Grundlagen der drahtlosen Kommunikation

Hans Kummer

© 2021: Elektor Verlag GmbH, Aachen.
1. Auflage 2021

Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

Erklärung

Der Autor und der Herausgeber dieses Buches haben alle Anstrengungen unternommen, um die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Informationen sicherzustellen. Sie übernehmen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die durch Fehler oder Auslassungen in diesem Buch verursacht werden, unabhängig davon, ob diese Fehler oder Auslassungen auf Fahrlässigkeit, Unfall oder andere Ursachen zurückzuführen sind.

Umschlaggestaltung: Elektor, Aachen

Satz und Aufmachung: Hans Kummer
Druck: Ipskamp Printing, Enschede, Niederlande

ISBN 978-3-89576-449-3
Ebook 978-3-89576-450-9

Elektor-Verlag GmbH, Aachen
www.elektor.de

Elektor ist Teil der Unternehmensgruppe Elektor International Media (EIM), der weltweit wichtigsten Quelle für technische Informationen und Elektronik-Produkte für Ingenieure und Elektronik-Entwickler und für Firmen, die diese Fachleute beschäftigen. Das internationale Team von Elektor entwickelt Tag für Tag hochwertige Inhalte für Entwickler und DIY-Elektroniker, die über verschiedene Medien (Magazine, Videos, digitale Medien sowie Social Media) in zahlreichen Sprachen verbreitet werden. **www.elektor.de**

Inhalt

1. Geschichte der Kommunikation 17

1.1 Kommunikation im 18. und 19. Jahrhundert 17
1.2 Die Anfänge der drahtgebundenen Kommunikation 20
1.2.1 Übertragung von Zeichen 20
1.2.2 Das Telefon 24
1.3 Drahtlose Kommunikation 26
1.3.1 Entwicklung der theoretischen Grundlagen 26
1.3.2 Erste Nutzung der elektromagnetischen Wellen 28
1.4 Technik der ersten Sender und Empfänger 30
1.4.1 Funkensender 30
1.4.2 Der Durchbruch: die «Radioröhre» 33
1.4.3 Anwendungen der «Radio-Röhren» 35
1.5 Die Hochzeit des Rundfunks 37
1.6 Die Zeit des Zweiten Weltkriegs 38
1.7 Fernsehen 39
1.8 Die Entwicklung der Halbleiter 40
1.9 Industrialisierung der Halbleiterproduktion 43
1.10 Signalverarbeitung im Zeitalter der Digitalisierung 49

2. Technische Kommunikation 53

2.1 Kommunikation, Information, Nachricht, Signal 53
2.2 Das ISO – OSI Kommunikationsmodell 58
2.3 Prinzip der drahtlosen Übertragung 59
2.4 Frequenzbereich und dessen Nutzung 61
2.4.1 Frequenz und Wellenlänge 61
2.4.2 Das Spektrum elektromagnetischer Wellen 62
2.4.3 Frequenzbereiche für die drahtlose Kommunikation 63
2.4.4 Wahl der «richtigen» Trägerfrequenz 68
2.4.4.1 Benötigte Bandbreite 68

2.4.4.2 Benötigte Reichweite 68

3. Signale und Übertragung 69

3.1 Klassierung von Signalen 69
3.1.1 Zeit- und amplituden-kontinuierliche Signale 70
3.1.2 Periodische Signale 75
3.1.3 Nichtperiodische Signale 78
3.1.3.1 Rauschen 79
3.1.3.2 Bandpass-Rauschen 82
3.1.3.3 Allgemeine analoge Signale 84
3.1.4 Zeit- und amplituden-diskrete Signale 86
3.2 Signalübertragung 86
3.2.1 Lineare Verzerrungen auf dem Übertragungsweg 88
3.2.2 Bandbreite eines Vierpols/Zweitors 92
3.2.3 Nicht lineare Verzerrungen 93
3.2.4 Das drahtlose Kommunikationssystem 94
3.2.5 Pegeldiagramm eines drahtlosen Übertragungssystems 97

