

# Inhalt

**Vorwort — IX**

**Danksagung — XVII**

**Notation — XIX**

**Sätze, Lemmata, Korollare und Trivialitäten — XXI**

**Arithmetische Vorrangregeln — XXIII**

**1      Einleitung — Moderne Mobilkommunikation und die innere physikalische Schicht im Transceiver — 1**

- 1.1      Von Systemen und Signalen — 1
- 1.2      Warum noch ein Buch über Mobilkommunikation? — 5
- 1.3      Struktur dieses Buchs — 6
- 1.3.1    Kapitel 1: Einleitung — Moderne Mobilkommunikation und die innere physikalische Schicht — 6
- 1.3.2    Kapitel 2: Abtastung — Abtastsatz — 6
- 1.3.3    Kapitel 3: Mehrantennentechniken — 10
- 1.3.4    Kapitel 4: Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) — 12

**2      Abtastung — Abtastsatz — 14**

- 2.1      Einführung — 14
- 2.2      Von zeitdiskret zu zeitstetig — 16
- 2.3      „Satz I“ und „Satz II“ in [1] von 1933 — 53
- 2.4      „Satz 13“ aus [2] von 1948 — 57
- 2.5      „Satz 1“ in [3] von 1949 — 77
- 2.6      Integration und Riemann'sches Integral — 78
- 2.7      Algebra, Maß und einfache Funktionen — 84
- 2.8      Einschränkungen des Riemann'schen Integrals — 86
- 2.9      Lebesgue-Integral — 86
- 2.10    Riemann-Stieltjes-Integral — 89
- 2.11    Fourier-Reihe — 91
- 2.12    Fourier-Transformation und Spektrum — 97
- 2.13    Beweis des Abtastsatzes — 114
- 2.14    Zwei einfache Beispiele — 117
- 2.14.1   Monochromatisches Signal mit der natürlichen Frequenz  $W/2$  — 117
- 2.14.2   Monochromatisches Signal mit der natürlichen Frequenz  $W$  — 121
- 2.15    Wichtige Eigenschaften der Dirac'schen Delta-Distribution — 125
- 2.15.1   Distributionen — 125

2.15.2	Dirac'sche Delta-Distribution —	129
2.15.3	Funktionsfolgen, die zur Delta-Distribution konvergieren —	136
2.15.4	Fourier-Transformation zum Zweiten —	143
2.15.5	Dirac-Kamm —	149
2.16	Abtastsatz 2.21 zum Zweiten —	157
2.17	„Aliasing“ —	160
2.18	Abtastsatz im Frequenzbereich —	164
2.19	Abtastung im Bandpassbereich —	166
2.19.1	Bandpasssignal —	166
2.19.2	Bandpasssystem —	170
2.19.3	Abtastsatz für Bandpasssignale —	171
2.20	Bandbreite eines Signals —	183
2.20.1	Bandbreiten-Dilemma —	183
2.20.2	Sieben gängige Definitionen der Bandbreite —	185
2.21	Klassische Unschärferelation —	186
2.21.1	Betrachtetes Signal —	186
2.21.2	Spektrum —	190
2.21.3	Resultierende klassische Unschärfe —	193
2.22	Was die Welt jetzt braucht, ist ... die mehrdimensionale Fourier-Reihe (MFS) und die mehrdimensionale Fourier-Transformation (MFT) —	194
2.22.1	Schauplatz der Ereignisse —	194
2.22.2	Mehrdimensionale Fourierkoeffizienten und mehrdimensionale Fourier-Reihen (MFS) —	198
2.22.3	Mehrdimensionale Fourier-Transformation (MFT) und mehrdimensionale inverse Fourier-Transformation (MIFT) —	200
2.23	Mehrdimensionaler Abtastsatz —	204
<b>3</b>	<b>Mehrantennentechniken —</b>	<b>207</b>
3.1	Einführung —	207
3.2	Krummlinige Koordinatensysteme —	222
3.2.1	Koordinatentransformationen —	222
3.2.2	Tangentialvektoren in krummlinigen Koordinatensystemen —	223
3.2.3	Normale Einheitsvektoren in krummlinigen Koordinatensystemen —	225
3.2.4	Kontravariante und kovariante Vektoren —	226
3.2.5	Koordinatentransformationsgesetz für kontravariante Komponenten —	227
3.2.6	Koordinatentransformationsgesetz für kovariante Komponenten —	230
3.2.7	Orthogonale krummlinige Koordinaten —	232
3.2.8	Beispiel 1: Zylindrische Koordinaten —	235
3.2.9	Beispiel 2: Kugelkoordinaten —	237
3.2.10	Divergenz, Rotation und Laplace-Operator —	238
3.3	Tensoren —	239
3.3.1	Bedeutung des Begriffs Tensor —	239

