

Raimund Lücker

# Grundlagen digitaler Filter

Einführung in die Theorie  
linearer zeitdiskreter  
Systeme und Netzwerke

Mit 96 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York 1980

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| 1. Einleitung   | 1  |
| 2. Zeitdiskrete Signale und Systeme                                 | 8  |
| 2.1. Zeitdiskrete Signale, Zahlenfolgen                             | 8  |
| 2.2. Zeitdiskrete Systeme   | 16 |
| 2.2.1. Allgemeines  | 16 |
| 2.2.2. Lineare zeitinvariante Systeme (LTI-Systeme)                 | 18 |
| 2.2.3. Beschreibung kausaler LTI-Systeme durch Differenzgleichungen | 21 |
| 2.2.4. Schlußbemerkung  | 23 |
| 3. Die z-Transformation   | 24 |
| 3.1. Einleitung   | 24 |
| 3.2. Definition   | 25 |
| 3.3. Beispiele  | 29 |
| 3.4. Eigenschaften von z-Transformierten                            | 32 |
| 3.5. Inverse z-Transformation                                       | 36 |
| 3.6. Fourier-Transformation   | 45 |
| 3.6.1. Definition   | 45 |
| 3.6.2. Fourier-Transformation von Abtastwerten                      | 48 |
| 3.7. Einseitige z-Transformation                                    | 49 |
| 4. Übertragungsfunktion und Frequenzgang                            | 51 |
| 4.1. Übertragungsfunktion   | 51 |
| 4.2. Frequenzgang   | 54 |
| 4.3. Systeme mit speziellem Frequenzgang                            | 59 |
| 4.3.1. Allpässe   | 59 |
| 4.3.2. Linearphasige Systeme  | 61 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.4. Erweiterung . . . . .   | 63  |
| 5. Zeitdiskrete Netzwerke . . . . .                                  | 65  |
| 5.1. Operationen, Bauelemente, Netzwerke . . . . .                   | 65  |
| 5.2. Elementare Netzwerkstrukturen . . . . .                         | 69  |
| 5.2.1. Erste und zweite kanonische Form . . . . .                    | 69  |
| 5.2.2. Kaskaden- und Parallelform . . . . .                          | 72  |
| 5.3. Spezielle Netzwerkstrukturen . . . . .                          | 75  |
| 5.3.1. Systeme zweiten Grades . . . . .                              | 75  |
| 5.3.2. Allpässe . . . . .  | 77  |
| 5.3.3. Linearphasige Systeme . . . . .                               | 78  |
| 5.4. Systeme mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen . . . . . | 80  |
| 6. Matrixbeschreibung zeitdiskreter Netzwerke . . . . .              | 82  |
| 6.1. Signalflußgraphen . . . . .                                     | 82  |
| 6.2. Zweigübertragungsgleichungen zeitdiskreter Netzwerke . . . . .  | 85  |
| 6.3. Signalflußmatrizen zeitdiskreter Netzwerke . . . . .            | 88  |
| 7. Analyse zeitdiskreter Netzwerke . . . . .                         | 91  |
| 7.1. Einleitung . . . . .  | 91  |
| 7.2. Berechnung der Zustandsdarstellung . . . . .                    | 92  |
| 7.2.1. Allgemeines . . . . .   | 92  |
| 7.2.2. Analyse durch schrittweise Matrixreduktion . . . . .          | 97  |
| 7.2.3. Numerische Zustandsanalyse . . . . .                          | 100 |
| 7.3. Berechnung der Übertragungsfunktion . . . . .                   | 101 |
| 7.4. Numerische Berechnung des Frequenzgangs . . . . .               | 103 |
| 7.5. Stabilitätsuntersuchungen im Zustandsraum . . . . .             | 104 |
| 7.5.1. Charakteristisches Polynom . . . . .                          | 105 |
| 7.5.2. Lösung der Zustandsgleichungen im Zeitbereich . . . . .       | 108 |
| 7.5.3. Lyapunov-Stabilität . . . . .                                 | HO  |
| 7.5.4. Erreichbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .                  | 113 |
| 7.6. Strukturbezogene Zeitbereichsanalyse . . . . .                  | 118 |



