

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-------------------------------------|------|
| Verzeichnis der Abkürzungen | XIII |
| Verzeichnis der Formelzeichen | XIV |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Das Konzept der Systemtheorie | 1 |
| 1.2 Übersicht über die Methoden der Signalverarbeitung | 4 |
| | |
| 2 Analoge Signale | 13 |
| 2.1 Klassierung der Signale | 13 |
| 2.1.1 Unterscheidung kontinuierlich - diskret | 13 |
| 2.1.2 Unterscheidung deterministisch - stochastisch | 15 |
| 2.1.3 Unterscheidung Energiesignale - Leistungssignale | 15 |
| 2.2 Die Fourierreihe (FR) | 17 |
| 2.2.1 Einführung | 17 |
| 2.2.2 Sinus- / Cosinus-Darstellung | 19 |
| 2.2.3 Betrags- / Phasen-Darstellung | 20 |
| 2.2.4 Komplexe Darstellung | 21 |
| 2.2.5 Das Theorem von Parseval für Leistungssignale | 23 |
| 2.3 Die Fouriertransformation (FT) | 26 |
| 2.3.1 Herleitung des Amplitudendichtespektrums | 26 |
| 2.3.2 Die Faltung | 31 |
| 2.3.3 Das Rechnen mit der Delta-Funktion | 33 |
| 2.3.4 Die Fouriertransformation von periodischen Signalen | 36 |
| 2.3.5 Die Eigenschaften der Fouriertransformation | 40 |
| 2.3.6 Das Theorem von Parseval für Energiesignale | 49 |
| 2.3.7 Tabelle einiger Fourier-Korrespondenzen | 51 |
| 2.4 Die Laplace-Transformation (LT) | 52 |
| 2.4.1 Wieso eine weitere Transformation? | 52 |
| 2.4.2 Definition der Laplace-Transformation und Beziehung zur FT | 52 |
| 2.4.3 Die Eigenschaften der Laplace-Transformation | 56 |
| 2.4.4 Die inverse Laplace-Transformation | 59 |
| 2.4.5 Tabelle einiger Laplace-Korrespondenzen (einseitige Transformation) | 60 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3 Analoge Systeme | 61 |
| 3.1 Klassierung der Systeme | 61 |
| 3.1.1 Linearität | 61 |
| 3.1.2 Zeitinvarianz | 64 |
| 3.1.3 Kausale und deterministische Systeme | 64 |
| 3.1.4 Gedächtnislose und dynamische Systeme | 65 |
| 3.1.5 Stabilität | 65 |
| 3.2 Die Impulsantwort oder Stossantwort | 66 |
| 3.3 Der Frequenzgang und die Übertragungsfunktion | 67 |
| 3.4 Die Schrittantwort oder Sprungantwort | 72 |
| 3.5 Kausale Systeme | 74 |
| 3.6 Pole und Nullstellen | 75 |
| 3.6.1 Einführung | 75 |
| 3.6.2 Amplitudengang, Phasengang und Gruppenlaufzeit | 77 |
| 3.6.3 Bodediagramme | 81 |
| 3.6.4 Spezielle Systeme | 84 |
| 3.6.4.1 Mindestphasensysteme | 84 |
| 3.6.4.2 Allpässe | 86 |
| 3.6.4.3 Zweipolfunktionen | 87 |
| 3.6.4.4 Polynomfilter | 88 |
| 3.6.5 Systemverhalten im Zeitbereich | 89 |
| 3.6.6 PN-Schemata der Filterarten | 91 |
| 3.6.6.1 Tiefpass | 91 |
| 3.6.6.2 Hochpass | 91 |
| 3.6.6.3 Bandpass | 92 |
| 3.6.6.4 Bandsperrre | 92 |
| 3.6.6.5 Allpass | 92 |
| 3.6.7 Realisierungsmöglichkeiten | 93 |
| 3.7 Normierung | 93 |
| 3.8 Übersicht über die Systembeschreibungen | 95 |
| 3.8.1 Einführung | 95 |
| 3.8.2 "Nette" Systeme: linear, stabil, zeitinvariant und mit konzentrierten Elementen | 97 |
| 3.8.3 "Garstige" Systeme | 98 |
| 3.8.4 Bestimmen der Systemgleichung | 99 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 4 Analog Filter | 102 |
| 4.1 Einführung..... | 102 |
| 4.2 Approximation des idealen Tiefpasses | 109 |
| 4.2.1 Einführung..... | 109 |
| 4.2.2 Butterworth-Approximation..... | 110 |
| 4.2.3 Tschebyscheff-I - Approximation | 113 |
| 4.2.4 Bessel-Approximation..... | 115 |
| 4.2.5 Tschebyscheff-II- und Cauer-Approximation | 116 |
| 4.2.6 Filter mit kritischer Dämpfung..... | 116 |
| 4.3 Frequenztransformation..... | 117 |
| 4.3.1 Tiefpässe | 117 |
| 4.3.2 Hochpässe | 118 |
| 4.3.3 Bandpässe..... | 119 |
| 4.3.4 Bandsperren..... | 123 |
| 4.3.5 Allpässe | 123 |
| 4.4 Die praktische Realisierung von aktiven Filtern..... | 124 |
| 4.4.1 Darstellung in der Kaskadenstruktur..... | 124 |
| 4.4.2 Bestimmen der Koeffizienten | 125 |
| 4.4.3 Skalierung | 126 |
| 4.4.4 Grundschaltungen | 127 |
| 4.4.4.1 Polynom-Tiefpass 1. Ordnung | 128 |
| 4.4.4.2 Polynom-Tiefpass 2. Ordnung | 128 |
| 4.4.4.3 Hochpass 1. Ordnung..... | 128 |
| 4.4.4.4 Hochpass 2. Ordnung..... | 129 |
| 4.4.4.5 Bandpass 2. Ordnung | 129 |
| 4.4.4.6 Bandsperre 2. Ordnung / elliptisches Grundglied | 129 |
| 4.4.4.7 Allpass 1. Ordnung..... | 130 |
| 4.4.5 Tabellen der Polynom-Tiefpässe..... | 130 |
| 4.4.5.1 Butterworth-Tiefpässe | 130 |
| 4.4.5.2 Bessel-Tiefpässe..... | 130 |
| 4.4.5.3 Tschebyscheff-I-Tiefpässe | 131 |
| 4.4.5.4 Kritisch gedämpfte Tiefpässe..... | 131 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5 Digitale Signale | 132 |
| 5.1 Einführung | 132 |
| 5.2 Die Fouriertransformation für Abtastsignale (FTA) | 135 |
| 5.2.1 Einführung | 135 |
| 5.2.2 Die ideale Abtastung von Signalen..... | 135 |
| 5.2.3 Das Spektrum von abgetasteten Signalen..... | 136 |
| 5.2.4 Das Abtasttheorem..... | 140 |
| 5.2.5 Die Abtastung von Bandpass-Signalen | 143 |
| 5.2.6 Die Rekonstruktion von abgetasteten Signalen ("DA-Wandlung")..... | 144 |
| 5.3 Die diskrete Fouriertransformation (DFT) | 147 |
| 5.3.1 Die Herleitung der DFT | 147 |
| 5.3.2 Verwandtschaft mit der komplexen Fourierreihe | 148 |
| 5.3.3 Die Eigenschaften der DFT | 151 |
| 5.3.4 Die schnelle Fouriertransformation (FFT)..... | 153 |
| 5.3.5 Die Redundanz im Spektrum reeller Zeitfolgen..... | 157 |
| 5.4 Praktische Frequenzanalyse | 160 |
| 5.4.1 Übersicht über die Methoden..... | 160 |
| 5.4.2 Spektralanalyse mit der DFT/FFT | 161 |
| 5.4.2.1 Periodische Signale..... | 161 |
| 5.4.2.2 Quasiperiodische Signale..... | 163 |
| 5.4.2.3 Nichtperiodische, stationäre Leistungssignale..... | 173 |
| 5.4.2.4 Nichtstationäre Leistungssignale | 173 |
| 5.4.2.5 Transiente Signale..... | 174 |
| 5.4.2.6 Zusammenfassung | 175 |
| 5.4.3 Messung von Frequenzgängen..... | 176 |
| 5.5 Die diskrete Faltung | 176 |
