

# Proseminar Evolutionsstrategien

## Das Mutations-Selektions-Prinzip

TU Chemnitz SS 2002

Janina Bär

**Gliederung**

1. Einführung	2
1.1. Bionik	2
1.2. Beispiele für unbewusstes Kopieren natürlicher Konstruktionen	3
1.3. Beispiele für bewusstes Kopieren natürlicher Konstruktionen	3
1.4. Definitionen	3
1.5. Der Affen-Versuch von Dawkin	4
2. Das Mutations-Selektions-Prinzip	5
2.1. Vereinfachte technische Nachahmung des biologischen Evolutionsvorgangs	5
2.2. Variabilität der Versuchsobjekte	6
3. Optimierungsversuche mit dem Mutations-Selektions-Verfahren	7
3.1. Gelenkplatte	7
3.2. Rechtwinklige Rohrumlenkung	8
3.3. Zweiphasen-Überschalldüse	9
3.4. Regleroptimierung	10
3.5. Fernsehverkabelung	11
4. Zusammenfassung	12
5. Literatur	13

## 1. Einführung

### 1.1. Bionik

Bionik ist (seit 1960) „ein eigenständiger Wissenschaftszweig, der es sich zur Aufgabe gemacht hat, technische Probleme durch Nachahmung biologischer Vorbilder zu lösen“ /RECH-73/. Eine besondere Rolle in der Bionik spielt dabei die Evolution bzw. so genannte Evolutionsstrategien.

„Die Forschungen auf dem Gebiet der Bionik beruhen [...] auf einer grundlegenden Erkenntnis: Die heutigen Lebewesen sind das Ergebnis einer über drei Milliarden Jahre andauernden Evolution. Während dieser Zeit hat die natürliche Auslese alles Unangepasste eliminiert. Das Ergebnis dieses Langzeitexperiments, für das der riesige Versuchsraum der Erdoberfläche zur Verfügung stand, sind optimal an die jeweilige Umwelt angepasste Lebensformen. Somit erscheint es nur vernünftig, die im Verlauf der Evolution gesammelten Experimentiererfahrungen, wie sie in jeder biologischen Struktur heute vorhanden sind, technisch auszuwerten.“ /RECH-73/

Forschungsthemen der Bionik sind beispielsweise:

- die widerstandsvermindernde Elastizität der Delfinhaut
- die Turbulenzdämpfung des Schleimes bei Fischen
- die Stofftrennungseigenschaften biologischer Membranen
- die Baustatik von Diatomeen- und Muschelschalen
- die biologischen Methoden zur Energieumwandlung (z.B. Fotosynthese und Solartechnik)
- die datenverarbeitende Funktion des Neurons
- die Mustererkennung in neuronalen Netzen
- die Sinnesorgane von Lebewesen als Modelle für technische Messgeräte
- die Organisationsformen komplexer biologischer Regelungssysteme und deren Zuverlässigkeit (z.B. Kontrollmechanismen bei genetischer Stangverdopplung)
- Bereiche der Mikrotechnologie
- wasserstoffbildende Bakterien
- die Wüsteneidechse als Modell und Vorbild für Festkörperreinigung.

Der Evolution unterliegen sowohl die Lebewesen, als auch die Experimentiermethoden, denn für das Überleben einer Art sind momentane Lebensleistung und Vererbungsstrategie wichtig. Deshalb entstanden im Verlauf der Evolution die genetische Kontrolle der Mutabilität, das Crossing-over der Chromosomen, die dominant-rezessive und die intermediäre Vererbung sowie andere Methoden. All diese Mechanismen führten zu einer Höherentwicklung. Sie dienen dem Zweck der schnellen Anpassung und somit einer Erhöhung der Evolutionsgeschwindigkeit.

Nun stellt sich für die Technik die Frage, wie genau man die natürlichen Mechanismen kopieren sollte. Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich sehr genaue Naturkopien häufig als groteske Fehlritte erwiesen haben. Der technische Mechanismus ist nur dann optimal, wenn er die gleiche Funktion unter den gleichen Randbedingungen wie sein biologisches Vorbild realisiert. Gleiche Randbedingungen sind aber kaum zu erwarten, weil die technische und biologische Struktur aus völlig verschiedenen Materialien bestehen. Somit sind für die Technik nur biologische Teilfunktionen von Interesse. Die Bionik kann also nur nahe an die technische Optimallösung heranführen, indem man das biologische Vorbild als Ausgangspunkt nimmt, es entsprechend den technischen Bedingungen weiterentwickelt und dadurch zum Ergebnis kommt. Es geht also nicht darum unbedingt jeden Evolutionsfaktor genauestens zu kopieren, sondern um das Verstehen des biologischen Vorgangs, um somit zu einem idealisierten Schema zu gelangen, das letztendlich die gleiche Wirkung zeigt.

