

# DIE ANWENDUNG DER GENETISCHEN ALGORITHMEN IM KONSTRUKTIONSPROZESS

György VANCSEY and Tibor BERCESEY

Institut für Maschinenkonstruktionslehre  
Technische und Wirtschaftswissenschaftliche Universität Budapest  
H-1521 Budapest, Ungarn

Eingegangen: 14. September 2000

## Abstract

The aim of product development is to meet, even more, to form and evolve any requirements of the chosen market segment. It is only possible via the early recognition of real demands and developing products which are flexibly adjustable to the permanently changing needs. Establishment of constructional variants adjusted to a system of abstract requirements with the use of artificial intelligence methods may be faster and their evaluation more objective. Via the example of planar linkage mechanism this paper presents how to apply genetic algorithms in different phases of the constructional design process. The presented method gives a procedure for the automatic solution of problems emerging in early, conceptual phases of the constructional design process.

*Keywords:* pseudo-optimum, automatic synthesis, genetic algorithms in the constructional design process.

## 1. Einführung

Das Ziel der Produktentwicklung ist die Bedürfnisse des gezielten Marktsegments *wirtschaftlich* zu erfüllen. Die existierenden Produkte sind den permanent ändernden Forderungen *wirtschaftlich* anzupassen.

Die Entwicklung wettbewerbsfähiger Produkte ist erst dann gewährleistet, wenn die Entwicklung (das eingesetzte Personal) in der Lage ist, die wahre Forderungen *rechtzeitig* zu erkennen, zu bewerten und darauf zu reagieren. Die konsequente Anwendung der künstlichen Intelligenz (KI) ist zwar alleine nicht ausreichend, jedoch ist sie eine effektive Hilfe, um die Konkurrenzfähigkeit der Produkte zu steigern.

Durch das Beispiel der automatischen Synthese ebener Gelenkmechanismen werden die Anwendungsmöglichkeiten der genetischen Algorithmen im Konstruktionsprozeß dargestellt.

## 2. Das Zielprodukt

Ein wettbewerbsfähiges Produkt ist für seine Funktion bestens geeignet. Seine Anwendung von der Installation an bis zur Entsorgung verursacht keine Probleme.

Es ist mindestens in einer gewissen Hinsicht besser als die Konkurrenz. Während des Entwicklungsprozesses darf man die folgenden zwei Kriterien nicht vergessen: das optimale Produkt ist günstiger (zu herstellen) und besser als seine Konkurrenten.

Die globalen Forderungen dem Produkt gegenüber sind meist bekannt. Die genauen Pflichten (Sollfunktionen, Sollwerte, . . . usw.) bleiben aber oft undefiniert, da sie auch für den künftigen Anwender unklar sind. Es ist oft erst nach jahrelanger Anwendung zu bestimmen, wo eventuell weitere Anpassungen, bzw. Verbesserungen noch erwünscht sind. Eine intensive Zusammenarbeit zwischen Vertrieb und Entwicklung ist unvermeidbar, um die Mode und den Trend voneinander noch rechtzeitig trennen zu können. (Achtung! Mode und Trend sind hier im 'technischen Sinn' zu verstehen. Durch die Umwandlung von – noch nicht ausgereiften – Wünschen auf rationale, technisch vertretbare Zielsetzungen kann die Entwicklung Vorsprung gewinnen.)

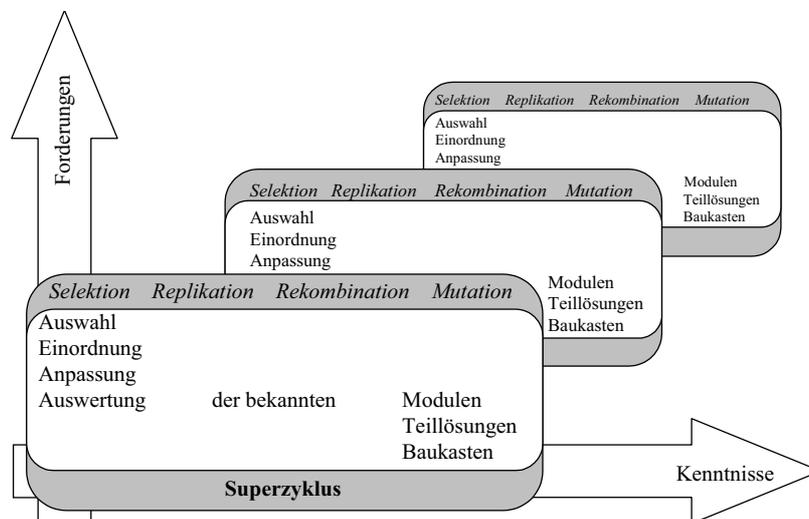


Abb. 1 Zyklus: Erscheinung eines neuen Wunsches – Bestimmung der Entwicklungsziele – Abgeltung des Bedarfs

### 3. Die Marktbedürfnisse

Das Zustandekommen eines Produkts wird durch die Absicht der Abgeltung eines existierenden oder zu erzeugenden Bedarfs initiiert. Die Lösung erzeugt sofort neue Forderungen, bzw. neue Ideen für die Erzeugung neuer Bedürfnisse. Gerade wegen der zyklischen Entwicklung der Ansprüche bleibt der Fortschritt der Kenntnisse erhalten (Abb. 1).

Die Lösung kann z.B. als eine neue oder neuartige Kombination, Anpassung oder Modifikation vorhandener Module und Bausteine gewählt aus einem – evtl. fremden – Anwendungsbereich entstehen. (Die Anwendungen neuer physischen Wirkprinzipien sind – vom praktischen Standpunkt aus – zu vernachlässigen.)

Bei der Erscheinung eines neuen Wunsches ist es zu prüfen, ob die Ziele technisch begründet, d.h. rationell sind. Mode soll nicht (unbedingt) verfolgt werden, Trends müssen gestaltet werden.

