

# Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER WICHTIGSTEN FORMELZEICHEN	XI
EINLEITUNG	1
I ELEMENTE PARAMETERADAPTIVER REGELUNGEN	5
1 GRUNDLAGEN	6
1.1 Klassifikation adaptiver Regelungen	7
1.2 Funktionsweise parameteradaptiver Regelungen	11
1.3 Zum Begriff der Robustheit	14
2 PARAMETERSCHATZVERFAHREN	17
2.1 Diskretes Prozeßmodell	19
2.2 Parameterschätzung als Gleichungsproblem	24
2.2.1 Lösung überbestimmter Gleichungssysteme	24
2.2.2 Meßdatenrekursives Wurzelverfahren der Informationsform	29
2.3 Parameterschätzung als Filterproblem	31
2.3.1 Parameterrekursive Wurzelverfahren der Kovarianzform	33
2.3.2 U-D-Faktorisierung	36
2.4 Vergleich der numerischen Eigenschaften	38
2.5 Kalman-Filter-Anwendungen	42
3 DIGITALE REGELALGORITHMEN	44
3.1 Kompensationsregler	45
3.1.1 Deadbeat-Regler	45
3.1.2 Robustheit von Deadbeat-Reglern	47
3.1.3 Minimal-Varianz-Regler	50
3.1.4 Robustheit von Minimal-Varianz-Reglern	53

3.2 Zustandsregler	56
3.3 PID-Regler	63
3.3.1 Grundlagen	63
3.3.2 Entwurfsmethoden	66
3.3.3 Einstellung über die charakteristische Gleichung und das Übergangsverhalten	70
3.3.4 Robustheit von PID-Reglern	78
3.4 Vergleich der Robustheit digitaler Ein/Ausgangsregler	82
II ROBUSTHEITSANALYSE DISKRETER QUADRATISCH OPTIMALER ZUSTANDSRÜCKFÜHRUNGEN	85
4 ROBUSTHEIT DISKRETER ZUSTANDSREGELUNGEN	86
4.1 Kontinuierliche Zustandsregelung	86
4.2 Stabilitätsreserven diskreter Zustandsregelungen	90
4.3 Optimalitätsbereich diskreter Zustandsregelungen	98
4.3.1 Veränderliche Reglerverstärkung	99
4.3.2 Veränderliche Systemverstärkung	102
4.4 Eigenwertverhalten des Zustandsreglers	106
4.5 Zusammenhänge zwischen Stabilitäts- und Optimalitätsschranken; Grenzwerte	109
5 ROBUSTHEIT DISKRETER ZUSTANDSBEOBACHTER	113
5.1 Dualität von Regelung und Beobachtung	113
5.2 Stabilitätsreserven diskreter Zustandsbeobachter	114
5.3 Optimalitätsbereich diskreter Zustandsbeobachter	120
5.4 Eigenwertverhalten des Beobachters	121
5.5 Zusammenhänge zwischen Stabilitäts- und Optimalitätsschranken; Grenzwerte	123
5.6 Kalman-Filter	124

<b>6 ROBUSTHEIT DISKRETER LS-PARAMETERSCHATZER</b>	<b>128</b>
6.1 Parameterzustandsmodell	128
6.2 Stabilitätsreserven diskreter LS-Parameterschätzer	132
6.3 Optimalitätsbereich diskreter LS-Parameterschätzer	134
6.4 Eigenwertverhalten des LS-Parameterschätzers	136
6.5 Konvergenzverhalten der Robustheitsmaße	141
<b>III ROBUSTE PARAMETERADAPTIVE SYSTEME FÜR ANWENDUNGSNAHE BEDINGUNGEN</b>	<b>149</b>
<b>7 ROBUSTHEIT ADAPTIVER SYSTEME</b>	<b>151</b>
7.1 Stabilität und Konvergenz	151
7.1.1 Globale asymptotische Stabilität der LS-Parameterschätzung (Ljapunov-Analyse)	151
7.1.2 Stabilität des parameteradaptiven Regelkreises	154
7.2 Sektorstabilitätsüberlegungen	156
7.2.1 Zusammenschaltung von Zustandsregler und Beobachter	156
7.2.2 Parameterzustandsmodell im adaptiven Kreis	158
7.3 Adaption und Robustheit	162
7.3.1 Robustheit bei MRAC-Systemen	162
7.3.2 Robustheit bei PAC-Systemen	165
<b>8 ADAPTIVE REGELUNG ZEITVARIANTER SYSTEME</b>	<b>172</b>
8.1 Problematik	172
8.2 Veränderung von Vergessensfaktor und Kovarianzmatrix	173
8.3 Identifikation mit vorgebbarer Robustheit	187
8.4 Berücksichtigung von a-priori-Kenntnissen	194
8.4.1 Schätzung von Teilparametersätzen	194
8.4.2 Modellierung der Zeitvarianz im Parameterzustandsmodell	197
8.5 Bewertung der Verfahren	200