1.2. Beispiele für unbewusstes Kopieren natürlicher Konstruktionen

- statische Elemente zur Verbesserung der Standsicherheit bei Stahlstützen und Masten (verbreiteter Fuß um Rutschen, Kippen, Knicken zu verhindern)  $\Leftrightarrow$  Brettwurzeln der Bäume
- Gerüste und Rohre (so dünn wie möglich, so dick wie nötig)  $\Leftrightarrow$  Röhrenknochen
- Stabilisatoren in Rotorblättern und Flugzeugflügeln  $\Leftrightarrow$  Libellenflügel (Ballastelement am äußeren Rand, das Vibrationen verhindert)

1.3. Beispiele für bewusstes Kopieren natürlicher Konstruktionen

- Klettverschluss  $\Leftrightarrow$  Anheftmechanismus der Fruchtstände der Klette
- Schuppung von Langlauf-Skiern (ungebremst vorwärts gleiten, aber nicht zurückrutschen)  $\Leftrightarrow$  Bauchschuppen einer südamerikanischen Schlangengattung
- Roboterhand  $\Leftrightarrow$  menschliche Hand
- Selbstreinigungsfolien  $\Leftrightarrow$  aufgeraute Oberfläche verschiedener Pflanzenblätter, z.B. Kohlrabi
- Wasser- und schmutzabweisende Fassade, selbstreinigende Dachziegel  $\Leftrightarrow$  „Lotus-Effekt“
- Pinguin als Vorbild für ideale Strömungskörper

1.4. Definitionen nach /BREH-01/**Evolution:**

Die Evolution von Arten ist ihr Entstehen, Erhalten (durch Fortpflanzung) und Vergehen; sie vollzieht sich in Populationen.

In allen natürlichen Populationen gibt es eine phänotypische und genotypische Variabilität, in der vielfältige Formen von Selektion und Isolation wirksam werden können. Diese Prozesse realisieren sich als Zusammenspiel der Evolutionsfaktoren.

**Selektion:**

Selektion (Auswahl) findet bei allen Lebensprozessen auf allen Organisationsstufen lebender Systeme statt.

(Überleben des am besten Angepassten; natürliche Auslese)

**Variabilität:**

Es gibt erbliche und nicht erbliche Variabilität. (erblich: Mutation, Rekombination; nicht erblich: Modifikation.)

Für die Evolutionsstrategien ist die erbliche Variabilität, vor allem die Mutation, wichtig.

**Mutation:**

Eine sprunghafte und zufällig auftretende Veränderung der Erbinformationen.

Bedeutung der Mutationen:

- wirken sich für ein Individuum meistens indifferent, selten nachteilig oder günstig aus
- sind eine wesentliche Grundlage der Evolution. Durch Veränderung im Genbestand einer Population erhöht sich die Variabilität in der Population.

### 1.5. Der Affen-Versuch von Dawkin

In diesem Versuch geht es darum, dass ein Affe zufällig ein Shakespeare-Zitat tippen soll. Das ist eigentlich unmöglich. Es gibt aber eine intelligentere Lösung: Ausgangspunkt ist eine zufällig getippte Zeile. Nun werden nur einige Buchstaben variiert. Wenn die Übereinstimmung mit dem Zitat wächst, nimm diese Zeile als Ausgangsbasis für weitere Versuche; wenn die Übereinstimmung nicht wächst, so nimm die alte Basis als Ausgangszeile. Man kann sich vorstellen, dass es nach genügend Wiederholungen zum Erfolg kommt.

In diesem Versuch wurden die Prinzipien der Evolution angewendet: die Mutation als Änderung im Satzbau der Erbinformation. Sie findet nicht überall gleichzeitig statt, sondern nur an einzelnen Buchstaben. Durch die Selektion (Richtiges behalten, Falsches verwerfen) wird die Übereinstimmung (also Anpassung) mit der Umwelt ständig verbessert.

## 2. Das Mutations-Selektions-Prinzip

### 2.1. Vereinfachte technische Nachahmung des biologischen Evolutionsvorgangs

Bei der Nachahmung gibt es eine grundlegende Schwierigkeit: der Biologe beschreibt das Evolutionsgeschehen verbal. Dies ist nicht ausreichend für eine technisch-mathematische Beschreibung, deshalb muss der Prozess in ein Programm mit technisch realisierbaren Befehlen übersetzt werden. Dabei gilt für die künstliche Evolution: nur die wirksamsten Naturprinzipien (Evolutionsfaktoren) sind nachzuahmen. Um dies zu entscheiden, bedarf es der Abstraktion: man betrachtet die biologische Evolution als zweistufigen Prozess: „Die Erzeugung zufälliger Variationen und die Aussonderung der unvorteilhaften Varianten durch die natürliche Auslese“ /RECH-73/. Dieser Prozess ist ohne weiteres auch zur Optimierung technischer Systeme anwendbar. Dabei müssen folgende Parallelen gezogen werden:

1. Vergleich des Genotyps<sup>1</sup> mit den Konstruktionsunterlagen des technischen Gebildes, dabei gilt: die „Schalterstellungen“ der Gene in den Chromosomen entsprechen den Maßangaben der Konstruktionszeichnung.
2. Vergleich des Phänotyps<sup>2</sup> mit dem betriebsfertigen technischen Objekt.
3. Vergleich der Vitalität eines Lebewesens in einer bestimmten Umwelt mit der Qualität des technischen Objekts unter den gegebenen Rahmenbedingungen.

Mutationen sind somit die verschiedenen Schalterstellungen der Gene.