#### 4. Die iterative Produktentwicklung

Aufgrund der zyklischen Entwicklung der Forderungen müssen die Entwicklungsziele ständig angepaßt werden. Schon während des Konstruktionsprozesses werden zum Teil von dem Konstrukteur selbst initiiert, zum Teil durch 'design reviews' zusätzliche Änderungswünsche zu den Pflichten erzeugt, wodurch Installation, Anwendung, (evtl. Herstellung, Entsorgung) des Produktes erleichtert, bzw. die Funktionssicherheit erhöht werden. Durch das wiederholende Umkonstruieren werden viele Schritte zwangsweise mehrmals durchgeführt, somit die effektive Entwicklungszeit drastisch reduziert. Diese iterative Anpassung fordert zusätzliche Kapazität in der Entwicklung.

Heute existieren solche – oft eine KI-Strategie einsetzende – Software-Produkte [3], [8], womit das zyklische Umkonstruieren wirtschaftlich zu lösen ist. Bei deren Anwendung muß zwar die Aufgabe mit Hilfe von abstrakten mathematischen Mitteln beschrieben werden, aber gerade dieser Zwang zeigt oft den zweckmäßigen Weg zur optimalen Lösung; macht eindeutig, welche Bereiche weitere Analyse benötigen und hilft die vorhandenen Widersprüche [7] aufzulösen.

Die KI-Forscher haben vorher meist auf die geometrischen Optimierungsprobleme der Konstruktion konzentriert, es wurde auf die Unterstützung des ganzen Konstruktionsprozesses weniger geachtet. Der Konstruktionsprozeß verlangt Infrastruktur, Methoden, Strategien und gut organisierte Kommunikation, um die Aufgaben verteilen, die Ergebnisse analysieren und die Konflikte detektieren zu können.

Das Konstruieren ist – im Wesentlichen – als die Kombination von unterschiedlichen physischen Wirkprinzipien, bzw. von geeigneten Modulen, Bausteinen zu beschreiben, da eine Konstruktion meist aus Teilen mit unterschiedlichen Funktionen zusammenzustellen ist, wobei deren Kopplung mit definierten Bedingungen ermöglicht ist. Die entscheidende 'Idee', womit die Aufgabe eigentlich gelöst wird, stammt oft aus einem fremden Anwendungsgebiet. Die Kreativität liegt eben darin, das geeignete Muster zu finden, das allen Randbedingungen und Forderungen entspricht.

Es sind in der Praxis unzählige Muster vorhanden, deren freie Kombination ebenso unzählig ist. Die konstruktiven Varianten müssen objektiv bewertet werden. Dazu wird eine rechnerintegrierte Wissensbasis benötigt, wo die Struktur und die Funktion der einzelnen Komponenten und deren Schnittstellen einheitlich

beschrieben sind.

Für die automatisierte Erzeugung und Bewertung konstruktiver Varianten erscheinen die Algorithmen eines natürlichen Evolution-Modells [4], die sog. EAs (evolutionary algorithms) als geeignet. Ein vereinfachtes Modell der natürlichen Evolution wird hier verwendet, wo nur die sog. Selektions-, Replikations-, Rekombinations- und Mutations-Operatoren eingesetzt werden. Die Individuen, die günstigere Eigenschaften haben, können deren Genen mit größerer Wahrscheinlichkeit weitergeben. Wird das stochastische Suchen mit definierten Randbedingungen gestartet, werden die aufeinanderfolgenden Varianten immer grössere Leistungsparameter, einen besseren Wirkungsgrad, ... usw. haben.

## 5. Das Pseudo-Optimum

In dem eingesetzten Evolutionsmodell werden aus einer Wissensbasis zufälligerweise Module und Bausteine zuerst ausgewählt, modifiziert, an- und anschließend zusammengepaßt. Die erzeugten Varianten werden miteinander verglichen. Wie ein Vergleich objektiv durchgeführt werden kann, wird hier beschrieben.

Während des Konstruktionsprozesses wird meistens eine mehrparametrische Optimierung gefordert. Inwieweit das Produkt die Erwartungen erfüllt, kann man mit dem gewichteten Mittelwert z.B. mit Hilfe eines 'Spinnennetzes' einfach darstellen, bzw. zwei oder mehrere Konkurrenzprodukte objektiv vergleichen (Abb. 2). Das gewichtete Mittel ist proportional zu der Konkurrenzfähigkeit des Produktes in einem Markt, wo die dargestellten Werte gelten. Daher ist es besonders wichtig, die einzelnen Kennwerte realistisch (d.h. nach dem in ausgewähltem Markt geltenden Wertesystem) einzustufen. Die auf den einzelnen Achsen dargestellten Werte

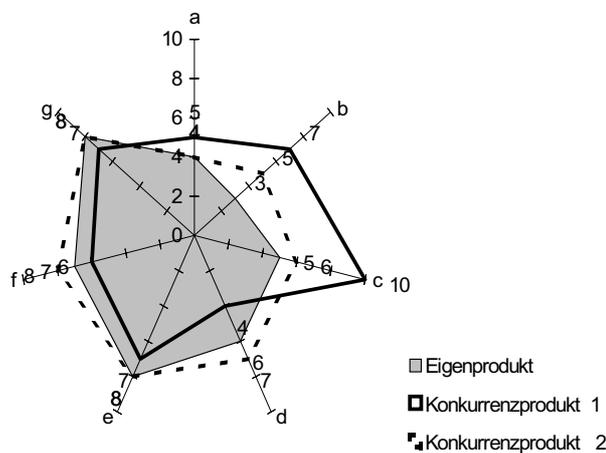


Abb. 2. Darstellung der Relation zwischen Konkurrenzprodukten

$(a, b, \dots, g)$  sind die Zielwerte der Optimierung  $Z(\underline{x})$ , die von den zu optimierenden Kennwerten  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) nach bestimmten Kriterien  $c(\underline{x})$  abhängig sind:

$$Z(\underline{x}) = c(\underline{x}) \Big|_{x=x_{\text{opt}}} \rightarrow \text{Extr.} \quad (1)$$

wobei noch weitere Bedingungen z.B.:

$$q_j(\underline{x}) \leq 0 \quad (2)$$

( $j \leq k$ ) erfüllt werden müssen. Die  $Z(\underline{x})$  Zielfunktion ist z.B. im globalen Minimum, wenn für alle  $\underline{x}$  gilt:

$$Z(\underline{x}_{\text{opt}}) < Z(\underline{x}). \quad (3)$$

Bei den genetischen Algorithmen wird die Bestkonstellation mit stochastischer Suche, also mit methodischem Versuch (Zufallauswahl der Kennwerte) und Auswertung (Berechnen der Zielwerte) – herausgefunden. Bei mehreren Zielfunktionen werden gewichtete Zielwerte summiert. Die einzelnen Gewichte entsprechen dem in ausgewähltem Markt geltenden Wertsystem. Die auf diese Weise gewichtete Summe beschreibt die Konkurrenzfähigkeit eines Produktes auf dem gewählten Markt. Ziel der Optimierung ist eine Parameterkonstellation zu erreichen, wobei das Eigenprodukt besser, wettbewerbsfähiger ist, als alle Fremdprodukte.

Trotz der alltäglichen Praxis wird zuerst angenommen, daß alle Erwartungen dem künftigen Produkt gegenüber am Anfang des Konstruierens bekannt und widerspruchsfrei sind.

## 6. Anwendungen

Das nachstehende Beispiel stellt die Wirksamkeit der angewandten Algorithmen in den unterschiedlichen Phasen des Konstruktionsprozesses dar, die in mehreren unterschiedlichen Anwendungsfällen erfolgreich getestet worden sind. Bei den eingesetzten Algorithmen:

- bleibt die Größe der Population unverändert, d.h. die Anzahl der Eltern und Nachkommen ist gleich;
- wechseln die Nachkommen die Elterngeneration vollständig ab;
- haben die Individuen binarische, haploid Chromosomen, d.h. die Sachmerkmale der Module und Bausteine sind im Binärsystem dargestellt. Der einzelne Parameterwert liegt zwischen einem vorgegebenen Mindest- und Höchstwert ( $P$ -Parameterwert;  $i$ -binäre Größe;  $n$ -Anzahl der Zeichen, woran die binäre Größe dargestellt ist):  $P = \frac{i}{2^n - 1}(P_{\max} - P_{\min}) + P_{\min}$ . Die Parameter werden im Binärformat nach einer vorgegebenen Reihenfolge einfach (ohne Redundanz) aufgelistet;
- wird die Länge des Chromosoms festgehalten;

- wird kein Inversion-Operator eingesetzt, d.h. die Reihenfolge der Sachmerkmale im Chromosom bleibt unverändert;
- wird der sog. ‘One-Point-Crossover’-Operator angewendet, d.h. zwei Chromosomen werden verändert wie folgt:

$$\begin{aligned} \mathbf{abcde} &\rightarrow \mathbf{abcDE} \\ \mathbf{ABCDE} &\rightarrow \mathbf{ABCde}. \end{aligned}$$

Der Kreuzungspunkt liegt immer an der Parametergrenze.)

- hängt die Auswirkung der Mutation von der Vielfältigkeit der Population ab, d.h. je einheitlicher die Population ist (und je ähnlicher die Individuen in gleicher Generation sind), desto größere Auswirkung hat eine Zufallsänderung im Chromosom eines Individuums;
- steht die Güte (Fitneß) eines Individuums immer in Relation zu den anderen Individuen der Population.

Die genetischen Algorithmen sind sowohl für Erzeugung von *Varianten* bekannter Lösungen, als auch für deren *Anpassung* an neue Forderungen; Erarbeiten *neuer Lösungsprinzipien* oder neue Auswahl und Kombination bekannter Teillösungen geeignet.

Das Beispiel stellt die automatische Synthese der ebenen Gelenkmechanismen dar. Nach der Definition der Sollkurve und der Randbedingungen wählen die genetischen Algorithmen den Typ und die Geometrie der optimalen Gelenkmechanismen automatisch aus.

## 7. Bahnbeschreibung mit Hilfe von ebener Gelenkmechanismen

Die Anwendung ebener Gelenkmechanismen kommt – in erster Linie wegen der sehr einfachen Herstellbarkeit und geringer Instandhaltungskosten – u.a. in der Verarbeitungsindustrie und in der Verpackungsindustrie öfters vor. Jedoch fordert die Entwicklung der Mechanismen mit unterschiedlichen kinematischen Verhältnissen besonders umfassende und doch sehr spezifische Kenntnisse. Der Konstrukteur muß nicht nur in der Lage sein, alle Kenngrößen gleichzeitig zu optimieren, sondern auch den passenden Typ des Mechanismus auswählen zu können. Bei dem vorgestellten Verfahren, das mit Hilfe von genetischen Algorithmen funktioniert, soll der Anwender außer der Sollkurve nur den zulässigen Bauraum definieren, die optimierte Lösung wird von dem System – quasi selbst – ausgewählt: die Mechanismen, deren Typ und Parameter unterschiedlich sind, werden eingesetzt, ausgewertet, die besseren Lösungen werden miteinander kombiniert, bestimmte Kennwerte werden zufälligerweise verändert, bis ein Pseudooptimum hergestellt wird. Die Synthese der ebenen Gelenkmechanismen ist also mit den genetischen Algorithmen verwirklicht worden.

