

# Evolutionäre Algorithmen

## **Inhaltsverzeichnis**

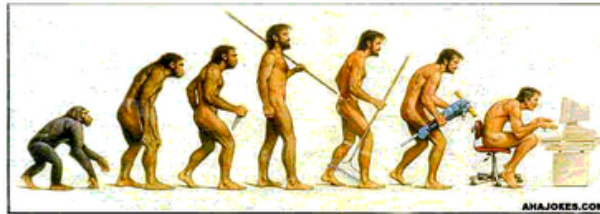
<b>1 Was sind evolutionäre Algorithmen?</b>	<b>2</b>
<b>2 Lernziele</b>	<b>3</b>
<b>3 Evolution in der Biologie</b>	<b>4</b>
<b>4 Modell in der Biologie</b>	<b>6</b>
<b>5 Modell in der Biologie</b>	<b>7</b>
<b>6 Modell in der Biologie</b>	<b>8</b>
<b>7 Modell: evolutionäre Algorithmen (EA)</b>	<b>9</b>
<b>8 Komplexes System Biologie</b>	<b>10</b>
<b>9 Vereinfachung der EA</b>	<b>11</b>
<b>10 Evolutionsfaktoren in der Biologie</b>	<b>12</b>
<b>11 Faktor: Mutation</b>	<b>13</b>
<b>12 Faktor: Mutation</b>	<b>14</b>
<b>13 EA: Mutation</b>	<b>15</b>
<b>14 Faktor: Selektion</b>	<b>16</b>
<b>15 Faktor: Selektion</b>	<b>17</b>
<b>16 EA: Selektion</b>	<b>18</b>
<b>17 Faktor: Genfluss</b>	<b>19</b>
<b>18 EA: Genfluss</b>	<b>20</b>
<b>19 Faktor: Gendrift</b>	<b>21</b>
<b>20 EA: Gendrift</b>	<b>22</b>
<b>21 Und die Rekombination?</b>	<b>23</b>

<b>22 Evolutionsfaktor: Rekombination</b>	<b>24</b>
<b>23 EA: Rekombination</b>	<b>25</b>
<b>24 Anpassung: Nischenbildung</b>	<b>26</b>
<b>25 EA: Nischenbildung</b>	<b>27</b>
<b>26 Anpassung: Koevolution</b>	<b>28</b>
<b>27 EA: Koevolution</b>	<b>29</b>
<b>28 Zunächst unberücksichtigt bleiben</b>	<b>30</b>
<b>29 Evolutionäre Algorithmen</b>	<b>31</b>

# Evolutionäre Algorithmen

Vorlesung 1

Karsten Weicker



# 1 Was sind evolutionäre Algorithmen?

## Was sind evolutionäre Algorithmen?

- Methoden zur Lösung von **Optimierungsproblemen**
- Ideen aus der natürlichen **Evolution**
- randomisierte Verfahren

Ganz an den Anfang der Vorlesung möchte ich eine kurze Charakterisierung der titelgebenden evolutionären Algorithmen stellen. An den Begriff der Evolution erinnert man sich vielleicht noch vage aus dem Biologieunterricht und mit Algorithmen haben wir als Informatiker laufend zu tun. Doch was soll man sich konkret unter der Kombination beider Begriffe vorstellen? Es handelt sich dabei um eine weite Klasse von Methoden zur Lösung von Optimierungsproblemen. Diese Methoden zeichnen sich nun vor allem dadurch aus, dass sie Ideen aus der natürlichen Evolution entlehnen und dabei randomisiert arbeiten, d.h. ihr Ablauf ist von den Zahlen eines Zufallszahlengenerators abhängig. Diese beiden letzten Punkte grenzen die evolutionären Algorithmen von den meisten deterministischen, mathematischen Optimierungsmethoden ab.

## 2 Lernziele

### Lernziele

1. Überblick über natürliche Evolution
2. Übertragung auf Optimierungsprobleme
3. Evolutionsfaktoren
4. grobes Schema evolutionärer Algorithmen

Während wir noch das gesamte Semester Zeit haben, um die evolutionären Algorithmen mit all ihren Facetten kennen zu lernen, möchte ich mich in dieser ersten Vorlesung auf das biologische Vorbild konzentrieren. Dabei geben wir einen Überblick über die natürliche Evolution und schauen uns schematisch an, was sich eigentlich ändert, wenn man stattdessen ein Optimierungsproblem lösen möchte. Indem wir weiterhin die sog. Evolutionsfaktoren in der natürlichen Evolution herleiten, leiten wir uns daraus die wesentlichen Komponenten eines evolutionären Algorithmus ab, so dass wir am Schluss ein grobes Schema der evolutionären Algorithmen als Resultat erhalten.

### 3 Evolution in der Biologie

#### Evolution in der Biologie

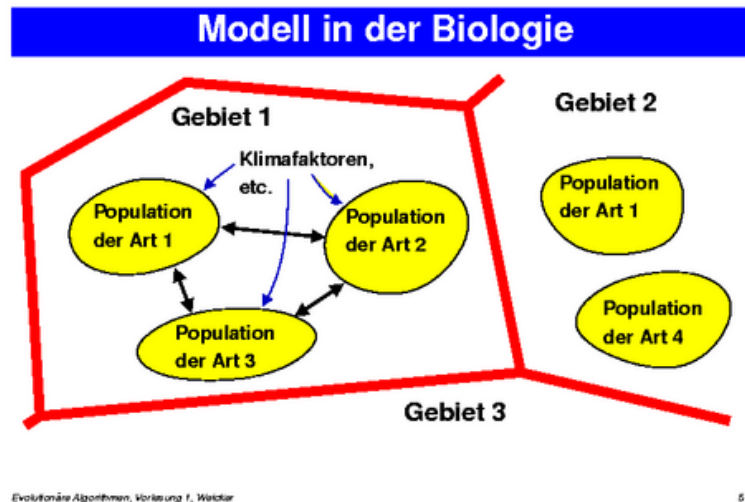
- Theorie, dass sich Lebewesen allmählich aus einfachen zu immer komplizierteren Formen entwickelt haben
- reine Beobachtung und Hypothesenbildung: Lamarck (1809), Darwin (1859)
- wissenschaftliche Erklärungen auf der Ebene der Populationen: Populationsgenetik (1908)
- Erklärungen aus der Molekulargenetik: Watson und Crick (1953)