<b>9 UBERWACHUNGSSYSTEME</b>	<b>202</b>
<b>9.1 Anforderungen</b>	<b>202</b>
<b>9.2 Wahl und Bestimmung der Strukturparameter</b>	<b>206</b>
<b>9.2.1 Abtastzeit</b>	<b>206</b>
<b>9.2.2 Totzeit</b>	<b>211</b>
<b>9.2.3 Ordnung</b>	<b>217</b>
<b>9.2.4 Zusammenhänge</b>	<b>223</b>
<b>9.3 Führung der Adaption über das Eigenverhalten der Parameterschätzung</b>	<b>225</b>
<b>9.3.1 Prinzipielle Vorgehensweise</b>	<b>225</b>
<b>9.3.2 Trennung von Verstärkungs- und Gleichwertänderungen</b>	<b>226</b>
<b>9.4 Weitere Überwachungsmaßnahmen</b>	<b>233</b>
<b>9.4.1 Impulsdetektion</b>	<b>233</b>
<b>9.4.2 Stabilitätsanalyse über die Regelkreissignale</b>	<b>235</b>
<b>9.4.3 Begleitende Gütesimulation</b>	<b>239</b>
<b>9.4.4 Filterung der Parameterschätzwerte</b>	<b>243</b>
<b>9.5 Überwachungs-Zustandsdiagramm</b>	<b>244</b>
<b>10 PARAMETERADAPTIVE REGELUNG SPEZIELLER PROZESSE</b>	<b>252</b>
<b>10.1 Integrierende Prozesse</b>	<b>252</b>
<b>10.2 Instabile Prozesse</b>	<b>257</b>
<b>10.3 Nichtlineare Prozesse mit Hysterese</b>	<b>258</b>
<b>10.3.1 Modellbildung einfacher mechanischer Systeme</b>	<b>259</b>
<b>10.3.1.1 Systeme mit Reibung</b>	<b>259</b>
<b>10.3.1.2 Systeme mit Lose</b>	<b>261</b>
<b>11.3.1.3 Vereinheitlichte Darstellung</b>	<b>263</b>
<b>10.3.2 Explizite Identifikation der Hysteresebreite</b>	<b>263</b>
<b>10.3.3 Adaptive Kompensation der Hysterese</b>	<b>267</b>

<b>11 PILOTSTUDIE THERMISCHER PROZESS</b>	<b>272</b>
<b>11.1 Regelungstechnisches Modell des Pilotprozesses</b>	<b>272</b>
<b>11.1.1 Übertragungsverhalten des Wärmeaustauschers</b>	<b>274</b>
<b>11.1.2 Übertragungsverhalten des Rückkühlers</b>	<b>276</b>
<b>11.2 Parameteradaptive Regelung des Pilotprozesses</b>	<b>278</b>
<b>11.2.1 Regelung der Strecke Wärmeaustauscher (WAT)</b>	<b>278</b>
<b>11.2.2 Regelung der Strecke Rückkühler</b>	<b>293</b>
<b>12 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>298</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>302</b>
<b>ANHANG</b>	<b>314</b>
<b>A: Herleitungen und Beweise</b>	
<b>A1: Potter-Kovarianzfilter</b>	<b>315</b>
<b>A2: UD-Faktorisierung</b>	<b>317</b>
<b>A3: Robustheitsbereiche von Deadbeat-Reglern</b>	<b>319</b>
<b>A4: Positivität von <math>Q_\mu</math></b>	<b>321</b>
<b>A5: Eigenwertberechnung des LS-Parameterschätzers</b>	<b>322</b>
<b>A6: Ljapunov-Stabilität des LS-Parameterschätzers</b>	<b>323</b>
<b>B: Testprozesse</b>	<b>325</b>
<b>C: Instrumentierung der Pilotanlage</b>	<b>330</b>
<b>D: Programmsystem DIPAC</b>	<b>331</b>
<b>E: Programmsystem MARIANNE</b>	<b>334</b>
<b>SACHVERZEICHNIS</b>	<b>335</b>