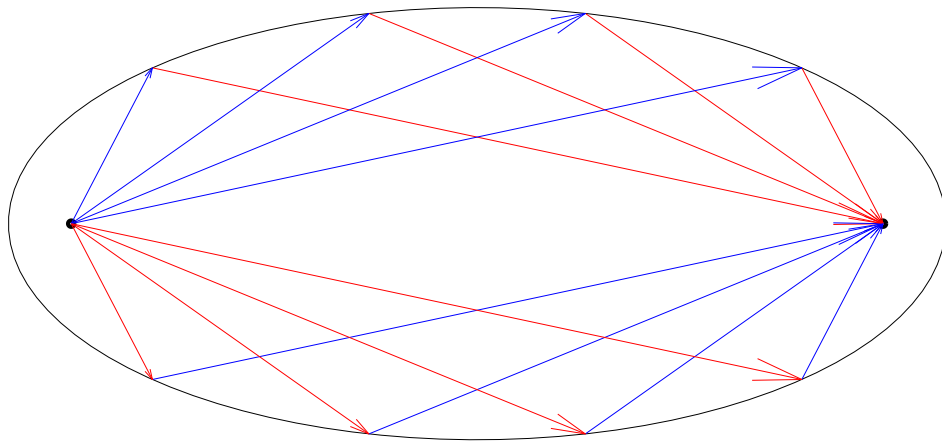


Abbildung 10: Verdeutlichung von Mehrwegeausbreitung am Beispiel elliptischer Reflexionen

Alle Pfade haben trotz unterschiedlicher Reflexionspunkte identische Pfadlängen. Ebenso ist über einen möglichen Phasensprung keine Unterscheidung möglich. Im Falle einer Sichtverbindung, kann diese als Referenz dienen, um Mehrwege generell zu erkennen. Die Anzahl, Amplitude und Phase der Pfade und folglich die Spannung am Empfänger verändern sich abhängig von Ort, Frequenz und Zeit. Phasensprünge durch Reflexion sowie die Ausbreitungspfadlänge und Übertragungsfrequenz bestimmen die Phase der Teilspannungen. Am Empfänger summieren sich diese, abhängig von der jeweiligen Übertragungsfrequenz, konstruktiv oder destruktiv. Dies wird dann als Mehrwegeinterferenz bezeichnet und kann die Empfangsqualität eines Signals massiv beeinflussen. Diese kurzzeitigen Schwankungen der Empfangsspannung werden als schneller Schwund bezeichnet. Die Abweichungen sind die Konsequenz interferierender Signale, wie sie durch die beschriebene Mehrwegeausbreitung erzeugt werden. Betrachtet man die eintreffenden Leistungen am Empfänger zeitlich, so wird ersichtlich, dass durch die Verzögerung der Pfade bewirkt wird, dass ein bestimmtes OFDM-Symbol ganz oder teilweise auf die nachfolgenden Symbole verschoben wird, wodurch die korrekte Erkennung dieser Symbole gestört wird. Dies wird als Intersymbolinterferenz bezeichnet. Eine effektive Gegenmaßnahme ist die Verwendung eines zyklischen Präfixes als so genanntes Guard-Intervall. [34, 53]

Auch die Bewegung des Senders oder Empfängers beeinflusst eine Kommunikationsstrecke. Sind Empfänger und/ oder Sender nicht stationär, sondern in Bewegung zueinander, so kommt es zu einer Frequenzverschiebung der Sendefrequenz f um die Dopplereffekt. Doch auch wenn sich Sender- und Empfänger nicht relativ zueinander bewegen, so kann der Dopplereffekt auftreten, wenn ausgesendete elektromagnetische Wellen mit sich in Bewegung befindenden Objekten interagieren. Alternativ kann auch der Sender und Empfänger in Bewegung sein, ohne Relativgeschwindigkeit untereinander, und an einem ruhenden Objekt ein Effekt wie Streuung, Beugung oder Reflexion stattfinden. Damit ist

der Dopplereffekt prinzipiell auch für die drahtlose Zug-Onboard-Kommunikation relevant. Die Dopplereffrequenz kann nach Formel 5 berechnet werden. Abbildung 11 veranschaulicht das Zustandekommen des Effektes grafisch. [34, 54]

Formel 5: Berechnung der Dopplereffrequenz f_d auf Basis der Geschwindigkeitskomponente v in Fahrtrichtung des Zuges, des Winkels α zwischen der Richtung des Sendesignals und der Fahrtrichtung des Zuges, der Trägerfrequenz f_0 , sowie der Lichtgeschwindigkeit c [54]

$$f_d = \frac{v}{c} \cdot f_0 \cdot \cos \alpha$$

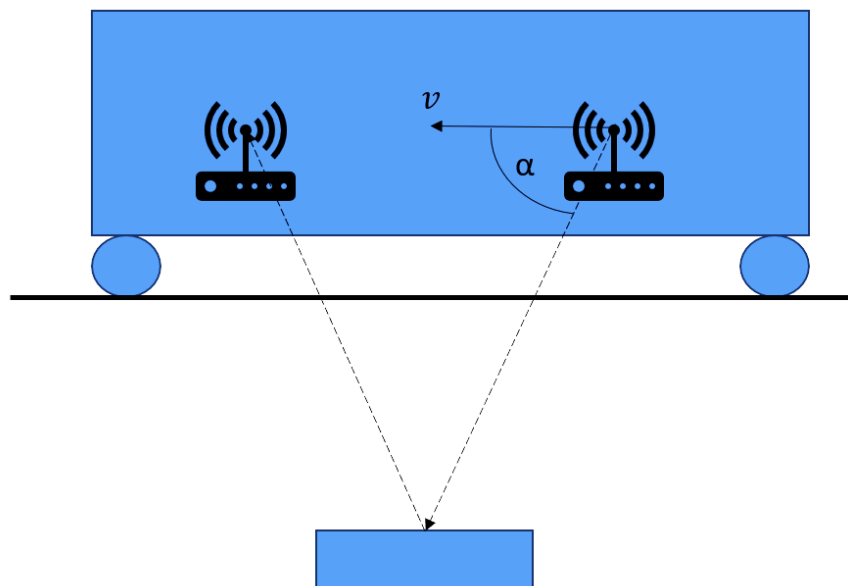


Abbildung 11: Visualisierung des Dopplereffektes bei Zug-Onboard-Kommunikation während der Fahrt mit Reflexionen an ruhenden Objekten neben der Strecke

Ein weiterer Aspekt ist die Erfassung von Frequenzsprüngen verursacht durch den Dopplereffekt. Bei der empirischen Erfassung des Effektes kann man von einer maximalen Zuggeschwindigkeit von 330 km/h in Deutschland ausgehen. Dies ist aktuell die Geschwindigkeit, die ein ICE 3 maximal im deutschen Regelbetrieb fahren kann. [55] Das bedeutet, dass bei einer Reflexion an einem ruhenden Objekt außerhalb des Wagenkastens ein maximaler Geschwindigkeitsunterschied von 330 km/h auftreten kann. Setzt man diesen Wert und $\alpha = 45^\circ$ in Formel 5 ein und verwendet als Sendefrequenz zwischen 1,0 GHz und 6,0 GHz, so liegt die möglichen Dopplereffrequenz zwischen 216 Hz und 1297 Hz. Werden hingegen zwei Züge betrachtet, die jeweils mit der Maximalgeschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung fahren, ergeben sich mögliche Dopplereffrequenzen zwischen 432 Hz und 2595 Hz. Um diese Frequenzverschiebung in der Praxis aufzulösen, muss das Abtasttheorem nach Nyquist und Shannon erfüllt sein. Um ein Eingangssignal aufzulösen, muss dieses mit mehr als der doppelten Grenzfrequenz

abgetastet werden. Da mit aktuellen Messsystemen breitbandig mit mehreren hundert MHz gemessen wird, ist das Theorem prinzipiell erfüllbar und auch Dopplerverschiebungen können identifiziert werden. [56]

2.3 Messbare und berechenbare Größen

Ausgehend von der Kanalimpulsantwort h können mittels Fourier-Transformation alle relevanten Systemfunktionen und Größen eines drahtlosen Übertragungskanals errechnet beziehungsweise dargestellt werden. Dabei ist ausschlaggebend von welchen Parametern die Kanalimpulsantwort h abhängig ist und welche Systemfunktionen dem Forschungszweck genügen. Da es sich im Bereich der drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikation um zeitlich veränderliche Kanäle handelt, die jedoch nicht gerichtet sind, wird mit folgenden vier Funktionen aus Abbildung 12 und Abbildung 13 gearbeitet. Über die Fourier Transformation (siehe Abbildung 12) und die inverse Fourier Transformation (siehe Abbildung 13) können bei Vorhandensein einer Funktion die übrigen drei berechnet werden. [57, 58]

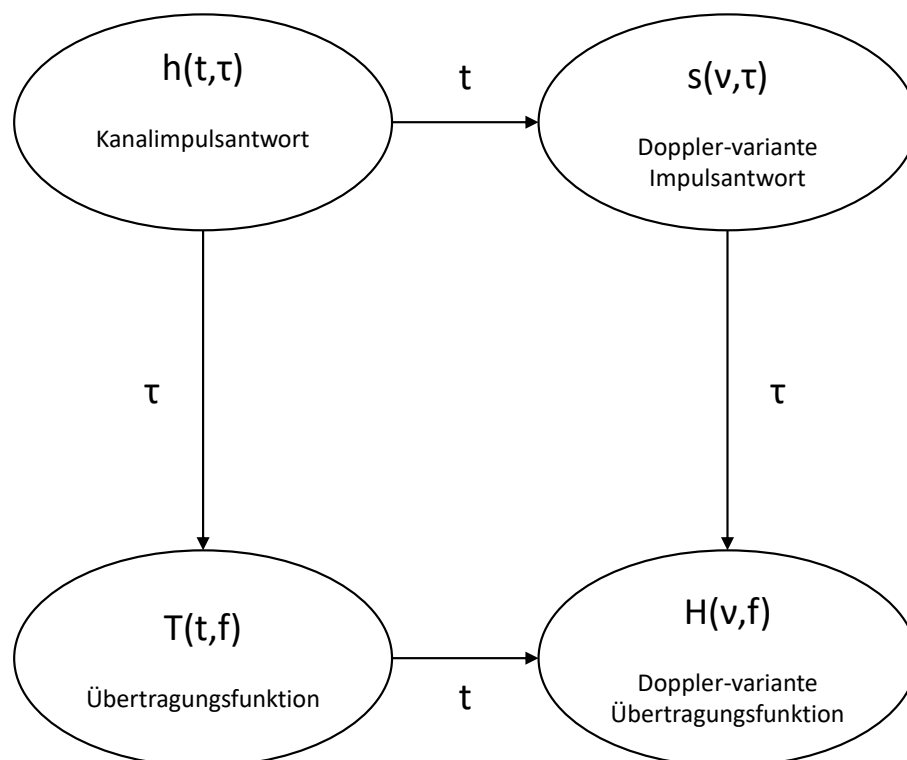


Abbildung 12: Visualisierung der möglichen Fourier-Transformationen und deren Ergebnisse ausgehend von der Kanalimpulsantwort und der Transformationsgröße (Zeit t , Verzögerungszeit τ) neben den Pfeilen abgeleitet von [58].

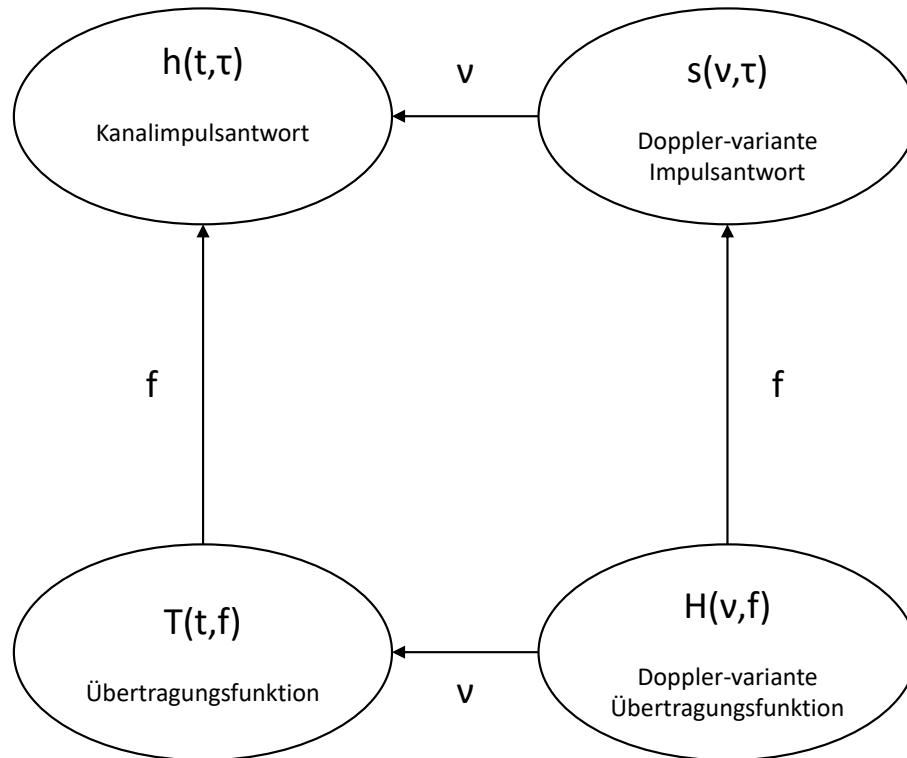


Abbildung 13: Visualisierung der möglichen inversen Fourier-Transformationen und deren Ergebnisse ausgehend von der Doppler-varianten Übertragungsfunktion und der Transformationsgröße (Frequenz f , v Dopplerverschiebung) neben den Pfeilen abgeleitet von [58].

Eine weitere Größe, die analytisch oder empirisch bestimmt werden kann ist der K-Faktor oder auch Rice Parameter genannt. Dieser gibt das Verhältnis von ankommender Leistung am Empfänger durch den Hauptpfad zu ankommender Leistung aus Nebenpfaden (durch zum Beispiel Mehrwegeausbreitung) wieder. Ein hoher Wert von K impliziert also eine starke Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfänger (Rician Fading). Im Umkehrschluss bedeutet dies für kleine K -Werte, dass vermutlich keine oder eine sehr schlechte Sichtverbindung existiert (Rayleigh Fading). [59]

Aus den verzögert ankommenden Pfaden am Empfänger lassen sich weitere Größen berechnen, um die Signalqualität zu beurteilen. Abbildung 14 zeigt beispielhaft und idealisiert vier Pfade, welche Zeitverzögert und mit unterschiedlichen Amplituden am Empfänger ankommen.

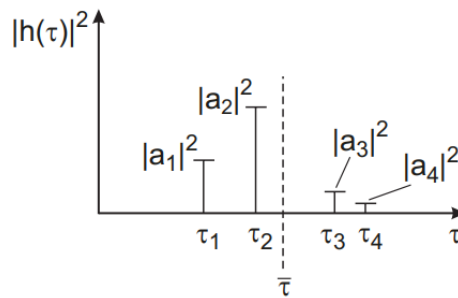


Abbildung 14: Beispiel eines Verzögerungsverlaufs am Empfänger auch im Englischen Power Delay Profile genannt mit vier verzögerten Pfaden aus [54]

Aus diesen Informationen, welche auch durch gemessenen Kanalimpulsantworten vorhanden sind, lässt sich der Mittelwert der Laufzeiten $\bar{\tau}$ berechnen. Dieser wird im Englischen als Mean Excess Delay bezeichnet und ist ebenso nach [54] wie folgt durch Formel 6 definiert.

Formel 6: Definition des Mittelwerts der Laufzeiten $\bar{\tau}$ nach [54] in Abhängigkeit der Leistungen der Einzelpfade a_j und deren Laufzeiten τ_j .

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{j=1}^n |a_j|^2 \tau_j}{\sum_{j=1}^n |a_j|^2}$$

Diese Größe wird dann zur Berechnung der Laufzeitspreizung τ_{rms} nach Formel 7 verwendet.

Formel 7: Definition der Laufzeitspreizung τ_{rms} oder aus dem Englischen RMS Delay Spread als Wurzel aus der Differenz des Mittelwerts der quadratischen Laufzeit $\overline{\tau^2}$ (zweites Moment) und des Quadrats des Mittelwertes der Laufzeiten $\bar{\tau}^2$ aus [54]

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2}$$

Aus dem Beispiel in Abbildung 14 kann außerdem der letzte abbildbare Mehrwegpfad abgelesen werden. In diesem Beispiel wäre dies τ_4 . Im Englischen wird die Verzögerung dieses Pfades Maximum Excess Delay genannt und ist zusätzlich mit einer Dämpfungsangabe in dB versehen, die den leistungsstärksten und den leistungsschwächsten Pfad maximal trennen sollen. In dieser Arbeit wurden hierfür -15 dB gewählt. Das τ_{rms} dient zudem der Berechnung der Kohärenzbandbreite B_c (siehe Formel 8). Sie gibt an über welche Breite eines Frequenzspektrums die Übertragung ohne Störung erfolgt und weist damit die tatsächlich nutzbare Bandbreite der Übertragung aus. [54]

Formel 8: Definition nach [54] der Kohärenzbandbreite B_c als Quotient aus 1 und τ_{rms} .

$$B_c = \frac{1}{\tau_{rms}}$$

Für eine finale Bewertung einer drahtlosen Übertragung auch im Sinne von Sicherheitsfunktionen und der Fehlerrobustheit ist die Bitfehlerrate, im Englischen Bit Error Rate (BER) genannt, von signifikanter Bedeutung. Sie gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Bit fehlerhaft ist. Dabei muss definiert sein, auf welche Randbedingungen sich die Bitfehlerrate bezieht. Es kann sich z.B. um eine Auswertung der fehlerhaften Bits innerhalb einer definierten Zeitspanne einer Übertragung handeln.
[60, 61]

3 Vorstudie: Kommunikationsmessungen im Hochgeschwindigkeitsverkehr

Wie in den vorherigen Kapiteln dargelegt, existiert eine Forschungslücke bezüglich Kanalmodellierung und Kommunikationsforschung für Zug-Onboard-Kommunikation. Um diesen Standpunkt auch empirisch zu festigen, wird in diesem Kapitel eine Messkampagne zu realen Kommunikationsmessungen vorgestellt. Grundlagen zu OFDM können aus Kapitel 2.1 und detaillierter [62] entnommen werden. Die Messungen bei 2,2 GHz sind, wie in [5] veröffentlicht, auf einem Testgleis durchgeführt worden. Prinzipiell wird nachgewiesen, dass die gefahrene Geschwindigkeit einen Einfluss auf die Fehlerrate des Kommunikationssystems hat. Alle Fehlerraten in Fahrt mit 100 km/h liegen bezüglich der Fehler-rate relativ um mindestens 20 % höher als im Stand, unabhängig von der Sender- und Empfängerposition der untersuchten Szenarien. Bisher findet diese Feststellung kaum Berücksichtigung in der Literatur bei der Erarbeitung von Kanalmodellen, da aufgrund der fehlenden Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger auch von keinen Effekten ausgegangen wird. Dies wird im Verlauf dieser Arbeit berücksichtigt. Zudem ist bei den Messungen keine Kanalcodierung zur Vorwärtsfehlerkorrektur implementiert worden, was über alle durchgeführten Messungen mit Sichtverbindung zu Fehlerraten zwischen 4 % und 16 % führt. Im Szenario ohne Sichtverbindung wird eine durchschnittliche Fehlerraten von maximal 66 % beobachtet. Diese massive Streuung in den Ergebnissen verdeutlicht, dass bei weiteren Untersuchungen szenarienspezifisch unterschieden werden muss und nicht pauschal von einem Kanalmodell für die Zug-Onboard-Kommunikation ausgegangen werden kann. Außerdem zeigen diese Kommunikationsergebnisse die Notwendigkeit realistischer Kanalmodelle für die Kommunikationssystementwicklung, um durch Simulationen clevere Modulations- und Fehlervermeidungsmechanismen zu erproben, die Robustheit zu steigern und bessere Fehlerraten zu ermöglichen. [5]

4 Theoretische Überlegungen zur Kanalmodellierung

In der drahtlosen Kommunikationstechnik gibt es nach dem Stand der Technik zwei verschiedene Möglichkeiten ein Kanalmodell zu erstellen.

- a. Die deterministische Kanalmodellierung basiert auf physikalischen Gesetzen und damit einer genau definierten Simulation der Umgebung oder Messungen und Analysen realer Kommunikationskanäle. Es werden alle relevanten Parameter wie die Signalstärke, die Verzögerung oder die Ausbreitungscharakteristik des Signals erfasst und analysiert. Die Ergebnisse werden dann genutzt, um ein mathematisches Modell des Kanals zu erstellen. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass sie sehr genau ist, auf realen Daten basiert und spezifische Kommunikationskonstellationen gerecht wird. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Datenerhebung durch Simulation oder Messungen sehr aufwendig ist und für jede Umgebung und jede Frequenz ein neues Modell erstellt werden muss. Die Simulationsmethode Strahlverfolgung (aus dem Englischen von „Ray tracing“) vereinfacht das Erzeugen von Daten für deterministische Kanalmodelle signifikant, da ohne reale Messungen erste Kanalmodelle erzeugt werden können. Aufgrund der gestiegenen verfügbaren Rechenleistung und innovativer Algorithmen, ist der Strahlverfolgungsansatz in der Kanalmodellierung in den letzten Jahren in seiner Bedeutung gewachsen. Gleichzeitig ist die Genauigkeit der geometrischen Modellierung vor der Simulation eine bedeutsame Stellschraube für die Brauchbarkeit der Ergebnisse. [63]
- b. Die stochastische Kanalmodellierung basiert auf der Modellierung des Kanals als stochastischem Prozess. Dabei werden statistische Eigenschaften des Kanals wie die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Signalstärke oder die Korrelation zwischen verschiedenen Kanälen modelliert. Die Datengrundlage für diese Art der Modellierung kann aus Messungen oder auch Simulationen stammen und es wird meist mit gemittelten Werten gerechnet. Je nach Detailgrad und stochastischer Aufbereitung der Datengrundlage für die Modellierung können unterschiedliche Eignungen des Modells als Ergebnis erzielt werden. Es ist jedoch immer das Ergebnis einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Das bedeutet, dass bei gleichen Eingabedaten unterschiedliche Ergebnisse abhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung geliefert werden. Generell eignet sich diese Herangehensweise für allgemeine Modelle einer Funktechnik und ist bezüglich Rechenaufwand weniger anspruchsvoll als komplexe deterministische Ansätze. [54]

Es existieren jedoch zahlreiche Mischformen der Kanalmodellierung, die Artefakte aus beiden Modellierungsmethoden zu unterschiedlichen Anteilen verwenden. Diese Hybridisierung in der Modellierung wird zukünftig im Terrahertzbereich eine verstärkte Rolle spielen und die beiden

klassischen Herangehensweisen ergänzen. [64] Unabhängig welcher Modellierungsansatz verwendet wird, sind empirische Daten von zentraler Bedeutung. Sie können die Basis einer Kanalmodellierung sein oder auch als Validierungshilfsmittel dienen, um theoriebasierte Modelle zu bestätigen oder zu widerlegen. [65]

In dieser Arbeit werden Kanalmodelle alleine auf Basis von realen Kanalmessungen erzeugt und validiert. Somit können Ungenauigkeiten von rein simulativen Ansätzen vermieden werden. Für jedes Szenario müssen entsprechende individuelle Messungen durchgeführt werden. Auf Allgemeingültigkeit wird bewusst verzichtet.

Angelehnt an [66] wird die Kanalmodellierung in folgenden Schritten gemäß Abbildung 15 durchgeführt, die sich dabei unter drei Überschriften clustern lassen. Die einzelnen Artefakte dieser Vorgehensweise sind in dieser Arbeit auf entsprechende Kapitel verteilt.

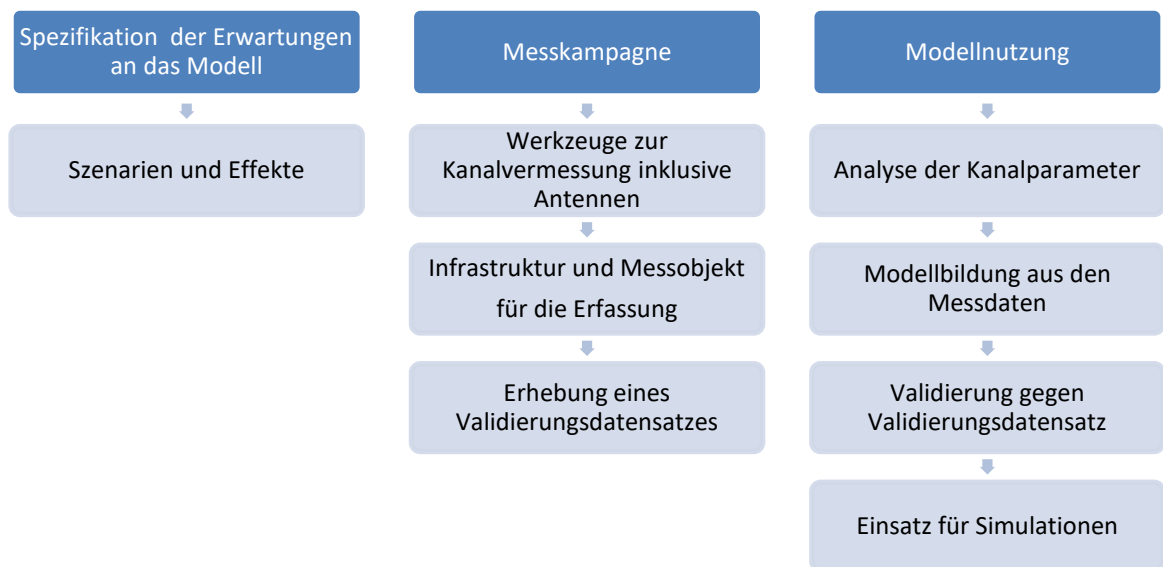


Abbildung 15: Von der Idee eines Modells zur Modellnutzung für Kommunikationssimulationen

5 Erzeugung einer Datenbasis für die Kanalmodellierung

Basierend auf den Feststellungen in Kapitel 1 und 3 existieren in der Zug-Onboard-Kommunikation signifikante Herausforderungen und das Wissen über die Onboard-Funkkanäle ist deutlich begrenzt. Als Datenbasis für die szenarienspezifischen Kanalmodelle werden daher Kanalvermessungen im Fahrzeugbetrieb durchgeführt. Diese sind mit enormem Aufwand verbunden, da sowohl Zug, Strecke wie auch Personal verfügbar sein müssen und zusätzlich Genehmigungen von der Bundesnetzagentur nötig sind. Dies ist in der Tatsache begründet, dass bei einer Kanalvermessung sehr breitbandige Signale verwendet werden, die über die aktuellen und frei verwendbaren Funkbänder hinaus gehen. Die nachfolgenden Unterkapitel erklären die Frequenzauswahl, das Messequipment, die verfügbare Infrastruktur und Schienenfahrzeuge, sowie die Datenaufbereitung nach erfolgten Messkampagnen, um gemäß Kapitel 4 nutzbare Kanalmodellen zu erzeugen.

5.1 Frequenzauswahl

Sowohl für die zukünftige Funkapplikation als auch die Kanalmessung ist die Funkfrequenzauswahl eine relevante Thematik. Zum einen müssen die grundsätzlichen physikalischen Eigenschaften dem Zweck genügen, zum anderen die verfügbaren Bandbreiten ausreichen und die Frequenz lokal nutzbar sein. Es existieren neben weltweit anerkannten Funkstandards länderspezifische Besonderheiten und Frequenzpläne mit gesetzlichem Charakter. In Deutschland regelt die Frequenznutzung der Frequenzplan der Bundesnetzagentur. Wie in Kapitel 1.3 angekündigt beschränkt sich diese Arbeit auf den Frequenzbereich unter 6 GHz. [67, 68] Durch Analyse der Neuerungen des 5G-Standards fällt besonders das neue Frequenzband zwischen 3,3 GHz und 3,8 GHz auf. Dieses hat das Potenzial, international harmonisiert verwendet zu werden und es ist mit wenigen Interferenzen anderer Anwendungen zu rechnen. Auf dem Zug könnte ein lokales 5G-Netzwerk verwendet werden, wie beispielsweise in Fabriken oder an Universitäten bereits getestet. [69, 70] Zudem wurde in der WLAN-Entwicklung die 5 GHz Frequenzen eingeführt nachdem die Bänder um 2,4 GHz massiv überlastet waren. Diese neueren Frequenzbänder haben sich inzwischen stark etabliert. Viele Architekturen existieren bereits, die für den Aufbau eines solchen Kommunikationssystems verwendet werden könnten. Die Wahrscheinlichkeit einer Industrialisierung der Forschungsergebnisse sind damit höher und mit geringem Kosteneinsatz realisierbar. Dies trifft ebenso auf die LTE-Frequenzbänder um 2,6 GHz zu, welche in urbanen Umgebungen häufig durch die Mobilfunkbetreiber verwendet werden. [71, 72] Somit sind die ausgewählten Frequenzen für die Kanalmessungen 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz. Darüber hinaus sind die

genannten Frequenzbänder auch im Frequenzplan der Bundesnetzagentur genannt, was Tabelle 7 visualisiert.

Frequenzteilplan	Eintrag im Frequenzplan	Frequenzbereich	Frequenznutzung
308	308001	2670 - 2690 MHz	Drahtloser Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten
311	311001	2700 - 2900 MHz	33: Drahtlose Kameras
316	316003	3475 - 3600 MHz	33: Drahtlose Kameras
316	316004	3475 - 3600 MHz	Drahtloser Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten
317	317003	3600 - 3800 MHz	Drahtloser Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten
332	332002	5470 - 5570 MHz	D446A: WLAN
333	333001	5570 - 5650 MHz	D446A: WLAN
334	334003	5650 - 5725 MHz	D446A: WLAN

Tabelle 7: Mögliche Frequenzbänder um 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz für potenzielle Zug-Onboard-Kommunikation aus dem deutschen Frequenzplan der Bundesnetzagentur [68]

5.2 Messaufbau und Ausrüstung

Eine Vielzahl der aktuellen Systeme zur Kanalvermessung ist zum Teil oder vollständig aus Komponenten bekannter Hersteller aufgebaut, die in regelmäßigen Zyklen die Bandbreiten und Leistungsfähigkeit der Geräte erweitern. Zusätzlich bieten diese oftmals die Möglichkeit, die Kanalparameter für Simulationen in einen Emulator einzubinden, wie ein Beispiel hierfür aus der Luft- und Raumfahrt zeigt [73]. Es wird ein Signalgenerator und Signalanalysator der Firma Rohde & Schwarz verwendet. Alternativ ist auch die Firma Keysight Technologies im Bereich der Kanalcharakterisierung etabliert und ein Beispiel für Mobilfunkmessungen bei 2,6 GHz sind in [74] zu finden. Die Hauptproblematik bei kommerziell erhältlichen Systemen sind für die Forschung die hohen Gerätekosten, die zum Teil über 100000 € pro Gerät betragen. Für diese Arbeit wurde aufgrund des innovativen Charakters des Messvorhabens eine kostenfreie Bereitstellung von Rhode & Schwarz gewährt. Dabei dient der Vektorsignalgenerator SMBV100B als Sendegerät und ein Signal- und Spektrumanalysator FSW wird als Empfangsgerät

verwendet (siehe Abbildung 16). Zusätzlich wird die Software TS5GCS zur Steuerung auf dem Laptop angewendet.

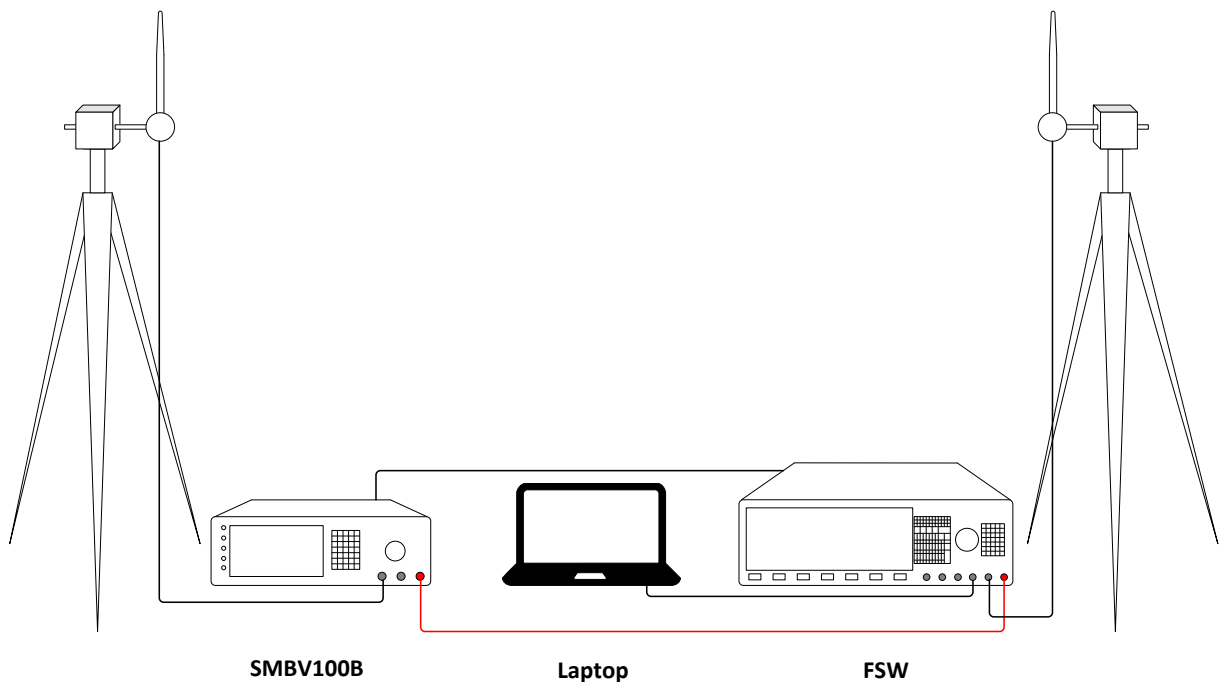


Abbildung 16: Schamatische Darstellung des Messaufbaus mit Geräten, Antennen, Stativen sowie Bedienlaptop

Der Laptop ist mit dem Empfangsgerät über ein Netzkabel verbunden. Es lassen sich so die Messungen anstoßen, der Ort der Speicherung festlegen, die Wellenform für die Messung einstellen und eine Kalibrierung durchführen. Außerdem werden die Geräte über ein BNC-Kabel synchronisiert und zu Konfigurationszwecken zusätzlich mit einem Netzkabel verbunden. Als Wellenform für die Kanalmessung wird in diesem Kontext eine gefilterte Zadoff-Chu-Sequenz verwendet, die über das Gerät SMBV100B mit einer Bandbreite von 600 MHz ausgesendet wird. Die vom FSW gelieferten I/Q-Daten werden mit Hilfe des Laptops ausgewertet und die Kanalimpulsantwort per Korrelation mit einer kalibrierten Ursprungssequenz berechnet, was als Pulskompressionsverfahren bezeichnet wird. Weitere Datenanalysen erfolgen mit eigenen Skripten in Matlab. Im Vergleich zu anderen Wellenformen wie z.B. Zufallssequenzen, sind Zadoff-Chu Sequenzen wesentlich besser geeignet, da weniger rauschanfällig. [75] bietet eine detaillierte Betrachtung möglicher Wellenformen und zeigt den Beweis für die sehr gute Eignung der Zadoff-Chu Sequenzen für die Kanalvermessung. Dies ist auch auf die optimalen Autokorrelationseigenschaften zurückzuführen. Die eingesetzte Zadoff-Chu Sequenz besteht aus 120000 Folgegliedern und wurde mit der Wurzel 30600 berechnet. Die Sequenz wird zudem gefiltert, um eine niedrige Peak-to-average power ratio (Verhältnis von Spitzenleistung zu der mittleren Leistung eines Signals) zu erhalten. In dem Folgenbeispiel in Abbildung 17 wird die konstante Magnitude als typische Eigenschaft der Zadoff-Chu Folge visualisiert. Im Englischen zählt die Zadoff-Chu Folge zu den

CAZA-Folgen (Aus dem Englischen: Constant amplitude zero autocorrelation waveform). Außerdem ermöglicht die Bandbreite des SMBV100B eine zeitliche Auflösung von ca. 1,67 ns. [76], was zum Zeitpunkt der Messdurchführung in dieser Domäne nahezu einzigartig ist. [54]

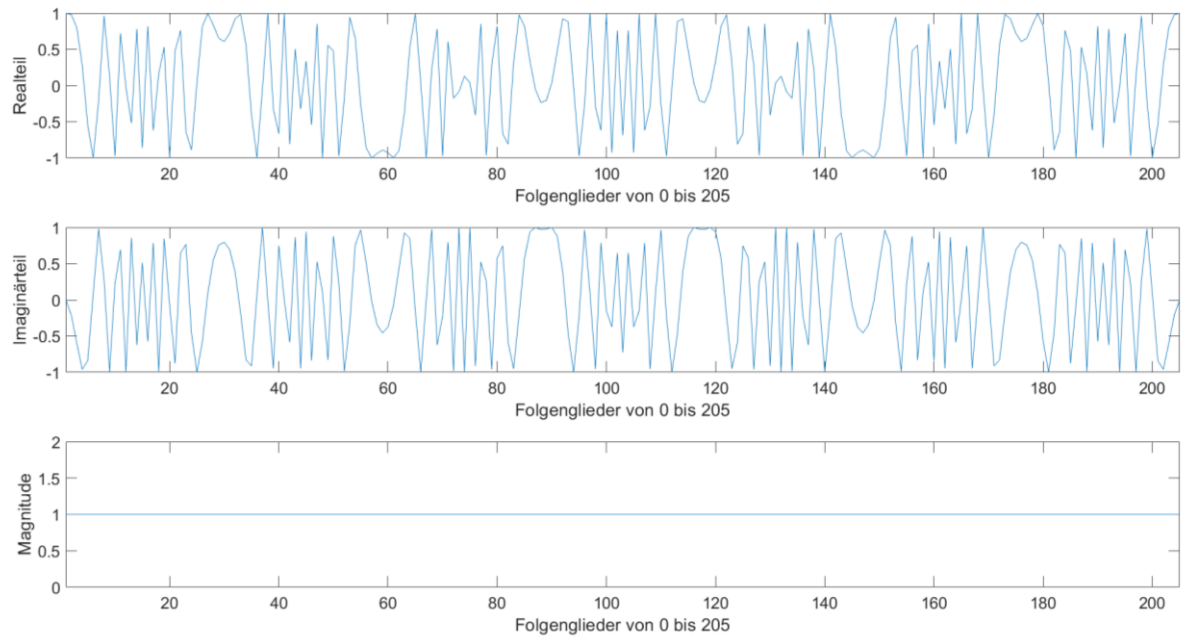


Abbildung 17: Beispiel einer Zadoff-Chu Folge mit 205 Folgengliedern und einer Wurzel von 7 angelehnt an [77]

Als Antennen wird ein Paar von Stabantennen des Herstellers Ettus Research mit dem Namen VERT2450 für ausgewählte Szenarien bei 5,6 GHz eingesetzt. Der Antennengewinn wird hier mit 3 dBi angegeben. Ebenso ist die Antenne FXUB66 des Herstellers Taoglas in Verwendung. Bei dieser handelt es sich um eine spezielle Flachantenne für den breitbandigen Einsatz im Sub-6-GHz-Bereich. Der maximale Gewinn liegt bei 2,7 GHz bei ca. 3,2 dBi, bei 3,6 GHz bei 5 dBi und bei 5,6 GHz bei 3,5 dBi. Ebenso ist die Strahlungscharakteristik relativ gleichmäßig. Die Auswahl der Antennen wird hauptsächlich von der Praxistauglichkeit beeinflusst. Sie müssen gut verfügbar, leicht montierbar, für die jeweilige Frequenz einsatzfähig und in den Kontext der Szenarien passend sein. [78, 79]

Abbildung 18 visualisiert die Eigenschaften der VERT2450 Antenne. Der Einsatzbereich bei 5,6 GHz wird nicht explizit genannt, es lässt sich aber die Rückflusdämpfung mit ca. -13 dB bei 5,6 GHz ablesen. Auch die Abstrahlcharakteristik ist omnidirektional.

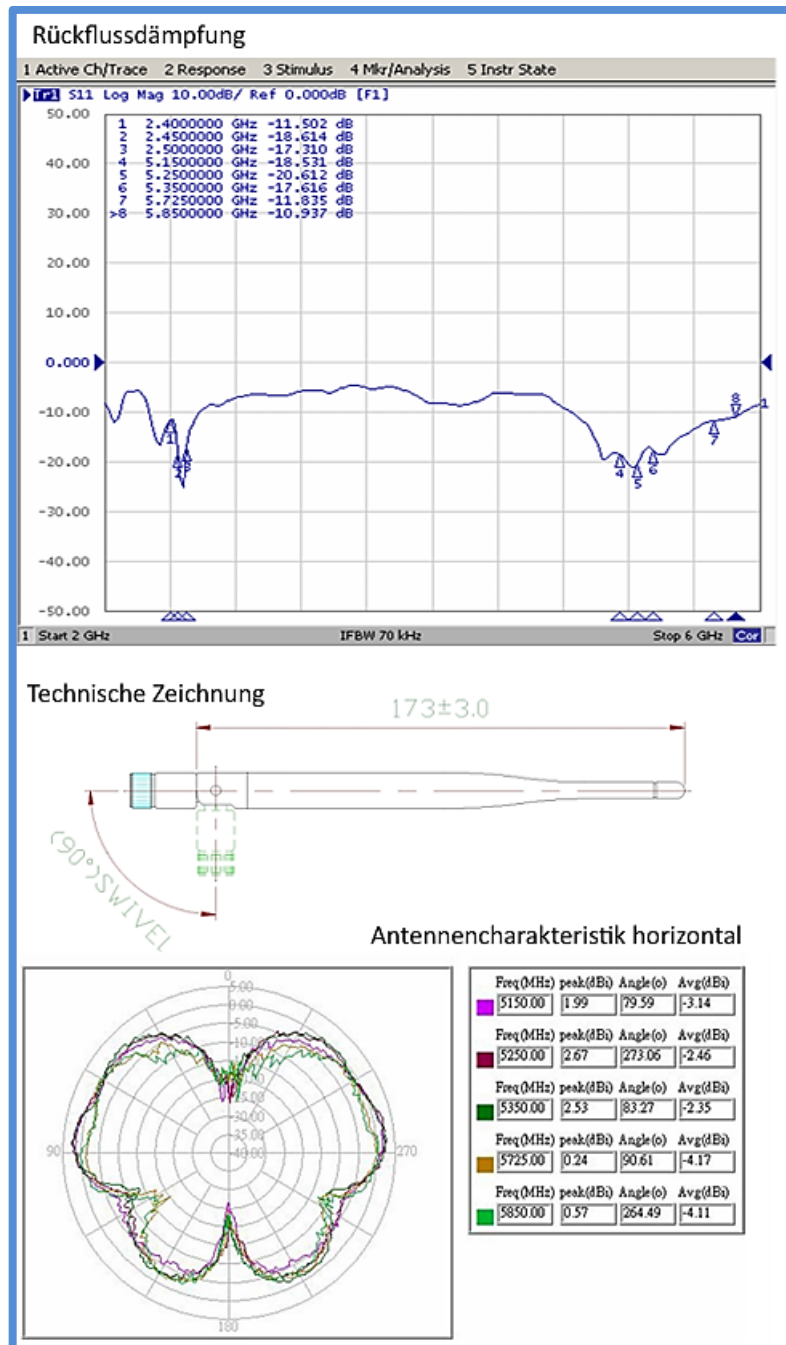


Abbildung 18: Antenneneigenschaften der VERT2450 aus dem Datenblatt [78]

Für die Antenne FXUB66 zeigt Abbildung 19 die Abstrahlcharakteristik bei 3,6 GHz. Weitere Frequenzen können dem Datenblatt [79] entnommen werden. Ebenso zeigt die Rückflussdämpfung eine gute Eignung der breitbandigen Antenne für die gewählten Frequenzen 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz. Zusätzlich benötigt die flache Antenne sehr wenig Bauraum, kann auf Oberflächen mit dem vorhandenen Klebestreifen sehr leicht befestigt werden und durch die Breitbandigkeit für diverse Applikationen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Antenne ist außerdem der günstige Preis von unter 10€.

