

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die diskrete Fourier-Transformation in der Signalverarbeitung — 1</b>
1.1	Einführung — 1
1.2	Die DFT und die Fourier-Reihe — 1
1.2.1	Amplituden- und Phasenspektrum — 3
1.2.2	MATLAB-Berechnung des Amplituden- und Phasenspektrums des periodischen rechteckigen Signals — 7
1.2.3	Leistung eines periodischen Signals — 11
1.2.4	Annäherung der Fourier-Reihe mit Hilfe der DFT — 12
1.2.5	Die DFT eines Intervalls mit mehreren periodischen Signalen — 17
1.2.6	Der Leckeffekt ( <i>Leakage-Effect</i> ) — 33
1.2.7	Simulation der Messung der Auflösung von A/D-Wandlern mit Hilfe der FFT — 44
1.2.8	Gleichmäßige Abtastung als Ursache der Mehrdeutigkeit zeitdiskreter Signale — 50
1.2.9	Ton-Aliasing Experiment — 56
1.2.10	DFT-Untersuchung eines rechteckigen Signals — 59
1.3	Die DFT und die Fourier-Transformation kontinuierlicher Signale — 62
1.3.1	Das Fourier-Spektrum — 63
1.3.2	DFT-Annäherung der Fourier-Transformation zeitkontinuierlicher Signale — 68
1.3.3	Parseval-Theorem — 69
1.3.4	Einige Beispiele für die Ermittlung der Fourier-Transformation mit Hilfe der DFT — 71
1.3.5	Erweiterung eines Signals mit Nullwerten — 79
1.3.6	Die Faltung kontinuierlicher Signale und ihre Fourier-Transformation — 86
1.4	Die DFT und die Fourier-Transformation zeitdiskreter Signale — 92
1.4.1	Darstellung der zeitdiskreten Signale — 93
1.4.2	Die DTFT der Abtaswerte abhängig vom Spektrum des kontinuierlichen Signals — 97
1.4.3	Die Fourier-Transformation eines abgetasteten Ausschnittes einer Cosinusfunktion — 101
1.4.4	Spektrum des Signals am Ausgang eines D/A-Wandlers — 104
1.5	Die DFT und die spektrale Leistungsdichte zufälliger Signale — 116
1.5.1	Zufallsvariablen — 116
1.5.2	Nichtstationäre, stationäre und ergodische Zufallsprozesse — 119
1.5.3	Die spektrale Leistungsdichte zufälliger Signale und ihre Annäherung über die DFT — 122

1.5.4	Beispiel für die Schätzung der spektralen Leistungsdicht mit Hilfe der DFT — <b>128</b>
1.5.5	Beispiel für die Schätzung der spektralen Leistungsdicht mit Hilfe der DFT über die Autokorrelationsfunktion — <b>134</b>
<b>2</b>	<b>Lineare zeitinvariante Systeme — 139</b>
2.1	Einführung — <b>139</b>
2.2	Systeme und deren Klassifizierung — <b>139</b>
2.2.1	Systeme ohne und mit „Gedächtnis“ — <b>139</b>
2.2.2	Kausale und nicht kausale Systeme — <b>140</b>
2.2.3	Lineare Systeme — <b>141</b>
2.2.4	Zeitinvariante Systeme — <b>141</b>
2.2.5	Stabile Systeme — <b>142</b>
2.3	Zeitkontinuierliche Systeme beschrieben durch Differentialgleichungen — <b>142</b>
2.3.1	Homogene Lösung — <b>144</b>
2.3.2	Stabilität der Systeme beschrieben durch Differentialgleichungen — <b>146</b>
2.3.3	Partikuläre Lösung — <b>148</b>
2.3.4	Lösung der Differentialgleichung der RLC-Reihenschaltung — <b>150</b>
2.3.5	Linearität und alternative Zerlegung der Lösung — <b>158</b>
2.3.6	Die Impulsantwort und das Faltungsintegral für LTI-Systeme — <b>162</b>
2.3.7	Schätzung der Übertragungsfunktion eines mechanischen Systems — <b>170</b>
2.3.8	Einführung in die Laplace-Transformation — <b>177</b>
2.3.9	Laplace-Transformation der gewöhnlichen Differentialgleichungen — <b>180</b>
2.3.10	Eigenschaften der Laplace-Transformation — <b>181</b>
2.3.11	Die Laplace-Transformation und die Fourier-Transformation — <b>182</b>
2.3.12	Berechnung der Übertragungsfunktionen elektrischer Schaltungen — <b>183</b>
2.3.13	Übertragungsfunktionen eines mechanischen Systems — <b>192</b>
2.4	Analoge Filter — <b>196</b>
2.4.1	Einführung — <b>197</b>
2.4.2	Simulation eines Antialiasing-Filters — <b>211</b>
2.4.3	Null- und Polstellen der Filter — <b>218</b>
2.5	Zeitdiskrete zeitinvariante Systeme — <b>225</b>
2.5.1	Differenzengleichung für zeitinvariante zeitdiskrete Systeme — <b>225</b>
2.5.2	Die Faltungssumme — <b>229</b>
2.5.3	Komplexer Frequenzgang aus der Differenzengleichung — <b>231</b>
2.5.4	Homogene Lösung der Differenzengleichung — <b>236</b>
2.5.5	Zustandsmodelle für zeitinvariante zeitdiskrete Systeme — <b>239</b>

