

Seminararbeit im wissenschaftspropädeutischen Seminar

Rahmenthema: Bionik

Kursleiterin: Frau Holfeld

Verfasser: Jonas Oefelein

Thema: Evolutionsbionik: Funktion evolutiver Prozesse
und deren Bedeutung für die Technik

Abgabetermin: 10.11.2015

Note der Seminararbeit (Punktezah):

Note der Präsentation (Punktezah):

Unterschrift der Kursleiterin:

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	3
2. Grundbegriff Evolution.....	4
3. Der Evolutionäre Algorithmus.....	7
3.1 Funktionalität.....	7
3.2 Veranschaulichung der Funktionalität des Evolutionären Algorithmus am Beispiel des Mutations-Selektions-Prinzips.....	8
3.3 Vor- und Nachteile des Evolutionären Algorithmus.....	11
3.3.1 Vorteile.....	11
3.3.2 Nachteile.....	12
3.4 Strategie – nicht Glück.....	14
3.5 Molekulare Evolution.....	15
4. Die Natur als Evolutionärer Algorithmus.....	18
4.1 Grund für den Erfolg der Bionik.....	18
4.2 Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten aus verschiedenen Bereichen der Bionik.....	19
4.2.1 Termitenbauten als Beispiel für bionische Klimatisierungs- und Beheizungsprobleme.....	19
4.2.2 Winglets in der Flügeltechnik.....	20
4.2.3 Elektrostimulation zur Unterstützung der menschlichen Atmung.....	21
5. Fazit.....	21
6. Literaturverzeichnis.....	23
6.1 Bücher und Zeitschriften.....	23
6.2 Internetseiten.....	24
7. Quellenverzeichnis.....	25

1. Einführung

„Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution“¹

Allein dieser Satz des Evolutionsbiologen Theodosius Dobzhansky aus dem Jahr 1973 zeigt die grundlegende Wichtigkeit der Evolutionstheorie in unserem heutigen wissenschaftlich determinierten Weltbild.

Über Jahrmillionen hinweg formte die Evolution Tiere, Menschen und Pflanzen und machte uns und unsere Umwelt zu dem, was wir heute sind. Und seit Jahrhunderten versuchen Menschen, diese Mechanismen und Strukturen für sich nutzbar zu machen. Dieser Prozess veränderte sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts dahingehend, dass Wissenschaftler den Vorgang der Evolution selbst auf die Technik zu übertragen versuchten. So entstand die Evolutionsbionik, die mich aufgrund ihrer Geschichte und Vielfalt in verschiedener Hinsicht fasziniert. Der zentralste und bedeutendste Punkt ist der Evolutionäre Algorithmus, der beschreibt, wie man den Mechanismus der Evolution auf die Technik übertragen und somit effiziente Lösungen für alltägliche und wissenschaftliche Probleme finden kann. Dieser wird in der Fachliteratur in Genetische Algorithmen (bzw. Genetisches Programmieren) und Evolutionsstrategien unterteilt. Hierbei versuchen erstere „Prinzipie der Evolution auf Zellebene genotypisch nachzubilden“² und haben ihren Ursprung in Amerika, letztere hingegen wurden unabhängig in Deutschland entwickelt und stellen ein „einfaches phänotypisches Modell der Evolution“² dar.

Zunächst behandle ich nun den Evolutionären Algorithmus im Allgemeinen. Dieses Verfahren bietet sich besonders an, wenn nur wenig Problemwissen und ein inkontinuierlicher Problemverlauf vorhanden ist. Anschließend wird die Funktionalität desselben anhand technischer Versuche aus dem Bereich der Evolutionsstrategie verdeutlicht. Die praktische Anwendbarkeit des Evolutionären Algorithmus im Bereich der Chemie möchte ich am Beispiel der molekularen Evolution genauer darstellen.

Ein abschließender Teil fundiert auf der Sicht, die Natur selbst sei ein zeitloser Evolutionärer Algorithmus und gibt somit eine Erklärung für die besondere Effizienz bionischer Techniken und Verfahren. Dieser Punkt stellt die Basis für

¹ Dobzhansky, 1973, S. 125–129

² Hartmann, 1996, S.19

² Hartmann, 1996, S.19

alle Teilbereiche der Bionik dar und kann somit auf all diese übertragen werden. Zuletzt wird ein fundamentaler Unterschied zwischen der Evolutionsbionik und anderen bionischen Teilgebieten dargelegt.

Doch zunächst bedarf es einer genauen Definition der Basis dieses Themas, der Evolution.

2. Grundbegriff Evolution

Bis ins 18. Jahrhundert schloss man eine Veränderlichkeit von Lebewesen weitgehend aus, da auch das biologische Weltbild stark religiös geprägt war und man „den biblischen Schöpfungsbericht als naturwissenschaftliche Beschreibung der Entstehung der Arten interpretierte“³. Zudem waren evolutionsbiologische Veränderungen an Arten in den zeitlichen Maßstäben eines Menschenlebens kaum erkennbar.

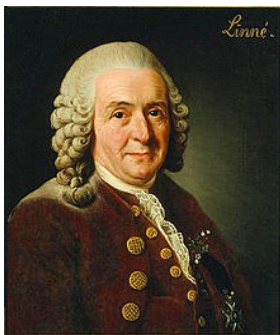


Abb. 1: Carl von
Linee (1707-1778)



Abb. 2: Jean-Baptiste
Lamarck (1744-1839)

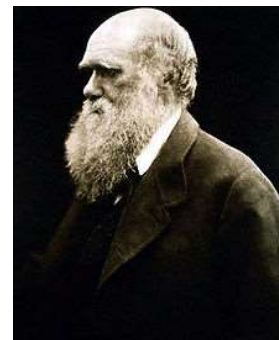


Abb. 3: Charles
Darwin (1809-1882)

Doch mit dem Wissen, das sukzessive von Forschern wie CARL VON LINEE (1707-1778), JEAN-BAPTISTE LAMARCK (1744-1839) und CHARLES DARWIN (1809-1882)⁴ erarbeitet wurde, entstand über die Festlegung von Ordnungssystemen und durch neue Berichte und Beobachtungen aus anderen Kontinenten eine wissenschaftlich begründbare und stichhaltige Theorie, die durch Erkenntnisse moderner biologischer Teilgebiete schließlich zur erweiterten Evolutionstheorie ergänzt wurde.

Über diese lässt sich sagen: „Die treibenden Kräfte für die Evolution sind die

³ Weber, 2010, S. 10

⁴ Weber, 2010, S. 10

ungerichteten erblichen Variationen der Individuen und die natürliche Selektion, die unter den vielen Varianten bevorzugt jene ausliest, die die größere Eignung aufweisen, also die bessere Anpassung zeigen.“⁵

Diese ungerichteten Variationen, auch genetische Operatoren genannt, sind dem Zufallsprinzip folgende Vorgänge, durch die neue genetische Information (Genkombinationen) und gleichzeitig die Möglichkeit erweiterter Variabilität entstehen. Man unterscheidet hauptsächlich zwischen Mutation und Rekombination. Unter ersterem versteht man sprunghafte, zufällige Fehler in der Vererbung, die die Erbinformation betreffen. Diese wirken sich zwar meist indifferent, also selten positiv oder negativ aus, bilden aber den grundlegenden, Neues schaffenden Faktor der Evolution. Rekombination ist einerseits die Neukombination von Allelen als Folge der geschlechtlichen Fortpflanzung und wird andererseits durch das Crossing-over (das während der Prophase I der Meiose abläuft und während dem einzelne Teile der DNA-Stränge einer Chromosomentetrade ausgetauscht werden) ergänzt. Ein Genpool mit hoher Variabilität ist für evolutionäre Entwicklungen unabdingbar und kommt durch die genetischen Operatoren zustande. Letztere werden in Abb. 4 visualisiert.

