

Bionik, die Evolution in der Technik

von Roland Steffen

Der Begriff ‚Bionik‘ ist ein Kunstwort und steht für die Methodik aus biologischen Mechanismen und Methoden Lösungen für technische Probleme abzuleiten. Das Wort ‚Bionik‘, oder auf Englisch ‚bionics‘, wurde zum ersten Mal 1960 auf dem Kongress ‚Bionics Symposium Living Prototypes - the key to new technology‘ in Dayton, Ohio, USA, als griffiges Schlagwort benutzt. Seit dem steht ‚Bionik‘ für das Auffinden von technischen Lösungen nach dem Vorbild der Natur. Zuvor war das, was wir heute unter Bionik verstehen, als Biotechnik bekannt. Da die Biotechnik aber heute eher mit der Molekularbiologie und Gentechnologie in Verbindung gebracht wird, hat sich die Bionik als fester Begriff eingebürgert.

Bionik ist kein bloßes Kopieren der Natur, sondern ein systematisches Erforschen der Prinzipien und Mechanismen die hinter biologischen Konstruktionen und Vorgehensweisen stehen. Da sich die biologischen Systeme über Jahrmillionen evolutionär entwickelt und spezialisiert haben, sind sie an ihr Umfeld und Einsatzzweck perfekt angepasst. Genau dieser Punkt macht aber ein einfaches Kopieren der Funktionen zunichte, weil die Technik oft andere Ansprüche stellt als die Biologie. Aus diesem Grund muss vor der Umsetzung aus der Biologie in die Technik die Hintergründe der evolutionären Entwicklung verstanden werden, um aus den gesammelten Erfahrungen eine technische Lösung zu entwickeln.

Diesen fatalen Fehler machte Raoul Heinrich Francé als er nach einer Möglichkeit zum gleichmäßigen ausstreuen von Düngemittel suchte. Als Vorbild nahm er sich die Mohnkapsel (**Abb. 1**). Er dachte, sie müsse ihren Samen ja möglichst gleichmäßig ausstreuen, damit die Pflanzen genug Platz zum wachsen haben und sich nicht selbst im Weg stehen. Dies funktionierte für seine Zwecke wohl so gut, das er einen Salzstreuer nach diesem Prinzip konstruierte und ihn zum Patent anmeldete (welches er auch 1920 bekam). Francé hatte nur einen Fehler gemacht, der Mohn muss zwar die Samen gleichmäßig verteilen, aber gleichzeitig muss er den Samen auch so weit wie möglich wegstreuen. Also wenn man den FRANCÉschen Salzstreuer benutzt, hat der Tischnachbar wahrscheinlich mehr von dem Salz als man selbst. Trotz des kleinen Missgeschickes gilt er als einer der Mitbegründer der Biotechnik, welche wir heute als Bionik kennen.

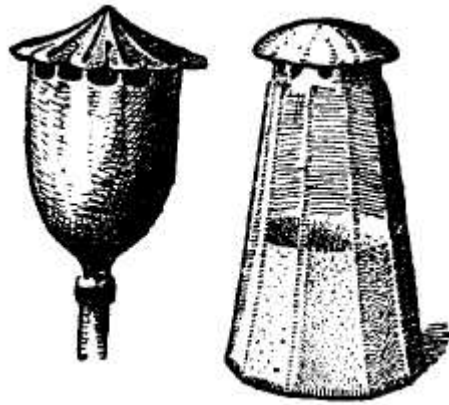


Abb. 1) FRANCÉscher Salzstreuer nach Vorbild der Mohnkapsel [IR]

Bionik ist nicht neu, wie das kleine Beispiel oben bereits gezeigt hat. Zwar wird der Begriff ‚Bionik‘ erst seit 1960 verwendet, aber die Vorgehensweise die dahinter steht ist schon viel älter. Z. B. hat sich Leonardo da Vinci (um 1500) mit dem Vogelflug beschäftigt und festgestellt, dass beim Aufschlagen der Flügel die Luft zwischen den Federn, ohne großen Widerstand, hindurch strömt. Beim Abschlagen schließen sich die Feder wie Klappen, so dass ein Luftpolster unter dem Flügel entsteht, wodurch sich der Vogel in die Luft heben kann (Abb. 2). Folglich schlug er für technische Flügel Klappen aus mit Leinen bespanntem Weidengeflechte vor, was aus heutiger Sicht völlig absurd erscheint aber zur damaligen Zeit nicht anders vorstellbar war. Heute wissen wir, dass es auch anders funktioniert.

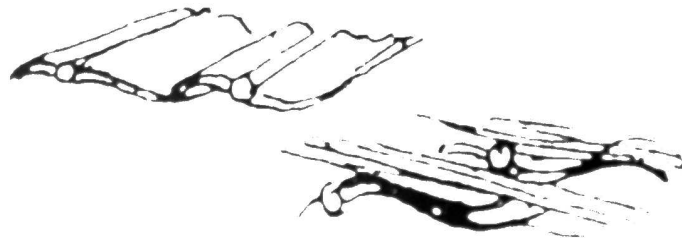


Abb. 2) Federüberlappung und Durchströmung beim Vogelflügel nach Leonardo da Vinci [WN]

Bionik und Technische Biologie sind nicht gleich zu setzen, sonder bauen aufeinander auf. Während die Technische Biologie die Natur mit technischen Prinzipien zu erklären versucht, nutzt die Bionik die so gewonnenen Ergebnisse um technische Lösungen nach dem Vorbild der Natur zu präsentieren. Durch bewusste Überschreitung der Grenzen wird Biologie und Technik zusammengeführt. Um dieses Überschreiten der Grenzen zu ermöglichen, müssen beide Seiten, die Biologen und die Techniker, das kleine Einmaleins des anderen kennen und verstehen. Sonst kann der Dialog zwischen Biologie und Technik, sowie Bionik und Technischer Biologie nicht funktionieren.

