

**Bernd Girod, Rudolf Rabenstein,
Alexander Stenger**

Einführung in die Systemtheorie

Signale und Systeme in der Elektrotechnik und Informationstechnik

4., durchgesehene und aktualisierte Auflage

Mit 388 Abbildungen und 113 Beispielen
sowie 200 Übungsaufgaben



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Signale	1
1.2	Systeme	5
1.3	Übersicht über dieses Buch	13
1.4	Aufgaben	14
2	Beschreibung kontinuierlicher LTI-Systeme im Zeitbereich	16
2.1	Differentialgleichungen	16
2.2	Blockdiagramme	18
2.3	Zustandsraumbeschreibung von LTI-Systemen	27
2.4	Differentialgleichung, Blockdiagramm und Zustandsraumbeschreibung	30
2.5	Äquivalente Zustandsraumdarstellungen	32
2.6	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	34
2.7	Zusammenfassung	36
2.8	Aufgaben	38
3	Beschreibung von LTI-Systemen im Frequenzbereich	41
3.1	Komplexe Frequenzen	42
3.2	Eigenfunktionen	44
3.3	Aufgaben	54
4	Laplace-Transformation	56
4.1	Verallgemeinerung des Eigenfunktionsansatzes	56
4.2	Definition der Laplace-Transformation	56
4.3	Einseitige und zweiseitige Laplace-Transformation	58
4.4	Beispiele zur Laplace-Transformation	58
4.5	Konvergenzbereich der Laplace-Transformation	62
4.6	Existenz und Eindeutigkeit der Laplace-Transformierten	65
4.7	Eigenschaften und Sätze der Laplace-Transformation	69
4.8	Aufgaben	77
5	Komplexe Funktionentheorie und inverse Laplace-Transformation	79
5.1	Wegintegral in der komplexen Ebene	79
5.2	Hauptsatz der Funktionentheorie	80
5.3	Ringintegrale um Singularitäten	81
5.4	Integralformel von Cauchy	83
5.5	Inverse Laplace-Transformation	87

5.6	Aufgaben	94
6	Analyse zeitkontinuierlicher LTI-Systeme mit der Laplace-Transformation	96
6.1	Systemreaktion auf zweiseitige Eingangssignale	96
6.2	Berechnung der Systemfunktion	98
6.3	Pole und Nullstellen der Systemfunktion	100
6.4	Berechnung der Systemfunktion aus Differentialgleichungen	102
6.5	Zusammenfassendes Beispiel	103
6.6	Kombination von einfachen LTI-Systemen	105
6.7	Kombination von LTI-Systemen mit mehreren Ein- und Ausgängen	108
6.8	Analyse von Zustandsraumbeschreibungen	111
6.9	Aufgaben	113
7	Lösung von Anfangswertproblemen mit der Laplace-Transformation	114
7.1	Systeme erster Ordnung	114
7.2	Systeme zweiter Ordnung	123
7.3	Systeme höherer Ordnung	125
7.4	Bewertung der Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen	136
7.5	Linearität von Systemen mit Anfangszustand	136
7.6	Aufgaben	137
8	Faltung und Impulsantwort	139
8.1	Motivation	139
8.2	Zeitverhalten eines RC-Netzwerks	140
8.3	Der Delta-Impuls	143
8.4	Faltung	152
8.5	Anwendungen	170
8.6	Aufgaben	175
9	Fourier-Transformation	177
9.1	Rückblick auf die Laplace-Transformation	177
9.2	Definition der Fourier-Transformation	178
9.3	Unterschiede zwischen Fourier- und Laplace-Transformation	180
9.4	Beispiele zur Fourier-Transformation	182
9.5	Symmetrien der Fourier-Transformation	190
9.6	Inverse Fourier-Transformation	194
9.7	Sätze zur Fourier-Transformation	195
9.8	Parsevalsches Theorem	208
9.9	Korrelation deterministischer Signale	209
9.10	Zeit-Bandbreite-Produkt	213
9.11	Aufgaben	218

10 Bode-Diagramme	220
10.1 Einführung	220
10.2 Beiträge einzelner reeller Pole und Nullstellen	221
10.3 Bode-Diagramm für mehrere reelle Pole und Nullstellen	224
10.4 Regeln für Bode-Diagramme	226
10.5 Komplexe Pol- und Nullstellenpaare	227
10.6 Aufgaben	232
11 Abtastung und periodische Signale	236
11.1 Einleitung	236
11.2 Delta-Impulskamm und periodische Funktionen	236
11.3 Abtastung	243
11.4 Aufgaben	260
12 Diskrete Signale und ihr Spektrum	266
12.1 Diskrete Signale	266
12.2 Einfache Zahlenfolgen	267
12.3 Fourier-Transformierte einer Folge	271
12.4 Abtastung kontinuierlicher Signale	276
12.5 Sätze der \mathcal{F}_* -Transformation	278
12.6 Aufgaben	281
13 z-Transformation	284
13.1 Definition und Beispiele	284
13.2 Konvergenzbereich der z-Transformation	289
13.3 Beziehungen zu anderen Transformationen	290
13.4 Sätze der z-Transformation	294
13.5 Inverse z-Transformation	296
13.6 Pol-Nullstellen-Diagramm in der z-Ebene	299
13.7 Aufgaben	301
14 Zeitdiskrete LTI-Systeme	304
14.1 Einführung	304
14.2 Linearität und Zeitinvarianz	304
14.3 Lineare Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten	305
14.4 Eigenfolgen und Systemfunktion diskreter LTI-Systeme	307
14.5 Beschreibung durch Blockdiagramme und im Zustandsraum	310
14.6 Diskrete Faltung und Impulsantwort	315
14.7 Aufgaben	325
15 Kausalität und Hilbert-Transformation	329
15.1 Kausale Systeme	329
15.2 Kausale Signale	332
15.3 Analytisches Signal	335

15.4 Aufgaben	339
16 Stabilität und rückgekoppelte Systeme	342
16.1 BIBO, Impulsantwort und Frequenzgang	342
16.2 Kausale stabile LTI-Systeme	346
16.3 Rückgekoppelte Systeme	353
16.4 Aufgaben	358
17 Beschreibung von Zufallssignalen	361
17.1 Einleitung	361
17.2 Erwartungswerte	363
17.3 Stationäre Zufallsprozesse	368
17.4 Korrelationsfunktionen	373
17.5 Leistungsdichtespektren	382
17.6 Beschreibung diskreter Zufallssignale	386
17.7 Aufgaben	388
18 Zufallssignale und LTI-Systeme	392
18.1 Verknüpfungen von Zufallssignalen	392
18.2 Reaktion von LTI-Systemen auf Zufallssignale	396
18.3 Signalschätzung durch Wiener-Filter	406
18.4 Aufgaben	412
Anhang	417
A Korrespondenzen-Tabellen	418
A.1 Korrespondenzen der zweiseitigen Laplace-Transformation	418
A.2 Sätze der zweiseitigen Laplace-Transformation	419
A.3 Korrespondenzen der Fourier-Transformation	420
A.4 Sätze der Fourier-Transformation	421
A.5 Korrespondenzen der zweiseitigen z-Transformation	422
A.6 Sätze der zweiseitigen z-Transformation	423
A.7 Korrespondenzen der Fourier-Transformation von Folgen	424
A.8 Sätze der Fourier-Transformation von Folgen	425
Literaturverzeichnis	426
Index	428
Sachverzeichnis	428