Doch nun wenden wir uns der Biologie zu. Was versteht man denn eigentlich unter dem Begriff der biologischen Evolution? Es handelt sich dabei um eine Theorie, die besagt, dass sich alle Lebewesen allmählich aus einfachen Arten zu immer komplizierteren Formen entwickelt haben. Ganz wesentlich ist dabei der Schwerpunkt auf "allmählich" und "entwickelt". Als die Theorie im 19. Jahrhundert neu formuliert wurde, stand sie in einem krassen Gegensatz zum damaligen Glauben der Artkonstanz -- alle Lebewesen wurden gleichermaßen von Gott geschaffen. Fossile Funde wurden als Gesteinsformationen abgetan oder später durch eine Katastrophentheorie mit einer iterativen Neuschaffung von Arten durch einen Schöpfer erklärt. Die Ursprünge der Theorie gehen u.a. auf die Beobachtungen von Lamarck und Darwin zurück. Beide formulierten die langsame Anpassung von Arten als Hypothese -- wobei sie sich in ihren Erklärungsversuchen jedoch unterschieden. Lamarck ging von einer Rückkopplung individueller Erfahrungen und Lernens aus, während Darwin ein Wechselspiel zwischen zufälliger, kleiner Veränderung und Selektion postulierte. Der Lamarcksche Ansatz gilt im wesentlichen als widerlegt, während die auf Darwin begründete Evolutionstheorie im vergangenen Jahrhundert untermauert werden konnte. Dies geschah zunächst mit Hilfe der Populationsgenetik, bei der bestimmte Eigenschaften statistischen realen Populationen untersucht werden und mit Modellen zur Erklärung des Beobachteten abgeglichen werden. Dieser Ansatz geht eigentlich zurück auf die Experimente von Mendel im 19. Jahrhundert an Gartenerbsen, der damit die Genetik begründet hat. Ihre Hochzeit hat die Populationsgenetik dann am Beginn

des vergangenen Jahrhunderts erlebt. Noch detailliertere Erklärungen bezüglich der Mechanismen der Evolution hat dann schließlich die Molekulargenetik geliefert, die mit der Entdeckung der Struktur der Erbsubstanz (DNA) durch Watson und Crick im Jahre 1953 sowie die Entschlüsselung des genetischen Codes 8 Jahre später ebenfalls durch Crick eingeläutet wurde. Bei den Erklärungen in der heutigen Vorlesung werden wir uns im Wesentlichen auf der Ebene der Populationsgenetik bewegen.

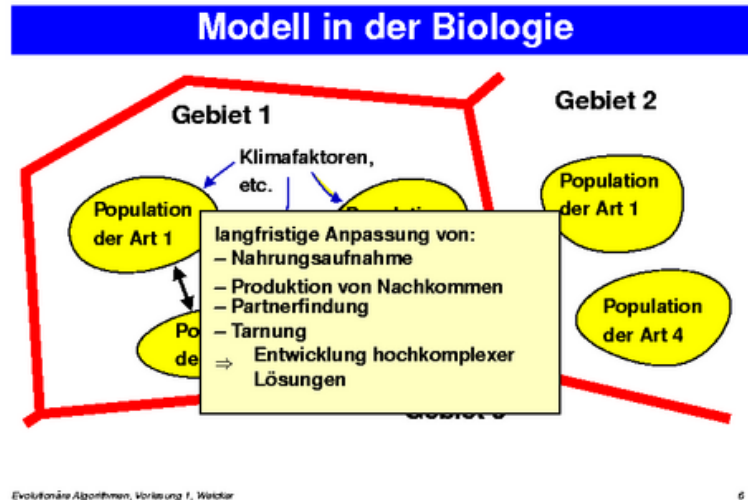


## 4 Modell in der Biologie



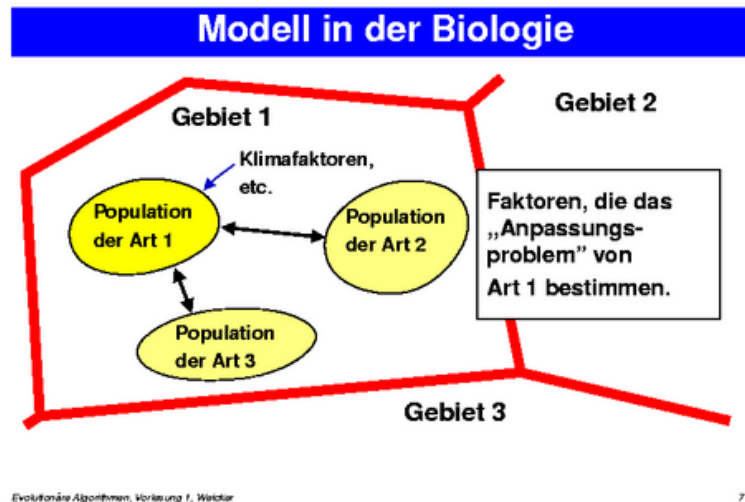
Schauen wir uns also einmal die Situation in der Natur an. Wir haben unterschiedliche Lebensräume, die hier als Gebiete strikt voneinander getrennt sind. Und in jedem dieser Gebiete kommen unterschiedliche Arten vor, die jeweils aus einer Population mehrerer Individuen bestehen. Die Entwicklung jeder Art hängt nun stark von den anderen Lebewesen in ihrem Lebensraum ab. Ebenso wird sie von sog. abiotischen Faktoren wie dem Klima beeinflusst.

## 5 Modell in der Biologie



D.h. jede Population ist bestrebt, seine Interaktion mit der Umwelt möglichst gut an diese anzupassen. Diese Anpassung findet in der Regel über einen sehr langen Zeitraum statt und kann sich in Veränderungen bezüglich der Nahrungsaufnahme, der Produktion von Nachkommen, der Partnerfindung, der Tarnung, usw. äußern. So hat die Evolution als Resultat dieser Anpassung vermutlich die unzähligen hochkomplexen Lösungen hervorgebracht, die wir in der Natur beobachten können.

