Evolutionäre Algorithmen – Begriffe und Definitionen*

Hans-Georg Beyer[1)], Eva Brucherseifer[2)], Wilfried Jakob[3)], Hartmut Pohlheim[4)], Bernhard Sendhoff[5)] und Thanh Binh To[6)]

[1)] Universität Dortmund, Informatik XI (Systemanalyse), D-44221 Dortmund

[2)] TU Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik, Landgraf-Georg-Str. 5, D-64283 Darmstadt

[3)] Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Angewandte Informatik, Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe

[4)] DaimlerChrysler AG, Forschung und Technologie, Alt-Moabit 96a, D-10559 Berlin

[5)] Honda R&D Europe GmbH, Future Technology Research Division, Carl-Legien-Str. 30, D-63073 Offenbach/Main

[6)] Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg, Steinfeldstr. 3, D-39179 Magdeburg

Vorbemerkung

Evolutionäre Algorithmen (EA) haben als universell anwendbare Verbesserungs- und Optimierungsstrategien seit Beginn der 1990'er Jahre eine weite Verbreitung in allen Bereichen von Wirtschaft und Forschung gefunden. Der große Erfolg liegt dabei u.a. in der Tatsache begründet, daß ihre Anwendung auf einem scheinbar einfachen und leicht nachvollziehbaren Prinzip, dem Darwinschen Evolutionsparadigma, oder etwas zugespitzt ausgedrückt, dem „survival of the fittest“ basiert: Durch die Anwendung von Variation und Selektion auf eine Population von Lösungsalternativen werden nach dem Muster der Natur schrittweise bessere Lösungen gefunden und auf diese Weise Optima bestimmt – oder zumindest approximiert.

Bedingt durch die einfachen Grundprinzipien hat sich in den vergangenen Jahren eine Unzahl von Varianten der EA gebildet (Anzahl der jährlichen Veröffentlichungen z.Zt. größer als 1000). War die Frühphase der EA-Geschichte noch durch disjunkte EA-Klassen gekennzeichnet, die Genetischen Algorithmen (GA), die Evolutionsstrategie (ES) und die Evolutionäre Programmierung (EP), so findet man zunehmend eine Vermischung all dieser Ansätze. Aus diesem Grund wurde der Oberbegriff „Evolutionäre Algorithmen“ eingeführt. Neben der allgemeinen Verwendung dieses Begriffes sollte dieser immer dann zur Anwendung kommen, wenn die spezielleren, in diesem Papier genauer definierten EA-Varianten *nicht* zutreffen.

1 Zweck

Da es aufgrund der international großen Zahl von Veröffentlichungen und der Vielzahl von EA-Varianten zu einem Wildwuchs von Begriffen gekommen ist, besteht ein großer Bedarf an Systematisierung und Standardisierung. Der Zweck dieses Papiers ist es daher, eine einheitliche Begriffs- und Definitionsbasis für die Evolutionären Algorithmen zu liefern.

Ein großer Teil der hier zu definierenden Begriffe hat seinen Ursprung in der Biologie und wird dort in ähnlicher, jedoch nicht notwendigerweise äquivalenter, teilweise auch abweichender Form/Bedeutung verwendet. Die hier gegebenen Definitionen sind für die Anwendung im Bereich der Ingenieur- und Naturwissenschaften gedacht. Ihre Anwendung wird für alle Bereiche von Wirtschaft und Wissenschaft empfohlen.

*Anmerkungen und Kommentare zu diesem Papier möglichst per email an Priv.-Doz. Dr. Hans-Georg Beyer, Informatik XI (Systemanalyse), Universität Dortmund, 44221 Dortmund, `beyer@zappa.cs.uni-dortmund.de`. Diese Arbeit wurde vom Sonderforschungsbereich 531, "'Computational Intelligence"', der Universität Dortmund unterstützt und wurde auf seine Veranlassung unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel gedruckt.

2 Begriffe und Definitionen

A

Abbruchkriterium	Bedingungen, unter denen der Evolutionsprozeß im EA terminiert (Beispiele: Anzahl der Funktionsberechnungen, max. Rechenzeit, Konvergenz im Zielfunktions- oder Suchraum)
Abschneideselektion	→ Kommaselektion, → Plusselektion
Adaptation	Prozeß der Anpassung an gegebene (äußere) Bedingungen
Allele	mögliche Ausprägungen des Zustandes eines → Gens (bei binärer → Repräsentation: `0` | `1`)
automatisch definierte Funktion (ADF)	Modularisierungskonzept, um die Effizienz von GP zu erhöhen. Hierzu werden Unterbäume gebildet, welche in den Hauptbäumen als Funktionen verwendet werden können. Die ADF werden in gleicher Weise variiert wie die Hauptbäume.

B

Baldwin-Effekt	Vom Baldwin-Effekt spricht man, wenn bei → hybriden Strategien durch lokale Suchverfahren der Zielfunktionswert eines Individuums verändert wird und dies zu einer Änderung des Fitnesswertes, d.h. der zu erwartenden Reproduktionsrate, führt. Im Gegensatz zur → Lamarckschen Evolution bleibt aber der Genotyp unverändert.
Baustein-Hypothese (kurz BBH für englisch: „building block hypothesis“)	Erklärungsversuch für das Funktionieren des (binären) GA auf der Basis des → Schematheorems. Die BBH basiert auf der Annahme, daß günstige Eigenschaften in den elterlichen Genomen in (relativ) kleinen Codeblöcken an verschiedenen Stellen aggregiert sind und durch → Crossover im Nachkommen zusammengeführt werden. Die verbesserte Lösung wird also aus „Teillösungen“, den Bausteinen, „zusammengebaut.“ Anmerkung: Die BBH erlaubt *keine* Aussagen über die Effizienz des Zusammenbauens oder über das Konvergenzverhalten (→ Konvergenz) und die → Performance des GA.
Bitmutation	zufällige Negation einer Bitposition (Gen) im Individuengenom (bei binärer → Repräsentation)
Block	→ Knoten

C

Chromosom	Satz der Gene eines Individuums
Codeaufblähung	Phänomen des unkontrollierten Wachstums der Genome von GP-Individuen
Codierung	→ Repräsentation
Crossover (CO, XO)	(seltener „Kreuzung“) spezielle Form der → Rekombination in GA bei der zwei Eltern durch Genaustausch (i.d.R.) zwei Nachkommen produzieren, Varianten: n-Punkt-CO, uniformes CO, problemspezifische CO
Crossoverrate	Wahrscheinlichkeit für die Durchführung eines CO

D

Diffusionsmodell	→ lokales Populationsmodell
diskrete Rekombination	auch dominante R., Erzeugung eines Rekombinanten durch koordinatenweise Zufallsauswahl aus einer Menge von ρ Eltern
Diversität	Grad bzw. Maß(e) der Verschiedenartigkeit der Individuen auf der Ebene ihrer Genome
dominante Rekombination	→ diskrete Rekombination

E

Ein-Fünftel-Regel/ 1/5-Regel	Regel zur Steuerung der → Mutationsstärke in der $(1 + 1)$-ES: In Abhängigkeit von der (gemessenen) → Erfolgswahrscheinlichkeit P_s wird die Mutationsstärke nach einer gewissen Anzahl von Generationen vergrößert, wenn $P_s > 1/5$, und verkleinert, wenn $P_s < 1/5$.
Elitismus/Eliteselektion	Eigenschaft von Selektionsmethoden, die ein Überleben des besten Individuums garantieren
Elter	→ Individuum, das aufgrund seiner → Fitness zur Generierung von Nachkommen ausgewählt/selektiert wurde
endogener Strategieparameter	Strategieparameter, der der Evolution unterliegt, z.B. die → Mutationsstärke in selbstadaptiven ES und EP
entstochastisierte ES	ES, bei der der tatsächlich erfolgte Schritt im Objektvariablenraum zur → Adaptation der → Strategieparameter genutzt wird
Epistasis	Nichtseparabilität der Effekte einzelner Gene auf den Zielfunktionswert (→ Zielfunktion) bzw. auf die → Fitness des Individuums
Erfolgswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, daß ein Nachkomme einen besseren Zielfunktionswert hat als sein Elter (nur für Mutation definiert)
Evolutionärer Algorithmus (EA)	Sammelbegriff für alle Varianten von (probabilistischen) Optimierungs- und Verbesserungsalgorithmen, die der Darwinschen Evolution nachempfunden sind. Optimalzustände werden durch schrittweise Verbesserung auf Basis des Variations-Selektions-Paradigmas approximiert. Die → Variationsoperatoren produzieren dabei genetische → Diversität und die → Selektion gibt der Evolution die Richtung.
Evolutionäre Programmierung (EP)	Variante der EA, die wie die ES auf der natürlichen Problemrepräsentation evolviert, Mutation, jedoch *keine* Rekombination als Variationsoperator, und $(\mu + \mu)$ → Turnierselektion verwendet
Evolutionäres Rechnen (EC)	Berechnungen unter Verwendung von → Evolutionären Algorithmen

Evolutionsstrategie (ES)	Variante der EA, die i.d.R. in der natürlichen Problemrepräsentation evolviert (keine Genotyp-Phänotyp-Abbildung für → Objektparameter) und deren Grundformen durch die $(\mu/\rho \overset{+}{,} \lambda)$-ES (sprich: „mü-Strich-rho-Plus-bzw.-Komma-lambda-ES“) Nomenklatur charakterisiert wird. Hierbei ist μ die Elternanzahl, λ die Nachkommenzahl, ρ die Mischungszahl (Anzahl der Elternindividuen, die (multi-) rekombinativ einen Nachkommen generieren), „+“ bzw. „,“ die Art der → (Abschneide-) Selektion. Ein Individuum besteht aus einem Satz von Objektparametern, dem dazugehörigen Zielfunktionswert (→ Zielfunktion) und einem Satz von (endogenen) → Strategieparametern. Die ES verwendet → Mutation und → Rekombination (falls $\rho > 1$) als Variationsoperatoren.
Evolvierbare Hardware (EH)	spezielle Vorrichtungen, Schaltkreise oder Maschinen, die eine Realisierung des Darwinschen Evolutionsparadigmas auf materieller Ebene erlauben
exogener Strategieparameter	Strategieparameter, der während der Evolution konstant gehalten wird, z.B. (i.d.R.) Populationsgröße, Lernparameter

F

Fitness	Bewertung des Individuums bzgl. seiner Reproduktionstauglichkeit. → Selektion im EA erfolgt auf der Basis der F. Dabei wird die F. im allgemeinen basierend auf dem(n) Zielfunktionswert(en) im Vergleich zu allen anderen Individuen im → Selektionspool bestimmt. Die F.-funktion kann zusätzlich von verschiedenen Nebenbedingungen abhängen und stochastischen Einflüssen unterliegen (Fitnessrauschen). Der Begriff der F.-Funktion wird häufig synonym zur → Zielfunktion verwendet.
Fitnesslandschaft	auch Gütegebirge, Metapher zur Verdeutlichung der Abhängigkeit der Fitness, bzw. Zielfunktion, von der Lage des Individuums im Suchraum
fitness-proportionale Selektion	Zufallsselektionsverfahren, wobei die Selektionswahrscheinlichkeit für ein Individuum proportional zu dessen Fitness ist. Die Fitness muß daher nichtnegativ sein (→ Skalierungsfunktion). Als Evolutionsziel ist nur die Maximierung möglich.
Fortschrittsgeschwindigkeit	theoretisches Performancemaß, Erwartungswert der Änderung des Abstandes zu einem vordefinierten Ziel (i.d.R. Optimum) in einer Generation
Funktionenmenge	Menge problemangemessener elementarer Funktionen, die als innere Knoten zusammen mit der → Terminalmenge einem GP zum Bilden eines baumförmigen Individuums zur Verfügung stehen. Beispiele für F. sind arithmetische Operationen und mathematische Funktionen $\{+, -, *, /, \sin, \cos\}$ für die symbolische Regression oder Elemente einer Programmiersprache {if-then-else, for, do-until, …} für das Bilden von → Programmen.

G

Geburtenüberschuß	Überschuß der Geburten gegenüber der Größe der Elternpopulation, notwendige Voraussetzung für das Funktionieren gewisser Selektionsoperatoren (→ Kommaselektion)
Gen	Untereinheit des Chromosoms (Genoms), die i.d.R. einen (→ Objekt-) Parameter bzw. → Block (im GP) darstellt oder dafür codiert
Generation	(natürliche) Zeiteinheit im EA, eine Iteration des EA, vollständiger Zyklus, der die Bildung und Evaluierung (Fitnessbestimmung) eines oder mehrerer neuer Individuen umfaßt
Generationslücke	Konzept zur Beschreibung überlappender Generationen (→ stationärer EA), G. ist definiert als das Verhältnis der Anzahl der Nachkommen zur Größe der Elternpopulation
Genetische Programmierung (GP)	Variante der EA, die mit Genomen variabler Länge arbeitet und zum Evolvieren symbolischer Informationen dient. Hauptanwendungsfelder sind das Evolvieren von Computercode, symbolische Regression, automatischer Schaltungsentwurf. Eine häufige Form der → Repräsentation ist die baumförmige Anordnung der Gene als → Programm.
Genetischer Algorithmus (GA)	(auch kanonischer GA, oder einfacher GA) Variante der EA, der i.d.R. in Analogie zum biologischen DNA-Alphabet auf Zeichenketten, insbesondere Bitketten konstanter Länge, operiert (siehe aber → reellwertiger GA). Die Zeichenkette stellt den → Genotyp des → Individuums dar. Der → Phänotyp des Individuums wird durch eine Abbildung auf die → Objektparameter (Genotyp-Phänotyp-Abbildung) realisiert. Die → Fitness des Individuums ist i.d.R. eine Funktion der zu optimierenden → Zielfunktion, die von den Objektparametern abhängt. Der GA ist i.d.R. charakterisiert durch → fitness-proportionale Selektion bzw. → Turnierselektion, Haupt-Variationsoperator ist → Crossover; Mutation (→ Bitmutation) ist Hintergrundoperator oder fehlt vollständig.
genetische Drift	Zufallsprozeß, der auch ohne → Selektionsdruck zum Diversitätsverlust und zur → Gen-Konvergenz in endlichen Populationen führt. Die Zeit bis zur Gen-Fixierung ist proportional zur effektiven (d.h., reproduzierenden) → Populationsgröße.
genetische Operatoren	→ Variationsoperatoren
Gen-Konvergenz	Diversitätsverlust während der Evolution; von der Gen-Konvergenz kann *nicht* mit Notwendigkeit auf Konvergenz gegen lokale oder globale Optima geschlossen werden (Problem der → vorzeitigen Konvergenz, engl. *premature convergence*)
Genom	Satz der → Gene eines Individuums
Genotyp	bei EA mit Genotyp-Phänotyp Abbildung, die → Repräsentation, auf der die Rekombinations- und Mutationsoperatoren arbeiten (→ Phänotyp)
genotypische Varianz	→ Diversität
Genpool	Gesamtheit der → Gene in einer → Population

Genreparatur	Ansatz zur Erklärung des möglichen Performancegewinns durch → Rekombination. Danach besteht die Aufgabe der Rekombination in der Extraktion von Gemeinsamkeiten in der genetischen Information der selektierten Individuen, da diese mit gewisser Wahrscheinlichkeit für den Fitnessgewinn verantwortlich sind. Ein idealer Rekombinationsoperator sollte zudem die Anteile im → Genom, die für Fitnessverlust verantwortlich sind, reduzieren. Die Standard-ES-Rekombinationsoperatoren in reellwertigen Suchräumen realisieren dies durch statistisches Herausmitteln von Verlustkomponenten (Genreparatur).
geschachtelter EA	→ Meta-EA
globales Populationsmodell	auch → panmiktische Population, es findet keine Unterteilung der Population statt, zum → Selektionspool gehören alle Individuen der Population. Die Population wird als „unstrukturierte Menge" betrachtet. Individuen aus beliebigen Bereichen der Population können gemeinsam Nachkommen bilden. Das globale P. entspricht dem klassischen EA.
Gütegebirge	→ Fitnesslandschaft

H

hybride Strategien	Hier: Optimierungsverfahren, die EA mit meist problemspezifischen Suchverfahren koppeln, wobei i.d.R. das problemspezifische Suchverfahren die lokalen Optima bestimmt oder approximiert und der EA auf der Menge der lokalen Optima operiert. Weitere Varianten hybrider EA sind charakterisiert durch die Verwendung problemspezifischer Verfahren zur Initialisierung der Startpopulation und/oder die Benutzung lokaler Suchverfahren zur Nachoptimierung der EA-Ergebnisse.

I

Individuum	Träger der genetischen Information (→ Chromosom), wird charakterisiert durch seinen Zustand im Suchraum und seine → Fitness (→ Zielfunktion) und ggf. einem Satz von → Strategieparametern. Das Individuum ist die Einheit der → Selektion.
Inselmodell	→ regionales Populationsmodell
intermediäre Rekombination	Erzeugung eines Rekombinanten in reellwertigen Suchräumen durch Schwerpunktbildung von ρ Eltern, Spezialfall der (gewichteten) arithmetischen R.
Introns	Codesequenzen im Genom von GP-Individuen, die keinen direkten Einfluß auf die Fitness des Individuums haben. Introns sind eine der Ursachen für → Codeaufblähung.
Inversion	Mutationsoperator, der einen (zufällig ausgewählten) Teil des Genoms eines Individuums herausschneidet und die Gene in umgekehrter Reihenfolge wieder einsetzt; bei Reihenfolgeproblemen auch unter dem Namen „Lin-2-Opt" bekannt

K

kanonischer GA	→ Genetischer Algorithmus
(starke) Kausalität	Eigenschaft eines Systems, auf kleine Ursachen mit kleinen Wirkungen zu reagieren. In EA können Ursachen als Änderungen des → Genotyps und Wirkungen als Änderungen des → Phänotyps oder des assoziierten Fitnesswertes (bzw. Zielfunktionswertes) angesehen werden. Die s.K. führt zu effektiv arbeitenden EA, aber auch bei Aufgaben mit nur teilweise vorhandener s.K. können EA erfolgreich angewandt werden.
Klassifikator System (CS)	spezieller GA zum Evolvieren von Regelbasen für regelbasierte Klassifikatoren
Knoten/Block	Element eines baumförmigen GP-Individuums. Die Menge der Blöcke teilt sich auf in die → Terminalmenge und die → Funktionenmenge.
Kommaselektion/ „,“-Selektion	Form der Zuchtauswahl, Abschneideselektion mit deterministischer Auswahl der besten μ Individuen aus der Menge von λ Nachkommen (Eltern werden nicht berücksichtigt), notwendige Bedingung: $\lambda > \mu$
(strukturelle) Komplexität	speziell in GP, Maß für die Größe eines baumförmigen Individuums. Dazu wird meist die Anzahl der → Knoten/Blöcke bestimmt.
Konvergenz	Prozeß der Annäherung an einen stationären Systemzustand, wobei die Änderungsrate der betrachteten Zustandsvariablen gegen Null strebt. Man unterscheidet → Gen-Konvergenz (bzw. vorzeitige Konvergenz) und K. gegen Optimalzustände, letztere werden unterschieden in lokale K. und globale K. in Abhängigkeit davon, ob die K. gegen ein lokales Optimum oder gegen ein globales Optimum erfolgt.
Konvergenzgeschwindigkeit/ Konvergenzordnung/ Konvergenzrate	mathematische Maße zur Beschreibung des Konvergenzverhaltens von EA; man unterscheidet sublineare, → lineare (auch geometrische) und superlineare Konvergenz (oder Konvergenzordnung)
Kovarianzmatrixadaptation (CMA)	Adaptation der gesamten Kovarianzmatrix der Normalverteilung bei der ES. Verfahren, das im Rahmen der → entstochastisierten ES genutzt wird.

L

Lamarcksche Evolution	bei → hybriden Strategien erfolgende Anpassung des Genotyps eines Nachkommen an die durch das lokale Suchverfahren (→ lokale Suche) gefundene Verbesserung
Lernparameter	auch Lernrate, in selbstadaptiven ES/EP, ein → exogener Strategieparameter, der die Geschwindigkeit der Selbstanpassung der → Mutationsstärke beeinflußt
lineare Konvergenz	Konvergenzrate/-ordnung, bei der die Annäherung an das lokale (ggf. auch globale) Optimum, gemessen in Zielfunktionswerten F oder im Objektparameterraum (Suchraum), exponentiell schnell erfolgt (auch geometrische Progression genannt), wird oft bei EA in reellwertigen Suchräumen beobachtet

lokales Populationsmodell	auch Diffusionsmodell, Nachbarschaftsmodell, *fine grained model*. Für jedes Individuum wird eine Nachbarschaft definiert (nicht zu verwechseln mit der → (Suchraum-)Nachbarschaft). Nur Individuen innerhalb einer Nachbarschaft können Nachkommen miteinander bilden, die Nachbarschaft bildet den → Selektionspool. Die Anwendung des lokalen P. führt zu einer fließenden Unterteilung der Population. Die Individuen sind untereinander durch Distanz isoliert. Durch die Topologie/Struktur der Nachbarschaft wird bestimmt, wie schnell Information innerhalb der Population fließen (diffundieren) kann. Lokale P. werden benutzt, um die → Diversität in einer → Population durch → Nischenbildung länger aufrecht zu erhalten und vorzeitiger → (Gen-)Konvergenz entgegenzuwirken.
lokale Suche	auch lokale Optimierung oder Nachbarschaftssuche, Finden oder Approximieren von Optimalzuständen mit → Variationsoperatoren oder Suchstrategien (nicht notwendigerweise EA), die nur einen eingeschränkten Teil des Suchraumes, die sogenannte → (Such-) Nachbarschaft explorieren. Die gefundenen Optima sind daher i.d.R. lokal.

M

Melioration	Verbesserung, Synonym für die Eigenschaft, daß EA i.d.R. initial gegebene Zustände verbessern, jedoch i. allg. keine Garantie dafür besteht, daß globale Optima in endlicher Zeit gefunden werden
Meta-EA	auch geschachtelter EA, hierarchisch organisierter EA oder Populationen-EA, Anwendung eines EA_1 auf eine Population von EA_2. Findet Verwendung im Bereich der gemischt-ganzzahligen Optimierung, kombinatorischen Optimierung, und zum Erlernen von kritischen (→ endogenen) Strategieparametern.
Migration	Austausch von Individuen zwischen → Unterpopulationen, wird im → regionalen Populationsmodell verwendet. Durch die Migrationstopologie (welche Unterpopulationen tauschen Individuen aus?), das Migrationsintervall (wie häufig findet ein Austausch statt?) und die Migrationsrate (wieviele Individuen werden ausgetauscht?) kann die Ausbreitung von Information zwischen den Unterpopulationen beeinflußt werden (ob sich die Unterpopulationen relativ unabhängig voneinander oder eher wie eine → panmiktische Population entwickeln).
multikriterielle Optimierung	auch Vektoroptimierung, Optimierung unter mehrfacher Zielsetzung, d.h. es gilt, mehrere Zielfunktionen gleichzeitig zu verbessern. Die Ziele sind i.d.R. konfliktär, daher existiert keine Optimallösung im herkömmlichen Sinne, stattdessen wird z.B. → Pareto-Optimalität angestrebt, d.h., es gilt die → Pareto-Menge zu bestimmen, aus der der Anwender dann geeignete Lösungen auswählt.
Multirekombination	Variationsoperator, der mehr als zwei Elternindividuen miteinander rekombiniert, um ein oder mehrere Nachkommen zu generieren

Mutation/ Mutationsoperator	Variationsoperator, der die Information eines elterlichen Genoms gemäß einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung zufällig abändert. Das geschieht bei Bitketten durch zufällige Negation (→ Bitmutation, → Mutationsrate) der einzelnen Bits, bei reellwertigen Objektparametern durch Addition einer Zufallszahl aus einer geeigneten Verteilung (→ Mutationsstärke) und bei mutativen Selbstadaptationsstrategien (in ES und EP) durch Multiplikation mit einer entsprechenden Zufallszahl (→ Lernparameter). In reellwertigen n-dimensionalen Suchräumen unterscheidet man zwischen isotropen vs. anisotropen und unkorrelierten vs. korrelierten M., die i.d.R. normalverteilt generiert werden. Bei GP wird die M. durch Löschen eines zufälligen Teilbaumes, Hinzufügen eines zufällig erzeugten Teilbaumes oder durch Austausch eines zufälligen Blocks (→ Knoten) erreicht. Gegebenenfalls muß das Individuum danach repariert werden, um ein geschlossenes → Programm zu erhalten.
Mutationsrate	Wahrscheinlichkeit, mit der die Mutation eines Gens/Objektparameters eines Individuums stattfindet (bei binärer Repräsentation z.B. Wahrscheinlichkeit, daß ein Bit negiert wird). Die M. sagt nichts über die → Mutationsstärke/Schrittweite aus.
Mutationsstärke	Standardabweichung σ, mit der ein elterlicher → Objektparameter (i.d.R. normalverteilt) mutiert wird; Maß für die realisierte → (Such-) Nachbarschaftsgröße

N

Nachbarschaft	Zustände im Suchraum, die durch einen gegebenen → Variationsoperator in *einem* Schritt erreicht werden können
Nachbarschaftsgröße	in diskreten Suchräumen, Anzahl der Nachbarschaftszustände
Nachbarschaftsmodell	→ lokales Populationsmodell
Nachkomme	Individuum, das aus der genetischen Information eines oder mehrerer Eltern durch Anwendung von → Variationsoperatoren erzeugt wird
neutrale Mutation	Mutation, die eine Änderung des → Genotyps, jedoch keine Änderung des → Phänotyps oder des assoziierten Fitnesswertes zur Folge hat
Nischenbildung	Prozeß der Separation von Individuen bzgl. ihrer Suchraumzustände bzw. Aufrechterhaltung von → Diversität durch geeignete Techniken, wie z.B. → lokale Populationsmodelle oder *fitness sharing* oder → verteilte EA

O

Objektparameter	auch Suchraumparameter oder Zielfunktionsparameter, Variablen im Genom bzw. Phänotyp der Individuen, die direkten Einfluß auf die Fitness haben. Die zu optimierende → Zielfunktion hängt direkt von den O. ab. Es ist i.d.R. das Ziel des EA, diejenigen Objektparameterwerte/Allele zu finden, die das Optimum der Zielfunktion liefern.

Optimierung	Hauptanwendungsfeld der EA, Prozeß der Bestimmung oder Approximation von → Objektparametersätzen oder generell von Systemzuständen, die gegebene → Zielfunktion(en) maximieren bzw. minimieren. Man unterscheidet globale O. und lokale O. (→ lokale Suche). Optimalzustände sind immer bezüglich einer gegebenen → Nachbarschaft im → Suchraum definiert. Bei globalen Optima umfaßt die Nachbarschaft den gesamten Suchraum. In Abhängigkeit von der Struktur des Suchraumes unterscheidet man Parameter-, kombinatorische und Strukturoptimierung.

P

panmiktische Population	keine Gruppenstruktur (z.B. in Form von → Unterpopulationen), alle Individuen sind potentielle Rekombinationspartner (→ globales Populationsmodell)
Pareto-Menge	auch Pareto-Front, Menge der Objektparameterzustände, die bei der → multikriteriellen Optimierung den Kriterien der → Pareto-Optimalität genügen
Pareto-Optimalität	Optimalitätskriterium bei mehrfacher Zielsetzung. Ein Zustand A (Objektparametersatz) ist dann Pareto-optimal, wenn es keinen anderen Zustand B gibt, der Zustand A bzgl. der Zielfunktionsmenge dominiert. Ein Zustand A dominiert einen Zustand B, wenn er mindestens hinsichtlich einer Zielfunktion besser und hinsichtlich keiner schlechter ist.
Performance	Sammelbegriff für verschiedene Aspekte der Bewertung der Optimierungsleistung von EA, häufig auch Synonym für die Darstellung der Evolution der Fitness- bzw. Zielfunktionswerte über die Generationen (s.a. → Performancemaße)
Performancemaße	man unterscheidet lokale und globale P. Die lokalen P. beschreiben das Verhalten des EA von einer Generation zur nächsten in Bezug auf die Optimierungsleistung, gemessen im Suchraum (z.B. → Fortschrittsgeschwindigkeit) oder im Raum der Zielfunktionswerte (→ Qualitätsgewinn). Die globalen P. bewerten die Ressourcen, die erforderlich sind, um ein lokales/globales Optimum zu bestimmen oder zu approximieren (z.B. → Zeitkomplexität, erwartete Laufzeit).
Permutationsoperator	Mutationsoperator, insb. bei Reihenfolgeproblemen, der die Anordnung der Gene im Genom vertauscht
Phänotyp	Ausprägung der Eigenschaften, die durch den → Genotyp des Individuums codiert sind. Die Entwicklung des Phänotyps kann zusätzlichen (stochastischen) Randbedingungen unterworfen sein. Die genaue Definition ist zumeist problemabhängig: Bei der Parameteroptimierung ist der P. i.d.R. identisch zum Objektparametersatz, bei der Strukturoptimierung (z.B. neuronaler Netze) repräsentiert der Phänotyp eine spezielle Struktur.
Plusselektion/ „+“-Selektion	Form der Zuchtauswahl, Abschneideselektion mit deterministischer Auswahl der besten μ Individuen aus der Menge der λ Nachkommen *und* der μ Eltern (Eliteselektion)

Pollination	(eigentlich „Bestäubung“ mit Pollen), Technik des Genomtransfers in → verteilten EA bei der – im Gegensatz zur → Migration – die genetische Information des (selektierten) Individuums, nicht jedoch das Individuum selbst, in die andere → Unterpopulation geschickt wird
Population	Gruppe von Individuen mit gleichartiger oder ähnlicher Genomstruktur, die die Anwendung von → genetischen Operatoren erlaubt
Populationsgröße	Anzahl der Individuen in einer Population
Populationsmodelle	Modelle für die Unterteilung bzw. Verteilung von Individuen innerhalb einer Population (→ verteilte EA). Gemeinsam ist allen P., daß die einzelnen (→ Unter-) Populationen voneinander getrennt sind und trotzdem miteinander in Verbindung stehen. Eine Unterscheidung der P. kann nach der Reichweite der Selektion (→ Selektionspool) vorgenommen werden. Danach lassen sich drei P. unterscheiden: → globales P., → regionales P. und → lokales P. Die hierarchische Kombination der P. führt zum hybriden P.
Problemgröße	Anzahl der → Objektparameter, Komponenten oder Freiheitsgrade eines Optimierungsproblems
Programm	Individuum im GP, im Regelfall baumartig strukturiert. Programme können Algorithmen, boolsche Ausdrücke, aber auch mathematische Funktionen beschreiben (→ Funktionenmenge-, → Terminalmenge).

Q

Qualitätsgewinn	Erwartungswert der Zielfunktionsänderung der Elternpopulation von einer Generation zur nächsten

R

Räuber-Beute-EA	Konzept für die evolutionäre Optimierung, welches einerseits der Berücksichtigung mehrerer (konkurrierender) Teilziele (→ multikriterielle Optimierung) auf natürliche Weise entgegenkommt und andererseits die Effizienz auf Parallelrechnern verbessern kann durch Überwindung der herkömmlichen Synchronisierung der Generationen: Die Beute-Individuen werden auf einem räumlichen Gitter angeordnet, auf dem die Räuber umherirren und gemäß je eigenem Teilziel lokale Selektion betreiben. Die entstehenden Lücken in der Beute-Population werden durch die üblichen Reproduktionsmechanismen mit Nachkommen der überlebenden Individuen wieder aufgefüllt.
rangbasierte Selektion	auch Ranking-Selektion, basierend auf der nach → Zielfunktionswerten geordneten Rangliste der Population erfolgt die Zuweisung der Selektionswahrscheinlichkeiten als Funktion des Rangplatzes

reellwertiger GA	GA zum Optimieren in reellwertigen Suchräumen, im Gegensatz zum kanonischen GA (→ GA) besteht das Genom aus den (reellen) → Objektparametern, d.h. es wird in der natürlichen Problemrepräsentation evolviert. Der r. GA verwendet spezielle Rekombinationsoperatoren, die Hybride aus → intermediärer Rekombination (i.d.R. $\rho = 2$) und → Mutation darstellen; er kann → selbstadaptives Verhalten zeigen.
regionales Populationsmodell	auch Migrationsmodell, Inselmodell, *coarse grained model*. Die Population wird in → Unterpopulationen aufgeteilt. Der → Selektionspool umfaßt alle Individuen einer Unterpopulation. Nur Individuen aus einer Unterpopulation können miteinander Nachkommen bilden. Von Zeit zu Zeit findet ein Austausch von Information (Individuen) zwischen den Unterpopulationen durch → Migration statt.
Rekombination	Variationsoperator, der die genetische Information zweier oder mehrerer Elternindividuen mischt und ein oder mehrere Individuen, die sogenannten Rekombinanten, produziert. In GA werden – dem biologischen Vorbild entsprechend – i.d.R. jeweils zwei Rekombinanten durch → Crossover von zwei Eltern generiert. In der ES finden → intermediäre und → diskrete Rekombination Verwendung.
Replikation	Kopieren eines selektierten Individuums
Repräsentation	auch Codierung oder Problemrepräsentation, Abbildung des Optimierungsproblems auf der Ebene des Genoms. Man unterscheidet problemspezifische (auch „natürliche") R. und problem*un*abhängige R. Bei der Parameteroptimierung sind bei der problemspezifischen R. → Genotyp und → Phänotyp identisch, während die natürliche R. bei der kombinatorischen oder der Strukturoptimierung zumeist nicht eindeutig (definierbar) ist. Der kanonische GA arbeitet typischerweise mit problemunabhängiger R., d.h. alle Suchräume werden auf die Menge der Bitketten abgebildet (Beispiel: Binär- oder Graycode zur Codierung von Zahlen). Sofern jede Eigenschaft des Phänotyps im Genotyp eindeutig repräsentiert ist, spricht man von *direkter*, andernfalls von *in*direkter Codierung; haben Teile des Genotyps keinen Einfluß auf den Phänotyp, spricht man von *redundanter* Codierung.
Roulett-Selektion	randomisierte Variante der → fitness-proportionalen Selektion

S

Schrittweite	Erwartungswert der Länge einer/s Mutation/Schrittes im Suchraum
Schema	in GA, Begriff, der aus mathematischer Sicht synonym für Unterraum des Raumes $\{0,1\}^l$ (Repräsentationsraum) der Bitketten der Länge l steht. Unterräume der Dimension $l - o$ werden als Schemata der Ordnung o bezeichnet.

Schema-Theoreme	Theoreme, auf deren Grundlage Erklärungsansätze für die Funktionsweise der GA vorgeschlagen wurden. Die Sch.T. liefern untere Schranken für die erwartete Besetzungshäufigkeit der → Schemata. Die Nützlichkeit der Sch.T. wird zunehmend in Frage gestellt, da sie auf unbegründeten bzw. unrealistischen Annahmen basieren, geringen Vorhersagewert haben und keine Aussagen über die → Performance der GA erlauben.
Selbstadaptation	in ES/EP (im engeren Sinne), Standardverfahren zum Erlangen → selbstadaptiven Verhaltens in ES- und EP-Algorithmen. S. wird realisiert durch die Evolution eines sekundären Satzes von Parametern, den sogenannten (→ endogenen) Strategieparametern, die gewisse statistische Eigenschaften der (Objektparameter-) Variationsoperatoren parametrisieren (z.B. → Mutationsstärke, i.d.R. Standardabweichung, oder Kovarianzmatrix des → Mutationsoperators). Jedes Individuum enthält neben dem Objekt- einen eigenen Strategieparametersatz der *zusammen* mit dem Objektparametersatz selektiert wird. Die Mutationsoperatoren wirken zuerst auf die Strategieparameter, die dann ihrerseits die Mutation der Objektparameter steuern.
selbstadaptives Verhalten	Eigenschaft eines EA, insb. gewisser Variationsoperatoren, ohne äußere Kontrolle, also autonom, sich den jeweiligen Verhältnissen in der → Fitnesslandschaft bzw. im Suchraum so anzupassen, daß der EA gewisse, zu definierende Performanceeigenschaften zeigt (Alternative: Fremdadaptation, z.B. → 1/5-Regel).
Selektion/ Selektionsoperator	notwendiger Operator im EA, der abhängig von der Fitness, bzw. der aktuellen Zielfunktionswerte, über die Reproduktion der Individuen entscheidet. Die Selektion gibt der Evolution die Richtung (z.B. im Sinne einer Optimierung), sie konserviert gute Zustände, reduziert jedoch die → Diversität der Population, sie ist somit Antagonist zur → Variation, die Diversität erzeugt. S., die die Information des besten Individuums mit Sicherheit konserviert, wird als „elitäre S." bezeichnet. Gängige Selektionsarten sind die Abschneideselektion (Zuchtauswahl) mit den Varianten → "+"- und → ","-Selektion, → Turnierselektion, → fitness-proportionale Selektion (realisiert als Roulett-Selektion bzw. *stochastic universal sampling*) und deren transformierte Versionen mit Rangbildung (→ rangbasierte Selektion) sowie Boltzmann-Selektion. Alle hiergenannten S. arbeiten mit „Zurücklegen", d.h. Individuen können mehrfach selektiert werden.
Selektionsdruck	Verhältnis der Wahrscheinlichkeit der Auswahl des besten Individuums zur durchschnittlichen Selektionswahrscheinlichkeit aller Individuen des → Selektionspools
Selektionspool	Bereich der Population, der alle Individuen enthält, die zusammen zur Auswahl der Reproduktionspartner (→ Eltern) in Betracht gezogen werden. Bei einer → panmiktische Population ist dies die gesamte Population, bei der Verwendung des → regionalen Populationsmodells jeweils eine → Unterpopulation und beim → lokalen Populationsmodell die lokale Nachbarschaft.
Skalierbarkeit	(nicht immer zu erfüllende) Forderung, daß ein EA oder ein Variationsoperator derart parametrisiert werden kann, daß er für beliebige → Problemgrößen (→ Suchraumdimension) hinreichende → Performance zeigt

Skalierungsfunktion	auch Fitnessskalierung, Methoden zur Transformation von Zielfunktionswerten in Fitnesswerte (→ Selektionsoperator). Insbesondere bei → fitness-proportionaler Selektion muß sichergestellt werden, daß negativen Zielfunktionswerten positive Fitnesswerte zugeordnet werden. Varianten: → rangbasierte Selektion, Boltzmann-Selektion
stationärer EA	besser, steady-state EA, EA mit gleitender Generationenfolge, es gibt keine Nachkommenpopulation im eigentlichen Sinne, vielmehr werden Nachkommen sukzessive generiert und die schlechtesten Individuen entfernt, so daß die Populationsgröße konstant bleibt (→ Generationslücke). Typisches Beispiel: $(\mu + 1)$-ES.
Strategieparameter	Parameter, die das Verhalten des EA beeinflussen, bzw. den EA näher definieren, wie z.B. → Populationsgröße, → Mutations- und → Crossoverraten. Man unterscheidet → exogene und → endogene S. Endogene S. werden während der Evolution adaptiert (z.B. → Mutationsstärke), wogegen die exogenen S. (z.B. Elternanzahl μ, Nachkommenzahl λ, Mischungszahl ρ, Lernparameter) konstant gehalten werden. Die Adaptation der endogenen S. erfolgt durch statistische Regelverfahren (z.B. → 1/5-Regel, → entstochastisierte ES), → Meta-EA oder evolutiv durch → Selbstadaptation.
Suchoperator	Operator, der im Suchraum arbeitet, → genetische Operatoren
Suchraum	Definitionsmenge des Objektparametersatzes (→ Objektparameter)
Suchraumdimension	Anzahl der Freiheitsgrade des Objektparametersatzes in unbeschränkten und kontinuierlichen Suchräumen (z.B. n-dimensionaler reellwertiger Suchraum R^n)

T

Terminalmenge	auch „Variablen- und Konstantenmenge“, Symbole in den Genomen von GP-Systemen, die als Terminale (Blätter) in den baumartig strukturierten → Programmen dienen, z.B. Variablen, Konstanten, Funktionen ohne Argumente
Turnierselektion	auch Wettkampfselektion, Selektionsoperator, der für die Bestimmung jedes Elters q Individuen *zufällig* aus dem → Selektionspool zu einem „Turnier“ auswählt und davon das beste Individuum selektiert, also jeweils eine $(1, q)$-Selektion betreibt

U

Unterpopulation	Teil der Individuen einer Population, der vom Rest der Population zeitweilig (Isolationszeit) oder immer isoliert ist (→ regionales Populationsmodell). Nur Individuen innerhalb derselben U. können Nachkommen bilden. Ein Austausch zwischen U. kann durch → Migration geschehen. Individuen innerhalb einer U. entwickeln sich getrennt von anderen U. (→ Nischenbildung).

V

Variation/ Variationsoperatoren	auch Suchoperatoren, genetische Operatoren, die die genetische Information (auf der Ebene des → Genotyps oder der → Objekt-/Strategieparameter) verändern: → Mutation und → Rekombination
Vektoroptimierung	→ multikriterielle Optimierung
verteilte EA	EA-Varianten, die speziell für Parallelrechnerarchitekturen vorgeschlagen wurden, stellen spezielle → Populationsmodelle (→ global, → regional, → lokal) dar, können auch beim Einsatz auf seriellen Rechnern Vorteile bringen
vorzeitige Konvergenz	Phänomen der → Konvergenz gegen *nicht*optimale Geno- und/ oder Phänotypen (s.a. → Gen-Konvergenz)

Z

Zeitkomplexität	in EA, Performancemaß, i.d.R. Erwartungswert der Anzahl der → Generationen oder Zielfunktionsauswertungen, die ein EA benötigt, um ein Optimum einer gegebenen Zielfunktion zu lokalisieren oder zu approximieren, in Abhängigkeit von der → Problemgröße bzw. → Suchraumdimension
Zielfunktion	auch Güte- oder Qualitätsfunktion, zu optimierende Funktion, die von den → Objektparametern (auch Suchraumparameter, phänotypische Parameter) abhängt. Die Z. stellt die Implementierung des zu lösenden Problems dar. Sie wird mit einem Satz von Objektparametern als Eingabeparameter ausgeführt. Als Ausgabe wird der Z.-wert als Bewertung/Güte des Individuums/Phänotyps geliefert. Bei einem → multikriteriellen Optimierungsproblem liefert die Z. mehrere Z.-werte pro Individuum zurück. Der Z.-wert wird oft als → Fitness bezeichnet.

3 Englische Begriffe mit Verweisen auf das Glossar

A

adaptation	→	Adaptation
allele	→	Allel
automatically defined function (ADF)	→	automatisch definierte Funktion

B

Baldwin effect	→	Baldwin-Effekt
bit flipping	→	Bitmutation
bit mutation	→	Bitmutation
bit string	—	Bitkette
bloat	→	Codeaufblähung
breeding selection	—	Zuchtauswahl (→ Abschneideselektion)
building block	—	Baustein
~ hypothesis	→	Baustein-Hypothese

C

canonical GA	→	kanonischer GA
chromosome	→	Chromosom
classifier system	→	Klassifikator System
coding	→	Codierung
combinatorial optimization	—	kombinatorische → Optimierung
comma selection	→	Kommaselektion/„,“-Selektion
competing subpopulations	—	konkurrierende → Unterpopulationen
complexity	→	Komplexität
constraints	—	Nebenbedingungen
convergence	→	Konvergenz
convergence order	→	Konvergenzordnung
convergence rate	→	Konvergenzrate
convergence velocity	→	Konvergenzgeschwindigkeit
covariance matrix adaptation (CMA)	→	Kovarianzmatrixadaptation
crossover (CO, XO)	→	Crossover
crossover rate	→	Crossoverrate

D

decoding	—	Decodierung
deme	→	Unterpopulation
diffusion model	—	Diffusionsmodell (→ lokales Populationsmodell)
discrete recombination	→	diskrete Rekombination
distributed EA	→	(räumlich) verteilter EA
diversity	→	Diversität
dominant recombination	→	dominante Rekombination

E

elitism	→	Elitismus
endogenous strategy parameter	→	endogener Strategieparameter
epistasis	→	Epistasis
evolutionary algorithm (EA)	→	Evolutionärer Algorithmus
evolutionary computation (EC)	→	Evolutionäres Rechnen
evolutionary programming (EP)	→	Evolutionäre Programmierung
evolution strategy (ES)	→	Evolutionsstrategie
evolvability	—	Evolvierbarkeit
evolvable hardware (EH)	→	Evolvierbare Hardware
exogenous strategy parameter	→	exogener Strategieparameter

F

fitness	→	Fitness
fitness assignment	—	Fitnesszuweisung
fitness landscape	→	Fitnesslandschaft
fitness noise	—	Fitnessrauschen (→ Fitness)
fitness proportionate selection	→	fitness-proportionale Selektion
fitness scaling	—	Fitnessskalierung (→ Skalierungsfunktion)
function optimization	—	Funktionsoptimierung
function set	→	Funktionenmenge

G

gene	→	Gen
gene fixation	—	Gen-Fixierung
generation	→	Generation
generation gap	→	Generationslücke
genetic programming (GP)	→	Genetische Programmierung
genetic algorithm (GA)	→	Genetischer Algorithmus
genetic drift	→	genetische Drift
genetic operator	→	genetischer Operator
genetic repair	→	Genreparatur
gene-pool	→	Genpool
genome	→	Genom
genotype	→	Genotyp
genotype phenotype mapping	—	Genotyp-Phänotyp-Abbildung

H

hybrid strategies	→	hybride Strategien
hierarchically organized EA	→	Meta-EA

I

individual	→	Individuum
intermediate recombination	→	intermediäre Rekombination
intron	→	Intron
inversion	→	Inversion
island model	—	Inselmodell (→ regionales Populationsmodell)

L

Lamarckian evolution	→	Lamarcksche Evolution
learning parameter/ learning rate	→	Lernparameter/Lernrate
linear convergence	→	lineare Konvergenz
local population model	→	lokales Populationsmodell
local search	→	lokale Suche
loss of diversity	—	Diversitätsverlust (→ Gen-Konvergenz)

M

melioration	→	Melioration/Verbesserung
meta EA	→	Meta-EA
migration	→	Migration
migration interval	—	Migrationsintervall
migration rate	—	Migrationsrate (→ Migration)
multicriteria decision making	→	multikriterielle Optimierung
multirecombination	→	Multirekombination
mutation	→	Mutation
mutation precision	—	Mutationspräzision
mutation range	—	Mutationsbereich
mutation rate	→	Mutationsrate
mutation strength	→	Mutationsstärke

N

neighborhood	→	Nachbarschaft
neighborhood size	→	Nachbarschaftsgröße
neighborhood search	—	Nachbarschaftssuche (→ lokale Suche)
nested EA	→	Meta-EA
niching	→	Nischenbildung
node	→	Knoten
noisy fitness	—	verrauschte → Fitness/ Fitnessrauschen
normal distribution	—	Normalverteilung

O

objective function	→	Zielfunktion
objective value	—	Zielfunktionswert/
	—	Gütewert
object parameter	→	Objektparameter
offspring	→	Nachkomme
1/5th rule	→	Ein-Fünftel-Regel
one-point crossover	—	Einpunkt-Crossover
optimization	→	Optimierung
ordering problem/ order-based problem	—	Reihenfolgeproblem

P

panmictic population	→	panmiktische Population
parameter optimization	—	Parameteroptimierung
parent	→	Elter
Pareto front	—	Pareto-Front
Pareto optimality	→	Pareto-Optimalität
Pareto set	→	Pareto-Menge
penalty function/ term	—	Straffunktion/-term
performance	→	Performance, Leistungsfähigkeit
performance measures	→	Performancemaße
permutation operator	→	Permutationsoperator
phenotype	→	Phänotyp
plus selection	→	Plusselektion/„+"-Selektion
pollination	→	Pollination (Bestäubung)
population	→	Population
population model	→	Populationsmodell
population size	→	Populationsgröße
predator-prey EA	→	Räuber-Beute-EA
premature convergence	→	vorzeitige Konvergenz
problem size	→	Problemgröße
progress rate	→	Fortschrittsgeschwindigkeit

Q

quality gain	→	Qualitätsgewinn

R

random genetic drift	→	genetische Drift
ranking	—	Rangbildung
ranking selection	—	Ranking-Selektion
rank-based selection	→	rangbasierte Selektion
real-coded GA	→	reellwertiger GA
recombination	→	Rekombination
recombination rate	—	Rekombinationsrate
replication	→	Replikation
reproduction	—	Reproduktion
representation	→	Repräsentation
response to selection	→	Qualitätsgewinn
roulette wheel selection	→	Roulett-Selektion

S

scalability	→	Skalierbarkeit
scaling function	→	Skalierungsfunktion
scheduling	—	Reihenfolgeplanung
schema (pl.: schemata)	→	Schema
schema theorem	→	Schema-Theorem
search space	→	Suchraum
search space dimension	→	Suchraumdimension
search operator	→	Suchoperator
selection	→	Selektion
selection intensity	—	Selektionsintensität
selection pool	→	Selektionspool
selection pressure	→	Selektionsdruck
selection variance	—	Selektionsvarianz
selective pressure	→	Selektionsdruck
self-adaptation	→	Selbstadaptation
self-adaptation response	—	Selbstadaptationsantwort
self-adaptive behavior	→	selbstadaptives Verhalten
single-point CO	—	Einpunkt-Crossover
steady-state EA	→	stationärer EA
step size	→	Schrittweite
stopping condition/ criterion, stop rule	→	Abbruchkriterium
strategy parameter	→	Strategieparameter
subpopulation	→	Unterpopulation
success probability	→	Erfolgswahrscheinlichkeit

T

terminal set	→	Terminalmenge
termination criterion	→	Abbruchkriterium
time complexity	→	Zeitkomplexität
tournament selection	→	Turnierselektion
truncation selection	→	Abschneideselektion

U

uniform crossover	—	uniformes Crossover

V

vector optimization	→	Vektoroptimierung

4 Deutsch-Englisches Wörterbuch

A

Abbruchkriterium	stopping condition/criterion, *auch* stop rule, *auch* termination condition
Abschneideselektion	truncation selection
Adaptation	adaptation
Allel	allele
automatisch definierte Funktion	automatically defined function (ADF)

B

Baustein	building block
Baustein-Hypothese	building block hypothesis
Bitkette	bit string
Bitmutation	bit flipping, bit mutation

C

Chromosom	chromosome
Codeaufblähung	bloat
Codierung	coding
Crossover	crossover (CO, XO)
Crossoverrate	crossover rate

D

Decodierung	decoding
Diffusionsmodell	diffusion model
diskrete Rekombination	discrete recombination
Diversität	diversity
Diversitätsverlust	loss of diversity
dominante Rekombination	dominant recombination

E

Ein-Fünftel-Regel	1/5th rule
Einpunkt-Crossover	one-point crossover, *auch* single-point crossover
Elitismus	elitism
Elter	parent
endogener Strategieparameter	endogenous strategy parameter
Epistasis	epistasis
Erfolgswahrscheinlichkeit	success probability
Evolvierbarkeit	evolvability
Evolvierbare Hardware	evolvable hardware (EH)
Evolutionäre Programmierung	evolutionary programming (EP)
Evolutionärer Algorithmus	evolutionary algorithm (EA)
Evolutionäres Rechnen	evolutionary computation (EC)
Evolutionsstrategie	evolution strategy (ES)
exogener Strategieparameter	exogenous strategy parameter

F

Fitness	fitness
Fitnesslandschaft	fitness landscape
fitness-proportionale Selektion	fitness proportionate selection
Fitnessrauschen	fitness noise
Fitnessskalierung	fitness scaling
Fitnesszuweisung	fitness assignment
Fortschrittsgeschwindigkeit	progress rate
Funktionenmenge	function set
Funktionsoptimierung	function optimization

G

Gen	gene
Generation	generation
Generationslücke	generation gap
genetische Drift	(random) genetic drift
Genetische Programmierung	genetic programming (GP)
Genetischer Algorithmus	genetic algorithm (GA)
genetischer Operator	genetic operator
Gen-Fixierung	gene fixation
Genom	genome
Genotyp-Phänotyp-Abbildung	genotype-phenotype mapping
Genpool	gene-pool
Genreparatur	genetic repair
Gütewert	objective value, *auch* solution quality

H

hybride Strategie	hybrid strategy

I

Individuum	individual
Inselmodell	island model
intermediäre Rekombination	intermediate recombination
Intron	intron
Inversion	inversion

K

kanonischer GA	canonical GA
Klassifikator-System	(learning) classifier system
Knoten	node
kombinatorische Optimierung	combinatorial optimization
Kommaselektion	comma selection
Komplexität	complexity
konkurrierende Unterpopulationen	competing subpopulations
Konvergenz	convergence
Konvergenzgeschwindigkeit	convergence velocity
Konvergenzordnung	convergence order
Konvergenzrate	convergence rate
Kovarianzmatrixadaptation	covariance matrix adaptation (CMA)
Kreuzung	crossover

L

Lernparameter	learning parameter
Lernrate	learning rate
lineare Konvergenz	linear convergence
lokales Populationsmodell	local population model
lokale Suche	local search

M

Melioration	melioration
Meta-EA	meta EA, *auch* hierarchically organized EA, *auch* nested EA
Migration	migration
Migrationsintervall	migration interval
Migrationsrate	migration rate
multikriterielle Optimierung	multicriteria decision making
Multirekombination	multirecombination
Mutation	mutation
Mutationsbereich	mutation range
Mutationspräzision	mutation precision
Mutationsrate	mutation rate
Mutationsstärke	mutation strength

N

Nachbarschaft	neighborhood
Nachbarschaftsgröße	neighborhood size
Nachbarschaftssuche	neighborhood search, *auch* local search
Nachkomme	offspring (pl: offspring), *auch* descendant
Nebenbedingung	constraint
Nischenbildung	niching
Normalverteilung	normal distribution, *auch* Gaussian distribution

O

Objektparameter	object parameter
Optimierung	optimization

P

panmiktische Population	panmictic population
Parameteroptimierung	parameter optimization
Pareto-Front	Pareto front
Pareto-Menge	Pareto set
Pareto-Optimalität	Pareto optimality
Performance	performance
Performancemaße	performance measures
Permutationsoperator	permutation operator
Phänotyp	phenotype
Plusselektion	plus selection
Pollination	pollination
Population	population
Populationsgröße	population size
Populationsmodell	population model

Q

Qualitätsgewinn	quality gain, *auch* response to selection

R

rangbasierte Selektion	rank-based selection
Rangbildung	ranking
Ranking-Selektion	ranking selection
reellwertiger GA	real-coded GA
Reihenfolgeplanung	scheduling
Reihenfolgeproblem	ordering problem, *auch* order-based problem
Rekombination	recombination
Rekombinationsrate	recombination rate
Replikation	replication
Repräsentation	representation
Reproduktion	reproduction
Roulett-Selektion	roulette wheel selection

S

Schema	schema (pl: schemata)
Schema-Theorem	schema theorem
Schrittweite	step size
Selbstadaptation	self-adaptation
Selbstadaptationsantwort	self-adaptation response
selbstadaptives Verhalten	self-adaptive behavior
Selektion	selection
Selektionsdruck	selection pressure, *auch* selective pressure
Selektionsintensität	selection intensity
Selektionsvarianz	selection variance
Skalierbarkeit	scalability
Skalierungsfunktion	scaling function
Selektionspool	selection pool
stationärer EA	steady-state EA
Straffunktion/-term	penalty function/term
Strategieparameter	strategy parameter
Suchoperator	search operator
Suchraum	search space
Suchraumdimension	search space dimension

T

Terminalmenge	terminal set
Turnierselektion	tournament selection

U

uniformes Crossover	uniform crossover
Unterpopulation	subpopulation

V

Vektoroptimierung	vector optimization, *auch* multicriteria decision making
verrauschte Fitness	noisy fitness, *auch* noisy fitness data
verteilter EA	distributed EA

Z

Zeitkomplexität	time complexity
Zielfunktion	objective function
Zielfunktionswert	objective value
Zuchtauswahl	breeding selection

Literatur

[1] T. Bäck, D. Fogel, and Z. Michalewicz, editors. *Handbook of Evolutionary Computation*, New York, 1997. IOP Publishing and Oxford University Press.

[2] T. Bäck, U. Hammel, and H.-P Schwefel. Evolutionary computation: comments on the history and current state. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1):3–17, 1997.

[3] W. Banzhaf, P. Nordin, R.E. Keller, and F.D. Francone. *Genetic Programming – An Introduction.* dpunkt, Heidelberg, 1998.

[4] H.-G. Beyer. Evolutionary algorithms in noisy environments: theoretical issues and guidelines for practice. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2–4):239–267, 2000.

[5] H.-G. Beyer. *The Theory of Evolution Strategies.* Natural Computing Series. Springer, Heidelberg, 2001. ISBN 3-540-67297-4.

[6] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* Addison Wesley, Reading, MA, 1989.

[7] J.R. Koza. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection.* MIT Press, Cambridge, MA, 1992.

[8] Z. Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.* Springer, Berlin, 2nd edition, 1994.

[9] M. Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms.* MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

[10] V. Nissen. *Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution.* Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1997.

[11] H. Pohlheim. *Evolutionäre Algorithmen – Verfahren, Operatoren, Hinweise aus der Praxis.* Springer, Berlin, Heidelberg, 1999.

[12] I. Rechenberg. *Evolutionsstrategie '94.* Frommann–Holzboog Verlag, Stuttgart, 1994.

[13] H.-P. Schwefel. *Evolution and Optimum Seeking.* Wiley, New York, NY, 1995.

[14] M.D. Vose. *The Simple Genetic Algorithm: Foundations and Theory.* MIT Press, Cambridge, MA, 1999.