Die Daten einer Konstruktionsanweisung können aber variabel sein. Nehmen wir als Beispiel die Tragflügel eines Flugzeugs. Die Profilrand-Koordinaten kann man in einem  $(x, y)$ -System darstellen. Die Koordinatenwerte der Profilsammlungen sind nun vergleichbar mit den Gen-Schalterstellungen. Die Vitalität eines Lebewesens wird durch zahllose Einzelleistungen bestimmt. Die Qualität des Tragflügelprofils wird auch durch viele Größen – Verhalten bei Reiseschnellflug, Verhalten beim Landeanflug, ... – bestimmt. Vereinfachen wir das Beispiel und gehen davon aus, dass die Qualität nur abhängig vom aerodynamischen Auftrieb ist. Nun können wir das *Mutations-Selektions-Prinzip* nachahmen. Dabei werden folgende Parallelen gezogen:

Gen-Schalterstellungen	↔	Profilkoordinaten
Phänotyp	↔	Windkanalmodell
Umwelt	↔	Strömung
Vitalität bzw. Fitness <sup>3</sup>	↔	Auftrieb

Gegeben sind nun die Koordinatenwerte von  $m$  Profilformen. Sie symbolisieren das genetische Material einer biologischen Population. Um die identische Selbstverdopplung des genetischen Materials nachzuahmen, schreiben wir Koordinatentabellen auf einzelne Karten. Diese lassen sich nun getrennt kopieren. Jetzt müssen die  $m$  Profilformen realisiert werden. Dazu kann man beispielsweise Modelle aus Holz bauen. Mit deren Hilfe können Messungen des Strömungsauftriebes im Windkanal gemacht werden. Die Ergebnisse notieren wir auf die Profilkarten. Der nächste Schritt ist die Nachahmung der Mutation: per Zufall werden einige Koordinatenwerte abgeändert. Die Beträge der Änderung sollen dabei, entsprechend der natürlichen genetischen Variationskurve, eine binominale Häufigkeitsverteilung besitzen. Nun wird erneut ein Holzmodell angefertigt, danach folgen Messungen im Windkanal, schließlich wird das Ergebnis notiert. Es sind  $m+1$  Profilkarten entstanden. Die natürliche Auslese sorgt dafür, dass die

<sup>1</sup> Gesamtheit der Erbanlagen eines Lebewesens

<sup>2</sup> sichtbares Erscheinungsbild eines Lebewesens

<sup>3</sup> Maß für die Wahrscheinlichkeit der Weitergabe der Erbinformationen: am besten angepasste Individuen (=größte Fitness) hinterlassen die größte Anzahl an Nachkommen.

Proseminar Evolutionsstrategien  
Das Mutations-Selektions-Prinzip

Individuenzahl eine bestimmte Grenze nicht überschreitet (Selbstregulierung: besser angepasste Organismen überleben, geben den Vorteil an Nachkommen weiter → Höherentwicklung) .

Wir legen nun für die technische Ebene fest:

1. Die Zahl der Glieder einer Gruppe soll konstant bleiben.
2. Die Auslese soll stets das schwächste Glied treffen.

Also sortieren wir aus den  $m+1$  Karten die schlechteste aus – sollte das auf zwei Karten zutreffen, so entscheidet der Zufall zwischen ihnen – so dass  $m$  Karten übrig bleiben. Wir fahren nun bei der Nachahmung der Mutation fort.

Dieses Beispiel nennt man eine  $(m+1)$ gliedrige Wettkampfsituation. (Wenn  $m=1$  ist, wäre es eine zweigliedrige Wettkampfsituation. Diese ist besonders einfach durchzuführen.)

## 2.2. Variabilität der Versuchsobjekte

Die Frage die sich nun stellt, ist: Ist dieses Schema nicht zu aufwendig? Eigentlich ist es sehr unökonomisch, da immer neue Varianten aus Holz angefertigt werden müssen und dann nach dem Windkanaltest übrig sind. Kann man also die Qualität des technischen Objekts mathematisch berechnen? Wenn ja, dann wäre das Evolutionsschema völlig auf mathematischer Ebene durchführbar. Allerdings ist es so, dass viele technisch bedeutsame Optimierungsaufgaben nicht mathematisch erfassbar sind. Dann gibt es keinen „Ausweg“, man muss Experimente durchführen. Hierbei stellt sich die Frage, wie lassen sich die Objektvarianten mit einem Minimum an Zeit und Material erzeugen? Die Antwort ist abhängig vom Gebiet, in dem man die Experimente durchführen will.

In der Strömungstechnik beispielsweise erreicht man die räumlich-geometrische Variabilität durch:

- mechanische Verstellung,
- elastische Verformung,
- segmentweise Kombination,
- elektrolytisches Wachstum (vorerst hypothetisch).

Dadurch ist eine Umkehrbarkeit der Formgebung gegeben. Außerdem kann man durch z.B. Gießen und dann wieder Einschmelzen variable Versuchsobjekte erzeugen.

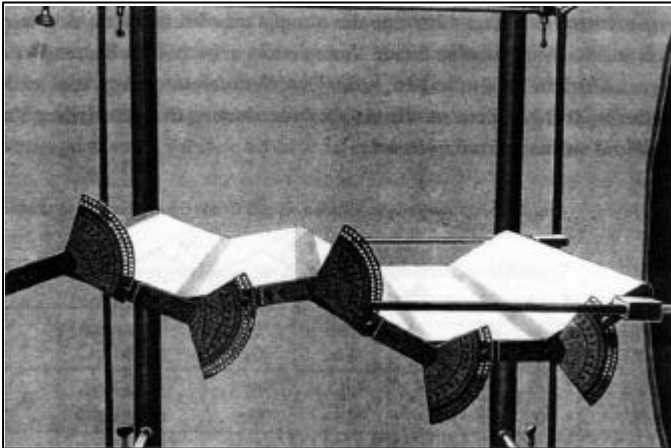
In der Elektrotechnik ist eine Variabilität der Versuchsobjekte besonders einfach, denn die wesentlichen Parameter einer elektrischen Schaltung (Widerstände, Kapazitäten, Induktivitäten) existieren handelsüblich in verstellbarer Ausführung.

