

# Inhalt

<b>1. Grundlagen der statistischen Behandlung von Regelsystemen</b>	<b>1</b>
1.1. Einige Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung .....	1
1.1.1. Relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit .....	1
1.1.2. Verteilungsfunktion und Dichtefunktion .....	4
1.1.3. Mittelwerte und Momente .....	7
1.1.4. Die Gaußverteilung .....	9
1.2. Stochastische Prozesse .....	10
1.2.1. Beschreibung stochastischer Prozesse .....	10
1.2.2. Der stationäre stochastische Prozeß .....	12
1.3. Korrelationsfunktionen und ihre Eigenschaften .....	14
1.3.1. Der Korrelationsfaktor .....	14
1.3.2. Autokorrelations- und Kreuzkorrelationsfunktion ....	15
1.3.3. Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften von Korrelationsfunktionen .....	17
1.3.4. Bestimmung der Autokorrelationsfunktion .....	20
1.4. Die spektrale Leistungsdichte .....	21
1.4.1. Definition der spektralen Leistungsdichte .....	21
1.4.2. Einige Beispiele für spektrale Leistungsdichten ....	23
 <b>2. Statistische Bestimmung dynamischer Eigenschaften linearer Systeme</b>	 <b>26</b>
2.1. Grundlegende Zusammenhänge .....	26
2.2. Auflösung der Grundgleichung .....	28
2.2.1. Auflösung im Frequenzbereich .....	28
2.2.2. Numerische Lösung im Zeitbereich .....	30
2.3. Zusammenhang zwischen den spektralen Leistungsdichten am Ein- und Ausgang linearer Systeme .....	32

