

Rolf Isermann

# Identifikation dynamischer Systeme 2

## Besondere Methoden, Anwendungen

Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 121 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

## Verzeichnis der Abkürzungen

<i>C</i>	<i>Identifikation mit parametrischen Modellen – zeitdiskrete Signale</i>	
	2. Teil: <i>Iterative und rekursive Parameterschätzmethoden</i>	
12	<b>Maximum-Likelihood-Methode</b>	3
12.1	Nichtrekursive Maximum-Likelihood-Methode (ML)	4
12.2	Rekursive Maximum-Likelihood-Methode (RML)	11
12.3	Erreichbare Genauigkeit, Cramér-Rao-Ungleichung	13
12.4	Zusammenfassung	16
13	<b>Bayes-Methode</b>	17
14	<b>Parameterschätzung mit nichtparametrischem Zwischenmodell (zweistufige Methoden)</b>	21
14.1	Antwortfunktionen auf nichtperiodische Testsignale und Methode der kleinsten Quadrate	22
14.2	Korrelationsanalyse und Methode der kleinsten Quadrate (COR-LS)	25
14.3	Zusammenfassung	32
15	<b>Rekursive Parameterschätzmethoden</b>	33
15.1	Einheitliche Darstellung rekursiver Parameterschätzmethoden	33
15.2	Konvergenz rekursiver Parameterschätzmethoden	35
15.2.1	Konvergenz im deterministischen Fall	36
15.2.2	Konvergenz bei stochastischen Störsignalen über gewöhnliche Differentialgleichungen	38
15.2.3	Konvergenz bei stochastischen Störsignalen mit der Martingale-Theorie	44
15.3	Eigenwertverhalten, rekursive Parameterschätzverfahren	46
15.4	Zusammenfassung	52

<b>16 Parameterschätzung zeitvarianter Prozesse</b>	54
16.1 Exponentielle Gewichtung mit konstantem Vergessensfaktor	54
16.2 Exponentielle Gewichtung mit variablem Vergessensfaktor	60
16.3 Beeinflussung der Kovarianzmatrix	61
16.4 Modelle für die Parameteränderung	63
16.5 Zusammenfassung	67
<b>17 Numerisch verbesserte rekursive Parameterschätzmethoden</b>	69
17.1 Wurzelfilterung	69
17.2 UD-Faktorisierung	71
17.3 Zusammenfassung	73
<b>18 Vergleich verschiedener Parameterschätzmethoden</b>	74
18.1 Vorbemerkungen	74
18.2 Vergleich der A-priori-Annahmen	75
18.3 Gütevergleich durch Simulation	80
18.4 Vergleich des Rechenaufwandes	92
18.5 Zusammenfassung	95
<b>19 Parameterschätzung im geschlossenen Regelkreis</b>	98
19.1 Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	99
19.1.1 Indirekte Prozeßidentifikation (Fall a+c+e)	100
19.1.2 Direkte Prozeßidentifikation (Fall b+d+e)	104
19.2 Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	108
19.3 Methoden zur Identifikation im geschlossenen Regelkreis	110
19.3.1 Indirekte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	110
19.3.2 Direkte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	110
19.3.3 Direkte Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	111
19.4 Zusammenfassung	111
<b>20 Verschiedene Probleme der Parameterschätzung</b>	112
20.1 Wahl des Eingangssignals	112
20.2 Wahl der Abtastzeit	115
20.3 Ermittlung der Modellordnung	117
20.3.1 Bestimmung der Totzeit	117
20.3.2 Bestimmung der Modellordnung	119
20.4 Parameterschätzung bei integralwirkenden Prozessen	127
20.5 Störsignale am Eingang	129

<b>D Identifikation mit parametrischen Modellen – kontinuierliche Signale</b>	133
<b>21 Parameterbestimmung aus Übergangsfunktionen</b>	135
21.1 Parameterbestimmung mit einfachen Modellen (Kennwertermittlung)	135
21.1.1 Approximation durch Verzögerungsglied erster Ordnung und Totzeit	135
21.1.2 Approximation durch Verzögerungsglied $n$ -ter Ordnung mit gleichen Zeitkonstanten	135
21.1.3 Approximation durch Verzögerungsglied zweiter Ordnung mit ungleichen Zeitkonstanten	137
21.1.4 Approximation durch Verzögerungsglied $n$ -ter Ordnung mit gestaffelten Zeitkonstanten	138
21.1.5 Approximation durch Verzögerungsglieder $n$ -ter Ordnung mit verschiedenen Zeitkonstanten	140
21.2 Parameterbestimmung mit allgemeineren Modellen	141
21.2.1 Methode der mehrfachen Integration	141
21.2.2 Methode der mehrfachen Momente	143
21.3 Zusammenfassung	145
<b>22 Parametereinstellung durch Modellabgleich</b>	146
22.1 Verschiedene Modellanordnungen	146
22.2 Modellabgleich mittels Gradientenmethode	149
22.2.1 Paralleles Modell	150
22.2.2 Serielles Modell	153
22.2.3 Paralleles-serielles Modell	154
22.3 Modellabgleich mit Referenzmodellmethoden und Stabilitätsentwurf	156
22.3.1 Zustandsfehler	157
22.3.2 Verallgemeinerter Fehler	159
22.4 Zusammenfassung	160
<b>23 Parameterschätzmethoden für Differentialgleichungen</b>	162
23.1 Methode der kleinsten Quadrate	162
23.1.1 Grundgleichungen	162
23.1.2 Konvergenz	165
23.1.3 Ermittlung der Ableitungen	166
23.1.4 Ergänzungen	170
23.2 Konsistente Parameterschätzmethoden	170
23.2.1 Methode der Hilfsvariablen	170
23.2.2 Erweitertes Kalman-Filter, Maximum-Likelihood- Methode	171