### 3. Optimierungsversuche mit dem Mutations-Selektions-Verfahren

Bei den nachfolgenden Versuchen gibt es einige, die vor 1973 durchgeführt wurden. Demnach kann es sein, dass die verwendete Technik heute „alt“ erscheinen mag.

#### 3.1. Gelenkplatte

Bei dem Versuch mit der Gelenkplatte geht es primär um den Test auf die Wirksamkeit des Mutations-Selektions-Verfahrens. Es handelt es sich um eine zweigliedrige Wettkampfsituation.

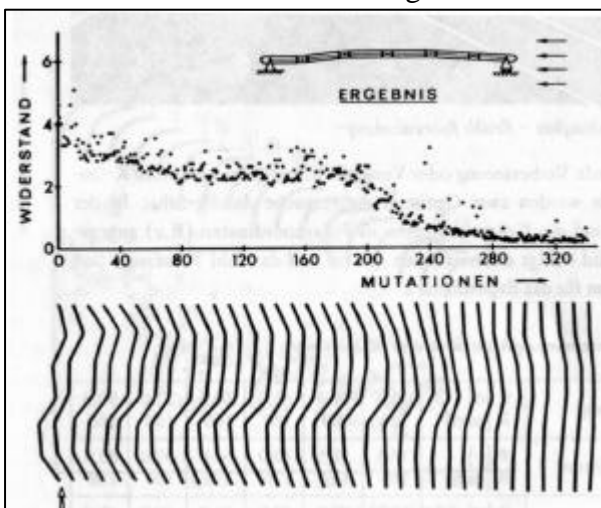


Die Gelenkplatte besteht aus sechs rechteckigen Flächenstreifen, die an ihren Längskanten miteinander gelenkig verbunden sind. Die Gelenke sind einzeln verstellbar. Für je zwei Grad Winkelablenkung sind sie einrastbar, so dass 51 Einraststufen entstehen. Somit kann die Gelenkplatte  $51^5 (=345025251)$  verschiedene Formen annehmen. Die Gelenkplatte ist daher durchaus ein variabler Versuchskörper. Die Winkeländerungen, also Variationen, werden mittels Zufallszahlen erzeugt. Diese folgen einer Binomialverteilung, so dass kleine Winkeländerungen häufiger auftreten, als große. (In der Natur kommt es auch häufiger zu kleinen Änderungen, als zu großen.)

Die Winkeländerungen, also Variationen, werden mittels Zufallszahlen erzeugt. Diese folgen einer Binomialverteilung, so dass kleine Winkeländerungen häufiger auftreten, als große. (In der Natur kommt es auch häufiger zu kleinen Änderungen, als zu großen.)

#### 1. Optimierungsaufgabe

Bei dieser Aufgabe sind Anfangs- und Endplatte auf einer Linie parallel zum Luftstrom ausgerichtet. Nun wird die Platte zusammengefaltet (Zickzack). Mit einem Pitotrohr<sup>1</sup> am Ende der Platte wird der Luftwiderstand gemessen.



Die Lösung des Optimierungsproblems ist klar: der geringste Luftwiderstand wird erreicht, wenn eine ebene, parallele Fläche angeströmt wird. Aber wird diese Form auch wirklich gefunden? Die Antwort ist: ja. Die ebene Platte wird nach rund 200 Schritten erreicht. Im Versuch wurde der Gelenkwinkel von genau null Grad nicht erreicht, weil die Widerstandsunterschiede zwischen leicht gewellter und völlig glatter Ebene nicht mehr messtechnisch feststellbar waren. Es handelt sich also um ein sehr flaches Optimum. Zwischen Mutation 80 und 180 trat im Experiment kaum eine Widerstandsverminderung auf. Bei dieser S-Form der Gelenkplatte ist somit ein lokales Minimum

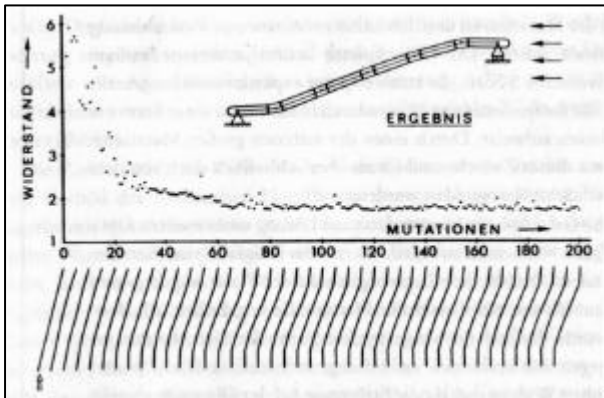
vorhanden. Erst nach einem eher großen Mutationsschritt konnte das Zwischenminimum vom Evolutionsverfahren überwunden werden.

Bei diesen Versuchen ging es aber nicht wirklich um Zufall, denn vom bekannten Ziel her waren „Entwicklungsrichtung“ und „Falsch“ definiert. Es war vielmehr eine sinnvolle zielgerichtete Entscheidung, also keine zufälligen Prozesse, sondern eine intelligente Auswahl.

