

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Evolutionäre Algorithmen</b>	<b>5</b>
2.1	Biologische Motivation	5
2.1.1	Darwins Theorie zur Evolution und ihre Weiterentwicklung	6
2.1.2	Eine moderne Sicht auf die genetischen Grundlagen der Variationsmechanismen	7
2.1.3	Komplexität als Herausforderung für die Informatik	10
2.2	Evolutionäre Algorithmen	12
2.2.1	Modellierung des Genoms von Individuen	12
2.2.2	Modellierung eines Phänotyps	14
2.2.3	Modellierung von Populationen und Generationen	18
2.2.4	Zielfunktion, Fitness-Begriff und der Selektions-Operator	19
2.2.5	Rekombinations- und Mutations-Operatoren als Variations-Operatoren	20
2.3	Mathematische Metamodelle von Evolutionären Algorithmen	22
2.3.1	Metamodellierung	23
2.3.2	Das Konzept der heuristischen Suche und des Suchraums als Basis für die beiden Metamodelle	23
2.3.3	Das Radcliffe-Metamodell	26
2.3.4	Das Altenberg-Metamodell	28
2.4	Zusammenfassung	33
<b>3</b>	<b>Modul- und Modularitäts-Begriff</b>	<b>35</b>
3.1	Ein intuitiver Zugang zu Modulen und Modularität	35
3.1.1	Modularität in technischen Systemen	36
3.1.2	Übertragbarkeit auf allgemeine Evolutionäre Algorithmen	39
3.2	Formalisierung im Rahmen des Radcliffe-Metamodells	40
3.2.1	Formalisierung von Teilsystemen	41
3.2.2	Eine strenge Anforderung: Radcliffe-Modularität	42
3.2.3	Die Begriffe von Reinheit und Respekt	43
3.2.4	Problematische Eigenschaften des Radcliffe-Modularitäts-Begriffs	45
3.3	Synthese der Metamodelle und Neu-Formulierung der betrachteten Konzepte	47
3.3.1	Synthese der beiden Metamodelle	47
3.3.2	Reinheit, Respekt und Radcliffe-Modularität in der Synthese der Metamodelle	48
3.4	Die Modularitäts-Matrix der reinen Rekombination	51
3.4.1	Definition des Modularitäts-Matrixelements der reinen Rekombination	51

3.4.2	Der Zusammenhang von Reinheit mit den Diagonalelementen der Modularitäts-Matrix . . . . .	52
3.4.3	Zusammenhang von Respekt mit dem Wert bestimmter Elemente der Modularitätsmatrix . . . . .	53
3.5	Individuen-Typ-bezogene Maße für Modularität . . . . .	55
3.5.1	Gleichverteilungs-Modularitätsgrad der reinen Rekombination als populationsunabhängiges Maß . . . . .	55
3.5.2	Der Effektive Modularitätsgrad der reinen Rekombination als praktikables populationsabhängiges Maß . . . . .	56
3.5.3	Das Verhältnis zwischen Gleichverteilungs- und Effektivem Modularitätsgrad der reinen Rekombination . . . . .	58
3.6	Integration von Mutationsphänomenen und Betrachtungen zur reinen Mutation . . . . .	59
3.6.1	Integration von Mutationsphänomenen . . . . .	59
3.6.2	Modellierung reiner Mutation und die Konsequenzen für Modularität und Respekt . . . . .	61
3.7	Zusammenfassung . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Bestehende Ansätze und ein Metamodell . . . . .</b>	<b>65</b>
4.1	Individuen als Module und Modulare Individuen . . . . .	66
4.1.1	Michigan-Modelle . . . . .	66
4.1.2	Pittsburgh-Modelle und hybride Ansätze . . . . .	68
4.2	Bezug des eingeführten Modularitätsbegriffs zur Building-Block-Hypothese . . . . .	69