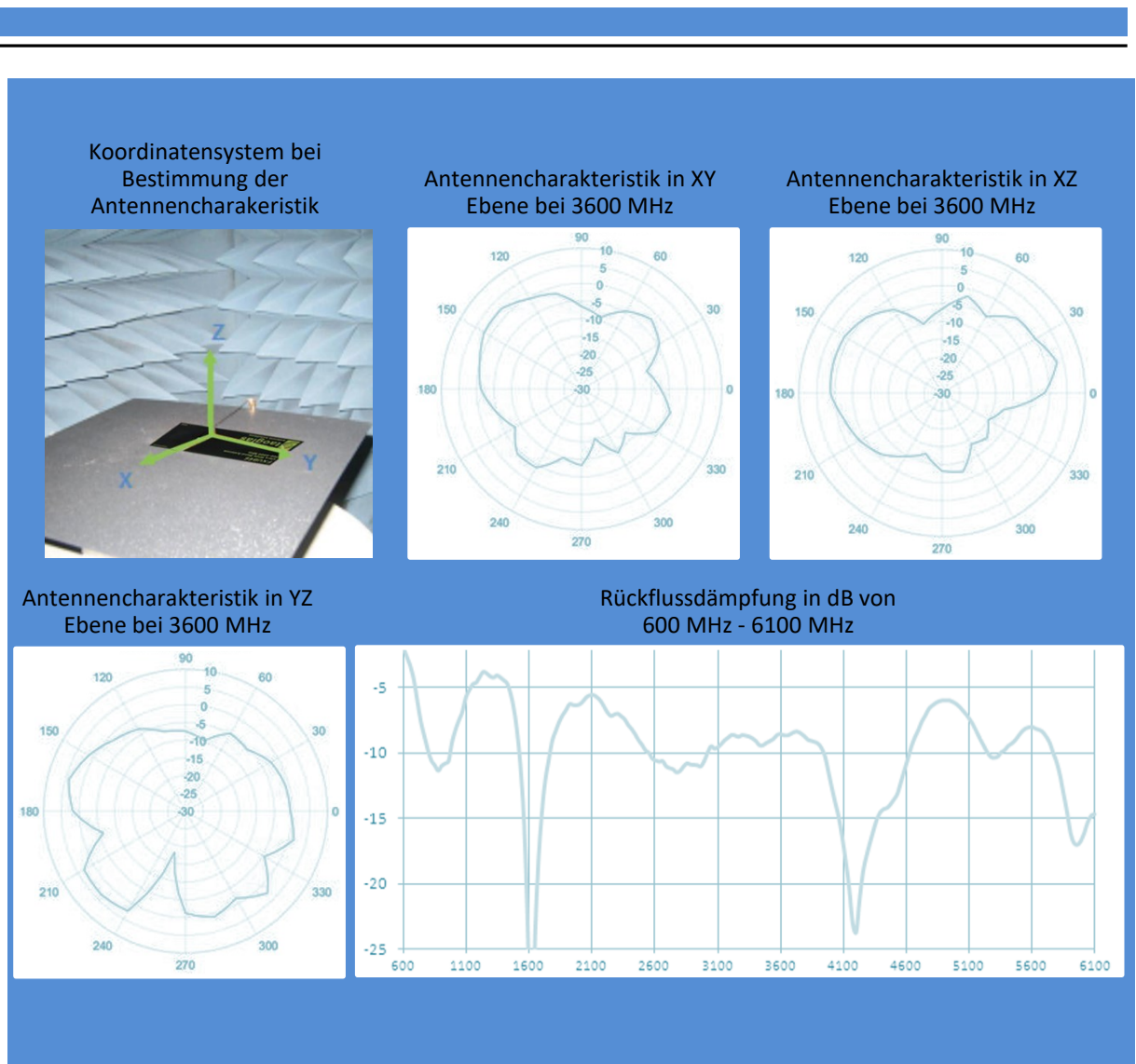


Abbildung 19: Antenneneigenschaften der FXUB66 Breitbandantenne aus dem Datenblatt [79]

5.3 Übersicht über die Messkampagnen

Folgende fünf Messkampagnen sind für diese Dissertation durchgeführt worden und sind in Tabelle 8 aufgezeigt. Teilergebnisse sind teilweise in den letzten Jahren veröffentlicht worden. Siehe hierzu [5, 13, 76, 80–85]. Als Datenbasis dienen über 200 Messreihen mit bis zu je 1000 empirisch erfasster Kanalimpulsantworten. Als Vertreter für Pendlerzügen wird die U-Bahn als Zugtyp untersucht. Dieser verkehrt sowohl unterirdisch, als auch oberirdisch. Die Durchgängigkeit ohne Barrieren, Sitzinseln oder Trennwänden über die gesamte Zuglänge ist mit hohem Stehplatzanteil typisch für diesen Zugtyp und ein deutliches Unterscheidungsmerkmal zum Regional- und Hochgeschwindigkeitszug. Aufgrund der Strecken und Fahrzeugverfügbarkeit werden Szenarien mit dem Zugtyp U-Bahn lediglich statisch durchgeführt.

Nr.	Datum	Zugtyp	Zustand des Zuges	Art der Messung
1	Jun. 2018	Hochgeschwindigkeitszug	statisch und dynamisch	Kommunikationsmessung
2	Apr. 2019	Regionalzug und U-Bahn	statisch	Kanalmessung
3	Apr. 2019	Regionalzug	statisch und dynamisch	Kanalmessung
4	Apr. 2019	Hochgeschwindigkeitszug	statisch	Kanalmessung
5	Mai. 2019	Hochgeschwindigkeitszug	statisch und dynamisch	Kanalmessung

Tabelle 8: Übersicht der durchgeführten Fahrzeugmessungen

5.4 Datenaufbereitung

Liegen die I/Q-Daten vor, welche wie in Kapitel 5.2 beschrieben, erfasst werden, müssen diese lesbar aufbereitet werden. Hierfür berechnet man aus den Spannungswerten die absoluten Leistungswerte (dBm). Aus den Messaufzeichnungen lassen sich ebenso Rauschgrenzen und der RMS Delay Spread extrahieren. Die Kanalimpulsantworten und dazugehörige Parameter werden innerhalb einer Messreihe gemittelt. Das bedeutet, dass aus bis zu 1000 einzelnen Kanalimpulsantworten ein Modell erzeugt wird. Außerdem wird die Standardabweichung für jeden Zeitpunkt in der Messreihe bestimmt. Dies ist ein Maß dafür, wie sich der Kanal über den Zeitraum der Untersuchung, während der Messung einer Vielzahl von Kanalimpulsantworten, verändert. Der Standarduntersuchungszeitraum pro Kanalimpulsantwort ist in diesem Kontext 2 μ s.

Für das Erstellen der Kanalmodelle müssen die absoluten Leistungswerte in relative umgerechnet und zusätzlich nur Werte berücksichtigt werden, die oberhalb der Rauschgrenze liegen. Ein weiterer Unterschied bei der Datenaufbereitung geht von der Art der durchgeführten Messung aus. Es werden getriggerte und ungetriggerte Messungen unterschieden. Bei getriggerten Messungen findet vor der eigentlichen Messung eine Synchronisation von Sende- und Empfangsgerät statt, was Frequenz- und Zeitfehler aufgrund von unterschiedlichen Quellen verhindert. Diese Messungen sind aufgrund der Kalibrierung sehr genau, benötigen aber zusätzlich Zeit, die nicht in jeder Situation gegeben ist. Abhilfe schafft hier die ungetriggerte Messung, die mit dem Eintreffzeitpunkt des ersten relevanten Pfads beginnt (gesetzt als Verzögerungszeit $\tau = 0$ s). Abbildung 20 stellt zwei Messreihen eines Szenarios dar, die mit den beiden unterschiedlichen Messmethoden durchgeführt worden sind. Die Grafik zeigt, dass der RMS Delay Spread und damit auch die Kohärenzbandbreite nahezu identisch sind, während aufgrund der unterschiedlichen Messstartzeitpunkte der Mean Excess Delay und der Maximum Excess Delay unterschiedlich sind. Dies muss bei späteren Vergleichen und Analysen berücksichtigt werden.

Die Identifikation der zeitlichen Start- und Endpunkte eines jeden Modells sind abhängig vom Leistungsmaximum, dessen Verlauf und der Rauschgrenze. Die Messdaten werden außerdem mit etablierten statistischen Methoden ausgewertet. Diese werden genannt, aber nicht explizit erläutert. Erklärungen und eine tiefe Einführung in statistische Methoden liefert [86].

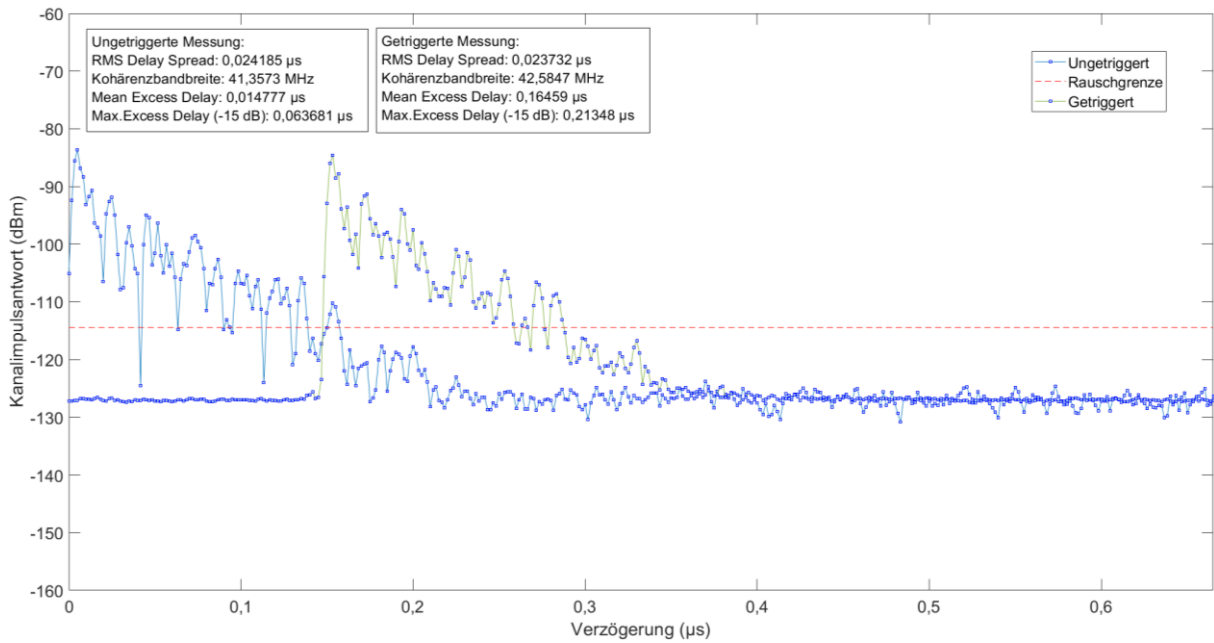


Abbildung 20: Vergleich einer getriggerten (grün) und einer ungetriggerten (blau) Messreihe eines Szenarios

6 Untersuchung ausgewählter Szenarien bezüglich Auffälligkeiten und Wellenausbreitungseffekten

Bei der empirischen Erfassung der Kanalimpulsantworten sind die beschriebenen Wellenausbreitungseffekte gemäß Kapitel 2 beobachtbar. In einigen Szenarien sind außergewöhnliche Ergebnisse feststellbar, die stark von dem bisherigen bekannten Stand der Technik abweichen, beziehungsweise zum ersten Mal im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Nicht jede identifizierte Besonderheit kann direkt in ein Kanalmodell überführt werden, ist jedoch für die Reduktion der Forschungslücke signifikant.

Folgende Szenarien werden untersucht:

- Mobiles Arbeiten im ICE bei 5,6 GHz
- Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen
- Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz
- Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen
- Mobiles Arbeiten im ICE bei verschiedenen Frequenzen
- Gegenüberliegende Steuerungen im Regionalzug bei 3,6 GHz

6.1 Mobiles Arbeiten im ICE bei 5,6 GHz

In diesem Szenario wird der Funkkanal in einem ICE 4 (siehe Abbildung 21) untersucht. Dabei wird der Sender auf einem Tisch, ähnlich einem Laptop beim Arbeiten im Zug, platziert. Der Empfänger wird auf Höhe der Displays im Gangbereich der Türen positioniert.



Abbildung 21: Aufnahme der Baureihe 412 der Deutschen Bahn von [87]

In diesem Bereich sind häufig Steuergeräte oder Informationsdisplays verbaut. Ebenso können an dieser Position leicht WLAN-Router nachgerüstet werden. Es handelt sich dabei um Orte zwischen denen in der Regel Kommunikation stattfindet oder zukünftig stattfinden könnte. In Abbildung 22 wird die Positionierung visualisiert und es ist zu erkennen, dass keine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger existiert.

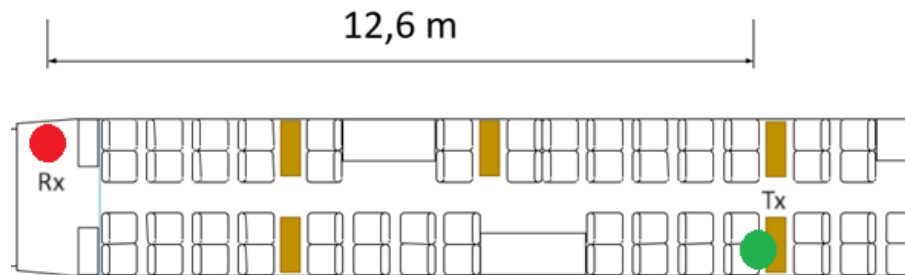


Abbildung 22: Sender Tx (grün) und Empfänger Rx (rot) ohne Sichtverbindung bei 5,6 GHz in einem Mittelwagen der Baureihe 412 der Deutschen Bahn auf Basis von [87]

Während der Messung befindet sich der Zug stillstehend in einem Depot und damit in eine Art Bahnhofsumgebung mit weiteren Zügen auf Nachbargleisen. Es sind außerdem keine Passagiere an Bord gewesen. Als Antennen ist die VERT2450 eingesetzt worden. Abbildung 23 visualisiert die Messreihe, wobei die Mehrwegepfade zwischen ca. -92dBm und -110 dBm bis zum Erreichen des Maximum Excess Delays bei 0,12 μ s wechseln.

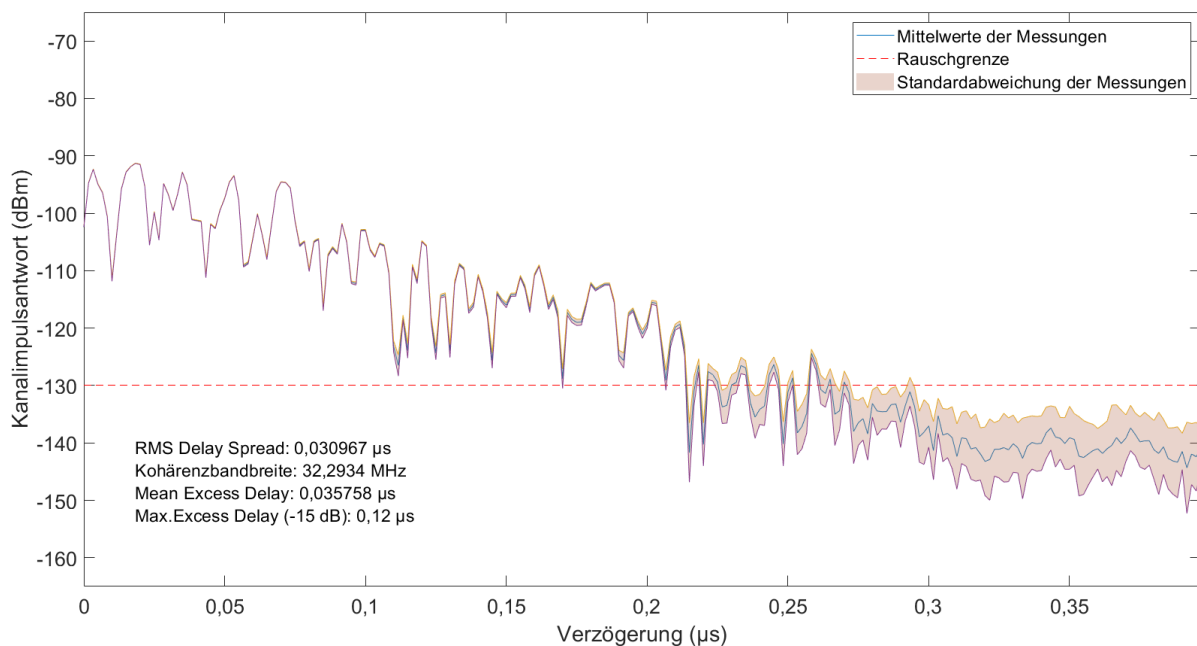


Abbildung 23: Mittelwerte aus 24 Kanalimpulsantworten mit visualisierter Standardabweichung und Rauschgrenze für das Szenario „Mobiles Arbeiten im ICE bei 5,6 GHz“

Bis zu diesem Verzögerungswert ist auch die Standardabweichung fast nicht erkennbar. Erst nach den 0,12 μ s wird diese breiter, bis beim Unterschreiten der Rauschgrenze diese nochmals massiv breiter wird. Diese Messreihe zeigt, dass trotz fehlender Sichtverbindung eine gute Bandbreite von über 32 MHz zur Verfügung stehen kann. Gleichzeitig ist anzumerken, dass dies unter Optimalbedingungen stattfindet, da weder Passagiere das Signal dämpfen noch Geschwindigkeitseinflüsse auftreten.

6.2 Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen

Ausgehend von einem Kommunikationsszenario zwischen zwei Fahrgastinformationsanzeigen wird Folgendes gemäß Abbildung 24 bei 2,7 GHz an Bord eines ICEs untersucht.

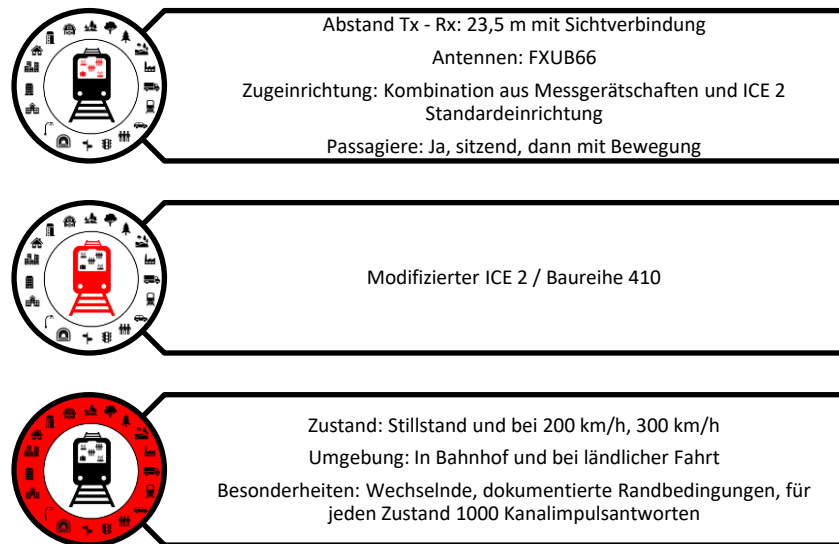


Abbildung 24: Szenario „Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen“

Bei dem Szenario wird ein möglicher realitätsnaher Betriebsablauf untersucht. Innerhalb des Wagens sitzen die Passagiere auf ihren Plätzen. Die Antennen werden über den Durchgangstüren, gegenüberliegend und mittig angebracht. Diese Positionierung wäre beispielsweise typisch für die Nachrüstung von drahtlos kommunizierenden Fahrgastinformationsbildschirmen, die an diesen Stellen gut einsehbar sind. Zusätzlich ist erwähnenswert, dass es sich bei dem verwendeten Messzug um einen modifizierten ICE 2 handelt, der für Experimente und Erprobung von Innovationen auf deutschen Regelstrecken eingesetzt wird. Dabei wird der ICE S der DB Systemtechnik GmbH mit dem Einzelwagenerprobungsträger der Siemens Mobility GmbH kombiniert und ein neuer Zug mit zwei Endwagen und drei Mittelwagen entsteht wie in Abbildung 25 dargestellt. Die Sitzplatzanordnung weicht stark vom ICE 2 im Passagierverkehr ab. Prinzipiell sind jedoch ähnliche Einrichtungsstände vorhanden wie Sitze,

Tische, Mittelgang und Gepäckablagen (siehe Abbildung 26). Technisch sind mit diesem Zug Geschwindigkeiten über 300 km/h möglich. In diesem Ausgangsszenario befindet sich der Zug allerdings im Stillstand. [88, 89]



Abbildung 25: ICE S mit Einzelwagenerprobungsträger von [89] während einer Fahrt durch ländliches Gebiet

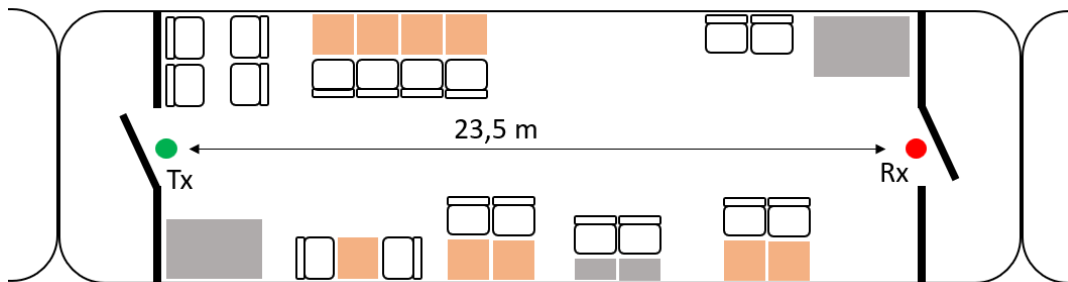


Abbildung 26: Layout des modifizierten ICE mit Sender (grün)- und Empfängerposition (rot)

Die Umgebung neben der Schiene ist für diese Messung bahnhofstypisch. Auf einer Seite des Zuges liegt der Bahnsteig, auf der anderen Seite eine Schallschutzmauer, die bis zur Höhe der Oberleitung ragt. Auf dem Bahnsteig befinden sich vereinzelt stehende und gehende Menschen, wobei die Auslastung für einen Wochentag abseits der Stoßzeiten typisch ist. Der Bahnsteig selbst ist überdacht. Operativ ist dies somit im Zuginneren ein statisches Szenario, da sich die Menschen noch immer sitzen oder bereits auf den Plätzen eingefunden haben. Der Zug steht abfahrtbereit, bis das Ausfahrtsignal erteilt wird. Das Ergebnis der Messung zeigt die rote Kanalimpulsantwort mit der Beschriftung „statisch ohne Menschen“ in Abbildung 27. Nun findet eine erste Veränderung des Szenarios statt und die Passagiere stehen auf, verlassen den Zug oder steigen ein. Die Ergebnisse dieses veränderten Szenarios sind ebenso in Abbildung 27 zu finden mit der Legendenbeschriftung „statisch mit Menschen“ in der Farbe Blau. Nun fährt der Zug aus dem Bahnhof aus und beschleunigt auf 200 km/h alle Passagiere sitzen

und die Umgebung neben den Gleisen lässt sich als ländliche, flache Umgebung bezeichnen. Die Kanalimpulsantworten bei der konstanten Fahrt ohne Passagierbewegung sind in schwarzer Farbe mit der Beschriftung „Überlandfahrt bei 200 km/h“ in Abbildung 27 visualisiert. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit auf 300 km/h erhöht, was dann in der Farbe Grün mit der textuellen Beschreibung „Überlandfahrt bei 300 km/h“ in der gleichen Grafik dargestellt ist.

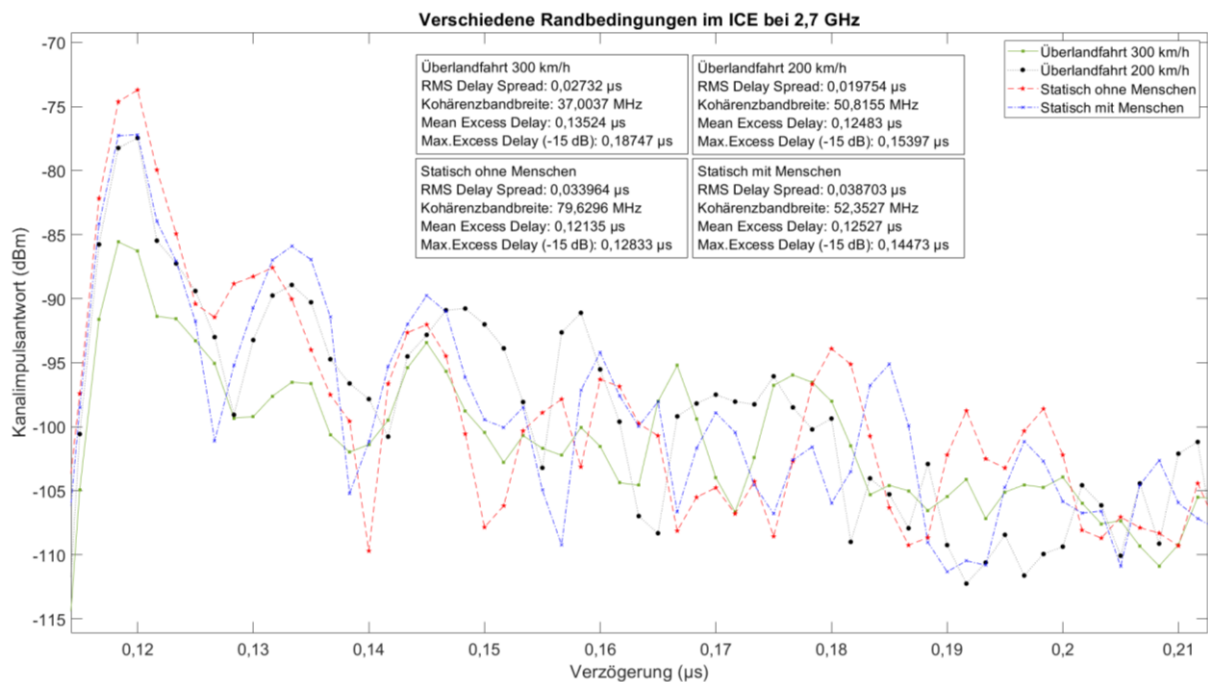


Abbildung 27: Kanalimpulsantworten für das Szenario „Fahrgastinformationsanzeigen im ICE bei 2,7 GHz unter verschiedenen Bedingungen“

Die Ergebnisse zeigen den Einfluss von Menschen. In den statischen Untersuchungen bricht die Kohärenzbandbreite von 79,6 MHz auf 52,4 MHz ein. Dies liegt in der gleichen Größenordnung wie der Einfluss der Geschwindigkeit (200 km/h). In diesem Fall wurde eine Kohärenzbandbreite von 50,8 MHz festgestellt. Nur der Unterschied zu der Fahrt bei 300 km/h ist größer. Hier ist lediglich eine Kohärenzbandbreite von 37,0 MHz verfügbar.

6.3 Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz

Die Kommunikation von mobilen Endgeräten ist ebenso ein zu untersuchendes Szenario. Insbesondere ist diese Kommunikation nötig bei der Fahrkartenkontrolle, nachträglichem Ticketkauf oder anderweitigem Abstimmungsbedarf zwischen dem Bordpersonal. Es wird hierfür die Frequenz von 3,6 GHz

gewählt. Das weitere Szenario ist in Abbildung 28 definiert, während das Zuglayout durch Abbildung 29 dargestellt wird.

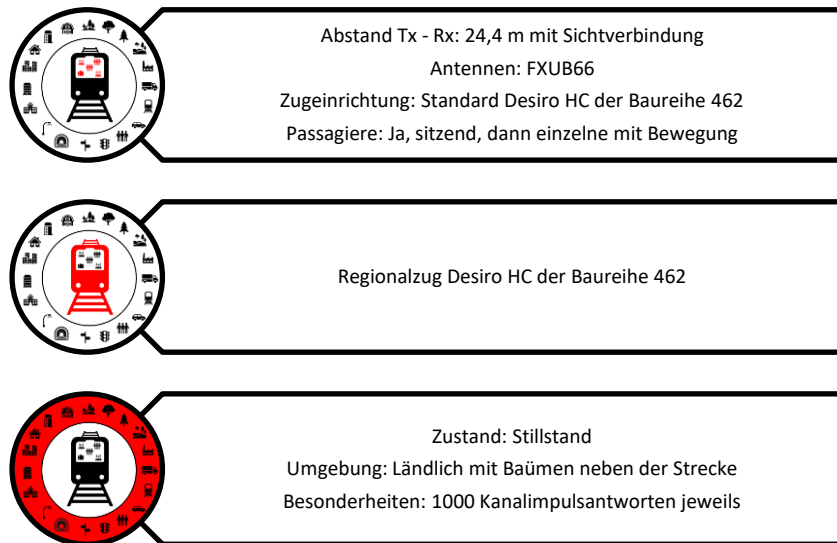


Abbildung 28: Szenario „Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz“

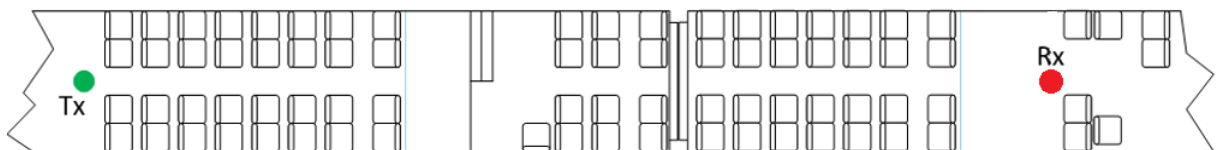


Abbildung 29: Layout des Regionalzuges der Baureihe 462 mit Positionen von Sender und Empfänger

Anzumerken ist, dass es sich bei der Baureihe 462 um einen Doppelstockzug handelt. Der Sender steht in diesem Beispiel in einem Doppelstockwagen in der unteren Ebene. Der Empfänger steht im Endwagen, der lediglich einstöckig ausgeführt ist. Dennoch besteht über den Mittelgang eine Sichtverbindung. Abbildung 30 zeigt ein Foto des Zuges.



Abbildung 30: Aufnahme eines Desiro HC der Baureihe 462 von [90]

Es werden in einem ersten Schritt Messungen ohne Bewegung von Personen durchgeführt. Diese sitzen auf den Plätzen, wobei nur ca. jeder 8. Platz besetzt ist. Das Messergebnis zeigt Abbildung 31.

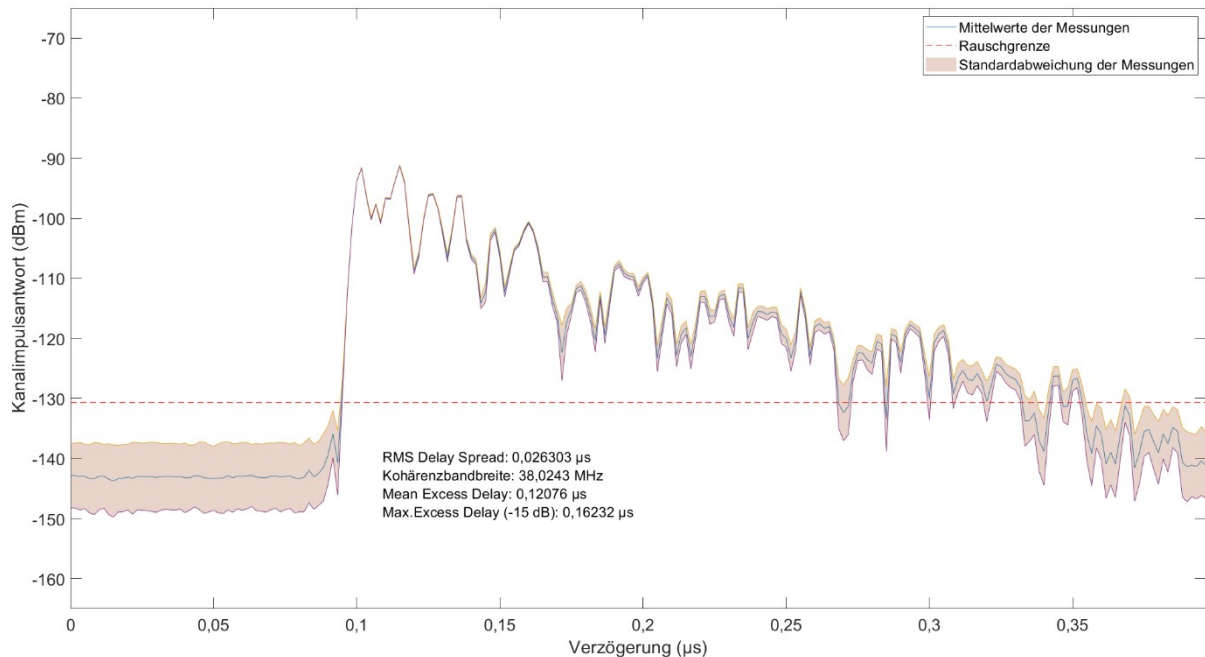


Abbildung 31: Kanalimpulsantworten für das Szenario „Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz“ ohne Menschen im Mittelgang

Anschließend verändert sich das Szenario. Vereinzelt stehen Personen auf, um Toiletten aufzusuchen oder den Sitzplatz zu wechseln. Je nach Gehweise, wird sporadisch die Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger unterbrochen. Die Messung visualisiert Abbildung 32. Beide Messreihen zeigen Leistungmaxima und -minima an identischen Verzögerungspunkten. Markant ist das zweite Maximum nach der Sichtverbindung, das aufgrund von Mehrwegeinterferenz hervorsteht. Die Kohärenzbandbreite wird durch die Personen um durchschnittlich 2,5 MHz negativ beeinflusst. Ebenso ist der Störfaktor Mensch über die Standardabweichung der Messreihe in Abbildung 32 ersichtlich, diese zeigt Abweichungen an manchen Verzögerungspunkten von ± 5 dBm, während die erste Messreihe bis zum Maximum Excess Delay keine ersichtliche Standardabweichung besitzt, sondern immer identische Werte erfasst werden. Im Wasserfalldiagramm (siehe Abbildung 33) mit der relativen Leistung, können mehrere Kanalimpulsantworten im zeitlichen Verlauf dargestellt werden. In Rot sind die Pfade der Sichtverbindung markiert. Dieser Pfad ist teilweise nicht vorhanden. Die Personen im Mittelgang bringen somit eine Dynamik in das Szenario und führen zu entsprechenden Leistungsabweichungen. Als Folge steigt die Standardabweichung.

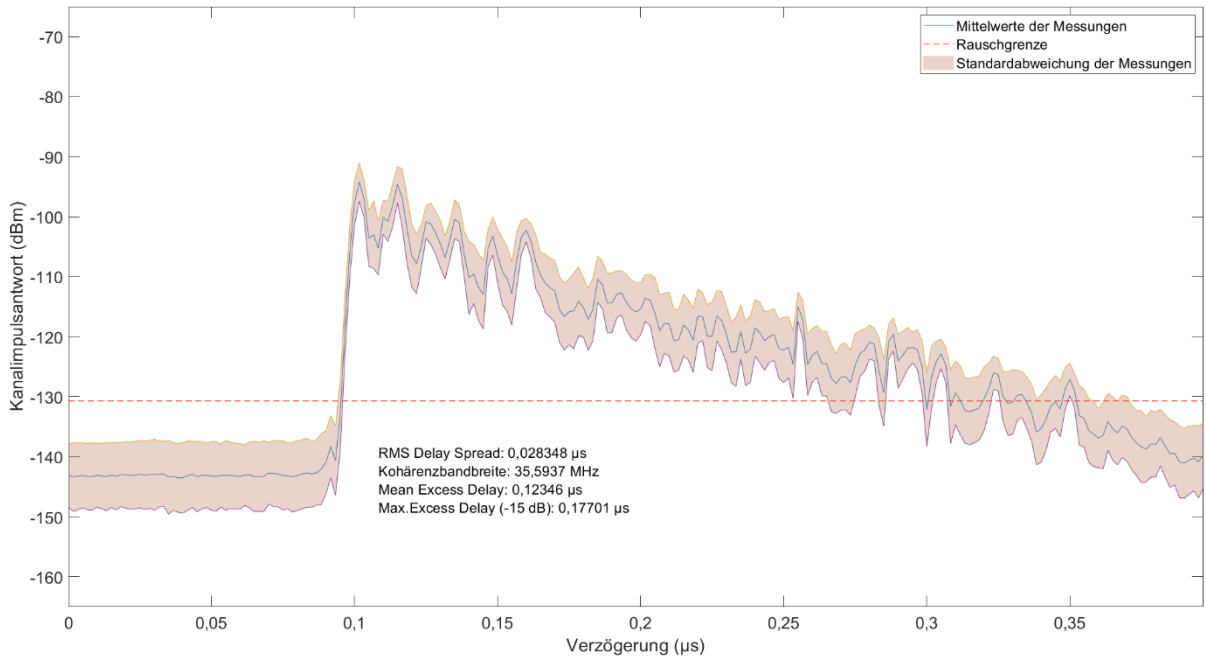


Abbildung 32: Kanalimpulsantworten für das Szenario „Mobile Endgeräte im Regionalzug bei 3,6 GHz“ mit Menschen im Mittelgang

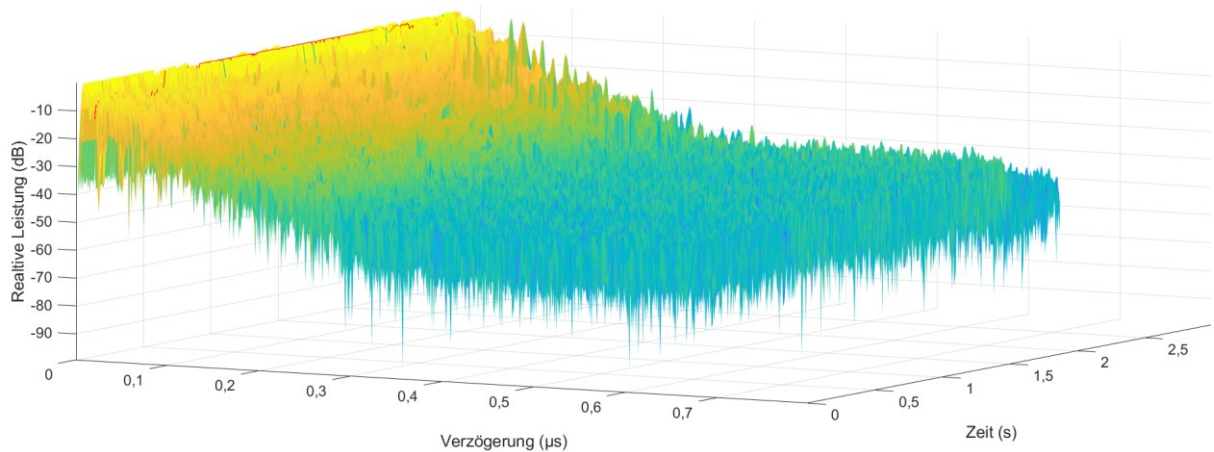


Abbildung 33: Wasserfalldiagramm mehrere Kanalimpulsantworten mit Personen im Mittelgang

Im Gegensatz zum Szenario aus Kapitel 6.2 ist der tatsächliche Einfluss durch Menschen in diesem Fall gering in Bezug auf die Kohärenzbandbreite, wobei hier nur vereinzelt Personen die Sichtverbindung stören.

6.4 Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen

Die Untersuchungen vorheriger Kapitel behandeln ein Szenario mit genau einer gewählten Frequenz. Diesem Szenario werden nun mehrere Frequenzen im Einsatz in einer U-Bahn als Vertreter für

Pendlerzüge gegenüberstellen. Es ist repräsentativ für die drahtlose Kommunikation zwischen zwei fixierten Endgeräten. Diese könnten Ticketvalidierungsmaschinen, Fahrgastinformationsdisplays oder Displays für Werbung sein. Es wird hierbei neben den vorher definierten Frequenzen 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz auch die aktuelle LTE Frequenz 1,6 GHz (LTE Band 24) betrachtet [79]. Abbildung 34 zeigt die Szenariendefinition, Abbildung 35 die Sende- und Empfangsposition.

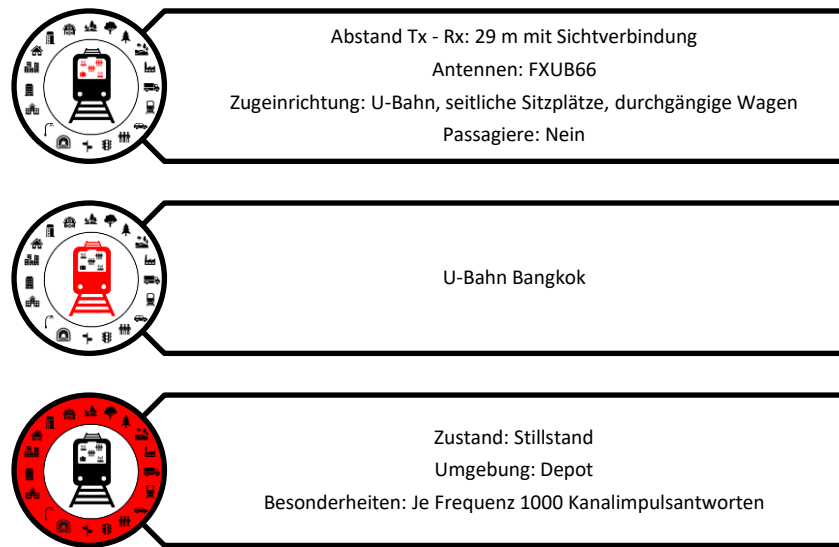


Abbildung 34: Szenario „Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen“

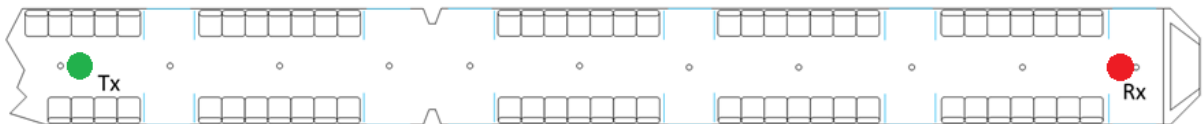


Abbildung 35: Layout U-Bahn Bangkok Blue Line mit Positionen von Sender und Empfänger

Die U-Bahn Bangkok Blue Line wurde durch 35 dreiteilige Züge 2020 verstärkt. Vor Auslieferung waren Züge in deutschen Depots untergebracht und Messungen im Rahmen dieser Arbeit möglich. Abbildung 36 zeigt eine dieser U-Bahnen in Bangkok. [91]

Die Messergebnisse werden in Abbildung 37 visualisiert. Es zeigen sich deutliche Unterschiede bei der maximalen Leistung über die verschiedenen Frequenzen. Hier ist das Maximum bei 1,6 GHz bei -50 dBm, bei 2,7 GHz bei -63 dBm, bei 3,6 GHz bei -61 dBm und bei 5,6 GHz bei -68 dBm. Zudem ist der Verlauf der Maxima nur bei 3,6 GHz und 5,6 GHz identisch und damit ein starker Pfad als Maximum, gefolgt von einem schwächeren.



Abbildung 36: U-Bahn Bangkok Blue Line Fahrzeug von [91]

Bei 1,6 GHz ist das erste Maximum kleiner als das zweite, wohingegen bei 2,7 GHz lediglich ein Maximum identifizierbar ist. Die Abweichungen können in den leicht unterschiedlichen Antennencharakteristiken, der Frequenzselektivität der Umgebung und der ungetriggerten Messdurchführung begründet liegen. Praxisrelevant ist jedoch hauptsächlich die Kohärenzbandbreite. Auf einen theoretischen Abgleich der Antennenparameter und damit eine Korrekturrechnung aufgrund des abweichenden Antennengewinns wird verzichtet, da die Praxistauglichkeit der breitbandigen Antenne im Vordergrund steht. In diesem Szenario erreicht die höchste Kohärenzbandbreite die Frequenz 5,6 GHz mit 37,1 MHz, gefolgt von 3,6 GHz mit 30,4 MHz, 1,6 GHz mit 28,6 MHz und 2,7 GHz bildet das Schlusslicht mit 23,7 MHz.