### 7.1. Anwendung bei der Getriebeanalyse

Die Grundform der Koppel- oder Kurbelgetriebe, die ausschließlich Drehgelenke aufweist, ist das Gelenkviereck (Abb. 3). Trotz oder gerade wegen des sehr einfachen Aufbaus wird es zur Lösung vieler Positionier- und Bewegungsaufgaben verwendet. Die Verwirklichung von vorgegebenen Bahnkurven bestimmter Punkte der Koppel ist bei sogenannten Führungsgetrieben ein wichtiges Einsatzgebiet. Bei der Entwicklung und Konstruktion eines derartigen Getriebes kann man in der Regel davon ausgehen, daß der zu realisierende Bewegungsablauf bekannt ist und daß die Abmessungen des Getriebes zu ermitteln sind. Man spricht dann von Maßsynthese.

Es gibt also ein ebenes Gelenkviereck (a), dessen Gestaltpunkte innerhalb eines zulässigen Gebietes (b) bleiben müssen und bei dem der Punkt  $B_1$  eine bestimmte Laufbahn (c) beschreiben soll. Es besteht aus zwei Kurbeln ( $A_1 - P_1$

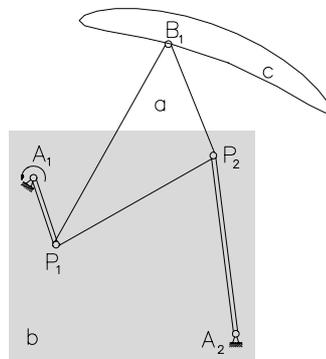


Abb. 3. Ebenes Gelenkviereck

und  $A_2 - P_2$ ), die in den Punkten  $A_1$  und  $A_2$  drehbar im Gestell gelagert sind. Der Koppel verbindet beide Kurbeln über die Drehgelenke  $P_1$  und  $P_2$ . Um den Bewegungszustand eines kompletten Systems zu erfassen ist es erforderlich, den Freiheitsgrad oder Laufgrad  $F$  des Getriebes zu kennen. Im allgemeinen läßt er sich nach GRÜBLER [11] in folgender Weise ermitteln:

$$F = b(n - 1) - \sum_{(i)} u_i - \sum_{(k)} f_{id,k} \quad (4)$$

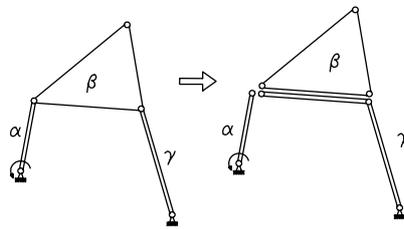
- mit:  $F$  = Freiheitsgrad;  
 $n$  = Anzahl der Glieder;  
 $b$  = Parameter zur Kennzeichnung der Dimension der Kette ( $b = 3$  für eine ebene und  $b = 6$  für eine räumliche Kette);  
 $u$  = Bewegungsunfreiheit;  
 $f_{id}$  = identischer Freiheitsgrad.

Für das in *Abb. 3* gezeigte Getriebe hat  $F$  somit den folgenden Wert:

$$F = 3 \cdot (4 - 1) - (3 - 1) \cdot 4 - 0 = 1. \quad (5)$$

Das Gelenkviereck ist also zwangsläufig, d.h., bei Vorgabe des Antriebs an der Kurbel  $A_1 - P_1$  ist auch der Bewegungszustand des Koppels  $P_1 - P_2$  und der anderen Kurbel  $A_2 - P_2$  bekannt. Um das Gelenkviereck zu beschreiben, werden die folgenden Grundeinheiten betrachtet (*Abb. 4*):

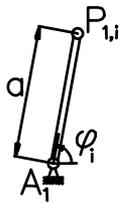
- Antriebsglied  $A_1 - P_1$  ( $\alpha$ );
- Koppelkörper  $P_1 - B_1 - P_2$  ( $\beta$ );
- Zweischlag  $P_1 - P_2 - A_2$  ( $\gamma$ ).



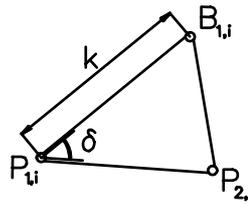
*Abb. 4.* Unterteilung des Gelenkvierecks

### 7.1.1. $\alpha$ -Antriebsglied $A_1 - P_1$

Sind  $A_1$ ,  $a$  und  $\varphi_i$  bekannt, ist  $P_{1,i}$  zu berechnen. Der Bewegungsablauf ist nach  $\varphi_i = \varphi_0 + i \cdot \Delta\varphi$  modellierbar. Bei der Wahl von  $\Delta\varphi = 4^\circ$  ist der Rechenprozeß ausreichend schnell ausführbar und das Ergebnis annehmbar genau (*Abb. 5*).



*Abb. 5.* Geometrie des Antriebsglieds



*Abb. 6.* Geometrie des Koppelkörpers

### 7.1.2. $\beta$ -Koppelkörper $P_1 - B_1 - P_2$

Bei konstanten Größen  $\overline{P_1 P_2}$ ,  $\overline{P_1 B_1}$  und  $\delta$  ändert sich  $\overline{P_2 B_1}$  nicht. Wenn  $P_{1,i}$ ,  $P_{2,i}$ ,  $\delta$  und  $k$  bekannt sind, ist die Lage des Punktes  $B_{1,i}$  zu beschreiben (Abb. 6).

### 7.1.3. $\gamma$ -Zweischlag $P_1 - P_2 - A_2$

Sind  $P_{1,i}$ ,  $A_2$ ,  $b$  und  $c$  bekannt, so sind  $P_{2,i}$  und  $P'_{2,i}$  in ihrer Lage fixiert. Es wird immer der zu dem vorhergehenden  $P_{2,i-1}$  näher liegende Punkt  $P_{2,i}$  oder  $P'_{2,i}$  ausgewählt (Abb. 7).