4.2.1	Schemata und das Schema-Theorem . . . . .	69
4.2.2	Schemata als Äquivalenzklassen von respektierten Äquivalenzrelationen . . . . .	71
4.2.3	Allgemeine Abschätzung der Modularitäts-Matrixelemente der reinen Rekombination . . . . .	72
4.3	Ein formaler Rahmen für komplexere Genom-Strukturen . . . . .	73
4.3.1	Genotypen, Phänotypen und ihre Darstellung . . . . .	73
4.3.2	Äquivalenzrelationen und -klassen über der Menge der Genotypen und der Menge der Phänotyp-Darstellung . . . . .	75
4.4	Der Linkage Learning Genetic Algorithm (LLGA) . . . . .	76
4.4.1	Das Codierungsschema des LLGA . . . . .	76
4.4.2	Respekt und Modularität beim Rekombinationsmechanismus des LLGA . . . . .	77
4.4.3	Ergebnisse zum LLGA . . . . .	81
4.5	Modularität als Eigenschaft der Genotyp-Phänotyp-Abbildung . . . . .	81
4.5.1	Adaptive Genotyp-Phänotyp-Abbildungen . . . . .	81
4.5.2	Ein Gedankenexperiment für eine Adaptive Genotyp-Phänotyp-Abbildung . . . . .	83
4.5.3	Verschieden starke Auswirkungen von reinen Mutationen im Gedankenexperiment . . . . .	84
4.5.4	Einführung von Rekombination im Gedankenexperiment und Betrachtungen zu Reinheit und Respekt . . . . .	86
4.5.5	Abhängigkeit der Modularitäts-Matrixelemente der reinen Rekombination von der Abbildung $\mu'$ im Gedankenexperiment . . . . .	87
4.5.6	Ergebnisse des Gedankenexperiments zu Adaptiven Genotyp-Phänotyp-Abbildungen . . . . .	88
4.6	Adaptive Mutationsraten . . . . .	88

4.6.1	Erweiterung des Genotyps durch Mutationsraten . . . . .	89
4.6.2	Respekt und Modularität bei Adaptiven Mutationsraten . . . . .	90
4.7	Das abstrakte MetaEA-Modell . . . . .	90
4.7.1	Gemeinsamkeiten der vorhergehenden Modelle . . . . .	90
4.7.2	Problematik der Verwendung der konkreten Modelle für die weiteren Untersuchungen . . . . .	91
4.7.3	Anforderungen an das MetaEA-Modell . . . . .	92
4.7.4	Der Genotyp von MetaEA . . . . .	93
4.7.5	Die evolutionären Operatoren von MetaEA . . . . .	98
4.7.6	Einige einfache Fallbeispiele zur Wirkungsweise des Algorithmus . . . . .	101
4.7.7	Die Matricelemente von MetaEA . . . . .	102
4.8	Zusammenfassung . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Selbstorganisierte Modularisierung</b> . . . . .	<b>105</b>
5.1	Selbstorganisation im Kontext von Modularität . . . . .	106
5.2	Entwicklung der Modularität bei neutraler Evolution . . . . .	106
5.2.1	Betrachtung reiner Rekombination . . . . .	106
5.2.2	Betrachtung reiner Mutation . . . . .	109
5.2.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	111
5.3	Theoretische Überlegungen zu Selektion und Modularität . . . . .	112
5.3.1	Verschiebung der Sichtweise und Nachkommen-Zielfunktion . . . . .	112
5.3.2	Betrachtung einfacher Spezialfälle von Selektion . . . . .	115
5.3.3	Zusammenhang zwischen Nachkommenzahl und dem Effektiven Modularitätsgrad . . . . .	117
5.3.4	Folgerungen aus den theoretischen Überlegungen . . . . .	119
5.4	Überprüfung des $\mathcal{M}$ - $\mathcal{N}$ -Zusammenhangs durch Simulation . . . . .	120