Das große Gebiet der Bionik zwingt mich es in 10 Teilgebiete zu zerlegen, die im Folgenden genannt und kurz beschrieben werden. Da mir die Evolution und Optimierung besonders am Herzen liegt, beschränke ich mich im Anschluss auf dieses Gebiet. Auf mehr möchte ich hier nicht eingehen, schließlich will ich kein Buch schreiben. Das haben schon andere getan und wohl auch viel besser als ich es könnte.

1) Materialien und Strukturen

Materialien werden auf biochemische, biophysikalische und Recycling-Aspekte untersucht. Die Materialkomplexe und Verbundwerkstoffen spielen in diesem Teilgebiet genauso mit, wie biokompatibel Materialien und Implantwerkstoffe. Dabei werden Strukturelemente untersucht, beschrieben und verglichen. Auch spezielle und unkonventionelle Materialien sind zu berücksichtigen. Naturentlehnte Strukturen wie z. B. anisotrope Verbundmaterialien und pneumatische Strukturen oder flächenüberspannende Membranstrukturen werden im Hinblick auf ihre Eignung für technische Großausführungen untersucht. Formbildungsprozesse in der Biologie bilden dabei auch unkonventionelle Vorbilder.

2) Formgestaltung und Design

Hierbei geht es um funktionelle und nicht-funktionelle Formgestaltung oder einfach um Bionik-Design. Mit der Form ist hier eine Außenhaut, Hülle oder Verpackung gemeint. In der Natur hat die äußere Hülle immer eine oder mehrere spezielle Funktionen, die mit der Umgebung oder dem Inneren in Zusammenhang stehen. Um nicht nur eine Formähnlichkeit zu erhalten, muss auch immer die Funktion berücksichtigt werden, sonst hat man das Prinzip der Bionik missverstanden.

3) Konstruktionen und Geräte

Zu diesem Gebiet zählen sich Konstruktionsmorphologie und funktionelle Anatomie, allgemeine und angewandte Biomechanik, Konstruktionen, Geräte, Mechatronik, Mikrosysteme und Nanosysteme. Es werden Konstruktions-elemente und Mechanismen aus den Bereichen der Biologischen und technischen Welt analysiert und verglichen. Wie sich die Konstruktionselemente zur funktionierenden Gesamtkonstruktion zusammensetzen, spielt dabei eine große Rolle, wobei auch unkonventionelle Materialeigenschaften wie z. B. partiell unterschiedliche Elastizität wichtig sind.

4) Bau und Klimatisierung

Hierzu zählt das Bauen mit traditionellen Baumaterialien, wie z. B. Ton, mit ihren baubiologisch interessanten Eigentümlichkeiten. Auch natürliche Leichtbaukonstruktionen dienen als Vorbild für temporäre Leichtbauten, hier sind u. a. Seil-, Membran- oder Schalenkonstruktionen zu nennen. Die Ausrichtung des Gebäudes und Verteilung bzw. Aufteilung der Fläche bezüglich Wind- und Sonnenrichtung oder optimaler Flächenausnutzung ist auch ein wichtiges Thema, vor allem im Bezug auf Energieoptimierung. Dazu gehören auch Gesichtspunkte wie passive Lüftung, Kühlung und Heizung.

5) Robotik und Lokomotion

Zu diesem Punkt zählen alle Arten der Bewegung und Fortbewegung, wie z. B. laufen, schwimmen, fliegen oder kriechen. Dabei spielt nicht nur der reine Bewegungsablauf eine Rolle, sondern z. B. auch die Oberfläche des bewegten Körpers im Bezug auf seinen Widerstand dem ihm das Umgebungsmedium in den Weg stellt. Oder auch beim Greifen, hier soll die Oberfläche des Greifers so gestaltet sein, das er mit möglichst wenig Kraft guten Halt hat.

6) Sensoren und neuronale Steuerung

Fragen der Messung physikalischer und chemischer Größen, Ortung und Orientierung in der Umwelt gehören zu diesem Bereich. Wenn man an die Empfindlichkeit und Vielfältigkeit biologischer Sensoren denkt, so wird einem bewusst, dass auf diesem Gebiet noch viel Forschungsarbeit zu leisten ist, um an dieses Niveau heranzukommen. Ein eigenes Fachgebiet hat sich aus der Datenanalyse und Informationsverarbeitung unter Benutzung intelligenter Schaltungen, so genannter „Neuronaler Netze“, entwickelt. Auch die Kopplung von biologischen und technischen Systemen wird zu diesem Gebiet gezählt.

7) Anthro- und biomedizinische Technik

Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine wird immer wichtiger. Die bedienungsfreundliche Gestaltung moderner Cockpits, die den sensorischen Gewohnheiten des Menschen angepasst sind, ist ein gutes Beispiel. Auch die Prothetik zählt zu diesem Gebiet.

8) Verfahren und Abläufe

Von Interesse sind Verfahren mit denen die Natur Vorgänge und Umsätze steuert, z. B. die Herstellung von Wasserstoff durch Fotosynthese ist im Hinblick auf die zukünftige Wasserstofftechnologie sehr interessant. Auch die für uns wohl nie erreichbare Möglichkeit des totalen Recycling, ist in der Natur gang und gäbe. In der Natur gibt es kein Deponiematerial, alles wird wiederverwertet. Dies zeigt uns, dass wir hier von den Verfahren und Abläufen noch wesentliches lernen können. Weitere Punkte sind passive Solarnutzung, Windnutzung, Erdwärme- und Erdkühlenutzung.

9) Evolution und Optimierung

In der Natur sterben nicht optimal an die Umwelt angepasste Lebewesen aus, die ‚besseren‘ überleben, was zu einer immer perfekteren Anpassung führt. Es geht darum komplexe Probleme mit Hilfe der Versuch-Irrtum-Methode zu lösen, d. h. das besser Angepasste überlebt, der Rest wird verworfen. Dazu wurden Evolutionsstrategien aus der Natur entlehnt und dienen dazu technische Probleme optimal zu lösen. Da die Problemstellungen meist mathematisch so komplex sind, dass sie rechnerisch nicht oder nur mit großem Aufwand zu lösen sind, greift man hier auf die Evolutionstechnik zurück.