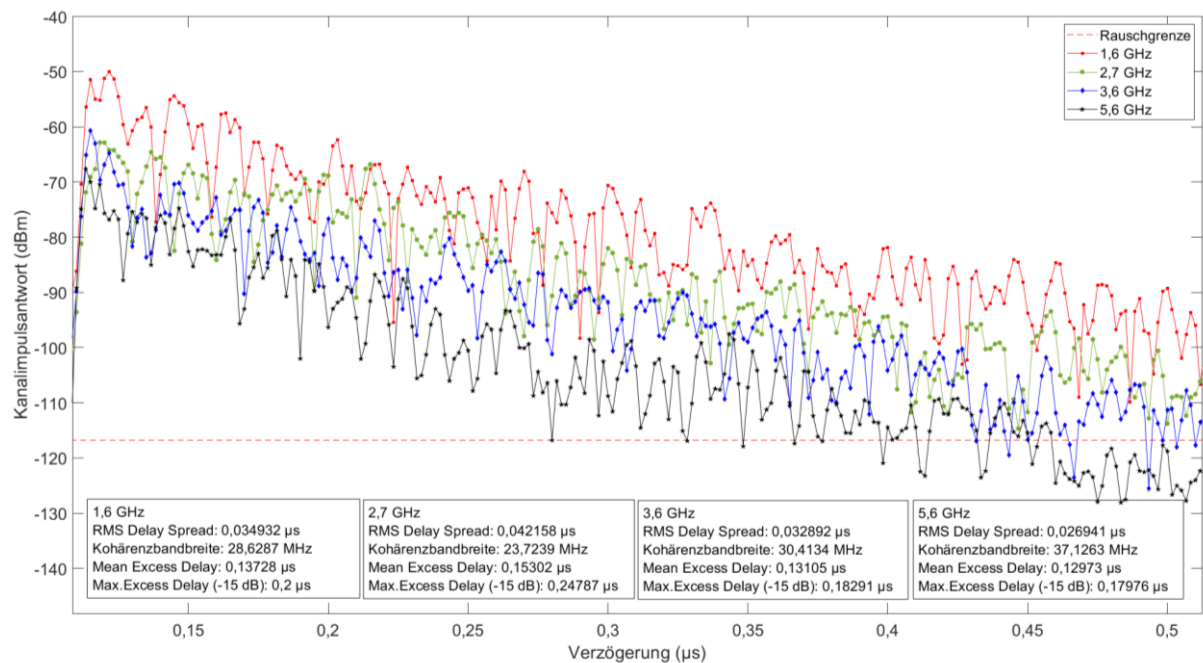


Abbildung 37: Kanalsimpulsantworten „Fixierte Endgeräte in der U-Bahn bei verschiedenen Frequenzen“

6.5 Mobiles Arbeiten im ICE bei verschiedenen Frequenzen

In diesem Abschnitt wird erneut ein Frequenzvergleich behandelt. Ausgehend vom Szenario aus Kapitel 6.1 werden mit zwei FXUB66 Antennen im Stillstand der Funkkanal bei den Frequenzen 1,6 GHz, 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz durch jeweils 100 Einzelmessungen charakterisiert. Die Messergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kohärenzbandbreite um lediglich 1,7 MHz bei 5,6 GHz von den vorherig genannten Messungen aus Kapitel 6.1 abweichen. Dies ist dem Wechsel der Antennen geschuldet. Ansonsten bestätigt sich das Ergebnis aus dem Frequenzvergleich in der U-Bahn (siehe Kapitel 6.4). Die beste Kohärenzbandbreite wurde bei 5,6 GHz, die schlechteste bei 2,7 GHz mit 19,1 MHz erfasst. Die Untersuchung der vier Frequenzen zeigt, dass lediglich durch Frequenzwechsel andere Übertragungsbandbreiten möglich sind.

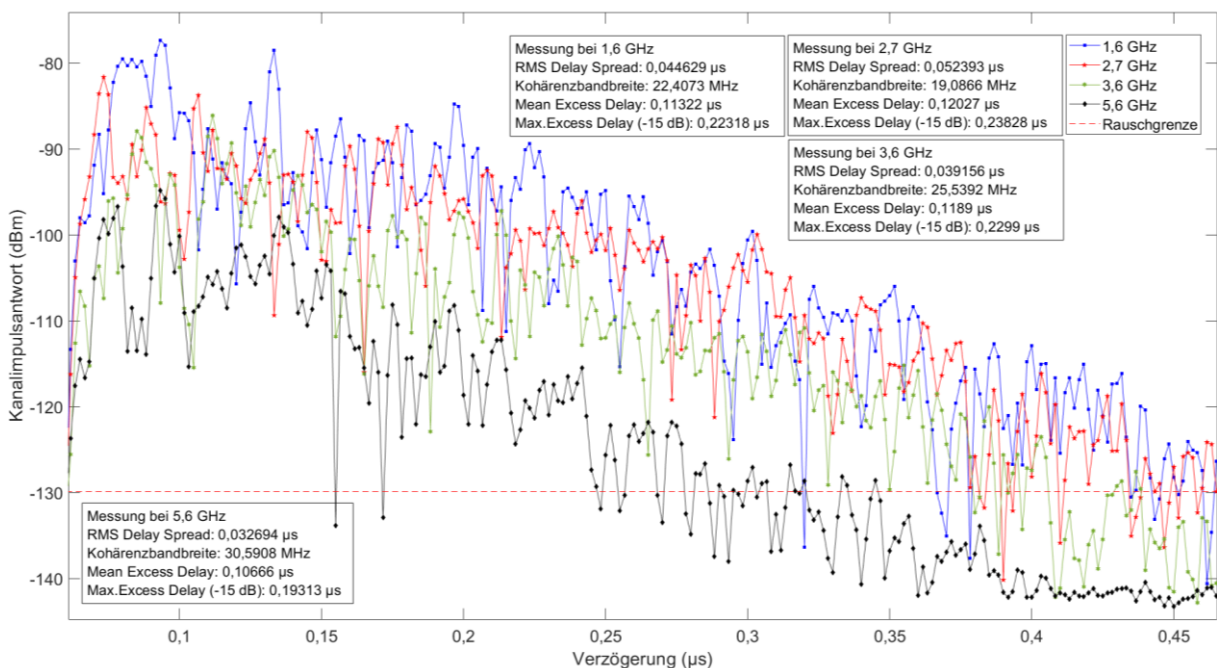


Abbildung 38: Kanalimpulsantworten „Mobiles Arbeiten im ICE bei verschiedenen Frequenzen“

6.6 Gegenüberliegende Steuerungen im Regionalzug bei 3,6 GHz

Ein Großteil der Zug-Onboard-Kommunikationsszenarien ist parallel zur Fahrtrichtung angeordnet, da wagenkastenübergreifend oder von einem Wagenkastenende zum anderen viele Meter Kabel eingespart werden könnten. Eine weitere Restriktion ist jedoch der Einbauraum von Steuergeräten. Diese besitzen oftmals kastenartige Abmessungen und müssen für Wartungspersonal leicht zugänglich sein. Eine geeignete Position ist hierfür hinter der Innenraumverkleidung des Wagenkastens. So kann es

möglich sein, dass Steuergeräte zukünftig in den Wänden gegenüber voneinander verbaut werden. Zu diesem Zweck wird das Szenario mit einem Kommunikationskanal orthogonal zur Fahrtrichtung untersucht. Die Messung wird im Regionalzug wie aus Kapitel 6.3 durchgeführt, wobei an den beiden Vierpersonensitzeinheiten am Endwagenende die FXUB-Antennen gegenüber voneinander befestigt werden (siehe Abbildung 39).

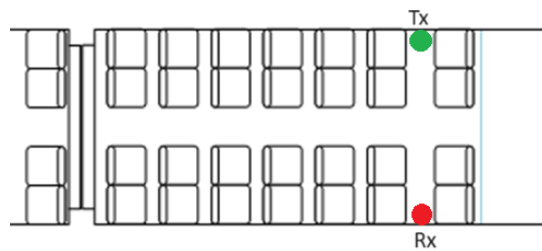


Abbildung 39: Position von Sender und Empfänger gegenüberliegend im Regionalzug

Es werden zwei unabhängige Messungen bei 100 km/h in ländlichem Gebiet durchgeführt ohne Passagiere. Die Ergebnisse sind Abbildung 40 zu entnehmen. Es lässt sich eine Kohärenzbandbreite von ca. 70 MHz bestimmen, wobei die Messungen bis zum Erreichen des Maximum Excess Delay (siehe schwarze, gestrichelte Linie) nahezu deckungsgleich sind.

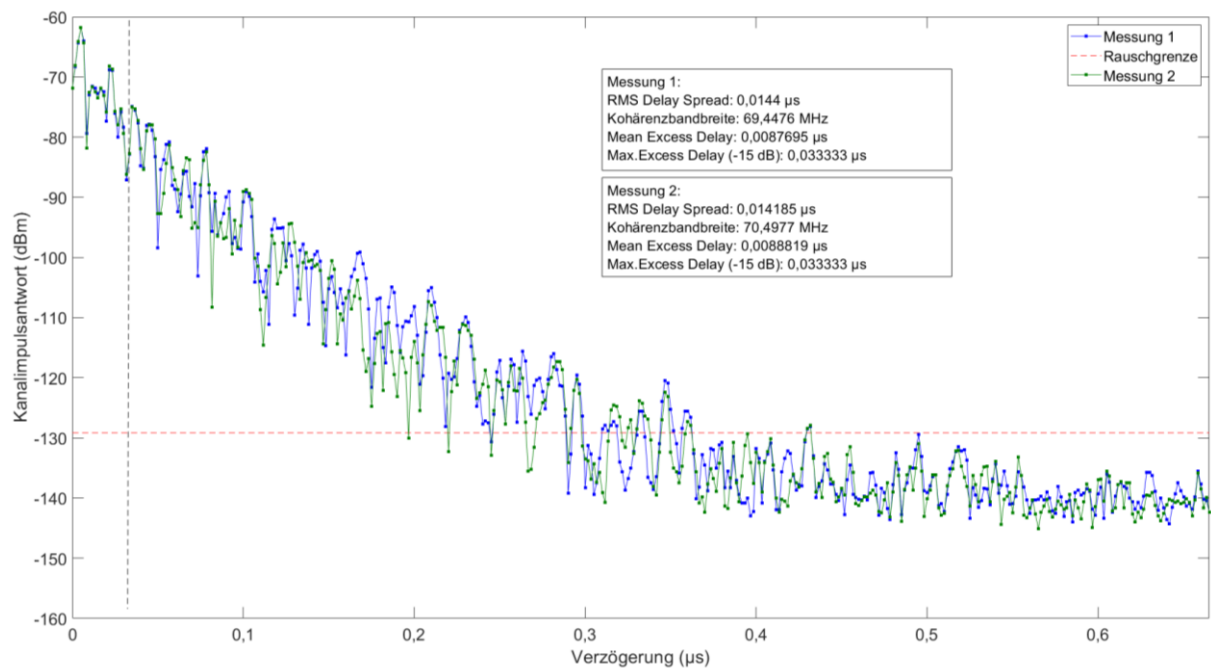


Abbildung 40: Kanalimpulsantworten „Gegenüberliegende Steuerungen im Regionalzug bei 3,6 GHz“

6.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse von Kapitel 6

Die vorgestellten Szenarien mit den dazugehörigen Messreihen belegen frequenzselektive Wellenausbreitungseffekte, die sowohl bei Sichtverbindung (Kapitel 6.4) als auch ohne Sichtverbindung (Kapitel 6.5) vorliegen. Ebenso zeigen sich deutlich Mehrwegepfade in Kapitel 6.3, die auf dem Leistungsniveau der Sichtverbindung detektiert werden. Es existiert außerdem mit den Messreihen aus Kapitel 6.2 ein starker Nachweis des Geschwindigkeitseinflusses im Hochgeschwindigkeitsverkehr auf die Kohärenzbandbreite. Zusätzlich zeigt Kapitel 6.6, dass durch die Nutzung neuer, alternativer Einbauräume orthogonal zur Fahrtrichtung relativ hohe Kohärenzbandbreiten erreichbar sind. Zuletzt ist noch die Abschattung des Signals durch Passagiere in Kapitel 6.2 im ICE und Kapitel 6.3 im Regionalzug erfasst.

7 Kanalmodellbildung für ausgewählte, kritische Szenarien

In diesem Kapitel werden aus den Messungen direkt Kanalmodelle abgeleitet, die später gegen Kontrollmessungen validierbar und in Simulationen einsetzbar sind (siehe Kapitel 8). Für Kapitel 6 liegen nicht ausreichend viele Kontrollmessungen vor. Sie zeigen jedoch die Wellenausbreitungseffekte exemplarisch unter diversen Randbedingungen.

Dieses Kapitel ist hierbei in vier Kategorien unterteilbar. Es werden Fahrten durch ländliches Gebiet, durch Tunnel, durch Mischgebiet und in Bahnhöfen beziehungsweise bahnhofsähnlichen Umgebungen im Stillstand betrachtet. Dies sind auch jene Umgebungen, die in Kapitel 2.1.2 identifiziert worden sind. Folgende Szenarien werden in diesem Kapitel bearbeitet:

- Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz
- Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz
- Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz
- Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz

- Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz
- Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz
- Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz

- Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz
- Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz
- Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz
- Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz

- Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz
- Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz
- Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung
- Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz

7.1 Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz

Wie in der Einleitung und der Relevanzdarlegung bereits beschrieben, ist der Fernverkehr mittels Hochgeschwindigkeitszüge ein integraler Bestandteil des gesamten Schienenverkehrsaufkommens. Bei der Verbindung von Metropolen müssen dabei zu hohen Anteilen ländliche Gebiete durchfahren werden. Diese sind unterschiedlich bezüglich der Vegetation neben der Strecke, haben jedoch eine Gemeinsamkeit - stark reflektierende Objekte wie Gebäude sind die Seltenheit. Meist sind lediglich Bahninfrastrukturbauten wie Umspannwerke oder Masten für die Oberleitung in unmittelbarer Nähe zu den Schienen verbaut. Angelehnt an das Szenario aus Kapitel 6.2 wird in diesem Szenario ein Modell für 3,6 GHz charakterisiert. Positionen und Art der Antennen sind identisch (FXUB66), wobei die Messungen während der Fahrt mit 300 km/h vorgenommen werden und die Passagiere währenddessen auf den Plätzen sitzen. Es ist damit ein klassisches Überlandszenario im Hochgeschwindigkeitsbereich. Abbildung 41 zeigt die gemittelte Kanalimpulsantwort aus 500 Einzelmessungen. Hier ist das Leistungsmaximum der Sichtverbindung deutlich bei -83,84 dBm erkennbar. Ebenso ist in Hinblick auf die sehr hohe Geschwindigkeit eine Kohärenzbandbreite von 43,45 MHz gut.

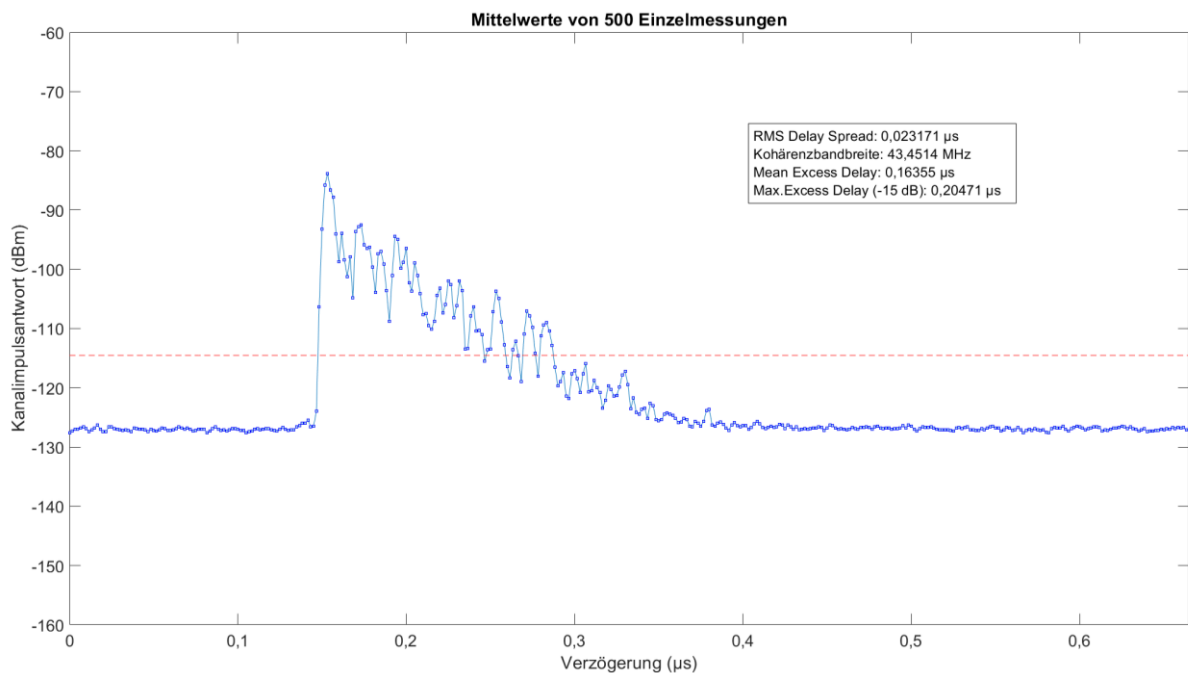


Abbildung 41: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“

Ausgehend von den Messungen lässt sich ein Kanalmodell für dieses Szenario gemäß Abbildung 42 aufbereiten. Es beginnt mit dem ersten Verzögerungspfad und endet mit dem Pfad vor dem Unterschreiten der Rauschgrenze. Die Validierung des Modells wird in Kapitel 8 beschrieben.

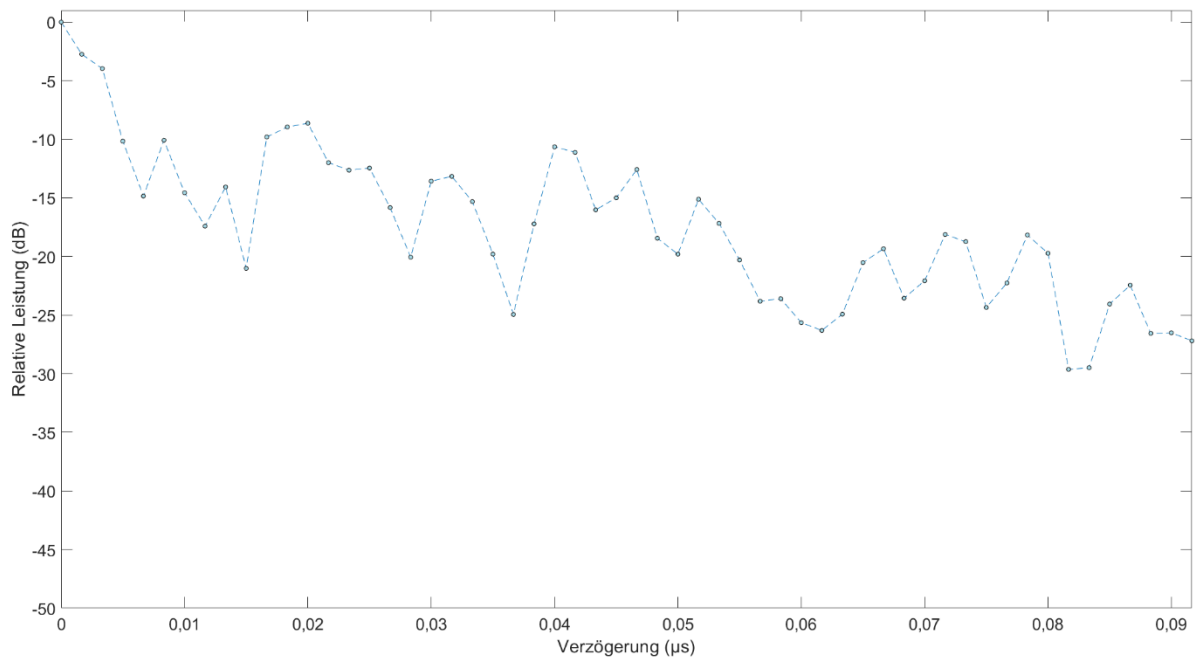


Abbildung 42: Kanalmodell „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“

7.2 Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz

Analog zur Überlandfahrt im Hochgeschwindigkeitsbereich wird in diesem Kapitel eine Überlandfahrt eines Regionalzuges (siehe Abbildung 43) untersucht.

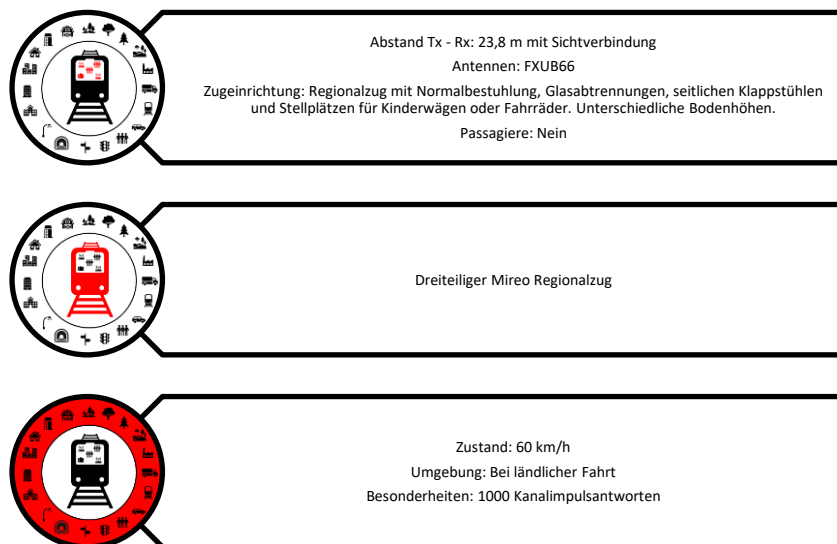


Abbildung 43: Szenario „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“

Die Antennen sind in einem Endwagen und im Mittelwagen positioniert, was Abbildung 44 visualisiert. Es ist zu erkennen, dass Sender und Empfänger nicht auf der gleichen Höhe sind, da der Bodenaufbau in diesem Regionalzug variiert.

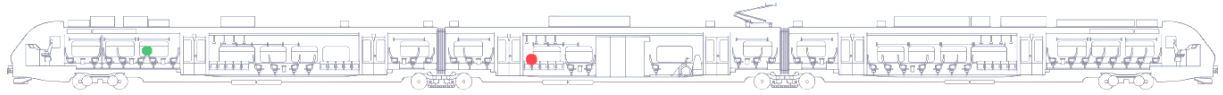


Abbildung 44: Layout eines dreiteiligen Mireos mit eingezeichnetem Sender (grün) und Empfänger (rot) von der Herstellerwebsite [92]

In Abbildung 45 wird das Messergebnis präsentiert, was einen unerwarteten Verlauf zeigt. Im Gegensatz zu einem klar dominierenden Pfad mit Sichtverbindung, ähnelt diese Kanalimpulsantwort einer Messung ohne Sichtverbindung mit starken Mehrwegepfaden. Ebenso ist die Kohärenzbandbreite um ca. 10 MHz niedriger als bei der Messung im Hochgeschwindigkeitszug in Kapitel 7.1 bei ähnlichen Randbedingungen abgesehen von der Geschwindigkeit.

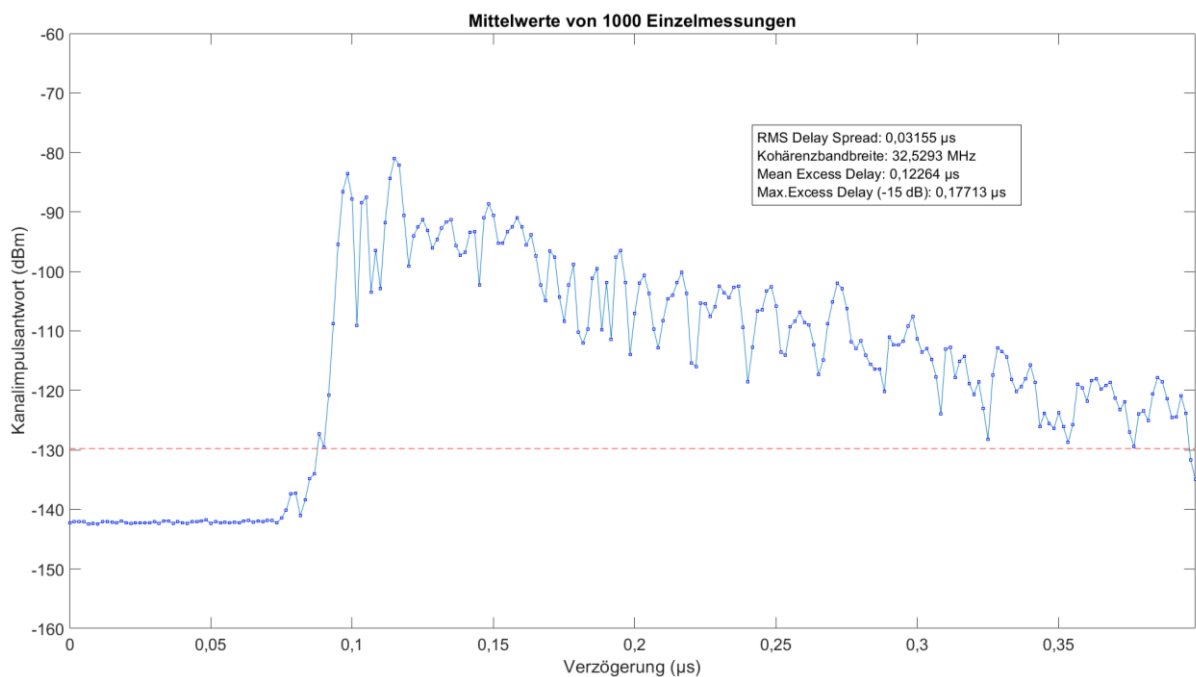


Abbildung 45: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“

Trotz der überraschenden Ergebnisse, die aktuell schwer einzuordnen sind, wird ein Modell in Abbildung 46 abgeleitet. Die Validierung und Interpretation der Ergebnisse erfolgen in Kapitel 8.

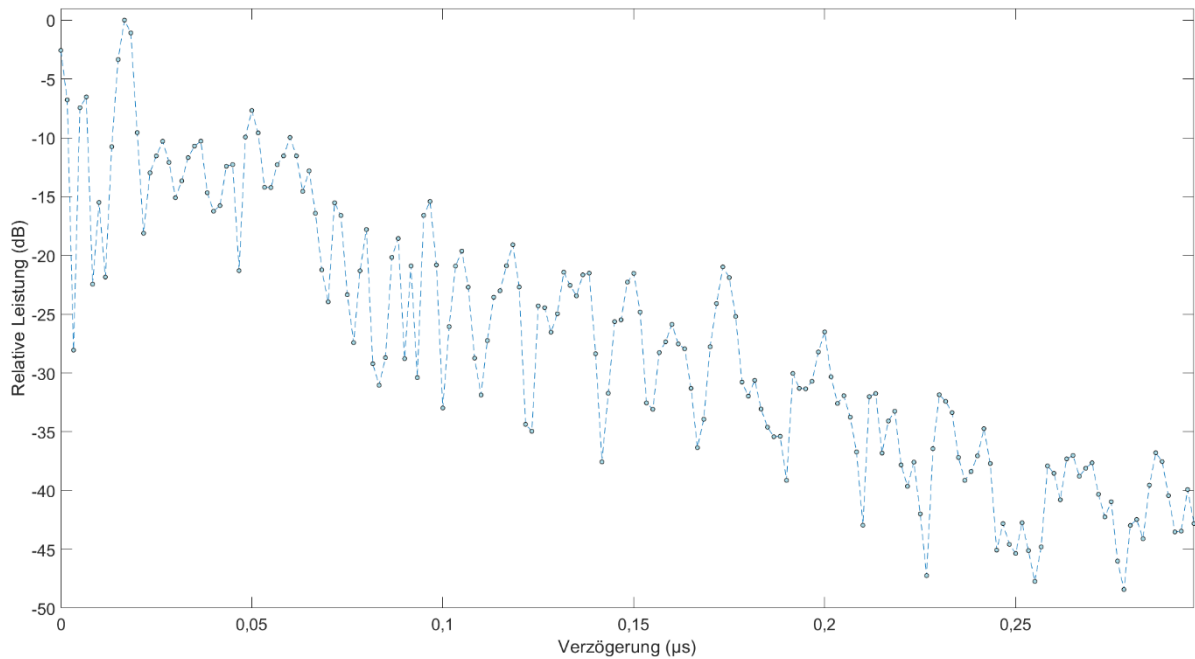


Abbildung 46: Kanalmodell „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“

7.3 Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz

Als Ausgangsszenario wird für diese Messungen Kapitel 7.1 herangezogen. Die Messbedingungen sind bis auf die Frequenz identisch. Das Messergebnis ist in Abbildung 47 und das Kanalmodell in Abbildung 48 dargestellt. Neben dem Maximum der Sichtverbindung ist auch ein Mehrwegepfad besonders auffällig, der auf ähnlich hohem Leistungsniveau detektiert wird. Die nutzbare Bandbreite ist zudem mit 50,98 MHz höher als mit 3,6 GHz in Kapitel 7.1. Aus den Messdaten lässt sich ein Modell mit wenigen Datenpunkten extrahieren, da die Rauschgrenze bereits vor dem Maximum Excess Delay unterschritten wird. Eine Validierung erfolgt in Kapitel 8.

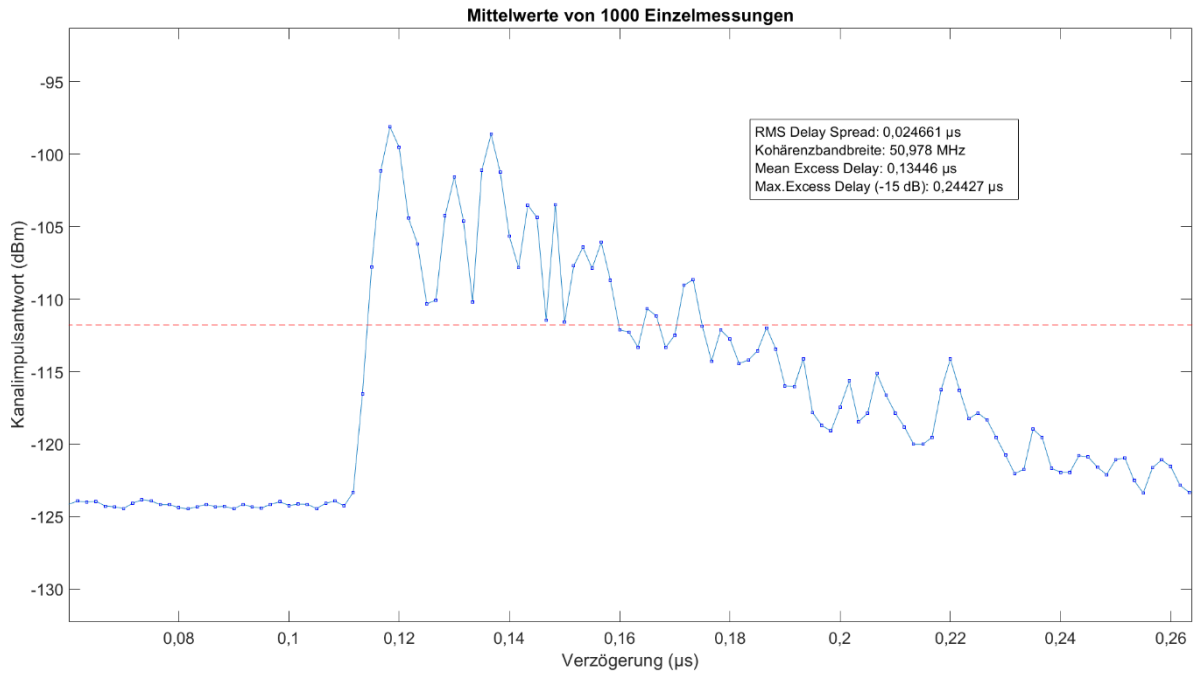


Abbildung 47: Kanalsimpulsantwort „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“

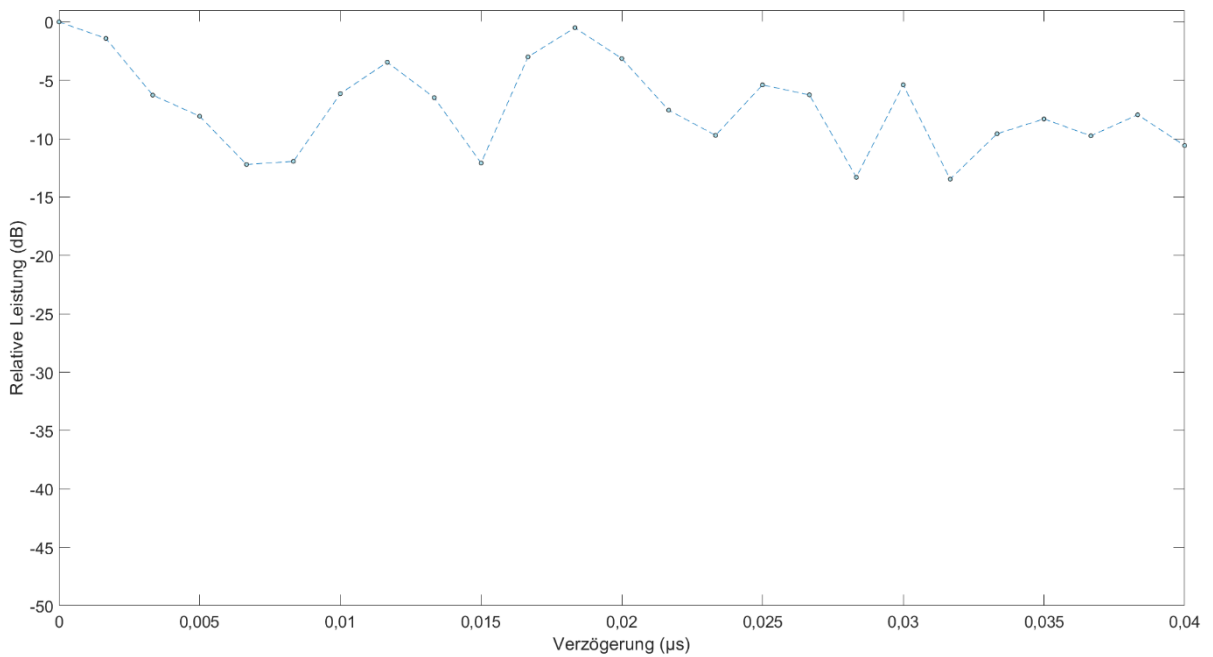


Abbildung 48: Kanalmodell „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“

7.4 Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz

Das Szenario entspricht dem in Kapitel 7.1 mit folgenden Abweichungen:

- Die Fahrtgeschwindigkeit ist konstant bei 260 km/h.
- Die Entfernung zwischen Sender- und Empfänger wird auf 18,2 m reduziert und die Antennen auf Höhe der Fenster auf Stativen befestigt.
- Während der Messung wird das Nachbargleis durch einen entgegenkommenden ICE befahren.

Das Messergebnis in Abbildung 49 zeigt eine Kohärenzbandbreite von 39,14 MHz. Trotz geringerem Abstand führen die veränderten Randbedingungen im Vergleich zu Ergebnissen aus Kapitel 7.1 zu einer geringeren nutzbaren Bandbreite in diesem Szenario.

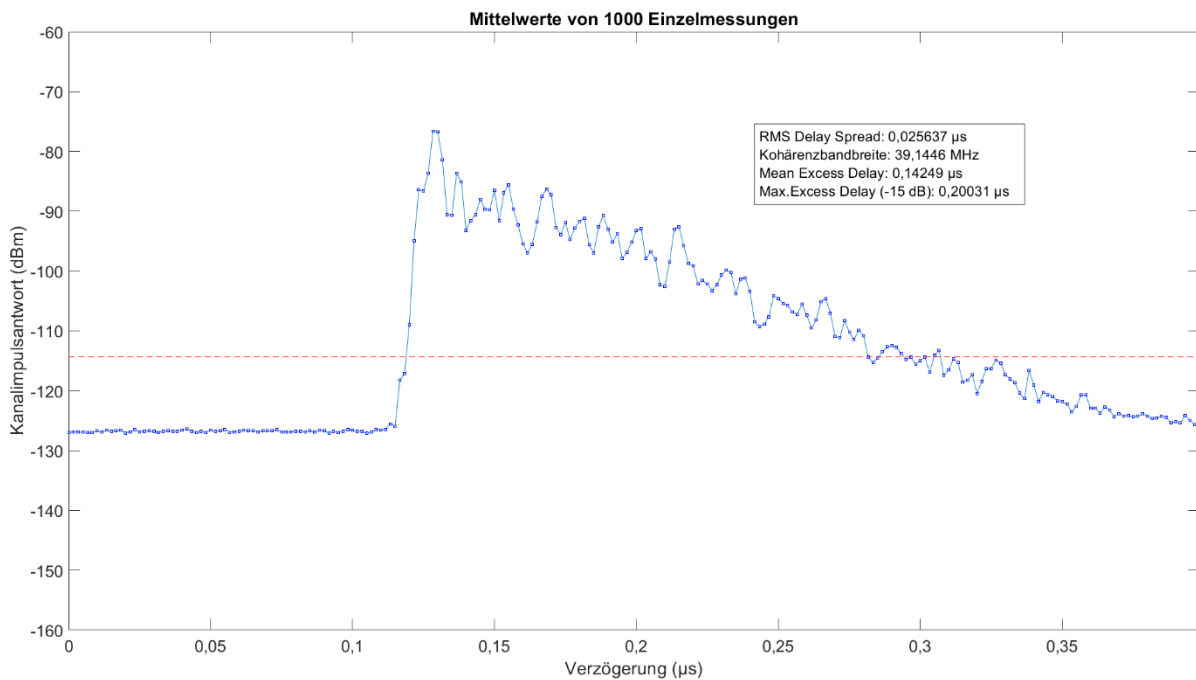


Abbildung 49: Kanalimpulsantwort „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“

Abbildung 50 visualisiert das erzeugte Kanalmodell, welches einen typischen Kommunikationskanal mit Sichtverbindung widerspiegelt. Auch für dieses Modell wird in Kapitel 8 die Eignung nachgewiesen.

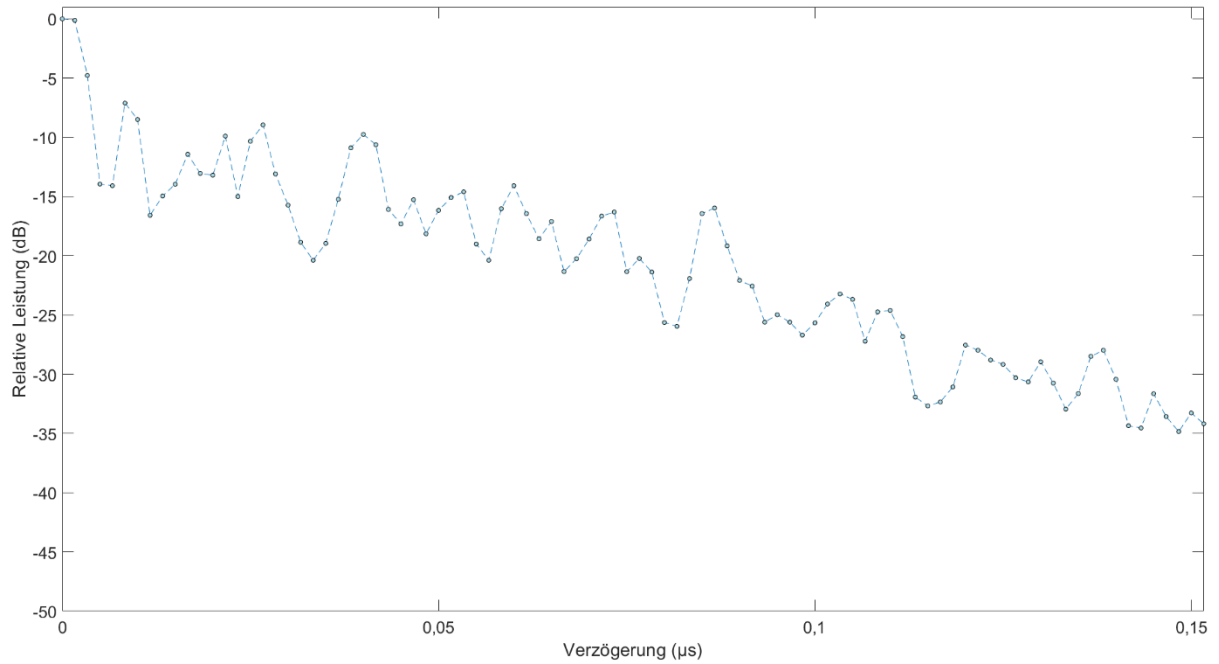


Abbildung 50: Kanalmodell „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“

7.5 Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz

Das Durchfahren von Tunneln ist im Hochgeschwindigkeitsverkehr ein weiteres, untersuchenswertes Szenario, wie bereits in den Einleitungskapiteln dieser Arbeit dargelegt. Identisch mit dem Szenario aus Kapitel 7.4, bis auf die Geschwindigkeit von nun 300 km/h, der Tunneldurchfahrt und dem Gegenverkehr, wird diese Messreihe durchgeführt. Für die Ergebnisse siehe Abbildung 51.

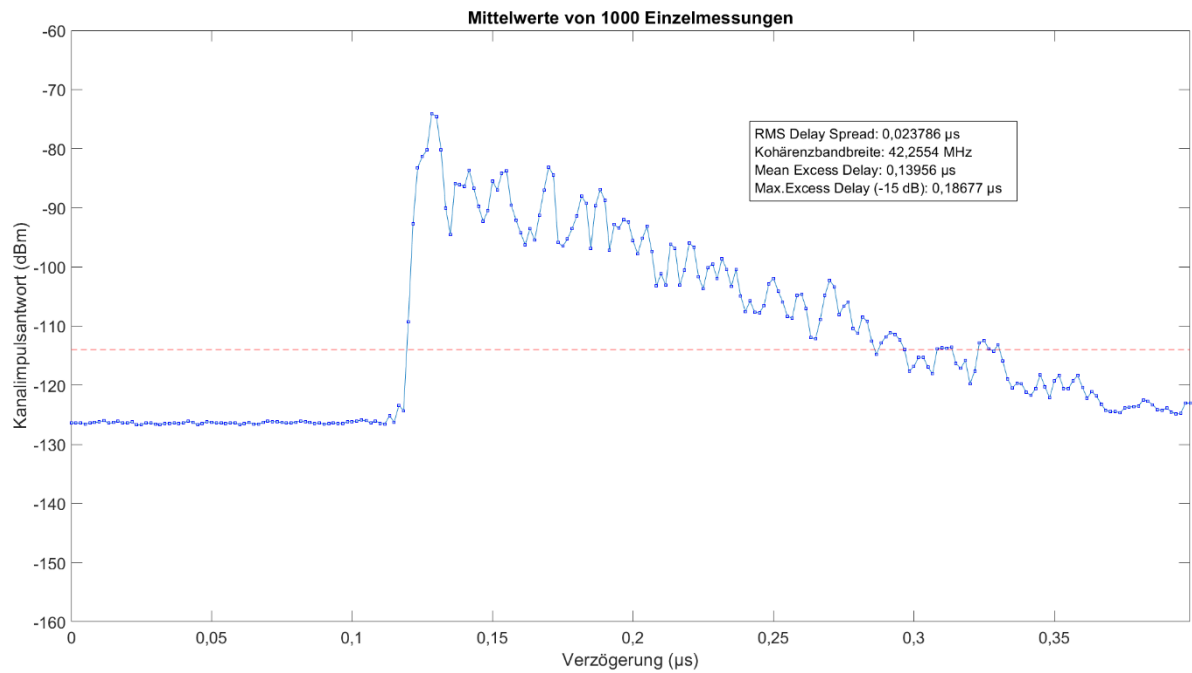


Abbildung 51: Kanalimpulsantwort „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“

Das abgeleitete Modell ist in Abbildung 52 dargestellt, wobei der relativ flache Verlauf der Maxima nach dem Pfad der Sichtverbindung auf starke Mehrwegeinterferenzen hinweist.

