Christoph Lange · Andreas Ahrens

# Übertragungstechnik

## Grundlagen und Verfahren der digitalen Basisbandübertragung

Springer Vieweg

# Inhaltsverzeichnis


**1 Signal- und systemtheoretische Grundlagen** ..... 1
1.1 Einführung und Grundlegendes ..... 1
1.2 Determinierte und stochastische Signale ..... 3
1.2.1 Determinierte Signale ..... 3
1.2.2 Stochastische Signale ..... 33
1.2.3 Zu spektralen Kennfunktionen determinierter und zufälliger Signale ..... 38
1.3 Charakterisierung von Systemen ..... 42
1.3.1 Grundlegendes ..... 42
1.3.2 Systembeschreibung im Zeit- und Frequenzbereich ..... 43
1.4 Übertragung von Signalen über Systeme ..... 53
1.4.1 Determinierte Signale ..... 53
1.4.2 Stochastische Signale ..... 65
1.5 Weitere Funktionaltransformationen ..... 70
1.5.1 Laplace-Transformation ..... 70
1.5.2 Z-Transformation ..... 77
1.6 Zusammenfassung und bibliografische Anmerkungen ..... 82
1.7 Aufgaben ..... 83
1.8 Lösungen zu den Aufgaben ..... 85

**2 Grundlagen der Basisbandübertragung** ..... 93
2.1 Grundmodell der binären Nachrichtenübertragung im Basisband ..... 94
2.1.1 Modell und Komponenten des Basisbandübertragungssystems ..... 94
2.1.2 Weg und Bewertung des Nutzsignals ..... 101
2.1.3 Weg und Bewertung der Störung ..... 115
2.1.4 Güte der Übertragung ..... 120
2.1.5 Zusammenhang zwischen Signal-Rausch-Verhältnis und Fehlerwahrscheinlichkeit ..... 123
2.1.6 Numerisches Beispiel: Basisbandübertragung über einen verzerrungsfreien Kanal mit Rauschstörung ..... 132

2.1.7 Erkenntnisse zur Nachrichtenübertragung ..... 136
2.2 Verbesserte Übertragungskonzepte im Basisband ..... 137
2.2.1 Einleitung und Motivation ..... 137
2.2.2 Alternative Sende- und Empfangsfiltercharakteristiken ..... 138
2.2.3 Nyquist-Kriterien ..... 147
2.2.4 Optimales Empfangsfilter: Matched Filter ..... 160
2.2.5 Aspekte bei nichtweißem Rauschen ..... 171
2.3 Mehrstufige Basisbandübertragung ..... 171
2.3.1 Einleitung und Motivation ..... 171
2.3.2 Modell des mehrstufigen Basisband-Übertragungssytems ..... 173
2.3.3 Bewertung des Nutzsignals bei mehrstufiger Übertragung ..... 176
2.3.4 Bewertung der Störung bei mehrstufiger Übertragung ..... 192
2.3.5 Güte der Übertragung: Signal-Rausch-Verhältnis ..... 192
2.3.6 Fehlerwahrscheinlichkeit bei mehrstufiger Basisbandübertragung ..... 193
2.3.7 Verschiedene Definitionen von Signal-Rausch-Verhältnissen und ihre Beziehung zur Fehlerwahrscheinlichkeit ..... 195
2.3.8 Signalangepasste Empfangsfilterung bei mehrstufiger Basisbandübertragung ..... 203
2.3.9 Vergleich mehrstufiger Basisbandverfahren ..... 211
2.3.10 Numerisches Beispiel: Mehrstufige Basisbandübertragung mit NRZ-Sendesignal und Gauß-Empfangsfilter ..... 216
2.3.11 Numerisches Beispiel: Mehrstufige Basisbandübertragung mit Wurzel-Kosinus-Roll-Off-Sende- und -Empfangsfilter ..... 222
2.3.12 Diskussion zu den Gütekriterien ..... 226
2.4 Zusammenfassung und bibliografische Anmerkungen ..... 228
2.5 Aufgaben ..... 229
2.6 Lösungen zu den Aufgaben ..... 230