10) Systematik und Organisation

Die Themen zu diesem Gebiet lauten: Selbstorganisation, Synergetik, Systemtheorie, Umweltökologie, Bioinformatik, Biokybernetik. Auch z. B. das Verhalten von Wirtschaftssystemen.

Die Evolution ist der Motor der Natur und auch das Gebiet welches mich beim Einlesen in das Thema der Bionik vorantrieb. Sie beruht im Wesentlichen auf drei einfachen Prinzipien: Mutation, Rekombination und Selektion. Die Mutationen entstehen durch kleine ungerichtete Veränderungen im genetischen Material, was beim Wachstum und der Entwicklung eines Organismus zu kleinen Veränderungen im Aufbau und Verhalten führt. Bei der geschlechtlichen Fortpflanzung wird das Genmaterial der Eltern zufällig gemischt und auf die Nachkommen verteilt, dieser Vorgang entspricht der Rekombination. Die Selektion ist das prüfende Kriterium, welches entscheidet ob die aktuelle Entwicklung weiter geführt wird oder abbricht. Dies geschieht durch die Summe aller äußeren Einflüsse, z. B. das Klima. Durch die Mutationen gibt es immer Individuen die mit einer Umweltveränderung besser zurechtkommen als andere. Durch die Rekombination wird eine solche Mutation schnell verteilt. Durch die bessere Anpassung wird die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen

Fortpflanzung erhöht und dadurch auch die Chance der Weitergabe einer Mutation.

(Zur heutigen Zeit ist der Mensch wohl der entscheidende Faktor in der Entwicklung vieler Arten. Er rötet schließlich täglich welche aus, aber es passen sich auch täglich Lebewesen an von Menschen geschaffene Lebensbedingungen an.)

Um die ‚natürliche Evolution‘ nachzubilden müssen Mechanismen gefunden werden, die diese drei Aspekte simulieren. Kleine, zufällige Änderungen, die für die gesuchte Eigenschaft oder Funktionalität wesentlichen Größe, werden durchgeführt und geeignet kombiniert und vervielfältigt. Aus dieser Folgegeneration werden die Individuen herausgesucht, die dem Prüfkriterium am besten entsprechen und dienen dann als Eltern für eine neue Folgegeneration. Wird dieses Verfahren angewandt, so wird durch die Generationenfolge eine immer bessere Anpassung an das Prüfkriterium erreicht. Ist das Prüfkriterium so gewählt, dass es eine optimale Lösung darstellt, so nähern sich die Mutationen immer mehr diesem Optimum an.

Man kann die Evolutionsstrategie auch testen, in dem man sie auf ein Problem anwendet auf das man die Lösung kennt. Dabei zeigt sich, dass die Evolution viel effektiver ist als eine reine Zufallssuche. Selbst einfache Algorithmen finden, auch bei mathematisch gut lösbaren Problemen, die schnellere Lösung. Natürlich soll das nicht heißen, dass die Evolutionsstrategie immer effektiver ist als die Mathematik. Auf mathematische Beispiele und Beweise möchte ich verzichten. Hierzu gibt es genügend Literatur.

Die Spielregeln der Evolution von I. Rechenberg stellen Handlungsregeln für die Entwicklung von Algorithmen zu Nachahmung der biologischen Evolution dar. Die im Folgenden erklärten und in der **Abbildung 3** veranschaulichten Spielzeichen reichen aus um sämtliche Möglichkeiten der Evolution durchzuspielen.

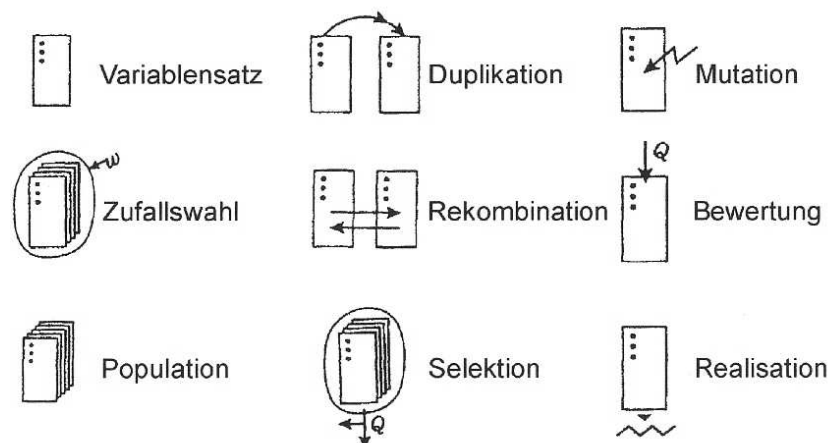


Abb. 3 Spielzeichen für Evolutionsstrategien (nach Rechenberg) [WN]

