

## Inhaltsverzeichnis

*Hinweis:* Mit \* gekennzeichnete Abschnitte sind als vertiefende Ergänzungen gedacht oder enthalten aufwändige Rechnungen. Sie können ohne Verlust an Verständlichkeit der weiteren Abschnitte übersprungen werden.

1	Einführung.....	1
1.1	Historischer Überblick.....	1
1.2	Kommunikationsmodell .....	3
1.3	Nachrichtenkanäle .....	4
1.4	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen.....	8
1.4.1	Einführung .....	8
1.4.2	Telegraphengleichung* .....	9
1.4.2.1	Herleitung und Lösung der Telegraphengleichung* .....	10
1.4.2.2	Lösung der Telegraphengleichung für sinusförmige Zeitabhängigkeit* .....	13
1.4.2.3	Leitungsabschluss und Reflexionen* .....	14
2	Nachrichtenquellen.....	19
2.1	Einführung.....	19
2.2	Audiosignalquellen.....	20
2.2.1	Hörschwelle .....	20
2.2.2	Mikrofon .....	20
2.2.3	Sprachtelefonie, Hörrundfunk, Compact Disc .....	21
2.2.4	Digitale Audioquellen .....	22
2.3	Bild- und Videosignalquellen, Multimedia.....	22
2.3.1	Überblick.....	22
2.3.2	Analoges Fernsehen .....	23
2.3.2.1	Schwarz-Weiß-Fernsehen.....	23
2.3.2.2	Farbfernsehen .....	25
2.3.3	Fernkopierer .....	26
2.3.4	Bildtelefonie und Video-Konferenz .....	27
2.3.5	Digitale Bilder, digitales Fernsehen und Video .....	27
2.4	Digital-Analog-Umsetzung.....	29
2.4.1	Einführung .....	29
2.4.2	Abtasttheorem .....	30
2.4.3	Quantisierung .....	32
2.4.4	Quantisierungsgeräusch .....	36
2.4.5	Pulse-Code-Modulation in der Telefonie.....	40
2.4.5.1	Abschätzung der Wortlänge .....	40
2.4.5.2	Kompanierung .....	41
2.4.5.3	13-Segment-Kennlinie.....	42
2.4.5.4	DPCM und ADPCM .....	46
2.4.6	Delta-Sigma-A/D-Umsetzer* .....	47
2.5	Aufgaben zu Abschnitt 2 .....	52
2.5.1	Aufgaben.....	52
2.5.2	Lösungen.....	53

<b>3</b>	<b>Amplitudenmodulation.....</b>	<b>54</b>
3.1	Analoge Modulation eines Sinusträgers .....	54
3.2	Prinzip der Amplitudenmodulation .....	56
3.3	Gegentakt-Modulator und Ring-Modulator .....	58
3.4	Zweiseitenband-AM mit Träger .....	59
3.5	Kohärente AM-Demodulation .....	62
3.6	AM-Demodulation mit dem Hüllkurvendetektor .....	63
3.7	Einseitenband-AM.....	63
3.7.1	Filtermethode .....	64
3.7.2	Phasenmethode .....	65
3.8	Restseitenband-AM .....	67
3.9	Quadraturamplitudenmodulation .....	68
3.10	Anwendungsbeispiele .....	70
3.10.1	Trägerfrequenzsystem in der Telefonie .....	70
3.10.2	Hörrundfunkempfänger.....	71
3.10.3	Zweiseitenband-AM zur Stereoundfunkübertragung .....	74
3.11	Einfluss von Verzerrungen .....	76
3.11.1	Lineare Verzerrungen .....	76
3.11.2	Einfluss nichtlinearer Kennlinien.....	77
3.11.2.1	Kubische Parabel.....	77
3.11.2.2	Kreuzmodulation.....	80
3.12	Störungen durch Rauschsignale.....	81
3.12.1	Einführung .....	81
3.12.2	Zweiseitenband-AM ohne Träger .....	82
3.12.3	Zweiseitenband mit Träger .....	85
3.13	Tiefpass- und Bandpass-Prozesse*.....	85
3.14	Aufgaben zu Abschnitt 3 .....	88
3.14.1	Aufgaben.....	88
3.14.2	Lösungen.....	92
<b>4</b>	<b>Frequenz- und Phasenmodulation .....</b>	<b>100</b>
4.1	Einführung.....	100
4.2	Zeigerdiagramm .....	103
4.3	Spektrum von FM-Signalen.....	103
4.4	FM-Demodulation .....	108
4.4.1	Konventioneller FM-Empfänger.....	108
4.4.2	FM-Demodulation mit dem Phasenregelkreis .....	111
4.5	Störungen durch Rauschsignale.....	112
4.6	Schwellwerteffekt und Dimensionierungsbeispiel .....	115
4.6.1	FM-Schwelle.....	115
4.6.2	Dimensionierungsbeispiel.....	116
4.7	Preemphasis und Deemphasis .....	118
4.8	Anmerkungen zur Bewertung von Modulationsverfahren.....	120
4.9	Phasenregelkreis* .....	121
4.10	SNR-Abschätzung für die FM- und PM-Demodulation* .....	126
4.11	Aufgaben zu Abschnitt 4 .....	129
4.11.1	Aufgaben.....	129
4.11.2	Lösungen.....	132