**3 Übertragungskanal Kupferkabel** ..... 239
3.1 Einführung zu Nachrichtenübertragungskanälen ..... 239
3.1.1 Übertragungstechnische Grundlagen für Übertragungskanäle ..... 240
3.1.2 Klassifizierung der Nachrichtenübertragungskanäle ..... 243
3.2 Einführung zu Kupferleitungen ..... 244
3.2.1 Einleitende Bemerkungen ..... 244
3.2.2 Elektrische Leitungen und Kabel ..... 245
3.3 Theorie der Leitungen ..... 246
3.3.1 Elektrische Leitungsparameter ..... 247
3.3.2 Homogene Leitung ..... 250
3.3.3 Leitungsgleichungen bei harmonischer Erregung ..... 255
3.3.4 Leitungskenngrößen ..... 260
3.3.5 Spezielle Eigenschaften von elektrischen Leitungen in Abhängigkeit von der Frequenz ..... 271

3.4 Kabelübertragungsfunktion ... 281
3.4.1 Übertragungsfunktion einer Leitung ... 281
3.4.2 Übertragungsfunktion der *RC*-Leitung ... 282
3.4.3 Rationale Approximation der Übertragungsfunktion der *RC*-Leitung ... 283
3.4.4 Übertragungsfunktion der verlustlosen HF-Leitung ... 288
3.5 Konstruktiver Aufbau von Nachrichtenkabeln ... 288
3.6 Nebensprechen in vielpaarigen Nachrichtenkabeln ... 290
3.6.1 Arten des Nebensprechens ... 290
3.6.2 Modell des Kabels mit Nebensprechen ... 291
3.7 Zusammenfassung und bibliografische Anmerkungen ... 294
3.8 Aufgaben ... 295
3.9 Lösungen zu den Aufgaben ... 296

**4 Basisbandübertragung über linear verzerrenden Kanal** ... 307
4.1 Einführung und grundlegende Aspekte ... 307
4.2 Kompensation des verzerrenden Kanaleinflusses ... 309
4.3 Kabelübertragungssystem bei rationalen Übertragungsfunktionen ... 312
4.4 Anwendungsbeispiel: Rationales linear entzerrtes Kabelübertragungssystem ... 316
4.4.1 Einleitung ... 316
4.4.2 Kabelübertragungssystem ... 317
4.4.3 Weg und Bewertung des Nutzsignals ... 319
4.4.4 Weg und Bewertung der Störung ... 324
4.4.5 Güte der Übertragung ... 328
4.4.6 Numerisches Beispiel: Basisbandübertragung bei Kabel mit einem Pol ... 330
4.5 Mehrstufige Basisbandübertragung über Kabel ... 336
4.5.1 Basisbandübertragung bei NRZ-Sendesignal und Gauß-Empfangsfilter ... 337
4.5.2 Basisbandübertragung bei Wurzel-Kosinus-Roll-Off-Sende- und -Empfangsfilter ... 345
4.6 Zeitdiskrete Entzerrung ... 351
4.6.1 Einführung ... 351
4.6.2 Symboltaktmodell des Basisbandübertragungssystems ... 352
4.6.3 Optimale Verfahren ... 353
4.6.4 Einteilung der Entzerrverfahren ... 354
4.6.5 Lineare und nichtlineare Entzerrer ... 357
4.6.6 Diskussion und Fazit zur Entzerrung ... 372
4.7 Zusammenfassung und bibliografische Anmerkungen ... 374
4.8 Aufgaben ... 374
4.9 Lösungen zu den Aufgaben ... 376

**5 Zusammenfassung und Ausblick** ..... 383
5.1 Zusammenfassung ..... 383
5.2 Ausblick ..... 384

**Anhang A: Systemtheoretische Zusammenhänge in der Übersicht** ..... 387

**Anhang B: Dimensionen in der Signal- und Systemtheorie** ..... 393

**Anhang C: Fourier-Transformation** ..... 399

**Anhang D: Laplace-Transformation** ..... 403

**Anhang E: Fehlerfunktion** $\mathrm{erf}(x)$ **und komplementäre Fehlerfunktion** $\mathrm{erfc}(x)$ ..... 407

**Anhang F: Mathematische Formeln und Zusammenhänge** ..... 411

**Anhang G: Zur Definition der Frequenz** ..... 413

**Literatur** ..... 415

**Stichwortverzeichnis** ..... 419