- Spielzeichen „Variablensatz“: Dieses Zeichen symbolisiert ein Individuum mit seinen Eigenschaften bzw. Variablen.
- Spielzeichen „Population“: Eine Population repräsentiert eine bestimmte Anzahl von Individuen einer Generation. Die Variabilität der Population ist durch die Eigenschaften der Individuen gegeben.
- Spielzeichen „Zufallswahl“: Ein Individuum wird zufällig aus einer Population ausgewählt, wobei die Auswahl mit einer gleichverteilten Wahrscheinlichkeit geschieht. Sind mehrere Populationen abgebildet, bezieht sich die Auswahl auf eine Population.
- Spielzeichen „Duplikation“: Die Eigenschaften des Individuums werden auf ein anderes kopiert. Bezieht sich die Duplikation auf eine Population, dann werden die Eigenschaften der Individuen dieser Population auf die Individuen einer anderen Population übertragen.
- Spielzeichen „Selektion“: Aus einer Population wird eine bestimmte Anzahl von Individuen ausgewählt, die dem geforderten Qualitätskriterium am besten entsprechen. Bezieht sich die Auswahl auf eine Menge von Populationen, so wird eine bestimmte Anzahl von Populationen ausgewählt. Eine Populationsqualität kann größer sein als das Mittel der Individuen-Qualitäten. Das ist z. B. der Fall, wenn sich soziale Verhaltensstrukturen in einer Population bewähren.
- Spielzeichen „Rekombination“: Es können die Variablenwerte zweier oder mehrerer Individuen vermischt werden, auch das Vermischen von Populationen ist möglich. Beim Mischen von Individuen wird zu jeder Variablen ein Wert aus der Gruppe der Individuen zufällig gewählt und dem neuen Individuum zugewiesen. Das Mischen von Populationen geschieht auf eine ähnliche Weise. Aus mehreren Populationen werden solange Individuen ausgewählt bis eine neue Population voll ist.
- Spielzeichen „Mutation“: Die Variablenwerte werden mit einer normalverteilten Wahrscheinlichkeit zufällig verändert. Dabei müssen nicht immer alle Variablen verändert werden. Dabei muss die Mutationsschrittweite optimal gewählt sein.
- Spielzeichen „Realisation“: Dieses Zeichen entspricht dem Fertigen eines Individuums aus seinen Variablenwerten. Die Informationsebene wird verlassen.
- Spielzeichen „Bewertung“: Die Realisation eines Individuums wird auf seine Qualität hin überprüft und sein Qualitätswert gespeichert.

Die Algorithmen von Evolutionsstrategien können jetzt leicht aus den oben genannten Spielregeln zusammengesetzt werden. Ich übernehme die Angaben aus dem Buch „Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler“ von Werner Nachtigall, der die Angaben selbst von I. Rechenberg übernommen hat.

- (1+1)-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 4**). Der Variablensatz eines Elters wird dupliziert. Das erhaltene Duplikat wird mutiert und bewertet. Dann gelangen Elter und Nachkomme in eine Selektionsurne, aus der die qualitätsbeste Datenkarte ausgelesen und zum Elter nachfolgenden Generation erklärt wird.

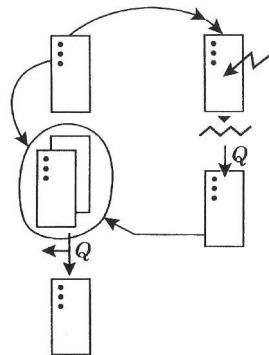


Abb. 4 (1+1)-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Besser als die (1+1)-ES ist die folgende Evolutionsstrategie. Wobei die biologische Wirklichkeit besser wiedergegeben wird.

- (1+5)-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 5**). Der Variablensatz eines Elters wird jetzt 5-mal dupliziert. Die mutierten und nach der Realisation bewerteten Kartenduplikate gelangen zusammen mit der Elternkarte in die Selektionsurne. Hier wird wieder die beste Datenkarte ausgelesen und zum Elter der nachfolgenden Generation erklärt.

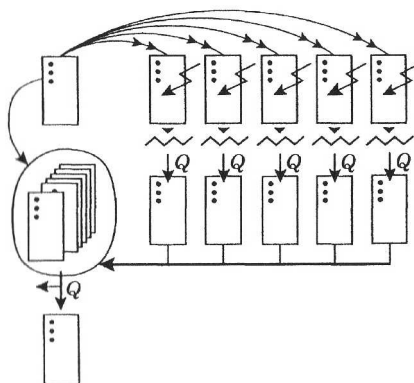


Abb. 5 (1+5)-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

- (1,5)-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 6**). Dieses Schema unterscheidet sich von dem vorangegangenen darin, dass nicht mehr der Elter plus die Nachkommen, sondern nur noch die

Nachkommen in die Selektionsurne gelangen. Der Elter scheidet aus dem Prozess aus, auch wenn er eine höhere Qualität als sämtliche Nachkommen aufweist.

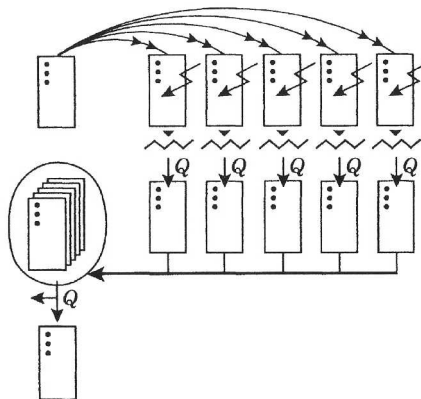


Abb. 6 (1,5)-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Es dürfte klar sein, dass wenn mehrere Eltern Nachkommen hervorbringen, dies besser dem biologischen Vorbild entspricht. In folgendem Beispiel spiegelt sich dies wieder.

- (3,7)-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 7**). Drei Eltern erzeugen in zufälliger Folge insgesamt sieben Nachkommen. Die mutierten und nach der Realisation bewerteten Datenkarten der Nachkommen gelangen wieder in die Selektionsurne. Diesmal werden die drei besten Datenkarten ausgelesen und zu Eltern der nachfolgenden Generation erklärt.

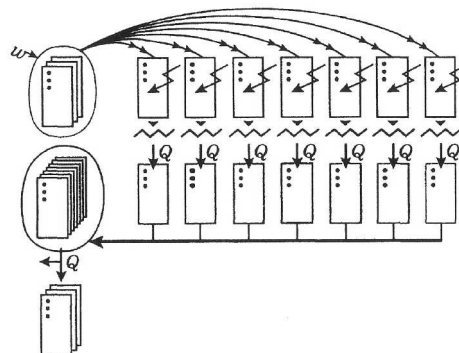


Abb. 7 (3,7)-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Wie bereits aufgefallen sein dürfte, werden die Algorithmen immer komplexer. Auch jetzt gibt es wieder eine Steigerung. Es kommt die Mischung eines Elternpaares hinzu.