4. Modulation mit analogen Signalen 101

4.1 Übersicht über die Modulationsverfahren 101
4.2 Amplitudenmodulation 103
4.2.1 Grundlagen, Definitionen und Begriffe 103
4.2.2 Zweiseitenband Amplitudenmodulation 104
4.2.2.1 Addition von Träger- und Modulationssignal 104
4.2.2.2 Multiplikation von Träger- und Modulationssignal 105
4.2.2.3 Zweiseitenband Amplitudenmodulation mit Träger 108
4.2.2.4 Erzeugung eines Zweiseitenband AM Signals 113
4.2.2.5 Demodulation eines DSB AM-Signals mit Träger 122
4.2.3 Einseitenband Amplitudenmodulation (ESB) 126
4.2.3.1 Erzeugung eines ESB Signals mit der Filtermethode 128
4.2.3.2 Erzeugung eines ESB-Signals mit der Phasenmethode 131

4.2.3.3 Erzeugung eines ESB-Signals nach der «dritten Methode» 134
4.2.3.4 Demodulation von Einseitenbandsignalen 137
4.2.3.5 Anwendungen der Einseitenbandtechnik 139
4.2.4 Restseitenbandmodulation (Vestigial Sideband) 140
4.2.5 Quadraturamplitudenmodulation 141
4.3 Winkelmodulation 145
4.3.1 Frequenzmodulation 148
4.3.2 Phasenmodulation 149
4.3.3 Vergleich zwischen Frequenz- und Phasenmodulation 150
4.3.4 Spektrum eines winkelmodulierten Signals 151
4.3.5 Bandbreite eines winkelmodulierten Signals 155
4.3.6 Unterdrückung von Störsignalen 157
4.3.7 Erzeugung eines winkelmodulierten Signals 167
4.3.7.1 (Frequenz-) Modulation eines Oszillators 167
4.3.7.2 Phasenmodulator 173
4.3.7.3 Digitale Frequenzsynthese 174
4.3.7.4 Phasenmodulator bei Navigationssendern für die Luftfahrt 176
4.3.8 Demodulation winkelmodulierter Signale 179
4.3.8.1 Einfacher Flankendiskriminator 180
4.3.8.2 Symmetrischer Flankendemodulator 181
4.3.8.3 Phasendiskriminator 183
4.3.8.4 Koinzidenz-Demodulator 185
4.3.8.5 PLL-Demodulator 188

5. Modulation mit digitalen Signalen 189

5.1 Informationstheorie 189
5.1.1 Informationsgehalt 191
5.1.2 Entropie 192
5.1.3 Redundanz 194
5.1.4 Entropie-Rate 195
5.1.5 Bedingte Entropie 195

5.1.6 Kanalkapazität ... 196
5.1.6.1 Bandbreite und Übertragungsgeschwindigkeit ... 197
5.1.6.2 Signal/Rauschabstand ... 198
5.1.6.3 Übertragungskanal mit Rauschen ... 200
5.2 Codierung ... 202
5.2.1 Arten der Codierung ... 203
5.2.2 Quellencodierung ... 204
5.2.2.1 Digitalisierung analoger Signale ... 204
5.2.2.2 Codes im Computerbereich ... 206
5.2.2.3 Die Huffmann-Codierung ... 208
5.2.3 Kanalcodierung ... 212
5.2.3.1 Paritätsprüfung ... 213
5.2.3.2 Fehlererkennung und Fehlerkorrektur durch Hamming-Codierung ... 214
5.2.3.3 Fehlererkennung und Fehlerkorrektur durch Reed-Solomon-Codierung ... 216
5.2.4 Leitungscodierung ... 218
5.2.4.1 NRZ-Codierung ... 219
5.2.4.2 NRZ-I ... 220
5.2.4.3 Manchester-Codierung ... 221
5.2.4.4 Scrambling ... 221
5.2.4.5 4B5B-Codierung ... 222
5.2.4.6 Weitere Leitungs-Codes ... 223
5.3 Modulation ... 223
5.3.1 Modulationsarten ... 223
5.3.2 Amplitudenumtastung, ASK ... 225
5.3.3 Phasenumtastung, PSK ... 228
5.3.4 Frequenzumtastung, FSK ... 229
5.3.5 Leistungsdichtespektren bei zufälliger Bitfolge ... 229
5.3.6 Übertragung bei begrenzter Bandbreite / Modulation ... 232
5.3.6.1 Grundsätzliche Überlegungen ... 232
5.3.6.2 Vermeiden der Intersymbol-Interferenz und Begrenzung der Bandbreite ... 234
5.3.6.3 Aufteilung der Tiefpass-Filterfunktion zwischen Sender und Empfänger ... 238