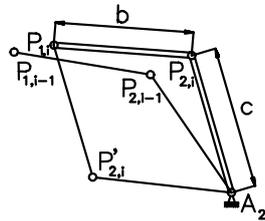


Abb. 7. Geometrie des Zweischlags

Das Antriebsglied ( $\alpha$ ) dreht sich um  $A_1$ . Der Zweischlag ( $\gamma$ ) ist zwangsläufig. Die Bahnkurve des Punktes  $B_1$  ist ebenfalls durch Glied ( $P_1 - P_2$ ) zwangsläufig. Die Bewegung der Getriebeglieder relativ zueinander ist nur durch Gliedabmessungen bestimmt, d.h., das Antriebsglied ( $\alpha$ ) kann sich nur bei bestimmten Voraussetzungen vollkommen herumdrehen. Falls diese Gliedabmessungen nicht erfüllt sind, bleibt der Gütewert Null (s.u.).

Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, daß nicht nur einfache Gelenkvierecke, sondern theoretisch gesehen auch andere, mehrgliedrige Getriebe relativ leicht beschrieben werden können.

## 7.2. Randbedingungen

In diesem Fall muß jede Gliedlänge ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) zwischen  $l_{\min}$  und  $l_{\max}$  liegen.

$$l_{\min} \leq l_{\text{GlieD}} \leq l_{\max} , \quad (6)$$

z.B.:  $l_{\min} = 0$ ;  
 $l_{\max} =$  durch Festigkeit oder Bauraum begrenzte Länge.

### 7.3. Das zulässige Gebiet

Die Gestaltpunkte  $A_1(x, y)$  und  $A_2(x, y)$  werden einfach nach Gleichung (7) und (8) in folgender Weise ausgewählt:

$$x_{\text{Grund,min}} \leq x_{\text{Gestaltpunkt}} \leq x_{\text{Grund,max}} , \quad (7)$$

$$y_{\text{Grund,min}} \leq y_{\text{Gestaltpunkt}} \leq y_{\text{Grund,max}} . \quad (8)$$

### 7.4. Die gewünschte (vorgeschriebene) Laufbahn

Punkt  $B_1$  soll eine bestimmte Laufbahn ( $c$ ) beschreiben. Um die Zielfunktion auf einfache Weise formulieren zu können, werden einfache Beschreibungsformen für die Sollkurven festgelegt, insbesondere soll die Übereinstimmung der Soll- und der Istverläufe bewertet werden.

Zur Beschreibung der Sollverläufe werden in der Regel diskrete Punkte verwendet. Die Punkte lassen sich (bei der einfachsten Betrachtung) mit Gerade verbinden. Jeder Strecke muß ferner ein Toleranzfeld zugeordnet werden, welches bei der Fehlerberechnung berücksichtigt wird. Die Eingabe wird sowohl graphisch als auch numerisch unterstützt.

Es ist möglich, zwei verschiedene Bahntypen einzugeben. Erstens eine Bahnstrecke, wobei der Sollpunkt nur innerhalb des Toleranzfelds liegen soll (Typ A), und zweitens eine solche, die mit Gleichgeschwindigkeit durchlaufen werden soll (Typ B). Typ A bedeutet den Abstand eines Punktes von einer Geraden und Typ B den Abstand von zwei Punkten. Im ersten Fall ist das Toleranzfeld ein Rechteck und im zweiten Fall ein Kreis.

In Abhängigkeit vom Antriebswinkel wird jedem Istpunkt der Koppelkurve genau ein Sollpunkt oder eine Sollgerade zugeordnet, wo der gedrehte Antriebswinkel mit der durchlaufenen Sollkurve eindeutig verknüpft ist. Dadurch wird gewährleistet, daß die Istpunkte immer den richtigen Sollgeraden zugeordnet werden. Es gibt folgende Zuordnung:

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_0 \rightarrow B_{1,0} \\ \varphi_i \rightarrow B_{1,i} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{i \cdot \Delta s}{L} , \quad i = 0, 1, 2, \dots, \left( \frac{2\pi}{\Delta\varphi} - 1 \right) , \quad (9)$$

mit:  $\varphi$  = Antriebswinkel ( $\varphi_i = \varphi_0 + i \cdot \Delta\varphi$ );  
 $i \cdot \Delta s$  = durchlaufene Sollkurve;  
 $L$  = Gesamtlänge der Sollkurve.

Wenn der Istpunkt innerhalb des Toleranzfelds liegt, gibt es keinen Fehler. Falls er außerhalb liegt, gilt folgender Fehler:

$$F_i = \overline{\text{Soll}P, \text{Ist}P} - X_a , \quad (10)$$

oder:

$$F_i = \overline{\text{SollGerade}, \text{Ist}P} - X_a , \quad (11)$$

mit:  $F_i$  = Einzelfehler;  
 $\frac{\text{Soll}P, \text{Ist}P}{\text{SollGerade, Ist}P}$  = Abstand von zwei Punkten;  
 $\frac{\text{SollGerade, Ist}P}{2 \cdot X_a}$  = Abstand eines Punktes von einer Gerade;  
 $2 \cdot X_a$  = Breite des Toleranzfelds.

Zu jedem Sollpunkt und zu jeder Sollgerade gehört ein Gewichtungsfaktor  $g_i$ , damit die Wichtigkeit der exakten Bahn berücksichtigt wird. Danach kann man z.B. mit der mittleren gewichteten Abweichung rechnen. Die Qualität des Gelenkvierecks läßt sich durch diesen Gesamtfehler nach folgender Beziehung gut charakterisieren:

$$\text{Güte} = \frac{1}{1 + F_g}. \quad (12)$$

So bleibt der Gütewert zwischen 0 und 1 bzw. 0 und 100%, was bei den genetischen Algorithmen eine leichtere Handhabung ermöglicht.

