

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Teil I: Einführung | 1 |
| 1 Einführung | 3 |
| 1.1 Neue Herausforderungen an technische Systeme | 3 |
| 1.2 Komplexe, komplizierte und chaotische Systeme | 4 |
| 1.3 Grenzen traditioneller Berechnungsmethoden | 4 |
| 1.4 Naturinspirierte Berechnungsmethoden | 5 |
| 1.4.1 Bionik | 5 |
| 1.4.2 Künstliche Intelligenz | 8 |
| 1.4.3 Natural Computing | 10 |
| 1.4.4 Soft Computing | 11 |
| 1.4.5 Computational Intelligence | 11 |
| 1.5 Abschließende Bemerkungen | 15 |
| 2 Problemstellungen und Lösungsansätze | 17 |
| 2.1 Einführende Beispiele | 17 |
| 2.2 Mustererkennung und Klassifikation | 21 |
| 2.2.1 Einführung in die Problemstellung | 21 |
| 2.2.2 Entwurfs- und Auslegungskonzepte | 25 |
| 2.2.3 Kriterien zur Ergebnisbewertung | 33 |
| 2.2.4 Praktische Beispiele | 34 |
| 2.2.5 Weiterführende Literatur | 36 |
| 2.2.6 Zusammenfassende Bewertung | 36 |
| 2.3 Modellbildung | 38 |
| 2.3.1 Einführung in die Problemstellung | 38 |
| 2.3.2 Entwurfs- und Auslegungskonzepte | 42 |
| 2.3.3 Kriterien zur Ergebnisbewertung | 47 |
| 2.3.4 Praktische Beispiele | 54 |
| 2.3.5 Weiterführende Literatur | 57 |
| 2.3.6 Zusammenfassende Bewertung | 58 |
| 2.4 Regelung | 60 |
| 2.4.1 Einführung in die Problemstellung | 60 |
| 2.4.2 Entwurfs- und Auslegungskonzepte | 63 |
| 2.4.3 Kriterien zur Ergebnisbewertung | 75 |

| | | |
|-----------------|--|------------|
| 2.4.4 | Praktische Beispiele..... | 78 |
| 2.4.5 | Weiterführende Literatur | 82 |
| 2.4.6 | Zusammenfassende Bewertung | 82 |
| 2.5 | Optimierung und Suche | 84 |
| 2.5.1 | Einführung in die Problemstellung | 84 |
| 2.5.2 | Entwurfs- und Auslegungskonzepte | 90 |
| 2.5.3 | Kriterien zur Ergebnisbewertung..... | 93 |
| 2.5.4 | Praktische Beispiele..... | 95 |
| 2.5.5 | Weiterführende Literatur | 98 |
| 2.5.6 | Zusammenfassende Bewertung | 99 |
| 2.6 | Beispiele und Benchmarks | 101 |
| Teil II: | Fuzzy-Systeme | 103 |
| 3 | Einleitung | 105 |
| 4 | Allgemeine Prinzipien | 107 |
| 4.1 | Fuzzy-Mengen, Grundoperationen und linguistische Variablen..... | 107 |
| 4.2 | Mamdani-Fuzzy-Systeme | 111 |
| 4.3 | Relationale Fuzzy-Systeme | 116 |
| 4.4 | Takagi-Sugeno-Systeme | 119 |
| 4.5 | Multivariate Zugehörigkeitsfunktionen und allg. Fuzzy-Partitionierungen..... | 121 |
| 4.6 | Gegenüberstellung von Mamdani- und Takagi-Sugeno-Fuzzy-Systemen..... | 124 |
| 4.7 | Kurze Historie | 124 |
| 5 | Clusterverfahren | 127 |
| 5.1 | Grundlegende Prinzipien | 127 |
| 5.1.1 | Abstand und Metrik | 127 |
| 5.1.2 | Einfaches Beispiel: Nächste-Nachbarn-Klassifikation | 130 |
| 5.2 | Umsetzung | 131 |
| 5.2.1 | Ablauf eines Clusterverfahrens..... | 133 |
| 5.2.2 | c-Means-Algorithmus | 133 |
| 5.2.3 | Fuzzy-c-Means-Algorithmus..... | 134 |
| 5.2.4 | Gustafson-Kessel-Algorithmus..... | 140 |
| 5.2.5 | Bestimmung der Clusteranzahl bei Fuzzy-Clusterverfahren | 144 |
| 5.2.6 | Wahl des Unschärfeparameters..... | 146 |