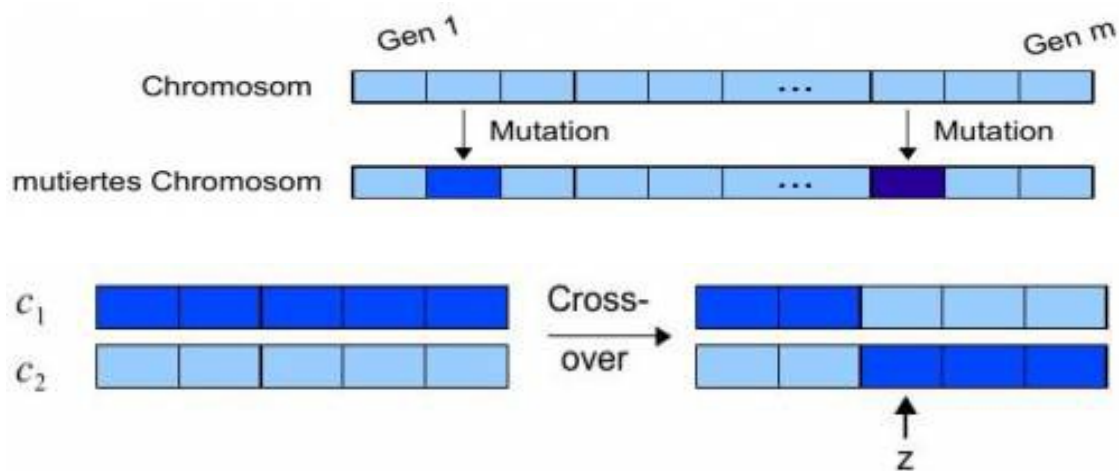


Abb. 4: oben: graphische Darstellung der Mutation: an den dunkel gefärbten Stellen des symbolischen Chromosoms tritt eine zufällige Veränderung auf. unten: graphische Darstellung des Crossing-over: die zwei Chromosomen (c₁ und c₂) eines Chromosomenpaares vertauschen jeweils Teile des Strangs.

Diesen zufällig auftretenden Ereignissen wirken nun Umwelteinflüsse in Form der Selektion entgegen. Die Selektion richtet die Variabilität und entscheidet

⁵ Weber, 2010, S. 11

über die Fitness der neuen Genkombination, was sich im Überleben bzw. Sterben des Individuums äußert. Ist ein Lebewesen besser angepasst, kann es sich gegen andere seiner Art durchsetzen und seine genetische Information weitergeben, dementsprechend hat es eine hohe Fitness. Im umgekehrten Fall hat das Lebewesen eine geringere Fortpflanzungsrate, wenn es schlechter an die Umweltbedingungen angepasst ist. Dabei stehen aber immer die momentanen Bedingungen des Lebensraumes in enger Wechselwirkung zur Fitness des Lebewesens, was die Anpassung an sich verändernde Umwelteinflüsse bzw. die Optimierung bei konstanten Einflüssen verstärkt.⁶



Abb. 5: *Anpassung an Beschaffenheit der Umwelt am Beispiel der Giraffe*

Wie in Abb. 5 dargestellt, ist es für Individuen mit dem Phänotyp eines langen Halses deutlich leichter, die an Bäumen vorhandene Nahrung aufzunehmen. Somit sind diese an die spezielle Umwelt (mehr Nahrung an Bäumen als auf dem Boden) besser angepasst und haben eine höhere Fitness. Hierbei zeigt sich das Prinzip der natürlichen Selektion, da letztere Lebewesen aufgrund ihrer Anpasstheit eher überleben als solche mit vergleichbar kurzen Hälsen.⁷ Sie geben ihre genetische Information durch geschlechtliche Fortpflanzung weiter, reproduzieren sich also selbst und die Schritte der Evolution beginnen von neuem.

Letztendlich lässt sich sagen, dass man unter Evolution das Entstehen, Erhalten und Vergehen von Arten versteht, welche von einem Zusammenspiel der Evolutionsfaktoren bedingt sind.⁸

⁶ Weber, 2010, S. 28/30

⁷ Kohl, 15.04.15, TUM

⁸ <http://www.janina-baer.de/downloads/paper.pdf>

3. Der Evolutionäre Algorithmus

3.1 Funktionalität

Der Evolutionäre Algorithmus folgt, wie der Name sagt, den strukturellen Abläufen der Evolution beziehungsweise wird der natürliche Evolutionsprozess anhand einiger Abänderungen in die Technik übertragen.

Allgemein ist es hierbei das Ziel, ein Individuum zu optimieren und schrittweise einer Problemlösung anzunähern, die in Form der Abbruchbedingung implementiert wird. Zunächst wird versucht, anhand stochastischer Mittel eine Anfangspopulation von Individuen zu generieren, die den Lösungsanforderungen des Problems schon weitgehend entspricht (*Initialisierung*). Nun werden diese Individuen anhand der Fitnessfunktion getestet und bewertet (*Evaluation*). Solche, die als der Problemlösung näher eingestuft werden, wenn also eine Fitnesssteigerung vorliegt, werden dem nächsten Schritt unterzogen (*Selektion*). Dieser besteht darin, dass letztere Individuen Nachfolger erzeugen, indem sie ihre Gene an die Kinder weitergeben (*Reproduktion*). Dabei ist es das Ziel, wie in der natürlichen Evolution auch, eine möglichst hohe genetische Variabilität und somit mehr mögliche Lösungsansätze zu nutzen.

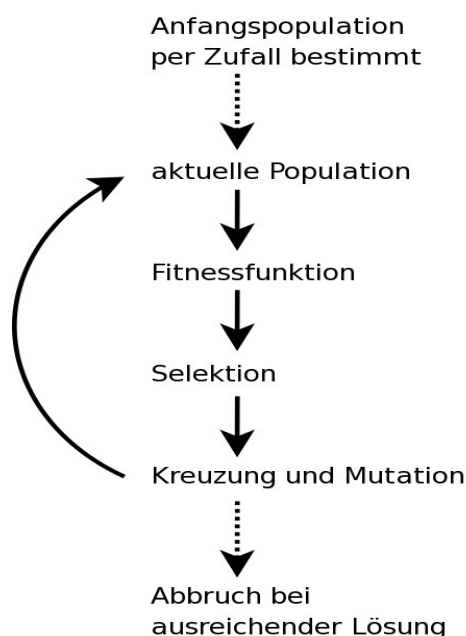


Abb. 6: Graphische Darstellung der sukzessiven Annäherung an die ausreichende Lösung; Repräsentation des iterativen Prinzips des Algorithmus durch den Pfeil.

Dabei kommen wiederum an die Natur angelehnte Operatoren zur Erhöhung der Variabilität zum Einsatz, wobei einzelne Teile des Individuums modifiziert werden.^{9 10} Man unterscheidet hauptsächlich zwischen Mutation, Crossing-over und Rekombination, deren natürliche Prinzipien bereits in 2. (unter dem Stichwort *ungerichtete Variationen*) erläutert wurden. Nun werden diese Schritte (*Initialisierung, Evaluation, Selektion, Reproduktion*) solange wiederholt, bis das Abbruchkriterium, bzw. eine ausreichende Lösung, erfüllt ist.

Durch die enge Anbindung an die biologische Evolution werden beim Evolutionären Algorithmus oft Fachbegriffe aus der Populationsbiologie verwendet, wie etwa Anfangspopulation statt Ausgangswert oder Individuum statt Partialwert.

3.2 Veranschaulichung der Funktionalität des Evolutionären Algorithmus am Beispiel des Mutations-Selektions-Prinzips

Im Folgenden wird der zuvor beschriebene Prozess, dem der Evolutionäre Algorithmus folgt, anhand zweier Optimierungsversuche veranschaulicht und es wird somit die Möglichkeit der praktischen Anwendung desselben dargelegt.

Die Versuche folgen dem Mutations-Selektions-Prinzip, das mit dem Prinzip des Evolutionären Algorithmus nahezu gleichzusetzen ist, und können somit für seine Veranschaulichung genutzt werden. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Mutations-Selektions-Prinzip etwas primitiver aufgebaut ist und, wie die Bezeichnung sagt, nahezu ausschließlich auf den beiden elementaren Hauptfaktoren der Evolution beruht, der zufälligen Variabilität (Mutation) und der Selektion. Dies bietet sich bei der praktischen Umsetzung des Evolutionsgedankens besonders an, da die „moderne synthetische Theorie der Evolution“¹¹ äußerst viele Faktoren kennt, man für „eine künstliche Evolution [...] jedoch nur die wirksamsten Naturprinzipien nachahmen [möchte], damit der Algorithmus noch einfach zu handhaben ist.“¹¹

Zunächst wird das Optimierungsverfahren anhand des Beispiels einer Gelenkplatte im Windkanal veranschaulicht. Hierbei ist es das Ziel, das

⁹ <http://emergenz.hpfsc.de/html/node33.html>

¹⁰ http://www.andreas-dewes.de/en/wp-content/uploads/2012/12/msc_thesis_ba.pdf

¹¹ Rechenberg, 1973, S.19

¹¹ Rechenberg, 1973, S.19

Experimentobjekt anhand des Verfahrens des Evolutionären Algorithmus (in diesem Fall des Mutations-Selektions-Prinzips) in die Form zu bringen, in der es den geringsten Strömungswiderstand bietet.

Für dieses Experiment wurde ein simpler und sehr variabler Widerstandskörper geschaffen, der aus sechs rechteckigen Flächenstreifen besteht, die jeweils an ihren Längskanten gelenkig miteinander verbunden sind. Die fünf Gelenke konnten einzeln in 2° Winkelabständen verstellt werden, womit sich durch 51 Einraststufen pro Gelenk schon eine beachtlich hohe Variabilität von $51^5 = 345\,025\,251$ verschiedenen Formen ergibt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 7 graphisch dargestellt: die Gelenkplatte befindet sich im Strömungskanal, der Luftwiderstand derselben kann anhand eines Messgerätes erfasst werden.

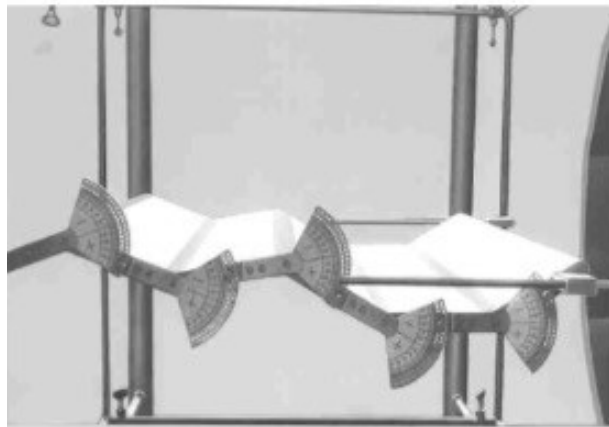


Abb. 7: Versuchsobjekt: Gelenkplatte

Nach jeder Messung wurden zufällige Änderungen an den 5 Gelenken durchgeführt. Ergab die anschließende Messung einen geringeren Widerstand, so wurde die neue Form beibehalten, wurde der Widerstand grösser, wurde sie verworfen. Die erste Optimierungsaufgabe diente zur Kontrolle, ob anhand dieser Methode wirklich die Optimalform gefunden werden kann und welche Anzahl an Schritten dazu benötigt wird. Dazu wurde die Platte parallel zum Luftstrom angebracht und schließlich zu einer Zickzack-Form gefaltet. Die Form des geringsten Widerstandes, eine ebene Platte, die parallel angeströmt wird, wurde durchschnittlich nach 200 Mutationsschritten erreicht. Damit wurde die grundlegende Funktionstüchtigkeit der Evolutionsmethode gezeigt.

Mit demselben Versuchsobjekt wurde nun eine zweite Optimierungsaufgabe durchgeführt. Die Vorgehensweise war dieselbe wie bei der ersten, nur wurde

eine Randbedingung geändert: das vordere Ende der Platte wurde angehoben, sodass sich eine um 14° angestellte, ausgestreckte Plattenform zu Beginn des Experiments ergab. Als Form mit dem geringsten Widerstand ergab sich eine S-förmige Wölbung des Körpers. Den Ablauf des Experiments zeigt Abb. 8. Mathematisch ist es nicht möglich, diese Optimalform zu berechnen, woraus sich der Nutzen der evolutionsbionischen Vorgehensweise ergibt.

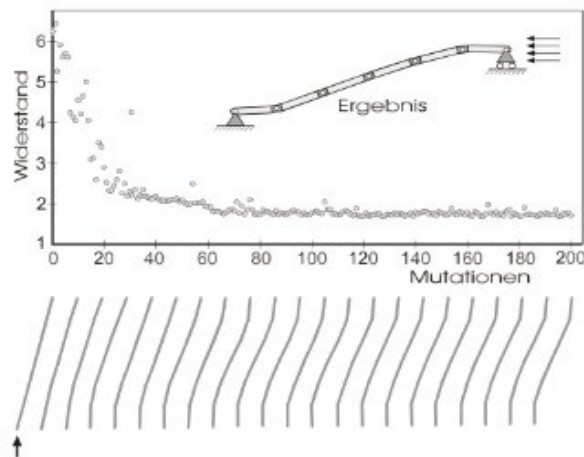


Abb. 8: Verlauf der Optimierung der schräg angeströmten Gelenkplatte

Das vorangegangene Beispiel wurde gewählt, um den praktischen Ablauf einer solchen Optimierung aufzuzeigen und das theoretische Prinzip zu verdeutlichen. Jedoch weist es kaum einen realen Nutzen in der Praxis auf.

Deshalb folgt nun ein zweiter Versuch, in dem von H.P. Schwefel eine Zweiphasen-Überschalldüse optimiert wurde. Diese findet ihre praktische Anwendung als essentielles Teilstück eines Kleinkraftwerkes für Raumfahrzeuge.

