

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	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
	Literatur .....	7
<b>2</b>	<b>Physikalische Eigenschaften von Übertragungsmedien</b> .....	9
2.1	Grenzflächen: Reflexion und Transmission .....	9
2.2	Reflexion und Transmission bei geschichteten Medien .....	13
2.3	Streuung an rauen Oberflächen .....	24
2.4	Streuung an einer kleinen ebenen Fläche .....	26
2.5	Beugung an einer Kante .....	29
2.6	Wellenausbreitung in der Atmosphäre .....	33
2.6.1	Dämpfung der Atmosphäre .....	33
2.6.2	Einfluss der atmosphärischen Dämpfung auf Reichweiten .....	37
2.6.3	Dielektrische Eigenschaften der Atmosphäre .....	38
2.6.4	Brechung und Beugung in der Atmosphäre .....	40
2.7	Wellenausbreitung in der Ionosphäre .....	43
2.7.1	Aufbau und Bedeutung der Ionosphäre .....	43
2.7.2	Berechnung der Wellenausbreitung im Plasma .....	44
2.7.3	Transmission durch die Ionosphäre .....	48
2.7.4	Reflexion an der Ionosphäre .....	51
	Literatur .....	54
<b>3</b>	<b>Mehrwegeausbreitung</b> .....	57
3.1	Zweiwegeausbreitung .....	57
3.2	Kanalimpulsantwort und abgeleitete Größen bei Mehrwegeausbreitung .	61
3.2.1	Impulsantwort des linearen und zeitinvarianten Kanals .....	61
3.2.2	Kanal-Übertragungsfunktion .....	62

3.2.3	Laufzeitspreizung . . . . .	65
3.2.4	Dopplerfrequenz . . . . .	67
3.2.5	Dopplerspektrum . . . . .	69
3.2.6	Fading . . . . .	70
3.2.7	Verteilungsfunktionen der Empfangsspannung . . . . .	73
	Literatur . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Modellierung von Funkkanälen . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1	Empirische Kanalmodelle . . . . .	80
4.1.1	ITU-Empfehlungen . . . . .	80
4.1.2	Feldstärkevorhersage nach Okumura . . . . .	81
4.1.3	Feldstärkevorhersage nach Hata/Okumura . . . . .	82
4.1.4	Inhouse Modell: Cost 259 Multi-Wall-Modell . . . . .	83
4.1.5	VHF-UHF: mobile-to-mobile . . . . .	84
4.2	Deterministische Kanalmodelle . . . . .	85
4.2.1	Grundlagen . . . . .	85
4.2.2	Erstellung des Szenarienmodells . . . . .	86
4.2.3	Ermittlung der Ausbreitungspfade zwischen Sender und Empfänger . . . . .	89
4.2.4	Berechnung der Übertragung und Auswertung . . . . .	91
	Literatur . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Messverfahren für den Übertragungskanal . . . . .</b>	<b>97</b>
5.1	Schmalbandmessung . . . . .	97
5.2	Breitbandmessung . . . . .	98
5.2.1	Periodic Pulse Sounding . . . . .	98
5.2.2	Chirp- und Multisinus-Signale . . . . .	99
5.2.3	Pulskompressionsverfahren . . . . .	100
5.2.4	Korrelationsempfänger für Pulskompressionsverfahren . . . . .	101
	Literatur . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Richtung einfallender Wellen durch Peilung . . . . .</b>	<b>107</b>
6.1	Klassische Peilverfahren . . . . .	108
6.1.1	Schmalbandige Einkanalpeiler . . . . .	108
6.1.2	Schmalbandige Mehrkanalpeiler . . . . .	114
6.1.3	Breitbandige Ein- und Mehrkanalpeiler . . . . .	114
6.1.4	Interferometer . . . . .	115
6.2	Peilung mit Gruppenantennen . . . . .	116
6.2.1	Systemmodell . . . . .	116
6.2.2	Peilung durch Maximierung von SNR . . . . .	119
6.2.3	Peilung durch Korrelation . . . . .	121
6.2.4	MUSIC-Algorithmus . . . . .	123

---

6.2.5	ESPRIT-Algorithmus	127
	Literatur	131
<b>7</b>	<b>Mehrantennensysteme im Mobilfunk</b>	<b>133</b>
7.1	Klassische Antennendiversität	133
7.1.1	Leistungsgewinn bei gleicher Wahrscheinlichkeit	134
7.1.2	Wahrscheinlichkeitsverbesserung bei gleichem Empfangspegel	136
7.2	Räumliche Entzerrung (MIMO)	136
7.2.1	Zero-Forcing (ZF)	139
7.2.2	Minimum-Mean-Squared-Error-Estimation (MMSE)	141
7.2.3	Matched-Filter (MF)	145
7.2.4	Räumliche Vorverzerrung	146
7.3	Korrelation der Antennencharakteristiken	149
7.4	Kalibrierung von MIMO-Systemen	154
7.5	Video-Demonstration der räumlichen Entzerrung	159
	Literatur	163
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>165</b>
8.1	Antennen im System	165
8.1.1	Abstrahlung von einer Antenne	165
8.1.2	Empfang durch eine Antenne	169
8.1.3	Übertragungsfaktor zwischen zwei Antennen	173
8.2	Mikrowellenradiometrie	174
8.2.1	Prinzip	174
8.2.2	Abschätzung der maximalen Reichweite	175
8.3	Reflexion und Transmission in Vektoralgebra	178
8.4	Wiener Filter	180
8.5	Matrixalgebra	181
	Literatur	183
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>185</b>