23.2.3	Korrelation und kleinste Quadrate	171
23.2.4	Umrechnung zeitdiskreter Modelle	173
23.3	Schätzung physikalischer Parameter	174
23.4	Parameterschätzung bei teilweise bekannten Parametern	185
23.5	Zusammenfassung	186
<b>24</b>	<b>Parameterschätzung für Frequenzgänge und periodische Signale</b>	<b>188</b>
24.1	Einfache Approximationsmethoden	188
24.1.1	Gegenseitige Abhängigkeit der Frequenzgangkoordinaten	188
24.1.2	Graphische Methoden	189
24.1.3	Analytische Methoden	190
24.2	Methoden der kleinsten Quadrate für Frequenzgänge	192
24.3	Zusammenfassung	195
<b>E</b>	<b>Identifikation von Mehrgrößensystemen</b>	<b>197</b>
<b>25</b>	<b>Modellstrukturen zur Identifikation von Mehrgrößensystemen</b>	<b>199</b>
25.1	Übertragungsmodelle	199
25.1.1	Übertragungsmatrix-Darstellung	199
25.1.2	Matrizenpolynom-Darstellung	201
25.2	Zustandsmodelle	201
25.2.1	Allgemeines Zustandsmodell	201
25.2.2	Beobachtbarkeitskanonisches Zustandsmodell	203
25.2.3	Steuerbarkeitskanonisches Zustandsmodell	206
25.3	Gewichtsfunktions-Modelle, Markov-Parameter	210
25.4	Zusammenfassung	213
<b>26</b>	<b>Methoden zur Identifikation von Mehrgrößensystemen</b>	<b>214</b>
26.1	Korrelationsmethoden	214
26.1.1	Entfaltung	214
26.1.2	Testsignale	215
26.2	Parameterschätzmethoden	216
26.2.1	Methode der kleinsten Quadrate	218
26.2.2	Korrelationsanalyse und kleinste Quadrate	219
26.3	Zusammenfassung	220
<b>F</b>	<b>Identifikation nichtlinearer Systeme</b>	<b>221</b>
<b>27</b>	<b>Parameterschätzung nichtlinearer Systeme</b>	<b>223</b>
27.1	Dynamische Systeme mit stetig differenzierbaren Nichtlinearitäten	223
27.1.1	Volterrareihe	223

27.1.2 Hammerstein-Modelle . . . . .	224
27.1.3 Wiener-Modelle . . . . .	227
27.1.4 Modell nach Lachmann . . . . .	228
27.1.5 Parameterschätzmethoden . . . . .	228
27.2 Dynamische Systeme mit nicht stetig differenzierbaren Nichtlinearitäten . . . . .	230
27.2.1 Systeme mit Reibung . . . . .	231
27.2.2 Systeme mit Lose (Tote Zone) . . . . .	236
27.3 Zusammenfassung . . . . .	238
<b>G Zur Anwendung der Identifikationsmethoden – Beispiele</b> . . . . .	240
<b>28 Praktische Aspekte zur Identifikation</b> . . . . .	241
28.1 Elimination besonderer Störsignale . . . . .	241
28.2 Verifikation des Ergebnisses . . . . .	243
28.3 Besondere Geräte für die Identifikation . . . . .	245
28.4 Identifikation mit Digitalrechnern . . . . .	246
28.5 Zusammenfassung . . . . .	248
<b>29 Identifikation von Prozessen der Energie- und Verfahrenstechnik</b> . . . . .	250
29.1 Dampsbeheizter Wärmeaustauscher 1 – zeitdiskretes, lineares Modell . . . . .	250
29.2 Dampsbeheizter Wärmeaustauscher 1 – zeitdiskretes, nichtlineares Modell . . . . .	252
29.3 Dampsbeheizter Wärmeaustauscher 2 – zeitkontinuierliches, lineares Modell . . . . .	255
29.4 Klimaanlage – zeitdiskretes Mehrgrößenmodell . . . . .	258
29.5 Folientrocknungsanlage – zeitdiskretes Mehrgrößenmodell in Zustandsdarstellung . . . . .	259
29.6 Trommeltrockner – zeitdiskretes P-kanonisches Mehrgrößenmodell . . . . .	263
<b>30 Identifikation von Kraftmaschinen</b> . . . . .	266
30.1 Gleichstrommotor-Kreiselpumpe – zeitkontinuierliches nichtlineares Modell . . . . .	266
30.2 Dynamischer Motorprüfstand – zeitkontinuierliches lineares Modell . . . . .	270
<b>31 Identifikation von Arbeitsmaschinen</b> . . . . .	277
31.1 Industrieroboter . . . . .	277
31.2 Werkzeugmaschinen-Vorschub . . . . .	285
31.3 Werkzeugmaschinen-Antrieb . . . . .	291
31.4 Werkzeugmaschine – Fräsen und Bohrprozeß . . . . .	298

<b>32 Identifikation von Aktoren</b>	306
32.1 Hubmagnet	306
32.2 Pneumatischer Antrieb	310
<b>Literaturverzeichnis</b>	314
<b>Sachverzeichnis</b>	333