| 5.6 Die z-Transformation (ZT) | 178 |
| 5.6.1 Definition der z-Transformation | 178 |
| 5.6.2 Zusammenhang mit der LT und der FTA | 180 |
| 5.6.3 Eigenschaften der z-Transformation..... | 183 |
| 5.6.4 Die inverse z-Transformation | 185 |
| 5.6.5 Tabelle einiger z-Korrespondenzen | 186 |
| 5.7 Übersicht über die Signaltransformationen | 187 |
| 5.7.1 Welche Transformation für welches Signal?..... | 187 |
| 5.7.2 Eigenschaften der Transformationen | 188 |

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 6 Digitale Systeme | 192 |
| 6.1 Einführung | 192 |
| 6.2 Die Differenzengleichung | 196 |
| 6.3 Die Impulsantwort | 198 |
| 6.4 Der Frequenzgang und die z-Übertragungsfunktion | 201 |
| 6.5 Die Schrittantwort | 204 |
| 6.6 Pole und Nullstellen | 205 |
| 6.7 Strukturen und Blockschaltbilder | 206 |
| 6.8 Digitale Simulation analoger Systeme | 212 |
| 6.9 Übersicht über die Systeme | 214 |
| 6.10 Der Einfluss der Amplitudenquantisierung | 216 |
| 6.10.1 Einführung..... | 216 |
| 6.10.2 Quantisierung bei der AD-Wandlung | 216 |
| 6.10.3 Quantisierung der Filterkoeffizienten | 218 |
| 6.10.4 Quantisierung der Rechenergebnisse | 220 |
| 6.10.5 Die Vektorquantisierung | 222 |
| 6.11 Die Realisierung von digitalen Systemen | 223 |
| 6.11.1 Die Signalwandler..... | 223 |
| 6.11.1.1 Sample- and Hold-Schaltungen (S&H)..... | 223 |
| 6.11.1.2 Analog-Digital-Wandler (ADC) | 224 |
| 6.11.1.3 Digital-Analog-Wandler (DAC) | 225 |
| 6.11.2 Die Verarbeitungseinheit..... | 225 |
| 6.11.2.1 Hardware | 226 |
| 6.11.2.2 Mikrocomputer und -Controller | 226 |
| 6.11.2.3 Digitale Signalprozessoren (DSP)..... | 227 |
| 6.11.2.4 Die Software-Entwicklung | 228 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7 Digitale Filter | 232 |
| 7.1 IIR-Filter..... | 232 |
| 7.1.1 Einführung | 232 |
| 7.1.2 Impulsinvariante Entwurf | 234 |
| 7.1.3 Entwurf mit bilinearer Transformation..... | 241 |
| 7.1.4 Frequenztransformation im z-Bereich | 246 |
| 7.1.5 Direkter Entwurf im z-Bereich | 246 |
| 7.1.6 Filter mit linearem Phasengang | 249 |
| 7.2 FIR-Filter | 255 |
| 7.2.1 Einführung | 255 |
| 7.2.2 Die 4 Typen linearphasiger FIR-Filter | 256 |
| 7.2.3 Fenstermethode | 259 |
| 7.2.4 Frequenz-Abtastung | 266 |
| 7.2.5 Synthese im z-Bereich | 267 |
| 7.2.6 Synthese von linearphasigen Hochpassen, Bandpassen und Bandsperren | 268 |
| 7.3 Die Realisierung eines Digitalfilters | 273 |
| 7.3.1 Gegenüberstellung FIR-Filter - IIR-Filter | 273 |
| 7.3.2 Schema zur Filterentwicklung | 273 |
| 7.3.3 Weitere Filterarten | 274 |
| 7.4 Systeme mit mehreren Abtastraten | 275 |
| 7.4.1 Einführung | 275 |
| 7.4.2 Dezimation..... | 276 |
| 7.4.3 Interpolation..... | 277 |
| 7.4.4 Rationale Änderung der Abtastfrequenz..... | 279 |
| Hinweise zur Weiterarbeit | 280 |
| Literaturverzeichnis | 281 |
| Sachwortverzeichnis | 282 |