5.4.1	$\mathcal{M}$ - $\mathcal{N}$ -Streuplots als Vergleichsmöglichkeit zwischen theoretischen Vorhersagen und Simulationsergebnissen . . . . .	121
5.4.2	Ein einfaches Testszenario mit $N^{[R]} = 1$ und $N^{[M]} = 1$ . . . . .	122
5.4.3	Auswirkungen von Parameteränderungen am einfachen Testszenario . . . . .	125
5.4.4	Ergebnis des Theorie-Simulations-Vergleichs . . . . .	128
5.5	Effekte Selbstorganisierter Modularisierung . . . . .	129
5.5.1	Verschiebung der Cluster beim einfachen Testszenario . . . . .	129
5.5.2	Selektions-Effekte aus höherem Gleichverteilungs-Modularitätsgrad einer bestimmten Modifikatorklasse . . . . .	132
5.5.3	Selektions-Effekte bei mehreren Respektklassen identischer Gleichverteilungs-Modularität . . . . .	138
5.5.4	Selektions-Effekte bei mehreren Respektklassen unterschiedlicher Gleichverteilungs-Modularität . . . . .	142
5.5.5	Zwei komplexere Szenarien . . . . .	144
5.6	Bezug zu Evolutionären Algorithmen außerhalb des MetaEA-Rahmens . . . . .	146
5.6.1	Bekannte Effekte in bestehenden Ansätzen und die Rolle von Schemata in Einfachen Genetischen Algorithmen . . . . .	147
5.6.2	Generelle Schlußfolgerungen für die Modellierung und Simulation von Evolutionären Algorithmen . . . . .	148
5.7	Zusammenfassung . . . . .	150
<b>6</b>	<b>Software-Werkzeuge</b> . . . . .	<b>153</b>
6.1	Anforderungen . . . . .	154

6.1.1	Entwicklung eines MetaEA-Simulators mit angemessenen Interaktions-Möglichkeiten . . . . .	154
6.1.2	Größtmögliche Plattformunabhängigkeit . . . . .	155
6.1.3	Größtmögliche Modellfreiheit bei der Implementierung abstrakter Konzepte und Offenheit für Erweiterungen . . . . .	155
6.2	Komponenten und Aufbau der Simulationsumgebung . . . . .	156
6.2.1	Wahl der bestehenden Komponenten und der Entwicklungsumgebung . . . . .	156
6.2.2	Konzeptueller Aufbau des Simulators . . . . .	157
6.3	Neu implementierte zentrale Bestandteile . . . . .	159
6.3.1	Modellierung von Äquivalenzrelationen und Äquivalenzklassen . . . . .	159
6.3.2	Erweiterung der GALib um Kenngrößen . . . . .	160
6.3.3	Die Implementation von MetaEA . . . . .	161
6.4	Interaktion und Visualisierung in einer graphischen Benutzungsoberfläche . . . . .	161
6.4.1	Das allgemeine Konzept . . . . .	161
6.4.2	Einzelläufe . . . . .	162
6.4.3	Steuerung von automatisierten, systematischen Simulationsexperimenten . . . . .	165
6.5	Zusammenfassung . . . . .	166
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Technische Herleitungen</b> . . . . .	<b>171</b>
A.1	Beweis für den fehlenden Respekt beim Beispiel aus Abschnitt 4.5.4 . . . . .	171
A.2	Herleitung der vereinfachten Formel für $n_{jk}$ aus Abschnitt 5.3.3 . . . . .	173
A.3	Herleitung des Anteils der Klasse $\xi^\dagger$ an Population $y$ aus Abschnitt 5.4.2 . . . . .	175
<b>B</b>	<b>Wichtige Bezeichnungen</b> . . . . .	<b>177</b>
<b>C</b>	<b>Inhalt der zur Arbeit gehörenden CD-ROM</b> . . . . .	<b>179</b>
C.1	Allgemeines . . . . .	179
C.2	Inhalt . . . . .	179