<sup>1</sup> /MEYE-89/: Sonde zur Messung des Gesamtdrucks (dynamischer und statischer Druck) in strömenden Flüssigkeiten und Gasen.

Gesamtdruck am Pitotrohr ist Maß für den Strömungsdurchsatz

2. Optimierungsverfahren



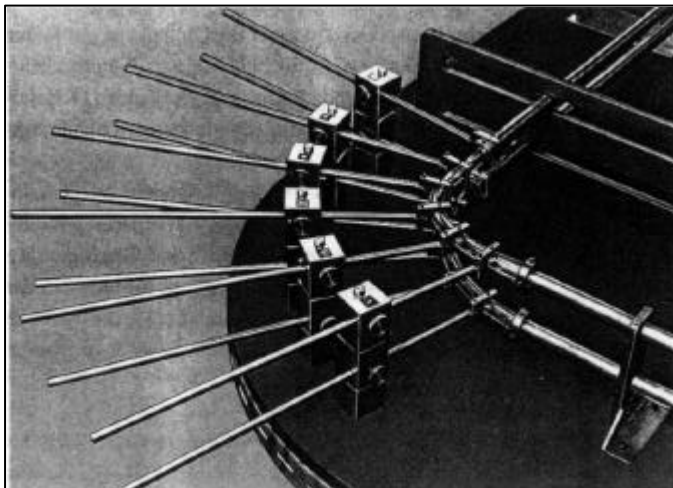
Nun wurden die Randbedingungen geändert: der vordere Lagerungspunkt der Platte wurde um  $\frac{1}{4}$  der Plattentiefe gegenüber dem hinteren Lagerungspunkt angehoben. Dies ist quasi eine Umweltveränderung – da aber der Windkanal nicht änderbar ist, muss die Platte gekippt werden. Die Platte ist nun um 14 Grad gegen den Luftstrom angestellt. Den geringsten Strömungswiderstand erreicht man mit einer S-förmigen Wölbung der Platte.

Gegenwärtig ist es unmöglich diese Optimallösung zu berechnen. Allerdings hat sie in der Praxis auch nur wenig Bedeutung.

3.2. Rechtwinklige Rohrumlenkung

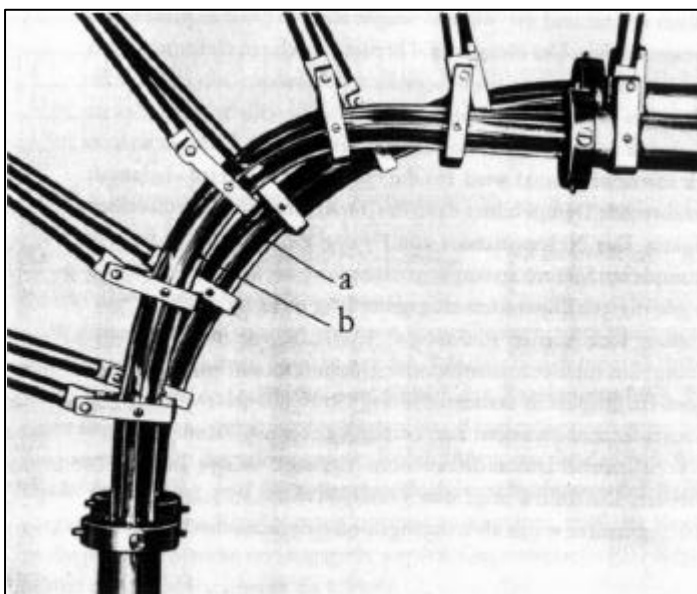
Gesucht ist in diesem Versuch das Rohr mit dem kleinsten Umlenkverlust.

Der Versuchsaufbau ist folgender: Ein flexibler Kunststoffschlauch, der in der Anlaufstrecke in



einem geraden Rohr geführt wird. Sechs verschiebbare Stangen halten ihn in der Kurve und in der Beruhigungsstrecke wird der Schlauch wieder in einem Rohr geführt. Am Ende des Schlauches befindet sich in der Mitte ein Pitotrohr. Für das Experiment werden zwei auf diese Art „präparierte“ Schläuche benötigt – einer, der variiert wird und einer zum Vergleich. Die sechs Stangen sind im Versuch die sechs Parameter des Systems. Zu Beginn werden beide Krümmen in eine Viertelkreisform gebracht. Nun wird der eine Krümmen entsprechend dem Evolutionsalgorithmus variiert.

Am Ende ergab sich ein Optimalkrümmer, mit einer von der Geraden stetig zunehmenden Krümmung (Klothoide). Diese Lösung des Problems wäre einem Strömungstechniker vorher nicht bekannt gewesen.