**3. Systemidentifikation mittels Korrelationsanalyse** 37

3.1. Ermittlung der Gewichtsfunktion ..... 37

3.2. Korrelationsanalyse mittels binärer und ternärer Rausch-  
signale ..... 38

3.2.1. Gewöhnliches binäres Rauschen als Testsignal ..... 38

3.2.2. Quantisiertes binäres Rauschsignal als Testsignal .. 41

3.2.3. Quantisierte binäre und ternäre Pseudo-Rauschsignale  
als Testsignal ..... 42

3.3. Korrelationsanalyse im geschlossenen Regelkreis ..... 52

3.4. Korrelationsanalyse zur direkten Bestimmung des Frequenz-  
ganges ..... 54

**4. Systemidentifikation mittels  
Parameterschätzverfahren** 57

4.1. Problemstellung ..... 57

4.2. Parameterschätzung bei linearen Eingrößensystemen ..... 62

4.2.1. Modellstruktur ..... 62

4.2.2. Numerische Lösung des Schätzproblems ..... 68

4.2.2.1. Direkte Lösung (LS-Methode) ..... 68

4.2.2.2. Rekursive Lösung (RLS-Methode) ..... 73

4.2.2.3. Die Hilfsvariablen-Methode oder Methode  
der "Instrumentellen Variablen"  
(IV-Methode) ..... 78

4.2.2.4. Die "Maximum-Likelihood"-Methode  
(ML-Methode) ..... 81

4.2.3. Gewichtete Parameterschätzung ..... 87

4.3. Strukturprüfverfahren ..... 90

4.3.1. Formulierung des Problems ..... 90

4.3.2. Verfahren zur "a priori"-Ermittlung der Ordnung .... 91

4.3.2.1. Der Determinantenverhältnis-Test (DR-Test) 91

4.3.2.2. Der erweiterte Determinantenverhältnis-  
Test (EDR-Test) ..... 92

4.3.2.3. Der "instrumentelle" Determinantenverhält-  
nis-Test (IDR-Test) ..... 92

4.3.3. Verfahren zur Bewertung der Ausgangssignalschätzung 93

4.3.3.1. Der Signalfehler-Test ..... 93

4.3.3.2.	Der Fehlerfunktionstest .....	94
4.3.3.3.	Der statistische F-Test .....	94
4.3.4.	Verfahren zur Beurteilung der geschätzten Übertragungsfunktion .....	96
4.3.4.1.	Der Polynom-Test .....	96
4.3.4.2.	Der kombinierte Polynom- und Dominanz-Test .....	96
4.3.5.	Vergleich der Verfahren .....	98
4.4.	Einige praktische Aspekte zur Systemidentifikation .....	105
4.4.1.	Theoretische Betrachtungen des untersuchten Systems (Stufe I) .....	105
4.4.2.	Voridentifikation zur Bestimmung der Abtastzeit und der Eingangstestsignale (Stufe II) .....	106
4.4.3.	Festlegung der Modellstruktur und der Startwerte .. des Rekursionsalgorithmus (Stufe III) .....	109
4.4.4.	Beobachtung und Beeinflussung der Parameterschätzwerte (Stufe IV) .....	111
4.4.5.	Modellverifikation (Stufe V) .....	114
4.5.	Parameterschätzung von Eingrößensystemen im geschlossenen Regelkreis .....	115
4.5.1.	Indirekte Identifikation .....	115
4.5.2.	Direkte Identifikation .....	117
4.6.	Parameterschätzung bei linearen Mehrgrößensystemen .....	118
4.6.1.	Modellansätze für Mehrgrößensysteme .....	119
4.6.1.1.	Gesamtmodellansatz .....	119
4.6.1.2.	Teilmodellansatz .....	122
4.6.1.3.	Der Einzelmodellansatz .....	125
4.6.2.	Algorithmen zur Parameterschätzung von Mehrgrößensystemen .....	128
4.6.2.1.	Parameterschätzung bei Verwendung des Teilmodellansatzes .....	128
4.6.2.2.	Parameterschätzung bei Verwendung des Einzelmodellansatzes .....	130
4.6.3.	Einige praktische Gesichtspunkte .....	131

**5. Adaptive Regelsysteme** 133

5.1.	Strukturen adaptiver Regelsysteme .....	133
5.1.1.	Problemstellung .....	133

5.1.2.	Drei wichtige Grundstrukturen .....	136
5.1.2.1.	Verfahren der geregelten Adaption mit parallelem Vergleichsmodell .....	136
5.1.2.2.	Verfahren der geregelten Adaption ohne Vergleichsmodell .....	137
5.1.2.3.	Verfahren der gesteuerten Adaption .....	138
5.1.3.	Extremwertregelsysteme .....	139
5.1.4.	Die wichtigsten Entwurfsprinzipien .....	141
5.1.4.1.	Der "Self-tuning"-Regler (ST-Regler) ....	141
5.1.4.2.	Regleradaption durch Modellvergleich ....	143
5.2.	Das Prinzip des "Self-tuning"-Reglers .....	144
5.2.1.	Der Minimum-Varianz-Regler (MV-Regler) .....	144
5.2.1.1.	Herleitung des MV-Reglers .....	144
5.2.1.2.	Stabilitätsbetrachtung .....	149
5.2.1.3.	Erweiterung des MV-Reglers durch Bewer- tung der Stellgröße .....	150
5.2.2.	Der "Self-tuning"-Regler .....	152
5.2.2.1.	Herleitung des einfachen "Self-tuning"- Reglers .....	152
5.2.2.2.	Stabilität und Konvergenz des einfachen "Self-tuning"-Reglers .....	156
5.2.2.3.	Erweiterung des "Self-tuning"-Reglers für Führungsverhalten .....	160
5.2.2.4.	Erweiterung des "Self-tuning"-Reglers durch Bewertung der Stell- und Führungs- größe .....	161
5.3.	Adaptive Regelsysteme mit parallelem Bezugsmodell .....	170
5.3.1.	Regleradaption nach dem Gradientenverfahren .....	171
5.3.2.	Einige Grundlagen aus der Stabilitätstheorie .....	182
5.3.2.1.	Vorbemerkungen .....	182
5.3.2.2.	Der Satz von Meyer-Kalman-Yacubovich ....	184
5.3.2.3.	Der Begriff der Hyperstabilität .....	193
5.3.2.4.	Definition der Hyperstabilität .....	196
5.3.2.5.	Eigenschaften hyperstabiler Systeme ....	198
5.3.2.6.	Hyperstabilität linearer Systeme .....	200
5.3.3.	Regleradaption mit Parallelmodell nach der Stabili- tätstheorie .....	203
5.3.3.1.	Das allgemeine Adaptionsverfahren .....	203
5.3.3.2.	Die Realisierung der Modifikationsstufe im Grundregelkreis .....	207

