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 Fahrszenario 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