- (6/2,10)-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 8**). Hier erzeugen sechs Eltern insgesamt zehn Nachkommen, wobei allerdings ein Elter im Mittel nur die Hälfte seiner Variablenwerte auf einen Nachkommen überträgt. Genau genommen entsteht der Nachkomme wie folgt: Zwei Elternkarten werden zufällig aus der Population herausgegriffen und dupliziert. Die Variablen

(Nummer und Wert Zusammen) werden aus den Karteiduplikaten gewissermaßen herausgeschnitten und in eine Mischungsurne eingebracht. Aus der Urne wird der neue, vollständige Variablensatz des Nachkommen gezogen. Wie bisher gelangen die zehn Nachkommenkarten dann nach vollzogener Mutation, Realisation und Bewertung in die Selektionsurne, aus der dann die sechs besten Karten herausselektiert und als Eltern für die nachfolgenden Generationen verwendet werden.

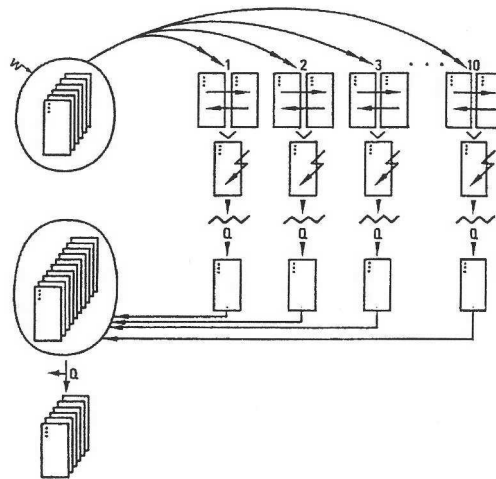


Abb. 8 (6/2,10)-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Bis jetzt wurden nur Individuen als Selektionseinheit betrachtet. Jetzt werden Algorithmen gezeigt, in denen die Population die Selektionseinheit darstellt.

- [2,3(4,7)]-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 9**). Die Schreibweise als Zweiklammer-Ausdruck soll andeuten, dass es sich hier um eine formale Erweiterung des bisherigen Musters handelt. Innerhalb der runden Klammer stehen weiterhin Individuen als Spieleinheiten. Außerhalb der runden, also in den eckigen Klammern, befinden sich dagegen Populationen als Spieleinheiten. Das Verfahren läuft wie folgt ab: Zwei Elternpopulationen führen dreifach parallel eine (4,7)-gliedrige Evolutionsstrategie aus. Die Selektion nach der individuellen Qualität Q liefert also drei Nachkommenpopulationen. Diese gelangen nun als Einheiten in eine zweite Selektionsurne, aus der aufgrund ihrer gruppenspezifischen Qualität Q' die zwei besten Populationen herausgesucht werden. Die gruppenspezifische Qualität Q' wird hier durch den Mittelwert Q der Individuen-Qualitäten ausgedrückt. Damit kann auf ein Realisierungs- und Bewertungszeichen in der Populationsebene verzichtet werden.

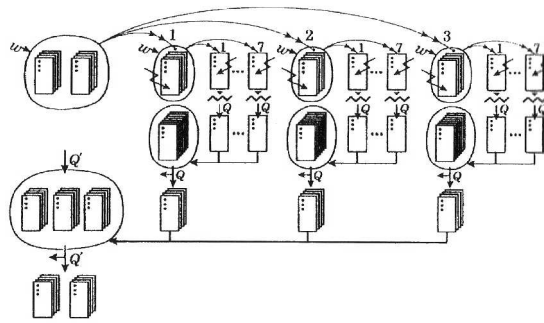


Abb. 9) [2,3(4,7)]-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Natürlich ist es auch möglich, dass sich verschiedenen Populationen eine Zeitlang parallel entwickeln, was im folgenden Beispiel gezeigt ist.

- [1,2(4,7)³⁰]-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 10**). Gegeben ist eine 4-Eltern-Population. Durch Duplikation des Kartensatzes werden daraus zwei 4-Eltern-Populationen hergestellt. Beiden Populationen führen 30 mal hintereinander den Spielzug einer (4,7)-ES durch. Mit anderen Worten: Die beiden Populationen besteigen für die Dauer von 30 Generationen parallel das Optimierungsgebirge. Erst dann werden die Entwicklungshöhen der zwei Populationen gemessen. Die beste Population wird ausgewählt und der Zyklus beginnt von vorn.

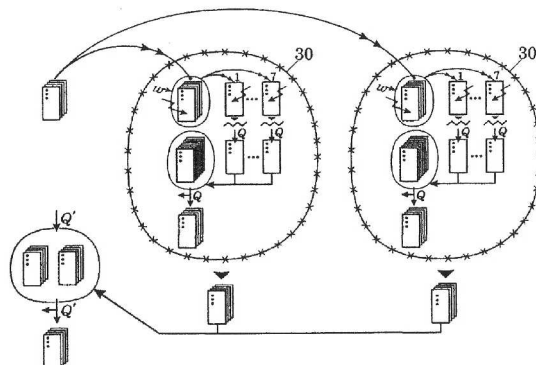


Abb. 10) [1,2(4,7)30]-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Zu guter Letzt ist auch noch die Vermischung einzelner Individuen verschiedener Populationen möglich.

- [4/3,6(5/2,7)]-gliedrige Evolutionsstrategie (**Abb. 11**). Es wird 6fach parallel ein (5/2,7)-gliedriger Evolutionszug ausgeführt. Für jeden dieser Unterzüge wird eine Ausgangspopulation aus drei Elternindividuen benötigt. Diese Elternpopulationen werden durch folgenden Mischungsprozess hergestellt: Aus dem Pool der vier Ausgangspopulationen werden zufällig drei Populationen ausgewählt. Deren Individuen werden nach Mischung einer Urne zu je einer neuen Population

zusammengestellt. Der restliche Spielablauf mit diesen Elternpopulationen folgt den bereits bekannten Regeln.