5.3.7 Übertragungsfehler 239
5.3.7.1 Ursachen 239
5.3.7.2 Das «Augendiagramm» 240
5.3.7.3 Berechnung der Übertragungsfehler 241
5.3.7.4 S/N und E_b/N_O 245
5.3.7.5 Kanalkapazität und S/N und E_b/N_O 246
5.3.8 Kombinierte Modulationsarten 248
5.3.8.1 Quadratur-Amplitudenmodulation, 2 bit oder 4QAM 248
5.3.8.2 4 Bit oder 16 QAM 250
5.3.8.3 Bitmapping bei QAM 251
5.3.8.4 Anwendungen von QAM 253
5.3.9 Minimum Shift Keying 253
5.3.9.1 Prinzip von MSK 254
5.3.9.2 Realisierung des MSK-Modulators 256
5.3.9.3 Spektrum eines MSK-modulierten Signals 259
5.3.9.4 Bitfehlerrate bei MSK 260
5.3.10 Gaussian Minimum Shift Keying 260
5.4 Demodulation 262
5.4.1 Nicht kohärente Demodulation 262
5.4.2 Kohärente Demodulation 263
5.4.2.1 Demodulation von ASK-modulierten Signalen 263
5.4.2.2 Demodulation von BPSK-modulierten Signalen 263
5.4.2.3 Demodulation vom MSK-modulierten Signalen 267

6. Praktische Realisierung 269

6.1 Empfänger 269
6.1.1 Aufgaben eines Empfängers 269
6.1.2 Konventionelle Realisierung der Empfängerfunktionen 270
6.1.2.1 Selektion 270
6.1.2.2 Verstärkung 282
6.1.2.3 Demodulation 283

6.1.2.4 Wahl der Empfangsfrequenz 283
6.1.3 Empfängerparameter 285
6.1.3.1 Empfindlichkeit, Rauschen 285
6.1.3.2 Grosssignalfestigkeit 294
6.1.3.3 Nebenempfangsstellen 295
6.1.3.4 Intermodulation 297
6.1.3.5 Kreuzmodulation 301
6.1.4 Blocking 301
6.1.5 Störstrahlung 302
6.1.6 Alternative Empfängerarchitektur 303
6.2 Sender 308
6.2.1 Grundlegende Anforderungen 308
6.2.2 Erzeugen der Sendefrequenz 308
6.2.3 Modulation 309
6.2.4 Leistungserzeugung 310
6.2.4.1 AM-Zweiseitenband Rundfunksender 311
6.2.4.2 AM Einseitenbandsender 312
6.2.4.3 Sender für winkelmodulierte Signale 313
6.2.5 Unerwünschte Ausstrahlungen 313
6.2.6 Energieversorgung, Klimatisierung 315

7. Wellenausbreitung und Antennen 317

7.1 Wellenausbreitung 317
7.1.1 Die Leistungsdichte 317
7.1.2 Elektrische und magnetische Feldstärke 318
7.1.3 Wirksame Antennenfläche 322
7.1.4 Freiraumdämpfung 324
7.2 Antennengrundlagen 326
7.2.1 Funktionsweise der Antenne 326
7.2.2 Kenngrössen einer Antenne 329
7.2.3 Strahlungswiderstand und Wirkungsgrad 331

