

# 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 Matrixelemente 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 Benutzeroberfläche . . . . .                                   | 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 $\xi^\uparrow$ 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        |

---

# Kapitel 1

## Einleitung

Evolutionäre Algorithmen sind neben den Neuronalen Netzen der wohl bekannteste Ansatz im Bereich der Informatik, der stark von biologischen Überlegungen inspiriert ist. Die Modelle bzw. Algorithmen ahmen in meist sehr vereinfachter und abstrakter Art und Weise das Darwinsche Modell der biologischen Evolution nach, über das im Bereich der Biologie heute in weiten Teilen Konsens besteht.

Unter der Annahme, daß die heute existierenden Lebensformen tatsächlich unter der Einwirkung der Mechanismen der Darwinschen Evolution zustandegekommen sind, haben diese Mechanismen die komplexesten Strukturen hervorgebracht, die der Menschheit bekannt sind. Sie reichen von den einzelnen Zellen über Gewebe und Organe hin zu Organismen und darüber hinaus zu komplexen Verbänden und Gesellschaften. Sie umfassen das physische Überleben und die Fortpflanzung unter den unterschiedlichsten Bedingungen, aber auch die faszinierenden geistigen Leistungen, die Tiere und Menschen hervorbringen können. Keine der beeindruckenden technischen Errungenschaften der menschlichen Geschichte reicht an das Maß an Komplexität heran, das in diesen Strukturen verwirklicht ist. Umgekehrt kommt man bei der Betrachtung vieler der Teilstrukturen nicht umhin, eher an eine kreative Ingenieurleistung denn an einen Mechanismus zu denken, der in einem stochastischen Prozeß entstanden ist.

So verwundert es nicht, daß versucht wird, durch Evolutionäre Algorithmen mehr über Evolutionsprozesse zu erfahren – etwa im Gebiet *Artificial Life*. Weiterhin ist es eine Bestrebung der Forschung im Bereich der *Künstlichen Intelligenz (Artificial Intelligence)*, solche Algorithmen auch gezielt als Optimierungsverfahren für immer komplexere Probleme einzusetzen. Unter beiden Gesichtspunkten steht die Frage im Raum, wie die vergleichsweise einfachen Prozesse des Darwinschen Evolutionsmodells komplexe und zweckmäßige Strukturen entstehen lassen können.

Eines der Schlüsselkonzepte im Bereich technischer Konstruktion durch kreative Ingenieure ist der Aufbau von komplizierten Gesamtsystemen aus Einzelteilen oder Modulen. Dies gilt im Bereich des Maschinenbaus, aber auch in Elektrotechnik und Elektronik sowie bei der Konzeption und Erstellung komplexer Software-Systeme, dem *Software Engineering*. Die geschickte stufenweise Modularisierung, also Zerlegung eines Gesamtproblems in immer kleinere Teilprobleme, die Erstellung von austauschbaren und