

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	XI
1 Einführung	1
1.1 Entstehung der Fuzzy-Technologie	1
1.2 Anwendungsbereiche der Regelungstechnik	2
1.3 Bedeutung von Fuzzy Control	3
2 Grundbegriffe der Regelungstechnik.....	5
2.1 Regelkreise mit Menschen als Regler	5
2.2 Technische Regelkreise	7
2.3 Regelungsziele	10
2.4 Einfache klassische Reglerfunktionale	13
2.5 Regler und Regelstrecken mit und ohne Erinnerung.....	18
2.6 Lineare und nichtlineare Regler und Regelstrecken.....	20
2.7 Entwurfskonzept für klassische Regler	25
3 Regleroptimierung von Hand und modellgestützte Regleroptimierung.....	27
3.1 Regleroptimierung von Hand.....	27
3.2 Modellgestützte Regleroptimierung.....	29
3.2.1 Faustformelverfahren	29
3.2.2 Frequenzkennlinienverfahren.....	31
3.2.3 Regleroptimierung durch modellgestützte Optimierung eines Gütemaßes	35
4 Flexiblere klassische Reglerfunktionale.....	43
4.1 Industrielle PID-Regler	43
4.2 Lineare Regler höherer Ordnung	44

4.3	Komplexere Reglerstrukturen.....	48
4.3.1	Vorfilter und Vorsteuerung.....	48
4.3.2	Mehrschleifige Regelkreise und Zustandsregler.....	50
4.3.3	Zustandsbeobachter.....	53
4.3.4	Modellgestützte Regelkreisstrukturen.....	54
4.3.5	Robuste und adaptive Regler.....	55
4.3.6	Abtastregler.....	56
4.3.7	Kennfeldregler	57
4.3.8	Mehrgrößenregelungssysteme.....	58
4.4	Lineare, nichtlineare und optimale Regler	59
5	Regelbasierte Regler als Vorläufer von Fuzzy-Reglern	63
5.1	Regelbasierte Beeinflussung und Modellierung dynamischer Systeme.....	63
5.2	Linguistische Regeln.....	65
5.3	Abgrenzung regelbasierter Regler von Fuzzy-Reglern.....	66
5.4	Regelbasierte Regler vom einfachen Typ	67
5.5	Komplexere regelbasierte Regler.....	74
5.6	Interpretation der konstruktiven und der destruktiven Inferenz.....	79
5.6.1	Interpretation der konstruktiven Inferenz.....	79
5.6.2	Interpretation der destruktiven Inferenz.....	80
5.7	Konstruktion der Ausgangsmengen	81
5.8	Entdeckung und Beseitigung von Unvollständigkeit.....	84
5.9	Entdeckung und Beseitigung von Mehrdeutigkeit.....	88
5.10	Redundante Regeln	91
5.11	Regelbasierte Regler mit mehreren Eingangsgrößen	92
5.12	Regelbasierte Regler mit mehreren Ausgangsgrößen	95
5.13	Allgemeinere regelbasierte Strukturen.....	100
6	Einsträngige Fuzzy-Regler.....	103
6.1	Weiche Zuordnung durch Zugehörigkeitsfunktionen	104
6.2	Fuzzy-Mengen	109
6.3	Einfache Fuzzy-Operatoren	111
6.4	Fuzzy-Regler nach Mamdani	115
6.4.1	Fuzzifizierung	116

6.4.2	Aggregation.....	116
6.4.3	Aktivierung	117
6.4.4	Akkumulation.....	119
6.4.5	Inferenz	122
6.4.6	Defuzzifizierung.....	123
6.4.7	Berücksichtigung von Glaubensgraden.....	127
6.4.8	Gesamtstruktur des Fuzzy-Reglers nach Mamdani	127
6.5	Abgewandelte Reglerstrukturen.....	132
7	Entwurf von Fuzzy-Reglern am Beispiel eines Mischventils	135
7.1	Mischwasserbereitungseinrichtungen	135
7.2	Systematischer Entwurf von Fuzzy-Reglern.....	136
7.2.1	Konfigurierung der Regelkreisstruktur	136
7.2.2	Festlegung der Struktur des Fuzzy-Reglers.....	137
7.2.3	Erstellung der Regelbasis.....	138
7.2.4	Ersteinstellung der Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen	138
7.2.5	Optimierung des Fuzzy-Reglers.....	139
7.3	Erstentwurf eines Fuzzy-Reglers für ein Mischventil.....	139
7.3.1	Konfigurierung der Regelkreisstruktur	139
7.3.2	Festlegung der Struktur des Fuzzy-Reglers und Ersteinstellung der Zugehörigkeitsfunktionen	140
7.3.3	Erstellung der Regelbasis.....	141
7.3.4	Optimierung der Zugehörigkeitsfunktionen	142
7.3.5	Regelungsverhalten.....	142
7.3.6	Reglerkennlinie	143
7.4	Neukonfigurierung des Regelungssystems	145
7.4.1	Erweiterung der Regelbasis.....	146
7.4.2	Zugehörigkeitsfunktionen	147
7.4.3	Verbessertes Regelungsverhalten.....	147
7.4.4	Reglerkennfeld	148
7.4.5	Entwurf und technische Realisierung.....	150
7.5	Diskussion.....	150
8	Weiterführende Anwendungaspekte	151
8.1	Fuzzy-Regler mit mehr als zwei Eingangsgrößen.....	151
8.2	Fuzzy-Regler mit strukturell mehrdeutigen / widersprüchlichen Regelbasen.....	152