7.2.4 Polarisation ... 333
7.2.5 Strahlungsdiagramm ... 334
7.2.6 Antennengewinn ... 336
7.2.7 Antennenhöhe ... 338
7.2.8 Antennenfaktor ... 340
7.2.9 Variationen des Halbwellendipols ... 341
7.2.9.1 Der Faltdipol ... 341
7.2.9.2 Monopolantenne / Groundplaneantenne ... 342
7.2.10 Magnetische Antennen ... 344
7.2.11 Dielektrische Antennen ... 344
7.3 Praktische Antennenbauformen ... 345
7.3.1 Antennen für tiefe Frequenzen ... 346
7.3.1.1 Sendeantennen für tiefe Frequenzen ... 346
7.3.1.2 Empfangsantennen für tiefe Frequenzen ... 350
7.3.2 Antennen für Kurzwellen (RF) ... 351
7.3.3 Antennen für Ultrakurzwellen (VHF – UHF) ... 352
7.3.3.1 Ortsfeste Antennen für VHF und UHF – Dipole und Arrays ... 352
7.3.3.2 Ortsfeste Antennen – λ/4 Groundplane ... 355
7.3.3.3 Ortsfeste Antennen – Yagi-Uda-Antenne ... 356
7.3.3.4 Besondere ortsfeste Antennen ... 357
7.3.4 Antennen für mobile Anwendungen im VHF/UHF-Bereich ... 359
7.3.5 Antennen für Mikrowellenanwendungen (ab 1 GHz) ... 360
7.3.5.1 Parabolantennen zum Empfang von Fernsehsatelliten ... 361
7.3.5.2 Antennen für Richtfunkverbindungen ... 362
7.3.5.3 Hornantennen ... 363
7.3.5.4 Radarantennen ... 363
7.4 Funkstrecke unter realen Bedingungen ... 365
7.4.1 Lang- und Mittelwellenbereich ... 365
7.4.2 Kurzwellen, Short-Wave, High-Frequency ... 370
7.4.3 Ultrakurzwellen, Very High Frequency ... 371
7.4.3.1 Bedingungen für «Quasi-Freiraum-Bedingungen» ... 371

7.4.3.2 Warum genügt Sichtverbindung nicht? ... 373
7.4.3.3 Absorptionsverluste ... 374
7.4.3.4 Beugungsverluste ... 375
7.4.3.5 Verluste durch Mehrwegeausbreitung ... 377
7.4.3.6 Two Ray Ground Reflection Model ... 381
7.4.3.7 Brechung (Refraktion) ... 384
7.4.3.8 Path Loss Exponent ... 385
7.4.4 Mikrowellen ... 386
7.4.5 Infrarot ... 387
7.5 Fremdstörungen ... 387
7.5.1 Atmosphärische Störungen, kosmisches Rauschen ... 387
7.5.2 Man-Made-Noise ... 389
7.6 Modelle und Simulationen ... 391
7.6.1 Programme zur Antennenberechnung ... 391
7.6.2 Programme zur Berechnung der Wellenausbreitung ... 391
7.6.2.1 Einfache Berechnung der Freiraumdämpfung ... 391
7.6.2.2 Komplexere Programme zur Funkplanung ... 391
7.6.2.3 Geländemodelle ... 392
7.6.2.4 Beispiel «CANDY Site Finder» ... 393
7.6.2.5 Innenraummodelle ... 394

8. Anhang ... 395

8.1 Begriffe und Definitionen. ... 395
8.2 Verwendete Abkürzungen und Bezeichnungen ... 396
8.2.1 Modulationsarten ... 396
8.2.2 Andere Abkürzungen ... 398
8.2.3 Verwendete Symbole und Bezeichner ... 398
8.2.4 Bezeichnungen der Modulationsarten ... 401
8.3 Konstanten, Grössen und Einheiten ... 405
8.3.1 Physikalische und mathematische Kontanten ... 405
8.3.2 Physikalische Grössen ... 406

8.3.3 Vorsatzzeichen für dezimale Teile und Vielfache 407
8.4 Umgang mit Dezibel (dB) 408
8.4.1 Das Dezibel als relatives Mass 408
8.4.2 Das Dezibel als absolutes Mass 410
8.5 Trigonometrische Funktionen 412
8.5.1 Elementare trigonometrische Funktionen 412
8.6 Strahlungsbelastung 417
8.6.1 Ionisierende und nicht ionisierende Strahlung 418
8.6.2 Grenzwerte für nicht ionisierende Strahlung 418
8.6.3 Länderspezifische Umsetzung 420
8.6.3.1 Deutschland 420
8.6.3.2 Schweiz 421
8.6.3.3 Übrige EU-Länder 422
8.6.3.4 Andere Standards 422
8.6.4 Grenzwerte für Mobile Geräte 422

9. Bibliographie 425

10. Index 437