5	Rauschen in Kommunikationssystemen .....	138
5.1	Einführung .....	138
5.2	Rauschen und Kettenschaltungen von Verstärkern .....	139
5.2.1	Äquivalente Rauschbandbreite.....	139
5.2.2	Rauschquelle bei angepasster Last.....	140
5.2.3	Rauschen an Verstärkern.....	141
5.2.4	Kettenschaltung von Verstärkern.....	143
5.2.5	Signalübertragung über eine Leitung mit Zwischenverstärkern.....	144
5.3	Beispiel Satellitenkommunikation .....	151
5.4	Aufgaben zu Abschnitt 5 .....	156
5.4.1	Aufgaben.....	156
5.4.2	Lösungen.....	156
6	Digitale Übertragung im Basisband .....	158
6.1	Einführung.....	158
6.2	Scrambler.....	159
6.3	Leitungscodierung .....	163
6.3.1	Binäre Leitungscodes .....	163
6.3.2	Ternäre Leitungscodes .....	165
6.4	Aufgaben zu Abschnitt 6.1 bis 6.3.....	168
6.4.1	Aufgaben.....	168
6.4.2	Lösungen.....	170
6.5	Optimalempfänger für bekannte Signale in AWGN.....	173
6.5.1	Übertragungsmodell.....	173
6.5.2	Trägersignale.....	173
6.5.2.1	Unipolare und bipolare Übertragung.....	174
6.5.2.2	Mehrpegelübertragung .....	175
6.5.2.3	Orthogonale Übertragung.....	176
6.5.3	Matched-Filter-Empfänger.....	177
6.5.4	Optimalempfänger für uni- und bipolare Signale in AWGN .....	181
6.5.5	Bitfehlerwahrscheinlichkeiten.....	185
6.5.5.1	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für die uni- und bipolare Übertragung.....	185
6.5.5.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für die $M$ -stufige PAM-Übertragung.....	188
6.5.5.3	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für die Übertragung orthogonaler Signale.....	190
6.5.6	Vergleich von PAM und orthogonaler Übertragung .....	194
6.6	Übertragung im Tiefpass-Kanal.....	196
6.6.1	Verzerrungen im Tiefpass-Kanal .....	196
6.6.2	Nyquist-Bandbreite und Impulsformung .....	198
6.6.3	Mehrstufige Pulsamplitudenmodulation .....	201
6.6.4	Kanalkapazität.....	203
6.6.5	Entzerrer.....	203
6.7	Leistungsdichtespektren digitaler Basisbandsignale* .....	209
6.7.1	Mittlere AKF und mittleres LDS* .....	209
6.7.2	Digitale Basisbandsignale ohne Gedächtnis*.....	211
6.7.3	Digitale Basisbandsignale mit Gedächtnis* .....	214
6.7	RC-Tiefpass als Ersatz für ein Matched-Filter* .....	217

6.8	Aufgaben zu den Abschnitten 6.5 und 6.6.....	219
6.8.1	Aufgaben.....	219
6.8.2	Lösungen.....	221
<b>7</b>	<b>Digitale Modulation mit Sinusträger.....</b>	<b>225</b>
7.1	Einführung.....	225
7.2	Äquivalentes Tiefpass-Signalmodell.....	225
7.3	Digitale Quadraturamplitudenmodulation (QAM).....	228
7.3.1	Grundprinzip der digitalen QAM.....	228
7.3.2	Ein- Austastung (OOK).....	230
7.3.3	Binäre Phasenumtastung (BPSK).....	231
7.3.4	Amplitudenumtastung (ASK).....	231
7.3.5	Quarternäre Phasenumtastung (QPSK).....	233
7.3.6	Höherstufige digitale Modulationsverfahren (M-QAM, M-PSK).....	236
7.3.7	Differenzielle Phasenumtastung (DPSK).....	238
7.3.8	Frequenzumtastung mit stetiger Phase (CPFSK).....	241
7.3.8.1	CPFSK-Signal.....	241
7.3.8.2	Spektren von CPFSK-Signalen.....	245
7.3.8.3	Empfänger für CPFSK-Signale.....	247
7.3.9	Minimum-Shift Keying (MSK).....	248
7.3.10	Gaussian Minimum-Shift Keying (GMSK).....	254
7.4	Trägerregelung zur kohärenten Demodulation.....	259
7.4.1	Trägerrückgewinnung mit quadrierendem Regelkreis.....	259
7.4.2	Trägerrückgewinnung mit der Costas-Schleife.....	260
7.5	Aufgaben zu Abschnitt 7.....	260
7.5.1	Aufgaben.....	260
7.5.2	Lösungen.....	262
<b>8</b>	<b>Digitale Modulation für den Mobilfunk.....</b>	<b>264</b>
8.1	Mobilfunkkanal.....	264
8.2	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).....	268
8.2.1	Multiträgersystem.....	269
8.2.2	OFDM_Übertragung für WLAN.....	275
8.2.3	OFDM-Übertragung für DVB-T.....	276
8.3	Code Division Multiple Access (CDMA).....	282
8.3.1	Spreizbandtechnik für den Vielfachzugriff.....	282
8.3.2	Spreizbandtechnik mit RAKE-Empfänger.....	287
8.4	Berechnung der Empfangsgrundimpulse zur OFDM-Übertragung*.....	290
8.4.1	Ohne Schutzabstand*.....	290
8.4.2	Mit Schutzabstand*.....	292
8.5	Aufgaben zu Abschnitt 8.....	294
8.5.1	Aufgaben.....	294
8.5.2	Lösungen.....	294
	Formelzeichen und Symbole.....	296
	Abkürzungen und Akronyme.....	300
	Literaturverzeichnis.....	303
	Sachwortverzeichnis.....	308