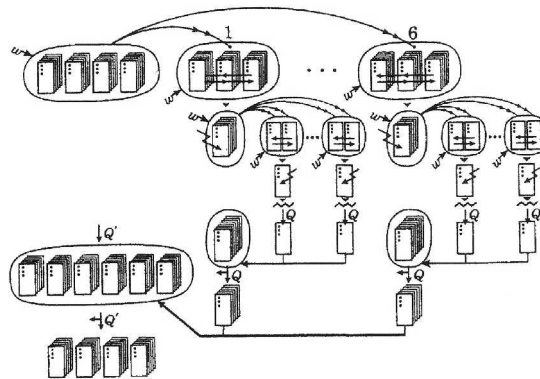


Abb. 11) [4/3,6(5/2,7)]-gliedrige Evolutionsstrategie (nach Rechenberg) [WN]

Die hier beschriebenen Algorithmen sind alle sehr leicht mit einem Computerprogramm zu simulieren. Dabei besteht jetzt die Schwierigkeit eine Prüffunktion zu implementieren, über die entschieden werden kann, ob ein Individuum oder eine Population besser oder schlechter ist als eine andere.

Die Anwendung der Algorithmen findet beim Lösen von Optimierungsproblemen ihre Berechtigung. Für die Evolution geeignete Optimierungsprobleme spannen ein „bergige Evolutionslandschaft“ (Abb. 12) auf, die starken kausalen Regeln folgt. Jede „Bergspitze“ stellt eine Optimallösung dar. Durch die Anfangsbedingungen wird ein Startpunkt festgelegt. Dieser liegt wahrscheinlich nicht auf einem Optimum, sondern in einem Tal oder wahrscheinlicher auf einer Bergflanke. Da ein Rückschritt, also eine Verschlechterung der Lösung, schon definitionsgemäß nicht möglich ist, schießt sich der Algorithmus auf den nächstliegenden Berg ein, wo er sich dann dem Optimum des Berges nähert. Wie man sich sicher vorstellen kann ist dies nicht in jedem Fall die optimale Lösung aller Lösungen, sondern wahrscheinlich nur eine suboptimale Lösung. Welche Lösung gefunden wird hängt also von der Anfangsbedingung ab. Eine zufällige Wahl der Anfangsbedingungen ist zwar möglich, aber, um ein bestimmtes Optimum zu erreichen nicht empfehlenswert.

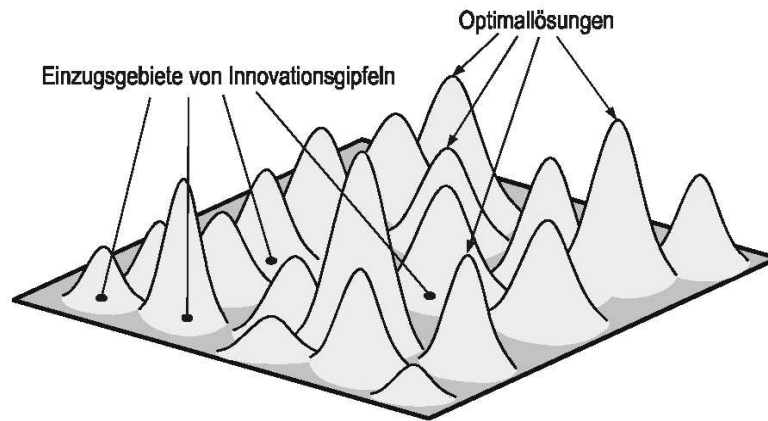


Abb. 12) bergige Evolutionslandschaft [IR]

Die Größe der Mutationsschrittweite spielt dabei auch eine große Rolle. Wird eine sehr große Schrittweite gewählt, springt die Lösung von einem Berg zu anderen. Wird sie zu klein gewählt, stagniert die Evolution. Es ist also wichtig die richtige Schrittweite zu finden.

In der Praxis wird die Evolution meistens nur dann eingesetzt wenn eine rechnerische Lösung zu kompliziert ist oder die Randbedingungen nicht ausreichend bekannt sind. In den meisten Fällen handelt es sich um ein Optimierungsproblem, z. B. die Suche nach dem kürzesten Weg, dem geringsten Widerstand oder einer optimalen Maschinenausnutzung. Eine wohl sehr häufige Anwendung der Evolutionsstrategien findet sich in CAD-Programmen zur Spannungsoptimierung in beanspruchten Bauteilen.

Ein paar Beispiele fehlen jetzt noch, um die Effektivität und die Vorgehensweise der Evolution zu verdeutlichen. Bei den Beispielen handelt es sich wohl um die Standardbeispiele der Bionik zu diesem Thema und sind wohl auch in jedem Bionikbuch zu finden. Ich habe die Beispiele aus dem Vorlesungsscript von I. Rechenberg zu Bionik I übernommen.

- **Evolution einer Zickzackplatte:**

Dieses Experiment brachte der Evolutionsstrategie wohl den Durchbruch. Dazu wurden sechs Platten gelenkig miteinander verbunden (Abb. 13). Die Gelenke hatten 51 Einraststellen, die je zwei Grad auseinander lagen, woraus sich $51^5 = 345\,025\,251$ verschiedene Einstellmöglichkeiten ergaben.

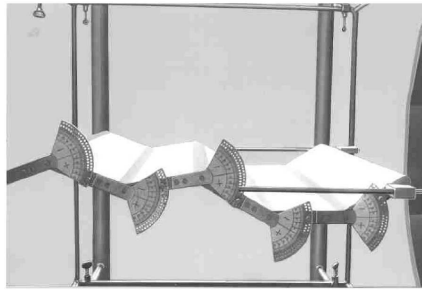


Abb. 13) Windkanalaufbau einer Gelenkplatte [IR]

Um das Experiment zu starten, wurde Platte in eine zufällige Zickzackform gebracht und in dem Windkanal ausgerichtet. Die Vorder- und Hinterkante der Platte waren stets auf einer Höhe parallel zu Luftstrom angeordnet. Bei dem Experiment galt es den Strömungswiderstand der Gelenkplatte zu minimieren. Es weiß natürlich jeder, dass der geringste Widerstand dann erreicht ist, wenn die Platte komplett gesteckt wird.