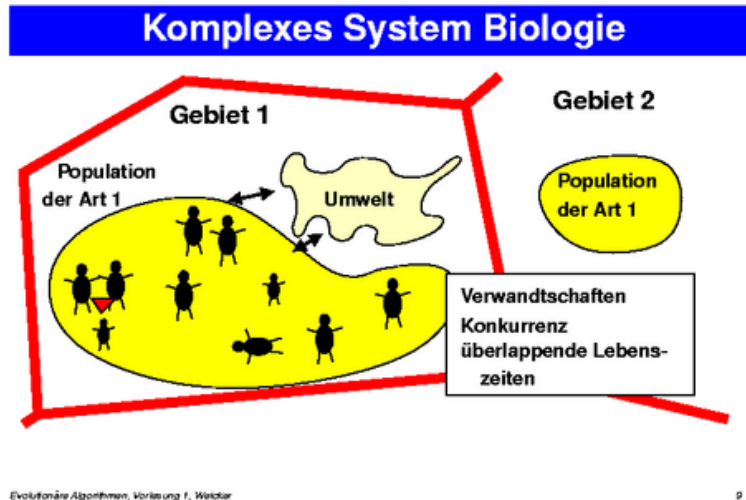
## 6 Modell in der Biologie



Die Faktoren, die dieses "Anpassungsproblem" ausmachen sind nun z.B. für die Art 1, all die Populationen mit denen sie interagiert sowie die abiotischen Faktoren. Sobald sich an diesen Faktoren etwas ändert, stellt die veränderte Umwelt auch andere Anforderungen an die Population von Art 1. Wobei hier festzuhalten ist, dass Art 1 immer als komplette Population versucht, das Anpassungsproblem zu lösen.

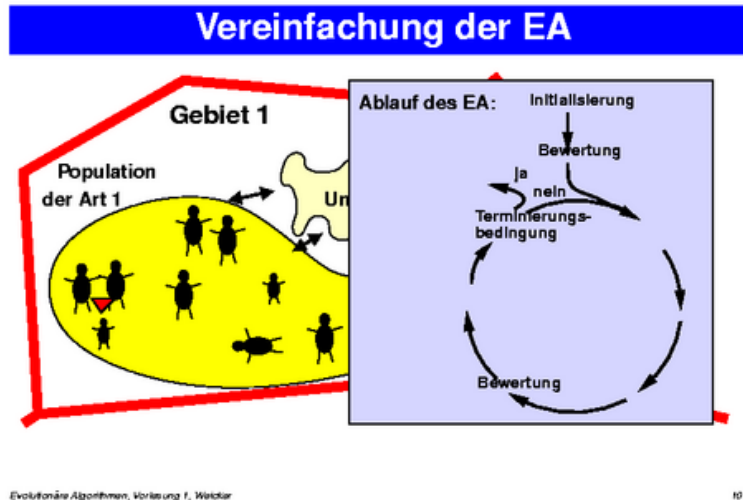


## 8 Komplexes System Biologie



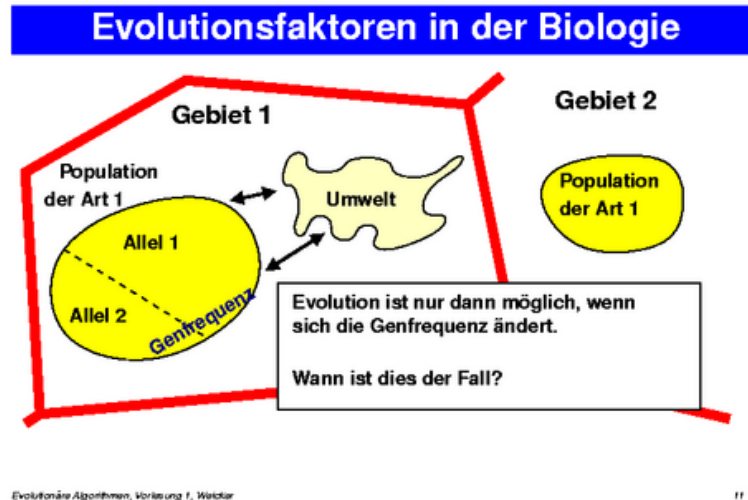
Doch wie läuft die Evolution denn nun eigentlich ab? Dafür ist es zweckmäßig, genauer in die Population hineinzuschauen. Und was sich uns präsentiert ist ein hochkomplexes System gegenseitiger Abhängigkeiten. Diese werden in erster Linie durch die Verwandtschaftsbeziehungen der Individuen zueinander bestimmt, aber auch durch andere Interaktionen miteinander wie z.B. ein Konkurrenzverhalten in Bezug auf Nahrung oder die Partnerfindung. Und ein sehr schwerwiegender Faktor ist auch die Tatsache, dass die Lebenszeiten der Individuen sehr unterschiedlich sein können und sich darüberhinaus sehr stark überlappen können. Dieses komplexe System lässt sich nicht auf einfache Weise mathematisch oder algorithmisch beschreiben. Wenn wir nun also Optimierungsprobleme lösen wollen, können die Vorgänge der Evolution nicht direkt kopiert werden. Was ist also notwendig?

## 9 Vereinfachung der EA



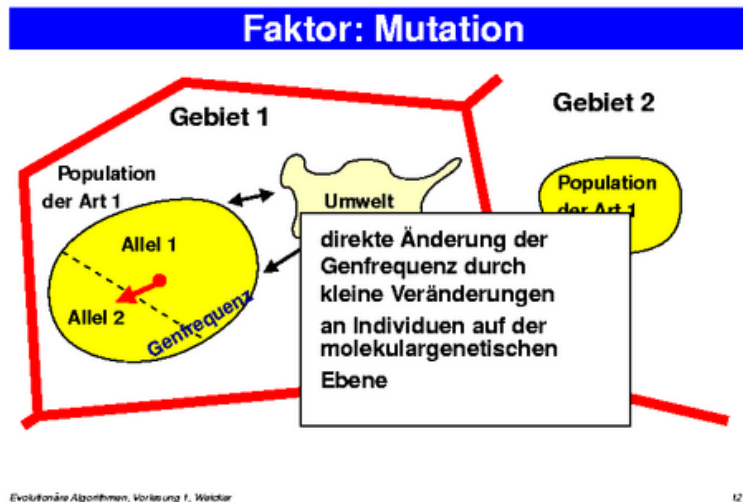
Wir vereinfachen diese komplexen Vorgänge, indem wir sie auf ein einfaches iteratives Schema als Grundalgorithmus abbilden. Während wir in der Natur nur schwerlich einen Anfang der Evolution festmachen können und ein Ende auch nur durch Auslöschung einer Art vorkommt, sind Anfang und Ende essentiell bei einer Optimierung. Wenn wir uns entscheiden ein Problem zu lösen, haben wir also mit irgendeiner Population von ersten Lösungskandidaten zu starten, d.h. wir initialisieren unsere Anfangspopulation. Diese Lösungskandidaten müssen nun immer wieder bewertet werden, inwieweit sie sich als Lösung unseres Optimierungsproblems eignen. Und das Ende der simulierten Evolution ergibt sich dann meist aus der Tatsache, dass ein ausreichend gutes Individuum gefunden wurde oder dass die Optimierung abgebrochen wird, da keine weitere Zeit mehr investiert werden soll. Jede Iteration in diesem Zyklus entspricht nun beim evolutionären Algorithmus einer Generation. Und bei vielen Standardverfahren wird auch die komplette Population bei jeder Iteration durch die neu erzeugten Kinder ersetzt.