Die spezifische Funktionalität der Düse ist für diese Arbeit nur dahingehend von Bedeutung, dass sie aufgrund komplexer Strömungsverhalten innerhalb des Objekts einer besonderen, nicht berechenbaren Optimalform bedarf. Deshalb zeigt sich hier der praktische Nutzen des Evolutionsgedankens in der Technik. Der Versuchsaufbau dieses Experiment ähnelt bezüglich der Grundstruktur der ersten: auch hier wurde ein Versuchsobjekt mit hoher Variabilität geschaffen, nur dass hier „die rotationssymmetrische Düsenform aus [330] Segmenten zusammengesetzt“¹² wurde.

Dementsprechend ließen sich mehr als 10^{60} unterschiedliche funktionstüchtige

¹² Rechenberg, 1973, S. 34

Düsenformen zusammenstellen. Gesucht war die Düse mit dem optimalen Querschnitt, also der höchsten Effizienz. Der Ablauf des Optimierungsvorgangs ist in Abb. 9 dargestellt, wobei als Ausgangsform eine standardmäßige Lavaldüse gewählt wurde (Form 0 in Abb. 9).

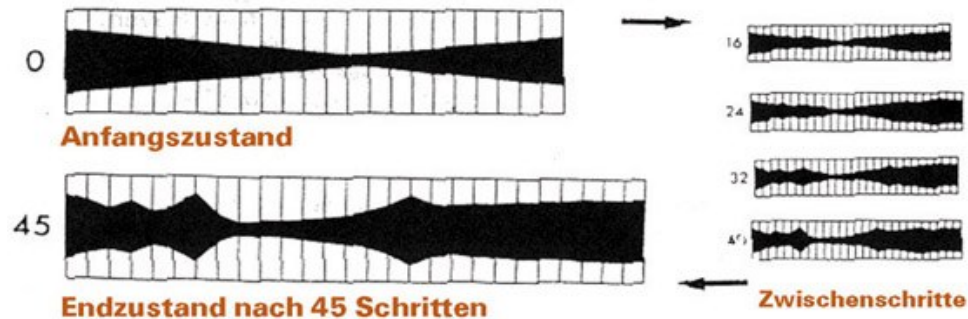


Abb. 9: Entwicklung des Optimierungsvorgangs von der Lavaldüse (Form 0) zum Endzustand (Form 45) mit einigen Zwischenschritten.

Nach jeder Messung wurden zufällige Veränderungen einerseits an der Form und andererseits an der Anzahl der Segmente durchgeführt. Letzteres lässt sich mit der Gen-Duplikation bzw. Gen-Deletion beim natürlichen Evolutionsvorgang vergleichen. Wie beim vorigen Experiment mit der Gelenkplatte wurden auch hier neu entstandene Formen des Objektes nach ihrer Effizienz bewertet und selektiert. Das Ergebnis ist eine „völlig unerwartete Düsenbestform“¹³ (Form 45 in Abb. 9), die eine Steigerung des Wirkungsgrades von 55% auf 80% aufweist. Damit zeigt sich endgültig der praktische Nutzen der Optimierung nach der Evolutionsstrategie.¹⁴

3.3 Vor- und Nachteile des Evolutionären Algorithmus

3.3.1 Vorteile

Der elementarste Vorteil des Evolutionären Algorithmus liegt in der Tatsache, dass für eine Optimierung nur sehr wenig Basis- bzw. Problemwissen vorhanden sein muss. Diese kann also auch durchgeführt werden, wenn erst wenige Faktoren oder Parameter im gegebenen Sachzusammenhang bestimmt worden sind, was das Verfahren des Evolutionären Algorithmus besonders für

¹³ Rechenberg, 1973, S. 36

¹⁴ Rechenberg, 1973, S. 25-36.

weitgehend unerforschte Teildisziplinen der Wissenschaft wertvoll macht, wie etwa für die Energiegewinnung in der Raumfahrt. Dieses, unter Kapitel 3.2 behandelte, von H. P. Schwefel durchgeführte Experiment zeigt den Vorteil: Es gelang, eine bedeutende Steigerung der Effizienz der Düse zu erreichen trotz unbekannter Gradienten und durch die alleinige Anwendung des Evolutionären Algorithmus. Es lässt sich sagen, dass es grundsätzlich als einziger Voraussetzung der Möglichkeit der Vergleichbarkeit und der Bewertung verschiedener Lösungen bedarf. Dadurch ist das evolutive Prinzip der Selektion und somit das des Evolutionären Algorithmus bereits anwendbar. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Evolutionäre Algorithmus angewandt werden kann, wenn herkömmliche Optimierungsverfahren versagen: wenn „Voraussetzungen wie Linearität, Stetigkeit, Differenzierbarkeit, usw. der zu optimierenden Funktion[en]“¹⁵ nicht gegeben sind, der Problemverlauf also nicht vorhersehbar ist. Auch dies lässt sich am Beispiel des Experiments von H. P. Schwefel zeigen: am Ende, wie in Abb. 9 erkennbar, ergab sich eine stark inkontinuierliche Düsenform im Vergleich zur Ausgangsform des Objekts (s. ebenfalls Abb.9). Hinzu kommt, dass beim evolutionären Verfahren immer eine parallele Suche nach Lösungen anhand mehrerer, verschiedener Individuen, erfolgt. Somit ist auch ein breiteres Spektrum an Problemlösungen vorhanden, mit dem weitergearbeitet werden kann. All diese Vorteile machen den Evolutionären Algorithmus besonders universell einsetzbar und damit sehr nützlich für verschiedenste Teilgebiete der Wissenschaft.

3.3.2 Nachteile

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, besteht der größte Nachteil des Evolutionären Algorithmus in der sehr langen Rechenzeit bzw. einem hohen materiellen Aufwand. Dies erschließt sich aus dem Funktionsprinzip: der Schritt der Erzeugung neuer Individuen einer neuen Generation ist meist sehr aufwändig und muss meistens viele Male wiederholt werden, um eine akzeptable Problemlösung erreichen zu können. Wie zuvor erwähnt benötigte Ingo Rechenberg bei seinem ersten Versuch mit der Gelenkplatte etwa 200

¹⁵ <https://www-old.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-Kleine-Buening/files/ws10/pg-agents/seminar/SeminarWybranietz.pdf>

Mutationsschritte, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Noch deutlicher wird der Arbeitsaufwand beim Versuch der Optimierung der Überschalldüse von H. P. Schwefel. Nur für dieses Experiment musste ein „heizölgefeuerter *Babcock*-Dampfkessel [...] mit einer Dampfleistung von 5 Tonnen pro Stunde“¹⁶ betrieben werden. Dies war äußerst kostenintensiv, weshalb die Anzahl der Experimente stark eingeschränkt werden musste. In diesem Punkt unterliegt der Evolutionäre Algorithmus klar anderen, für bestimmte Bereiche entwickelten Verfahren, weshalb er in solch spezifizierten Gebieten selten zum Einsatz kommt.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass oft nicht die optimale Lösung des Problems gefunden wird. „Dies passiert, wenn die Chromosomen der Population sich einem lokalen Optimum der Zielfunktion nähern und die genetischen Operatoren nicht ausreichend starke Änderungen hervorbringen, um die suboptimale Lösung zu überwinden.“¹⁷

Es wird also nicht das globale, sondern nur das lokale Maximum (Optimum) erreicht (in Abb. 10 handelt es sich um ein globales Randmaximum).

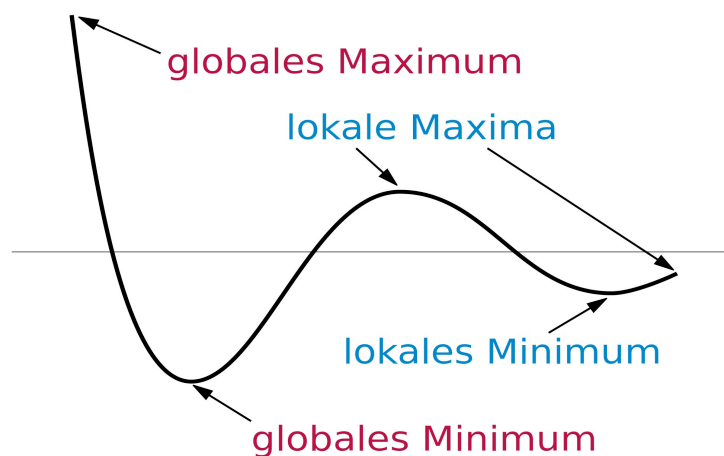


Abb.10: Funktion mit lokalem und globalem Maximum

Dies kann, wie im Zitat erwähnt, passieren, wenn die Operatoren (Mutation, Rekombination) keine genügend wirkungsvollen Veränderungen am Experimentobjekt bewirken, um über das lokale Optimum hinauszugelangen.

Ein weiterer Grund dafür ist ein zu unpräzises oder meistens zu hoch

¹⁶ Rechenberg, 1973, S.36

¹⁷ http://www-e.uni-magdeburg.de/harbach/genetische_algorithmen/genetische_algorithmen.pdf

angesetztes Abbruchkriterium. Oft haben Funktionen auch lokale Maxima, wie in Abb.10 erkennbar. Werden nun die Schritte beim Ablauf des Evolutionären Algorithmus sukzessive ausgeführt, durch ein fehlerhaft gewähltes Abbruchkriterium jedoch nicht oft genug, so kann ein lokales Maximum für ein globales gehalten werden. Somit besteht die Gefahr, dass Lösungen entstehen, die deutlich unter dem erreichbaren Bestwert liegen.^{15 17}

Zusammenfassend bringt der Evolutionäre Algorithmus Vorteile wie wenige nötige Voraussetzungen, Funktionstüchtigkeit bei Nichtlinearität und Diskontinuität und ein breites Spektrum an Problemlösungen mit sich. Andererseits weist er auch nachteilige Merkmale auf, etwa einen hohen zeitlichen und materiellen Aufwand und einen Abbruch der Lösungssuche bei lokalen Maxima. Deshalb wird er vor allem in neuen, noch weitgehend unbekannten Bereichen der Technik eingesetzt.

3.4 Strategie – nicht Glück

Mutationen und Rekombinationen und somit ein wesentlicher Teil der Evolution sind in der Natur, damit auch bei der Anwendung in der Technik, immer ungerichtet. Das heißt, diese Mechanismen laufen rein nach dem Zufallsprinzip ab. Somit kann der Anschein erweckt werden, dass der evolutive Prozess einem reinen Zufallswurf gleicht, was dessen Effizienz stark infrage stellt.

Um dies zu widerlegen, lässt sich ein unter Gegnern des Evolutionsgedankens weiträumig verwendetes Beispiel heranziehen. Dieses besagt, evolutionsbiologische Vorgänge seien derart ineffizient und zufälliger Natur, dass sie mit der Aufgabe vergleichbar sind, von einem Affen zu erwarten, dass er durch willkürliches Tippen auf einer Schreibmaschine den Wortlaut eines Werks (z.B. Hamlet) von Shakespeare träfe. Die mit diesem Experiment verbundenen Wahrscheinlichkeiten lassen sich an einem Zahlenbeispiel veranschaulichen.

Dazu geht man von einem idealisierten Versuchsaufbau aus, bei dem die Wahrscheinlichkeit des Tippens jedes einzelnen Buchstaben gleich groß ist und

¹⁵ <https://www-old.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-Kleine-Buening/files/ws10/pg-agents/seminar/SeminarWybranietz.pdf>

¹⁷ http://www-e.uni-magdeburg.de/harbach/genetische_algorithmen/genetische_algorithmen.pdf

außerdem unabhängig von dem davor getippten Buchstaben. Somit ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von $1/26$ für jeden beliebigen Buchstaben. Die Wahrscheinlichkeit des besagten Ereignisses steigt nun exponentiell an und da das gesamte Werk „Hamlet“ über 130.000 Buchstaben enthält, ergibt sich eine Chance von $1 : 26^{130.000}$, was etwa $1 : 3,4 \times 10^{183.946}$ entspricht. Eine Zahl so unfassbar klein, dass sie sich jeglicher Vorstellung in menschlichen Bezügen entzieht: Selbst wenn das gesamte sichtbare Universum mit tippenden Affen so groß wie Atome gefüllt wäre, die bis ans Ende des Universums tippen würden, wäre die Chance, das Werk von Shakespeare zu erhalten, immer noch viel kleiner als $1 : 10^{138.000}$.¹⁸ Wenn dieses Experiment nun mit den Vorgängen der Evolution vergleichbar ist, wie können dann anhand rein zufälliger Mechanismen solch höchst komplexe Organismen und Strukturen wie etwa das genetische Codierungsprinzip oder der menschliche Stoffwechselkreislauf entstehen? Als Erklärung gibt es einen wesentlichen Unterschied zwischen dem Aufbau des genannten Versuchs und dem Prinzip der Evolution bzw. des Evolutionären Algorithmus: Bei dem Experiment wird bei keiner der getippten Zeilen die vorangegangene berücksichtigt.

Beim Evolutionären Algorithmus hingegen kommen zusätzlich zum unkontrollierten „Tippen“ die Mechanismen der Bewertung (Evaluation) und der Selektion hinzu. Bei der Anwendung auf das Beispiel bedeutet dies: Als Ausgangssituation wird eine zufällig geschriebene Zeile verwendet, woraufhin nur wenige Buchstaben verändert werden. Ergibt sich danach eine größere Übereinstimmung mit dem gewollten Zitat, so nimmt man diese Zeile als Basis für die nächste Änderung, steigt die Übereinstimmung nicht, so wird wieder mit der ersten Zeile weitergearbeitet. Damit nähert man sich iterativ der Lösung. Übertragen auf die Evolution in der Natur verdeutlicht dies, wie Individuen sich schrittweise an die Umgebung anpassen.¹⁹ Die Wichtigkeit dieser vorteilhaften Strategie für die Entwicklung hoch komplexer biologischer Formen wird noch klarer, wenn man betrachtet, dass das menschliche Genom über weitaus mehr Parameter verfügt als ein Stück Shakespeares Buchstaben hat.

Es lässt sich also sagen, dass das evolutive Prinzip mit seinen Bezügen und Relationen zwischen den einzelnen Schritten und der Bewertung und Selektion der Individuen einem Zufallswurf klar gegenübersteht.

¹⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Infinite-Monkey-Theorem>

¹⁹ <http://www.janina-baer.de/downloads/paper.pdf>

3.5 Molekulare Evolution

Die molekulare Evolution stellt eine weitere Anwendungsmöglichkeit des evolutiven Prinzips in der Wissenschaft dar.