Als das Experiment im Sommer 1964 gestartet wurde, dachten Skeptiker, dass das Experiment, wegen seiner 51^5 Einstellmöglichkeiten, Jahre in Anspruch nehmen würde und die Suche erst nach mehreren Millionen Einstellungen zum Ziel führt. Doch das Ziel wurde sehr schnell erreicht, wie **Abbildung 14** zeigt.

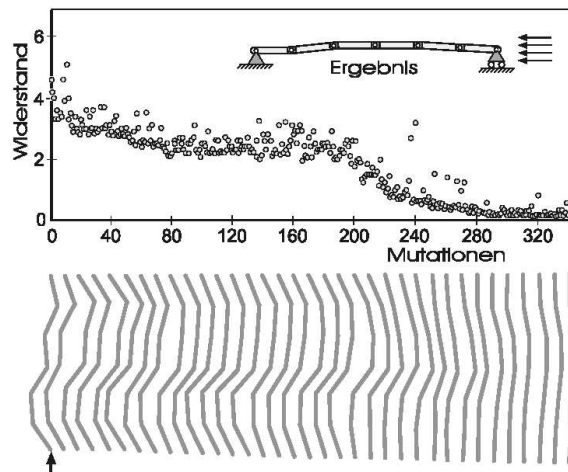


Abb. 14) Minimierung des Widerstands einer Gelenkplatte [IR]

Schon nach ca. 320 Generationen hatte die Platte eine fast ebene Form erreicht. Die kleine Abweichung von der Optimalform war aufgrund der Messungenauigkeiten nicht weiter zu verbessern. Bemerkenswert ist, dass es zwischen den Generationen 80 und 180 keine wesentliche Änderung gibt. Hier liegt wohl ein lokales Widerstandsminimum. Bei Wiederholungsversuchen trat diese Stagnation nicht mehr auf und die Optimalform wurde bereits nach 200 Generationen erreicht.

- **Evolution eines Rohrkrümmers:**

Ein nicht so einfach vorhersehbares Ergebnis brachte die Evolution zweier Rohrkrümmen (**Abb. 15**). Dabei galt es bei einem 90°- und einem 180°-Krümmer den Energieverlust beim Durchströmen zu minimieren.

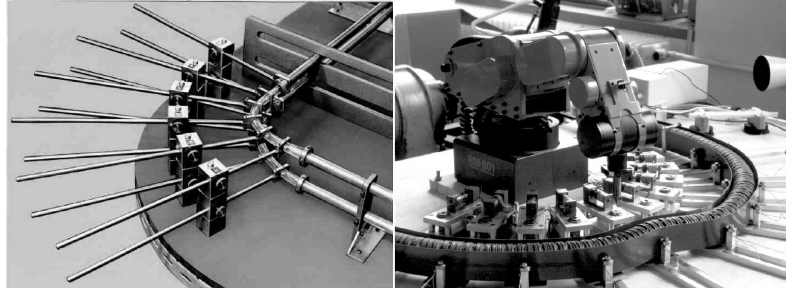


Abb. 15) Manuelles und maschinelles Verfahren zur Rohroptimierung [IR]

Beide Experimente wurden mit Pressluft bei vollturbulenter Strömung ($Re = 68\ 000$) durchgeführt. Als Starteinstellung wurde eine Kreisform vorgegeben (**Abb. 16**). Bei den beiden Evolutionsergebnissen ist zu erkennen, dass die Krümmung von der Geraden an stetig zunimmt. Am Auslauf tritt bei beiden Krümmern eine Krümmungsumkehr auf. Im Vergleich mit der Ausgangsform besitzt die Endform eine Energieersparnis von 2%. Betrachtet man nur die Umlenkverluste, dann ist der Reibungswiderstand des gestreckten Rohres Null zu setzen. Die Optimalkrümmer weisen dann eine um 10% verringerten Umlenkverlust auf.

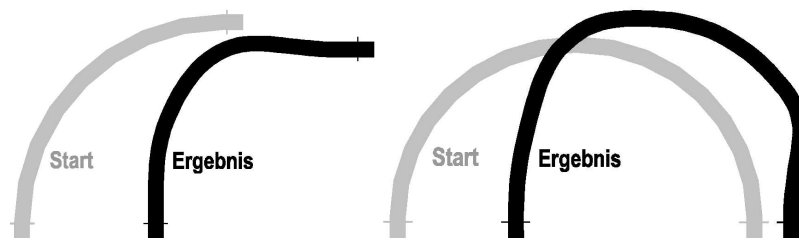


Abb. 16) Startform eines Krümmers und Ergebnis nach Optimierung [IR]

- **Evolution eines magischen Quadrates:**

Ein magisches Quadrat ist eine quadratische Matrix, die mit ganzen Zahlen gefüllt ist (**Abb. 17**). Die Zahlen werden dabei so angeordnet, dass die Zeilen, Spalten und Diagonalen die gleiche Summe bilden. Dabei ist es auch üblich zu fordern, dass es mit aufeinander folgenden natürlichen Zahlen gebildet wird.

