
Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Entwicklung der Fahrzeugkommunikation zu 6G JCRS-Systemen	3
1.3 Herausforderungen und offene Fragestellungen	6
1.4 Zielsetzung, Beiträge und Aufbau der Arbeit	8
2 Ausbreitungseffekte und Modellierung des mmWellen-Kanals	13
2.1 Stand der Technik der Untersuchung des mmWellen-Fahrzeugfunkkanals	13
2.1.1 Kanalmessungen	14
2.1.2 Kanalmodelle	17
2.1.3 Motivation der nachfolgenden Untersuchungen	19
2.2 Grundlegende Pfadeffekte im mmWellen-Ausbreitungskanal	20
2.2.1 Freiraumdämpfung	20
2.2.2 Atmosphärische Dämpfung	21
2.2.3 Dämpfung durch Niederschlag	22
2.2.4 Dämpfung durch Hindernisse	23
2.2.5 Kanaleffekte	24
2.3 Metriken der Kanalcharakterisierung	27
2.3.1 Frequenzselektivität	27
2.3.2 Zeitvarianz	28
2.4 Untersuchte Szenarien	29
2.4.1 Landstraße	31
2.4.2 Autobahn	31
2.4.3 Leipziger Platz	31
2.5 Validierung der mmWellen-Simulationen	33
2.5.1 Gewählte Konfigurationen	34
2.5.2 Abgleich mit Messungen	35
2.5.3 Untersuchung der Ausbreitungsphänomene	36
2.6 Auswahl an charakteristischen Einflussfaktoren zukünftiger JCRS-Anwendungen	37
2.6.1 Zusätzliche Streukörper	38
2.6.2 Blockieren des LOS-Pfades	41
2.7 Übersprechen im urbanen Umfeld	47
2.7.1 Untersuchtes Szenario	47

2.7.2	Ergebnisse der Störanalyse	47
2.7.3	Reduktion der Störungen	49
2.8	Diskussion der Ergebnisse	51
3	Einfluss der Antennenkonfigurationen auf den Kommunikationskanal	53
3.1	Stellenwert von Automobilantennen	53
3.1.1	Kompensation der Freiraumdämpfung	54
3.1.2	Antennenpositionierung	55
3.1.3	Bauweise der Antennen	57
3.1.4	Motivation der nachfolgenden Untersuchungen	58
3.2	Grundlegende Antennenkenngrößen	58
3.2.1	Richtcharakteristik	59
3.2.2	Halbwertsbreite	59
3.2.3	Richtfaktor und Antennengewinn	59
3.3	Metriken der Kanalcharakterisierung	61
3.4	Verwendete Antennenkonfigurationen	62
3.4.1	Antennencharakteristika	62
3.4.2	Untersuchte Antennenpositionen	64
3.5	Konfiguration der Kanalsimulation	65
3.5.1	Landstraße	65
3.5.2	Urbanes Umfeld	65
3.6	Einfluss der Antennenkonfigurationen im Szenario Landstraße	66
3.6.1	Vergleich omnidirektionale und 2x2 [★] Patchantenne	66
3.6.2	Einfluss fokussierter Antennen	67
3.7	Einfluss der Antennenkonfigurationen im urbanen Umfeld	71
3.7.1	Intra-Platoon Kommunikation	72
3.7.2	Inter-Platoon Kommunikation	79
3.8	Diskussion der Ergebnisse	89
4	Einfluss von Antennenkonfigurationen auf die Radarsensorik	93
4.1	Stand der Technik der Radarsensorik im Fahrzeug	93
4.1.1	Radaranalyse mittels 3D-Ray-Tracing	94
4.1.2	Motivation der nachfolgenden Untersuchungen	96
4.2	Grundlagen des FMCW-Radars	96
4.2.1	Funktionsprinzip eines FMCW-Radars	97
4.2.2	FMCW-Signalverarbeitung	98
4.3	Konfiguration der verwendeten FMCW-Analyse	100
4.3.1	Konfiguration der Wellenform	101
4.3.2	Konfiguration der Kanalsimulation	101
4.3.3	Konfiguration der Radarsignalverarbeitung	102
4.4	Validierung der Radaranalyse mittels WinProp	103
4.4.1	Vermessenes Fahrscenario und Signalverarbeitung	103
4.4.2	Vergleich der Simulations- und Messergebnisse	104
4.5	Einfluss der Antennenkonfigurationen im Szenario Landstraße	106
4.5.1	Vergleich omnidirektional und 2x2 [★] Patchantenne	106
4.5.2	Einfluss fokussierter Antennen	108

4.6	Einfluss der Antennenkonfigurationen im urbanen Umfeld	109
4.6.1	Radaranalyse für EIRP = 13 dBm	110
4.6.2	Radaranalyse für EIRP = 55 dBm	114
4.7	Ausblick: High-Level Signalverarbeitung und synthetische Datensätze	117
4.8	Diskussion der Ergebnisse	119
5	Modellierung eines JCRS-Systems	123
5.1	Stand der Technik der Modellierung kombinierter JCRS-Systeme	123
5.1.1	Diskussion der Wellenform	124
5.1.2	Verfügbare JCRS-Modelle im Hinblick auf Nichtidealitäten der Hardwarekomponenten	126
5.1.3	Motivation der nachfolgenden Untersuchungen	128
5.2	Realisierte Modellierungen	129
5.2.1	Fahrzeugkommunikation	130
5.2.2	JCRS-Modell	134
5.3	Grundlagen des PMCW-Radars	137
5.3.1	PMCW-Signalverarbeitung	137
5.3.2	Konfiguration der PMCW-Radarwellenform	139
5.4	Metriken zur Bewertung von Hardwareeffekten	140
5.4.1	Bewertung der Kommunikationsqualität	140
5.4.2	Bewertung der Sensorik	140
5.5	Untersuchte Hardwareeffekte	141
5.5.1	S-Parameter	142
5.5.2	Phasenrauschen der Mischer	144
5.5.3	Nichtlinearitäten der Verstärker	145
5.5.4	Rauschzahl der Verstärker	148
5.6	Einfluss der Hardwareeffekte auf das JCRS-System	149
5.6.1	S-Parameter	150
5.6.2	Phasenrauschen der Mischer	152
5.6.3	Nichtlinearitäten der Verstärker	155
5.6.4	Rauschzahl der Verstärker	156
5.7	Diskussion der Ergebnisse	158
6	Diskussion und Ausblick	163
6.1	Vergleich mit dem Stand der Technik	163
6.2	Ausblick	167
7	Zusammenfassung	169
	Literaturverzeichnis	171
	Abkürzungsverzeichnis	197
	Tabellen und Abbildungen	201
	Danksagung	209
	Eigene Veröffentlichungen	211

Anhang	215
A.1 Übersicht über Arbeitsablaufplan	215
A.2 Materialkatalog	216
A.3 Antennendiagramme	217
A.4 Kanalanalyse des Radarsignals	220
A.4.1 Radarkanalanalyse für EIRP = 13 dBm	220
A.4.2 Radarkanalanalyse für EIRP = 55 dBm	220
A.4.3 Vergleich der Auswertungsmethoden des Radarsignals	223
A.5 Spezifikation des PMCW-Radars	224
A.5.1 Einfluss der Sequenztypen	225
A.5.2 Einfluss der Sequenzlängen	228