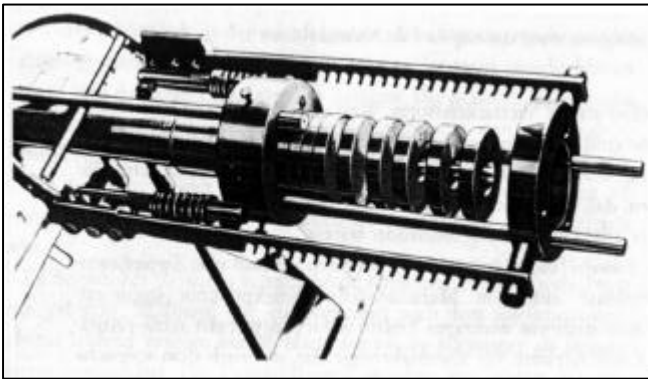


a – Anfangsform des Krümmers  
b – Optimalform des Krümmers

Der Umlenkverlust beim Optimalkrümmer ist um 10% kleiner, als der des Viertelkreiskrümmers. Berücksichtigt man allerdings die Reibung, so hat der hier verwendete Optimalkrümmer nur noch einen um circa 2% geringeren Widerstand. Die Bogenlänge  $L$  des Krümmers ist im Experiment sehr groß gegenüber dem Rohrdurchmesser  $D$  ( $L/D = 31,4$ ). Somit wird der Formgewinn durch den Reibungsverlust verdeckt. Bei einem kleineren Verhältnis  $L/D$ , was in der Praxis üblich ist, wäre die Optimierung lohnender.

### 3.3. Zweiphasen-Überschalldüse

Die Zweiphasen-Überschalldüse wurde von H. P. Schwefel /KLOC-70/ entwickelt. Es handelt sich um ein wichtiges Teilstück für ein Kleinkraftwerk für Raumfahrzeuge. Es kommt zur Beschleunigung in einer konvergent-divergenten Düse. Der Druck wird in der Düse soweit abgesenkt, bis die Flüssigkeit teilweise verdampft. Hierbei kommt es zu sehr komplexen Strömungsvorgängen, deren Berechnung derzeit unmöglich ist. Deshalb bediente man sich des Mutations-Selektions-Prinzips.



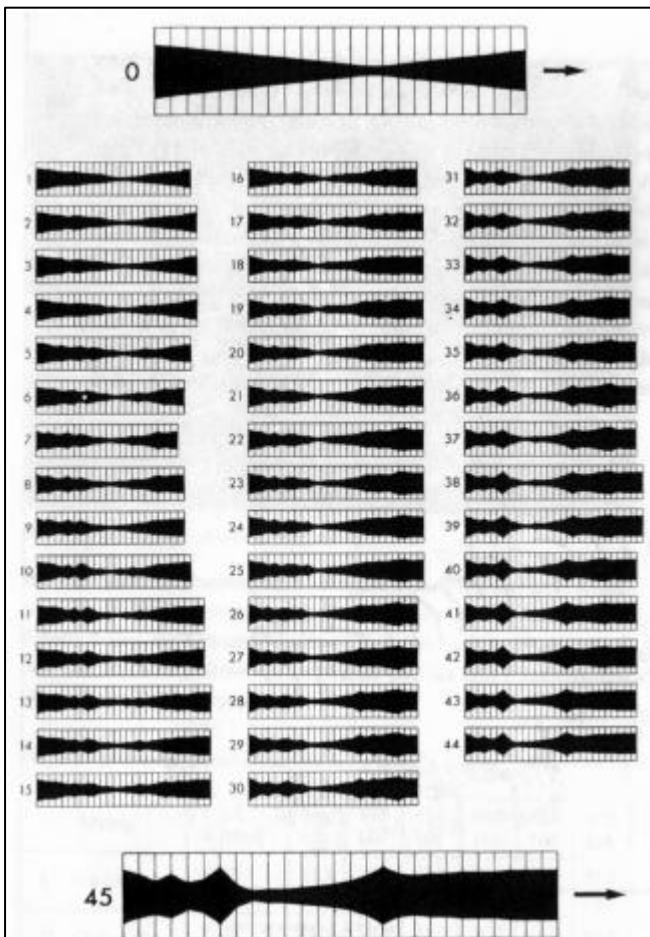
Die rotationssymmetrische Düsenform wurde aus Segmenten aufgebaut. Sie besaßen passende konische Innenbohrungen. Insgesamt waren 330 verfügbar, so dass  $10^{60}$  mögliche Düsenformen erschaffen hätten werden können. Das Experiment startete man mit einer Lavaldüse mit besonders langem Einlauf. Als Modellmedium verwendete man ein Wasser – Wasserdampf – Gemisch. Gesucht war die Düsenform, die den maximalen Impuls liefert. Die Variation wurde in zweifacher Art durchgeführt:

1. Der Durchmesser wurde an zufällig gewählten Stellen abgewandelt. Damit keine Sprünge entstehen, wurden stets zwei nebeneinanderliegende Segmente gewechselt.
2. Die Segmentzahl war veränderbar, indem man an zufälliger Stelle ein Segment neu einsetzte oder entfernte. (Ähnlich der Gen-Duplikation bzw. -Deletion in der Natur.)

Der Durchmesser wurde öfter als die Segmentzahl variiert.

Das Ergebnis ist eine völlig überraschende Düsenform, deren Wirkungsgrad bei fast 80% liegt. Die konische Ausgangsform hatte einen Wirkungsgrad von nur 55%.

Dieses Optimierungsexperiment wurde an der TU Berlin durchgeführt. Es war sehr kostspielig, so dass kein weiterer Versuch gemacht werden konnte.