## 10 Evolutionsfaktoren in der Biologie



Um nun den Ablauf des evolutionären Algorithmus weiter auszufüllen, wollen wir uns mit der Frage beschäftigen, wann denn eigentlich Evolution in der Natur tatsächlich stattfindet. Dazu teilen wir die Population aufgrund der Ausprägung eines speziellen Gens, welches z.B. die Haarfarbe oder eine Blütenfarbe bestimmt, in zwei Klassen ein. Ein Gen ist also eine Erbinformation, die einen speziellen Aspekt der Erscheinung des Individuums bestimmt. Jede Ausprägung des Gens wird als Allel bezeichnet. Die beiden Allele stehen in der Population also in einem bestimmten Häufigkeitsverhältnis zueinander. Dieses Verhältnis wird als Genfrequenz bezeichnet. Eine Anpassung der Population in ihrer Gesamtheit findet also nur dann statt, wenn sich diese Genfrequenz verändert -- ansonsten wäre die Population ja immer konstant. Aus der Frage, wie eine solche Veränderung der Genfrequenz zustande kommen kann, leiten wir im weiteren die Evolutionsfaktoren ab und stellen diese immer in den Zusammenhang zu den evolutionären Algorithmen.

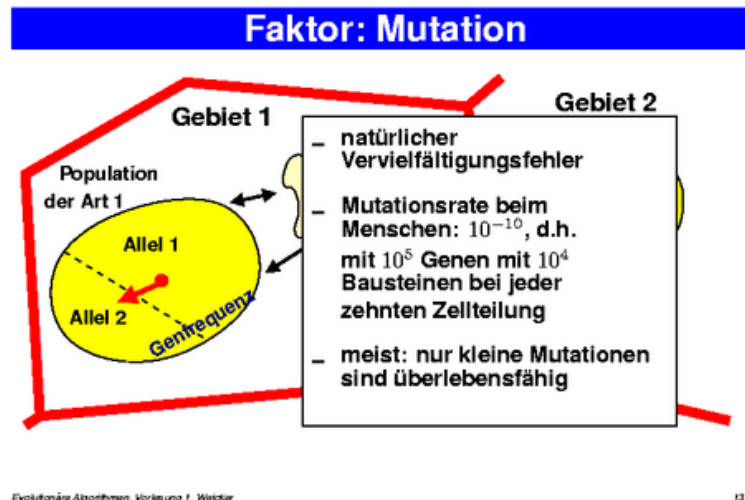
## 11 Faktor: Mutation



Die einfachste Möglichkeit stellt die Mutation dar. Eine Mutation ist eine kleine Veränderung an der Erbmasse eines Individuums. Wird nun durch eine solche Veränderung das Allel 1 in ein Allel 2 verwandelt, ändert sich dadurch natürlich auch die Genfrequenz.

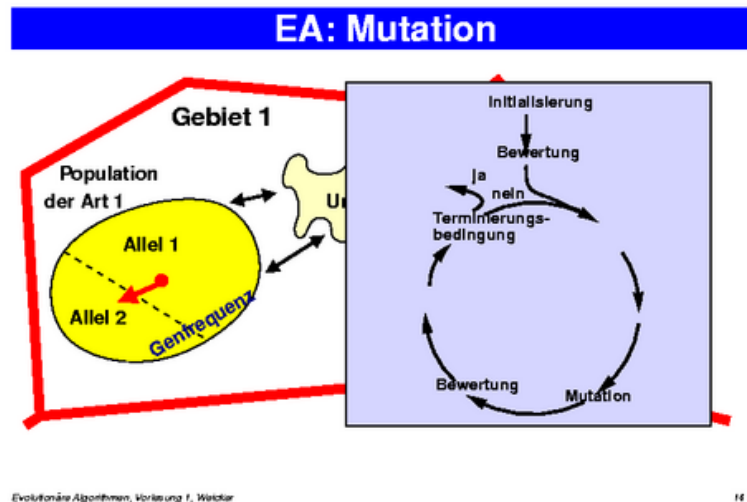


## 12 Faktor: Mutation



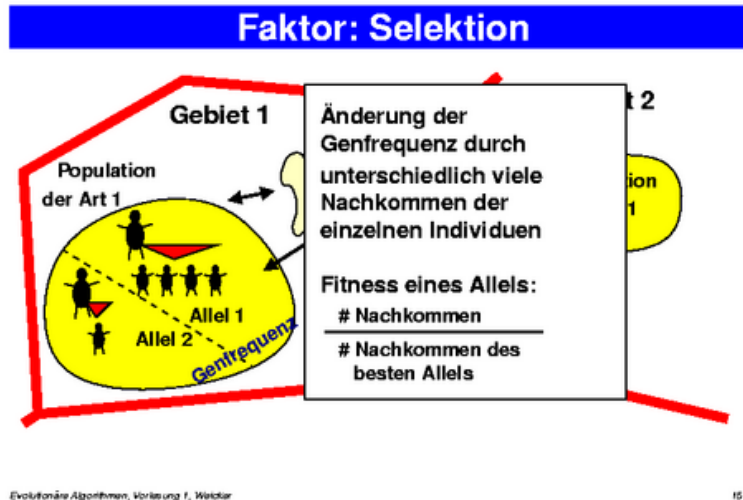
Bei Mutationen handelt es sich um natürliche Vervielfältigungsfehler -- diese ist z.B. aufgrund der natürlichen radioaktiven Strahlung eine feste Grundgröße. So beträgt die Mutationsrate beim Menschen etwa  $1.0e-10$ . D.h. bei jeder zehnten Zellteilung findet ein Fehler bei der Reproduktion der Erbsubstanz statt. In der Regel sind nur kleine Mutationen überlebensfähig.