| 5.2.7 | Verfahrenserweiterungen | 147 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Datengetriebene Modellbildung | 149 |
| 6.1 | Einführung | 149 |
| 6.2 | Lineare Systemidentifikation | 149 |
| 6.2.1 | Identifikation statischer LiP-Modelle mittels LS-Verfahren | 150 |
| 6.2.2 | Identifikation linearer dynamischer Eingrößenmodelle | 154 |
| 6.2.3 | Ablauf einer Identifikation | 160 |
| 6.3 | Fuzzy-Modelle | 162 |
| 6.3.1 | Statische Fuzzy-Modelle | 162 |
| 6.3.2 | Gewinnung zeitkontinuierlicher dynamischer Fuzzy-Modelle | 170 |
| 6.3.3 | Identifikation zeitdiskreter dynamischer Takagi-Sugeno-Modelle | 171 |
| 7 | Regelung | 177 |
| 7.1 | Einführung | 177 |
| 7.2 | Mamdani-Fuzzy-Regler | 178 |
| 7.2.1 | Fuzzy-P-Regler | 178 |
| 7.2.2 | Fuzzy-PI/PD-Regler | 181 |
| 7.2.3 | Anmerkungen | 183 |
| 7.3 | Fuzzy-basierte Selbsteinstellung für PI-Regler | 184 |
| 7.4 | Relationaler Fuzzy-Reglerentwurf | 185 |
| 7.4.1 | Reglerentwurf durch Modellinversion | 185 |
| 7.4.2 | Fuzzy-Vorsteuerung | 187 |
| 7.5 | Fuzzy-Gain-Scheduling und Takagi-Sugeno-Regler | 189 |
| 7.5.1 | Lineare Zustandsmodelle | 190 |
| 7.5.2 | Affine Zustandsmodelle | 192 |
| 7.6 | Realisierungsaspekte | 195 |
| 8 | Anwendungsbeispiele | 197 |
| 8.1 | Clusterung mittels Fuzzy-c-Means | 197 |
| 8.1.1 | Fehlererkennung und -isolierung bei Brennstoffzellen | 197 |
| 8.1.2 | Klinische instrumentelle Ganganalyse | 198 |
| 8.2 | Fuzzy-Klassifikation (nicht linear separierbares Zwei-Klassenproblem) | 199 |
| 8.3 | Fuzzy-Modellbildung | 200 |
| 8.3.1 | Kennfläche eines Axialkompressors | 200 |
| 8.3.2 | Dynamisches Modell einer Klärschlammverbrennungsanlage | 202 |
| 8.4 | Mamdani-Fuzzy-Regelung eines Drei-Tanksystems | 203 |
| 9 | Übungsaufgaben | 209 |
| 9.1 | Clusterung einer Objektmenge | 209 |
| 9.2 | Mamdani-Fuzzy-Regler | 210 |
| 9.3 | Kompensation einer nichtlinearen Ventilkennlinie | 211 |

| | | |
|---|--|------------|
| 9.4 | Entwurf einer Vorsteuerung für einen Verbrennungsprozess | 213 |
| 9.5 | Fuzzy-Kennlinienregler | 216 |
| Teil III: Künstliche Neuronale Netze | | 221 |
| 10 | Einleitung | 223 |
| 11 | Allgemeine Prinzipien | 225 |
| 11.1 | Netzstrukturen und -topologien | 225 |
| 11.1.1 | Schichten | 225 |
| 11.1.2 | Vorwärtsgerichtete und rückgekoppelte Netze | 226 |
| 11.2 | Lernkonzepte | 227 |
| 11.3 | Universelle Approximation und Netzstruktur | 228 |
| 11.4 | Effizienz und Lösungsqualität von Suchverfahren | 229 |
| 11.5 | Kurze Historie | 230 |
| 12 | Multi-Layer-Perceptron-(MLP-)Netze | 233 |
| 12.1 | Aufbau und Funktionsprinzip eines Neurons | 233 |
| 12.2 | Netzaufbau und Übertragungsverhalten | 234 |
| 12.3 | Training/Lernverfahren | 238 |
| 12.3.1 | Delta-Regel | 238 |
| 12.3.2 | Backpropagation-Algorithmus | 240 |
| 12.4 | Probleme beim Einsatz des Backpropagation-Verfahrens | 247 |
| 12.5 | Erweiterungen des Backpropagation-Verfahrens | 248 |
| 12.6 | Mustererkennung mit MLP-Netzen | 250 |
| 12.6.1 | Trennflächenform und Ebenenanzahl | 250 |