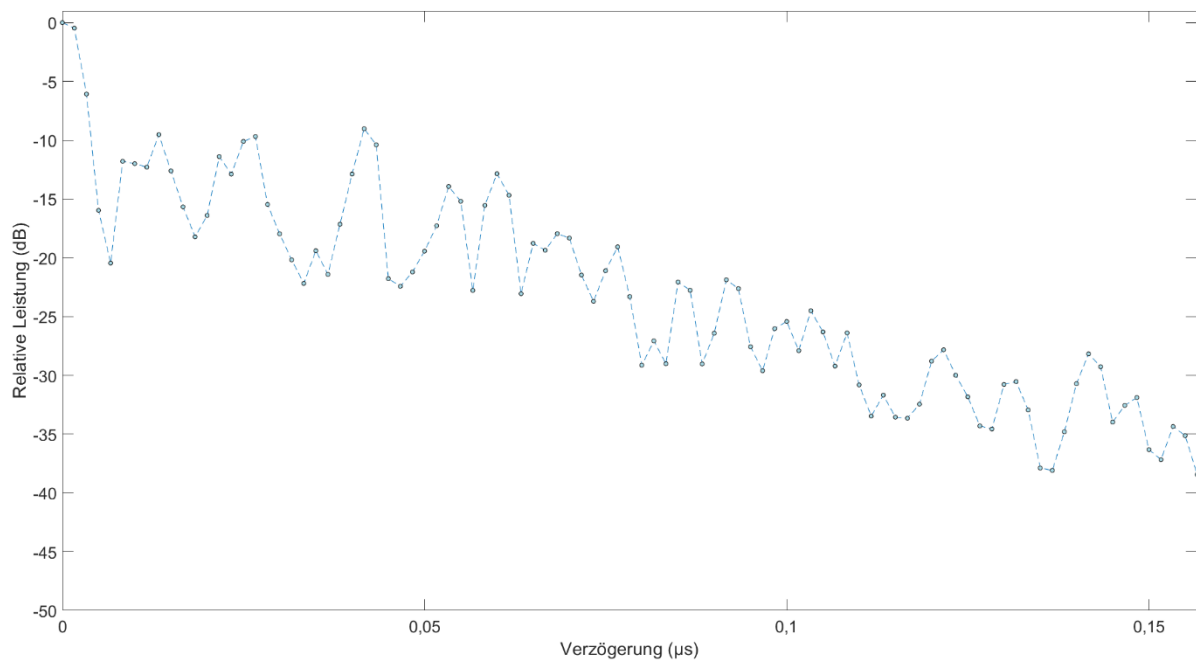


Abbildung 52: Kanalmodell „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“

7.6 Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz

Dieses Szenario bietet einen exzellenten Vergleich bezüglich der Frequenzen, da es bis auf die auf 5,6 GHz erhöhte Frequenz und den Antennenwechsel auf die VERT2450 komplett mit dem vorherigen Szenario aus Kapitel 7.5 übereinstimmt. Es folgen die Ergebnisse und das Modell in Abbildung 53 und Abbildung 54. Diese Messung zeigt neben dem bekannten Leistungsmaximum auch sehr deutliche Leistungseinbrüche, die bereits vor dem Maximum Excess Delay unter die Rauschgrenzen fallen. Bezüglich Kohärenzbandbreite ist dieses Szenario mit 65 MHz vergleichsweise performant.

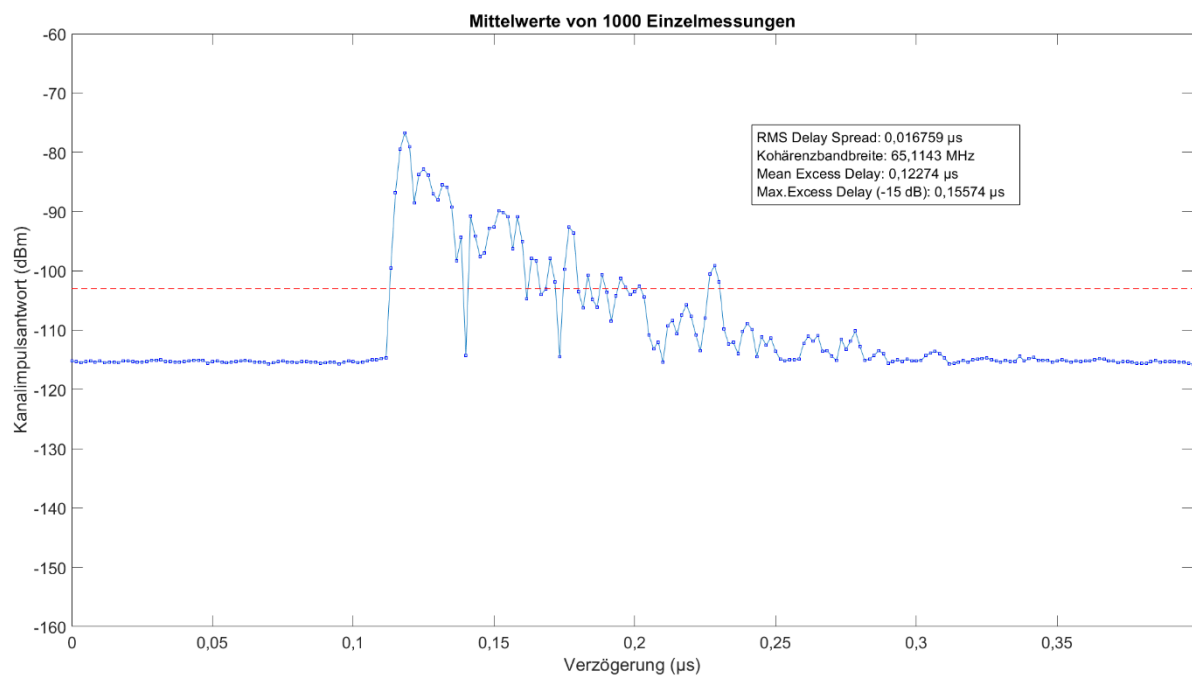


Abbildung 53: Kanalimpulsantwort „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“

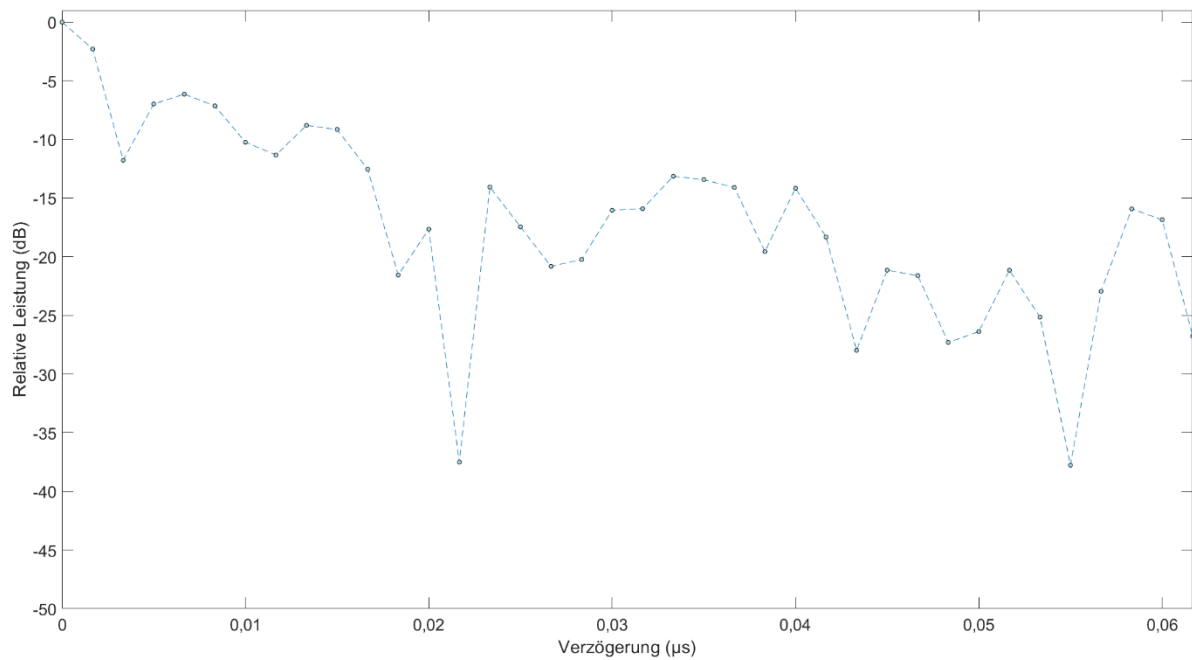


Abbildung 54: Kanalmodell „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“

7.7 Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz

Das Szenario „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“ ist eine Ableitung der Messanordnungen aus den Kapiteln 7.1 und 7.3. Es ändern sich lediglich die Frequenz und die Streckenumgebung. Nach dem Messresultat (siehe Abbildung 55) folgt das Kanalmodell (siehe Abbildung 56).

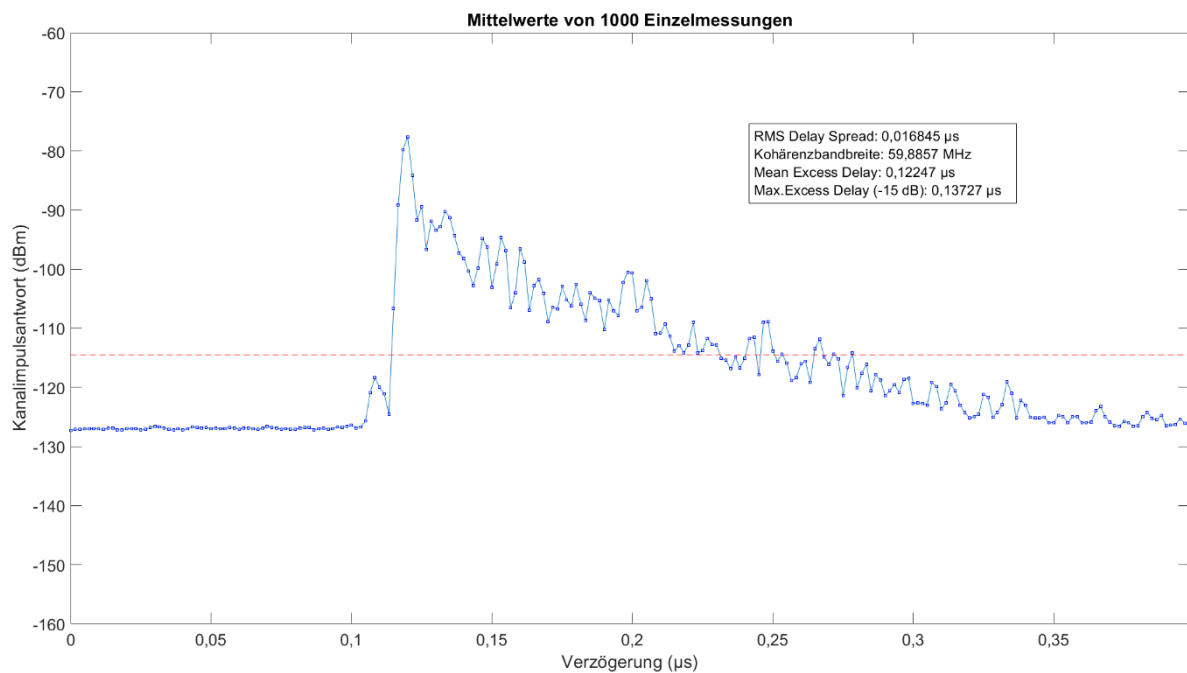


Abbildung 55: Kanalimpulsantwort „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“

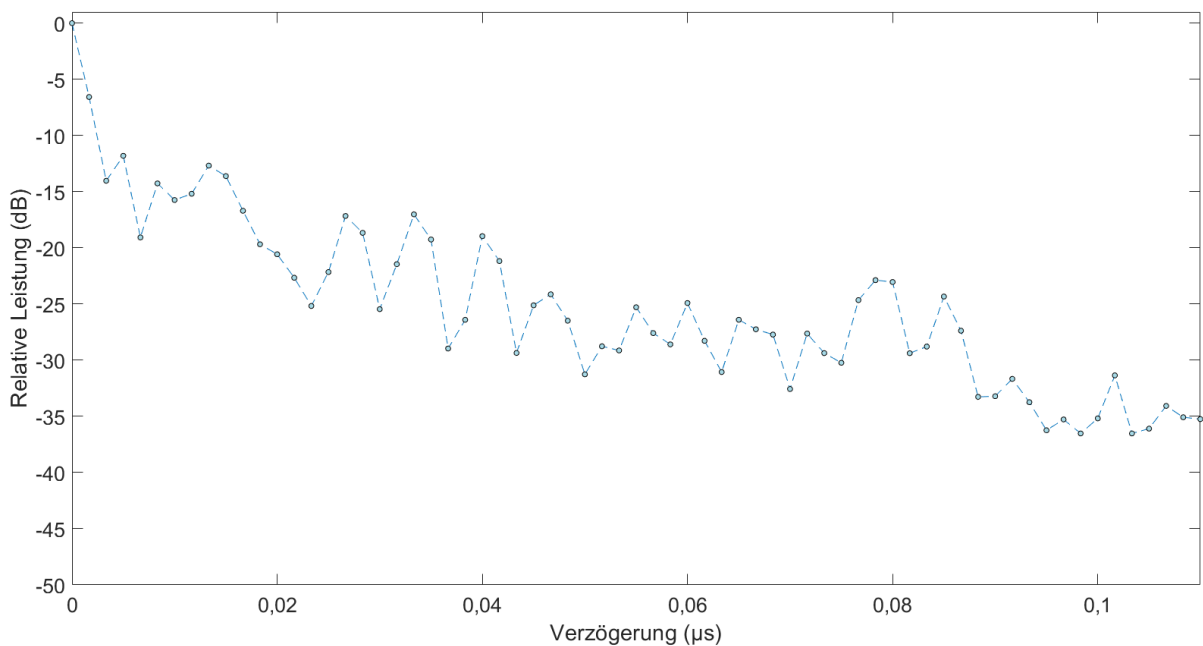


Abbildung 56: Kanalmodell „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“

Die Kohärenzbandbreite von 59,88 MHz liegt zwischen denen der vorherigen Tunnelfahrten bei 3,6 GHz und 5,6 GHz. Die Sichtverbindung ist deutlich ausgeprägt. Alle Tunnelfahrten werden in Kapitel 8 validiert.

7.8 Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz

Die „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“ ist eine Ableitung des Szenarios aus Kapitel 7.7. Angepasst werden die Geschwindigkeit, die lediglich 160 km/h beträgt, und die Gleisumgebung. Es wird durch Mischgebiet gefahren, welches hauptsächlich urban geprägt ist. Das bedeutet es befinden sich viele Gebäude, Schallschutzwände und Infrastrukturobjekte in der Umgebung. Vereinzelt auch Vegetation. Abbildung 57 zeigt die Messung, während in Abbildung 58 das Kanalmodell dargestellt wird. Diese Messung zeigt innerhalb von Kapitel 7 die höchste Kohärenzbandbreite mit 78,56 MHz.

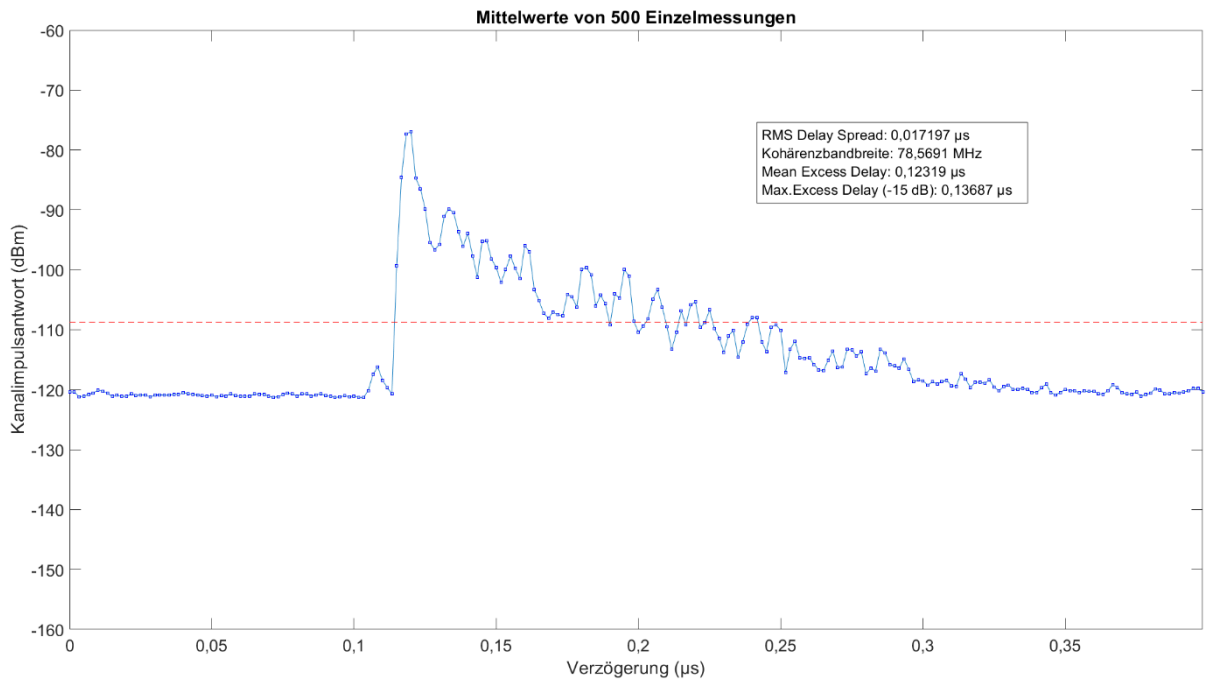


Abbildung 57: Kanalsimpulsantwort „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“

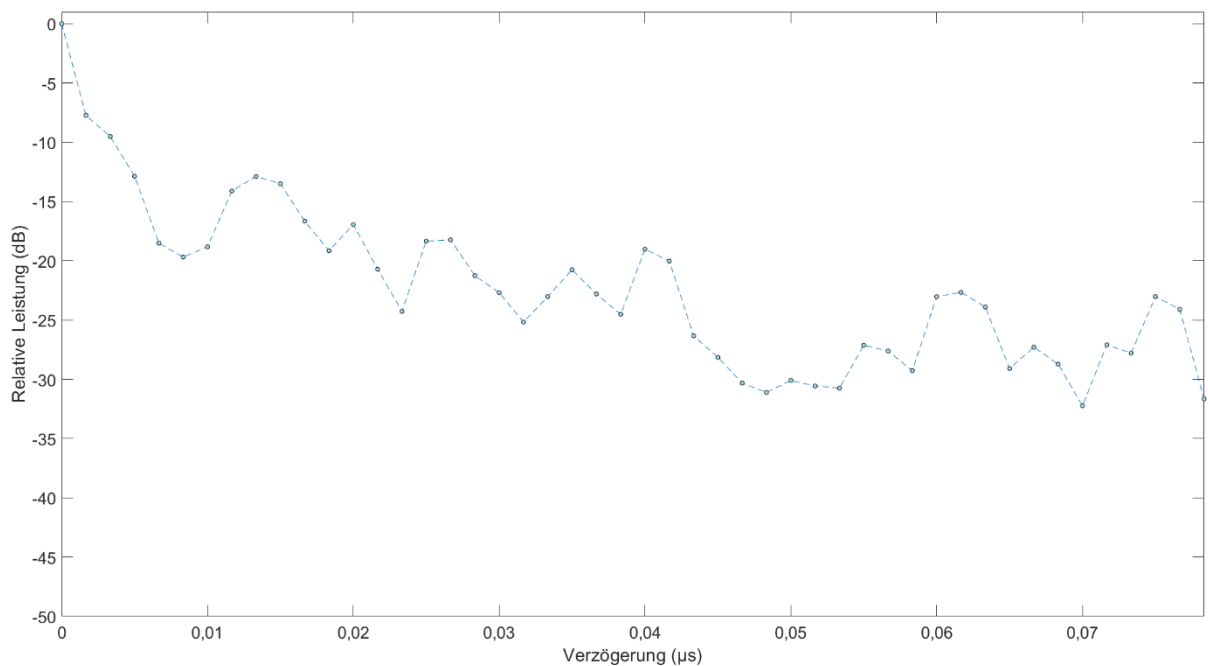


Abbildung 58: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“

7.9 Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz

Die „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“ basiert auf dem Szenario aus Kapitel 7.2. Es bleiben alle Parameter gleich, bis auf die Geschwindigkeit, die auf 130 km/h erhöht wird und die Umgebung. Auch in diesem Szenario ist der urbane Anteil mit reflektierenden Oberflächen höher als die

Vegetation. Dies spiegelt sich auch in den Mehrwegepfaden wider. Dennoch liegt mit 57,72 MHz die Kohärenzbandbreite im Vergleich hoch. Die Messung und das Kanalmodell werden durch Abbildung 59 und Abbildung 60 visualisiert.

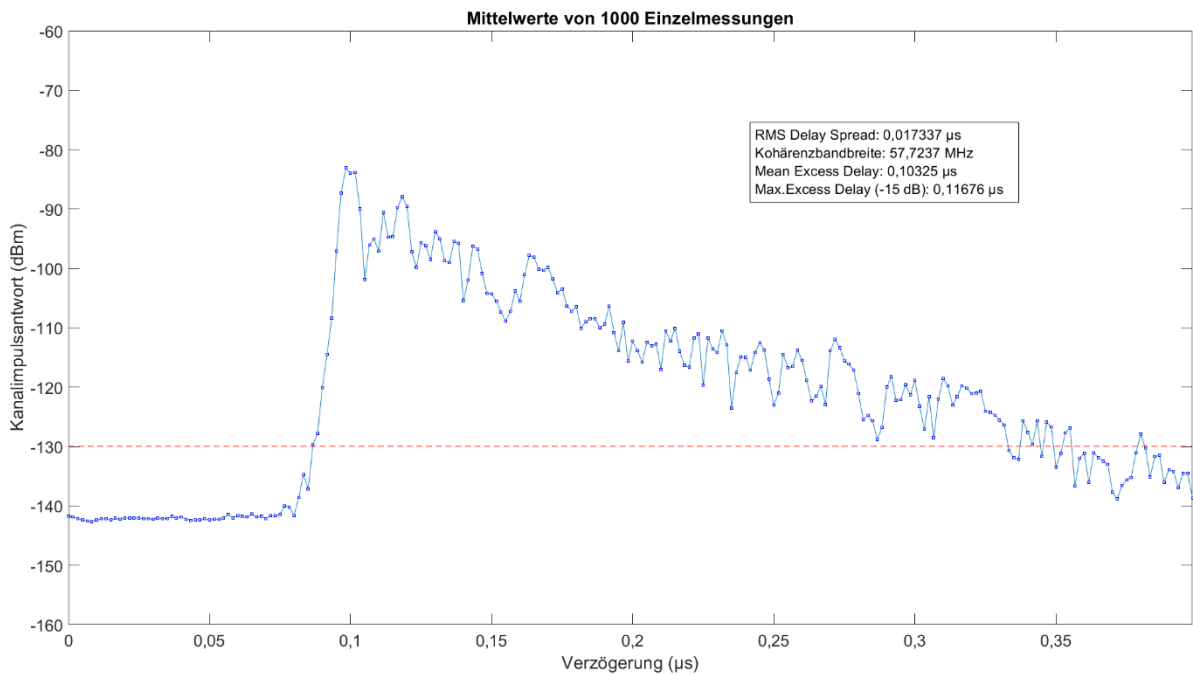


Abbildung 59: Kanalimpulsantwort „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“

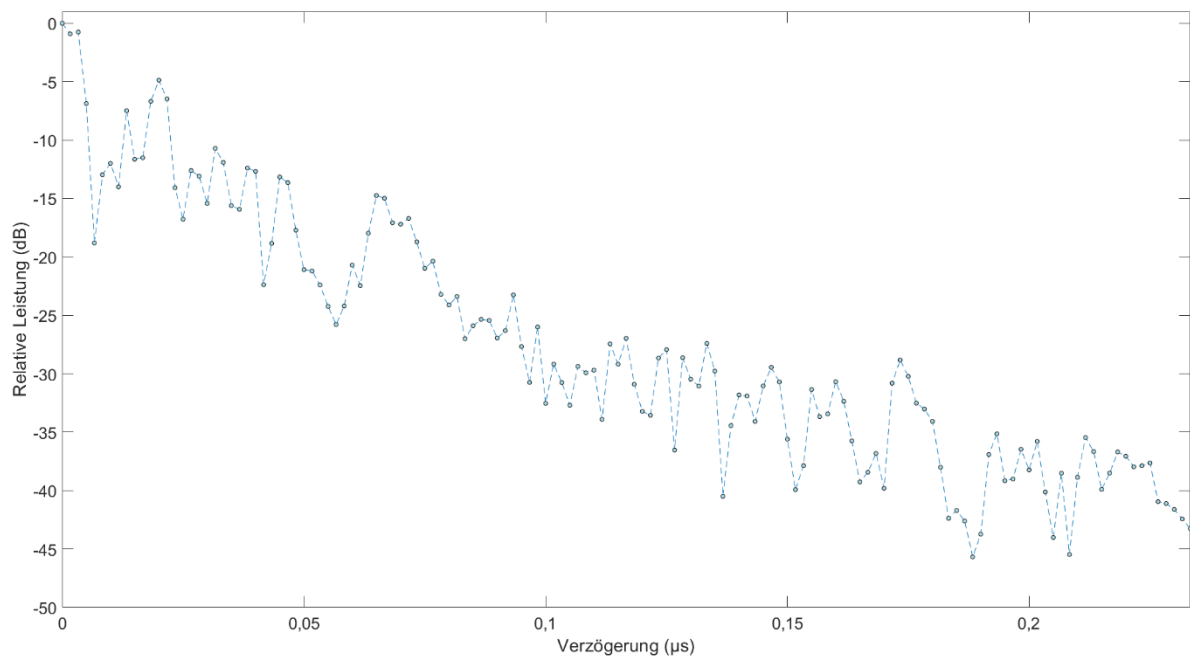


Abbildung 60: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“

7.10 Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz

Dieses Szenario ist an jenes von Kapitel 6.3 angelehnt, aufgrund diverser Anpassungen wird es jedoch erneut durch Abbildung 61 definiert.

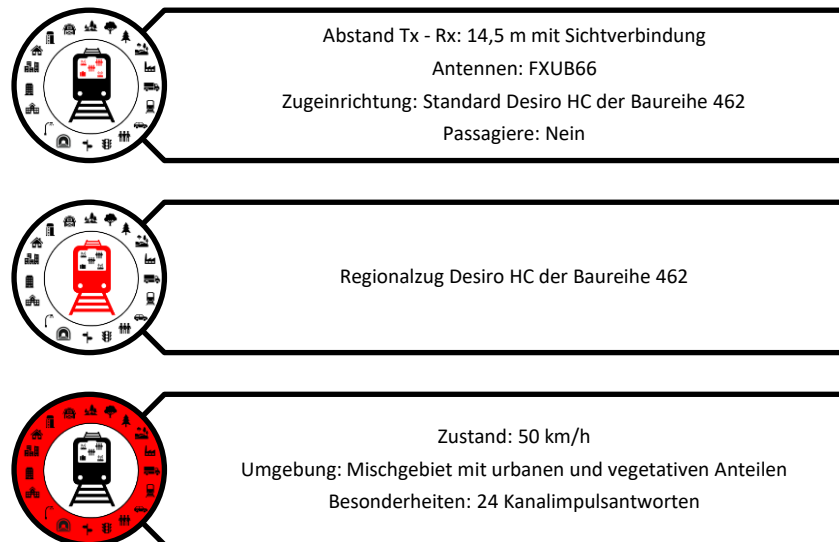


Abbildung 61: Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“

Des Weiteren zeigt Abbildung 62 das Layout inklusive Antennenpositionierung für die Messreihe. Obwohl dies ein Doppelstockzug ist, findet diese Untersuchung auf einer Passagierebene statt. Erst hinter dem eingezeichneten Sender wird der Wagen in zwei Stockwerke aufgeteilt.



Abbildung 62: Positionierung im Zug von Sender und Empfänger im Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“

In Abbildung 63 ist die gemittelte Kanalimpulsantwort der Messreihe dargestellt, während Abbildung 64 das extrahierte Kanalmodell beschreibt. Für die Erfassung dieser Messreihe und jener nachfolgend in Kapitel 7.11 ist auf dem Fahrzeug unter diesen Bedingungen sehr wenig Zeit verfügbar gewesen, weshalb sowohl die Anzahl der einzelnen Kanalimpulsantworten reduziert ist, als auch die Messungen ungetriggert durchgeführt worden sind. Die Kohärenzbandbreite mit 59,25 MHz sticht positiv aus den durchgeführten Messungen heraus.

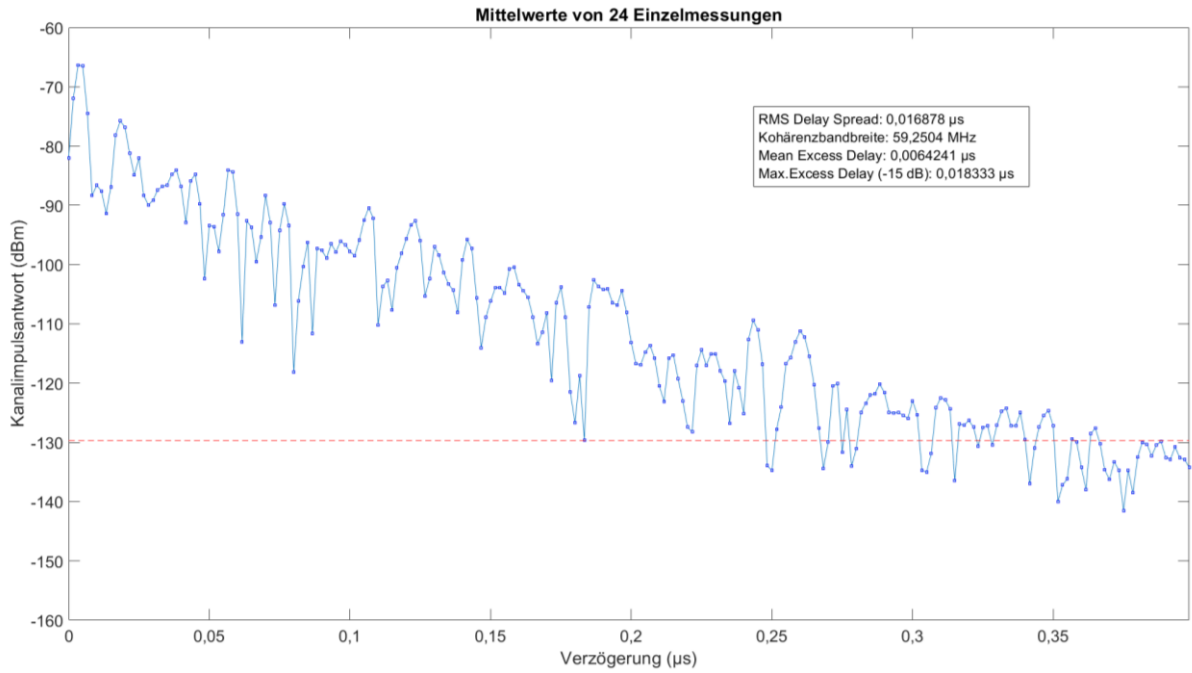


Abbildung 63: Kanalimpulsantwort „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“

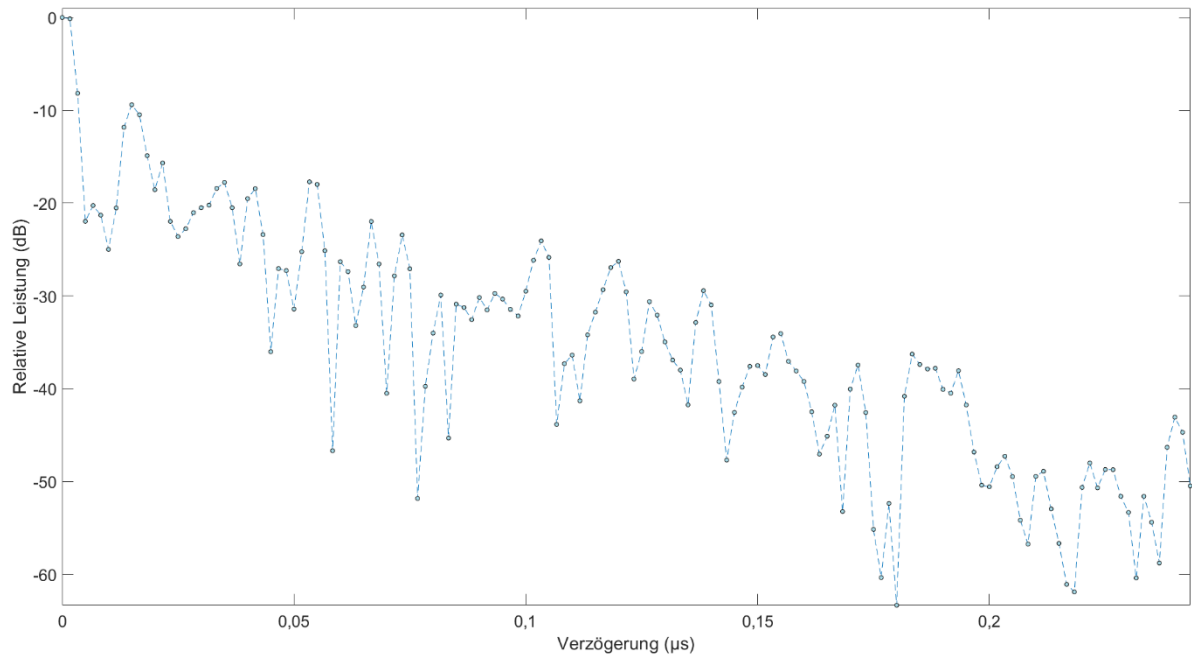


Abbildung 64: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“

7.11 Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz

Die „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“ ist identisch zur Szenariendefinition aus Kapitel 7.10, bis auf den Frequenzwechsel zu 2,7 GHz. Das Messergebnis, welches Abbildung 65 beschreibt, weicht massiv vom vorherigen Szenario ab. Mit einer Kohärenzbandbreite von 32,36 MHz halbiert sich diese fast durch den Frequenzwechsel von 3,6 GHz auf 2,7 GHz. Ebenso zeigt die Kanalimpulsantwort kein klares Leistungsmaximum, was einem Szenario ohne Sichtverbindung entspricht. Dies ist das Ergebnis signifikanter Wellenausbreitungseffekte. Abbildung 66 zeigt das dazugehörige Kanalmodell, dass in späteren Kapiteln validiert wird.

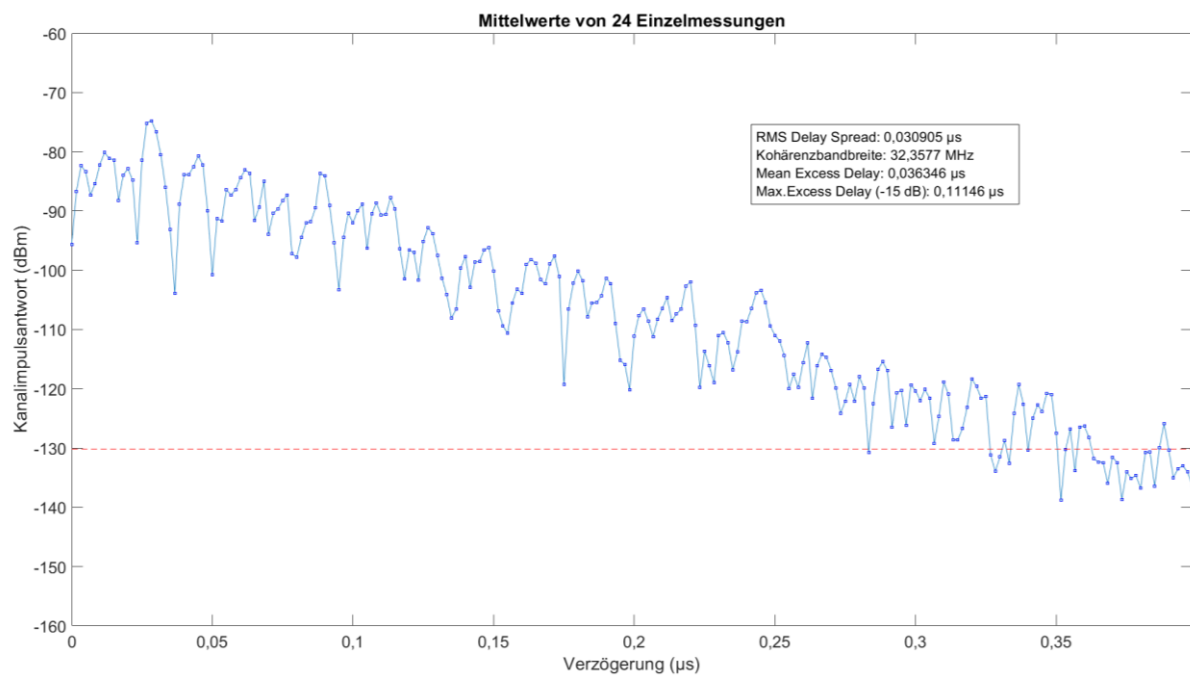


Abbildung 65: „Kanalimpulsantwort Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“

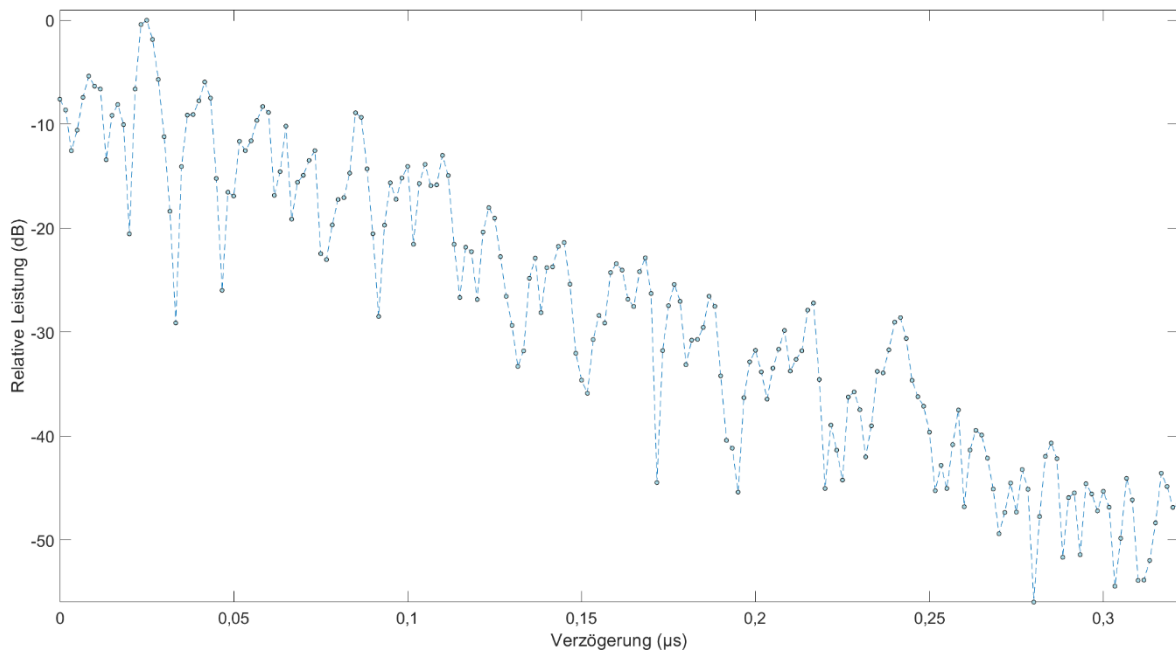


Abbildung 66: Kanalmodell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“

7.12 Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz

Basierend auf dem Szenario aus Kapitel 7.5 ändert sich hier die Zugumgebung und der Zustand. Der Hochgeschwindigkeitszug steht im Bahnhof neben dem Bahnsteig mit mittlerer Passagierauslastung. Das Nebengleis ist nicht belegt. Die Darstellung der Kanalimpulsantwort ist in Abbildung 67 und das Kanalmodell in Abbildung 68 zu finden. Trotz des Stillstandes liegt die Kohärenzbandbreite bei lediglich 36,08 MHz. Die Kanalimpulsantwort scheint stufenartig zu sinken, was auf deutliche Mehrwegeinterferenzen durch die Bahnhofsumgebung hervorgerufen wird.

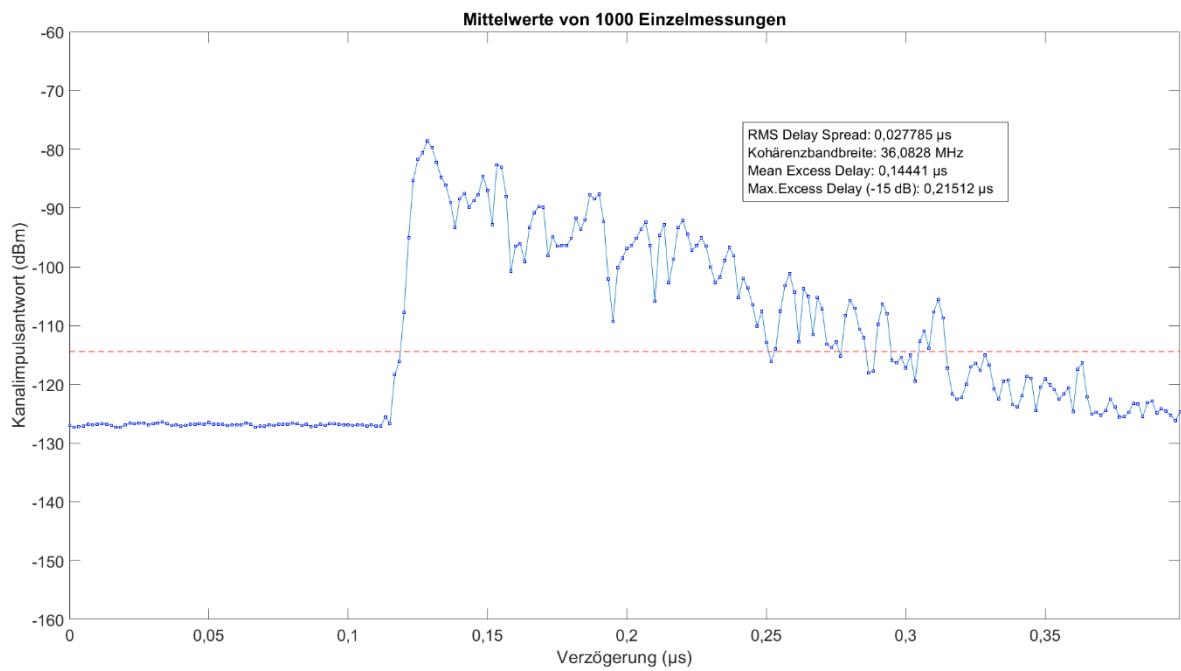


Abbildung 67: Kanalsimpulsantwort „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“

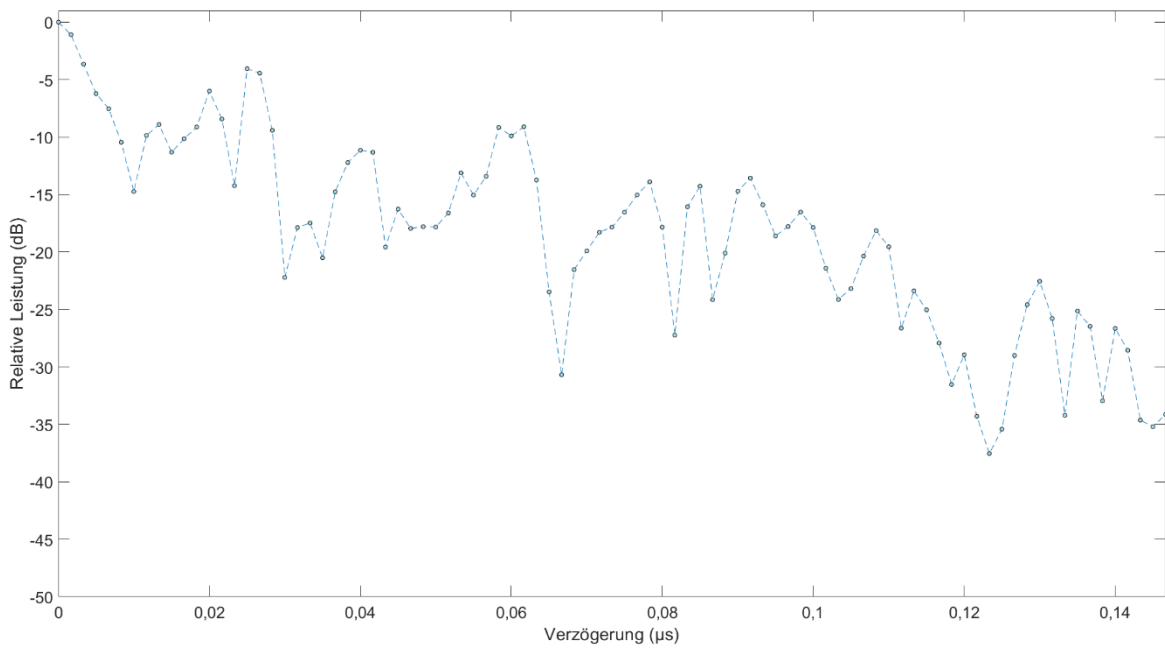


Abbildung 68: Kanalmodell „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“

7.13 Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz

Als Grundlage dieses Szenarios ist aus Kapitel 7.10 die Szenariendefinition heranzuziehen. Es ändert sich der Zustand zu Stillstand, die Frequenz zu 5,6 GHz und die Zugumgebung ist von Natur dominiert. Das bedeutet links und rechts neben der Strecke sind Büsche. Lediglich die Oberleitungsmasten und Streckensignale können als reflektierende Objekte identifiziert werden. Das Resultat der Messreihe zeigt Abbildung 69 und das Modell Abbildung 70. Die Kohärenzbandbreite von 54,44 MHz befindet sich auf einem hohen Niveau, liegt jedoch unterhalb der Szenarien bei Fahrt durch Mischgebiet, was durch die eher dämpfende Zugumgebung verursacht wird.