8.3	Fuzzy-Regeleinrichtungen mit Erinnerung.....	153
8.4	Fuzzy-Regler auf höherer Automatisierungsebene.....	155
8.5	Genauigkeitsanforderungen an die Sensoren.....	156
9	Eigenschaften von Fuzzy-Operatoren.....	159
9.1	UND- und ODER-Operatoren	160
9.2	Gemeinsame Eigenschaften der UND- und ODER-Operatoren	164
9.3	Unterschiedliche Eigenschaften der UND- und ODER-Operatoren	167
9.4	Einbeziehen der Defuzzifizierung.....	174
9.4.1	Gleichzeitige Aktivierung mehrerer Regeln mit derselben Konklusion.....	174
9.4.2	Unsymmetrische ausgangsseitige Zugehörigkeitsfunktionen	175
9.5	Berücksichtigung des Realisierungsaufwandes.....	176
9.5.1	Regelaktivierung	177
9.5.2	Akkumulation.....	179
9.6	Kompensatorische Operatoren.....	181
9.7	Implikationsoperatoren	189
10	Zweisträngige Fuzzy-Regler	193
10.1	Flexibilität und Transparenz	193
10.2	Positives und negatives Erfahrungswissen.....	197
10.3	Negative Regeln.....	199
10.4	Zweisträngige Fuzzy-Reglerstruktur.....	201
10.5	Hyperinferenzstrategien.....	202
10.6	Hyperdefuzzifizierungsstrategien	204
10.7	Vergleich von ein- und zweisträngigen Fuzzy-Reglern.....	207
10.7.1	Verbot aller Ausgangsgrößenwerte $u \neq u_0$	208
10.7.2	Berücksichtigung verbotener Zonen	210
10.7.3	Berücksichtigung von Warnungen	212
10.7.4	Verarbeitung von globalen Regeln.....	212
10.7.5	Getrennte Verarbeitung von positiven und negativen Regeln	216
10.7.6	Zusammenfassender Vergleich	217

10.8	Anwendungsbeispiel Positionsregelung mit Hafreibung	218
10.8.1	Die Regelstrecke	218
10.8.2	Einsträngiger Fuzzy-Regler	220
10.8.3	Zweisträngiger Fuzzy-Regler mit Verbots- regel R_1^- zur Vermeidung der Ruhespannung.....	222
10.8.4	Zweisträngiger Fuzzy-Regler mit Verbots- regel R_2^- zur Verkleinerung der bleibenden Regelabweichung	224
10.8.5	Zweisträngiger Fuzzy-Regler mit beiden Verbotsregeln R_1^- und R_2^-	225
10.8.6	Anpassung an eine modifizierte Regelstrecke.....	226
10.8.7	Diskussion.....	226
10.9	Anwendungspotential zweisträngiger Fuzzy-Regler.....	228
11	Fuzzy-Regler mit Inferenzfiltern.....	231
11.1	Neue Interpretation von Zugehörigkeitsfunktionen	232
11.2	Das Inferenzfilter	233
11.2.1	Quadratische Filterfunktion.....	234
11.2.2	Lineare Filterfunktion	236
11.2.3	δ -Funktion als Filterfunktion.....	238
11.3	Allgemeinere Filterfunktionen.....	238
11.4	Invarianzforderungen.....	241
11.5	Wirkung und Anwendungspotential des Inferenzfilters.....	246
11.6	Filterung von Singletons.....	250
11.7	Zweisträngige Fuzzy-Regler mit Inferenzfilter.....	251
11.7.1	Reglerstrukturen.....	251
11.7.2	Eigenschaften	253
11.7.3	Variante für schnelle Echtzeitanwendungen	257
11.8	Verzicht auf die Translationsinvarianz	258
12	Datenbasierte Fuzzy-Modellierung und Regelgenerierung.....	265
12.1	Grundaufgabe der datenbasierten Fuzzy-Modellierung	265
12.2	Fuzzy-Modellierung durch vollständige Regeln.....	267
12.3	Fuzzy-Modellierung durch globale Regeln.....	269
12.4	Fuzzy-Modellierung durch relevante Regeln.....	271
12.4.1	Motivierung des Relevanzbegriffes.....	271
12.4.2	Ein Relevanzmaß	272

12.4.3 Regelgenerierung mit dem Fuzzy-ROSA-Verfahren	275
12.4.4 Reduktionsstrategien	278
12.5 Anwendungen des Fuzzy-ROSA-Verfahrens und des Relevanzindex.....	279
13 Realisierung von Fuzzy-Reglern und Entwurfsstrategien	283
13.1 Realisierung von Fuzzy-Reglern.....	283
13.2 Modellfreie und modellbasierte Entwurfsstrategien	286
14 Stabilitätsanalyse	289
14.1 Modellbasierte Stabilitätsanalyse.....	289
14.1.1 Methode der konvexen Zerlegung.....	289
14.1.2 Direkte Methode von Ljapunov	297
14.2 Stabilitätsanalyse ohne Prozeßmodell.....	300
15 Anwendungspotential von Fuzzy Control	303
Anhang	305
A Aussagen, Eigenschaften und Teilmengen.....	305
B Aussagenlogik.....	307
C Korrespondenzen zwischen Aussagen und Mengen	316
D Analytische Berechnung der gefilterten Zugehörigkeitsfunktion.....	319
Literaturverzeichnis	321
Sachregister.....	333