2.5.6	Die z-Transformation der Differenzengleichungen —	<b>241</b>
2.5.7	Frequenzgang für LTI-Systeme beschrieben durch Differenzengleichungen —	<b>243</b>
<b>3</b>	<b>Digitale Filter —</b>	<b>247</b>
3.1	Einführung in digitale Filter —	<b>249</b>
3.2	Entwurf und Analyse der FIR-Filter mit linearen Phasengang —	<b>263</b>
3.2.1	Entwurf der FIR-Filter mit linearer Phase über das Fensterverfahren —	<b>275</b>
3.2.2	Entwurf der FIR-Filter durch Abtastung des gewünschten Frequenzgangs —	<b>281</b>
3.2.3	FIR-Filterentwurf basierend auf iterativen Optimierungstechniken —	<b>287</b>
3.3	Der Einfluss der Welligkeit digitaler FIR-Filter —	<b>297</b>
3.3.1	Das Vor- und Nachecho wegen der Welligkeit im Durchlassbereich eines FIR-Tiefpassfilters —	<b>301</b>
3.4	FIR-Filter mit inversem Sinc-Verhalten —	<b>306</b>
3.5	Hilbert-FIR-Filter —	<b>312</b>
3.5.1	Simulation einer Übertragung mit SSB-Modulation —	<b>322</b>
3.5.2	Hilbert-Filter in der Energietechnik —	<b>330</b>
3.6	Entwurf und Analyse der IIR-Filter —	<b>332</b>
3.6.1	Einführung —	<b>332</b>
3.6.2	Klassischer Entwurf der IIR-Filter —	<b>334</b>
3.6.3	IIR-Filterentwurf direkt im Frequenzbereich —	<b>342</b>
3.7	Strukturen digitaler Filter —	<b>344</b>
3.7.1	Die direkte Form der FIR-Filter —	<b>344</b>
3.7.2	Strukturen für FIR-Filter mit linearer Phase —	<b>345</b>
3.7.3	Strukturen für IIR-Filter —	<b>346</b>
3.8	IIR Allpass-Filter —	<b>351</b>
3.8.1	Kompensation der nichtlinearen Phase eines IIR-Filters mit Hilfe eines Allpass-Filters —	<b>352</b>
3.8.2	Zerlegung eines IIR-Filters in zwei Allpass-Filter —	<b>355</b>
3.9	<i>Lattice</i> - oder Gitter-Strukturen —	<b>358</b>
3.9.1	Gitter-Struktur für ein MA-System —	<b>358</b>
3.9.2	Gitter-Struktur für ein FIR-Prädiktionsfilter —	<b>364</b>
3.9.3	Gitter-Struktur für IIR-Filter —	<b>368</b>
3.10	Nullphase-Filter —	<b>369</b>
3.11	Das Savitzky-Golay-Glättungsfilter —	<b>374</b>
3.11.1	Glättung eines Spektrums mit dem Savitzky-Golay Filter —	<b>379</b>
3.12	Cosinus-Roll-off-Filter —	<b>383</b>
3.12.1	Das Root-Raised-Cosine-Filter —	<b>388</b>
3.13	Zusammenfassung und Ausblick —	<b>392</b>

**4 Multiraten-Signalverarbeitung — 394**

- 4.1 Einführung — **394**
- 4.2 Dezimation mit einem ganzzahligen Faktor — **394**
  - 4.2.1 Untersuchung des Abwärtstasters für die Dezimierung — **396**
- 4.3 Interpolation mit einem ganzzahligen Faktor — **404**
  - 4.3.1 Simulation einer Interpolation — **407**
- 4.4 Dezimation und Interpolation in mehreren Stufen — **411**
  - 4.4.1 Simulation einer Interpolation in zwei Stufen — **413**
  - 4.4.2 Änderung der Abtastrate mit einem rationalen Faktor — **416**
  - 4.4.3 Filterung von Bandpasssignalen mit sehr kleiner Bandbreite — **419**
- 4.5 Dezimierung und Interpolierung mit Polyphasenfiltern — **425**
  - 4.5.1 Dezimierung mit Polyphasenfiltern — **427**
  - 4.5.2 Interpolierung mit Polyphasenfilter — **430**
- 4.6 *Off-Line* Interpolierung mit Hilfe der FFT — **433**
- 4.7 Interpolierung mit Lagrange-Filter *intfilt* — **437**
- 4.8 *Fractional Delay* Filter — **442**
  - 4.8.1 Definition der *Fractional Delay* Filter — **443**
  - 4.8.2 Entwurf von *Fractional-Delay*-Filter über mathematische Interpolation — **450**
  - 4.8.3 Verzögerung mit einem Farrow-Filter — **454**
  - 4.8.4 Abtastfrequenzänderung mit einem Farrow-Filter — **457**
- 4.9 Entwurf der *Interpolated*-FIR Filter — **461**
- 4.10 Dezimierung und Interpolierung mit IFIR-Filtern — **468**

**5 Hinweise zu MATLAB und Simulink — 472**

- 5.1 Der Umgang mit den MATLAB-Objekten — **473**
- 5.2 Hinweise zu Simulink — **478**
  - 5.2.1 Die neuen Möglichkeiten des *Scope*-Blocks — **478**
  - 5.2.2 Der *Spectrum Analyser*-Block — **481**
- 5.3 *Sample*- und *Frame*-Daten — **485**

**Literaturverzeichnis — 495**

**Index — 497**