### 13 EA: Mutation



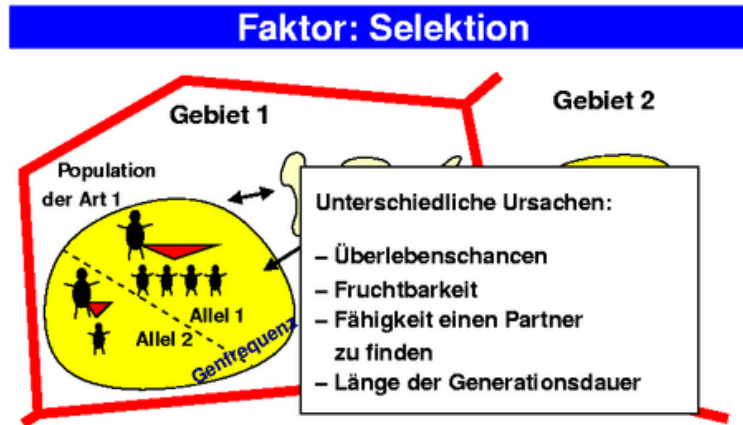
Für die evolutionären Algorithmen können wir also die Mutation als kleine Veränderung als ein Faktor im simulierten evolutionären Zyklus festhalten.

## 14 Faktor: Selektion



Statt einer direkten Veränderung an der Erbmasse kann sich die Genfrequenz auch indirekt ändern, wenn die Individuen der einzelnen Allele unterschiedlich viele Nachkommen haben -- d.h. wenn beispielsweise Allel 1 an wesentlich mehr Kinder weitergegeben wird als Allel 2. Man spricht dann auch davon, dass Allel 1 besser an die Umgebung angepasst ist. Dieses Angepasstsein wird durch einen Fitnesswert gemessen: das Allel mit den meisten Nachkommen erhält den Wert 1.0, die anderen Allele werden relativ zum Allel mit den meisten Kindern gemessen.

## 15 Faktor: Selektion

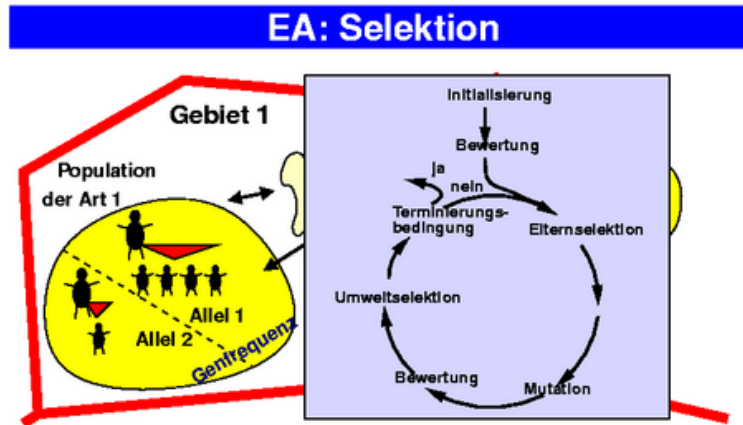


Evolutionäre Algorithmen, Vorlesung 1, Weibler

16

Die Gründe für ein solches Angepasstsein können unterschiedlicher Natur sein: höhere Überlebenschancen der Kinder in der Interaktion mit der Umwelt, eine höhere Fruchtbarkeit der Eltern, eine bessere Fähigkeit einen Partner zu finden oder ein längeres Leben der Eltern. Allen Ursachen eigen ist die Tatsache, dass die Veränderung der Genfrequenz auf einer Auswahl, einer Selektion, der besser angepassten Individuen beruht. Der Faktor der Selektion ist wesentlich für die in der Evolution stattfindende Anpassung.

## 16 EA: Selektion

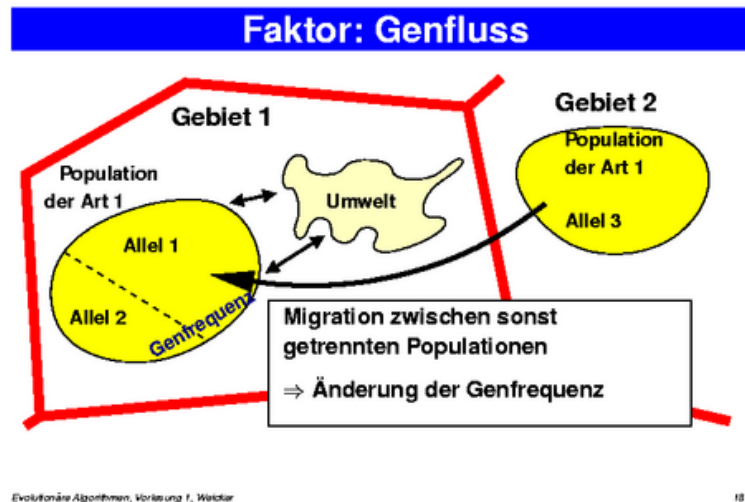


Evolutionäre Algorithmen, Vorlesung 1, Weiskopf

17

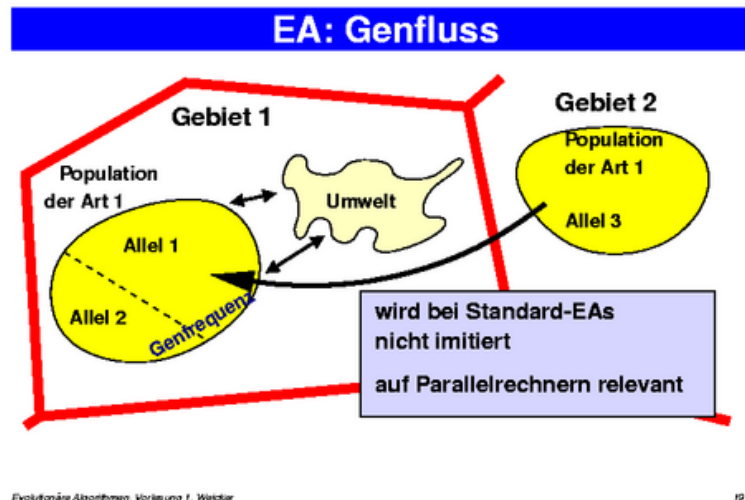
Wenn wir dies nun auf die evolutionären Algorithmen übertragen, fassen wir die unterschiedlichen Ursachen in zwei verschiedene Arten der Selektion zusammen. Die Partnerfindung und die Fruchtbarkeit finden sich in einer Elternselektion wieder, die bestimmt, welche Eltern wieviele Kinder bekommen. Und die Überlebenschancen und die Lebensdauer der Individuen findet sich in der Umweltselektion wieder, die bestimmt, welche Individuen in der nächsten Iteration als Eltern herangezogen werden können. An dieser Stelle können bei vielen Verfahren auch Eltern der aktuellen Generation als mögliche Eltern für die nächste Generation erneut übernommen werden. Ähnlich zur Biologie ist auch bei den evolutionären Algorithmen die Selektion wesentlich um der Optimierung eine Richtung zu geben.

## 17 Faktor: Genfluss



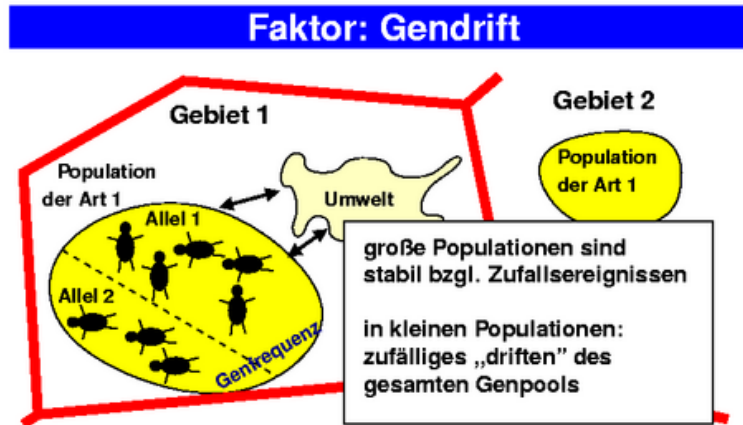
Ein weiterer Faktor besteht in der Einwanderung von Individuen aus einer eigentlich getrennten lebenden Population derselben Art. Auch dieser sog. Genfluss ändert die Genfrequenz und sorgt damit für eine Evolution.

## 18 EA: Genfluss



Bei den üblichen Standardverfahren der evolutionären Algorithmen, findet der Genfluss keinen Eingang. Dieser Faktor wird erst dann relevant, wenn man evolutionäre Algorithmen auf Parallelrechnern implementiert.

## 19 Faktor: Gendrift



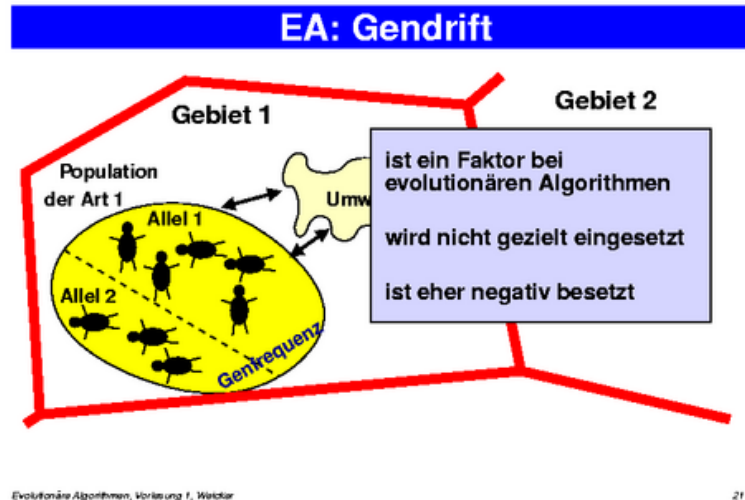
Evolutionäre Algorithmen, Vorlesung 1, Weibler

20

Einen letzten wichtigen Faktor können wir aus unserem biologischen Modell ablesen: während große Populationen stabil gegenüber Zufallsereignissen sind, kann dies in sehr kleinen Populationen sich stark auf die Genfrequenz auswirken. Dann verändert sich die Genfrequenz der Population zufällig. Man spricht dann auch von Gendrift. Dieser Faktor kann in der Natur insbesondere bei einem engen Zusammenwirken mit dem Genfluss bei vielen sehr kleinen Teilpopulationen interessante Effekte mit sich bringen.



## 20 EA: Gendrift

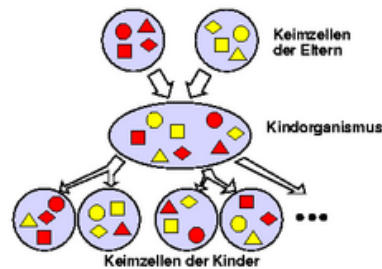


Da evolutionäre Algorithmen in der Regel mit eher kleinen Populationsgrößen arbeiten, ist der Gendrift auch dort ein wichtiger Faktor. Allerdings kann er meist nicht gezielt zur Lösung von Optimierungsaufgaben eingesetzt werden und wird daher meist als ein eher negativer Effekt beschrieben.

## 21 Und die Rekombination?

### Und die Rekombination?

- Ist die Rekombination ein Evolutionsfaktor?
- Gemäß der Populationsgenetik: nein, da in großen Populationen die Genfrequenz gleich bleibt



Ein Detail der Evolution bleibt bei diesen Betrachtungen völlig außen vor, nämlich die Vermischung, die Rekombination, des Erbguts zweier Eltern bei einer geschlechtlichen Fortpflanzung, wie dies schematisch in dieser Abbildung gezeigt ist. Es stellt sich daher die Frage, ob es sich dabei nicht um einen Evolutionsfaktor handelt. Wenn man beider Argumentation der Populationsgenetik bleibt, ist die Antwort "Nein". Denn in großen Populationen führt eine willkürliche Vermischung des elterlichen Erbguts nicht zu einer veränderten Genfrequenz, da jedes Gen dieselbe Chance hat, übernommen zu werden. D.h. statistisch bleibt die Genfrequenz immer gleich.