5.3.4.	Regleradaption mit Parallelmodell unter Verwendung des Satzes von Meyer-Kalman-Yacobovich .....	211
5.3.5.	Die Methode des "vermehrten Fehlers" .....	221
5.3.6.	Der Entwurf modelladaptiver Regelsysteme nach der Hyperstabilitätstheorie .....	231
5.3.6.1.	Der grundlegende Entwurfsgedanke .....	231
5.3.6.2.	Entwurf für beliebiges Modellverhalten ...	235
5.3.6.3.	Konvergenzverbesserung des Entwurfs .....	238
5.3.6.4.	Das allgemeine Adaptionsgesetz .....	240
5.3.6.5.	Das allgemeine Stellgesetz .....	242
5.3.6.6.	Auslegung der Entwurfparameter .....	246
5.3.6.7.	Vereinfachungen des allgemeinen Entwurfsverfahrens .....	250
5.4.	Zusammenhang zwischen "Self-tuning"-Reglern und modelladaptiven Regelsystemen nach der Hyperstabilitätstheorie .....	255
5.5.	Die Anwendung der Hyperstabilitätstheorie zur Untersuchung der Stabilität von "Self-tuning"-Reglern .....	259
<b>6.</b>	<b>Entwurf optimaler Zustandsregler</b> .....	<b>262</b>
6.1.	Problemstellung .....	262
6.2.	Einige Grundlagen der Variationsrechnung .....	264
6.2.1.	Aufgabenstellung .....	264
6.2.2.	Das Fundamentallemma der Variationsrechnung .....	265
6.2.3.	Das Euler-Lagrange-Verfahren .....	267
6.2.3.1.	Herleitung für feste Endzeit .....	267
6.2.3.2.	Herleitung für beliebige Endzeit .....	272
6.2.4.	Das Hamilton-Verfahren .....	279
6.2.5.	Vor- und Nachteile der Optimierung nach den Verfahren von Euler-Lagrange und Hamilton .....	290
6.3.	Das Maximumprinzip von Pontrjagin .....	290
6.4.	Das optimale lineare Regelgesetz .....	303
6.4.1.	Herleitung für kontinuierliche zeitvariante Systeme	303
6.4.2.	Kontinuierliche zeitinvariante Systeme als Spezialfall .....	311
6.4.3.	Herleitung für zeitdiskrete zeitinvariante Systeme	315
6.4.4.	Die stationäre Lösung der Matrix-Riccati-Differenzgleichung .....	319

6.5.	Lösungsverfahren für die Matrix-Riccati-Gleichung .....	321
6.5.1.	Der kontinuierliche Fall .....	321
6.5.1.1.	Direkte Integration .....	321
6.5.1.2.	Verfahren von Kalman-Englar .....	323
6.5.1.3.	Newton-Raphson-Methode .....	323
6.5.1.4.	Verfahren von Kleinman .....	325
6.5.1.5.	Direkte Lösung durch Diagonalisierung ....	327
6.5.2.	Der diskrete Fall .....	330
6.5.2.1.	Rekursives Verfahren .....	330
6.5.2.2.	Das sukzessive Verfahren .....	331
6.5.2.3.	Eigenwert-Eigenvektor-Methode .....	332

## 7. Sonderformen des optimalen linearen

### Zustandsreglers für zeitinvariante

#### Mehrgrößensysteme

336

7.1.	Einführende Bemerkungen .....	336
7.2.	Berücksichtigung von sprungförmigen Stör- und Führungsgrößen	340
7.2.1.	Stör- und Führungsgrößenaufschaltung .....	340
7.2.2.	Optimale Zustandsregler mit integraler Ausgangsvektorrückführung .....	345
7.2.2.1.	Herleitung des Stellgesetzes bei integraler Ausgangsvektorrückführung .....	345
7.2.2.2.	Stör- und Führungsgrößenaufschaltung bei integraler Ausgangsvektorrückführung ....	349
7.2.3.	Zustandsregelung mit Beobachter .....	354
7.2.3.1.	Beobachter bei gemessenen Störgrößen ....	354
7.2.3.2.	Regelung mit Beobachter bei gemessenen Störgrößen .....	357
7.2.3.3.	Regelung mit Beobachter bei nicht gemessenen und nicht beobachteten Störgrößen ....	360
7.2.3.4.	Störbeobachter für beliebige deterministische Störungen .....	360
7.3.	Entwurf optimaler Zustandsregler im Frequenzbereich .....	367
7.3.1.	Die Rückführdifferenz-Matrix .....	368
7.3.2.	Das Entwurfsverfahren .....	371
7.4.	Einfluß des Gütefunktional auf den Reglerentwurf .....	376
7.4.1.	Optimaler linearer Regler bei unvollständiger Zustandsrückführung .....	376

7.4.2. Optimaler linearer Regler mit vorgegebenem Stabilitätsgrad .....	379
7.4.3. Spezielle Ansätze für die Bewertungsmatrix $\underline{Q}$ .....	381
7.4.4. Integralkriterium für optimale Abtastregler .....	382
7.4.5. Zustandsregler mit Kreuzbewertung .....	387

## Anhang

Anhang zu Kapitel 1	389
Anhang zu Kapitel 5	398
Anhang zu Kapitel 6	405

## Literatur

564

## Sachverzeichnis

581