

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Umfeld der Arbeit	1
1.2 Motivation	3
1.3 Einführung zu Mehrantennensystemen und Stand der Forschung	4
1.4 Problemstellung und Ziele	7
1.5 Allgemeine Ansätze zur Kanalmodellierung für Mehrantennensysteme	9
1.5.1 Deterministische Kanalmodelle	10
1.5.2 Stochastische Kanalmodelle	11
1.5.3 Gemessene Kanäle und Hardware Demonstratoren	14
1.6 Lösungsansatz und Gliederung der Arbeit	15
<b>2 Systemtheoretische Beschreibung des MIMO-Mobilfunkkanals</b>	<b>17</b>
2.1 Übertragungskanal und richtungsaufgelöster Funkkanal	18
2.1.1 Beschreibung der Sende- und Empfangsanenne	18
2.1.2 Beschreibung der Mehrwegeausbreitung	20
2.1.2.1 Funktionen zur Beschreibung des Übertragungskanals	21
2.1.2.2 Gerichtete Funktionen zur Beschreibung des Funkkanals	24
2.2 Kennfunktionen und Kenngrößen zur Charakterisierung der Mehrwegeausbreitung	25
2.2.1 Charakterisierung der Zeitvarianz	26
2.2.2 Charakterisierung der Frequenzselektivität	29
2.2.3 Charakterisierung der Richtungsselektivität	31
2.3 Zusammenfassung	34
<b>3 Grundlagen der Mehrantennen-Übertragungstechnik</b>	<b>35</b>
3.1 MIMO in Punkt-zu-Punkt Systemen	36
3.1.1 MIMO-Systembeschreibung	36
3.1.2 Punkt-zu-Punkt Mehrantennen-Übertragungsverfahren	38
3.1.3 Bestimmung der SISO-Kapazität	42
3.1.4 Bestimmung der MIMO-Kapazität	42
3.1.5 Normierung der MIMO-Übertragungsmatrix	46
3.2 MIMO in Punkt-zu-Mehrpunkt Systemen	48
3.2.1 Systembeschreibung von Mehrnutzer-MIMO-Systemen	49
3.2.2 Mehrnutzer-MIMO-Kapazität	51
3.2.3 Lineare Downlink-Mehrnutzer-MIMO-Signalverarbeitung	53
3.2.4 Gruppierung der Nutzer und zeitliche Reihenfolge	57
3.3 Metriken zur Bewertung von MIMO-Kanälen und zur Verifikation von MIMO-Kanalmodellen	60
3.4 Zusammenfassung	66

<b>4 Deterministisches Kanalmodell für urbane Gebiete und Vergleich mit Messungen</b>	<b>67</b>
4.1 Deterministische Kanalmodellierung . . . . .	68
4.1.1 Umgebungsmodell . . . . .	68
4.1.2 Strahlenoptisches Ausbreitungsmodell . . . . .	69
4.2 Beschreibung des Messsystems und der Messzenarien . . . . .	72
4.2.1 Messprinzip der Channel Sounder . . . . .	73
4.2.2 Messzenarien und Messantennen . . . . .	75
4.2.3 Beschreibung des Parameterschätzverfahrens RIMAX . . . . .	79
4.3 Verifikation des deterministischen Kanalmodells . . . . .	82
4.3.1 Erzeugung der Simulationsdaten . . . . .	82
4.3.2 Extrapolation von SISO auf MIMO . . . . .	84
4.3.3 Analyse der Empfangsleistung und der Zeitvarianz . . . . .	86
4.3.3.1 Analyse des langsamen Schwundes . . . . .	86
4.3.3.2 Analyse des schnellen Schwundes mithilfe von CDF und LCR . . . . .	90
4.3.3.3 Analyse des Doppler-Verhaltens . . . . .	91
4.3.4 Analyse der Frequenzselektivität . . . . .	96
4.3.5 Analyse der Richtungsselektivität . . . . .	100
4.3.6 Vergleich der MIMO-Metriken . . . . .	103
4.3.6.1 Analyse der Korrelationseigenschaften des MIMO-Übertragungskanals . . . . .	104
4.3.6.2 MIMO-Antennenanordnungen . . . . .	109
4.3.6.3 Analyse des <i>Multiplexing</i> -Gewinns . . . . .	109
4.3.6.4 Analyse der Diversität . . . . .	115
4.4 Zusammenfassung . . . . .	118
<b>5 Geometrisch-stochastische Kanalmodellierung</b>	<b>119</b>
5.1 Streu- <i>Cluster</i> als Mittel der Kanalmodellierung . . . . .	120
5.2 Parameterextraktion und Ermittlung der stochastischen Zufallsprozesse . . . . .	123
5.2.1 Simulationsszenarien . . . . .	124
5.2.2 Algorithmus zur automatischen Streu- <i>Cluster</i> -Extraktion . . . . .	125
5.2.3 Algorithmus zur Klassifizierung von Mehrwegepfaden . . . . .	128
5.2.4 Zusammenspiel der beiden Algorithmen . . . . .	131
5.3 Grundlegende Ergebnisse der Streu- <i>Cluster</i> -Analyse . . . . .	133
5.4 Prinzip des neuen geometrisch-stochastischen Mehrnutzer-MIMO-Kanalmodells	135
<b>6 Geometrisch-stochastisches Kanalmodell für urbane Mehrnutzer-MIMO-Systeme</b>	<b>141</b>
6.1 Mobilitätsmodell und zeitliche Rasterung . . . . .	141
6.2 Modellierung lokaler Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	143
6.2.1 Platzierung und Eigenschaften der Streuer . . . . .	144
6.2.2 Suchfunktion für den lokalen Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	146
6.2.3 Dynamisches Verhalten der Suchfunktion . . . . .	148
6.2.4 Berechnung der Winkel und der Verzögerungszeit der Pfade . . . . .	151
6.2.5 Berechnung der Streumatrix . . . . .	152
6.2.6 Berechnung der normierten Pfadübertragungsmatrix . . . . .	154
6.2.7 Veranschaulichung der Wirkungsweise des lokalen Streu- <i>Clusters</i> . . . . .	156