| 12.6.2 | Training des Klassifikators | 253 |
| 12.7 | Modellbildung mit MLP-Netzen | 259 |
| 12.8 | Modellbasierte prädiktive Regelung mit MLP-Netzen | 260 |
| 13 | Radiale-Basisfunktionen-Netze | 261 |
| 13.1 | Netzaufbau | 261 |
| 13.2 | Basisfunktionen | 262 |
| 13.3 | Übertragungsverhalten | 263 |
| 13.4 | Lernverfahren | 265 |
| 13.4.1 | Festlegung von Basen und Formparametern | 265 |
| 13.4.2 | Ermittlung der Gewichte | 267 |
| 13.4.3 | Parameteroptimierung | 267 |
| 13.5 | Methodische Erweiterungen | 269 |

| | | |
|--|--|------------|
| 14 | Selbstorganisierende Karten | 271 |
| 14.1 | Netzaufbau und Funktionsprinzip..... | 271 |
| 14.2 | Lernverfahren | 273 |
| 15 | Anwendungsbeispiele | 279 |
| 15.1 | Kennfläche eines Axialkompressors (MLP) | 279 |
| 15.2 | Dynamische Modellierung eines servo-hydraulischen Antriebs (MLP) | 281 |
| 15.3 | Dynamische Modellierung eines servo-pneumatischen Antriebs (MLP)..... | 282 |
| 15.4 | Fließkurvenmodellierung beim Kaltwalzen (MLP) | 283 |
| 15.5 | Virtueller Kraftsensor für elastischen Roboterarm (MLP)..... | 284 |
| 15.6 | Qualitätskenngrößenvorhersage bei Polymerisationsprozess mittels MLP-Netz... | 285 |
| 15.7 | Zustandsbewertung von Energieübertragungsnetzen (SOM)..... | 287 |
| 15.8 | Routenplanung/TSP (SOM)..... | 288 |
| 16 | Übungsaufgaben | 291 |
| 16.1 | Ex-Or-Funktionsapproximation mittels MLP-Netz | 291 |
| 16.2 | Klassifikation mittels MLP-Netzen (1)..... | 292 |
| 16.3 | Klassifikation mittels MLP-Netzen (2)..... | 293 |
| 16.4 | Funktionsapproximation mittels RBF-Netz | 294 |
| 16.5 | Training einer Kohonenkarte | 295 |
| Teil IV: Evolutionäre Algorithmen | | 297 |
| 17 | Allgemeine Prinzipien | 299 |
| 17.1 | Einführung | 299 |
| 17.2 | Grundidee und -schema Evolutionärer Algorithmen | 300 |
| 17.3 | Kurze Historie..... | 303 |
| 18 | Genetische Algorithmen | 305 |
| 18.1 | Einführung..... | 305 |
| 18.2 | Problemkodierung..... | 306 |
| 18.3 | Algorithmusablauf | 309 |
| 18.4 | Selektion der Elternteile..... | 310 |
| 18.4.1 | Fitnessproportionale Selektion..... | 310 |
| 18.4.2 | Rangbasierte Selektion | 313 |
| 18.4.3 | Tournierbasierte Selektion | 314 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 18.5 | Rekombination durch Cross-over | 314 |
| 18.5.1 | Binär kodierte kontinuierliche Probleme | 315 |
| 18.5.2 | Reell kodierte kontinuierliche Probleme..... | 315 |
| 18.5.3 | Ganzzahlig oder symbolisch kodierte Probleme..... | 316 |
| 18.5.4 | Permutationsprobleme | 317 |
| 18.6 | Mutation | 318 |
| 18.6.1 | Binär kodierte kontinuierliche Probleme | 318 |
| 18.6.2 | Ganzzahlig, symbolisch oder reell kodierte Probleme..... | 319 |
| 18.6.3 | Permutationsprobleme | 319 |
| 18.7 | Selektion der Überlebenden/Populationsmodelle | 320 |
| 18.8 | Abbruchkriterium | 321 |
| 18.9 | Erweiterungen/Weiterführendes | 321 |
| 18.10 | Illustrierendes Beispiel | 321 |
| 19 | Evolutionsstrategien | 325 |
| 19.1 | Einführung | 325 |