Das Ziel besteht darin, anhand des Evolutionsmechanismus unter Laborbedingungen bestimmte DNA-Sequenzen zu entwickeln und zu selektieren, die für eine gewünschte Eigenschaft in einem Organismus codieren. Das heißt, man versucht eine neue biologische Funktion einer DNA-Sequenz zu finden, die in der natürlichen DNA nicht enthalten ist. Dies variiert von Projekt zu Projekt und inkludiert alles von der Optimierung einer vorhandenen Funktion der DNA, einer neuen Funktion, die bisher nie bekannt war, bis zur Anwendung solcher Funktionen in der Therapeutik.

Da ich mich bei diesem Punkt auf englischsprachige Quellen beziehe, möchte ich die Fachbegriffe auch dementsprechend einfließen lassen. Der molekularen Evolution liegen drei Schritte zugrunde, die bis zum Erreichen des erwünschten Ergebnisses iterativ wiederholt werden. Diese sind stark an der Funktionalität des Evolutionären Algorithmus angelehnt: *diversification* (Abwechslung, Variabilität), *selection* (Selektion) und *amplification* (Verbreitung, Verstärkung).

DIVERSIFICATION, also Variabilität, ist in der Natur ein sehr langsam fortschreitender Prozess, da Mutationen hauptsächlich durch Fehler bei der Replikation von DNA oder durch einen Einfluss von mutagenen Substanzen auftreten, und diese Veränderungen nur selten tatsächliche Auswirkungen auf den Organismus haben. Deshalb erfolgt Evolution in der Natur in sehr großen zeitlichen Maßstäben, dem jedoch lässt sich in einem Labor entgegenwirken. Dies geschieht, indem bestimmte DNA-Sequenzen synthetisiert werden oder indem man unter anderem die sogenannte error-prone DNA Polymerase-Kettenreaktion einsetzt, „bei der die natürliche Fehleinbaurate der zur Amplifikation verwendeten DNA-Polymerase erhöht wird.“²⁰ Verfügt man nun über einen diversifizierten Genpool, kann man zum nächsten Schritt, der Selektion, übergehen.

Hierbei bieten sich zwei verschiedene selektive Methodiken an. SELECTION und SCREENING. Selection, also die Selektion, wie sie in der Natur auftritt, bietet den enormen Vorteil eines sehr geringen menschlichen Aufwands. Es

²⁰ <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/error-prone-pcr/22413>

werden einfach bestimmte DNA-Sequenzen in einzelne Bakterien eingesetzt, sodass diese Bakterien die entsprechenden phänotypischen Ausprägungen der jeweiligen Sequenz aufzeigen. Nun setzt man diese Bakterien einem selektiven Druck aus, sodass, einfach gesagt, die gewünschte genetische Eigenschaft mit einfachem Überleben verbunden ist. Beispielsweise setzt man einen Pool von Bakterien dem Druck eines Antibiotikums aus, und diejenigen Bakterien mit der geeigneten Mutation, das Antibiotikum zu überleben, werden auf natürliche Weise selektiert. Jedoch taucht bei dieser Methode ein eklatanter Nachteil auf: Setzt man einen Pool von Bakterien einem bestimmten Druck aus, um ein gewünschtes DNA-Molekül zu selektieren, so überleben Bakterien sehr häufig auf eine Art, die man vorher nicht antizipiert hat, also ohne das gesuchte Molekül phänotypisch auszuprägen. Deshalb bedarf es bei selections immer weiterer Prüfungen des Ergebnisses und einer überaus gründlichen Durchführung. Bei einem gegebenen Genpool geringeren Umfangs bietet sich aus diesem Grund das screening an, bei dem jedes einzelne Molekül separat untersucht wird. Dadurch sinkt die Möglichkeit des Auftretens falscher Lösungen stark, jedoch können größere Anzahlen an Sequenzen aufgrund des hohen Arbeitsaufwands nicht selektiert werden.

Wenn man nun ein geeignetes Molekül gefunden hat, das für eine gewünschte Eigenschaft des Organismus codiert, muss dieses vervielfacht bzw. optimiert werden (AMPLIFICATION). Dieser Schritt dient als Startpunkt für die nächste Runde, in der die drei Schritte erneut wiederholt werden. Diese Wiederholung ermöglicht die Bewertung und das Testen von weitaus mehr Kombinationen, als es nur nach einer Runde gegeben wäre, man kann das gesuchte Ergebnis also weitaus besser optimieren. Dieser zyklische Ablauf ist in Abb. 11 dargestellt.

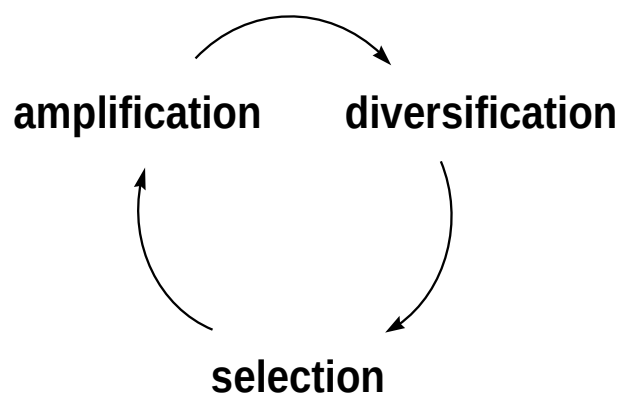


Abb. 11: Schematischer Ablauf der molekularen Evolution

Jedoch weist auch die molekulare Evolution in ihrer Umsetzung einen für den evolutionären Algorithmus typischen Nachteil auf (s. 3.3.2). Meist werden nur zwei bis drei Runden durchgeführt, weil das Experiment sonst sehr kostspielig und unhandlich wird, somit lässt sich also nur in seltenen Fällen das optimale Molekül finden.^{21 22}

Die molekulare Evolution bietet also eine weitere Anwendungsmöglichkeit evolutionärer Algorithmen und zeigt vor allem das weitreichende Spektrum der Evolutionsbionik, das von der Raumfahrt bis in die Molekularbiologie reicht.

4. Die Natur als Evolutionärer Algorithmus

„Auf der Erde hat über einige Milliarden Jahre ein riesiges Experiment stattgefunden: Die Evolution hat dadurch die optimalsten Ergebnisse entwickelt, Ingenieure lernen davon und nutzen dieses Prinzip der Evolutionsbionik.“²³ So beschreibt Bernd Joschko, ein Mitbegründer der Evolutionsbionik in Deutschland, den fortwährenden Vorgang der Evolution und dessen Nutzen. Aufgrund der nahen Verwandtschaft bezüglich des systematischen Ablaufs von Evolution und evolutionärer Algorithmen kann die Natur selbst als ein uralter Evolutionsalgorithmus angesehen werden, der mit dem ersten Leben auf dieser Erde begann und sein Ende erst mit dem Ende des Lebens auf dem Erdball finden wird.