## 22 Evolutionsfaktor: Rekombination

### Evolutionsfaktor: Rekombination

- Sichtweise der Populationsgenetik ist mechanistisch:  
Gene sind ein Bauplan  
⇒ Rekombination: stellt nur neu zusammen
- modernere Sichtweise: genetisches Netzwerk  
Gene sind abhängig von anderen Genen aktiv
- selbstorganisierter, zyklischer „Wachstumsprozess“  
⇒ Rekombination kann neue Zusammenhänge erschaffen

Evolutionsalgorithmen, Vorlesung 1, Weicker

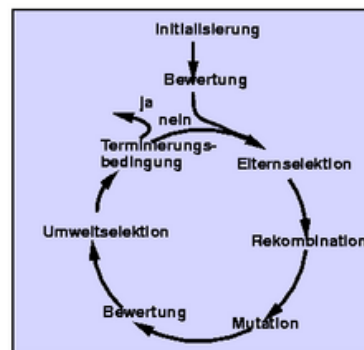
23

Damit hätte sich die Rekombination und die geschlechtliche Fortpflanzung als Mechanismus jedoch kaum in der Biologie etablieren können. Daher verwundert es nicht, dass die der Populationsgenetik zugrundeliegende mechanistische Sichtweise -- die Gene stellen einen Bauplan dar, der direkt umgesetzt wird -- nicht zuletzt aufgrund von molekulargenetischen Erkenntnissen durch eine modernere Vorstellung ersetzt wurde. Dabei bilden die Gene ein sog. genetisches Netzwerk, in denen Gene in der Abhängigkeit von der Wirksamkeit anderer Gene aktiv sind. D.h. die Ausbildung eines Individuums ist eine selbstorganisierter Wachstumsprozess. In solch einem Prozess kann eine Rekombination natürlich ganz andere neue Zusammenhänge herstellen als dies bei einer bloßen Rekombination einzelner Charakteristika der Fall ist.

## 23 EA: Rekombination

### EA: Rekombination

- Rekombination wird benutzt
- meist: zufälliges Durchprobieren anderer Kombinationen
- unberücksichtigt: Selbstorganisation

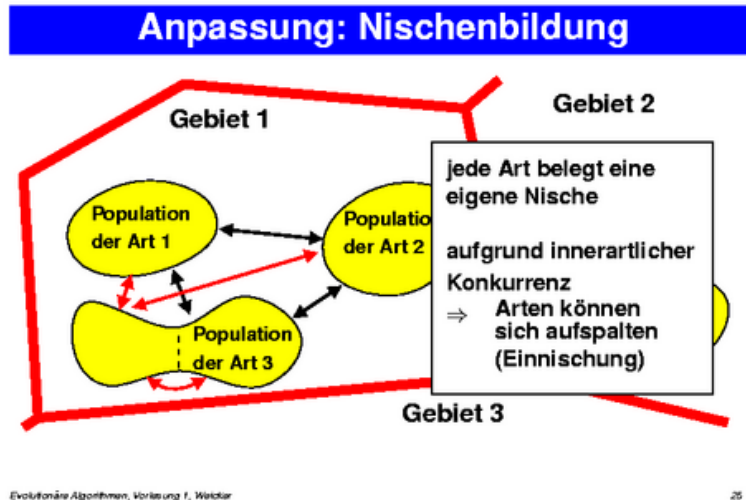


Evolutionäre Algorithmen, Vorlesung 1, Weiskopf

24

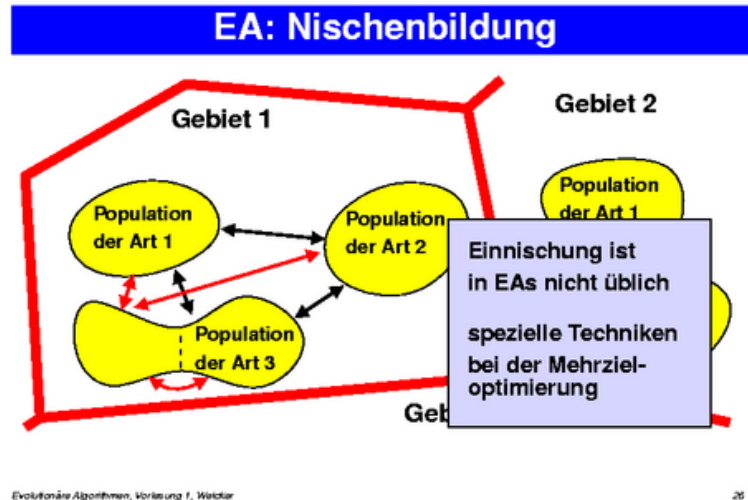
Konsequenterweise wird die Rekombination auch als Faktor bei den evolutionären Algorithmen eingesetzt. Allerdings auch hier eben meist nur in der Rolle des zufälligen Durchprobierens der unterschiedlichen möglichen Kombinationen. Der selbstorganisierte Aufbau eines Lösungskandidaten für das Optimierungsproblem aus den Genen bleibt meist unberücksichtigt.

## 24 Anpassung: Nischenbildung



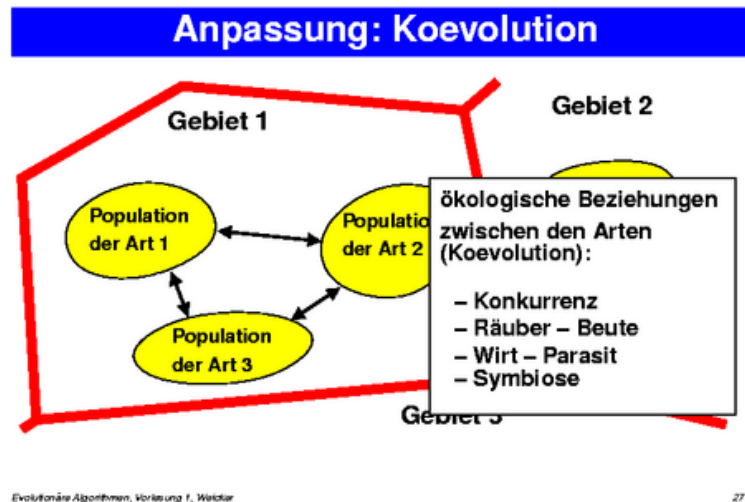
Zum Abschluss möchten wir nochmals kurz auf zwei interessante Aspekte in der biologischen Evolution eingehen. Der erste Aspekt ist die Nischenbildung. In einem Lebensraum belegt jede Art eine eigene Nische und so teilen sich die verschiedenen Arten die verfügbaren Ressourcen untereinander auf. Da jedoch die Ressourcen für jede Art begrenzt sind, herrscht in jeder Art auch eine große innerartliche Konkurrenz. Dies führt nun in der Natur dazu, dass ständig ein Ausweiten der Nische einer Art angestrebt wird, um die innerartliche Konkurrenz zu verringern. Dies kann im Extremfall zur Aufspaltung einer Art in zwei voneinander getrennte Arten führen. Dieser Anpassungsprozess ist im Wesentlichen für die Artenvielfalt der Natur verantwortlich.

