

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen . . . . .	XV
<b>1 Einführung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Theoretische und experimentelle Systemanalyse . . . . .	1
1.2 Aufgaben und Probleme der Identifikation dynamischer Systeme . . . . .	8
1.3 Klassifikation von Identifikationsmethoden . . . . .	14
1.4 Identifikationsmethoden . . . . .	17
1.5 Testsignale . . . . .	19
1.6 Besondere Einsatzfälle . . . . .	22
1.7 Anwendungsmöglichkeiten . . . . .	24
1.8 Literatur . . . . .	26
<b>2 Mathematische Modelle linearer dynamischer Prozesse und stochastischer Signale . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1 Mathematische Modelle dynamischer Prozesse für zeitkontinuierliche Signale . . . . .	29
2.1.1 Nichtparametrische Modelle, deterministische Signale . . . . .	29
2.1.2 Parametrische Modelle, deterministische Signale . . . . .	32
2.1.3 Kennwerte der Übergangsfunktionen einfacher parametrischer Modelle . . . . .	36
2.2 Modelle für zeitkontinuierliche stochastische Signale . . . . .	50
2.3 Mathematische Modelle dynamischer Prozesse für zeitdiskrete Signale . . . . .	63
2.3.1 Nichtparametrische Modelle, deterministische Signale . . . . .	64
2.3.2 Parametrische Modelle, deterministische Signale . . . . .	67
2.4 Modelle für zeitdiskrete stochastische Signale . . . . .	70
<b>A Identifikation mit nichtparametrischen Modellen – zeitkontinuierliche Signale</b>	
<b>3 Fourier-Analyse mit nichtperiodischen Testsignalen . . . . .</b>	<b>81</b>
3.1 Grundgleichungen . . . . .	81
3.2 Fourier-Transformierte nichtperiodischer Testsignale . . . . .	83

3.2.1 Einfache Impulse . . . . .	84
3.2.2 Doppelimpulse . . . . .	88
3.2.3 Sprung- und Rampenfunktion . . . . .	90
<b>3.3 Numerische Berechnung der Fourier-Transformierten und des Frequenzganges. . . . .</b>	<b>93</b>
3.3.1 Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	93
3.3.2 Die schnelle Fourier-Transformation . . . . .	95
3.3.3 Spezielle numerische Verfahren . . . . .	96
<b>3.4 Einfluß von Störsignalen . . . . .</b>	<b>99</b>
3.4.1 Fehler durch den gestörten transienten Verlauf . . . . .	101
3.4.2 Fehler durch falschen Bezugs- und Endwert . . . . .	103
3.4.3 Verkleinerung der Fehler durch Wiederholung der Messungen . . . . .	105
3.4.4 Günstige Testsignale für die Fourier-Analyse . . . . .	107
<b>3.5 Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>112</b>
 <b>4 Frequenzgangmessung mit periodischen Testsignalen . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>4.1 Frequenzgangmessung mit sinusförmigen Testsignalen . . . . .</b>	<b>115</b>
4.1.1 Direkte Auswertung der registrierten Ein- und Ausgangsschwingungen . . . . .	115
4.1.2 Auswertung durch Kompensationsgerät . . . . .	116
4.1.3 Auswertung mittels Abtastgerät . . . . .	117
<b>4.2 Frequenzgangmessung mit rechteck- und trapezförmigen Testsignalen . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>4.3 Frequenzgangmessung mit Mehrfrequenz-Testsignalen . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>4.4 Frequenzgangmessung mit Korrelationsverfahren . . . . .</b>	<b>124</b>
4.4.1 Messung der Korrelationsfunktionen . . . . .	124
4.4.2 Messung mit orthogonaler Korrelation . . . . .	126
<b>4.5 Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>134</b>
 <b>5 Korrelationsanalyse mit zeitkontinuierlichen stochastischen Testsignalen . . . . .</b>	<b>136</b>
<b>5.1 Schätzung von Korrelationsfunktionen . . . . .</b>	<b>137</b>
5.1.1 Kreuzkorrelationsfunktion . . . . .	137
5.1.2 Autokorrelationsfunktion . . . . .	140
<b>5.2 Korrelationsanalyse dynamischer Prozesse mit stationären stochastischen Signalen. . . . .</b>	<b>142</b>
5.2.1 Bestimmung der Gewichtsfunktion durch Entfaltung . . . . .	142
5.2.2 Weißes Rauschen als Eingangssignal. . . . .	144
5.2.3 Natürliches Rauschen als Testsignal . . . . .	148
<b>5.3 Korrelationsanalyse dynamischer Prozesse mit binären stochastischen Signalen . . . . .</b>	<b>149</b>
<b>5.4 Korrelationsanalyse am geschlossenen Regelkreis . . . . .</b>	<b>158</b>