4.1 Grund für den Erfolg der Bionik

Wie es Bernd Joschko im obigen Zitat formuliert, hat die Evolution die „optimalsten Ergebnisse“ bezüglich der Anpassung an gegebene Umweltbedingungen entwickelt. Der Grund für den hohen Grad dieser Anpassung bzw. dafür, dass die Ergebnisse bis hin zum Optimum entwickelt wurden, liegt vor allem in den unmenschlichen zeitlichen Maßstäben der Evolutionsgeschichte. Man kann also allgemein sagen, dass die Natur anhand der Mechanismen der

²¹ Esvelt, K., Carlson J., Liu D., 2011, S.499-503

²² Kehayova, 2006

²³ <http://www.bernd-joschko.de/psychobionik-kurz.html>

Evolution über einen Zeitraum, der menschlichen Bezügen völlig entweicht²⁴, bestmögliche Lösungen für Probleme unterschiedlichster Formen entwickelt hat. Ein für Menschen undenkbarer Arbeitsaufwand. Und hier liegt auch der Grund für den Erfolg der Bionik in der Technik: Der Mensch braucht nur die Arbeit, die die Natur über Jahrmilliarden vollbracht hat, für sich zu nutzen, indem er schlichtweg die Problemlösungen der Natur in seine Alltagswelt überträgt. Somit lassen sich Alltagsleben sowie Anliegen der Forschung ungemein erleichtern und dies anhand oft extrem ausgefallener Lösungen, auf die Wissenschaftler niemals von selbst gekommen wären oder zumindest nicht mit so äußerst geringem Aufwand. Dies zeigt nun die Grundlage für den besonderen Nutzen aller bionischer Verfahren. Das Prinzip des Kopierens von der Natur lässt sich also auf alle Teilgebiete der Bionik übertragen, weshalb ich im anschließenden letzten Kapitel einige Beispiele für die Vorteile von Errungenschaften der Bionik im Alltagsleben und in der Technik darlegen will.

4.2 Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten aus verschiedenen Bereichen der Bionik

Das vorangegangene Kapitel zeigt die Grundlage für den besonderen Nutzen aller bionischer Verfahren. Das Verfahren der Nachahmung der Natur lässt sich also auf alle Teilbereiche der Bionik übertragen, weshalb ich in diesem letzten Kapitel einige Beispiele für die Vorteile von Errungenschaften der Bionik im Alltagsleben und in der Technik darlegen will. Um in diesem Sinne dem mannigfaltigen Spektrum bionischer Teilbereiche gerecht zu werden, wird je ein Beispiel aus der Struktur-Bionik (4.2.1), der physiologischen Bionik (4.2.2) und aus der allgemeinen Neurobionik (4.2.3) herangezogen.

4.2.1 Termitenbauten als Beispiel für bionische Klimatisierungs- und Beheizungsprobleme

Als Beispiel der Strukturbionik betrachte man die Kompass-Termiten Australiens. Diese Insektenarten verfügen über ein strukturell raffiniertes System zur Klimatisierung ihrer Bauten. Einerseits wird die Temperaturregelung durch eine günstige meridionale Ausrichtung des Baus gesichert. Die

²⁴ Zur symbolischen Verdeutlichung: Die Evolution findet seit ca. 300 Millionen Menschenleben statt

Sauerstoffversorgung innerhalb des Baus erfolgt anhand senkrechter Kühlrippen. Die in den Brutkammern erwärmte und sauerstoffarme Luft steigt durch kaminartige Züge in höher gelegene Räume und sinkt schließlich über die Kühlrippen wieder ab, wodurch eine kontinuierliche und abgeschlossene Luftzirkulation innerhalb des Baus gewährleistet wird. Beim Absinken der Luft wird diese durch die poröse Außenhaut mit O₂ angereichert und gibt gleichzeitig CO₂ ab. Damit wird die Sauerstoff- und Temperaturregelung ohne jeglichen Aufwand sichergestellt. Diese Prinzipien könnten bei menschlichen Hochbauten durchaus das kostenträchtige Ventilationssystem ablösen, was neben dem finanziellen auch einen hohen ökologischen Nutzen hätte.

4.2.2 Winglets in der Flügeltechnik

Die physiologische Bionik orientiert sich an organismischen Lebensvorgängen und behandelt Funktionsmechanismen wie Transport, Substanz- und Wärmeaustausch und Fortbewegung. Im Speziellen möchte ich auf ein der Flugbionik zugeordnetes Beispiel eingehen. Die sogenannten „Winglets“ werden heute in der Flugzeugindustrie häufig gebraucht: Diese besonders effiziente Tragflügelform ist von den charakteristischen Spreizflügeln vieler Greifvögel abgeleitet. Der Nachteil herkömmlicher Flugzeugtragflächen besteht darin, dass durch die seitlichen Umströmungen ein Luftwirbel-„Zopf“ entsteht, der einen zusätzlichen Widerstand erzeugt und somit „eine Minderung des Vortriebs durch die Triebwerke um etwa 30%“²⁵ verursacht. Die Flügelenden von Greifvögeln hingegen sind aufgefingert, die sogenannten „Handfittiche“ können unterschiedlich weit gespreizt werden (s. Abb. 12).



Abb. 12/13: Links: aufgespreizte Flügelspitzen beim Kondor. Rechts: Winglets bei einem Passagierflugzeug.

²⁵ Zerbst, 1987, S. 170

Zwar entstehen auch bei diesen Tragflächenenden Randwirbel, diese sind jedoch kleiner und verteilen sich durch die Spreizung so, dass sich die einzelnen Wirbel nicht mehr zu einem Luftwirbel-“Zopf“ vereinigen. Somit ist der Widerstand weitaus geringer als bei einem kompakten Einzelwirbel, was unter anderem einen geringeren Kraftstoffverbrauch zur Folge hat.

4.2.3 Elektrostimulation zur Unterstützung der menschlichen Atmung

Die Neurobionik behandelt im besonderen Analogien zwischen Biologie und Technik bezüglich der Aufnahme, Behandlung, Speicherung und Verwertung von Informationen und sucht darauf basierend Problemlösungen in der Technik. Es wird sozusagen der Organismus Mensch oder ein Teil desselben kopiert und diese Prozesse werden in die Technik umgesetzt, um sie wiederum beim Menschen selbst anzuwenden. Dies geschieht beispielsweise nach einer Störung der Atemfunktion durch eine Verletzung des Rückenmarks, die meist im bewussten oder schlafenden Zustand des Betroffenen eintritt. Die Atmung wird durch geeignete Sensoren überwacht. Setzt sie aus, wird ein spezieller Schrittmacher aktiviert, der die Atemmuskulatur in nahezu normalem Rhythmus anregt. Das geschieht anhand bipolarer Elektroden, die an betroffenen Nerven (in diesem Fall den Zwerchfellnerven Nn. phrenici) angelegt werden und diese mit bestimmten Impulssalven stimulieren. So kann der lebensbedrohliche Zustand einer Disfunktion der Atmung während des Schlafes beseitigt werden.²⁶

Die genannten Beispiele mit ihren kurzen Vorstellungen einzelner Themengebiete zeigen die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Bionik sowie die weitreichende Präsenz bionischer Vorgehensweisen in Wissenschaft und Technik.