## 25 EA: Nischenbildung



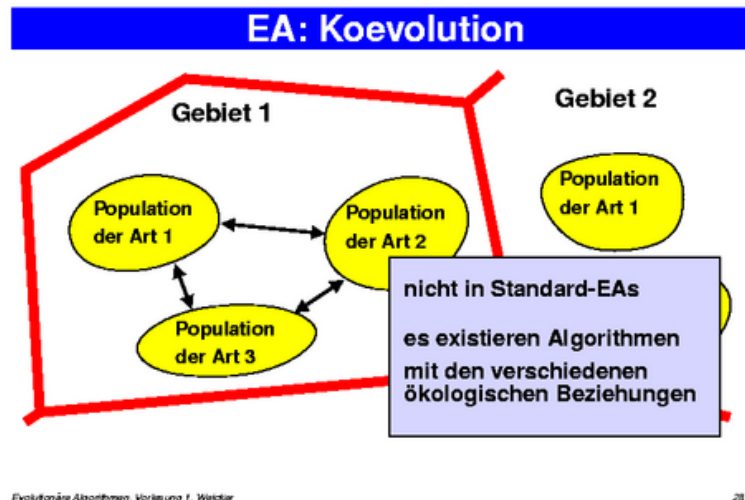
Auch dieser Effekt findet bei den evolutionären Algorithmen meist keine Entsprechung. Erst gegen Ende der Vorlesung werden wir bei der Mehrzieloptimierung spezielle Techniken kennenlernen, die die Nischenbildung der natürlichen Evolution zu kopieren versuchen.

## 26 Anpassung: Koevolution



Ein zweiter Aspekt auf den wir hier nochmals kurz eingehen möchten, ist die Entwicklung ökologischer Beziehungen zwischen den Arten eines Lebensraums. So ist die Entwicklung jeder Art von der Entwicklung der anderen Arten abhängig. Man unterscheidet dabei die folgenden Arten der Koevolution, d.h. der gemeinsamen Evolution. ein Konkurrenzverhalten z.B. im Bezug auf vorhandene Ressourcen, eine Räuber-Beute-Beziehung, in der ein Wettstreit zwischen den Arten um bessere Fang- und Flucht- oder Tarnungstechniken einsetzt, eine Wirt-Parasit-Beziehung, bei der eine Art die andere ausnutzt, und die Symbiose, bei der beide Arten zu gleichen Teilen einen Vorteil aus der gegenseitigen Interaktion ziehen. Als Beispiel für die letzte Art der Koevolution kann die Kultivierung der Blattläuse durch Ameisen angeführt werden.

## 27 EA: Koevolution



Durch die simple Ersetzung aller äußeren Einflüsse auf eine Art durch ein einzelnes Optimierungsproblem, wurden auch alle Formen der Koevolution in den Standardverfahren der evolutionären Algorithmen zunächst ausgeschlossen. Es gibt jedoch Verfahren, die diese ökologischen Beziehung auch im Hinblick auf eine Optimierung wieder in die evolutionären Algorithmen einführen.



## 28 Zunächst unberücksichtigt bleiben

### Zunächst unberücksichtigt bleiben

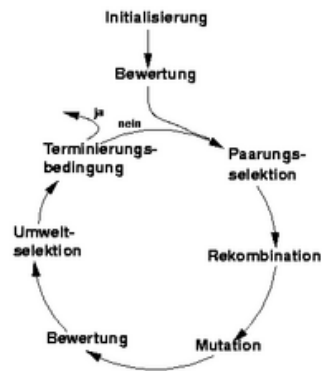
- dynamische Populationsgrößen
- selbstorganisierte Interpretation der DNA
- Sexualität
- Nischenbildung
- Koevolution
- Genfluss
- dynamische Umgebungen

Unter dem Strich bleibt eine ganze Reihe von Details der biologischen Evolution bei den evolutionären Algorithmen unberücksichtigt. Diese Liste gibt dabei nur einen unvollständigen Einblick. Man hat sich dies jedoch immer wieder vor Augen zu führen, wenn man evolutionäre Algorithmen betrachtet, dass man einen von der natürlichen Evolution gänzlich unterschiedlichen Betrachtungsgegenstand hat.

## 29 Evolutionäre Algorithmen

### Evolutionäre Algorithmen

- Population, Individuen
- (randomisierte) Operationen  
Rekombination, Mutation,  
Selektion
- definierte Gütebewertung
- Verwendung von Begriffen  
z.T. anders als in Biologie



Evolutionäre Algorithmen, Vorlesung 1, Weickler

30

Und hier ist das Grundschema der evolutionären Algorithmen nochmals im Überblick. Aus der Biologie wurden die Begriffe der Population und des Individuums übernommen. Ebenso werden einzelne Evolutionsfaktoren in den evolutionären Algorithmen als Operationen eingesetzt. So baut sich eben eine Generation aus der sukzessiven Anwendung einer Paarungsselektion, der Rekombination, der Mutation, einer Bewertung der erzeugten Kindindividuen im Hinblick auf das Optimierungsproblem und eine Umweltselektion auf. Dabei sieht man schon hier, dass viele Begriffe zwar aus der Biologie entlehnt sind, aber im Weiteren mit einer oft geringfügig anderen Semantik verwendet werden. An diesem Punkt werden wir dann auch in der nächsten Vorlesung wieder aufsetzen, die Biologie hinter uns lassen und anhand eines Beispiels die evolutionären Algorithmen näher kennenlernen.