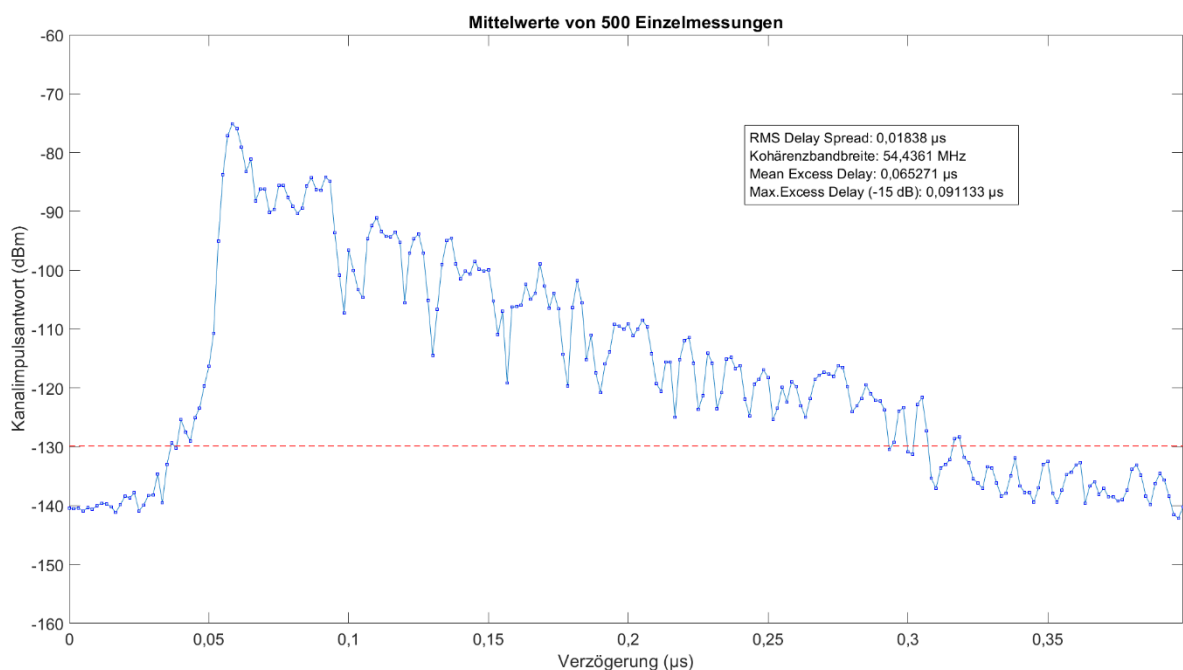


Abbildung 69: Kanalimpulsantwort „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz“

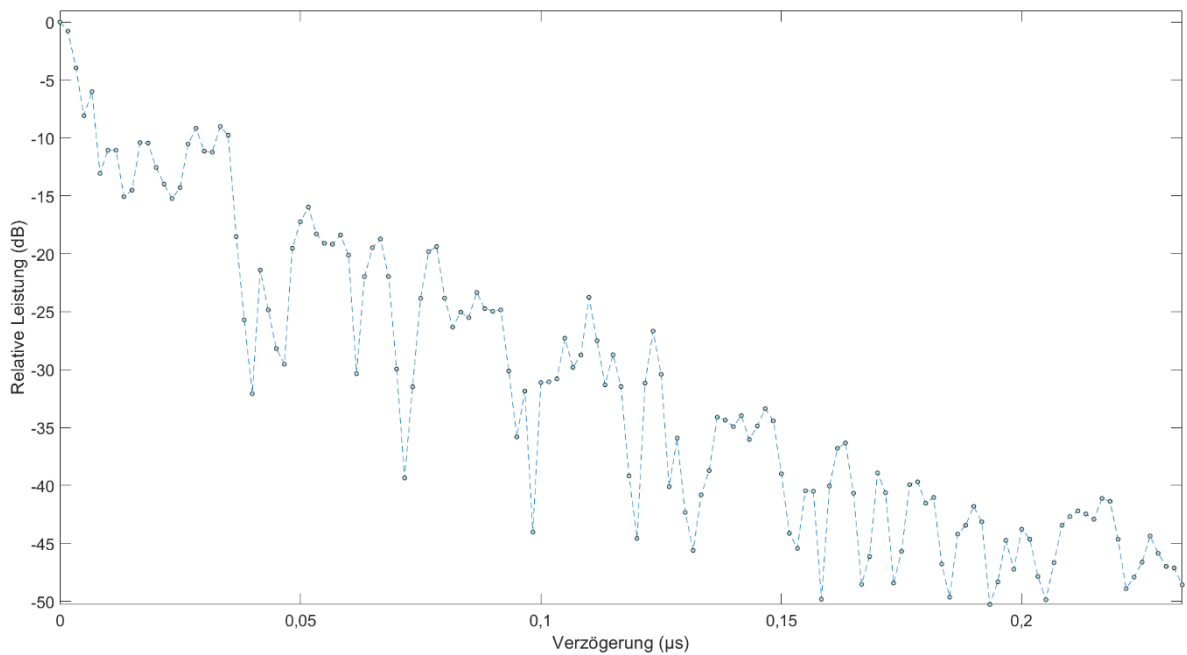


Abbildung 70: Kanalmodell „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz“

7.14 Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung

Abgeleitet vom Szenario aus Kapitel 7.13 wird dieses Szenario mit VERT2450 Antennen sowie neuen Antennenpositionen durchgeführt. Hierbei wird bewusst auf eine Sichtverbindung verzichtet und eine Kommunikationsstrecke über zwei Ebenen des Doppelstockzuges untersucht (siehe Abbildung 71). Alle anderen Parameter bleiben zur vorherigen Messreihe unverändert.

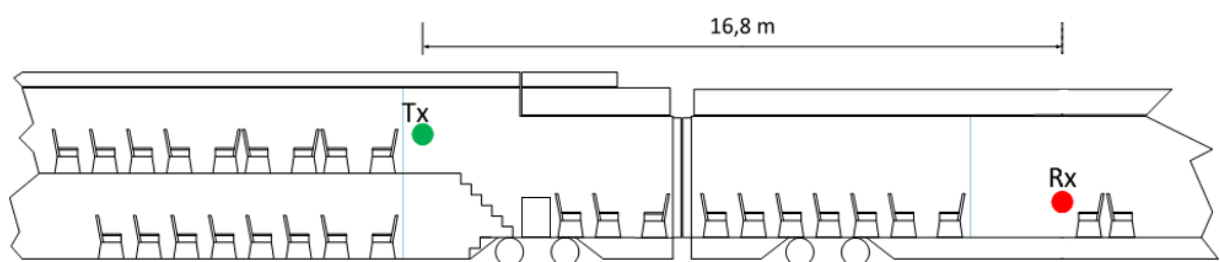


Abbildung 71: Seitenansicht des Zuglayouts mit Sende- und Empfangsposition

Das Messresultat zeigt klare Anzeichen von Mehrwegepfaden und starken destruktiven Interferenzen an markanten Minimastellen (siehe Abbildung 72). Verglichen mit dem Szenario mit Sichtverbindung verliert die Kohärenzbandbreite ca. 24 MHz. Das daraus resultierende Kanalmodell wird in Abbildung 73 beschrieben.

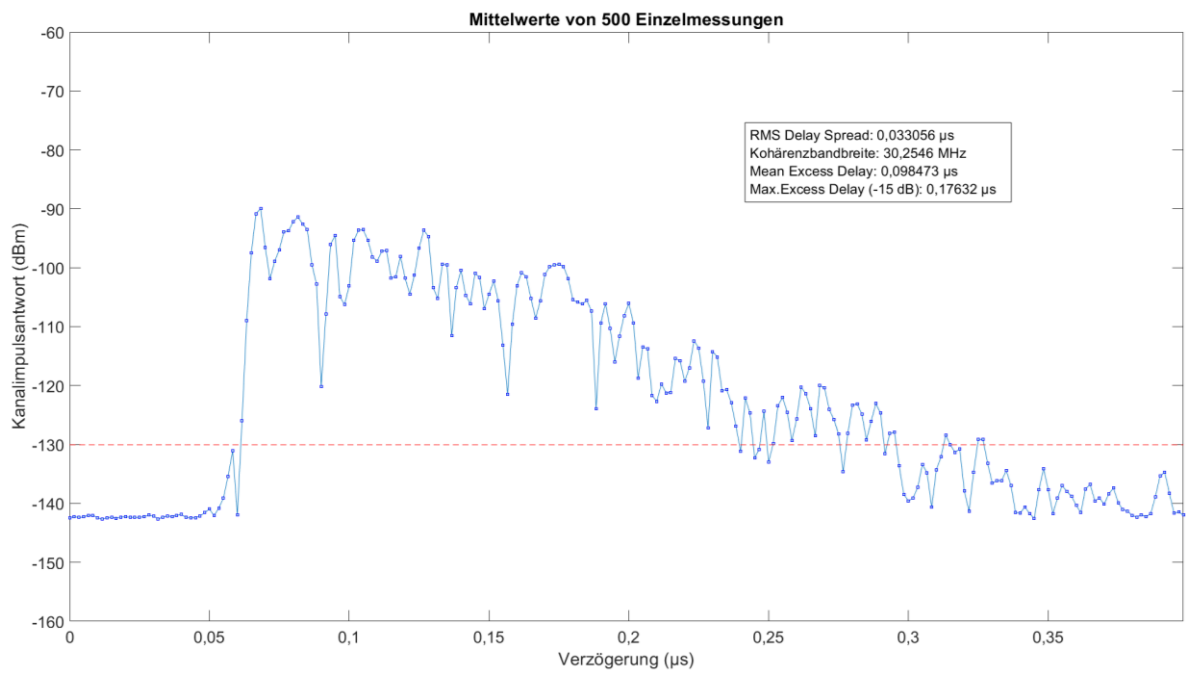


Abbildung 72: Kanalimpulsantwort „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“

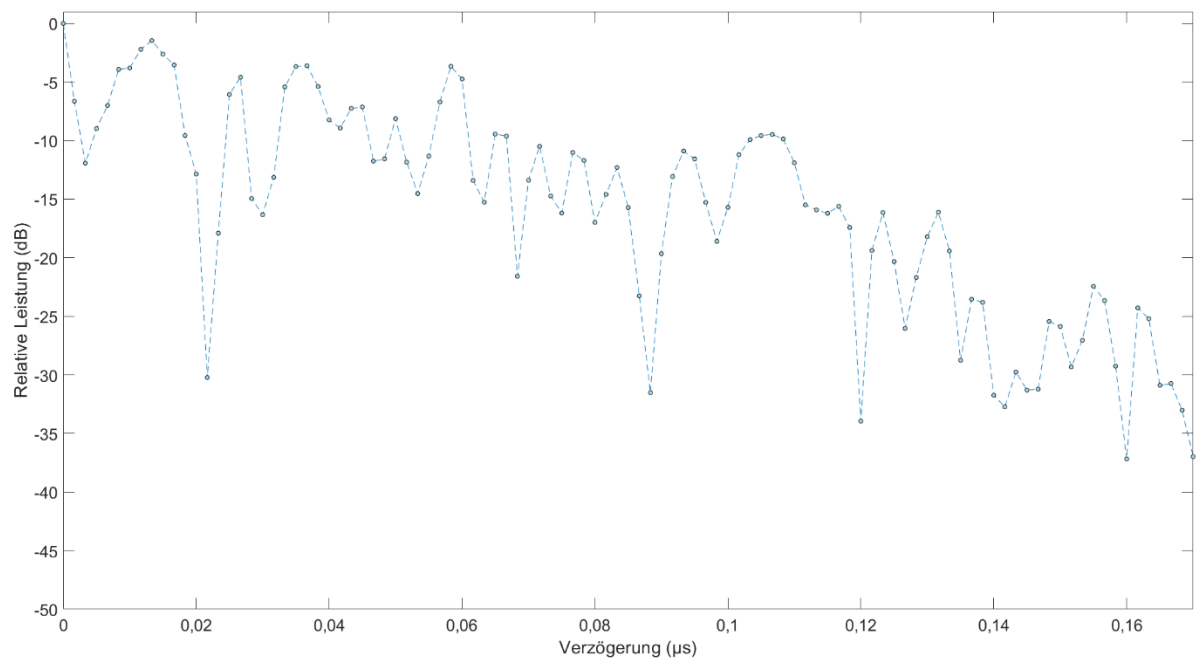


Abbildung 73: Kanalmodell „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“

7.15 Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz

Sonst identisch mit dem Szenario aus Kapitel 6.4, wird bei „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“ mit den VERT250 Antennen bei 5,6 GHz die Messung durchgeführt. Die Depotumgebung ähnelt dabei einer Bahnhofsumgebung mit belegten Nachbargleisen und sehr wenigen Passagieren am Bahnsteig. Zudem wird diese Messung getriggert durchgeführt im Gegensatz zu jenen in Kapitel 6.4. Die Kanalimpulsantwort ist in Abbildung 74 ersichtlich, das Modell in Abbildung 75.

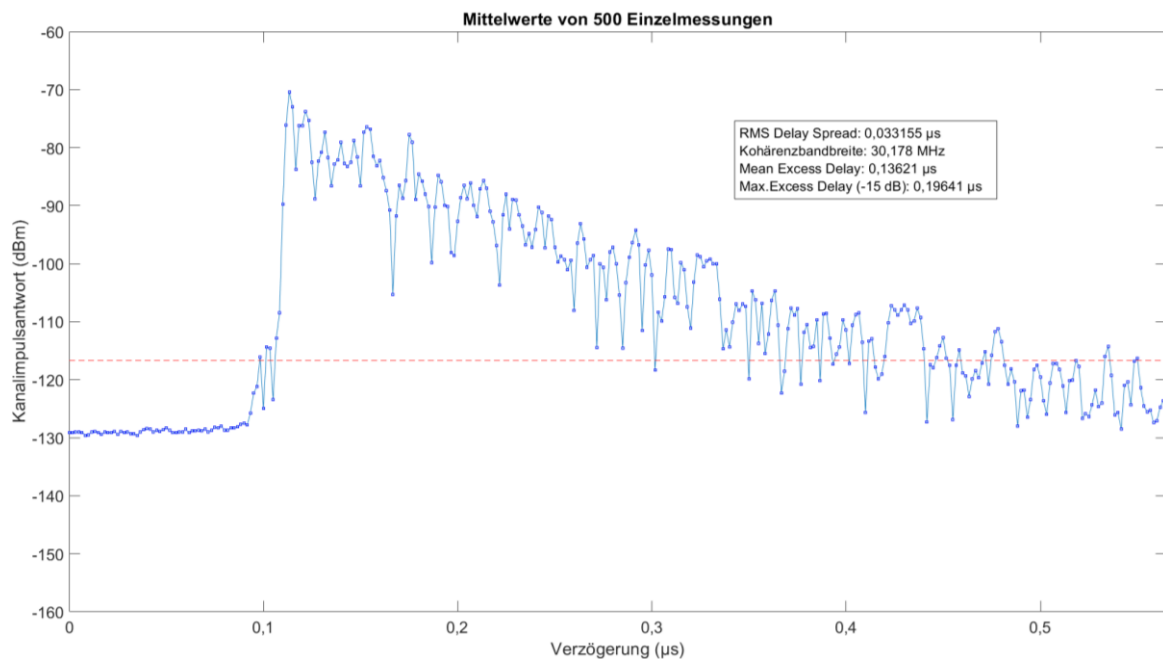


Abbildung 74: Kanalimpulsantwort „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“

Die Kohärenzbandbreite von 30,18 MHz liegt ca. 7 MHz niedriger als in jener Messreihe in Kapitel 6.4. Die stark reflektierende Umgebung sowohl im Zug als auch außerhalb, führt zu deutlichen destruktiven Interferenzen. In der Kanalimpulsantwort zeigt sich dies durch stark negative Leistungsausläge.

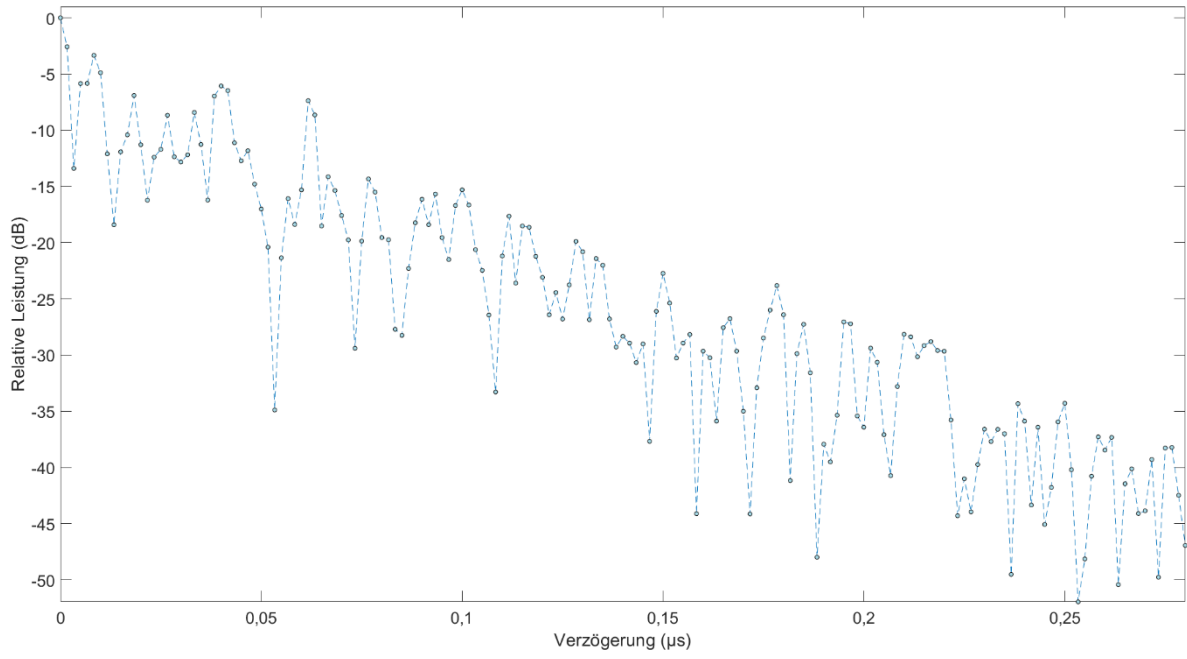


Abbildung 75: Kanalmodell „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“

8 Validierung und Anwendung der Modelle

Das Kapitel zur Validierung der erarbeiteten Kanalmodelle aus Kapitel 7 weist die Eignung der Modelle für den Zweck der szenarienspezifischen Simulation nach, wobei dies durch zusätzliche Kontrollmessungen aufgezeigt wird. Hierfür muss eine ausreichende Anzahl weiterer Kanalimpulsantworten vorliegen, die nicht Teil der für die Kanalmodellerstellung verwendeten Daten sind. Insgesamt hat die Nutzung realer Messdaten gegenüber Simulationen und analytischen Ansätzen bei der Modellerstellung und -validierung zahlreiche Vorteile. Es werden beispielsweise unrealistische Idealisierungen und Vereinfachungen vermieden, die das Ergebnis bis hin zur Unbrauchbarkeit verfälschen können. Für die Beurteilung eines jeden Modells wird eine Validierungsgrafik erzeugt. Ein Beispiel hierfür ist Abbildung 76. In der Überschrift werden die Anzahl der Erstmessungen zur Modellerstellung und die Anzahl der Kontrollmessungen genannt. Auch der RMS Delay Spread, die Kohärenzbandbreite, der Mean Excess Delay und der Maximum Excess Delay der beiden Messreihen wird in der Grafik gezeigt. Außerdem werden gemäß Legende die Mittelwerte der Erstmessungen, die Rauschgrenze der Erstmessungen, die Standardabweichung der Erstmessungen, sowie die Mittelwerte der Kontrollmessungen aufgezeigt. Des Weiteren zeigt die Legende die Ampelfarbe der Validierung. Wie bei einer Verkehrssampel zeigt diese die Farbe Grün (= erfolgreiche Validierung), Orange (= teilweise erfolgreiche Validierung) oder Rot (= nicht erfolgreiche Validierung).

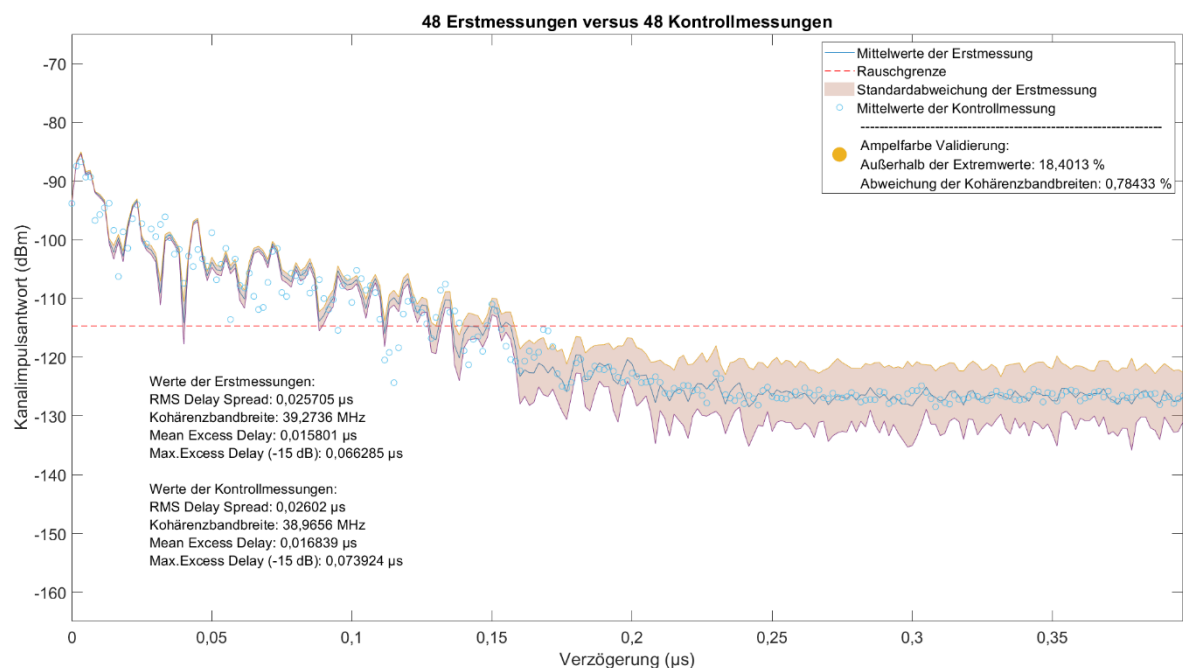


Abbildung 76: Beispiel einer Validierungsgrafik für ein erarbeitetes Modell

Die Farben werden auf Basis des definierten Übereinstimmungsgrades zwischen Erst- und Kontrollmessungen vergeben. Hierfür werden zwei Übereinstimmungskriterien bestimmt. Das erste Kriterium ist die Anzahl der Abweichungen der Mittelwerte der Kontrollmessungen von den Extremwerten der Erstmessung. Das zweite Kriterium ist die prozentuale Abweichung der Kohärenzbandbreiten der beiden Messreihen. Liegen mehr als 5 % der Mittelwerte der Kontrollmessung außerhalb der Extremwerte der Erstmessungen und weichen die Kohärenzbandbreiten um mehr als 5 % voneinander ab, so wird die Ampelfarbe Rot vergeben. Die Messreihen zeigen dann starke Abweichungen voneinander und eine pauschale Nutzung des Modells für das jeweilige Szenario sei klar infrage gestellt. Liegen mehr als 5 % der Mittelwerte der Kontrollmessung außerhalb der Extremwerte der Erstmessungen oder weichen die Kohärenzbandbreiten um mehr als 5 % voneinander ab, so wird die Ampelfarbe Orange vergeben. Es existieren messbare Abweichungen zwischen den beiden Messreihen, die es für eine Nutzung des Modells zu erklären gilt. Liegen 5 % der Mittelwerte der Kontrollmessung oder weniger außerhalb der Extremwerte der Erstmessungen und weichen die Kohärenzbandbreiten um 5 % oder weniger voneinander ab, so wird die Ampelfarbe Grün in der Validierungsgrafik abgebildet. Die beiden Messreihen weisen einen hohen Übereinstimmungsgrad auf und können als repräsentatives Modell für das jeweilige Szenario verwendet werden. Die 5 % Marke wurde dabei aus der Statistik vom gängigen Vertrauensintervall abgeleitet. Der Vergleich der Kohärenzbandbreiten ist eine universelle Möglichkeit, Kommunikationstrecken zu vergleichen und reduziert den Vergleich dabei auf das Wesentliche, nämlich die tatsächlich nutzbare Bandbreite für Datenübertragung. Ebenso ist die Verletzung von Extremwerten ein Indikator dafür, dass sich die Randbedingungen des Kommunikationsszenarios ändern. Dies ist bei der szenarienspezifischen Modellvalidierung ein Aspekt, der beleuchtet werden muss. [93]

Zudem werden Simulationen einer OFDM-Kommunikationsstrecke unter Gebrauch etablierter Kanalmodelle für 5G und der hier erarbeiteten Modelle der Zug-Onboard-Kommunikation durchgeführt und gegenübergestellt (siehe Kapitel 8.5). Für Szenarien ohne und mit Sichtverbindung werden die im technischen Bericht der „3rd Generation Partnership Project“ definierten und etablierten Kanalmodelle verwendet. Diese sind von 0,5 GHz bis 100 GHz gültig und entsprechend für 5G-Anwendungsfälle empfohlen. Die Modelle TDL-A, TDL-B, TDL-C repräsentieren Szenarien ohne Sichtverbindung. Die Modelle TDL-D und TDL-E können bei vorhandenen Sichtverbindungen eingesetzt werden. Zudem können die Modelle über Parameter skaliert werden, um dem konkreten Anwendungsfall besser zu entsprechen. Hierfür sind bereits detaillierte Kenntnisse über den Kommunikationskanal nötig, was die praktische Anwendung erschwert. Die Modelle sind wissenschaftlich erstellt worden und in der gesamten Welt der Kommunikationsforschung anerkannt. [94]

8.1 Validierung der Überlandfahrten

In diesem Abschnitt werden die vier erzeugten Modelle für Überlandfahrten bezüglich ihrer Verwendbarkeit und Validität bewertet. Die Validierungsergebnisse sind in Abbildung 77, Abbildung 78, Abbildung 79 und Abbildung 80 jeweils unter Nennung des Szenarios beschrieben.

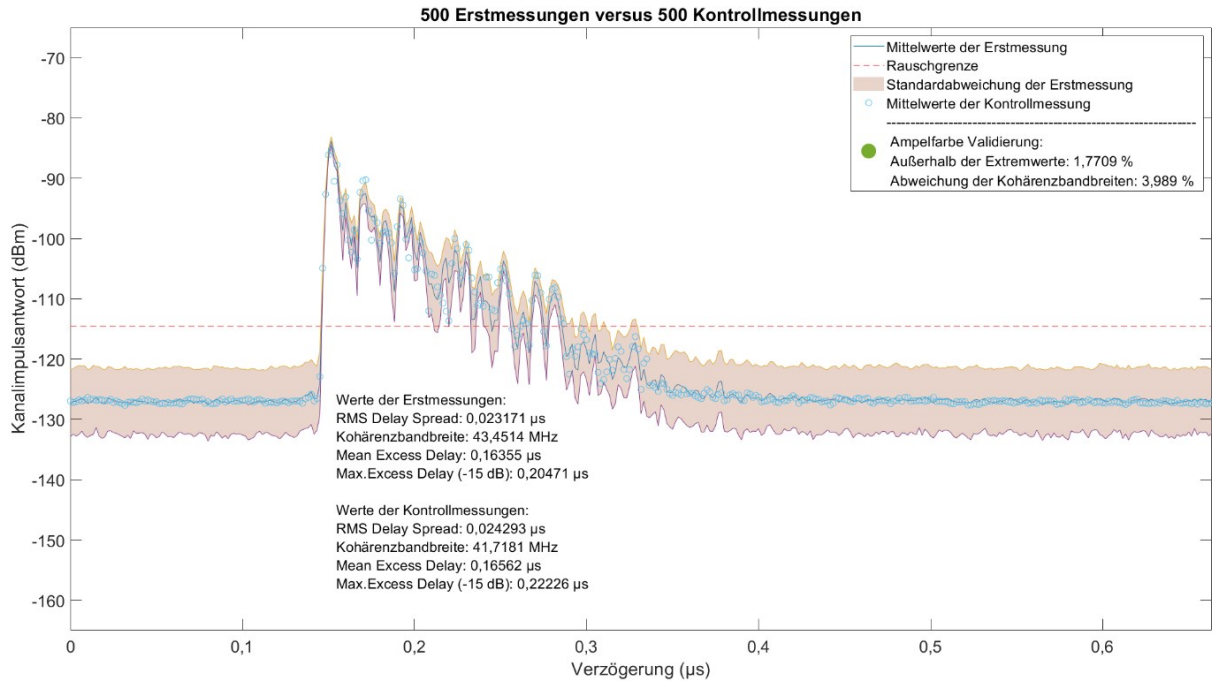


Abbildung 77: Validierung „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.1

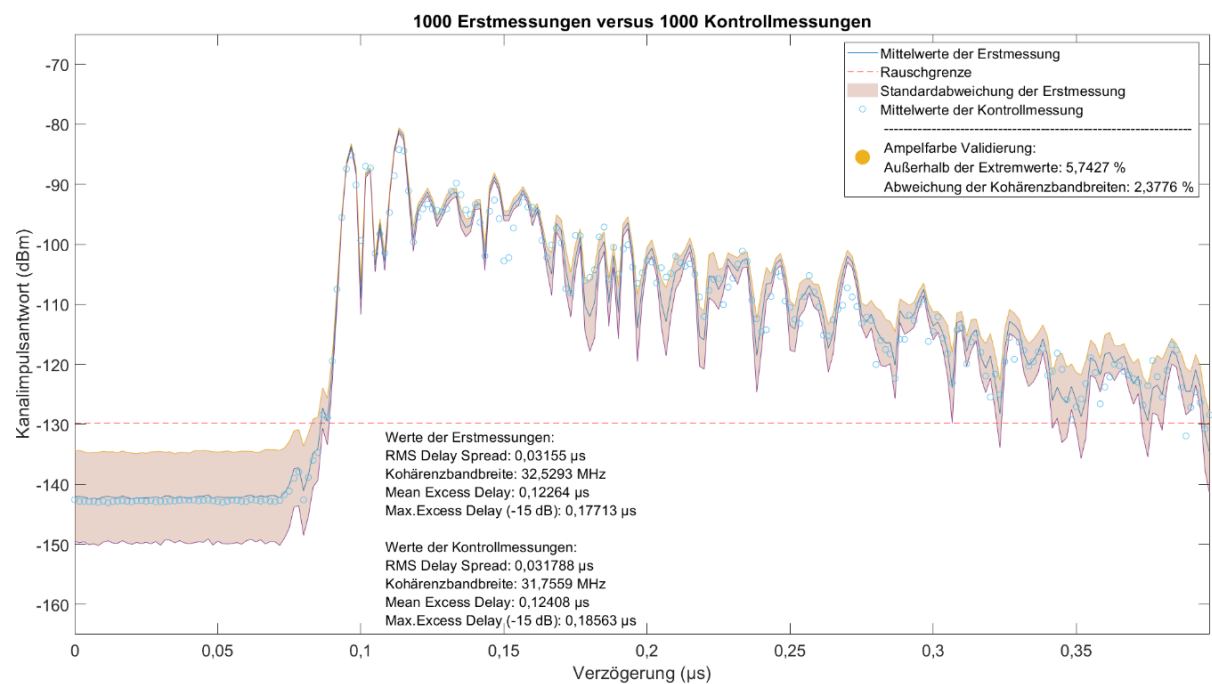


Abbildung 78: Validierung „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.2

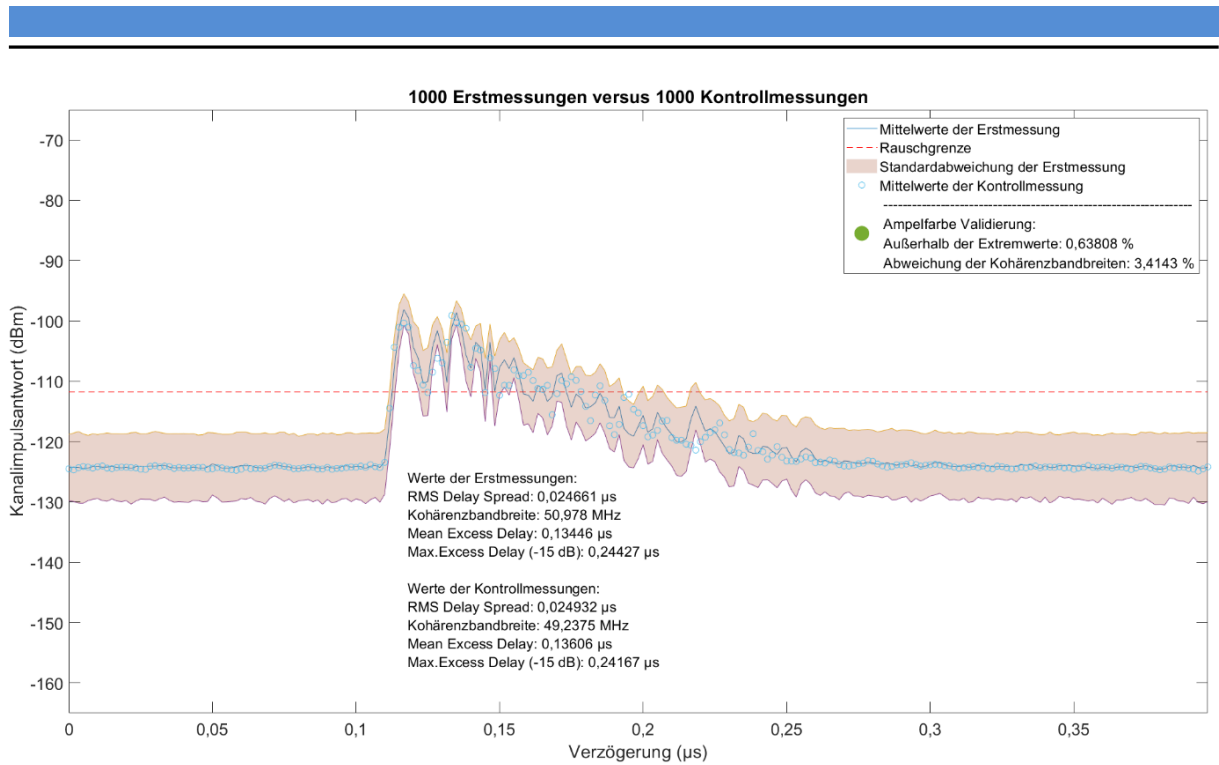


Abbildung 79: Validierung „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.3

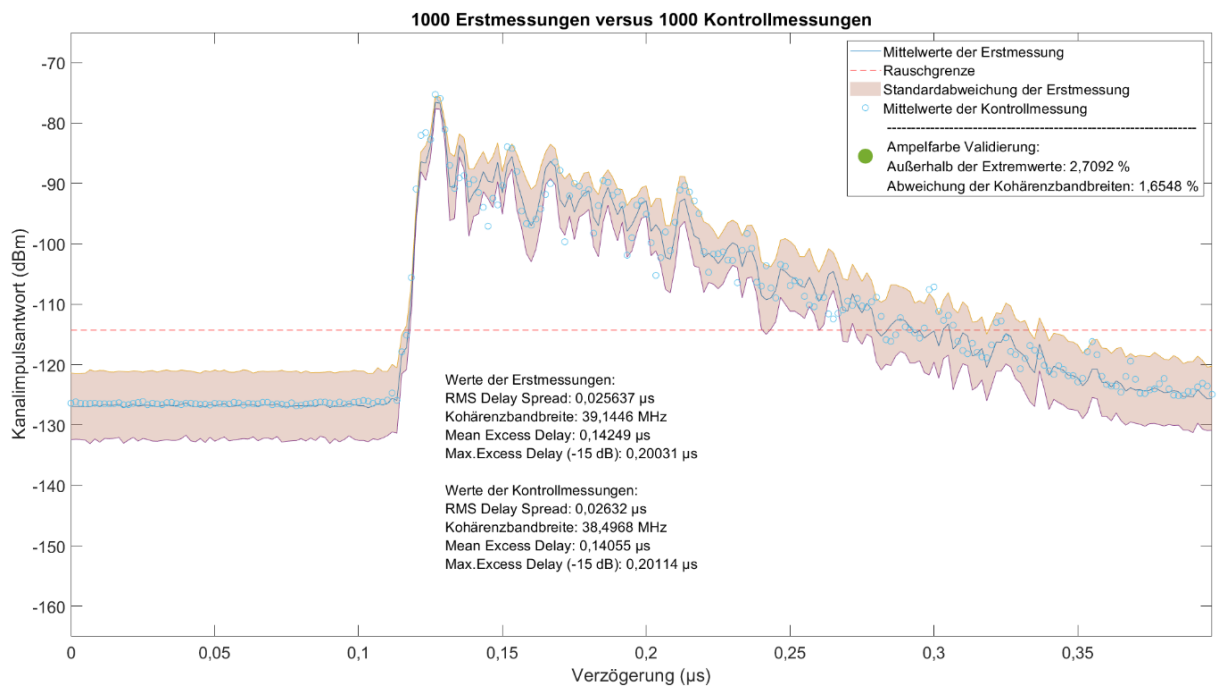


Abbildung 80: Validierung „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.4

Es ist aus den Grafiken ersichtlich, dass alle Modelle, welche durch Messungen auf dem ICE erstellt wurden mit einer grünen Ampel bezüglich Eignung bestätigt werden. Speziell in den Validierungsgrafiken Abbildung 77 und Abbildung 80 ist die Sichtverbindung eindeutig ausgeprägt. Die Standardabweichungen sind an diesen Stellen sehr gering. Erst spätere Mehrwegepfade haben höhere

Abweichungen. Im Gegensatz hierzu zeigt sich in Abbildung 79 während des kompletten Verzögerungsverlaufs eine relativ breite Standardabweichung mit leistungsstarkem Mehrwegepfad auf dem Niveau der Sichtverbindung. Die Validierung von Abbildung 46: Kanalmodell „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“ ist jedoch mit einer orangen Ampel bewertet worden (siehe Abbildung 78). Es liegt zwar die Übereinstimmung der Kohärenzbandbreite in einem guten Wertebereich, die Kontrollmessung lag aber zu 5,74 % außerhalb der Extremwerte der Erstmessung. Bei Betrachtung der Validierungsgrafik sind einzelne Abweichungen der Kontrollmessung von der Standardabweichung zu erkennen. Für eine genauere Verfolgung der Mittelwerte wird mit Abbildung 81 eine Darstellung ohne Standardabweichung erstellt. Hier zeigt sich nun, dass die Erstmessungswerte deutlich ausgeprägtere Leistungsschwankungen besitzen bei gleichzeitig wenig Varianz innerhalb eines Verzögerungszeitpunktes. Bei der Kontrollmessung liegen die Mittelwerte generell weiter zusammen, zeigen jedoch den gleichen Kurvenverlauf wie die Erstmessung. Das bedeutet, dass die Pfade an sich identisch sind und die Interferenzeffekte unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Aufgrund dieser Tatsache und den minimalen Einfluss hiervon auf die Kohärenzbandbreite, wird das Modell ebenso als geeignet angesehen.

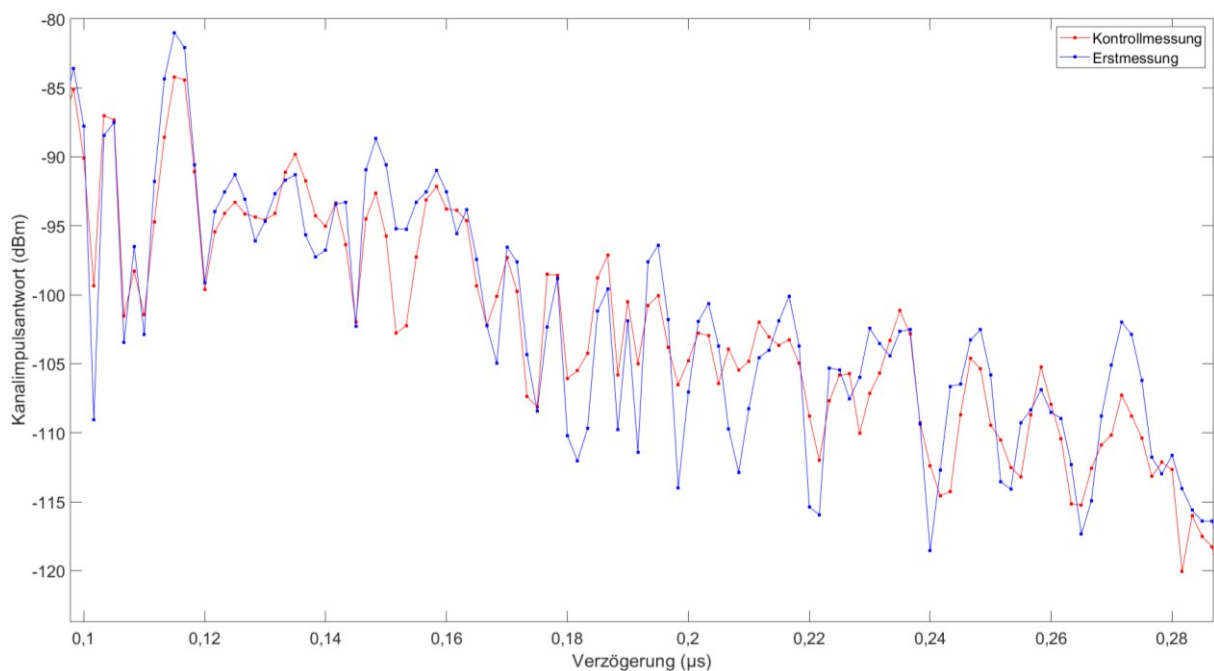


Abbildung 81: Erstmessung versus Kontrollmessung vergrößert von „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“

8.2 Validierung der Tunnelfahrten

Innerhalb der Tunnelfahrten ist ein anderes Validierungsergebnis zu beschreiben. Für das Szenario „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ ist die Ampelfarbe Grün das Ergebnis (siehe Abbildung 82), während Abbildung 83 für das Szenario „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ eine rote Ampel erhält.

