

Christian Borgelt, Frank Klawonn,  
Rudolf Kruse, Detlef Nauck

# **Neuro-Fuzzy-Systeme**

**Von den Grundlagen künstlicher  
Neuronaler Netze zur Kopplung  
mit Fuzzy-Systemen**

3. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Neuronale Netze</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Motivation . . . . .	3
1.2	Biologische Grundlagen . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Schwellenwertelemente</b>	<b>8</b>
2.1	Definition und Beispiele . . . . .	8
2.2	Geometrische Deutung . . . . .	10
2.3	Grenzen der Ausdrucksmächtigkeit . . . . .	12
2.4	Netze von Schwellenwertelementen . . . . .	14
2.5	Training der Parameter . . . . .	16
2.6	Varianten . . . . .	27
2.7	Training von Netzen . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Allgemeine neuronale Netze</b>	<b>29</b>
3.1	Struktur neuronaler Netze . . . . .	29
3.2	Arbeitsweise neuronaler Netze . . . . .	32
3.3	Training neuronaler Netze . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Mehrschichtige Perzeptren</b>	<b>39</b>
4.1	Definition und Beispiele . . . . .	39
4.2	Funktionsapproximation . . . . .	46
4.3	Logistische Regression . . . . .	52
4.4	Gradientenabstieg . . . . .	55
4.5	Fehler-Rückpropagation . . . . .	59
4.6	Beispiele zum Gradientenabstieg . . . . .	61
4.7	Varianten des Gradientenabstiegs . . . . .	65
4.8	Beispiele zu einigen Varianten . . . . .	71
4.9	Sensitivitätsanalyse . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Radiale-Basisfunktionen-Netze</b>	<b>76</b>
5.1	Definition und Beispiele . . . . .	76
5.2	Funktionsapproximation . . . . .	80
5.3	Initialisierung der Parameter . . . . .	84
5.4	Training der Parameter . . . . .	91
5.5	Verallgemeinerte Form . . . . .	96

<b>Selbstorganisierende Karten</b>	<b>98</b>
6.1 Definition und Beispiele . . . . .	98
6.2 Lernende Vektorquantisierung . . . . .	101
6.3 Nachbarschaft der Ausgabeneuronen . . . . .	105
<b>Hopneld-Netze</b>	<b>111</b>
7.1 Definition und Beispiele . . . . .	111
7.2 Konvergenz der Berechnungen . . . . .	115
7.3 Assoziativspeicher . . . . .	120
7.4 Lösen von Optimierungsproblemen . . . . .	125
7.5 Simuliertes Ausglühen . . . . .	131
<b>Rückgekoppelte Netze</b>	<b>134</b>
8.1 Einfache Beispiele . . . . .	134
8.2 Darstellung von Differentialgleichungen . . . . .	140
8.3 Vektorielle neuronale Netze . . . . .	141
8.4 Fehler-Rückpropagation in der Zeit . . . . .	145
<b>II Fuzzy-Systeme</b>	<b>149</b>
<b>9 Einleitung</b>	<b>151</b>
9.1 Motivation . . . . .	151
9.2 Fuzzy-Mengen . . . . .	152
9.3 Grundlegende Operationen auf Fuzzy-Mengen . . . . .	156
<b>10 Fuzzy-Systeme und -Verfahren</b>	<b>161</b>
10.1 Fuzzy-Regelung . . . . .	161
10.2 Fuzzy-Klassifikatoren . . . . .	168
10.3 Fuzzy-Clusteranalyse . . . . .	170
<b>III Neuro-Fuzzy-Systeme</b>	<b>177</b>
<b>11 Einleitung</b>	<b>179</b>
11.1 Modellierung von Expertenverhalten . . . . .	179
11.2 Kombination Neuronaler Netze und Fuzzy-Systeme . . . . .	182
11.3 Was ist ein Neuro-Fuzzy-System? . . . . .	188
<b>12 Typen von Neuro-Fuzzy-Systemen</b>	<b>194</b>
12.1 Kooperative und Hybride Neuro-Fuzzy-Systeme . . . . .	194
12.2 Adaptive Fuzzy-Assoziativspeicher . . . . .	201
12.3 Linguistische Interpretation selbstorganisierender Karten . . . . .	208
12.4 Erlernen von Fuzzy-Mengen . . . . .	211
12.5 Das ARIC-Modell . . . . .	215
12.6 Das GARIC-Modell . . . . .	224

12.7	Das ANFIS-Modell . . . . .	233
12.8	Das NNDFR-Modell . . . . .	238
12.9	Das FuNe-I-Modell . . . . .	242
12.10	Fuzzy RuleNet . . . . .	248
12.11	Weitere Modelle . . . . .	252
<b>13</b>	<b>Das generische Fuzzy-Perzeptron</b>	<b>257</b>
13.1	Architektur . . . . .	258
13.2	Lernverfahren . . . . .	260
13.3	Semantische Aspekte . . . . .	262
<b>14</b>	<b>Fuzzy-Regeln aus Daten lernen</b>	<b>264</b>
14.1	Strukturlernen . . . . .	266
14.2	Lernalgorithmen . . . . .	273
14.3	Behandlung symbolischer Daten . . . . .	282
14.4	Behandlung fehlender Werte . . . . .	289
<b>15</b>	<b>Optimierung von Fuzzy-Regelbasen</b>	<b>293</b>
15.1	Adaptive Regelgewichte . . . . .	293
15.2	Lernverfahren für Fuzzy-Mengen . . . . .	308
15.3	Strukturoptimierung (Pruning) . . . . .	327
<b>16</b>	<b>Fuzzy-Regelung mit NEFCON</b>	<b>330</b>
16.1	Die Architektur . . . . .	332
16.2	Parameterlernen — Fuzzy-Mengen trainieren . . . . .	336
16.3	Erlernen einer Regelbasis . . . . .	346
16.4	Implementierungen von NEFCON . . . . .	350
<b>17</b>	<b>Klassifikation mit NEFCLASS</b>	<b>362</b>
17.1	Intelligente Datenanalyse . . . . .	362
17.2	Das NEFCLASS-Modell . . . . .	364
17.3	Implementierungsaspekte . . . . .	367
17.4	Der Einfluss von Regelgewichten . . . . .	370
17.5	Erzeugung kleiner Klassifikatoren . . . . .	373
17.6	Verwendung Symbolischer Variablen . . . . .	376
17.7	Klassifikation als Datenvorverarbeitung . . . . .	378
<b>18</b>	<b>Funktionsapproximation mit NEFPROX</b>	<b>383</b>
<b>19</b>	<b>Anwendung von Neuro-Fuzzy-Systemen</b>	<b>387</b>
19.1	Anwendungsbeispiele . . . . .	387
19.2	Auswahl von Neuro-Fuzzy-Ansätzen . . . . .	390
19.3	Semantik und Interpretierbarkeit . . . . .	392

<b>IV</b>	<b>Anhänge</b>	<b>397</b>
<b>A</b>	<b>Geradengleichungen</b>	<b>399</b>
<b>B</b>	<b>Regression</b>	<b>402</b>
<b>C</b>	<b>Aktivierungsumrechnung</b>	<b>407</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>409</b>
	<b>Index</b>	<b>429</b>