| 19.2 | Problemkodierung | 327 |
| 19.3 | Startpopulation..... | 327 |
| 19.4 | Algorithmusablauf..... | 328 |
| 19.5 | Selektion der Elternteile | 328 |
| 19.6 | Rekombination | 328 |
| 19.7 | Mutation | 328 |
| 19.7.1 | Rechenbergs 1/5-(Erfolgs-)Regel | 329 |
| 19.7.2 | Einheitliche Mutationsschrittweitenadaption..... | 330 |
| 19.7.3 | Separate unkorrelierte Mutationsschrittweitenadaption..... | 330 |
| 19.7.4 | Separate korrelierte Mutationsschrittweitenadaption..... | 331 |
| 19.8 | Selektion der Überlebenden/Populationsmodelle | 331 |
| 19.9 | Abbruchkriterium | 332 |
| 19.10 | Erweiterungen/Weiterführendes | 332 |
| 19.11 | Illustrierendes Beispiel | 333 |
| 20 | Genetisches Programmieren | 337 |
| 21 | Anwendungsbeispiele | 341 |
| 21.1 | Formoptimierung eines Rohrkrümmers (ES)..... | 341 |
| 21.2 | Pfadplanung für mobile Roboter (GA) | 342 |
| 21.3 | Modellgenerierung für biotechnologische Prozesse (GP) | 343 |

| | | |
|----------------|---|------------|
| 22 | Übungsaufgaben | 345 |
| 22.1 | Routenplanung für mobilen Roboter mittels Genetischem Algorithmus | 345 |
| 22.2 | Evolutionsstrategie zur Lösung eines kontinuierlichen Optimierungsproblems..... | 346 |
| 22.3 | Formoptimierung mittels Genetischem Algorithmus..... | 346 |
| 22.4 | Optimierung eines Fuzzy-Systems mittels Genetischem Algorithmus | 348 |
| Teil V: | Weiterführende Methoden | 349 |
| 23 | Hybride CI-Systeme | 351 |
| 23.1 | Einführung | 351 |
| 23.2 | Neuro-Fuzzy-Systeme | 353 |
| 23.2.1 | Methodik..... | 353 |
| 23.2.2 | Anwendungsbeispiel Schadensdiagnose von Abwasserrohren | 359 |
| 23.3 | Evolutionäre Fuzzy-Systeme | 361 |
| 23.3.1 | Methodik..... | 361 |
| 23.3.2 | Anwendungsbeispiel Fuzzy-Reglung inverses Rotationspendel..... | 364 |
| 23.4 | Evolutionäre Neuronale Netze | 366 |
| 23.4.1 | Methodik..... | 366 |
| 23.4.2 | Anwendungsbeispiel MLP-Netzoptimierung..... | 370 |
| 23.5 | Evolutionäre Neuro-Fuzzy-Systeme | 372 |
| 23.6 | Weiterführende Literatur..... | 372 |
| 24 | Schwarmintelligenz & Künstliche Immunsysteme | 375 |
| 24.1 | Einführung | 375 |
| 24.2 | Schwarmintelligenz | 375 |
| 24.2.1 | Partikelschwarmoptimierung | 375 |
| 24.2.2 | Ameisenalgorithmen..... | 378 |
| 24.2.3 | Weiterführende Literatur..... | 380 |
| 24.3 | Künstliche Immunsysteme..... | 380 |
| 24.3.1 | Biologisches Vorbild..... | 380 |
| 24.3.2 | Technische Umsetzung | 383 |
| 24.3.3 | Anwendungsbeispiel Unterdrückung von Störeinwirkungen..... | 385 |
| 24.3.4 | Weiterführende Literatur..... | 386 |
| Anhang | | 389 |
| 25 | Anhang | 391 |
| 25.1 | Verzeichnis häufiger Formelzeichen und Abkürzungen..... | 391 |
| 25.2 | Vektoren und Matrizen..... | 395 |
| 25.3 | Normalverteilung..... | 397 |

| | | |
|--|---|------------|
| 25.4 | Graphen..... | 398 |
| 25.5 | Herleitung des FCM-Algorithmus | 398 |
| 25.6 | Berechnungsprogramme im Bereich der CI..... | 400 |
| Literatur | | 403 |
| Verzeichnis der Anwendungsbeispiele | | 423 |
| Index | | 425 |