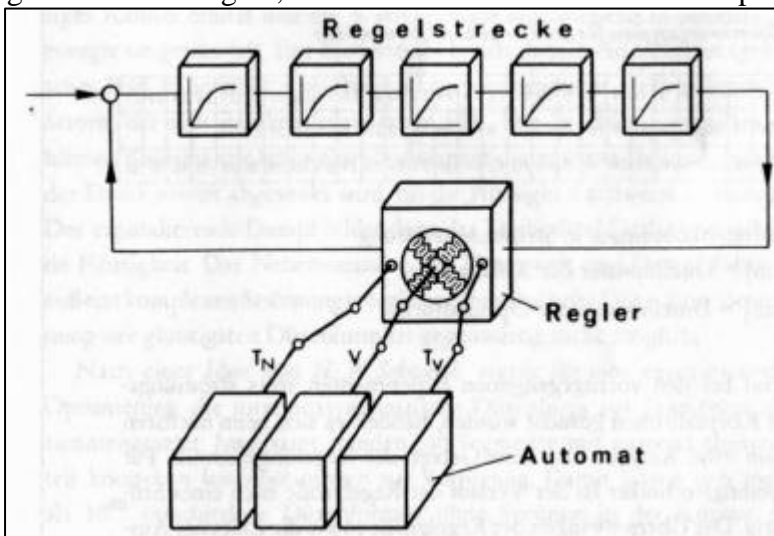


### 3.4. Regleroptimierung

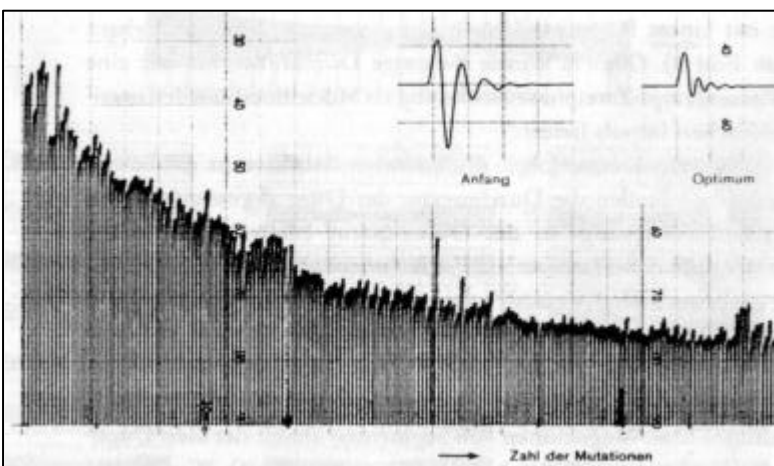
Hierbei geht es um den für einen Regelungstechniker wichtigen Verlauf der Regelgröße nach einer Störung. Unerwünschte Begleiterscheinungen eines Regelvorgangs sind das Überschwingen der Regelgröße oder die Zeit zum Ausregeln der Störung. Für einen optimalen Regelvorgang muss der Regler erst an die jeweilige Stelle angepasst werden. Dafür besitzt der universelle PID<sup>1</sup>-Regler drei Parameter:

- die Verstärkung  $V$
- die Nachstellzeit  $T_N$
- die Vorhaltezeit  $T_V$

Diese können eingestellt werden. Wenn man einen PID-Regler im Betrieb optimal einstellen will, gibt es Einstellregeln, die teilweise aber erheblich vom Optimum abweichen.



Nun soll in einer pneumatischen Regelanlage ein PID-Kreuzbalgregler mit Hilfe des Mutations-Selektions-Prinzips optimal eingestellt werden. Dies geschieht mit einem Automaten und nicht, wie in den anderen Experimenten, durch einen Evolutionsstrategen. Der Automat erzeugt die Verstellbefehle, also Mutationen, und diese werden dann über Gelenkwellen auf die Justierschrauben des Reglers übertragen. Um die Güte der Regelung nach einer impulsförmigen Störung am Eingang



der Regelstrecke zu bewerten, bildete man das Integral über den Absolutwert der Regelabweichung. Die Integralbildung wurde auf einem Analogrechner nach Umformung des Drucksignals in elektrische Spannung vorgenommen. Die Fläche muss am Optimum minimal sein. Da durch die Selbstoptimierung Parameterwerte eingestellt werden können, bei denen die Stabilitätsgrenze des Regelkreises überschritten wird, dies aber nicht zulässig ist, schaltete der

Automat die Regelparameter sofort zur letzten Besteinstellung zurück, falls die Integration der Regelfläche einen höheren Wert als den derzeitigen Optimalwert ergab.

Solche Automaten lassen sich zur Lösung zahlreicher Optimierungsaufgaben einsetzen, wenn sich das Versuchsobjekt durch Drehknöpfe verstellen lässt. Die Größe des Automaten kann sich dabei nach der Größe der Parameter richten, weil der Automat aus einzelnen kettenförmig angeordneten Bausteinen besteht.

<sup>1</sup> zeitliches Übertragungsverhalten eines Reglers; P - proportional, I - Integral, D - Differential  
/GRAE-64/:Eine verzögerte und nachgebende Rückführung erzeugt ein PID-Verhalten.