5.5 Spektralanalyse mit stochastischen Signalen . . . . .	159
5.6 Zusammenfassung . . . . .	160
<b>B Identifikation mit nichtparametrischen Modellen – zeitdiskrete Signale</b>	
<b>6 Korrelationsanalyse mit zeitdiskreten Signalen . . . . .</b>	<b>165</b>
6.1 Schätzung der Korrelationsfunktionen . . . . .	165
6.1.1 Autokorrelationsfunktionen . . . . .	165
6.1.2 Kreuzkorrelationsfunktionen . . . . .	168
6.1.3 Rekursive Korrelation . . . . .	170
6.2 Korrelationsanalyse linearer dynamischer Prozesse . . . . .	171
6.2.1 Bestimmung der Gewichtsfunktion durch Entfaltung . . . . .	171
6.2.2 Einfluß stochastischer Störsignale . . . . .	173
6.3 Binäre Testsignale . . . . .	178
6.4 Zusammenfassung . . . . .	183
<b>C Identifikation mit parametrischen Modellen – zeitdiskrete Signale</b>	
<b>1. Teil: Direkte Parameterschätzmethoden</b>	
<b>7 Methode der kleinsten Quadrate für statische Prozesse . . . . .</b>	<b>189</b>
7.1 Lineare statische Prozesse . . . . .	190
7.2 Nichtlineare statische Prozesse . . . . .	195
7.3 Zusammenfassung . . . . .	200
<b>8 Methode der kleinsten Quadrate für dynamische Prozesse . . . . .</b>	<b>202</b>
8.1 Nichtrekursive Methode der kleinsten Quadrate (LS) . . . . .	202
8.1.1 Grundgleichungen . . . . .	202
8.1.2 Konvergenz . . . . .	209
8.1.3 Parameter-Identifizierbarkeit . . . . .	220
8.1.4 Unbekannte Gleichwerte . . . . .	227
8.1.5 Numerische Probleme . . . . .	230
8.2 Rekursive Methode der kleinsten Quadrate . . . . .	235
8.2.1 Grundgleichungen . . . . .	235
8.2.2 Rekursive Parameterschätzung für stochastische Signale . . . . .	246
8.2.3 Unbekannte Gleichwerte . . . . .	248
8.3 Methode der gewichteten kleinsten Quadrate . . . . .	249
8.3.1 Markov-Schätzung . . . . .	249
8.3.2 Rekursive Methode der kleinsten Quadrate mit exponentiell nachlassendem Gedächtnis . . . . .	251
8.4 Zusammenfassung . . . . .	254

<b>9 Modifikationen der Methode der kleinsten Quadrate . . . . .</b>	258
<b>9.1 Methode der verallgemeinerten kleinsten Quadrate . . . . .</b>	258
<b>9.1.1 Nichtrekursive Methode der verallgemeinerten kleinsten Quadrate (GLS) . . . . .</b>	258
<b>9.1.2 Rekursive Methode der verallgemeinerten kleinsten Quadrate (RGLS) . . . . .</b>	260
<b>9.2 Methode der erweiterten kleinsten Quadrate (ELS) . . . . .</b>	261
<b>9.3 Methode der Biaskorrektur (CLS) . . . . .</b>	263
<b>9.4 Methode der totalen kleinsten Quadrate (TLS) . . . . .</b>	264
<b>9.5 Zusammenfassung . . . . .</b>	265
<b>10 Methode der Hilfsvariablen (Instrumental variables) . . . . .</b>	267
<b>10.1 Nichtrekursive Methode der Hilfsvariablen (IV) . . . . .</b>	267
<b>10.2 Rekursive Methode der Hilfsvariablen (RIV) . . . . .</b>	270
<b>10.3 Zusammenfassung . . . . .</b>	272
<b>11 Methode der stochastischen Approximation (STA) . . . . .</b>	273
<b>11.1 Der Robbins–Monro–Algorithmus . . . . .</b>	273
<b>11.2 Der Kiefer–Wolfowitz–Algorithmus . . . . .</b>	274
<b>11.3 Zusammenfassung . . . . .</b>	277
<b>Anhang . . . . .</b>	278
<b>A1 Fourier- und Laplace-Transformation . . . . .</b>	278
<b>A1.1 Fourier-Transformation . . . . .</b>	278
<b>A1.2 Laplace-Transformation . . . . .</b>	282
<b>A2 Modellstrukturen durch theoretische Modellbildung . . . . .</b>	284
<b>A2.1 Theoretische Modellbildung und elementare Modellstruktur . . . . .</b>	284
<b>A2.2 Beispiel für verschiedene Modellstrukturen . . . . .</b>	286
<b>A3 Einige Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .</b>	292
<b>A4 Grundbegriffe der Schätztheorie . . . . .</b>	296
<b>A4.1 Konvergenzbegriffe für stochastische Variable . . . . .</b>	296
<b>A4.2 Eigenschaften von Parameterschätzverfahren . . . . .</b>	298
<b>A5 Zur Ableitung von Vektoren und Matrizen . . . . .</b>	302
<b>A6 Satz zur Matrizeninversion . . . . .</b>	304
<b>A7 Positiv reelle Übertragungsfunktionen . . . . .</b>	306
<b>A7.1 Kontinuierliche Signale . . . . .</b>	306
<b>A7.2 Zeitdiskrete Signale . . . . .</b>	308
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	309
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	327