

1	Einleitung	1
1.1	Bezeichnungen, Eigenschaften und Anwendungen technisch genutzter Frequenzen	2
1.2	Wellenausbreitung in verschiedenen Höhen	5
1.3	Frequenzen für Rund- oder Richtstrahlung	6
	Literatur	7
2	Physikalische Eigenschaften von Übertragungsmedien	9
2.1	Grenzflächen: Reflexion und Transmission	9
2.2	Reflexion und Transmission bei geschichteten Medien	14
2.3	Streuung an rauen Oberflächen	26
2.4	Streuung an einer kleinen ebenen Fläche	28
2.5	Beugung an einer Kante	31
	2.5.1 Knife-Edge Diffraction (KED)	31
	2.5.2 Uniform Asymptotic Theory (UAT)	34
2.6	Wellenausbreitung in der Atmosphäre	37
	2.6.1 Dämpfung der Atmosphäre	37
	2.6.2 Einfluss der atmosphärischen Dämpfung auf Reichweiten	40
	2.6.3 Dielektrische Eigenschaften der Atmosphäre	42
	2.6.4 Brechung und Beugung in der Atmosphäre	43
2.7	Wellenausbreitung in der Ionosphäre	46
	2.7.1 Aufbau und Bedeutung der Ionosphäre	46
	2.7.2 Berechnung der Wellenausbreitung im Plasma	48
	2.7.3 Transmission durch die Ionosphäre	51
	2.7.4 Reflexion an der Ionosphäre	55
	Literatur	58
3	Mehrwegeausbreitung	59
3.1	Zweiwegeausbreitung	59
3.2	Kanalimpulsantwort und abgeleitete Größen bei Kanalimpulsantwort	63
	3.2.1 Impulsantwort des linearen und zeitinvarianten Kanals	63

3.2.2	Kanal-Übertragungsfunktion	64
3.2.3	Laufzeitspreizung.	66
3.2.4	Dopplerfrequenz.	68
3.2.5	Dopplerspektrum	71
3.2.6	Fading.	72
3.2.7	Verteilungsfunktionen der Empfangsspannung	75
	Literatur.	79
4	Modellierung von Funkkanälen.	81
4.1	Empirische Kanalmodelle	82
4.1.1	ITU-Empfehlungen	82
4.1.2	Feldstärkevorhersage nach Okumura	83
4.1.3	Feldstärkevorhersage nach Hata/Okumura.	84
4.1.4	Inhouse Modell: Cost 259 Multi-Wall-Modell.	85
4.1.5	VHF-UHF: mobile-to-mobile	86
4.2	Deterministische Kanalmodelle.	87
4.2.1	Grundlagen.	87
4.2.2	Erstellung des Szenarienmodells	88
4.2.3	Ermittlung der Ausbreitungspfade zwischen Sender und Empfänger.	91
4.2.4	Berechnung der Übertragung und Auswertung	95
4.2.5	Interpolation und Wichtung	98
4.3	Raytracer <i>RAY</i>	102
4.3.1	Pfadsuche	103
4.3.2	Berechnung der Feldstärke.	104
4.3.3	Beispiele.	104
	Literatur.	110
5	Messverfahren für den Übertragungskanal	113
5.1	Schmalbandmessung	113
5.2	Breitbandmessung	114
5.2.1	Periodic Pulse Sounding.	114
5.2.2	Chirp- und Multisinus-Signale.	115
5.2.3	Pulskompressionsverfahren	116
5.2.4	Korrelationsempfänger für Pulskompressionsverfahren	118
	Literatur.	122
6	Bestimmung der Richtung einfallender Wellen durch Peilung.	125
6.1	Klassische Peilverfahren	126
6.1.1	Schmalbandige Einkanalpeiler.	126
6.1.2	Schmalbandige Mehrkanalpeiler	132
6.1.3	Breitbandige Ein- und Mehrkanalpeiler.	132
6.1.4	Interferometer.	133

6.2	Peilung mit Gruppenantennen	134
6.2.1	Systemmodell	134
6.2.2	Peilung durch Maximierung von SNR	137
6.2.3	Peilung durch Korrelation	139
6.2.4	MUSIC-Algorithmus	141
6.2.5	ESPRIT-Algorithmus	145
	Literatur.	149
7	Mehrantennensysteme im Mobilfunk	151
7.1	Klassische Antennendiversität	151
7.1.1	Leistungsgewinn bei gleicher Wahrscheinlichkeit	152
7.1.2	Wahrscheinlichkeitsverbesserung bei gleichem Empfangspegel	154
7.2	Räumliche Entzerrung (MIMO)	155
7.2.1	Zero-Forcing (ZF)	157
7.2.2	Minimum-Mean-Squared-Error-Estimation (MMSE)	159
7.2.3	Matched-Filter (MF).	163
7.2.4	Räumliche Vorverzerrung	164
7.3	Korrelation der Antennencharakteristiken	167
7.4	Kalibrierung von MIMO-Systemen	172
7.5	Video-Demonstration der räumlichen Entzerrung	177
	Literatur.	181
8	Anhang	183
8.1	Antennen im System	183
8.1.1	Abstrahlung von einer Antenne	183
8.1.2	Empfang durch eine Antenne	187
8.1.3	Übertragungsfaktor zwischen zwei Antennen	191
8.2	Mikrowellenradiometrie.	192
8.2.1	Prinzip	192
8.2.2	Abschätzung der maximalen Reichweite	193
8.3	Reflexion und Transmission in Vektoralgebra	196
8.4	Wiener Filter	197
8.5	Matrixalgebra.	199
	Literatur.	201
	Stichwortverzeichnis	203