## 8. Lösung für das vorgegebene Beispiel

Gegeben sind folgende 8 Parameter:

Tabelle 1. Parameter eines Gelenkvierecks

Gestaltpunkte:	$A_1(x, y)$ und $A_2(x, y)$	4 Parameter
Länge der Glieder:	$a, b, c$	3 Parameter
Antriebswinkel:	$\varphi$	1 Parameter
$\sum$ Wahl zwischen $P_{2,0}$ und $P'_{2,0}$ (Abb. 7):		8 Parameter +1 Bit

Am Anfang der Rechnung hat das Zusatzbit eine Funktion. Es entscheidet, an welcher Seite der  $P_1 - A_2$ -Geraden der Punkt  $P_2$  liegt. Bei den weiteren Entscheidungen (zwischen  $P_{2,0}$  und  $P'_{2,0}$ ) spielt das Zusatzbit keine Rolle. Der Koppelkörper  $P_1 - B_1 - P_2$  ist in diesem Zusammenhang indirekt durch die Relativlage von  $(A_1 - P_1 - P_2 - A_2)$  und des Punktes  $B_1$  gegeben.

*Beispiel 1:*

Gegeben ist der Bauraum und die Sollkurve, die eine Geradföhrung ist. Die Kurve ist mit zwei Punkten  $B_{1,0}$  und  $B_{1,k}$  (wobei  $k = \pi/\Delta\varphi$  ist) gegeben. Von  $B_{1,0}$  zu  $B_{1,k}$  ist das Toleranzfeld relativ breit (Typ A), von  $B_{1,k}$  zu  $B_{1,0}$  ist es enger und hier ist auch eine Gleichgeschwindigkeit erforderlich (Typ B).

Der Ergebnismechanismus (Abb. 8) ist mit der Tschebyschewschen-Geradföhrung verwandt.

Alle Daten sind in mm angegeben.

$$\begin{aligned}
 A_1(12.00; 245.20) & a = 77.06 \\
 A_2(194.35; 94.00) & b = 184.35 \\
 & c = 204.82 \\
 & \varphi = 216^\circ
 \end{aligned}$$

Restriktionen:

$$\begin{aligned}
 70 & \leq a, b, c \leq 250 \\
 -50 & \leq X_{\text{Gestaltpunkt}} \leq 260 \\
 -50 & \leq Y_{\text{Gestaltpunkt}} \leq 256
 \end{aligned}$$

$$\text{Güte} = 35.06\%$$

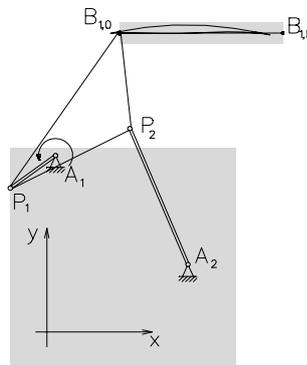


Abb. 8. Lösung für das vorgegebene Beispiel 1

Die einzelnen Parameterwerte werden berechnet, wie es am Beispiel von  $A_{1,x}$  dargestellt ist: Die Nummer '00110011' im Binärsystem ist gleich 51, damit:

$$A_{1,x} = \frac{51}{2^8 - 1} (260 - (-50)) + (-50) = 12. \quad (13)$$

Der Viergelenkmechanismus wird je  $4^\circ$  Verdrehen des Antriebsgliedes nachgerechnet. Ab  $B_{1,0}$  bis  $B_{1,k}$  ist die Breite des Toleranzfelds rel. groß:  $\pm 15$  mm und die einzelnen Fehler werden mit einem Faktor von 1 gewichtet. Von  $B_{1,k}$  bis  $B_{1,0}$  wurde die Breite des Toleranzfelds rel. eng gewählt:  $\pm 1$  mm und die einzelnen Fehler werden mit einem Faktor von 10 gewichtet.

Beispiel 2:

Diesmal besteht die Aufgabe darin, den Punkt  $B_1$  zwischen (100,0) und (0,0) möglichst gerade zu führen. Außerdem soll die Sollkurve den Geradführungsteil, der mit Gleichgeschwindigkeit durchlaufen werden soll (Typ B), möglichst senkrecht anfahren und auch wieder senkrecht verlassen.

Der Ergebnismechanismus (Abb. 9) ist fast eine  $\lambda$ -Geradführung.

Alle Daten sind in mm angegeben.

Die Güte wurde mit den folgenden Faktoren nach allen  $\Delta\varphi = 4^\circ$  Verdrehen des Antriebsgliedes berechnet:

von Punkt:	bis Punkt:	Gewicht	Breite des Tol. Felds
( 0; 0)	( 0; 55)	2	$\pm 5$ mm
( 0; 55)	(100; 55)	1	$\pm 35$ mm
(100; 55)	(100; 0)	2	$\pm 5$ mm
(100; 0)	( 0; 0)	10	$\pm 1$ mm

$$\begin{aligned}
 A_1(-99.00; 65.49) & a = 45.45 \\
 A_2(-19.67; -64.71) & b = 93.71 \\
 & c = 121.22 \\
 & \varphi = 115.76^\circ
 \end{aligned}$$

Restriktionen:

$$\begin{aligned}
 45 & \leq a, b, c \leq 160 \\
 -100 & \leq X_{\text{Gestaltpunkt}} \leq -15 \\
 -100 & \leq Y_{\text{Gestaltpunkt}} \leq 100
 \end{aligned}$$

$$\text{Güte} = 45.16\%$$

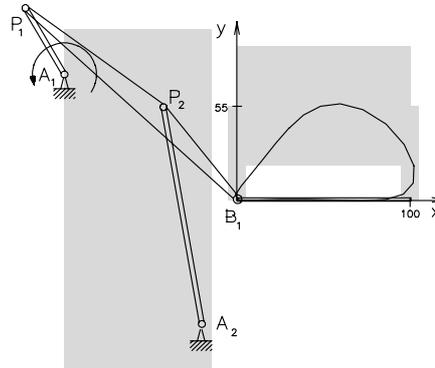


Abb. 9. Lösung für das vorgegebene Beispiel 2

## 9. Diskussion der Ergebnisse

- Der Optimierungsprozeß nach ca. 50–150 Generationen liefert annehmbare Lösungen mit einer Güte von 30–50% (Abb. 8 und 9) bei den folgenden Optimierungsparametern, die in *Tabelle 2* zusammengefaßt sind:

*Tabelle 2.* Die wichtigsten Optimierungsparameter

Versuchsreihe	I.	II.
Größe der Population	50	30
Anzahl der Gene	8	8
Länge des Chromosoms	257	65
Wahrscheinlichkeit der Mutation	0.032031	0.05
Wahrscheinlichkeit des Crossovers	0.597656	0.5

Die Versuchsreihe I. (*Tabelle 2*) wurde nach den Goldbergschen Konstanten gerechnet. Wegen des relativ langen Chromosoms ist der Suchraum groß, das Ergebnis ist relativ genau. Die Versuchsreihe II (*Tabelle 2*) ist schneller zu ermitteln, das Ergebnis ist aber vielleicht weniger genau. Die Wahrscheinlichkeit der Mutation wurde wegen der kürzeren Chromosomen größer gewählt. Bei der Ausarbeitung beider Aufgaben wurde der klassische Mutation-Operator eingesetzt.

Nach etwa 50–150 Generationen sind die automatisch generierten Lösungen akzeptabel. Es sind bei der Definition der Aufgabe nicht nur die Geometrie der Laufbahn, sondern auch weitere kinematische Eigenschaften zu definieren. Nachdem der Bauraum und die maximale Gliedlänge als Randbedingungen definiert sind, wird das Gelenkviereck, das die Sollkurve bestens

annähert, automatisch ermittelt [10].

2. Aus technischer Sicht sind die ebenen Gelenkmechanismen von größter Bedeutung. Wenn die Anzahl der Glieder  $n$ , und die von Gelenken  $m$  ist, sieht die Gleichung (4) wie folgt aus:

$$\Phi = 3 \cdot (n - 1) - 2m - 0 = 1, \quad (14)$$

wobei  $n$  und  $m$  positive Ganzzahlen sind. Die Lösungen der Gleichung (14) sind bei  $n = 2k$  ( $k = 2, 3, 4, \dots, i$ ):

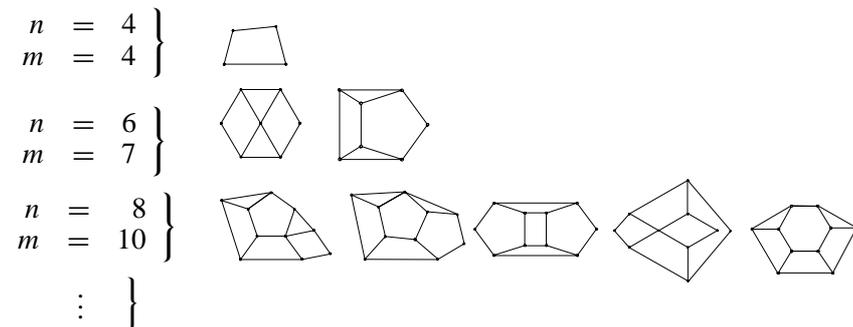


Abb. 10. Die Lösungen der Gleichung (14) bei  $n = 2k$  ( $k = 2, 3, 4, \dots, i$ )

Ist die Lösungsvielfalt auf die Fälle  $n = 4$  und  $n = 6$  begrenzt, sollen die folgenden Parameter gleichzeitig optimiert werden:

Tabelle 3. Die Optimierungsparameter der Gelenkmechanismen von 4 bis 6 Gelenken

Gestaltpunkte:	$A_i(x, y)$	4, 6 Parameter
Länge der Glieder:	$a, b, c, k \dots$ usw.	3, 7 Parameter
Antriebswinkel:	$\varphi, \delta \dots$ usw.	1, 3 Parameter
$\Sigma$		8, 14 Parameter

Diese Auflösung ermöglicht – in der Praxis – die gleichzeitige Handhabung der Mechanismen aus neun unterschiedlichen Gattungen, die aus den ersten drei Typen der Abb. 10 abzuleiten sind. Bestimmte Gelenke müssen als Gestaltpunkt fix gehalten werden, während die anderen – nach der gewählten Geometrie – beweglich bleiben. Es wird zuerst von den Daten des Punktes  $A_1$ , die Gliedlänge  $a$  und des Antriebswinkels  $\varphi_i$  der Punkt  $P_{1,i}$  ermittelt (Antriebsglied). Nachdem die Punkte  $P_{1,i}$  und  $A_2$  bekannt sind, ist der Punkt  $P_{2,i}$  mit Hilfe von  $b$  und  $c$  Gliedlängen zu rechnen (Zweischlag). Von den Punkten  $P_{1,i} - P_{2,i}$ , Gliedlänge  $k$  und der Winkel  $\delta$  ist der Bahnpunkt  $B_{1,i}$  definiert (Koppelkörper). Nach diesem Verfahren sind alle Punkte der genannten

Mechanismen einfach zu ermitteln. Um die unterschiedlichen Mechanismen trennen zu können wurde ein Vier-Bit-Kodesystem als 15. Parameter eingeführt. Die neun unterschiedlichen Mechanismen können mit Hilfe von vier Bit dargestellt werden. (Da an vier Bits insgesamt sechzehn Größen zu unterscheiden wären, wurde nicht jede kombinatorische Möglichkeit ausgenutzt. Die übrig bleibenden Kombinationen liefern einen Gütwert von Null.) Die eingesetzten genetischen Algorithmen können alle 15 Parameter gleichzeitig handhaben, wodurch die Synthese der ebenen Gelenkmechanismen verwirklicht wird.

