

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Physikalische Eigenschaften von Übertragungsmedien</b>	<b>9</b>
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
<b>3</b>	<b>Mehrwegeausbreitung</b>	<b>53</b>
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
<b>4</b>	<b>Modellierung von Funkkanälen . . . . .</b>	<b>75</b>
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
<b>5</b>	<b>Messverfahren für den Funkkanal . . . . .</b>	<b>89</b>
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
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Richtung einfallender Wellen durch Peilung . . . . .</b>	<b>99</b>
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
<b>7</b>	<b>Mehrantennensysteme im Mobilfunk . . . . .</b>	<b>123</b>
7.1	Klassische Antennendiversität . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>155</b>
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
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>169</b>