Um ein magisches Quadrat nun evolutionstechnisch zu entwickeln, muss eine Qualitätsfunktion aufgestellt werden. Dies ist nötig um zu entscheiden ob eine Version besser, schlechter oder gleich gut ist. Für eine 3×3-Matrix könnte diese Funktion z. B. wie folgt aussehen:

$$\begin{matrix}
 \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \\ n_4 & n_5 & n_6 \\ n_7 & n_8 & n_9 \end{bmatrix} & Q = (n_1 + n_2 + n_3 - 15)^2 + (n_4 + n_5 + n_6 - 15)^2 + (n_7 + n_8 + n_9 - 15)^2 \\
 & + (n_1 + n_4 + n_7 - 15)^2 + (n_2 + n_5 + n_8 - 15)^2 + (n_3 + n_6 + n_9 - 15)^2 \\
 & + (n_1 + n_5 + n_9 - 15)^2 + (n_7 + n_8 + n_3 - 15)^2 \rightarrow \text{Min}
 \end{matrix}$$

Um die Evolution zu starten werden die Zellen zufällig mit Zahlen gefüllt. Die Mutation erfolgt dann mit den folgenden Regeln:

- Suche zufällig eine Zahl aus dem Quadrat heraus.
- Mutiere diese Zahl virtuell um einen kleinen Betrag.
- Suche die Zahl im Quadrat, die gleich der Abgeänderten ist.
- Vertausche die Zahlen in den zwei Zellen.

Für kleine Quadrate ist die optimale Mutationsschrittweite die kleinste mögliche, nämlich ± 1 . Bei großen Quadraten empfiehlt es sich mit einer großen Schrittweite zu beginnen und diese dann zu verkleinern.

85	100	74	74	118	84	105	122	88	110	75	144	75	122	141	36	125	99	69	60	94
52	115	96	153	64	58	140	77	64	114	59	85	112	170	67	83	151	41	85	108	106
81	133	133	119	58	52	88	80	94	119	112	133	69	99	114	40	74	99	101	128	74
97	50	71	114	69	64	145	85	111	106	75	156	28	89	112	104	142	106	92	139	45
48	121	115	159	93	120	72	90	47	116	68	104	42	128	127	56	107	90	115	95	87
72	77	95	71	124	131	141	63	83	111	86	94	157	82	99	119	107	75	90	82	51
77	119	80	77	80	8	130	74	123	97	35	122	140	95	132	89	121	67	121	127	86
118	101	2	2	175	114	212	0	0	154	156	167	0	0	163	124	166	0	0	156	190
55	2	207	125	2	115	0	178	163	0	194	0	180	191	0	121	0	147	198	0	122
117	155	164	124	2	137	0	141	172	0	139	0	115	146	0	92	0	204	145	0	127
164	189	155	2	140	144	0	132	138	0	180	0	138	142	0	126	0	117	127	0	106
135	118	2	168	170	189	0	120	177	0	107	0	191	132	0	135	0	164	86	0	106
188	2	134	103	115	135	0	174	189	0	148	0	183	123	0	167	0	152	141	0	106
214	2	2	2	2	112	157	0	0	249	191	199	0	0	189	136	206	0	0	231	98
72	89	112	85	70	47	125	102	123	76	70	163	115	89	112	63	95	118	83	120	73
72	163	63	105	112	85	105	72	82	141	50	125	77	26	120	51	144	117	59	126	105
76	54	116	84	121	47	111	106	93	154	52	77	61	49	107	147	117	147	78	137	96
100	63	110	95	146	85	111	124	7	109	39	125	71	129	80	50	160	86	90	135	85
74	120	87	88	128	89	122	87	106	147	47	115	47	80	191	73	60	16	104	124	97
96	104	90	108	88	68	138	105	88	116	40	103	144	54	87	80	136	75	119	149	72
87	123	72	132	125	116	96	78	72	81	77	88	75	104	149	108	89	82	87	83	74

Abb. 17) Millennium-Quadrat für das 21ste Jahrtausend bestehend aus 21x21 Feldern und der Magischen Summe 2000. [IR]

Zum Schluss möchte ich noch eine kurze Zusammenfassung bieten. Das alte Gebiet der Bionik macht seinem modernen Namen alle Ehre. Die Bionik ist heute wohl aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Die verschiedenen Teilgebiete der Bionik dehnen sich über die gesamte Technik aus. Sogar aus philosophischer Sicht kann man die Bionik betrachten.

Wie bereits oben gesagt, kopiert die Bionik nicht die Natur, sondern versucht die Vorgänge und Hintergründe der biologischen Entwicklung zu verstehen, um dieses Wissen anschließend in technische Lösungen einfließen zu lassen.

Da alles Leben auf unserem Planeten durch evolutionäre Vorgänge entstanden ist, halte ich die Evolution als Teilgebiet der Bionik am wichtigsten und hervorhebenswert. Aus der Biologie entlehnte Evolutionsalgorithmen lösen auf erstaunliche Weise Optimierungsprobleme, bei denen sich mathematische Verfahren die Zähne ausbeißen.

Auch wenn ich auf die anderen Gebiete der Bionik nicht so ausführlich eingegangen bin, heißt das nicht, dass dies unwichtig und uninteressant sind. Die Bionik ist einfach zu umfangreich, um sie in einer so kurzen Form ausführlich darzustellen.

Literaturangaben habe ich bei meiner Recherche im Internet massenweise gefunden. Und da ich jedem zutraue, im Internet selbst danach zu suchen, gebe ich hier nur zwei Internetadressen an, unter denen man bestimmt fündig wird, und verzichte auf eine ewiglange Liste von Büchern.

- **www.bionik-netz.de**
Die Seite des Bionik-Kompetenznetz. Ein Zusammenschluss mehrerer deutscher Universitäten zum Thema Bionik.
- **www.google.de**
Die wohl bekannteste Suchmaschine des Internet. Hier findet man alles.

Außer Angaben zu Büchern sind leider nur wenige brauchbare Artikel im Internet zu finden. Die meisten bestehen eigentlich nur aus Beispielen, wie im Übrigen auch das Buch, in welches ich mich vertieft habe. Man könnte den Eindruck gewinnen, dass diese Wissenschaft eigentlich nur aus Beispielen besteht. Ich hoffe, dies wird sich in naher Zukunft ändern.

Quellen

- [IR] Ingo Rechenberg: Vorlesung Bionik I
- [WN] Werner Nachtigall: Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler