

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
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
2	Systemtheoretische Beschreibung des MIMO-Mobilfunkkanals	17
2.1	Übertragungskanal und richtungsaufgelöster Funkkanal	18
2.1.1	Beschreibung der Sende- und Empfangsantenne	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
3	Grundlagen der Mehrantennen-Übertragungstechnik	35
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

4	Deterministisches Kanalmodell für urbane Gebiete und Vergleich mit Messungen	67
4.1	Deterministische Kanalmodellierung	68
4.1.1	Umgebungsmodell	68
4.1.2	Strahlenoptisches Ausbreitungsmodell	69
4.2	Beschreibung des Messsystems und der Messszenarien	72
4.2.1	Messsprinzip der Channel Sounder	73
4.2.2	Messszenarien 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
5	Geometrisch-stochastische Kanalmodellierung	119
5.1	Streu-Cluster 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-Cluster-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-Cluster-Analyse	133
5.4	Prinzip des neuen geometrisch-stochastischen Mehrnutzer-MIMO-Kanalmodells	135
6	Geometrisch-stochastisches Kanalmodell für urbane Mehrnutzer-MIMO-Systeme	141
6.1	Mobilitätsmodell und zeitliche Rasterung	141
6.2	Modellierung lokaler Streu-Cluster	143
6.2.1	Platzierung und Eigenschaften der Streuer	144
6.2.2	Suchfunktion für den lokalen Streu-Cluster	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-Clusters	156

6.3	Modellierung des Wellenleitereffekts in Straßenschluchten	158
6.3.1	Platzierung und Eigenschaften der Straßenschlucht-Streu-Cluster . . .	159
6.3.2	Spiegelungsmethode	163
6.3.3	Berechnung der Pfadeigenschaften	165
6.4	Modellierung entfernter Streu-Cluster	166
6.4.1	Platzierung und Eigenschaften der entfernten Streu-Cluster	168
6.4.2	Platzierung und Eigenschaften der MT-Streu-Cluster	170
6.4.3	Modellierung der Sichtbereiche	172
6.4.4	Anzahl der Streu-Cluster und der Sichtbereiche im Szenario	176
6.4.5	Ein- und Ausblendvorgang entfernter und MT-Streu-Cluster	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
7	Verifikation des geometrisch-stochastischen Mehrnutzer-MIMO-Kanalmodells	195
7.1	Datensätze zur Analyse des Gesamtmodells	196
7.1.1	Simulationsdaten des geometrisch-stochastischen Mehrnutzer-MIMO-Kanalmodells	196
7.1.2	Ray Tracing Daten flächiger Simulationen im Karlsruhe Szenario . . .	198
7.1.3	Systemsimulator zur Generierung von Ray Tracing 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
8	Zusammenfassung	241
	Anhang	245

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
Literaturverzeichnis		267