---

6.3	Modellierung des Wellenleitereffekts in Straßenschluchten . . . . .	158
6.3.1	Platzierung und Eigenschaften der Straßenschlucht-Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	159
6.3.2	Spiegelungsmethode . . . . .	163
6.3.3	Berechnung der Pfadeigenschaften . . . . .	165
6.4	Modellierung entfernter Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	166
6.4.1	Platzierung und Eigenschaften der entfernten Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	168
6.4.2	Platzierung und Eigenschaften der MT-Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	170
6.4.3	Modellierung der Sichtbereiche . . . . .	172
6.4.4	Anzahl der Streu- <i>Cluster</i> und der Sichtbereiche im Szenario . . . . .	176
6.4.5	Ein- und Ausblendvorgang entfernter und MT-Streu- <i>Cluster</i> . . . . .	177
6.4.6	Berechnung der Pfadeigenschaften . . . . .	178
6.5	Modellierung der Sichtverbindung (LOS) . . . . .	179
6.5.1	Modellierung der Sichtbereiche für LOS und NLOS . . . . .	179
6.5.2	Ein- und Ausblendvorgang des LOS-Pfades . . . . .	182
6.5.3	Eigenschaften des LOS-Pfades . . . . .	183
6.6	Mittlere Übertragungsdämpfung . . . . .	184
6.6.1	Mittlere Übertragungsdämpfung im NLOS-Fall . . . . .	185
6.6.2	Mittlere Übertragungsdämpfung im LOS-Fall . . . . .	186
6.6.3	Umschaltvorgang zwischen dem NLOS- und LOS-Wegdämpfungsmodell	188
6.7	Polarimetrische Gesamt-Pfadübertragungsmatrix der Streupfade . . . . .	188
6.8	Fazit . . . . .	192
<b>7</b>	<b>Verifikation des geometrisch-stochastischen Mehrnutzer-MIMO-Kanalmodells</b>	<b>195</b>
7.1	Datensätze zur Analyse des Gesamtmodells . . . . .	196
7.1.1	Simulationsdaten des geometrisch-stochastischen Mehrnutzer-MIMO-Kanalmodells . . . . .	196
7.1.2	<i>Ray Tracing</i> Daten flächiger Simulationen im Karlsruhe Szenario . . . . .	198
7.1.3	Systemsimulator zur Generierung von <i>Ray Tracing</i> Daten entlang einzelner Simulationsstrecken . . . . .	199
7.1.4	MIMO-Antennenanordnungen . . . . .	200
7.2	Verhalten des Funkkanals für eine charakteristische makrozellulare Ausbreitungssituation . . . . .	201
7.3	Analyse des Gesamtverhaltens bezüglich der Impulsverbreiterung und Winkelspreizung . . . . .	210
7.4	Analyse des Gesamtverhaltens bezüglich der MIMO-Metriken . . . . .	215
7.4.1	Korrelationseigenschaften des MIMO-Übertragungskanals . . . . .	215
7.4.2	Kapazität für unterschiedliche MIMO-Übertragungsverfahren und Antennenanordnungen . . . . .	217
7.5	Mehrnutzer-MIMO-Systemsimulationen . . . . .	224
7.5.1	Szenarien, Übertragungsverfahren und Beurteilungskriterien . . . . .	226
7.5.2	Ergebnisse der Mehrnutzer-MIMO-Simulationen . . . . .	231
7.6	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	238
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>241</b>
<b>Anhang</b>		<b>245</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

A.1	Waterfilling-Algorithmus	245
A.2	Materialparameter der Objekte im Umgebungsmodell der Stadt Karlsruhe	247
A.3	Beschreibung der Messantennen	248
A.4	Ergänzungen zur Verifikation des deterministischen Kanalmodells - Analyse der MIMO-Metriken	254
A.5	Modellparameter	257
A.6	Ergänzende Ergebnisse der Mehrnutzer-MIMO-Simulationen	261

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>267</b>
-----------------------------	------------