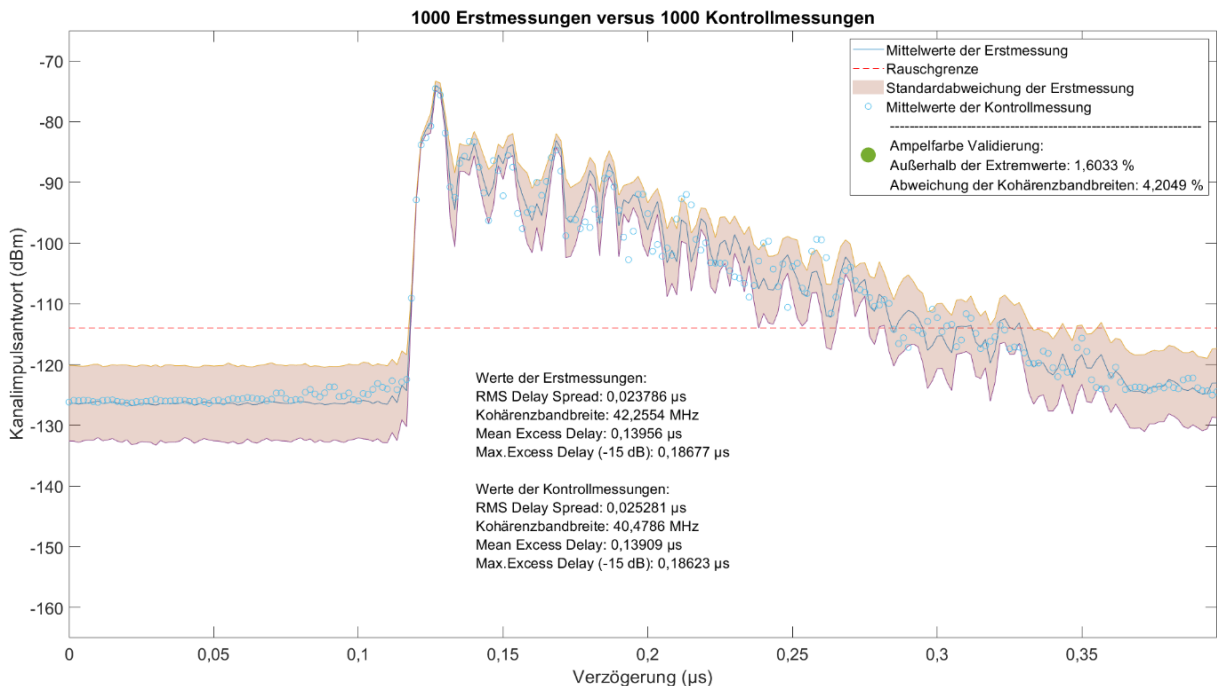


Abbildung 82: Validierung „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.5

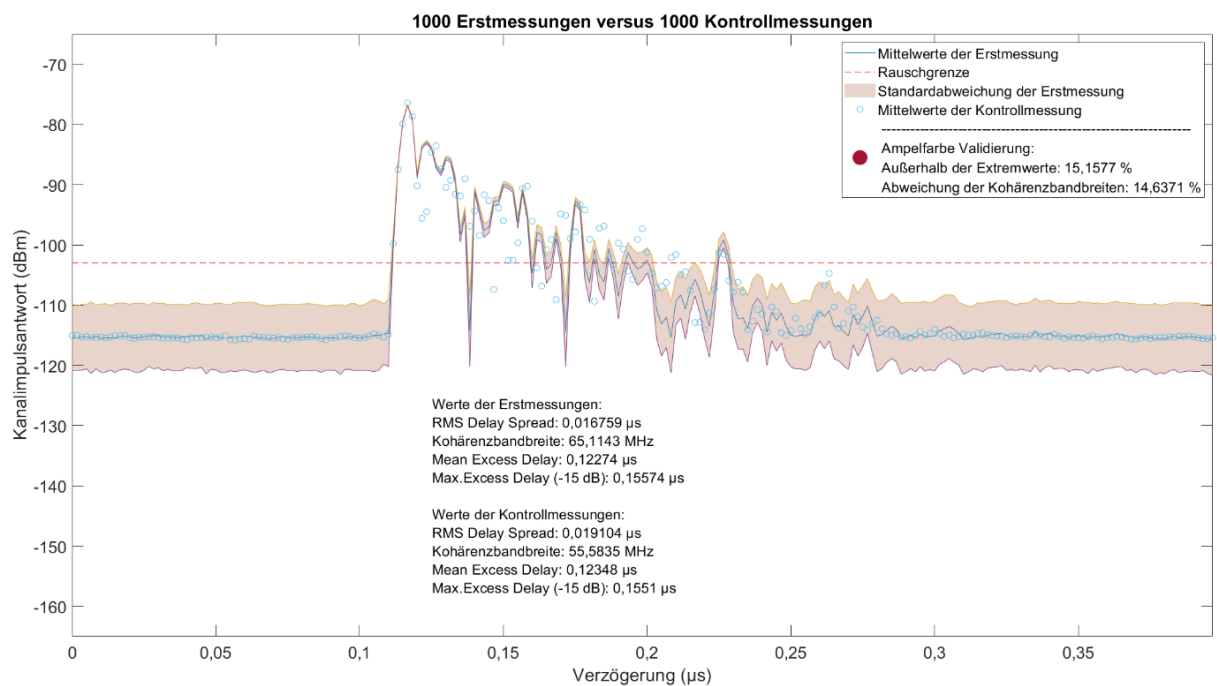


Abbildung 83: Validierung „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.6

Beide Bewertungskriterien zeigen Abweichungen von ca. 15 % was zu einem zunächst deutlichen Ergebnis führt. Eine genaue Untersuchung ist essentiell für den weiteren Gebrauch des Modells. In einem ersten Schritt werden die Extremwerte von Erstmessung und Kontrollmessung in Abbildung 84 gegenübergestellt. Zu jedem Verzögerungspunkt ist jeweils der maximale und der minimale Wert der Messreihe aufgetragen und die Fläche dazwischen farblich markiert. Violett sind die Bereiche, bei denen sich die Extremwerte von Erst- und Kontrollmessung überlappen. Durch die Grafik zeigt sich, dass zwischen 0,12 μs und 0,16 μs die Kontrollmessung massiv niedrigere Leistungsextremwerte vorweist. Nun stellt sich die Frage, ob lediglich einzelne Kanalimpulsantworten diese Abweichungen vorweisen, oder ob die gesamte Kontrollmessreihe grundverschieden von der Erstmessung ist.

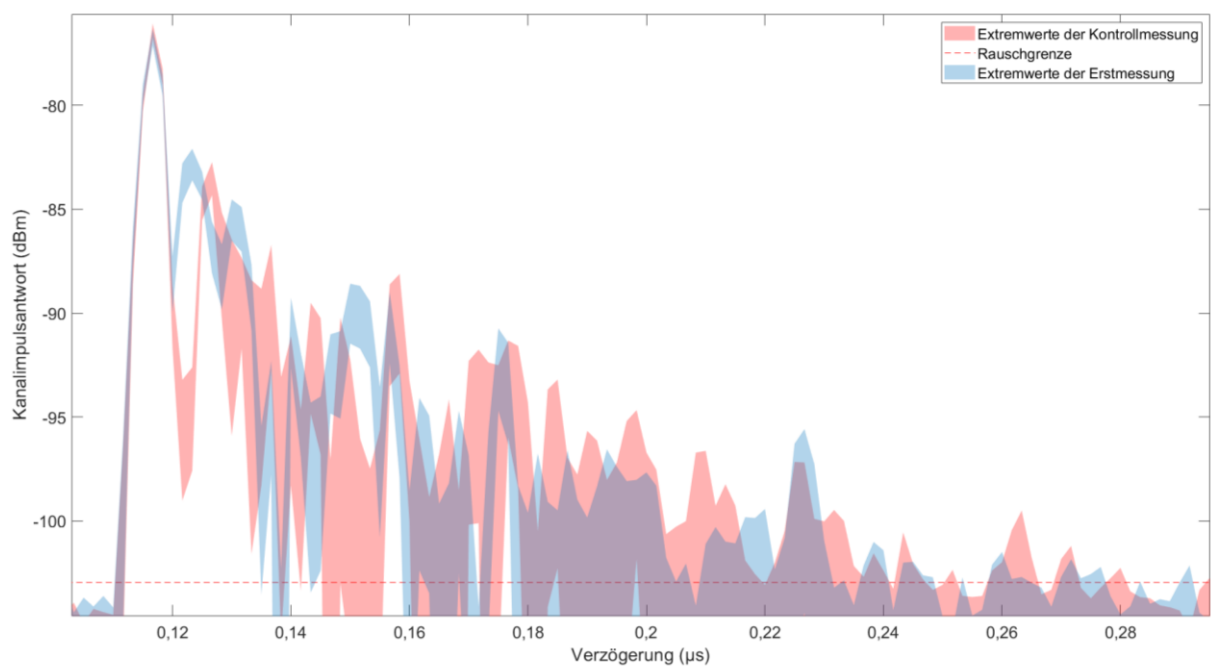


Abbildung 84: Extremwertanalyse „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.6

Diese Frage beantwortet Abbildung 85. Hier wird deutlich, dass zwischen Kanalimpulsantwort 200 und 400, sowie zwischen 650 und 750 Leistungsspitzen auftreten. Gleichzeitig fehlen die dominanten Pfade der Sichtverbindung, was typisch für Menschen innerhalb des Kommunikationskanals ist, da diese das Signal abschatten. Zusätzlich wurden die Messungen auf Stativen durchgeführt. Diese Positionierung begünstigt die Abschattung, da so Sender und Empfänger deutlich niedriger im Wagenkasten positioniert sind. Für einen abschließend validen Einsatz des Modells müsste eine weitere Kontrollmessung durchgeführt werden.

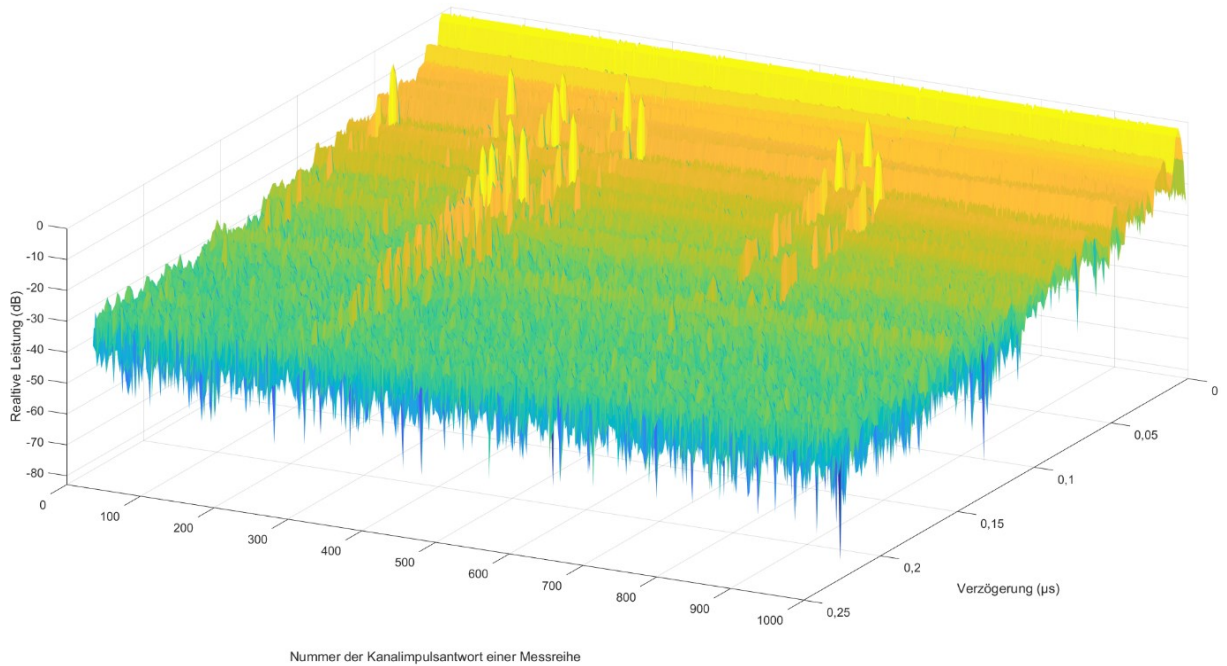


Abbildung 85: Alle Kanalimpulsantworten der Kontrollmessung zu „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“

Dem Modell für Szenario „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“ wird die Ampelfarbe Orange zugeordnet. Hier weicht die Kohärenzbandbreite deutlich ab und wird bei der Kontrollmessung mit ca. 9,8 MHz schlechter bewertet (siehe Abbildung 86). Die Mittelwerte der Kontrollmessung liegen an einigen Verzögerungspunkten (bei ca. 0,22 μs und bei 0,25 μs) deutlich über der Standardabweichung der Erstmessung, obwohl diese abseits der Sichtverbindung relativ breit ist.

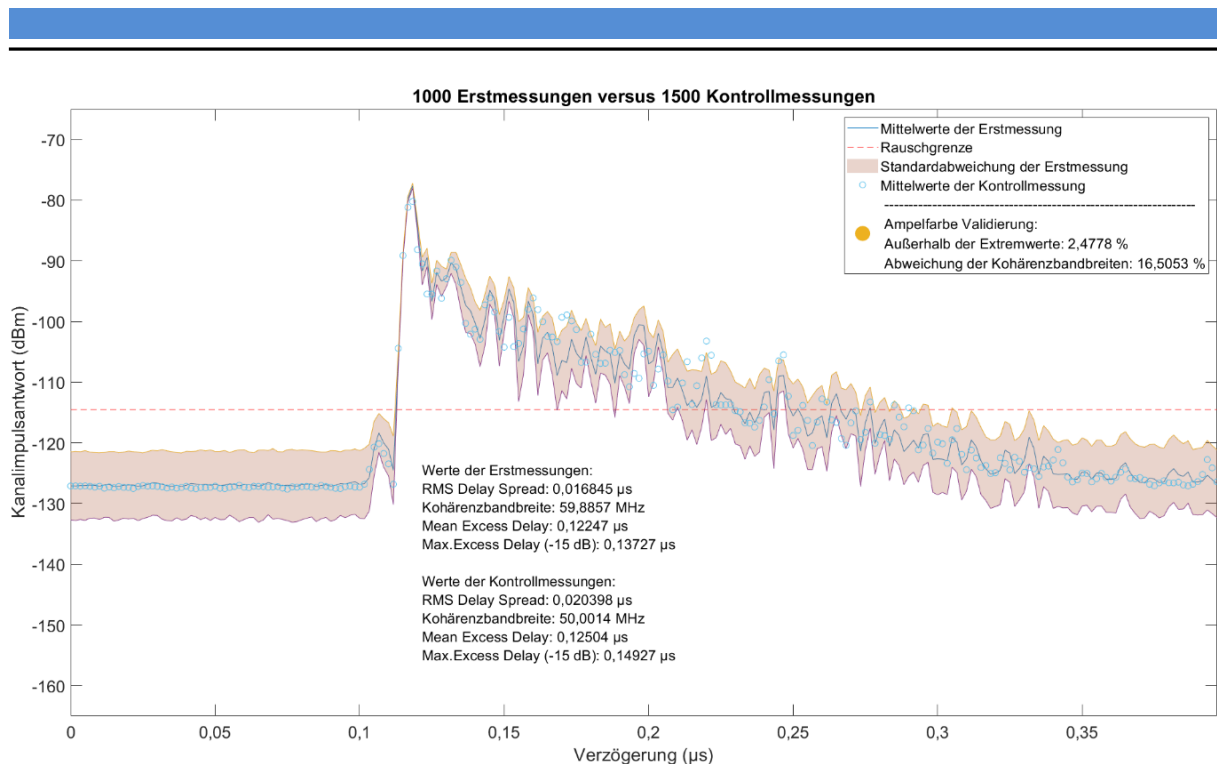


Abbildung 86: Validierung „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“ Kapitel 7.7

Im Vergleich aller Kanalimpulsantworten der Kontroll- und der Erstmessung fällt auf, dass die Leistungsmaxima und -minima bei der Erstmessung deutlicher definiert sind. Auf jedes Maximum folgt wiederum ein deutliches Minimum, während die Leistung relativ mit der Verzögerung abnimmt. Dies ist bei der Kontrollmessung nicht ausgeprägt der Fall. Hier sinkt die Leistung über die Verzögerung weniger stark und gleichmäßig. Es existieren Maxima zu späteren Verzögerungszeiten, die mehr Leistung haben als vorherige Pfade. Gleichzeitig ist der Pfad der Sichtverbindung im Mittel um einige dBm niedriger. Diese Beobachtung ist vermutlich für die geringere Bandbreite verantwortlich. Aus Sicht der Messmethode wurden 500 mehr Messungen durchgeführt, wobei alle Kanalimpulsantworten der Kontrollmessung in sich homogen sind. Ein möglicher Unterschied könnte die Bauart der Tunnel sein. Die Messreihen wurden in drei unterschiedlichen Tunneln gemessen. Namentlich sind das der Finnetunnel, der Bibratunnel und der Osterbergtunnel. Der Finnetunnel wurde mit Tunnelbohrmaschinen und modularen Tunnelfertigelementen erbaut, während die anderen beiden Tunnel bergmännisch durch Sprengung und Spritzbeton erstellt wurden. Beide Verfahren führen zu offiziellen Tunnelröhrendurchmessern von 9,6 m. Die Oberflächen der fertigen Tunnelröhren sind jedoch voneinander abweichend und können zu unterschiedlichen Wellenausbreitungseffekten führen. Da beide Messreihen Kohärenzbandbreiten über 50 MHz besitzen, und damit relativ hoch liegen, sollen auch mit diesem Modell Simulationen durchgeführt werden. [95]

8.3 Validierung von Fahrten in Mischgebieten

Innerhalb der Modelle für die Fahrten durch Mischgebiet kann nur das Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“ mit einer grünen Ampel bewertet werden. Die Validierung zeigt hierzu Abbildung 87.

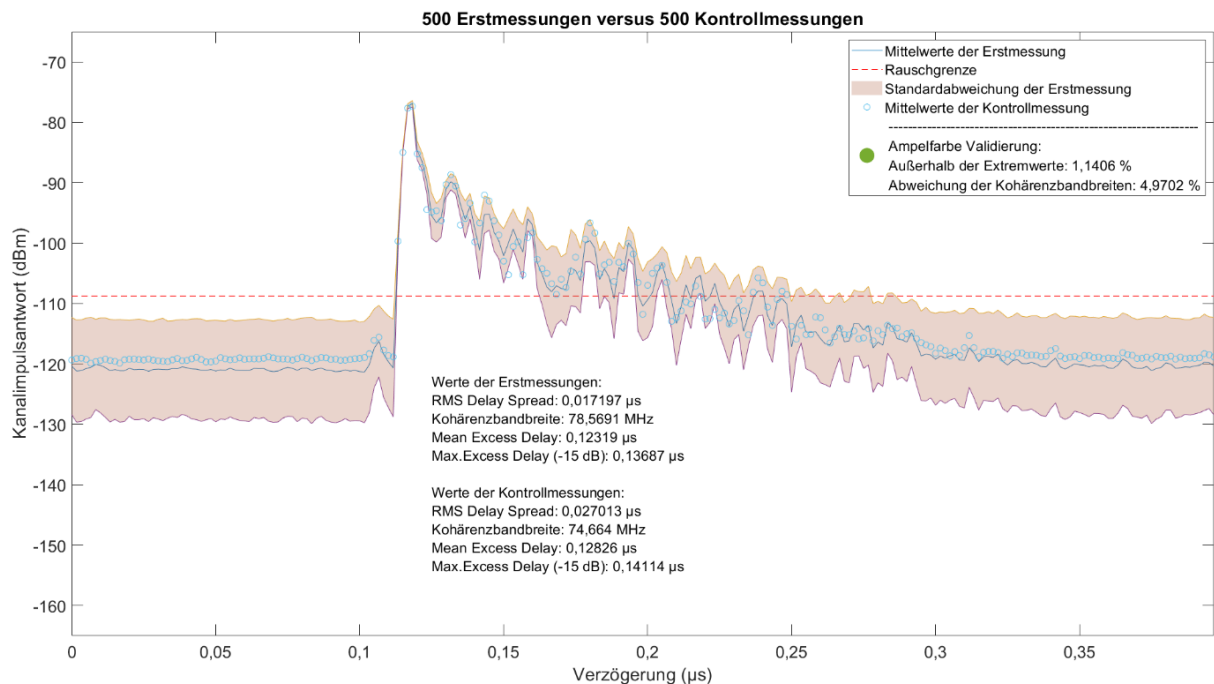


Abbildung 87: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“ Kapitel 7.8

Bei Fahrten durch Mischgebiet sind immer die Anteile von Natur und urbaner Umgebung relevant, da sich diese beiden Umgebungen komplett unterschiedlich auf den Kommunikationskanal auswirken können. Während Beton und Metall reflektieren, absorbiert Vegetation hauptsächlich. Dieser Umstand erschwert auch die Validierung des Kanalmodells „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“ in Abbildung 88. Mit rot bewertet, ist in der Grafik zu erkennen, dass die Mittelwerte der Kontrollmessung zu einem hohen Anteil unterhalb der Mittelwerte der Erstmessung liegen. Bei Sichtung aller Kanalimpulsantworten sind die Maxima bei 0,12 µs und 0,17 µs fast bei allen Messungen um 5 dBm und mehr niedriger. Rechnet man außerdem diese genannten Verzögerungszeiten in Meter um und korrigiert diese mit dem Wissen um eine Vorsequenz, so erhält man ca. 30,6 m und ca. 45,8 m. Um diese Mehrwegepfade zu erhalten, kann beziehungsweise muss eine Reflexion außerhalb des Wagenkastens stattfinden. Diese Entfernungen können damit dem Bereich der Zugumgebung zugeordnet werden, was die Vermutung erhärtet, dass die Anteile an urbanem Gebiet bei der Erstmessung höher gewesen sind als die der Vegetation. Dieses Modell kann nun nachvollzogen aber nicht belastbar validiert werden.

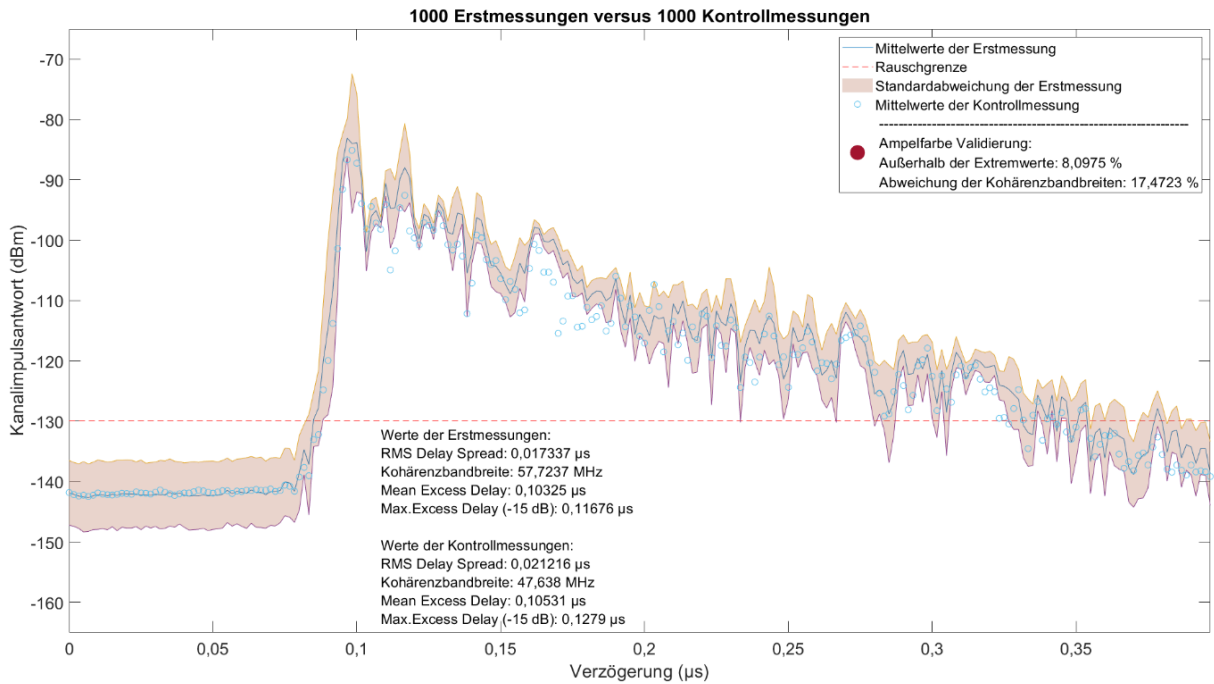


Abbildung 88: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.9

Das Modell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“ wird gemäß Abbildung 89 mit einer orangen Ampel versehen. Neben der geringen Anzahl der Messungen ist die hohe Abweichung mit 62,53 % von den Extremwerten festzustellen.

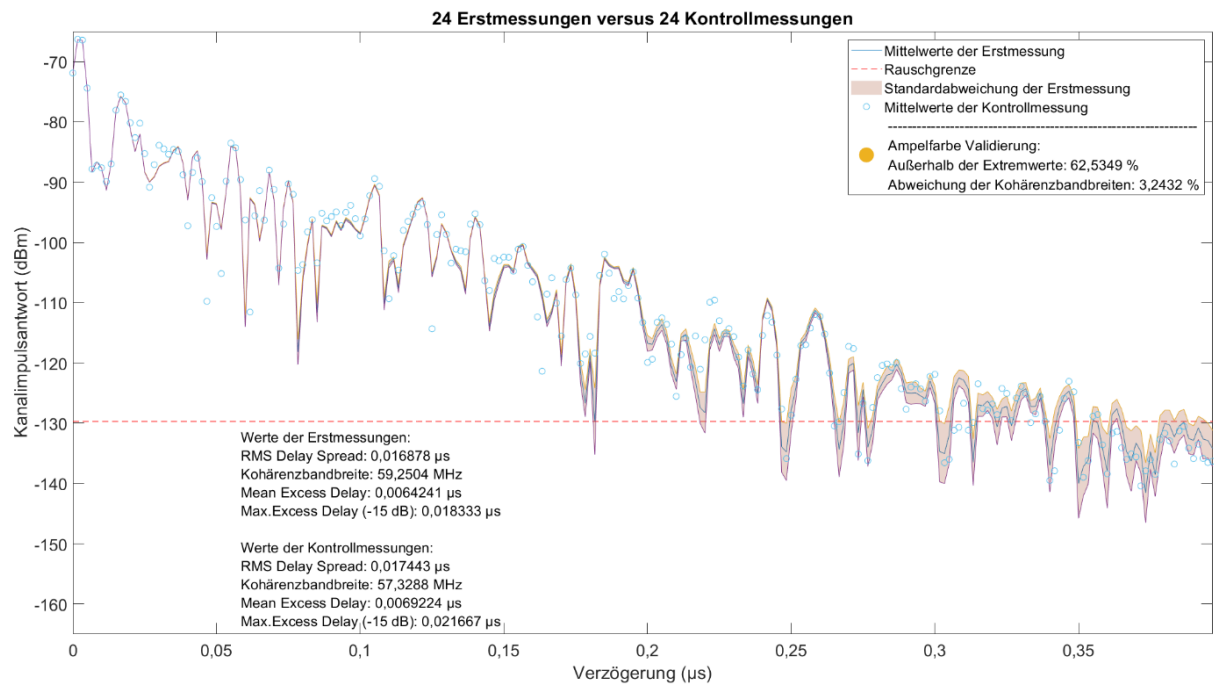


Abbildung 89: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.10

Bereits die Standardabweichung der Erstmessung ist fast nicht ablesbar. Nur die Werte nach $0,2 \mu\text{s}$ zeigen eine höhere Varianz. Es werden daher alle Kanalimpulsantworten in einer Abbildung analysiert. Aufgrund der geringen Anzahl von Kanalimpulsantworten ist diese direkte Sichtung der Daten einfach möglich, sonst müssten Analysen über Extremwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen erfolgen. Aus den beiden Messreihen in Abbildung 90 zeigt sich eine klare Deckung der Sichtverbindungspfade und dem direkt folgenden Wechsel von Minimum auf Maximum.

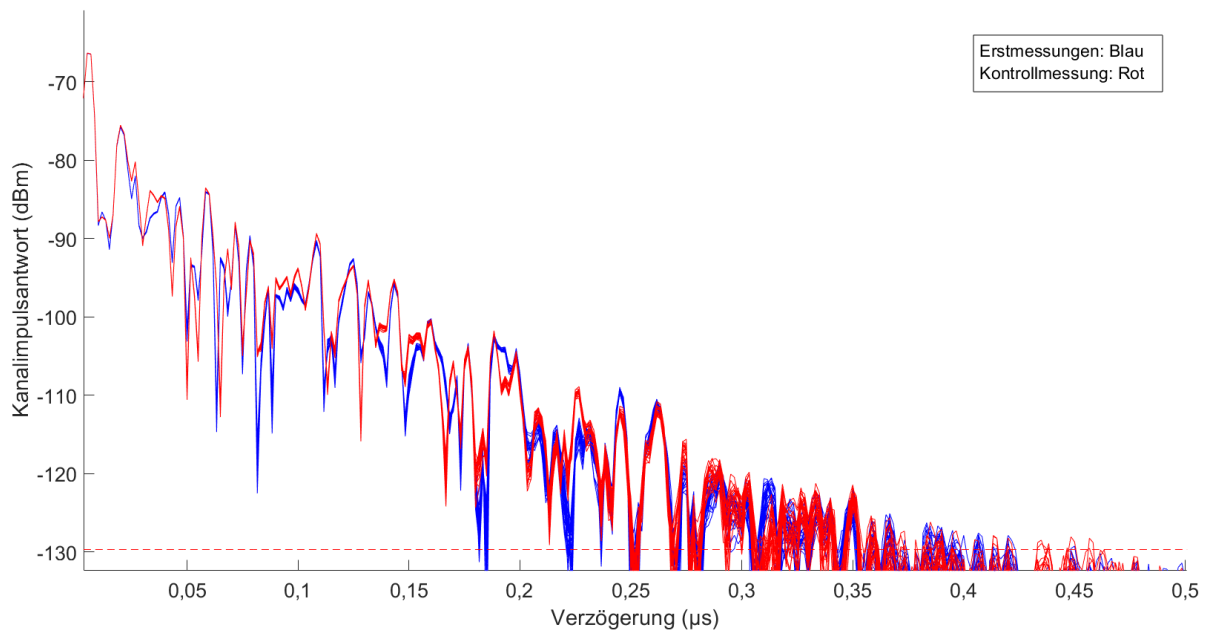


Abbildung 90: Alle Kanalimpulsantworten zu „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“

Ab $0,026 \mu\text{s}$ weichen die Messreihen erstmals merklich voneinander ab. Gerade bei den Leistungsmi-
nima ist dies später deutlicher wie beispielsweise bei $0,05 \mu\text{s}$ mit einem Unterschied von über 8 dBm. Die Leistungsmaxima sind bis auf eine deutlichere Abweichung bei $0,1 \mu\text{s}$ größten Teils übereinstimmend. Diese Tatsache spiegelt sich in den Kohärenzbandbreiten der beiden Messreihen wider, die lediglich um 3,43 % voneinander abweichen. Eine Reflexion außerhalb des Wagenkastens wäre in diesem Szenario ab ca. 18 m, also einer Verzögerungszeit von ca. $0,06 \mu\text{s}$ möglich. Dies lässt sich wiederum gut mit Abbildung 90 kombinieren, da erst nach diesem Verzögerungspunkt die Abweichungen zwischen den einzelnen Impulsantworten anwachsen. Hier beeinflusst die Zugumgebung verstärkt den Leistungsverlauf. Die gemischte Zusammensetzung der Zugumgebung bei Erst- und Kontrollmessung wird deutlich sichtbar. Dieses Szenario zeigt einen deutlichen Kompromiss zwischen Nutzen und Kosten. Hier wird ein Kanalmodell erstellt ohne Kalibrierung und mit wenigen Messungen. Dennoch stimmen die Kohärenzbandbreiten stark überein. Außerdem zeigt sich der individuelle Einfluss der

Mischgebietszusammensetzung wie bei der vorherigen Messung. Unter Berücksichtigung des Genannten kann das Modell für Simulationen verwendet werden.

Auch das Modell „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“ hat bei der Validierungsdurchführung eine orange Ampel erhalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 91 visualisiert. Es treffen bis auf die exakten Verzögerungspunktangaben die gleichen Feststellungen wie bei der vorherigen Validierung von Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“ zu. Jedoch zeigen Erst- und Kontrollmessung Anzeichen dafür, dass keine Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfänger vorliegen. Auch bei Betrachtung aller Kanalimpulsantworten (siehe Abbildung 92) wird das bestätigt.

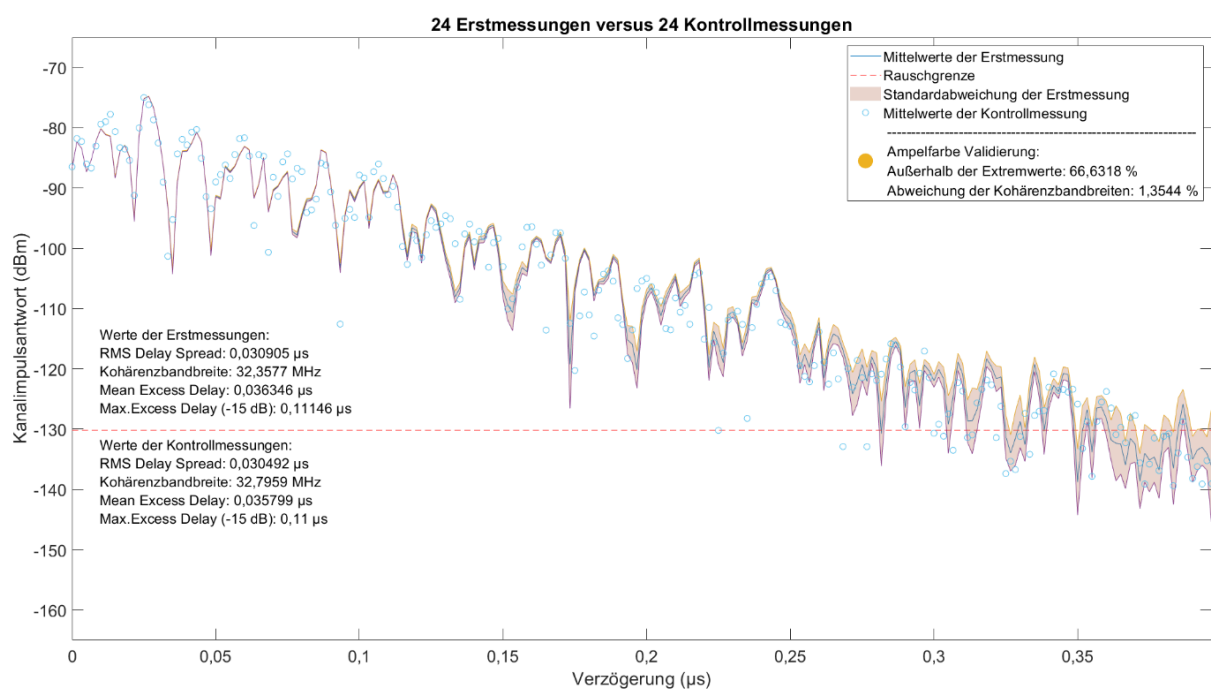


Abbildung 91: Validierung „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“ Kapitel 7.11

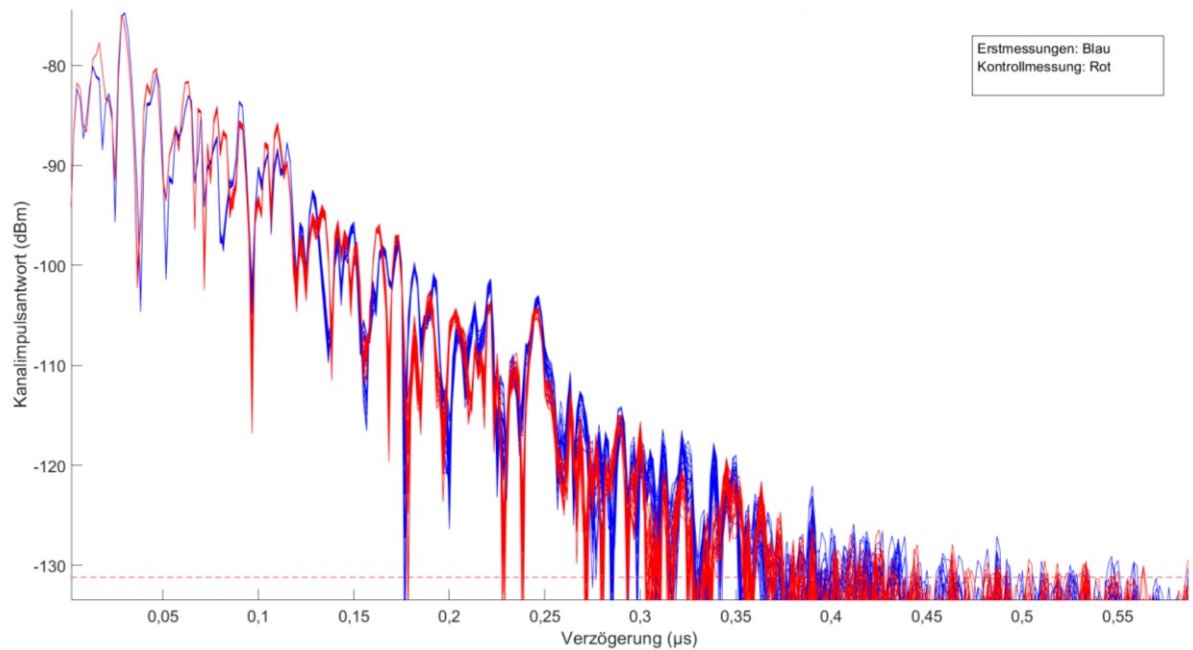


Abbildung 92: Alle Kanalimpulsantworten zu „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“

Abbildung 92 verdeutlicht den Umgebungseinfluss bei späteren Verzögerungszeitpunkten. Die ungewöhnlichen Anfangspfade können durch eine weitere, diesmal getriggerte, Kontrollmessung über 100 Kanalimpulsantworten bestätigt werden, was zusätzlich die Validität des Modells stützt, weiterhin aber das Ausbleiben der Sichtverbindung offenlässt. Hier muss von starker, destruktiver Mehrwegeinterferenz ausgegangen werden.

8.4 Validierung statischer Messungen

Das erste Modell der statischen Messungen „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“ wird mit einer orangen Ampel bewertet. Die Extremwertabweichungen liegen bei 15,71 %. In Abbildung 93 sind die Validierungsergebnisse beschrieben. Die Kontrollmessungsmittelwerte liegen gehäuft außerhalb der Standardabweichung der Erstmessung. In Abbildung 94 werden gezielt die Standardabweichungen der beiden Messreihen verglichen, um zu vermeiden, dass lediglich Ausreißer den Mittelwert derart beeinflussen. Die violette Einfärbung zeigt hierbei die Überlappung der beiden Standardabweichungsbereiche. Diese sind für ein statisches Szenario äußerst breit und unterscheiden sich bereits im Pfad der Sichtverbindung, was auf eine unerwartete Dynamik innerhalb des Wagenkastens schließen lässt. In der weiteren Analyse mit Wasserfalldiagrammen lassen sich zwei Hauptunterschiede in den Messungen identifizieren. Der erste ist ein weniger exakt definierter Sichtverbindungspfad in der Erstmessung als in der Kontrollmessung. Als Zweites sind in der Kontrollmessung deutliche Störungen zu erkennen

(ähnlich Abbildung 85). Das Modell wird daher nur aufgrund der übereinstimmenden Kohärenzbandbreiten als valide eingestuft und kann nur mit diesem Hinweis für Simulationen verwendet werden.

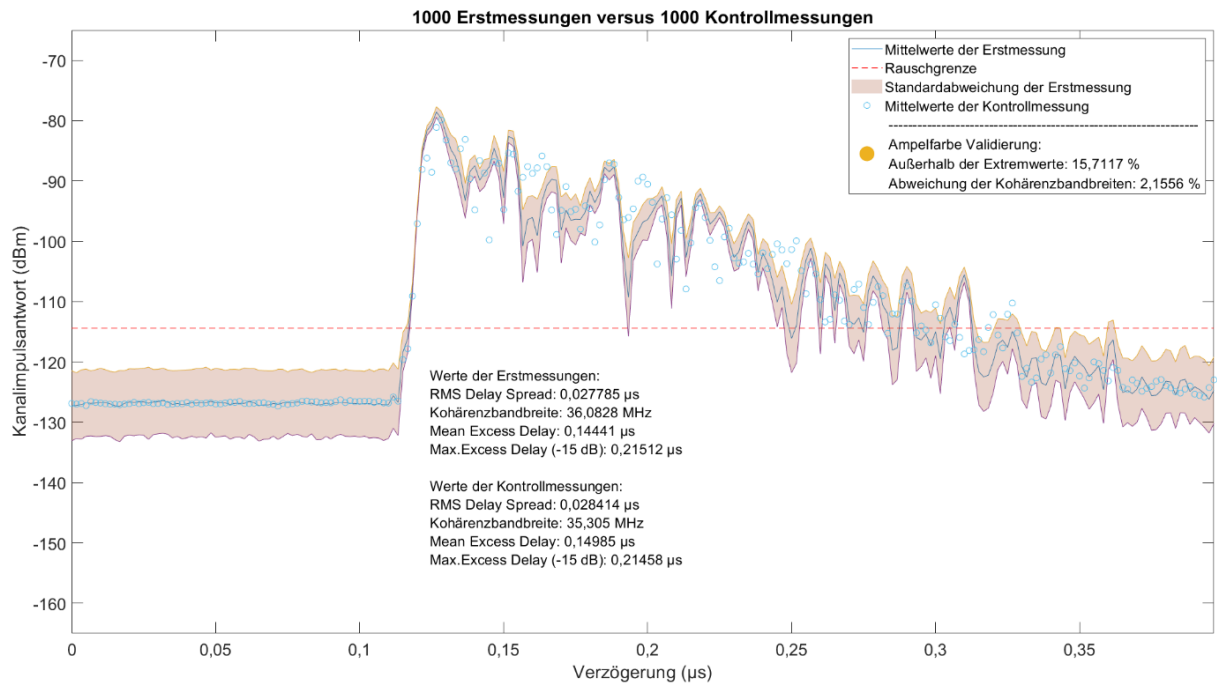


Abbildung 93: Validierung „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“ Kapitel 7.12

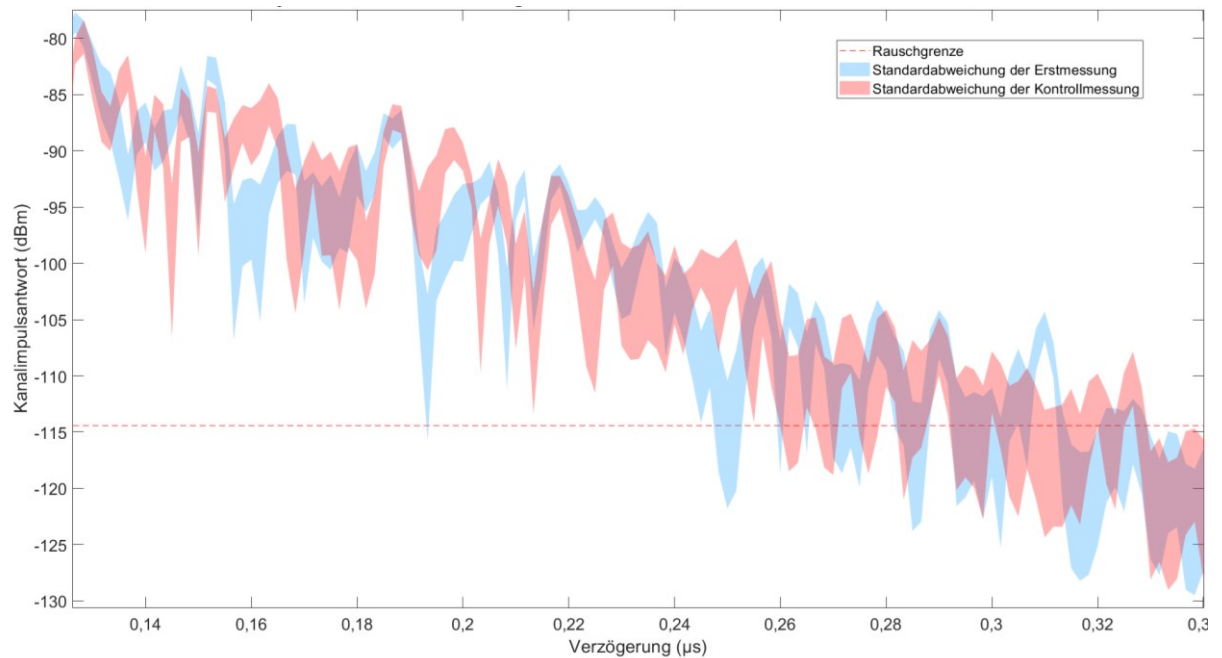


Abbildung 94: Standardabweichungen der Messreihen aus „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“

Die verbleibenden Validierungen der Modelle im Stillstand wurden jeweils mit einer grünen Ampel erfolgreich validiert. Die Resultate zeigen Abbildung 95, Abbildung 96 und Abbildung 97. Die geringen Standardabweichungen bestätigen die konstanten Bedingungen während der Messungen.