²⁶ Zerbst, 1987, S. 121 f., S. 170 f., S. 192

5. Fazit

Zusammenfassend birgt die Evolutionsbionik eine Vielfalt neuer Möglichkeiten gerade als Optimierungsstrategie in der Technik und hat sich schon jetzt klar im weiten Spektrum wissenschaftlicher Methodiken etabliert. Trotz potenzieller langer Rechenzeiten oder einem hohen Arbeitsaufwand bietet der Evolutionäre Algorithmus die Möglichkeit des Hervorbringens verschiedener, beinahe optimaler Lösungen unter sehr wenigen Voraussetzungen und dies auch wenn herkömmliche Verfahren aufgrund nicht vorhersagbarer Problemverläufe versagen. Dabei ist der Evolutionäre Algorithmus aufgrund seines strukturellen Aufbaus von einem Zufallswurf weit entfernt und ermöglicht eine Anwendung in verschiedensten wissenschaftlichen Teilbereichen, so z.B. auch in der Molekularbiologie und Medizin. Wenn man die Natur selbst als einen Evolutionären Algorithmus betrachtet erhält man eine Erklärung für den besonderen Erfolg der Bionik in der Wissenschaft, da dieses Prinzip auf alle Teilbereiche der bionischen Variationsbreite übertragen werden kann. Hierzu möchte ich jedoch noch einen grundlegenden Unterschied zwischen der Evolutionsbionik und anderen Gebieten der Bionik darlegen. Während sich nahezu alle Bereiche der Bionik auf unterschiedlichster Weise verschiedener, über Jahrmillionen von der Evolution geformter Strukturen und Prozesse bedienen und diese in die Technik umsetzen, so nimmt sich im Gegensatz die Evolutionsbionik keiner bestimmten Einzelheit an, sondern dem Prozess der Evolution selbst. Und dies ist allem Voran keine schlechte Idee, wenn man bedenkt, dass das grundlegende Prinzip der Evolution seit dem Urknall nicht von jeglichen anderen strukturellen Abläufen abgelöst wurde. Die Evolution an sich muss allein aus diesem Grund äußerst effizient und gewinnbringend sein, was sich die Evolutionsbionik in raffinierter Weise zu Nutze macht. Wie es Dobzhansky 1973 formulierte: „*Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution*“¹ gilt es heute immer noch, jedoch wohl mit dem Unterschied, dass sich dies nicht nur auf die Biologie, sondern auf die gesamte Bandbreite wissenschaftlicher Disziplinen übertragen lässt.

¹ Dobzhansky, 1973, S. 125-129

6. Literaturverzeichnis

6.1 Bücher und Zeitschriften

- 1:** Dobzhansky, T., The American Biology Teacher, Band 35, 1973, S. 125–129
- 2:** Hartmann, C., „Simulierte Evolution“: Ein Lösungsansatz für Formfindungsprobleme?, München, 1996, S.19
- 3:** Weber, U., Fokus Biologie, Berlin, Cornelsen Verlag, 2010, S. 10
- 4:** Weber, U., Fokus Biologie, Berlin, Cornelsen Verlag, 2010, S. 10
- 5:** Weber, U., Fokus Biologie, Berlin, Cornelsen Verlag, 2010, S. 11
- 6:** Weber, U., Fokus Biologie, Berlin, Cornelsen Verlag, 2010, S. 28/30
- 7:** Kohl, T., Einführung in die Bionik; Biologie im Überblick; 15.04.2015, Technische Universität München, Raum BC2 0.01.17
- 11:** Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie, Stuttgart-Bad Cannstatt, Verlag Frommann-holzboog, 1973, S. 19
- 12:** Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie, Stuttgart-Bad Cannstatt, Verlag Frommann-holzboog, 1973, S. 34
- 13:** Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie, Stuttgart-Bad Cannstatt, Verlag Frommann-holzboog, 1973, S.36
- 14:** Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie, Stuttgart-Bad Cannstatt, Verlag Frommann-holzboog, 1973, S. 25-36
- 16:** Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie, Stuttgart-Bad Cannstatt, Verlag Frommann-holzboog, 1973, S. 36
- 21:** Esvelt, K., Carlson J., Liu D., A system for the continuous directed evolution of biomolecules, in: Nature, 2011, Nr.472, S. 499-503

22: Doktorarbeit, Polina Kehayova, 2006, Harvard University, Chemistry,
Faculty of Arts and Sciences

25: Zerbst, E.: Bionik, Teubner, Stuttgart, 1987, S. 170

26: Zerbst, E.: Bionik, Teubner, Stuttgart, 1987, S. 121 f., S. 170 f., S. 192

6.2 Internetseiten

8: <http://www.janina-baer.de/downloads/paper.pdf>
(aufgerufen am 31.08.2015)

9: <http://emergenz.hpfsc.de/html/node33.html>
(aufgerufen am 08.09.15)

10: http://www.andreas-dewes.de/en/wp-content/uploads/2012/12/msc_thesis_ba.pdf
(aufgerufen am 16.09.15)

15: <https://www-old.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-Kleine-Buening/files/ws10/pg-agents/seminar/SeminarWybranietz.pdf>
(aufgerufen am 12.10.15)

17: http://www-e.uni-magdeburg.de/harbach/genetische_algorithmen/genetische_algorithmen.pdf
(aufgerufen am 14.10.15)

18: <https://de.wikipedia.org/wiki/Infinite-Monkey-Theorem>
(aufgerufen am 25.10.15)

19: <http://www.janina-baer.de/downloads/paper.pdf>
(aufgerufen am 31.08.15)

20: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/error-prone-pcr/22413>
(aufgerufen am 04.11.15)

23: <http://www.bernd-joschko.de/psychobionik-kurz.html>
(aufgerufen am 10.10.15)

7. Quellenverzeichnis

Abb.1: [https://de.wikipedia.org/wiki/Carl_von_Linné#/media/File:Carolus_Linnaeus_\(cleaned_up_version\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Carl_von_Linné#/media/File:Carolus_Linnaeus_(cleaned_up_version).jpg) (aufgerufen am 3.11.15)

Abb. 2: Kohl, T., Einführung in die Bionik; Biologie im Überblick; 15.04.2015, Technische Universität München, Raum BC2 0.01.17

Abb. 3: Kohl, T., Einführung in die Bionik; Biologie im Überblick; 15.04.2015, Technische Universität München, Raum BC2 0.01.17

Abb. 4: <http://wiki.ifs-tud.de/sbas/ss2013/genalg>
(aufgerufen am 08.09.15)

Abb. 5: Kohl, T., Einführung in die Bionik; Biologie im Überblick; 15.04.2015, Technische Universität München, Raum BC2 0.01.17

Abb. 6: <http://emergenz.hpfsc.de/html/node33.html>
(aufgerufen am 08.09.15)

Abb. 7: <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/skript/bibu2.pdf> Zweiphasen-Drüse
(aufgerufen am 3.11.15)

Abb. 8: <http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/skript/bibu2.pdf> Zweiphasen-Drüse
(aufgerufen am 3.11.15)

Abb. 9: <http://www.bernd-joschko.de/psychobionik-kurz.html>
(aufgerufen am 10.10.15)

Abb.10: https://de.wikipedia.org/wiki/Extremwert#/media/File:Extrema_example_de.svg (aufgerufen am 21.10.15)

Abb. 11: selbst erstellte Graphik

Abb. 12: https://de.wikipedia.org/wiki/Winglet#/media/File:Condor01_ST_98.jpg
(aufgerufen am 1.11.15)

Abb. 13: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CO-Winglet.JPG>
(aufgerufen am 1.11.15)

„Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den.....

Ort

Datum

Unterschrift des Schülers