3.3.2	Einstein'sche Summenkonvention —	240
3.3.3	Kontravariante Tensoren —	241
3.3.4	Kovarianter Tensor —	242
3.3.5	Levi-Civita (Pseudo)-Tensor — Epsilon-Tensor —	243
3.3.6	Rotation der Rotation eines Vektorfeldes —	253
3.4	Elektromagnetische Wellen im Vakuum —	256
3.5	Ebene Welle im freien Raum —	260
3.6	Einfache Gruppenantenne —	264
3.6.1	Phasenunterschiede einer empfangenen ebenen Welle —	264
3.6.2	Wahl des Abstands benachbarter Antennenelemente — räumlicher Abtastsatz —	267
3.6.3	Antennendiagramm einer Gruppenantenne —	270
3.7	Beugung in der Optik — ein kleiner Exkurs —	285
3.7.1	Beugung am Einzelspalt —	285
3.7.2	Beugung am optischen Gitter —	294
3.8	Kurzer Überblick über die Wahrscheinlichkeitsrechnung —	299
3.8.1	Stochastik, Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik —	299
3.8.2	Permutation, Variationen und Kombinationen —	300
3.8.3	Endliche Wahrscheinlichkeitsfelder —	305
3.8.4	Borelsche Wahrscheinlichkeitsfelder —	330
3.8.5	Zufallsvariablen und Verteilungsfunktionen —	334
3.8.6	Mathematische Erwartung —	339
3.8.7	Funktionen von Zufallsvariablen und „Simulationslemma“ —	341
3.8.8	Bedingte Wahrscheinlichkeit und Satz von Bayes in borelschen Wahrscheinlichkeitsfeldern —	354
3.8.9	Mehrdimensionale Zufallsvariablen —	357
3.8.10	Stochastische Prozesse —	379
3.9	Diversität mit mehreren Empfangsantennen —	468
3.9.1	Systemmodell —	468
3.9.2	Likelihood-Funktion —	527
3.9.3	Hinreichende Statistik —	543
3.9.4	Signalangepasst gefiltertes Rauschen —	547
3.9.5	Dekorrelieren des signalangepasst gefilterten Rauschens: Cholesky-Zerlegung —	550
3.9.6	Dekorrelieren des signalangepasst gefilterten Rauschens: Diskrete Karhunen-Loève-Transformation —	551
3.9.7	Optimale Empfänger —	553
3.9.8	Optimale Detektion übertragener komplexer Datenfolgen —	578
3.9.9	Empfänger mit Maximum-Likelihood-Folgendetektion —	581
3.9.10	Anschauliche Betrachtung des Viterbi-Algorithmus —	588
3.9.11	Maximum-Likelihood-Folgendetektion mit dem Viterbi-Algorithmus —	596

## **XXVIII — Inhalt**

3.9.12	Leistungsanalyse des Viterbi-Algorithmus —	<b>601</b>
3.9.13	Soft Output Viterbi-Algorithmus — „SIMPLE RULE“ —	<b>619</b>
3.9.14	Soft Output Viterbi-Algorithmus — „HUBER RULE“ —	<b>624</b>
3.9.15	Soft Output Viterbi-Algorithmus — „BATTAIL RULE“ —	<b>627</b>
3.9.16	Empfänger mit Maximum-a-posteriori-Wahrscheinlichkeit-Symboldetektion —	<b>633</b>
3.10	Diversität mit mehreren Sendeantennen —	<b>666</b>
3.11	Kurzer Überblick über die Informationstheorie —	<b>678</b>
3.11.1	Information —	<b>678</b>
3.11.2	Entropie —	<b>682</b>
3.11.3	Kanalkapazität —	<b>696</b>
3.11.4	Komplexe zirkularsymmetrische Normalverteilung —	<b>699</b>
3.12	Raummultiplex —	<b>703</b>
<b>4</b>	<b>Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) —</b>	<b>713</b>
4.1	Einführung —	<b>713</b>
4.2	Zeitstetige Modellierung —	<b>715</b>
4.2.1	OFDM-Signal —	<b>715</b>
4.2.2	Leistungsdichtespektrum —	<b>722</b>
4.3	Zeitdiskrete Modellierung —	<b>734</b>
4.4	Diagonalisierung von zirkulanten Matrizen —	<b>736</b>
4.5	Übertragung und Empfang über Mehrwegekanäle —	<b>743</b>
4.6	Kanalkapazität —	<b>755</b>
4.7	Einträger-Frequenzvielfachzugriff (SC-FDMA) —	<b>762</b>

## **Literatur — 769**

## **Stichwortverzeichnis — 781**