

Inhalt

Vorwort — V

Verzeichnis der Abkürzungen — XIII

1 Einleitung — 1

- 1.1 Prozessautomatisierung — 1
- 1.2 Zum Begriff „Advanced Process Control“ — 6
- 1.3 Advanced Process Control – Kosten und Nutzen — 11
- 1.4 Zum Inhalt dieses Buches — 14
- 1.5 Informationsquellen zu APC — 16
- 1.6 Weiterführende Literatur — 19

2 Einfache mathematische Modelle verfahrenstechnischer Regelstrecken — 21

- 2.1 Einführung — 21
- 2.2 Einfache Prozessmodelle verfahrenstechnischer Regelstrecken — 28
 - 2.2.1 Strecken mit Verzögerungsverhalten und Totzeit — 29
 - 2.2.2 Integrierende und andere instabile Regelstrecken — 34
 - 2.2.3 Regelstrecken mit Nichtminimalphasen-Verhalten — 35
 - 2.2.4 Modellvereinfachung nach der Halbierungsregel — 38
- 2.3 Identifikation des dynamischen Verhaltens — 39
 - 2.3.1 Kennwertermittlung im offenen Regelkreis — 40
 - 2.3.2 Kennwertermittlung im geschlossenen Regelkreis — 48
 - 2.3.3 Rechnergestützte Identifikation — 52
- 2.4 Software-Werkzeuge für die Identifikation — 66
- 2.5 Weiterführende Literatur — 67

3 PID-Basisregelungen — 69

- 3.1 Regelkreis mit PID-Regler — 69
 - 3.1.1 PID-Regelkreis – Struktur, Signale, Übertragungsfunktionen — 69
 - 3.1.2 Forderungen an den Regelkreis — 74
 - 3.1.3 Quantifizierung der Forderungen an PID-Regelkreise — 79
- 3.2 Praktische Implementierung des PID-Algorithmus — 85
- 3.3 Ermittlung günstiger Reglerparameter — 103
 - 3.3.1 Auswertung von Versuchen an der Regelstrecke — 105
 - 3.3.2 Auswertung von Versuchen im geschlossenen Regelkreis — 114
 - 3.3.3 Selbsteinstellung im Online-Betrieb — 117
 - 3.3.4 Software-Werkzeuge für die Einstellung von PID-Reglern — 119
- 3.4 Control Performance Monitoring — 120

3.4.1	Motivation und Ziele —	121
3.4.2	Statistische Maßzahlen zur Bewertung des Regelkreisverhaltens —	124
3.4.3	Benchmarking —	125
3.4.4	Stiktionserkennung und Oszillationsanalyse —	127
3.4.5	Erkennung zu konservativer bzw. aggressiver Reglereinstellung —	133
3.4.6	Software-Werkzeuge für das Control Performance Monitoring —	134
3.5	Weiterführende Literatur —	136

4 Erweiterte Regelungsstrukturen — 138

4.1	Kaskadenregelung —	138
4.2	Störgrößenaufschaltung —	143
4.3	Verhältnisregelung —	150
4.4	Split-Range-Regelung —	154
4.5	Ablösende Regelung —	157
4.6	Pufferstandregelung —	158
4.7	Internal Model Control —	167
4.8	Smith-Prädiktor-Regler und prädiktiver PI-Regler —	171
4.9	Gain Scheduling —	177
4.10	Valve Position Control —	181
4.11	Dezentrale Regelung von Mehrgrößensystemen und Entkopplungsstrukturen —	182
4.12	Weiterführende Literatur —	198

5 Softsensoren — 201

5.1	Einführung —	201
5.2	Empirische lineare Modelle —	205
5.2.1	Multiple lineare Regression —	205
5.2.2	Ridge Regression, Principle Components Analysis (PCA) und Partial Least Squares (PLS) —	215
5.3	Empirische nichtlineare Modelle —	228
5.3.1	Nichtlineare Regression —	228
5.3.2	Künstliche neuronale Netze —	233
5.4	Vorgehensweise bei der Entwicklung und Anwendung von Softsensoren —	236
5.4.1	Datenakquisition —	237
5.4.2	Datenvorverarbeitung —	240
5.4.3	Auswahl relevanter Einflussgrößen —	245
5.4.4	Modellvalidierung —	253
5.4.5	Online-Betrieb und Update-Mechanismen —	256
5.5	Software-Werkzeuge für die Entwicklung von Softsensoren —	260
5.6	Weiterführende Literatur —	261

6	Modellbasierte prädiktive Regelung mit linearen Modellen — 263
6.1	MPC in der Automatisierungshierarchie — 264
6.2	Grundprinzip der prädiktiven Regelung — 267
6.3	Modellgestützte Prädiktion — 273
6.3.1	Prädiktion mit linearen Zustandsmodellen — 273
6.3.2	Prädiktion mit Sprungantwortmodellen — 276
6.3.3	Erweiterung der Prädiktion um messbare Störgrößen — 281
6.4	Schätzung nicht gemessener Stör- und Zustandsgrößen — 283
6.5	Berechnung der optimalen Stellgrößenfolge — 289
6.5.1	MPC ohne Beschränkungen der Stell- und Regelgrößen — 290
6.5.2	MPC mit Beschränkungen der Stell- und Regelgrößen — 292
6.5.3	Szenarien für das zukünftige Verhalten der Stell- und Regelgrößen — 295
6.5.4	MPC-Reglereinstellung — 297
6.6	Integrierte statische Arbeitspunktoptimierung — 300
6.7	Bestimmung der aktuellen Struktur des Mehrgrößensystems — 304
6.8	Predictive Functional Control (PFC) — 306
6.9	Software-Werkzeuge für MPC-Regelungen — 311
6.10	Entwicklungstrends — 313
6.11	Weiterführende Literatur — 321
7	MPC-Regelungen mit nichtlinearen Modellen (NMPC) — 324
7.1	Erweiterungen der LMPC-Regelung für nichtlineare und zeitvariante Systeme — 326
7.2	Nichtlineare dynamische Prozessmodelle — 331
7.2.1	Empirische nichtlineare Modelle deren Identifikation — 331
7.2.2	Nichtlineare theoretische Prozessmodelle — 338
7.3	NMPC-Regelung mit empirischen Prozessmodellen — 340
7.4	NMPC-Regelung mit theoretischen Prozessmodellen — 343
7.4.1	Sequentielle Optimierung und Simulation — 345
7.4.2	Simultane Optimierung und Lösung des DAE-Systems — 350
7.5	Target-Berechnung und Economic MPC — 356
7.6	Schätzung nicht messbarer Zustands- und Störgrößen — 359
7.6.1	Nichtlineare Filter — 359
7.6.2	Schätzung auf bewegtem Horizont — 363
7.7	NMPC-Programmsysteme — 366
7.8	Weiterführende Literatur — 367

Literaturverzeichnis — 369

Verzeichnis der Quellen von Abbildungen — 395

Stichwortverzeichnis — 397