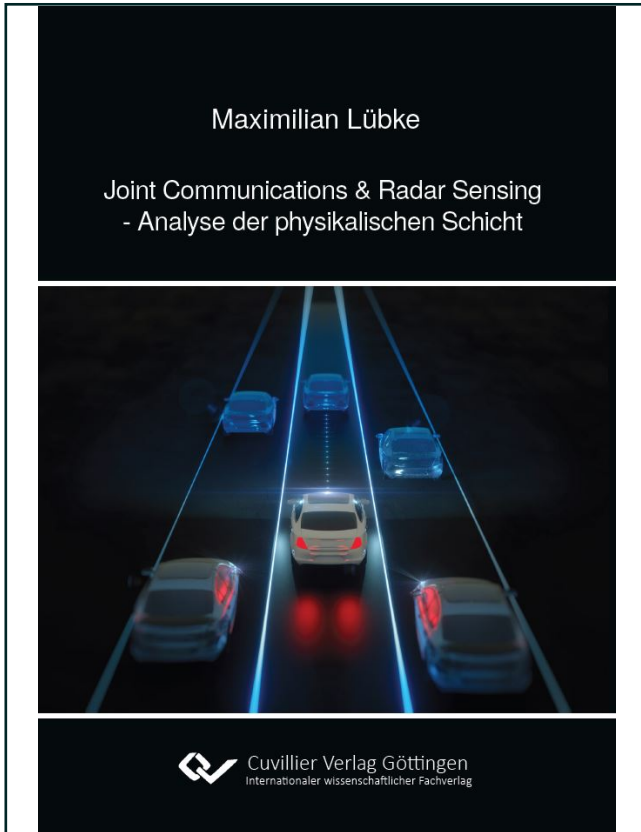




Maximilian Lübke (Autor)

## **Joint Communication & Radar Sensing - Analyse der physikalischen Schicht**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8890>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Ausbreitungseffekte und Modellierung des mmWellen-Kanals</b>	<b>13</b>
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
<b>3</b>	<b>Einfluss der Antennenkonfigurationen auf den Kommunikationskanal</b>	<b>53</b>
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 Antennenkenngößen . . . . .	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 <sup>★</sup> 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
<b>4</b>	<b>Einfluss von Antennenkonfigurationen auf die Radarsensorik</b>	<b>93</b>
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 <sup>★</sup> 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
<b>5</b>	<b>Modellierung eines JCRS-Systems</b>	<b>123</b>
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
<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>163</b>
6.1	Vergleich mit dem Stand der Technik . . . . .	163
6.2	Ausblick . . . . .	167
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>169</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>171</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>197</b>
	<b>Tabellen und Abbildungen</b>	<b>201</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>209</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>211</b>

<b>Anhang</b>	<b>215</b>
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