|   |     |
|---|-----|
| 8. Strukturunabhängige Synthese zeitdiskreter Netzwerke . . . . .                           | 125 |
| 8.1. Einleitung . . . . .   | 125 |
| 8.2. Konzeption des Syntheseverfahrens . . . . .  | 126 |
| 8.3. Synthese durch schrittweise Matrixerweiterung . . . . .                                | 129 |
| 8.4. Beispiele . . . . .  | 132 |
| 9. Entwurf zeitdiskreter IIR-Systeme . . . . .  | 141 |
| 9.1. Einleitung . . . . .   | 141 |
| 9.2. Entwurf nach vorgeschriebener Impulsantwort . . . . .                                  | 142 |
| 9.2.1. Systemidentifikation bei vorgeschriebener Impulsantwort . . .                        | 142 |
| 9.2.2. Impulsantwort-Invariante Transformation zeitkontinuierlicher Systeme . . . . .       | 145 |
| 9.3. Entwurf nach Vorschriften bezüglich des Frequenzganges . . . . .                       | 147 |
| 9.3.1. Allgemeines . . . . .  | 147 |
| 9.3.2. Entwurf durch Transformation zeitkontinuierlicher Systeme . . . . .                  | 149 |
| 9.3.2.1. Bilineartransformation . . . . .   | 149 |
| 9.3.2.2. Entwurf zeitkontinuierlicher Systeme . . . . .                                     | 152 |
| 9.3.2.2.1. Frequenztransformationen . . . . .   | 152 |
| 9.3.2.2.2. Standardverfahren zum Entwurf normierter Tiefpässe . . . . .                     | 154 |
| 9.3.2.2.3. Abschließende Bemerkungen . . . . .  | 168 |
| 9.3.2.3. Beispiel . . . . .   | 170 |
| 9.3.3. Entwurf mittels transformierter Verfahren der zeitkontinuierlichen Theorie . . . . . | 175 |
| 9.3.3.1. Allpaßtransformationen . . . . .   | 175 |
| 9.3.3.2. Entwurf normierter Tiefpässe . . . . .   | 180 |
| 9.3.4. Wellendigitalfilterentwurf nach zeitkontinuierlichen LC-Abzweigschaltungen . . . . . | 181 |
| 9.3.4.1. Spannungswellenstrommatrizen zeitkontinuierlicher Mehr Tore . . . . .              | 182 |
| 9.3.4.2. Entwurfsablauf . . . . .   | 185 |
| 9.3.4.3. Beispiel . . . . .   | 192 |

|   |     |
|---|-----|
| 10. Entwurf linearphasiger FIR-Systeme nach Vorschriften im Frequenzbereich ..... | 196 |
| 10.1. Einleitung .....  | 196 |
| 10.2. Allgemeines zum Entwurf linearphasiger FIR-Systeme .....                    | 198 |
| 10.3. Fourier-Approximation, Fensterung .....                                     | 208 |
| 10.4. Tschebyscheff-Approximation .....   | 220 |
| 10.4.1. Formulierung der Approximationsaufgabe .....                              | 220 |
| 10.4.2. Bemerkungen zur Lösung der Approximationsaufgabe ..                       | 222 |
| 10.5. Abschließende Bemerkungen .....   | 231 |
| <br>  |     |
| 11. Bemerkungen zum Verhalten digitaler Filter .....                              | 232 |
| <br>  |     |
| Anhang: FORTRAN-Programme .....   | 237 |
| <br>  |     |
| Literaturverzeichnis .....  | 242 |
| <br>  |     |
| Sachverzeichnis .....   | 252 |