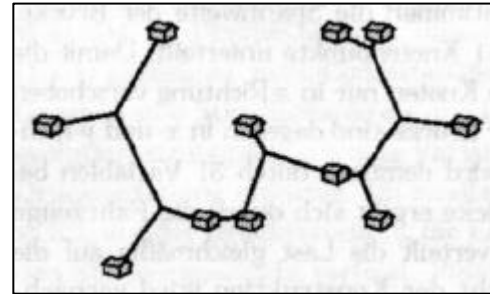
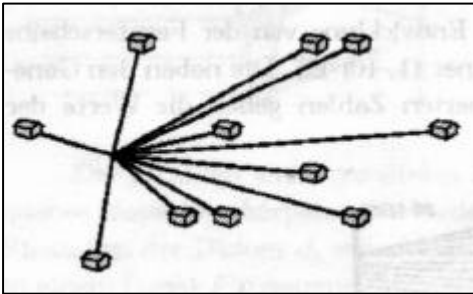
### 3.5. Fernsehverkabelung

Das Kabelfernsehen kommt nach Schilda. Das Hauptkabel endet am Marktplatz. Nun ist ein Verkabelungsplan gesucht, bei dem die benötigten Kabel eine minimale Gesamtlänge haben. Der Geometer von Schilda hat gelernt: die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten ist eine Gerade. Danach stellt er seinen Plan auf. Der Evolutionsstrategie findet aber eine bessere Lösung. Wie? Er benutzt eine variationsfähige Verbindungsgeometrie, ein Verbindungsnetz aus Dreierverzweigungen mit x-y-verschiebbaren Knoten:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \rightarrow \min$$

mit:  $Q$  - Gesamtstreckenlänge  
 $\Delta x$  - Änderung der x-Koordinaten der Knoten  
 $\Delta y$  - Änderung der y-Koordinaten der Knoten

Der Evolutionsstrategie benötigt somit 40% weniger Kabel.



Die Form der Minimallösung ist abhängig von der gewählten Netztopologie. Die Reihenfolge in der die Häuser „mathematisch“ verkabelt werden, ist bei der Optimierung nicht änderbar. Also ist die gefundene Lösung nur ein lokales Optimum. In der Natur ist das aber genauso, von einer vorhandenen Struktur (Topologie) ist nur schwer wegzukommen: die Grundform des Skeletts der Fische wurde bei der Landtierwerdung nicht neu entworfen, sondern nur neu modifiziert. Um das globale Optimum für das Verkabelungsbeispiel zu finden, muss die Optimierung für alle anderen Verknüpfungstopologien wiederholt werden. Dies ist in der Natur allerdings fast unmöglich.

#### 4. Zusammenfassung

Das Prinzip Zufall erzeugt eine neue sinnvolle Struktur. Es kommt also zu einer zufälligen Verbesserung der Überlebens –und Vermehrungsfähigkeit. Allerdings kann nur bei äußerst simplen Strukturen auf diese Weise eine sinnvolle Veränderung stattfinden. Deshalb gilt: Je komplexer eine Veränderung sein muss, um einen Selektionsvorteil zu gewähren, desto unwahrscheinlicher ist deren Eintreten.

Die Evolutionsmethode „Mutations-Selektions-Prinzip“ führt selbst in vereinfachter Version, der zweigliedrigen Wettkampfsituation, zur Optimierung des technischen Systems.

Die mehrgliedrige Wettkampfsituation entstand von selbst: durch identische Selbstverdopplung, bei der ab und zu „Fehler“ passierten, entstanden aus der ehemaligen Struktur veränderte Molekülgruppen. Diese wurden eliminiert, wenn sich die Fitness im Vergleich zur Ausgangsstruktur verschlechtert hatte oder bevorzugt vermehrt, wenn sich die Fitness verbessert hatte.

Das Urverfahren Mutation-Selektion wurde im Laufe der langen Evolution nicht durch ein anderes abgelöst, deshalb ist es der Nachahmung wert.

Der Wirkungsgrad der Evolutionsstrategie müsste sich durch Hinzunahme des Crossing-over-Prinzips (Crossing-over der Chromosomen) verbessern.

## 5. Literatur

/BREH-01/:

Brehme, S. und Meincke, I.:  
Wissensspeicher Biologie  
Berlin: Volk und Wissen, 2001

/GRAE-64/:

Gräßler, R.:  
Lehrbuch der Automatisierungstechnik  
VEB Verlag Technik, Berlin, 1964

/KLOC-70/:

Klockgether, J. and Schwefel, H.-P.  
Two-phase nozzle and hollow-rod jet experiments.  
Proc. 11. Symp. on Eng. Aspects of MHD, Cal. Inst. Techn.,  
1970, pp 141-148

/MEYE-89/:

Meyers Lexikonredaktion:  
Das neue Duden-Lexikon in 10 Bänden, Band 7  
Dudenverlag Mannheim/Wien/Zürich, 1989

/RECH-73/:

Rechenberg, I.:  
Evolutionsstrategie – Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution,  
Stuttgart: Frommann-Holzboog 1973,  
Teil A, Seiten 13 bis 41

/RECH-00/:

Rechenberg, I.:  
Vorlesungsskript Bionik I,  
TU Berlin, WS 2000/2001

Borlinghaus, W.:

Bionik – Wie intelligent ist die Natur?  
[www.fh-zwickau.de/esg/bionik.htm](http://www.fh-zwickau.de/esg/bionik.htm) bzw. [www.hld-soft.de/bionik01.htm](http://www.hld-soft.de/bionik01.htm)

Bionik & Evolutionstechnik

TU Berlin, FG Bionik und Evolutionstechnik, Leiter: Prof. Dr.-Ing. I. Rechenberg  
[www.bionik.tu-berlin.de](http://www.bionik.tu-berlin.de)

Mircosoft<sup>®</sup> Encarta<sup>®</sup> '99 Enzyklopädie Plus