

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Bionische Optimierung  
Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung

Biomimetic optimization  
Application of evolutionary algorithms

VDI 6224

Blatt 1 / Part 1

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung . . . . .	2	Preliminary note . . . . .	2
Einleitung . . . . .	2	Introduction . . . . .	2
<b>1 Anwendungsbereich . . . . .</b>	<b>4</b>	<b>1 Scope . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>2 Begriffe . . . . .</b>	<b>4</b>	<b>2 Terms and definitions . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>3 Formelzeichen . . . . .</b>	<b>4</b>	<b>3 Symbols . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>4 Prinzipielle Vorgehensweise in der evolutionären Optimierung . . . . .</b>	<b>5</b>	<b>4 Basic approach to evolutionary optimization . . . . .</b>	<b>5</b>
4.1 Aufgabenstellung . . . . .	5	4.1 Problem definition . . . . .	5
4.2 Mathematische Modellierung . . . . .	5	4.2 Mathematical model . . . . .	5
4.3 Verwendeter Evolutionärer Algorithmus . . . . .	6	4.3 Evolutionary algorithms used . . . . .	6
4.4 Beispiel einer einfachen $(\mu/\mu, \lambda)$ - $\sigma$ -CMSA-Evolutionsstrategie . . . . .	9	4.4 Example of a simple $(\mu/\mu, \lambda)$ - $\sigma$ -CMSA evolution strategy . . . . .	9
4.5 Optimierungsverlauf und Ergebnisse . . . . .	12	4.5 Optimization process and results . . . . .	12
<b>5 Beispiele zur Durchführung des Verfahrens . . . . .</b>	<b>15</b>	<b>5 Examples of application of the method . . . . .</b>	<b>15</b>
5.1 Kontinuierliche Optimierung . . . . .	15	5.1 Continuous optimization . . . . .	15
5.2 Optimierung mit diskreten Parametern . . . . .	18	5.2 Optimization with discrete parameters . . . . .	18
5.3 Kombinatorische Optimierung . . . . .	23	5.3 Combinatorial optimization . . . . .	23
5.4 Subjektive Optimierung . . . . .	26	5.4 Subjective optimization . . . . .	26
<b>6 Weitere Problemklassen . . . . .</b>	<b>29</b>	<b>6 Additional classes of problems . . . . .</b>	<b>29</b>
6.1 Optimierung unter mehrfacher Zielsetzung . . . . .	29	6.1 Optimization of multiple objectives . . . . .	29
6.2 Optimierung unter Nebenbedingungen . . . . .	32	6.2 Optimization with constraints . . . . .	32
6.3 Optimierung unter Unsicherheiten . . . . .	33	6.3 Optimization with uncertainties . . . . .	33
<b>7 Abschließende Bemerkungen . . . . .</b>	<b>34</b>	<b>7 Closing remarks . . . . .</b>	<b>34</b>
7.1 Historische Algorithmen . . . . .	34	7.1 Historical algorithms . . . . .	34
7.2 Abgrenzung zu anderen Optimierungsstrategien . . . . .	34	7.2 Differences from other optimization strategies . . . . .	34
7.3 Andere bionische Verfahren . . . . .	35	7.3 Other biomimetic methods . . . . .	35
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>37</b>	<b>Annex . . . . .</b>	<b>37</b>
Schrifttum . . . . .	38	Bibliography . . . . .	38

VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences (TLS)

Fachbereich Bionik

VDI-Handbuch Bionik

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi-richtlinien.de](http://www.vdi-richtlinien.de)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/6224](http://www.vdi.de/6224).

## Einleitung

Evolutionäre Algorithmen sind bionische Optimierungsverfahren, deren erste Varianten in den 1960er-Jahren entstanden sind. Mit diesen Algorithmen können schwierige Optimierungsprobleme gelöst werden, für die keine Standardverfahren anwendbar sind, weil z.B. keine Gradienteninformationen, nur veräuschte Bewertungen oder noch nicht einmal eine mathematisch formulierbare Zielfunktion vorliegen.

Die Grundidee Evolutionärer Algorithmen (EA) leitet sich von den Prinzipien der darwinschen Evolution ab: Individuen stehen im Wettstreit um Ressourcen (Nahrung, Lebensraum, Fortpflanzungspartner). Besonders gut angepasste oder starke Individuen haben besseren Zugang zu den Ressourcen und damit eine erhöhte Chance zur Fortpflanzung. Das Maß ihrer Fähigkeit, sich fortzupflanzen, wird als „Fitness“ bezeichnet; diese hängt von den Eigenschaften des Individuums, dem sogenannten Phänotyp ab. Die phänotypischen Eigenschaften ihrerseits werden (neben der Umwelt) hauptsächlich durch den „Bauplan“ des Individuums – der Menge der Gene (das Genom, der Genotyp) – bestimmt. Individuen mit guter Fitness übertragen per Definition mit größerem Erfolg ihre Baupläne auf die Nachkommen der nächsten Generation. Dieses Prinzip, auch als „survival of the fittest“ bezeichnet, stellt die eine Seite des darwinschen Evolutionsprinzips dar – die Selektion.

Höherentwicklung ist jedoch nur möglich, wenn verschiedene Baupläne – also Genome – in der Population vorhanden sind, wenn also „genetische Variation“ in der Individuenpopulation vorhanden ist. Selektion kann dann die bezüglich der Fitness besten

## Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI Notices ([www.vdi-richtlinien.de](http://www.vdi-richtlinien.de)).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

A catalogue of all available parts of this series of guidelines can be accessed on the internet at [www.vdi.de/6224](http://www.vdi.de/6224).

## Introduction

Evolutionary algorithms are biomimetic optimization methods. The first versions of these methods were developed in 1960s. With evolutionary algorithms, it is possible to solve difficult optimization problems for which no standard optimization method can be applied because there is no gradient information available, only noisy evaluations are available, or there is not even a mathematical formulation of the target function available, for example.

The basic concept of evolutionary algorithms (EAs) is derived from the principles of Darwinian evolution: Individuals compete with each other for resources (food, territory, reproduction partners). Especially well-adapted or strong individuals have better access to the resources and therefore a higher chance of reproducing. The measure of an individual's ability to reproduce is referred to as its "fitness". Its fitness depends on the characteristics of the individual, the so-called phenotype. The phenotypic characteristics, on the other hand, are determined primarily by the "construction plan" of the individual, meaning its set of genes (the genome or the genotype), as well as by the environment. By definition, individuals with "good" fitness are able to transfer their construction plans to the offspring of the next generation with greater success. This principle, which is also referred to as "survival of the fittest", is one of the principles of Darwinian evolution – namely the principle of selection.

Higher development is only possible, though, when different construction plans – i.e. genomes – are present in the population, which therefore means there is "genetic variation" in the population of individuals. Selection can then prefer the best construc-

Baupläne präferieren. Genetische Variation entsteht durch zwei Prozesse, durch Rekombination der Gene verschiedener Individuen und durch Mutation.

Rekombination mischt die genetische Information zweier oder mehrerer Individuen, die aufgrund ihrer Fitness selektiert wurden; dadurch entstehen neue Genome und damit, phänotypisch gesehen, neue Individuen.

Mutationen ändern das Genom eines Individuums zufällig. Während die Selektion am Phänotyp angreift, erfolgt die Variation durch „genetische Operatoren“ (Mutation und Rekombination) am Genotyp.

Der Prozess Variation und Selektion ändert das genetische Material von der Elternpopulation zur Nachkommenpopulation, dies entspricht einer Generation. Die wiederholte Anwendung (Iteration) definiert eine Evolutionsschleife, in der das System schrittweise bezüglich der Fitnesswerte verbessert wird.

Evolutionäre Algorithmen (EA) verwenden die Prinzipien der Variation (Mutation und Rekombination) und Selektion, iterativ ausgeführt in einer Evolutionsschleife, zum Evolvieren neuer Lösungen mit dem Ziel der Systemverbesserung und Optimierung. Hierbei liefert die Variation das genetische Material (Diversität) und die Selektion gibt der Evolution die (gewünschte) Richtung.

Die algorithmische Umsetzung des darwinschen Evolutionsparadigmas kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen und unterscheidet sich unter anderem auch in dem Grad, wie die biologische Maschinerie nachgebildet wird. Historisch gesehen haben sich so verschiedene Unterklassen von EA herausgebildet: Genetische Algorithmen (GA) [41], Evolutionsstrategien (ES) [39; 40] und Evolutionary Programming (EP) [42]. Neben diesen historisch in ihren Grundversionen schon seit den 1960er-Jahren bekannten Verfahren, sind noch weitere bionische Optimierungsverfahren (siehe Abschnitt 7.3) zu erwähnen, die jedoch nicht Inhalt dieser Beschreibung sind.

Am Beispiel der Optimierung einer Prismenlinse wird in Abschnitt 4 die prinzipielle Vorgehensweise in der evolutionären Optimierung beschrieben. In Abschnitt 5 werden Beispiele zur Durchführung des Verfahrens für die Problemklassen kontinuierliche Optimierung, Optimierung mit diskreten Parametern, kombinatorische Optimierung und subjektive Optimierung gezeigt. Abschnitt 6 behandelt die Themen mehrfache Zielsetzung, Nebenbedingungen und unsichere Bewertung.

tion plans in terms of their fitness. Genetic variation arises through two different processes, through recombination of the genes of different individuals and through mutation.

Recombination mixes the genetic information of two or more individuals selected based on their fitness. This produces new genomes, and therefore new individuals in terms of their phenotypes.

Mutations randomly change the genome of an individual. While selection is based on the phenotype, variation is achieved on the genotype using “genetic operators” (mutation and recombination).

The process of variation and selection changes the genetic material of the parent population in the offspring population, which corresponds to one generation. Repeated application (iteration) defines an evolutionary loop in which the system is improved step-by-step in terms of its fitness values.

Evolutionary algorithms (EAs) use the principles of variation (mutation and recombination) and selection, executed iteratively in an evolutionary loop, to evolve new solutions with the objective of improving and optimizing the system. In this process, variation supplies the genetic material (diversity) and selection pushes evolution in the (desired) direction.

The Darwinian evolution paradigm can be implemented algorithmically in various ways. These implementations differ in the degree to which they model the biological machinery, among other differences. When viewed historically, this has resulted in the creation of various subclasses of EAs: genetic algorithms (GA) [41], evolution strategies (ES) [39; 40], and evolutionary programming (EP) [42]. In addition to these methods, basic versions of which have been known historically since the 1960s, there are other biomimetic optimization methods (see Section 7.3) available, but these are not described in the following.

Section 4 describes the basic evolutionary optimization procedure based on an example of the optimization of a prism lens. Section 5 presents examples of the execution of this method for continuous optimization problems, optimization problems with discrete parameters, combinatorial optimization problems, and subjective optimization problems. Section 6 handles the subject of multiple objectives, constraints, and uncertain evaluations.

## 1 Anwendungsbereich

Die Richtlinie wendet sich vorrangig an Ingenieure, die Optimierungsprobleme zu lösen haben,

- für die keine Standardlösungen oder Algorithmen bekannt sind,
- für die Standardlösungen oder Algorithmen nicht den gewünschten Erfolg bringen,
- deren Lösung mit herkömmlichen Verfahren absehbar zu aufwendig erscheinen.

Um in diesen Fällen Evolutionäre Algorithmen erfolgreich anwenden zu können, sollten gewisse Designprinzipien beachtet werden, die in dieser Richtlinie detaillierter ausgeführt werden.

## 1 Scope

The guideline is intended primarily for engineers who need to solve optimization problems

- for which there is no known standard solutions or algorithms,
- for which the standard solutions or algorithms do not yield the desired success,
- whose solution using conventional methods appears to be too expensive.

To facilitate the successful application of evolutionary algorithms in such cases, it is necessary to follow certain design principles. These design principles are described in more detail in this guideline.