

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bezeichnungen, Eigenschaften und Anwendungen technisch genutzter Frequenzen	2
1.2	Wellenausbreitung in verschiedenen Höhen	4
1.3	Frequenzen für Rund- oder Richtstrahlung	5
2	Physikalische Eigenschaften	
von Übertragungsmedien		9
2.1	Reflexion an einer Grenzfläche	9
2.2	Reflexion und Transmission bei geschichteten Medien	13
2.3	Streuung an rauen Oberflächen	21
2.4	Streuung an einer kleinen ebenen Fläche	24
2.5	Beugung an einer Kante	26
2.6	Wellenausbreitung in der Atmosphäre	30
2.6.1	Dämpfung der Atmosphäre	30
2.6.2	Einfluss der atmosphärischen Dämpfung auf Reichweiten	32
2.6.3	Dielektrische Eigenschaften der Atmosphäre	35
2.6.4	Brechung und Beugung in der Atmosphäre	36
2.7	Wellenausbreitung in der Ionosphäre	39
2.7.1	Aufbau und Bedeutung der Ionosphäre	39
2.7.2	Berechnung der Wellenausbreitung im Plasma	40
2.7.3	Transmission durch die Ionosphäre	44
2.7.4	Reflexion an der Ionosphäre	48
3	Mehrwegeausbreitung	53
3.1	Zweiwegeausbreitung	53
3.2	Kanalimpulsantwort und abgeleitete Größen bei Mehrwegeausbreitung	57
3.2.1	Impulsantwort des linearen und zeitinvarianten Kanals	57
3.2.2	Kanal-Übertragungsfunktion	58
3.2.3	Laufzeitspreizung	61
3.2.4	Dopplerfrequenz	62

3.2.5	Dopplerspektrum	65
3.2.6	Fading	66
3.2.7	Verteilungsfunktionen der Empfangsspannung	69
4	Modellierung von Funkkanälen	75
4.1	Empirische Kanalmodelle	76
4.1.1	ITU Recommendations	76
4.1.2	Feldstärkevorhersage nach Okumura	76
4.1.3	Feldstärkevorhersage nach Hata/Okumura	78
4.1.4	Inhouse Modell: Cost 259 Multi-Wall-Modell	79
4.2	Deterministische Kanalmodelle	79
4.2.1	Grundlagen	79
4.2.2	Erstellung des Szenarienmodells	80
4.2.3	Ermittlung der Ausbreitungspfade zwischen Sender und Empfänger	83
4.2.4	Berechnung der Übertragung und Auswertung	85
5	Messverfahren für den Funkkanal	89
5.1	Schmalbandmessung	89
5.2	Breitbandmessung	90
5.2.1	Periodic Pulse Sounding	90
5.2.2	Chirp-Technik mit inverser FFT	91
5.2.3	Pulskompressionsverfahren	92
5.2.4	Korrelationsempfänger für Pulskompressionsverfahren	93
6	Bestimmung der Richtung einfallender Wellen durch Peilung	99
6.1	Klassische Peilverfahren	100
6.1.1	Schmalbandige Einkanalpeiler	100
6.1.2	Schmalbandige Mehrkanalpeiler	106
6.1.3	Breitbandige Ein- und Mehrkanalpeiler	106
6.1.4	Interferometer	107
6.2	Peilung mit Gruppenantennen	108
6.2.1	Datenmodell	108
6.2.2	Peilung durch Maximierung von SNR	110
6.2.3	Peilung durch Korrelation	112
6.2.4	MUSIC-Algorithmus	113
6.2.5	ESPRIT-Algorithmus	117
7	Mehrantennensysteme im Mobilfunk	123
7.1	Klassische Antennendifferenzialität	123
7.1.1	Leistungsgewinn bei gleicher Wahrscheinlichkeit	124
7.1.2	Wahrscheinlichkeitsverbesserung bei gleichem Empfangspegel	126
7.2	Räumliche Entzerrung (MIMO)	127

7.2.1	Zero-Forcing (ZF)	129
7.2.2	Minimum-Mean-Square-Error-Estimation (MMSE)	131
7.2.3	Matched-Filter (MF)	135
7.2.4	Räumliche Vorverzerrung	136
7.3	Korrelation der Antennencharakteristiken	139
7.4	Kalibrierung von MIMO-Systemen	144
7.5	Video-Demonstration der räumlichen Entzerrung	149
8	Anhang	155
8.1	Antennen im System	155
8.1.1	Abstrahlung von einer Antenne	155
8.1.2	Empfang durch eine Antenne	159
8.1.3	Übertragungsfaktor zwischen zwei Antennen	163
8.2	Mikrowellenradiometrie	164
8.2.1	Prinzip	164
8.2.2	Abschätzung der maximalen Reichweite	165
Sachverzeichnis	169