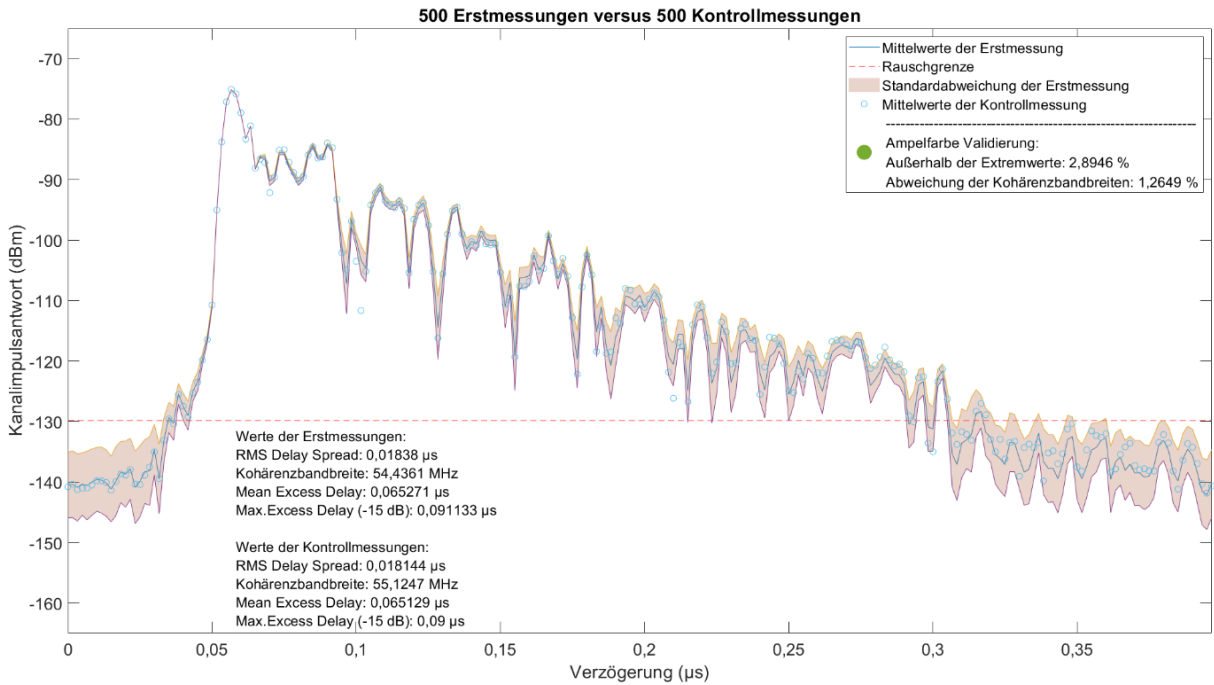


Abbildung 95: Validierung „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.13

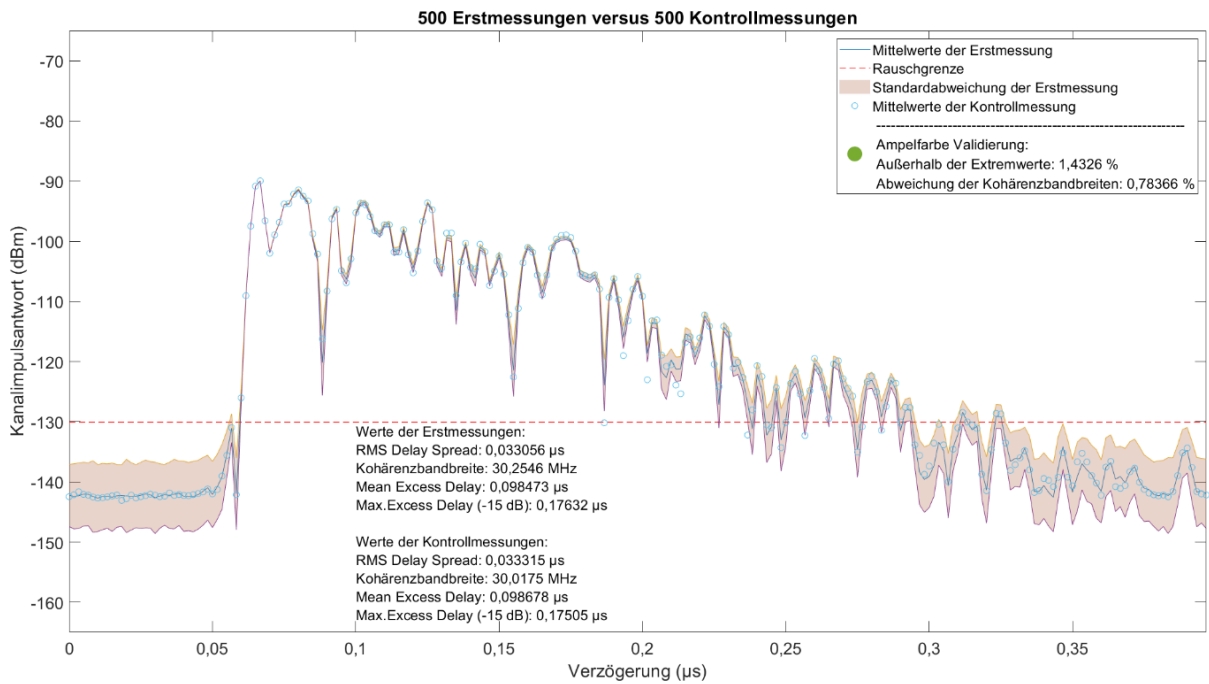


Abbildung 96: Validierung „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“ Kapitel 7.14

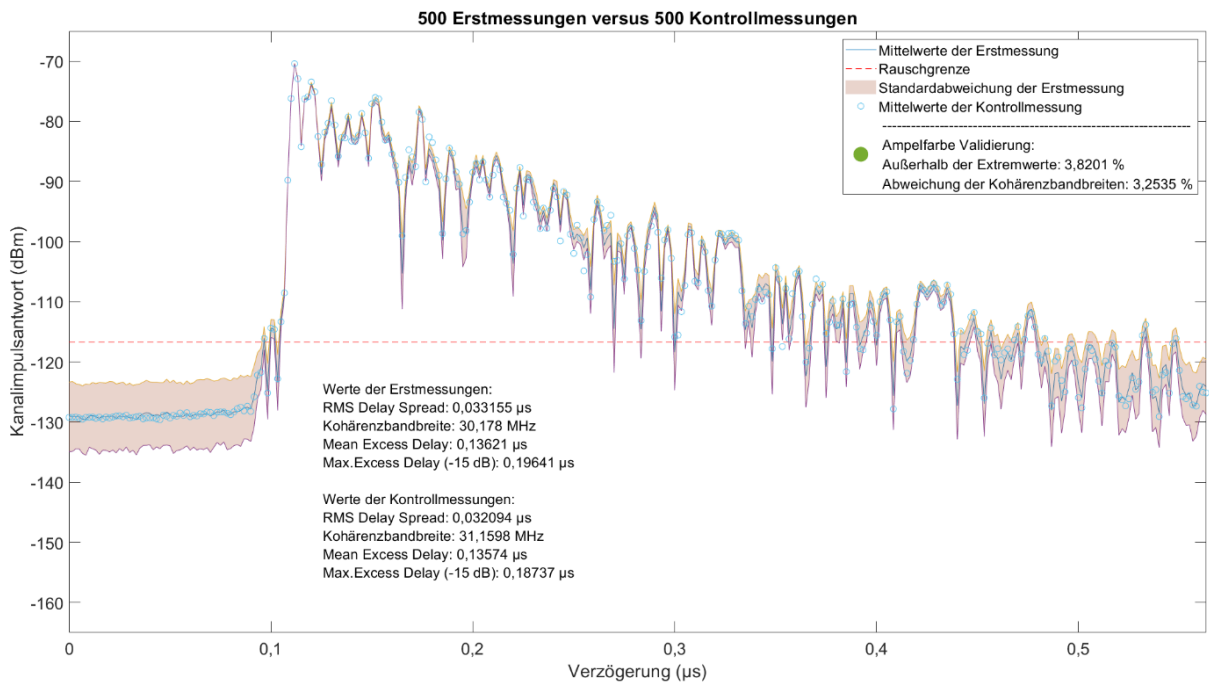


Abbildung 97: Validierung „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.15

8.5 Simulationen mit Hilfe der entwickelten Modelle und Vergleich der Ergebnisse

Die erarbeiteten und validierten Modelle lassen sich in vorhandene Simulationsframeworks einbinden, wie beispielhaft in diesem Kapitel in jenes von [96]. Es wird eine OFDM-Übertragung mit folgenden Parametern simuliert und dient als Nachweis der praktischen Einsatzfähigkeit:

- Anzahl Subträger: 24
- Subträgerabstand: 15 kHz
- Modulation: 1024 QAM
- Anzahl der Wiederholungen der Monte Carlo Simulation: 400

Die Anzahl der Monte Carlo Simulationen ist hierbei ein Kompromiss aus Simulationszeit und Abweichung des Simulationsergebnisses von der theoretischen Wahrscheinlichkeit. Praktisch bedeutet dies für die genannten Parameter, dass die simulierte Bitfehlerrate um ca. 0,1 % bei zwei Simulationsdurchläufen von je 400 Monte Carlo Simulationen mit denselben Parametern voneinander abweichen kann. Grundlage hierfür ist das Gesetz der Großen Zahlen. [97]

Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, werden die Modelle TDL-A bis -E zum Vergleich simuliert. Nach der Validierung und der Analyse der selbst erarbeiteten Modelle sind von fünfzehn erstellten Modellen dreizehn für den Simulationseinsatz geeignet. Lediglich Szenario „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ und „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“ konnten nicht durch Kontrollmessungen bestätigt werden. Die Simulationen werden frequenzspezifisch durchgeführt. Damit ergeben sich Ergebnisse für 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz. Zudem werden Simulationen mit und ohne Sichtverbindung unterschieden. Alle Simulationsergebnisse zeigen einen Verlauf der Bitfehlerrate über dem Signal-Rausch-Verhältnis in dB.

Ein Hauptkritikpunkt an den vorhandenen Kanalmodellen aus [94] ist die Notwendigkeit der Parametrierung, die zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Das verdeutlicht Abbildung 98.

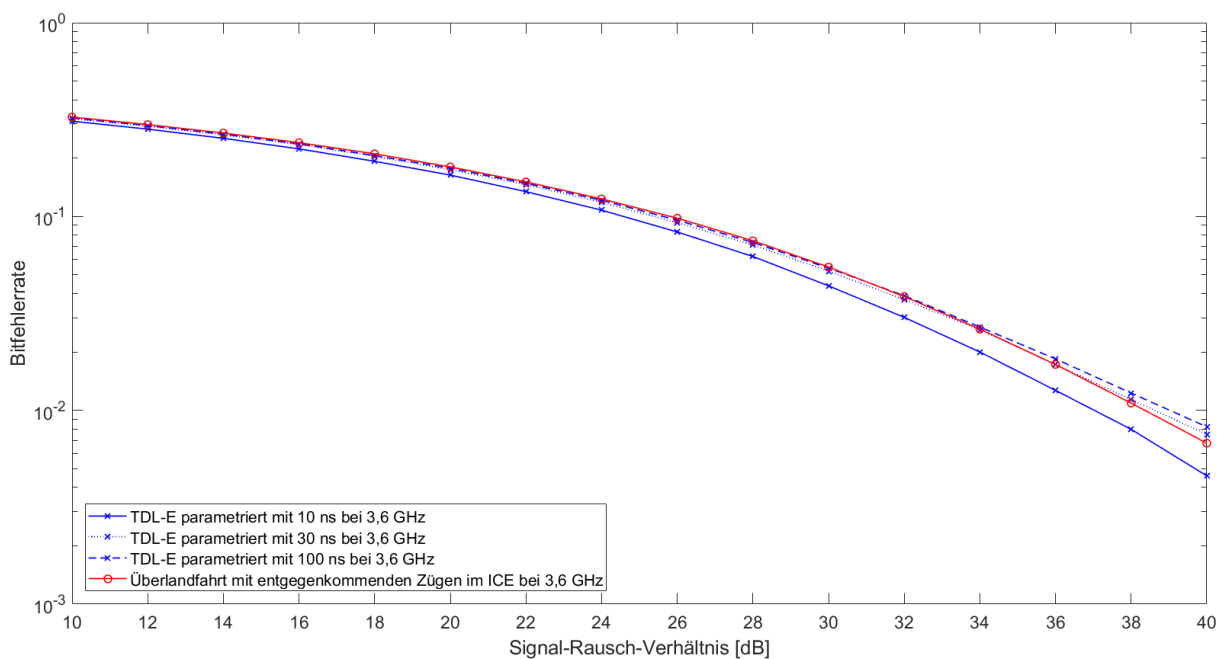


Abbildung 98: TDL-E parametrierung versus „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“

Am Beispiel des Kanalmodells TDL-E sieht man Simulationen mit den empfohlenen Laufzeitspreizungen 10 ns, 30 ns und 100 ns. Die Ergebnisse liegen abhängig vom SNR um mehrere Fehlerprozentpunkte voneinander entfernt, was in Bezug auf die Bewertung von sicherheitsgerichteten Funktionen kritisch ist. Durch die Erkenntnisse einer Kanalcharakterisierung kann die Parametrierung optimiert werden, doch auch an dieser Stelle existieren Herausforderungen, die den Einsatz unpraktikabel erscheinen lassen. Wählt mal beispielsweise für die Repräsentation des Szenarios „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“ das Kanalmodell TDL-E mit der Parametrierung 30 ns, so liegt man bei einem SNR von 40 dB ca. 0,1 Fehlerprozentpunkte neben dem hier erarbeiteten Modellergebnis. Bei anderen SNR sind durchaus Abweichungen von 0,5 Fehlerprozentpunkten zu beobachten und

die Parametrierung mit 100 ns des Modells scheinen besser an das Szenario angepasst zu sein. Diese Änderung der Parametrierung für unterschiedliche SNR erscheint aufwendig, unpraktikabel und für unbekannte Szenarien fast unmöglich. Da die Laufzeitspreizungen der untersuchten Szenarien durch diese Arbeit alle bekannt sind und aufgrund der übergreifenden Vergleichbarkeit, ist die naheliegendste Parametrierung für weitere Simulationen und für alle TDL-Modelle die Laufzeitspreizung 30 ns.

Beginnend mit dem Szenario „Überlandfahrt im Regionalzug bei 3,6 GHz“ wird ein Vergleich mit Kanalmodellen ohne Sichtverbindung in Abbildung 99 gezeigt.

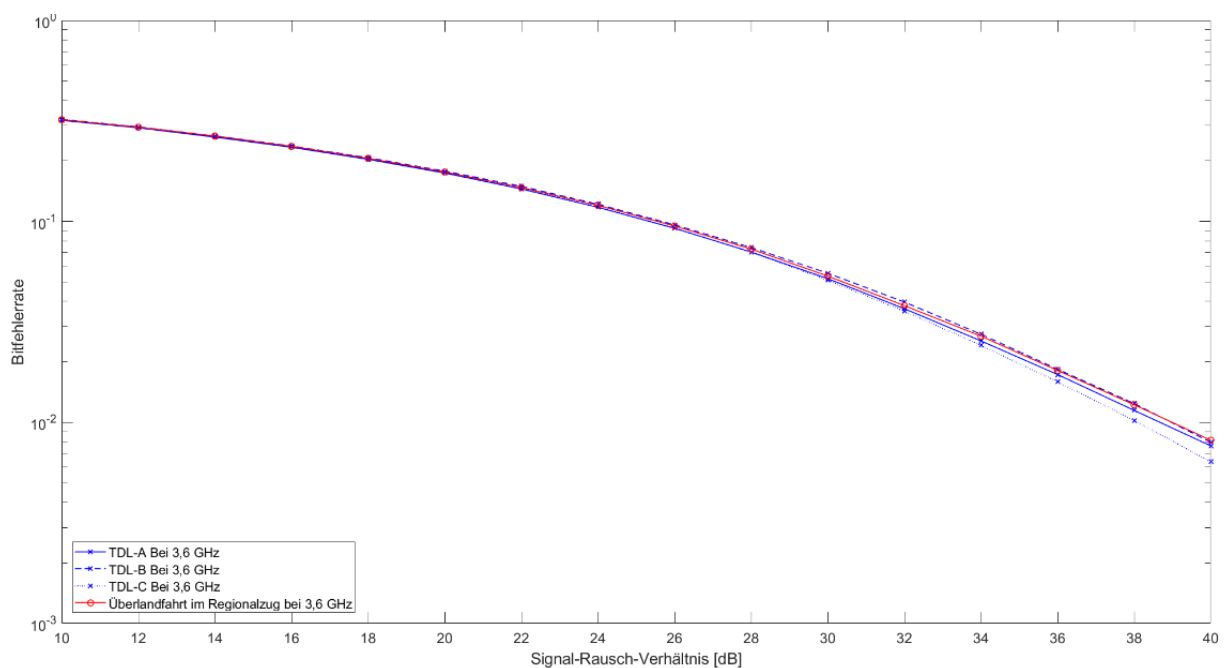


Abbildung 99: Simulationsergebnis des Szenarios bei 3,6 GHz und ohne Sichtverbindung

Die Simulation liefert bei einem SNR von 10 dB eine Fehlerrate von 32,06 % und bei einem SNR von 40 dB 0,81 %. Insbesondere im Vergleich mit TDL-C ergeben sich relative Abweichungen von bis zu 24,55 % der Bitfehlerraten. Außerdem ist auffällig, dass der Fehlerverlauf des selbsterstellten Modells den von TDL-B kreuzt. Das zweite Simulationsergebnis eines Modells ohne Sichtverbindung ist „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei 5,6 GHz ohne Sichtverbindung“, welches Abbildung 100 visualisiert. Der Fehlerverlauf liegt kontinuierlich zwischen dem Simulationsergebnis von TDL-C und TDL-A. Zu TDL-B lassen sich relative Abweichungen von bis zu 17,20 % der Bitfehlerraten feststellen.

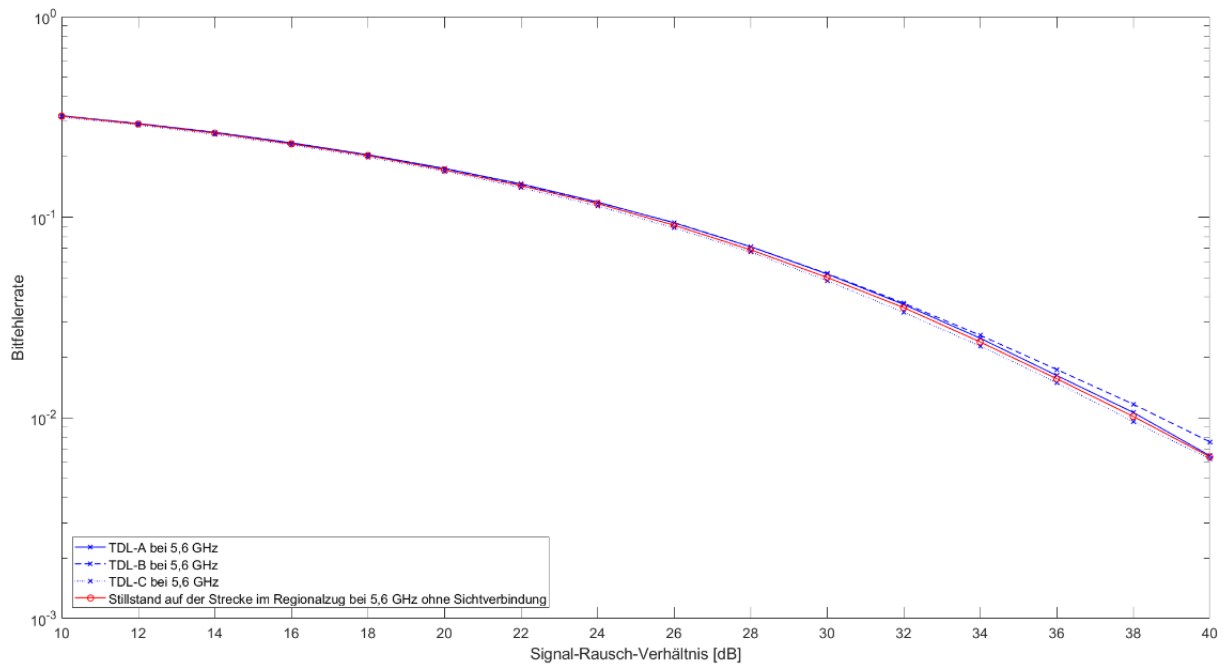


Abbildung 100: Simulationsergebnis des Szenarios bei 5,6 GHz und ohne Sichtverbindung

Folgend mit Szenarien bei 2,7 GHz mit Sichtverbindung werden in Abbildung 101 die Simulationsergebnisse präsentiert.

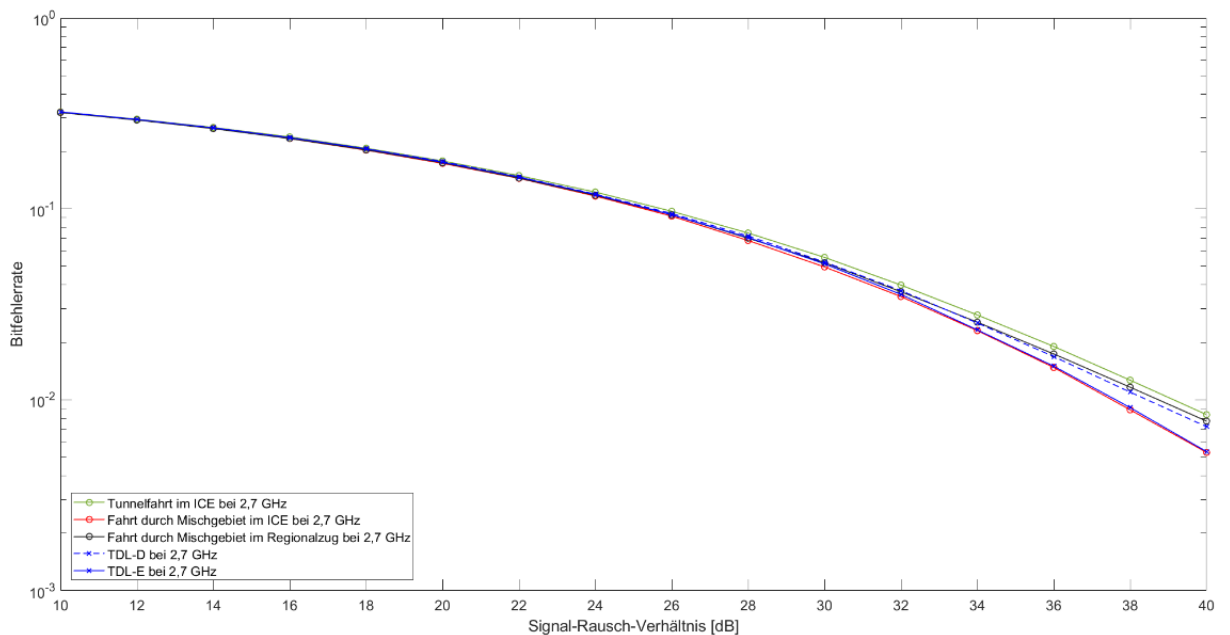


Abbildung 101: Simulationsergebnisse der Szenarien bei 2,7 GHz mit Sichtverbindung

Die drei Modelle werden den Simulationsergebnissen von TDL-D und TDL-E gegenübergestellt. Hier verdeutlicht sich die Notwendigkeit individueller Modelle. Die Bitfehlerrate von „Tunnelfahrt im ICE bei 2,7 GHz“ liegt durchgängig in dieser Grafik am höchsten. Im Direktvergleich mit TDL-E bedeutet das eine

relative Abweichung der Bitfehlerrate um bis zu 43,88 %. TDL-D zeigt hingegen eine bessere Anpassung mit maximal 14,53 %. Eine gute Deckung der Fehlerraten existiert hingegen bei „Fahrt durch Mischgebiet im ICE bei 2,7 GHz“. Zudem liegen „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 2,7 GHz“ und TDL-D mit einer relativen Fehlerratenabweichung von maximal 6,71 % benachbart.

Die Simulationsergebnisse der Szenarien bei 3,6 GHz mit Sichtverbindung werden in Abbildung 102 präsentiert.

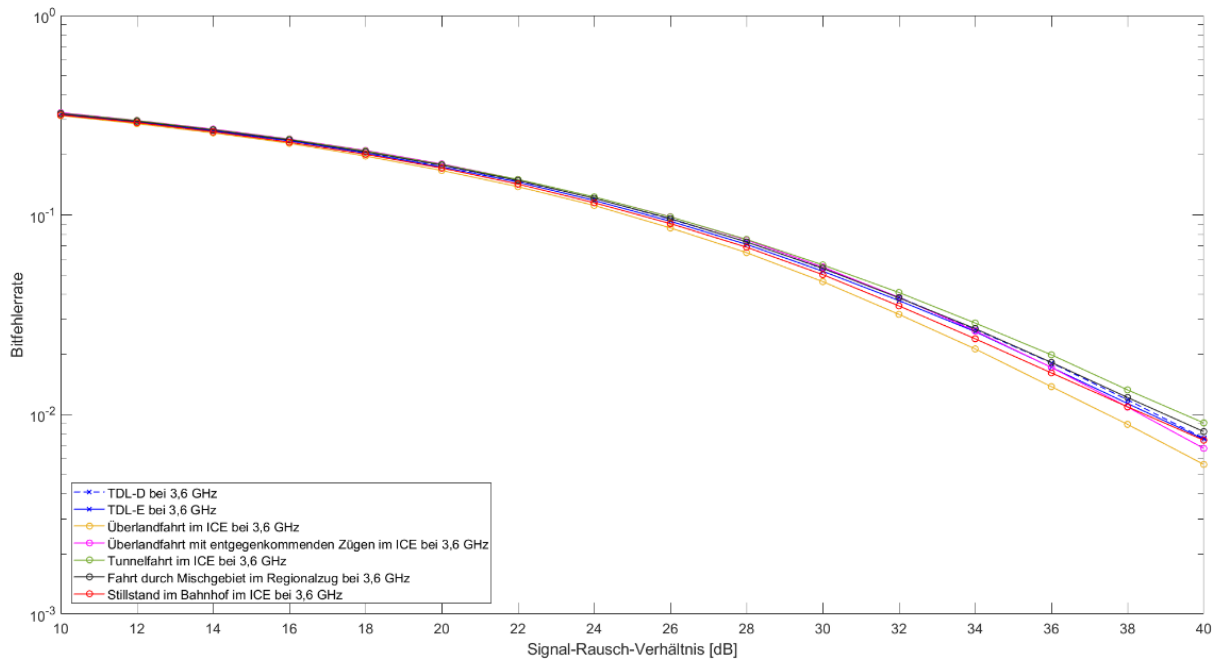


Abbildung 102: Simulationsergebnisse der Szenarien bei 3,6 GHz mit Sichtverbindung

Es decken sich TDL-D und TDL-E im Fehlerverlauf hochgradig, weshalb Abweichungen nur mit TDL-D berechnet werden. So vielfältig wie die Szenarien sind, so unterschiedlich sind auch die maximalen relativen Abweichungen von TDL-D. Somit existiert mit „Stillstand im Bahnhof im ICE bei 3,6 GHz“ ein niedriger Wert von 2,22 %, mit „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 3,6 GHz“ einer von 7,92 %, mit „Überlandfahrt mit entgegenkommendem Zug im ICE bei 3,6 GHz“ einer von 11,05 %, mit „Tunnelfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ einer von 19,35 % und mit „Überlandfahrt im ICE bei 3,6 GHz“ der höchste mit 26,11 %.

Zuletzt werden die Simulationsergebnisse der Szenarien bei 5,6 GHz mit Sichtverbindung aus Abbildung 103 diskutiert. Ebenso wie bei 3,6 GHz wird auch bei 5,6 GHz aufgrund der Übereinstimmung der Vergleichsmodelle nur der Unterschied zu TDL-D analysiert. Es ergeben sich für die validierten Modelle folgende maximale, relative Bitfehlerratendifferenzen zu dem Resultat von TDL-D: Für „Stillstand im Depot in einer U-Bahn bei 5,6 GHz“ sind das 7,03 %, für „Stillstand auf der Strecke im Regionalzug bei

5,6 GHz“ 19,93 % und für „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ 27,75 %. Die Ergebnisse der negativ validierten Modelle wären bei 9,18 % für das Szenario „Fahrt durch Mischgebiet im Regionalzug bei 5,6 GHz“ und bei 32,16 % für „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“.

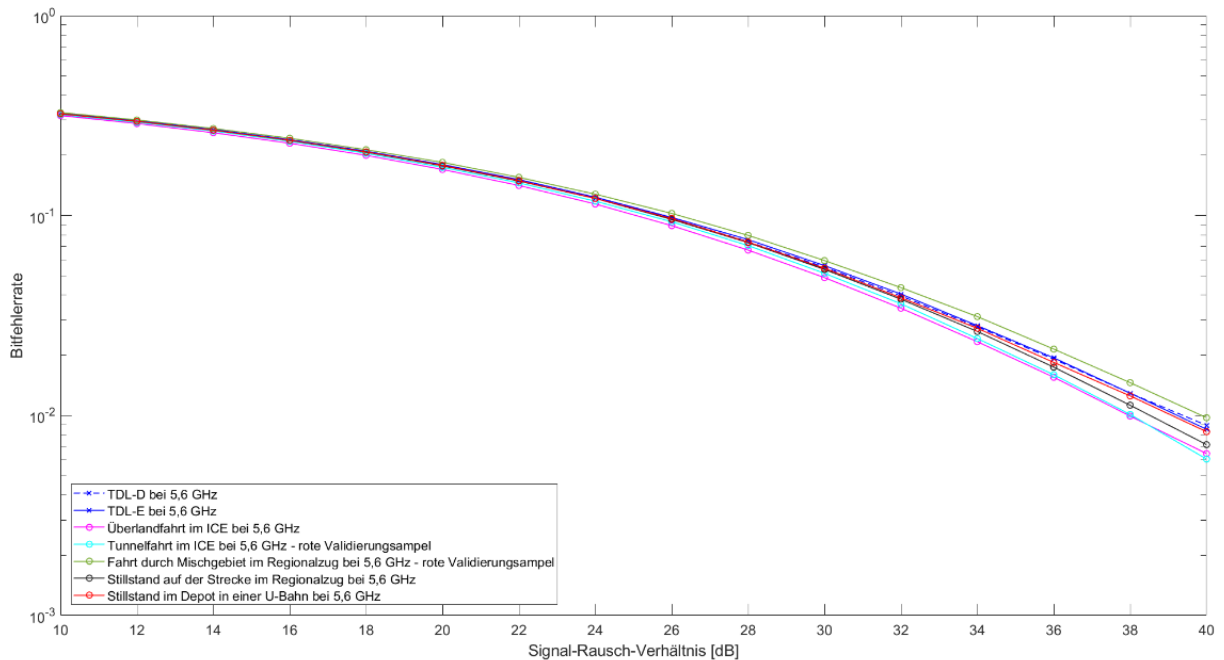


Abbildung 103: Simulationsergebnisse der Szenarien bei 5,6 GHz mit Sichtverbindung

Bei der Analyse der Simulationsergebnisse (nur die 13 positiv validierten) werden für die SNRs von 10 dB, 20 dB, 30 dB und 40 dB die statistischen Werte ermittelt (siehe Tabelle 9). Die Mittelwerte der Bitfehlerrate entsprechen dem erwarteten Verlauf, denn diese nimmt mit steigendem SNR ab. Die maximale absolute Abweichung zwischen den Szenarien für die Signal- Rausch-Verhältnisse 10 dB, 20 dB und 30 dB liegen in der gleichen Größenordnung, wohingegen dieser Wert für 40 dB bei niedrigen 0,38 % liegt. Setzt man diese Erkenntnisse aber in Relation zu den jeweiligen Mittelwerten, so steigen diese relativen Abweichungen mit wachsendem SNR massiv an.

Bezeichnung	SNR 10 dB	SNR 20 dB	SNR 30 dB	SNR 40 dB
Mittelwert der Bitfehlerraten	32,06 %	17,51 %	5,23 %	0,73 %
Maximale absolute Abweichung der Bitfehlerraten	1,13 %	1,31 %	0,98 %	0,38 %
Maximale relative Abweichung der Bitfehlerraten	3,52 %	7,48 %	18,81 %	51,63 %

Tabelle 9: Statistische Werte über alle Simulationsergebnisse zu ausgewählten Signal- Rausch-Verhältnissen

Das heißt, dass sich nur durch den Wechsel des Szenarios die Bitfehlerrate nahezu verdoppelt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Eigenheiten und die individuellen Szenariobedingungen in dem hier

untersuchten Bereich der Zug-Onboard-Kommunikation besonders massiv bei sehr guten Signal-Rausch-Verhältnissen in Form von stark abweichenden Bitfehlerraten manifestieren. Abbildung 104 zeigt sowohl die Bitfehlerraten als auch die Kohärenzbandbreiten der Szenarien. Es zeigt sich ein deutlicher Trend in den Daten. Mit steigender Kohärenzbandbreite sinkt die Bitfehlerrate. Dies kann jedoch nur bei einem SNR von 40 dB beobachtet werden. Aus den Daten der anderen Signal-Rausch-Verhältnisse, ist kein Zusammenhang ableitbar.

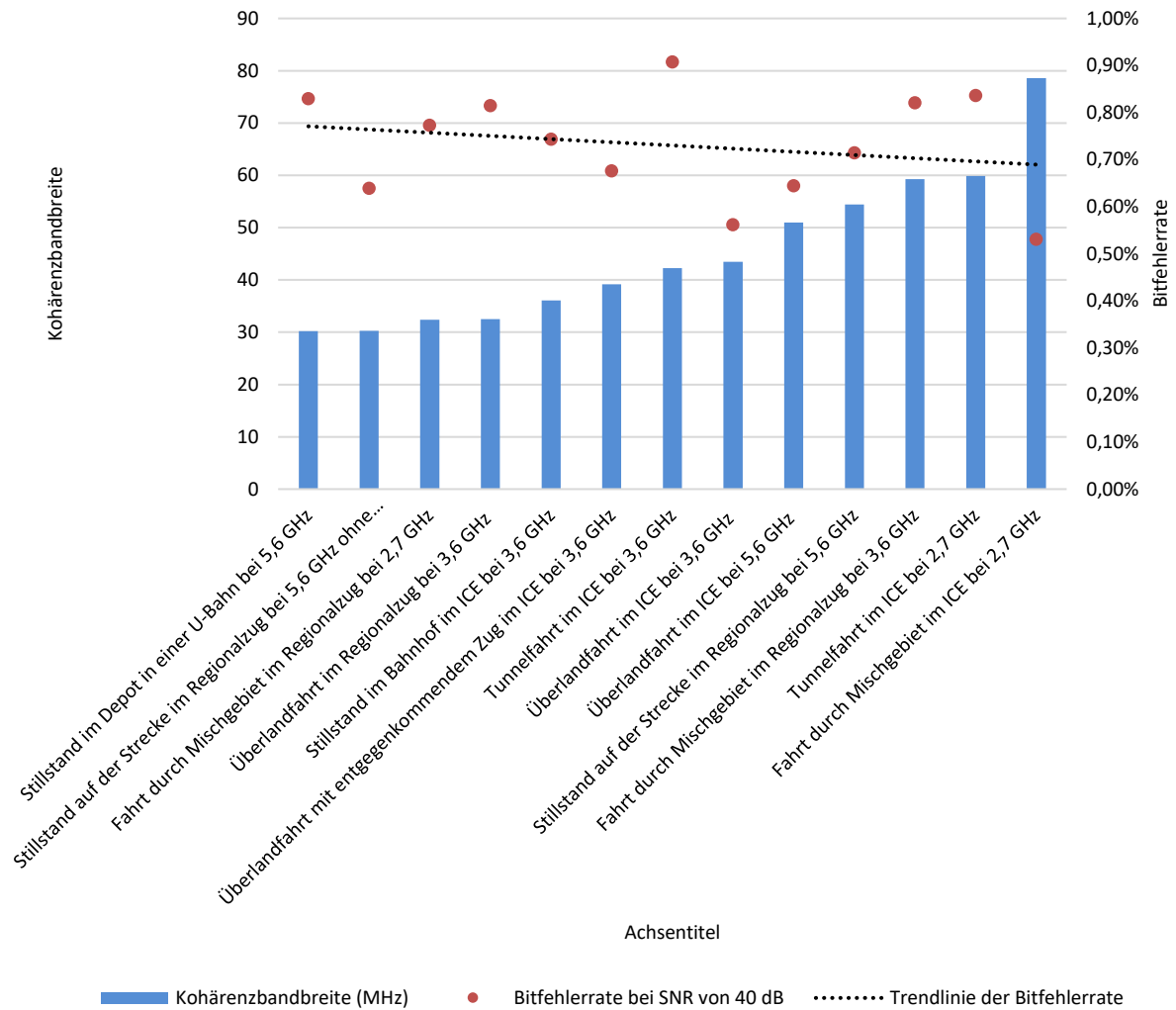


Abbildung 104: Zusammenhang der Kohärenzbandbreite und der Bitfehlerrate über alle 13 Szenarien

9 Diskussion

Wie zu Beginn dieser Arbeit dargelegt existiert im Bereich der drahtlosen Zugkommunikation ein klarer Mangel von validen Onboard-Kanalmodellen. Diese sind dringend notwendig, um vernetzte Systeme für Züge auszulegen, zu erproben und letzten Endes auch in den Regelbetrieb zu integrieren. Durch die sorgfältige Planung von Messkampagnen auf Basis der identifizierten Forschungslücke können wertvolle Daten aus dem Testbetrieb und dem operativen Schienenverkehr für unterschiedliche Zugtypen und Umgebungsszenarien gewonnen werden. Auf dieser Datenbasis lassen sich Effekte und Auswirkungen identifizieren. Als erste Auffälligkeit ist an dieser Stelle der Dopplereffekt zu benennen. Dieser kann durch Frequenzanalyse der Messdaten vereinzelt identifiziert werden. In Abbildung 105 sind Frequenzverschiebungen von ca. 400 Hz und 300 Hz während einer Fahrt im ICE bei 300 km/h ersichtlich. Die Magnituden sind im relativen Vergleich deutlich reduziert, was die Theorie bezüglich Reflexionen außerhalb des Wagenkastens an der Infrastruktur bestärkt (siehe Kapitel 2.2). Diese Frequenzveränderung resultiert nicht aus einer Relativbewegung von Sender- und Empfänger, sondern wird durch Reflexion an stillstehenden Objekten verursacht, während das Kommunikationssystem mit dem Zug in Bewegung ist. Die unterschiedlichen Reflexionswinkel führen dabei zu unterschiedlichen Dopplerverschiebungen.

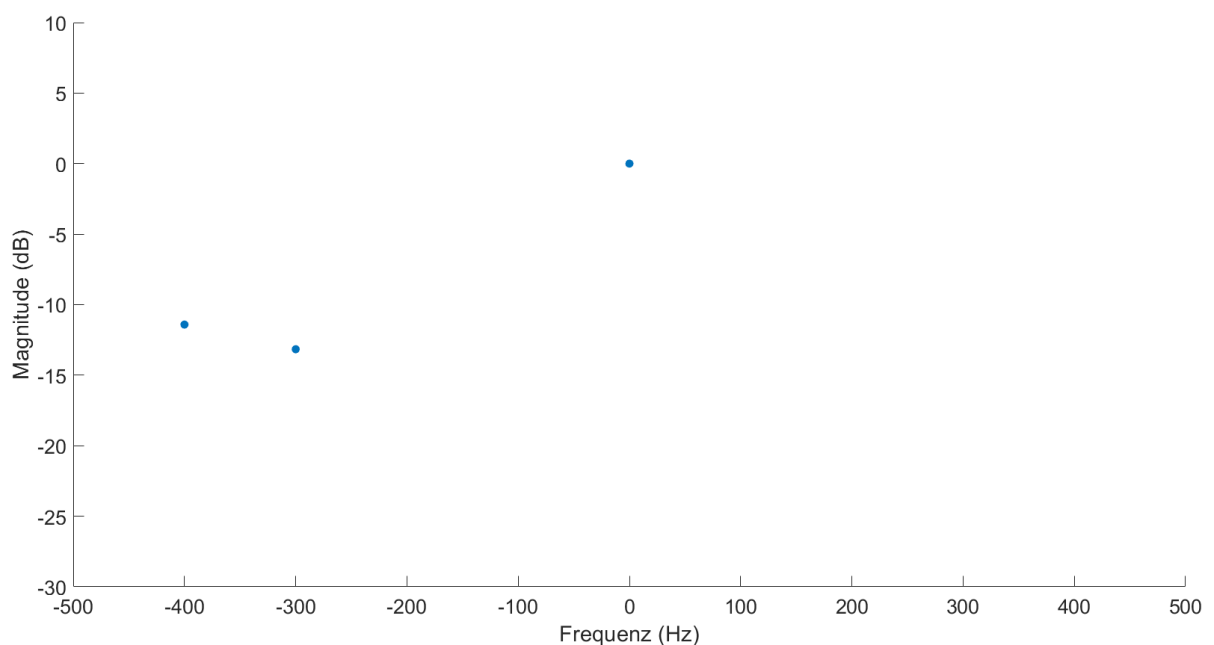


Abbildung 105: Dopplerverschiebung bei einer Messung auf dem ICE bei 5,6 GHz

In allen untersuchten Szenarien sind aufgrund von Reflexionen Mehrwegepfade erkennbar. Die erfassten Kanalimpulsantworten lassen sich auf drei grobe Cluster aufteilen, wie es Abbildung 106 darstellt. Neben klassischem Rician Fading links und Rayleigh Fading rechts, existiert eine Mischung der beiden Arten. Bemerkenswert ist bei dieser, dass es einen oder mehrere Mehrwegepfade gibt, die auf dem ähnlichen Leistungsniveau der Sichtverbindung auftreten. Reflexion und konstruktive Interferenz prägen an dieser Stelle den Kanal maßgebend. Ändert sich zudem die Umgebung permanent, ist das in der Standardabweichung der Kanalimpulsantworten einer Messreihe erkennbar. In Abbildung 79: Validierung „Überlandfahrt im ICE bei 5,6 GHz“ Kapitel 7.3 ist diese vergleichsweise groß. Reflexionen finden außerhalb des Wagenkastens an den unterschiedlichsten Objekten der Infrastruktur statt, entsprechend wechseln Reflexionswinkeln und damit Interferenzbedingungen. Es zeigt sich ein typisches Bild für schnellen Schwund. Ursächlich für die Wellenausbreitungseffekte und damit auch für reduzierte Kohärenzbandbreiten sind zum einen die Relativbewegung zwischen Zug und Zugumgebung und zum anderen die verschiedenen Ausprägungen der Zugumgebung selbst.

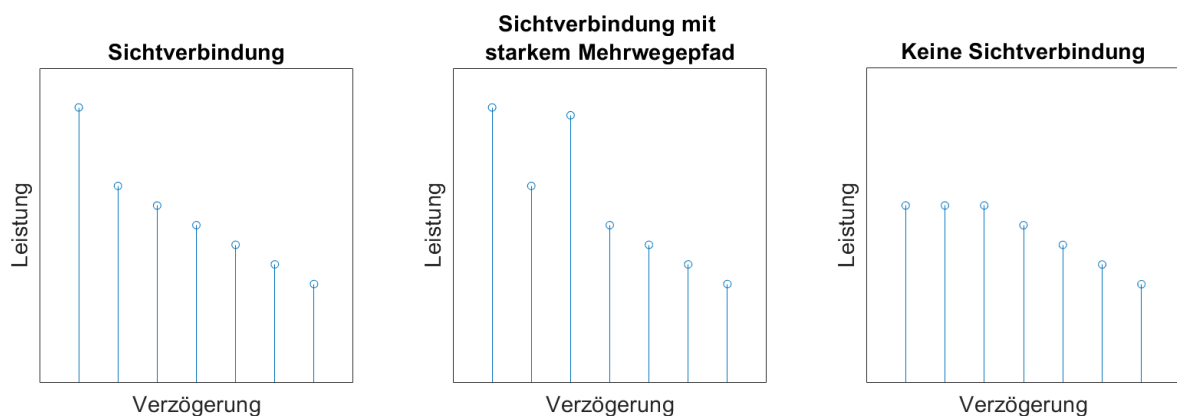


Abbildung 106: Drei Grobausprägungen von Kanalimpulsantworten

Neben den bereits veröffentlichten Erkenntnissen aus Kapitel 3 zum negativen Einfluss der Geschwindigkeit auf die Fehlerrate, zeigt Kapitel 6.2 eine Reduktion der Kohärenzbandbreite bei 200 km/h um ca. 29 MHz und bei 300 km/h um ca. 42 MHz im Vergleich zum Stillstand. Zudem wurden bei 2,45 GHz Kommunikationsmessungen durchgeführt (siehe [82]), die diese Feststellung zusätzlich stärken. Die Geschwindigkeit wird immer als isoliertes Untersuchungskriterium herangezogen. Andere Randbedingungen sind nicht geändert worden.