Von den Mechanismen mit  $n = 6$  und  $m = 7$  kann man auch noch zwei weitere Lösungen entwickeln, wo das Antriebsglied zu einer kinematischen Gruppe von der vierten Klasse gekoppelt ist. In diesen zwei Fällen ist eine derartige Berechnung nicht möglich.

3. Da für die Optimierung von Gelenkmechanismen mit 4-, bzw. 6-Gelenken unterschiedliche Anzahl der Parameter verwendet wird, haben die 'konventionellen' genetischen Algorithmen immer den einfachsten Viergelenkmechanismus als Optimum gefunden. Sobald eine Lösung mit der Optimierung von 8 Parametern akzeptabel erschien, war eine weitere Optimierung in Richtung 6-Gelenkmechanismen nicht mehr wahrscheinlich. Die ursprünglich angewandte Skalierung war nicht effektiv genug, um den scheinbaren Vorteil des Viergelenkmechanismus neutralisieren zu können.

Eine mögliche und zweckmäßige Lösung ist, die genetischen Algorithmen mit dem Sequentiellen Niche Verfahren zu kombinieren. In dieser Kombination werden – wenn z.B. eine Viergelenk-Lösung während der Optimierung viel zu dominant erscheint – die Daten des (lokalen) Optimums gespeichert und der Typ des Mechanismus (bzw. deren Kodierung) gesperrt. Durch diese relativ einfache Änderung können die genetischen Suchalgorithmen die Gelenkmechanismen mit komplexem Aufbau untersuchen und damit bei bestimmten Aufgaben bessere Lösungen automatisch ermitteln.

Am Ende eines Versuches kann man die unterschiedlichen Mechanismustypen vergleichen, bzw. auswerten. In den geprüften Fällen hat der Viergelenkmechanismus die besten Ergebnisse geliefert. Wenn das Suchen bei gleichen Randbedingungen gestartet war, war das Ergebnis auch gleich, d.h. die genetischen Parameter – in erster Linie die Anzahl der Generationen – sind zu dieser Aufgabe richtig gewählt worden.

Die Idee von ebenen Gelenkmechanismen als theoretische Lösung des Problems wird schon in der Konzeptionsphase dargestellt. Die Auswahl des richtigen (optimalen) Mechanismus und deren Optimierung wird völlig automatisch durch die genetischen Algorithmen bestimmt. Dies bedeutet, daß nicht nur eine einfache Parameteroptimierung, sondern auch die automatische Funktionssynthese verwirklicht wurde. Das dargestellte Programmsystem kann eine wirksame und effektive Hilfe in der Entwicklung von Führungen und Positionierungen werden.

Die Anwendung genetischer Algorithmen vereinfacht viele Entscheidungen, die insbesondere am Anfang des Konstruierens schwer zu treffen sind. Dies be-

schleunigt einige Schritte, die während der Entwicklung – in der Regel – öfters wiederholt werden müssen. Die Erfahrung und die Intuitionen des Fachpersonals sind aber dadurch nicht zu ersetzen, da die Erkennung der Probleme, deren (mathematische) Beschreibung und nicht in letzter Linie die Auswertung der Ergebnisse in der Hand des Anwenders bleiben.

## 10. Ausblick

Zunehmend werden Simulationsprogramme in der Industrie verwendet, um mögliche Alternativen eines (technischen) Systems rechnerisch abzuspielen, mit dem Ziel, technologische und wirtschaftliche Risiken zu erfassen und damit wertvolle Entscheidungshilfen zu erhalten.

Bei der konventionellen Optimierung werden i.a. nur einzelne Parameter und deren Einfluß auf das Ergebnis untersucht. Mit den genetischen Algorithmen können mit Benutzung von Zufallszahlen vielfältige Parameterverknüpfungen simuliert werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Optimierung des Gesamtsystems oder für das Auffinden globaler Optima erhöht wird.

Der modulare Aufbau der hier behandelten genetischen Algorithmen ermöglicht es, beliebige Simulationsprogramme einzubinden. Er ist deshalb für die industrielle Praxis wegen der Schnelligkeit der Programme bei vergleichbar zufriedenstellenden Ergebnissen interessant.

## Literatur

- [1] BERCESEY, T. – ZAGYI, L.: Genetikus algoritmusok alkalmazása a gépszerkesztésben, Budapest: GÉP LXVI., 1994.
- [2] CULBERSON, J. C.: On the Futility of Blind Search: an Algorithmic View of no Free Lunch, *Evolutionary Computation* 6 (1998), (2), pp. 109–127.
- [3] DAVIS, L.: *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, London: Pitman, 1988.
- [4] DENNETT, D. C.: *Darwin's Dangerous Idea*, Simon & Schuster, 1995.
- [5] GOLDBERG, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, MA, Reading: Addison Wesley, 1989.
- [6] HOLLAND, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [7] LINDE, H. – HILL, B.: *Erfolgreich Erfinden: Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie*, Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, 1993.
- [8] LÜCKE, J.: Kombination von Genauagensynthese und allgemeiner Optimierung zur Auslegung von Koppelgetrieben, *VDI Fortschrittberichte*, Reihe 1, Nr.205., 1992.
- [9] RECHENBERG, I.: *Evolutionsstrategie–Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1973.
- [10] STEINHILPER, W. – BERCESEY, T. – VANCSEY, GY.: Parametrische Optimierung von technischen Systemen mit Hilfe der genetischen Algorithmen, Miskolc: GÉP, XLVII, 1996.
- [11] STEINHILPER, W. – HENNERICI, H. – BRITZ, S.: *Kinematische Grundlagen ebener Mechanismen und Getriebe*. Würzburg: Vogel, 1993.
- [12] TENGLER, N.: Entwicklung und Anwendung einer extrapolierenden (2+lambda)-Evolutionsstrategie für Simulationprogramme, Universität Kaiserslautern, Diss., 1992.