Für die Betrachtung des Einflusses der verschiedenen Zugumgebungen werden alle Messungen bei 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz statistisch ausgewertet. Insgesamt liegen hier 195 Messreihen vor. Die Gesamtheit der Messungen ist dabei nicht normalverteilt (Kolmogorov-Smirnov mit $p=0,003$) in Bezug auf die ermittelten Kohärenzbandbreiten. Dies hat zur Folge, dass für den Hypothesentest

nichtparametrische Tests verwendet werden müssen. Grafisch ist die Abweichung von der Normalverteilung in Abbildung 107 dargestellt. Die Nullhypothese ist somit: „Es gibt keinen Unterschied zwischen den 4 Kategorien der unabhängigen Variable Zugumgebung in Bezug auf die abhängige Variable Kohärenzbandbreite.“ Der Kruskal-Wallis Test zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Kategorien der unabhängigen Variable Zugumgebung in Bezug auf die abhängige Variable Kohärenzbandbreite gibt ($p = < 0,001$ und $\text{Chi}^2 = 23,77$, 3 Freiheitsgrade). Mit diesem Ergebnis wird die Nullhypothese abgelehnt und verdeutlicht, dass die Zugumgebung auf die Kohärenzbandbreite einen nachweisbaren, signifikanten Einfluss hat. [86]

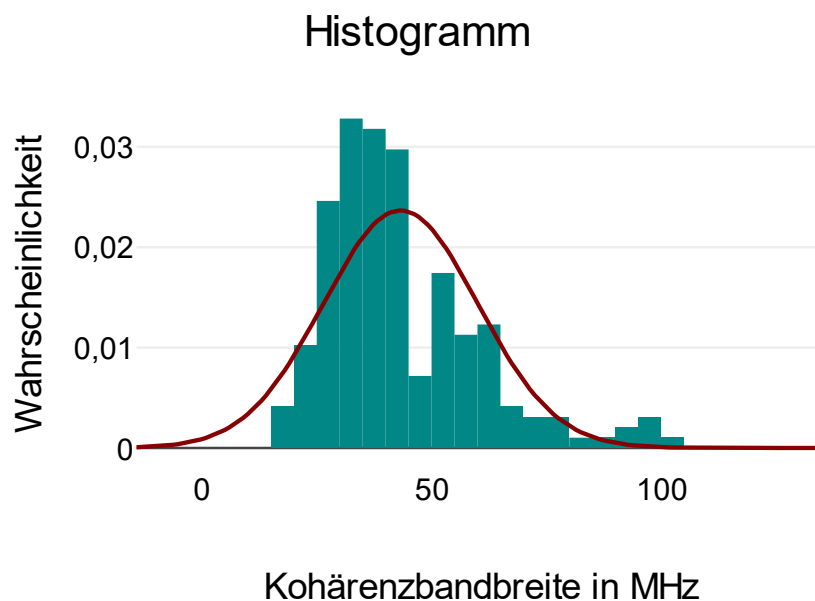


Abbildung 107: Verteilung der 195 Messreihen bezüglich der gemittelten Kohärenzbandbreiten

Die Übersicht der Messreihen ist in Tabelle 10 ersichtlich und in Abbildung 108 visualisiert. Auffällig sind die hohen Standardabweichungen bei Fahrten durch Mischgebiet und niedrige bei Tunnelfahrten. Dies ist auf die Homogenität der Umgebungen zurückzuführen. Während sich bei Fahrten durch Mischgebiet die Umgebung immer wieder verändert, so bleibt die Zugumgebung bei Tunnelfahrten kontinuierlich reflektiv. Auch die Abstände und Reflexionswinkel bleiben bei Tunnelfahrt quasi konstant. Dies bedingt dann gleichbleibende Mehrwegeeffekte außerhalb des Wagenkastens und führt in den Messungen zu kleineren Standardabweichungen. Ebenso kann das Ergebnis als frequenzselektiv interpretiert werden. Die Kohärenzbandbreiten liegen bei 3,6 GHz am niedrigsten, während die von 5,6 GHz am höchsten sind. Die statistische Auswertung bestätigt die Frequenzabhängigkeit ebenso als signifikant. Abbildung 108 verdeutlicht dies ebenso.

Zugumgebung	Frequenz in GHz	Anzahl der Messreihen	Mittelwert \pm Std. der Kohärenzbandbreite in MHz
Überland	5,6	4	54,31 \pm 6,20
	3,6	17	37,25 \pm 5,24
	2,7	4	50,24 \pm 9,93
Mischgebiet	5,6	32	47,00 \pm 14,56
	3,6	14	51,15 \pm 14,37
	2,7	16	53,13 \pm 24,81
Tunnel	5,6	4	59,16 \pm 8,05
	3,6	10	38,77 \pm 3,08
	2,7	3	53,30 \pm 5,71
Bahnhof/ Stillstand	5,6	43	45,97 \pm 20,41
	3,6	31	31,83 \pm 8,86
	2,7	17	33,12 \pm 15,94

Tabelle 10: Alle Messungen bei 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz mit den vier verschiedenen Zugumgebungen und deren ermittelter Kohärenzbandbreiten inklusive Standardabweichung

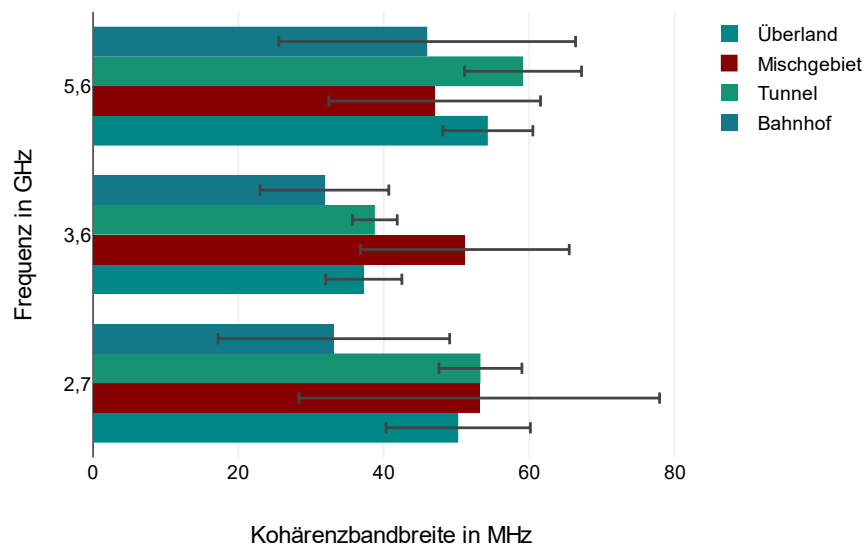


Abbildung 108: Alle Messungen bei 2,7 GHz, 3,6 GHz und 5,6 GHz mit den vier verschiedenen Zugumgebungen und deren ermittelter Kohärenzbandbreiten inklusive Standardabweichung

Die Abschattung der Sichtverbindung durch Passagiere im Zug ist ein weiterer Effekt, der zu der klassischen Kanalimpulsantwort in Abbildung 106 rechts führt. Hier kann durch Messungen aus Kapitel 6.2 zudem ein stark negativer Einfluss auf die Kohärenzbandbreite (ca. 18 MHz Reduktion) nachgewiesen werden. Zusätzlich zeigen auch die Messungen in Kapitel 6.3 eine reduzierte Kohärenzbandbreite, wenn Leute den Mittelgang betreten. Ebenso führen mit hoher Wahrscheinlichkeit Abschattungseffekte zur nicht Validierbarkeit von Szenario „Tunnelfahrt im ICE bei 5,6 GHz“. Rein statistisch gesehen wirkt sich die Abschattung in den Messreihen nur sehr gering auf die mittlere Kohärenzbandbreite aus und der Einfluss ist im Rahmen dieser Messungen statistisch nicht signifikant. Dies liegt zum einen an der Wahl der Sender- und Empfängerpositionen, die in manchen Szenarien so gewählt sind, dass auch bei stehenden Personen eine Sichtverbindung nicht unterbrochen wird, zum anderen sind deutlich weniger Messungen mit Personenbeeinflussung vorhanden (22 Messreihen), was dazu führen kann, dass ein Effekt zwar messbar ist, aber nicht als signifikant eingestuft werden kann. Schließlich lassen sich aus der Gesamtheit der Messdaten Regressionsmodelle ableiten, die wiederum den Einfluss der einzelnen Messparameter bewerten lassen. Hier bestätigt sich, dass fast alle Messparameter einen signifikanten Einfluss auf die Kohärenzbandbreite und damit die Kommunikationsperformanz haben. Tabelle 11 zeigt dies unter Aufführung der einzelnen Parameterausprägungen der hier ausgewerteten Messungen.

Parameter/ Randbedingung in 195 Messreihen	Prozentualer Einfluss des Parameters auf die Varianz der Kohärenzbandbreite
Frequenz (2,7 GHz, 3,6 GHz, 5,6 GHz)	6,49 %
Abstand Sender-Empfänger (Zwischen 3 m und 38 m)	6,31 %
Menschen (ja, nein)	Nicht signifikant
Zugumgebung (Überland, Tunnel, Mischgebiet, Bahnhof)	8,03 %
Zuggeschwindigkeit (0 km/h-330 km/h)	2,71 %
Zugtyp (ICE, U-Bahn, Regionalzug)	8,33 %

Tabelle 11: Einflussstärke der einzelnen Parameter auf die Varianz der Kohärenzbandbreite

Aus den Messungen diverser Szenarien lassen sich Kanalmodelle ableiten, die für Simulationen im Sub-6-GHz-Frequenzbereich verwendet werden können (siehe Kapitel 8). Diese Arbeit verzichtet bewusst auf den Anspruch der Allgemeingültigkeit der Modelle, sondern fokussiert besonders relevante Kommunikationskonstellationen, die bisher durch kein etabliertes Kanalmodell abgedeckt werden können. Limitiert ist die Gültigkeit der Modelle durch die Frequenzen bei der Kanalvermessung aber auch in Bezug auf die Höchstgeschwindigkeit in den Hochgeschwindigkeitsmodellen. Hier war aufgrund der Rahmenbedingungen keine Geschwindigkeit bei der Kanalmessung über 330 km/h möglich. Es gilt jedoch zu bedenken, dass sich der Großteil des europäischen Hochgeschwindigkeitsverkehrs zwischen 200 km/h und 300 km/h bewegt. Viele Strecken, die 350 km/h und höher auf der Schiene ermöglichen, sind aktuell noch im Bau. Ebenso existieren lediglich zwei andere Züge weltweit, die im Regelbetrieb schneller fahren als der ICE. Dies ist der CR400 (350 km/h) und der Shanghai Maglev (460 km/h) aus China (siehe hierzu Abbildung 109).

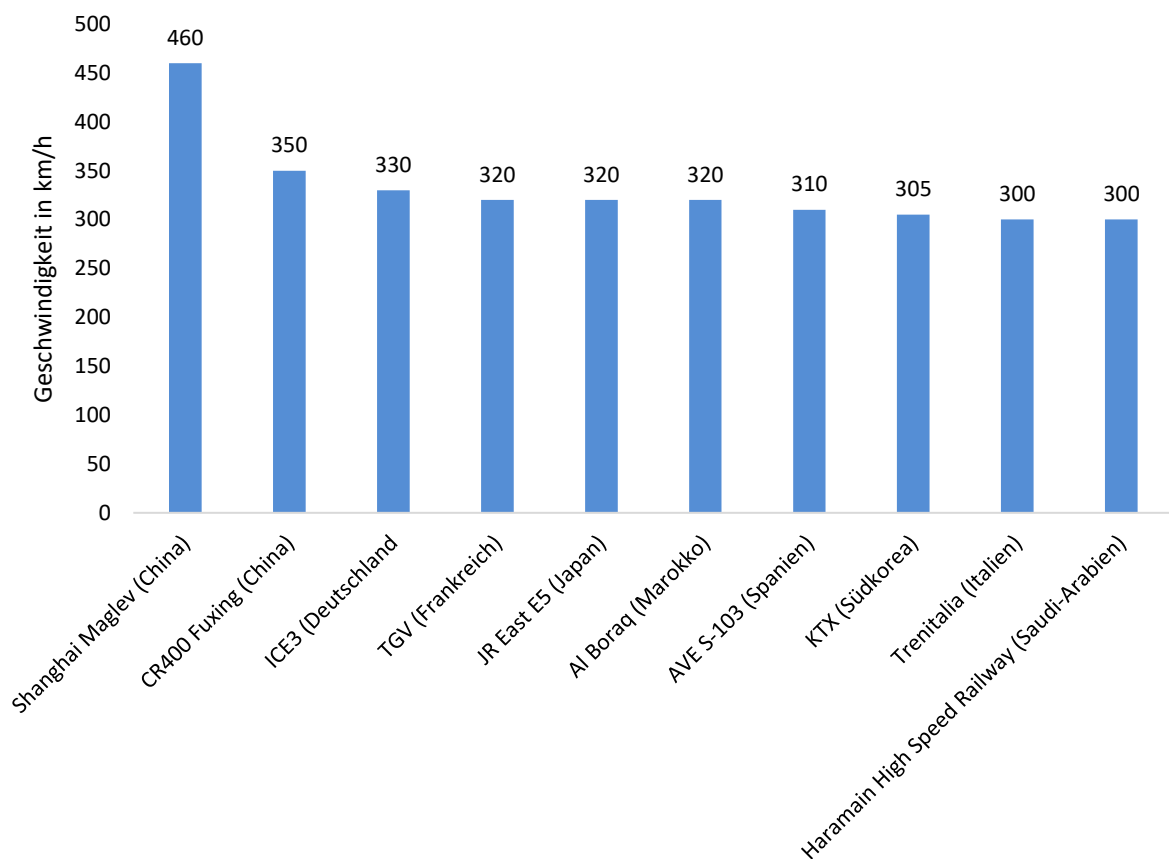


Abbildung 109: Maximal gefahrene Geschwindigkeit der schnellsten Züge der Welt (in Kilometer pro Stunde; Stand Dezember 2021 [98])

Die Validität der Modelle wird durch erneute Messungen und Vergleich mit diesen sichergestellt. Simulationen und auch damit mögliche falsche Vereinfachungen werden nicht eingesetzt. Die

Simulationsergebnisse aus Kapitel 8.5 zeigen Abweichungen zwischen hier abgeleiteten Modellen und den etablierten TDL-Modellen. Es zeigen sich die bahnspezifischen Einflussparameter deutlich, insbesondere der Zugtyp und die Zugumgebung. Des Weiteren können mit den vorhandenen Modellen nur gute Näherungen für spezifische Szenarien erfolgen, wenn durch Kanalmessungen die Verzögerungen bekannt sind. Damit ist allein die Anzahl der Kanalmessungen bei der hohen Varianz an Parametern ein Alleinstellungsmerkmal dieser Dissertation in der Literatur. Jedoch werden darüber hinaus die Simulationsergebnisse in einen sicherheitskritischen Kontext gesetzt. Als Basis dienen hierfür die Mittelwerte aus der bereits eingeführten Tabelle 9, die aus den durchgeführten Simulationen Bitfehlerraten von

32,06 %, 17,51 %, 5,23 % und 0,73 % zeigt. Die Simulationen liegen ohne Fehlerkorrekturmaßnahmen vor. Das bedeutet, dass es noch weiteres Potenzial gibt wie beispielsweise in [13] aufgezeigt, um diese Werte in der Praxis zu reduzieren. Bei der folgenden Abschätzung für sicherheitskritische Funktionen wird von den simulierten Fehlerraten als tatsächlich finale Fehlerrate ausgegangen. Im aktuellen WLAN-Standard 802.11be ist die kleinste Kanalbandbreite 20 MHz, was bei einem Datenstrom zu einer Nettodatenrate von ca. 110 Mbit/s führt. Geht man von einer zyklischen Kommunikation für eine Sicherheitsfunktion aus, so können die Werte aus Tabelle 4 für die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde verwendet werden. Ohne weitere Maßnahmen zeigen die Fehlerraten, dass keine Sicherheitsanforderungsstufe erreichbar ist. Jedoch, kann man durch Redundanz (z.B. zusätzliche Kommunikationspfade, mehrmaliges Senden der Information etc.) die Fehlerrate reduzieren. Welche Redundanz hierfür nötig ist, lässt sich mit dem Redundanzfaktor x beschreiben, der aus der simulierten Bitfehlerrate B und der Zielfehlerrate nach IEC-Standard und DIN EN 50126 Z berechnet werden kann, wie folgende Formel zeigt.

Formel 9: Berechnung des Redundanzfaktors zum Erreichen einer belastbaren sicherheitskritischen drahtlosen Kommunikation im Zug-Onboard-Bereich

$$x = \log_B Z$$

Für die verschiedenen Sicherheitsanforderungsstufen und Bitfehlerraten ergibt sich somit Tabelle 12. Damit können je nach SIL-Belastung und SNR sicherheitskritische Daten dank Redundanz zwischen 6,0 Mbit/s und 39,3 Mbit/s mit der erforderlichen Zuverlässigkeit mit dem 20 MHz Kanal des Standards 802.11be übertragen werden. Diese Werte ergeben sich bei entsprechendem Abzug von der Nettodatenrate 110 Mbit/s. Reduziert werden diese Werte lediglich durch andere Komponenten neben dem drahtlosen Kommunikationssystem, die ebenso Ausfallraten mit sich bringen und dann eingerechnet werden müssen.

Bitfehlerrate simuliert B	Zielfehlerrate gemäß IEC 61508 und DIN EN 50126 Z	Sicherheitsanforderungs- stufe SIL	Redundanzfaktor x
0,73 % (SNR 40 dB)	0,0001 %	SIL1	2,81
	0,00001 %	SIL2	3,28
	0,000001 %	SIL3	3,74
	0,0000001 %	SIL4	4,21
5,23 % (SNR 30 dB)	0,0001 %	SIL1	4,68
	0,00001 %	SIL2	5,46
	0,000001 %	SIL3	6,24
	0,0000001 %	SIL4	7,02
17,51 % (SNR 20 dB)	0,0001 %	SIL1	7,93
	0,00001 %	SIL2	9,25
	0,000001 %	SIL3	10,57
	0,0000001 %	SIL4	11,89
32,06 % (SNR 10 dB)	0,0001 %	SIL1	12,14
	0,00001 %	SIL2	14,17
	0,000001 %	SIL3	16,19
	0,0000001 %	SIL4	18,22

Tabelle 12: Redundanzfaktoren für unterschiedliche Fehlerraten

Generell zeigt dieses Ergebnis, dass eine Sicherheitsbelastung drahtloser Zug-Onboard-Kommunikation möglich ist. In der Praxis sollte dennoch mit Funktionen der Basisintegrität bezüglich Industrialisierung und Implementierung begonnen werden. Durch die weniger strengen Ausfallraten (größer 0,001%) lassen sich so ohne Einfluss auf Sicherheitsfunktionen Erfahrungen sammeln und nachfolgend Erkenntnisse auf sicherheitskritische Funktionalität migrieren.

10 Fazit und Schlussfolgerungen

Durch die Ergebnisse dieser Arbeit ist es möglich, die existierende Forschungslücke im Bereich der drahtlosen Zug-Onboard-Kommunikation durch empirische, szenarienspezifische Kanalmodelle im Sub-6-GHz-Bereich zu reduzieren. Es werden die Wellenausbreitungseffekte in den typischen On-board-Kommunikationsszenarien identifiziert, Simulationen durchgeführt und deren Ergebnisse unter dem Aspekt sicherheitskritischer Funktionen in der Schienenfahrzeugtechnik betrachtet. Trotz der 195 durchgeführten Messreihen, sind noch weitere Messungen unter anderen Randbedingungen nötig, um beispielsweise auch U-Bahnen und deren Kommunikationskanäle während der Fahrt besser abbilden zu können. Hier bieten vorhandene, etablierte Kanalmodelle nicht die gewünschte Genauigkeit ohne detaillierte Kanalkennntnis. Im Kontext der aktuellen Megatrends und in Hinblick auf die Marktentwicklung im Schienenverkehr ist diese Arbeit von signifikanter Bedeutung, um aktuelle und zukünftige Funkstandards zum Vorteil der Passagiere, der Betreiber und Hersteller einzusetzen. Sie schafft die Basis für das Design neuer Kommunikationsarchitekturen und könnte das disruptive Element sein, um über neue Fahrzeugkonzepte auf der Schiene nachzudenken, weil nun wegen der Möglichkeit alternativer Kommunikationswege Einbauräume anders genutzt werden können. Insbesondere im Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr existiert ein hohes Potenzial und auch der politische Wille, um neue Ideen zum Wohle der Gesellschaft umzusetzen. Ein exzellentes Beispiel ist hierfür das Konzept einer neuen Hochgeschwindigkeitszuggeneration des Zughersteller Siemens Mobility. Hier sind aufgrund neuer Technik komplett neue Raumkonzepte in Überlegung, die das Zuginnere maximal ausnutzen und beispielsweise eine Diskothek im Zug ermöglichen, wie Abbildung 110 visualisiert. Diese Arbeit kann ein entscheidender Baustein für neue Szenarien und Anwendungen in diesem Kontext darstellen. [99]

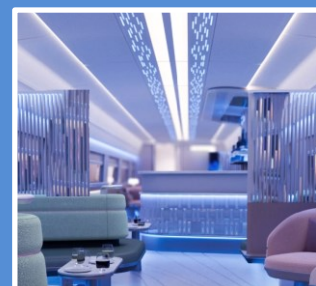


Abbildung 110: Konzept American Pioneer 220 von Siemens Mobility aus [99]

Literaturverzeichnis

- [1] Verband der Bahnindustrie in Deutschland (VDB) e.V., "Digitalisierung - Digitale Schiene Deutschland," Zugriff am: 11. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: <https://bahnindustrie.info/de/themen/gesamt/detail/digitale-schiene-deutschland>
- [2] MarketsandMarkets, "Höhe des Marktvolumens des weltweiten Schienenfahrzeugbaus im Jahr 2022 und Prognose für 2027 (in Milliarden US-Dollar)," Zugriff am: 11. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1279750/umfrage/marktvolumen-des-weltweiten-schienenfahrzeugbau/>
- [3] C. Schifers und G. Hans, "IEC 61375-1 and UIC 556-international standards for train communication," in *VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No.00CH37026)*, Tokyo, Japan, Mai. 2000, S. 1581–1585, doi: 10.1109/VETECS.2000.851393.
- [4] H. Kirrmann und P. A. Zuber, "The IEC/IEEE train communication network," *IEEE Micro*, Jg. 21, Nr. 2, S. 81–92, 2001, doi: 10.1109/40.918005.
- [5] J. Lichtblau, B. Sanftl, F. Lurz, R. Weigel und A. Koelpin, "Examination of OFDM for wireless train-onboard communication," in *2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Anaheim, CA, Jan. 2018 - Jan. 2018, S. 184–187, doi: 10.1109/RWS.2018.8304981.
- [6] International Electrotechnical Commission, "Electronic railway equipment – Train communication network (TCN) – Part 2-6: On-board to ground communication," IEC 61375-2-6, Mai. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vde-verlag.de/iec-normen/preview-pdf/info_iec61375-2-6%7Bed1.0%7Db.pdf
- [7] International Electrotechnical Commission, "Electronic railway equipment - Train communication network (TCN) - Part 2-7: Wireless Train Backbone (WLTB)," IEC TR 61375-2-7, Apr. 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/220723/iec-tr-61375-2-7-2014.html>
- [8] DB Fernverkehr AG, "WLAN in Zügen des Fernverkehrs," Zugriff am: 17. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.bahn.de/service/zug/wlan-im-ice>
- [9] Hannah Schwär, "Funkstille im ICE: Eine Karte zeigt, wie schnell das WLAN auf eurer Bahnstrecke ist," Zugriff am: 5. Mai 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.businessinsider.de/tech/eine-karte-zeigt-wie-schnell-das-wlan-in-den-ices-der-deutschen-bahn-ist-2018-5/>
- [10] Nils Raettig, "Fast ein Totalausfall bei der Deutschen Bahn: WLAN muss im Jahr 2022 doch besser gehen!," Zugriff am: 5. Mai 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.gamestar.de/artikel/deutsche-bahn-ice-wlan-kolumne,3385946.html#comments>

-
- [11] Thorsten Neuhezki, "WLAN im ICE: Deutsche Bahn sagt, warum das Internet im Zug oft so schlecht ist," Zugriff am: 17. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.inside-digital.de/news/wlan-im-ice-bahn-gesteht-darum-ist-das-internet-in-zuegen-oft-so-schlecht>
- [12] Jochen G. Fuchs, "Wieso ist das WLAN der DB eigentlich so grottenschlecht?," Zugriff am: 17. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: <https://t3n.de/news/wlan-db-eigentlich-1236877/>
- [13] J. Lichtblau, B. Scheiner, F. Michler, M. Graebner, B. Sanftl, R. Weigel und A. Koelpin, "Novel Approach for Virtual Coupling of Trains Using Different Modulation and Coding Schemes," in *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Singapore, Dez. 2018 - Dez. 2018, S. 1–4, doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641557.
- [14] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios und J. Zhang, "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Jg. 65, Nr. 12, S. 6213–6230, 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2734243.
- [15] C.-X. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang und M. Zhang, "A Survey of 5G Channel Measurements and Models," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, Jg. 20, Nr. 4, S. 3142–3168, 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2862141.
- [16] J. Meinil, P. Kysti, T. Jms und L. Hentil, "WINNER II Channel Models," in *Radio Technologies and Concepts for IMT-Advanced*, M. Dttling, W. Mohr und A. Osseiran, Hg., Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009, S. 39–92.
- [17] T. S. Rappaport, S. Sun und M. Shafi, "Investigation and Comparison of 3GPP and NYUSIM Channel Models for 5G Wireless Communications," in *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, ON, Sep. 2017 - Sep. 2017, S. 1–5, doi: 10.1109/VTCFall.2017.8287877.
- [18] R. He, B. Ai, Z. Zhong, M. Yang, R. Chen, J. Ding, Z. Ma, G. Sun und C. Liu, "5G for Railways: Next Generation Railway Dedicated Communications," *IEEE Commun. Mag.*, Jg. 60, Nr. 12, S. 130–136, 2022, doi: 10.1109/MCOM.005.2200328.
- [19] I. Mesogiti, E. Theodoropoulou, F. Setaki, G. Lyberopoulos, A. Tzanakaki, M. Anastassopoulos, C. Politi, P. Papaioannou, C. Tranoris, S. Denazis, P. Flegkas, N. Makris, N. Maletic, D. Cvetkovski, J. G. Teran, P. K. Chatsias, K. Stamatis, M. Xezonaki, D. Kritharidis, A. Dalkalitsis, M. Taferner und M. Piovarci, "5G-VICTORI: Future Railway Communications Requirements Driving 5G Deployments in Railways," in *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2021 IFIP WG 12.5 International Workshops (IFIP Advances in Information and Communication Technology)*, I. Maglogiannis, J. Macintyre und L. Iliadis, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 21–30.
- [20] P. H. Fischer, "GSM-R — ein digitales Funknetz für die europäischen Eisenbahnen," *Elektrotech. Inftech.*, Jg. 116, Nr. 9, S. 504–508, 1999, doi: 10.1007/BF03158948.

-
- [21] "Radio Wave Fundamentals," in *Radio Propagation Measurement and Channel Modelling*, S. Saalou, Hg., Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013, S. 1–33.
- [22] Nokia, "Future Railway Mobile Communication System (FRMCS): Ensure safe, dependable operations with FRMCS based on 5G," Zugriff am: 23. April 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nokia.com/industries/railways/frmcs/>
- [23] S. Banerjee, M. Hempel und H. Sharif, "A Survey of Wireless Communication Technologies & Their Performance for High Speed Railways," *JTTs*, Jg. 06, Nr. 01, S. 15–29, 2016, doi: 10.4236/jtts.2016.61003.
- [24] Deutsches Institut für Normung e.V, "Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme; Deutsche Fassung EN 50128:2011," DIN EN 50128:2012-03, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-50128/148018416>
- [25] Deutsches Institut für Normung e.V, "Bahnanwendungen - Anwendungen für Schienenfahrzeuge - Software auf Schienenfahrzeugen; Deutsche Fassung EN 50657:2017," 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-50657/275610562>
- [26] R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhong, A. F. Molisch, C. Briso-Rodriguez und C. P. Oestges, "High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Jg. 11, Nr. 3, S. 49–58, 2016, doi: 10.1109/MVT.2016.2564446.
- [27] Y. Fukuda, T. Hatase, A. Satoh, Y. Nakamura und S. Wada, "Characterizing the basic performance of IEEE 802.11ax using actual hardware measurements," in *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Budapest, Hungary, Apr. 2022 - Apr. 2022, S. 1–4, doi: 10.1109/NOMS54207.2022.9789895.
- [28] UIC, "11th UIC High -Speed Congress - Key messages," Zugriff am: 2. Oktober 2023. [Online.] Verfügbar: <https://uic.org/IMG/pdf/uic-world-congress-high-speed-rail-2023-key-messages.pdf>
- [29] UIC, "Länge der betriebenen Hochgeschwindigkeits-Schienennetze nach Regionen (Stand: 1. September 2022; in Kilometer)," Zugriff am: 2. Oktober 2023. [Online.] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1289278/umfrage/laenge-der-hochgeschwindigkeits-schienennetze-nach-regionen/>
- [30] UIC, "Länge des sich in Planung befindenden Hochgeschwindigkeits-Schienennetzes nach Regionen (Stand: 1. September 2022; in Kilometer)," Zugriff am: 2. Oktober 2023. [Online.] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1289432/umfrage/laenge-des-geplanten-hochgeschwindigkeits-schienennetzes-nach-regionen/>
- [31] UIC, "Commuter and Regional Train Services Handbook," Zugriff am: 2. Oktober 2023. [Online.] Verfügbar: <https://uic.org/passenger/commuter-and-regional-train-services/>

-
- [32] Karlsruher Institut für Technologie, "125 Jahre Entdeckung der elektromagnetischen Wellen," Presseinformation 165/2011. Zugriff am: 12. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: www.kit.edu
- [33] X. Yin, "Propagation channel characterization, parameter estimation, and modeling for wireless communications," Singapore: Wiley-IEEE Press, 2016978-1-118-18823-1.
- [34] S. Knörzer, "Funkkanalmodellierung für OFDM-Kommunikationssysteme bei Hochgeschwindigkeitszügen," (Karlsruher Forschungsberichte aus dem Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik). Erscheinungsort nicht ermittelbar: KIT Scientific Publishing, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/48216##978-3-86644-361-7>.
- [35] S. B. Weinstein, "The history of orthogonal frequency-division multiplexing [History of Communications]," *IEEE Commun. Mag.*, Jg. 47, Nr. 11, S. 26–35, 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5307460.
- [36] X. Lin und N. Lee, "Introduction to 5G and Beyond," in *5G and Beyond*, X. Lin und N. Lee, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 1–25.
- [37] K. Abbas, "From algorithms to hardware architectures: Using digital radios as a design example," Cham: Springer, 2023978-3-031-08693-9.
- [38] Julian Diefenbach, "Entwicklung eines OFDM-Empfängers mit flexibler Frequenzanpassung auf Basis eines Software Defined Radios," Masterarbeit, Lehrstuhl für Technische Elektronik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2017.
- [39] E. Khorov, I. Levitsky und I. F. Akyildiz, "Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7," *IEEE Access*, Jg. 8, S. 88664–88688, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993448.
- [40] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, "Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme: Teil 1: Allgemeine Anforderungen," IEC 61508-1:2010, Berlin, 2010.
- [41] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, "Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS): Teil 2: Systembezogene Sicherheitsmethodik,," DIN EN 50126-2, Berlin, 2017.
- [42] J. Börcsök, "Funktionale Sicherheit: Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme," 5. Aufl. Berlin: VDE Verlag, 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783800753581##978-3-8007-5357-4.
- [43] Deutsches Institut für Normung e.V., "Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS-Prozess; Deutsche Fassung EN 50126-1:2017," DIN EN 50126-1:2018-10, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-50126-1/279777807>

-
- [44] M. V. Nikolic, B. D. Kotic, M. D. Milanovic, N. M. Antonic, Z. M. Stojkovic und I. Z. Kotic, "Railway axle counter prototype," in *2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, Nov. 2014 - Nov. 2014, S. 694–697, doi: 10.1109/TELFOR.2014.7034503.
- [45] H. Henke, "Elektromagnetische Felder," Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020978-3-662-62234-6.
- [46] D. Meschede, "Gerthsen Physik," Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015978-3-662-45976-8.
- [47] N. Ida, "Engineering Electromagnetics," Cham: Springer International Publishing, 2021978-3-030-15556-8.
- [48] K. Raghunandan, "Introduction to wireless communications and networks: A practical perspective," (Textbooks in telecommunication engineering). Cham: Springer, 2022978-3-030-92187-3.
- [49] "Werkstoffe der Elektrotechnik," 10. Aufl. (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Teubner, 2007978-3-8351-9088-7.
- [50] G. Lehner und S. Kurz, "Elektromagnetische Feldtheorie: Für Ingenieure und Physiker," 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1903151##978-3-662-63069-3>.
- [51] G. L. Stüber, "Principles of Mobile Communication," Cham: Springer International Publishing, 2017978-3-319-55614-7.
- [52] I. Rashdan, P. Unterhuber, F. de Ponte Muller, S. Sand und G. Caire, "Diffuse Multipath Analysis of Vehicle-to-Vulnerable Road User Channel in Urban Environment," in *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Dusseldorf, Germany, Mrz. 2021 - Mrz. 2021, S. 1–5, doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411391.
- [53] A. Mishra, D. Gupta und G. Chetty, Hg., "Advances in IoT and Security with Computational Intelligence: Proceedings of ICAISA 2023, Volume 2," 1. Aufl. (Lecture Notes in Networks and Systems 756). Singapore: Springer Nature Singapore; Imprint Springer, 2023978-981-99-5088-1.
- [54] B. Rembold, "Wellenausbreitung: Grundlagen - Modelle - Messtechnik - Verfahren," (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015978-3-658-08641-1.
- [55] DB Fernverkehr AG, "ICE 3: Der Schnelle," Zugriff am: 17. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: https://www.bahn.de/service/ueber-uns/zugtypen/ice_3
- [56] A. Heinz, "Nutzung der Fahrzeug-Schnittstelle zur Datenerfassung im dynamischen Fahrzeug-Betrieb," 1. Aufl. (Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, 2024978-3-658-44166-1.
- [57] P. Bello, "Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels," *IEEE Trans. Commun.*, Jg. 11, Nr. 4, S. 360–393, 1963, doi: 10.1109/TCOM.1963.1088793.

-
- [58] R. Kattenbach, "Statistical modeling of small-scale fading in directional radio channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Jg. 20, Nr. 3, S. 584–592, 2002, doi: 10.1109/49.995517.
- [59] W. Stallings, "Wireless communications and networks," 2. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <https://permalink.obvsg.at/AC09033952##0-13-191835-4>.
- [60] M. Werner, "Nachrichtentechnik," Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017978-3-8348-2580-3.
- [61] A. Houghton, "Bit Error Rates," in *Error Coding for Engineers*, A. Houghton, Hg., Boston, MA: Springer US, 2001, S. 165–176.
- [62] H. Rohling, "OFDM," Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011978-3-642-17495-7.
- [63] Z. Yun und M. F. Iskander, "Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications," Jg. 3, S. 1089–1100, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2453991.
- [64] C. Han, Y. Wang, Y. Li, Y. Chen, N. A. Abbasi, T. Kurner und A. F. Molisch, "Terahertz Wireless Channels: A Holistic Survey on Measurement, Modeling, and Analysis," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, Jg. 24, Nr. 3, S. 1670–1707, 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3182539.
- [65] M. F. Iskander und Z. Yun, "Propagation prediction models for wireless communication systems," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, Jg. 50, Nr. 3, S. 662–673, 2002, doi: 10.1109/22.989951.
- [66] "New Directions in Wireless Communications Research," (SpringerLink Bücher). Boston, MA: Springer US, 2009978-1-4419-0672-4.
- [67] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, "Allgemeinzuteilungen," Zugriff am: 14. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/start.html>
- [68] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, "FREQUENZPLAN: gemäß § 54 TKG über die Aufteilung des Frequenzbereichs von 0 kHz bis 3000 GHz auf die Frequenznutzungen sowie über die Festlegungen für diese Frequenznutzungen," Zugriff am: 14. Juli 2023. [Online.] Verfügbar: <http://www.bundesnetzagentur.de/Frequenzplan>
- [69] D. Ginthoer und D. Harutyunyan, "Evaluation of Control-to-Control Communication in Industrial 5G Network," in *2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, Pavia, Italy, Apr. 2023 - Apr. 2023, S. 1–7, doi: 10.1109/WFCS57264.2023.10144117.
- [70] V. D.E. ITG, Hg., "ITG-Fb. 304: Mobilkommunikation – Technologien und Anwendungen: Vorträge der 26. ITG-Fachtagung, 18. – 19. Mai 2022 in Osnabrück," (ITG-Fachberichte). Berlin: VDE Verlag, 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783800758746##978-3-8007-5873-9.

-
- [71] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov und G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, Jg. 21, Nr. 1, S. 197–216, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2871099.
- [72] U. Varshney, "4G Wireless Networks," *IT Prof.*, Jg. 14, Nr. 5, S. 34–39, 2012, doi: 10.1109/MITP.2012.71.
- [73] C. Heller, C. Blumm und B. Fourestie, "On the characterization of the Wireless Channel for Aeronautic Mobile Telemetry in C-Band," in *2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, East Syracuse, NY, USA, Okt. 2013 - Okt. 2013, S. 1–30, doi: 10.1109/DASC.2013.6719623.
- [74] Z. Wen, Z. Zhong und H. Kong, "Full-duplex channel measurement and analysis based on high dynamic channel sounding system," in *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, HI, USA, Jun. 2017 - Jun. 2017, S. 1158–1161, doi: 10.1109/MWSYM.2017.8058806.
- [75] M. M. Silva, L. d. S. Mello, C. V. Rodriguez R. und P. G. Castellanos, "Wideband Channel Sounding Using Modulated OFDM Signals," in *2018 IEEE-APS Topical Conference on Antennas*, S. 1–4.
- [76] J. Lichtblau, F. Lurz, B. Sanftl, R. Weigel und A. Koelpin, "Characterization of The Wireless Onboard Channel During Tunnel Crossing in High-Speed Rail Traffic," in *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, Nov. 2019 - Nov. 2019, S. 1–3, doi: 10.1109/IMOC43827.2019.9317549.
- [77] European Telecommunications Standards Institute, "ETSI TS 136 211 V14.2.0 (2017-04): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation," Zugriff am: 8. August 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/14.02.00_60/ts_136211v140200p.pdf
- [78] Ettus Research, "VERT2450 Antenna," Zugriff am: 12. April 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.ettus.com/all-products/vert2450/>
- [79] Taoglas, "Maximus FXUB66 5G/4G Wideband 600-6000MHz Flexible Antenna, 150mm Ø1.37, I-PEX MHF® (U.FL)," Zugriff am: 12. April 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.taoglas.com/product/maximus-fxub66-ultra-wide-band-flex-antenna-ipex-mhf/>
- [80] J. Lichtblau, B. Sanftl, C. Kraus, R. Weigel und A. Koelpin, "Influence of train interior on train-on-board communication," in *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, Poznan, Poland, Mai. 2018 - Mai. 2018, S. 605–606, doi: 10.23919/MIKON.2018.8405299.
- [81] J. Lichtblau, F. Michler, B. Scheiner, F. Lurz, M. Graebner, M. Hundhausen, R. Weigel und A. Koelpin, "Phased Array Approach for Vehicle-to-Infrastructure Communication in Train Stations," in *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Orlando, FL, USA, Jan. 2019 - Jan. 2019, S. 1–4, doi: 10.1109/RWS.2019.8714204.

-
- [82] J. Lichtblau, F. Lurz, R. Weigel und A. Koelpin, "Measurements for Onboard Communication in a High-Speed Train up to 330 km/h for Selected Scenarios at 2.45 GHz," in *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Orlando, FL, USA, Jan. 2019 - Jan. 2019, S. 1–3, doi: 10.1109/RWS.2019.8714281.
- [83] J. Lichtblau, K. Elkholy und A. Koelpin, "Analysis of onboard channel measurements for train communication scenarios in the context towards 6G enabling technologies," in *2022 52nd European Microwave Conference (EuMC)*, Milan, Italy, Sep. 2022 - Sep. 2022, S. 880–883, doi: 10.23919/EuMC54642.2022.9924457.
- [84] K. Elkholy, J. Lichtblau, T. Reissland, R. Weigel and A. Koelpin, "Channel Measurements for the Evaluation of Evolving Next Generation Wireless Railway Communication Applications," in *2020 German Microwave Conference (GeMiC)*, S. 120–123.
- [85] Johann Lichtblau, Fabian Lurz, Benedikt Sanftl, Robert Weigel und Alexander Koelpin, "Development of a novel channel model for train-onboard communication in commuter traffic at 100 km/h," in *2019 Kleinheubach Conference*. Zugriff am: 14. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8890196>
- [86] Y. Dodge, "The concise encyclopedia of statistics," (Springer reference). New York, NY: Springer, 2010978-0-387-32833-1.
- [87] DB Fernverkehr AG, "ICE 4," Zugriff am: 5. Oktober 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.bahn.de/service/ueber-uns/zugtypen/ice-4#Rueckgrat-des-Fernverkehrs>
- [88] DB Systemtechnik GmbH, "Hochgeschwindigkeits-Messzug (ICE-S)," Zugriff am: 13. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.db-systemtechnik.de/dbst-de/Technik/Fahrzeuge-6258694>
- [89] Frank Türpitz, "ICE S auf Messfahrt mit dem EWET," Zugriff am: 10. November 2023. [Online.] Verfügbar: <https://www.nef-online.de/ice-s-auf-messfahrt-mit-dem-ewet/>
- [90] Christian Bremer, "Das Elektrotriebzugduo 462 071 & 462 042 (ID 1302326)," Zugriff am: 16. April 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.bahnbilder.de/bild/deutschland~bahnhofe-r---z~wuppertal-alle-bahnhofe/1302326/das-elektrotriebzugduo-462-071--462.html>
- [91] Siemens Mobility GmbH, "Erweiterung der Blauen Linie in Bangkok - Lieferung eines schlüsselfertigen Metrosystems mit 35 dreiteiligen Zügen," Zugriff am: 16. April 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/referenzen/bangkok-blue-line.html>
- [92] Siemens Mobility GmbH, "Mireo – ein Zug, der alle intelligent vereint," Zugriff am: 17. April 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/fahrzeuge/commuter-und-regionalzuege/mireo.html>

-
- [93] H. Holland und K. Scharnbacher, "Grundlagen der Statistik," 6. Aufl. (Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines). Wiesbaden: Gabler Verlag, 2003978-3-322-96617-9.
- [94] European Telecommunications Standards Institute, "ETSI TR 138 901 V16.1.0: 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz(3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16)," Zugriff am: 8. Februar 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf
- [95] DB InfraGO AG, "Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 8: Tunnel," Zugriff am: 20. März 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.vde8.de/de/projektabschnitte/neubaustrecke-erfurt-leipzig-halle/tunnel>
- [96] R. Nissel, M. Rupp und R. Marsalek, "FBMC-OQAM in doubly-selective channels: A new perspective on MMSE equalization," in *2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Sapporo, Japan, Jul. 2017 - Jul. 2017, S. 1–5, doi: 10.1109/SPAWC.2017.8227806.
- [97] "Streifzüge durch die Wahrscheinlichkeitstheorie: Aus dem Schwedischen übersetzt von Arne und Christina Ring," (SpringerLink Bücher). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006978-3-540-29859-5.
- [98] CNN, "Maximal gefahrene Geschwindigkeit der schnellsten Züge der Welt (in Kilometer pro Stunde; Stand Dezember 2021)," Zugriff am: 2. Oktober 2023. [Online.] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1289477/umfrage/schnellste-zuege-der-welt-nach-maximal-gefarener-geschwindigkeit/>
- [99] Siemens Mobility, "The American Pioneer 220: High Speed Rail for the U.S.," Zugriff am: 14. Mai 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.mobility.siemens.com/us/en/portfolio/rolling-stock/high-speed-and-intercity-trains/american-pioneer-220.html>