

# **Autogenetische Konstruktionstheorie - Evolutionärer Ansatz einer erweiterten Konstruktionstheorie**

S. Vajna, B. Wegner, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

## **Zusammenfassung**

Verfahren der künstlichen Intelligenz spielen bei der Lösung technischer Probleme eine immer größere Rolle, um in kürzerer Zeit kostengünstig qualitativ hochstehende Produkte zu entwickeln. Konventionelle Optimierungsverfahren weisen nur begrenzte Lösungsmöglichkeiten auf, da nicht jede Problemstellung mathematisch exakt beschrieben werden kann, viele Parameter mit zum Teil widersprechenden Randbedingungen parallel bearbeitet werden müssen und nicht jede Eigenschaft in Regeln abbildbar ist.

Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien dagegen lösen komplexe Optimierungsprobleme nicht auf herkömmlichen Weg, sondern nach dem Vorbild der biologischen Evolution und der molekularen Genetik. Ausgehend von einer zufällig generierten Startlösungsmenge werden mit Hilfe multidimensionaler Bewertungsfunktionen unter Beachtung von Rand-, Kompatibilitäts- und Anfangsbedingungen die Lösungen miteinander rekombiniert und anschließend mutiert. Die Lösungen einer Generation erhalten eine zu ihrer Fitneß proportionale Wahrscheinlichkeit zu überleben. Nach hinreichend vielen Generationen werden so optimale oder annähernd optimale Lösungen gefunden.

Methodisch orientierte Analogiebetrachtungen unter Einbeziehung der Gesetzmäßigkeiten der biologischen Evolution eröffnen daher dem Konstruktionsprozeß neue Möglichkeiten für die Entwicklung komplexer, den steigenden Anforderungen angepaßter Produkte. Die folgenden Ausführungen zeigen, wie evolutionäre Methoden mit ihren Komponenten zur Lösung von Optimierungsproblemen in Entwicklung und Konstruktion eingesetzt werden können.

## **Einleitung**

Zunehmend kürzere Produktlebenszyklen bei hoher Variantenvielfalt sowie hohe Qualitäts- und Umweltverträglichkeitsansprüche an Produkt und Produktion bestimmen die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Mehr denn je kommt es darauf an, die Produktentwicklung effektiv und effizient zu gestalten. Neben neuen Formen für Auftragsbearbeitung und Arbeitsorganisation sowie leistungsfähigen Systemen der Informationstechnik werden erweiterte und neue Methoden für die Produktentwicklung benötigt.

Den Engineering-Bereichen kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. In diesen Bereichen werden bis zu 85% der späteren Produktkosten festgelegt, womit eine enorme Kostenverantwortung verbunden ist [EHR-95]. Der Ingenieur im Engineering wird daher immer mit dem Problem des Finden der besten Lösung konfrontiert, um die Forderungen nach minimalen Kosten, maximaler Funktionserfüllung, minimaler Produktentwicklungszeit, höchster Qualität, um nur einige zu nennen, zu erfüllen. Der Konzept- und Entwurfsphase einer Konstruktion kommt eine besondere Bedeutung zu, weil man hier durch Entwicklung alternativer Lösungsvarianten und durch gezielte Parametervariationen eine größere Produktverbesserung erreichen kann als in der Ausarbeitungsphase, wenn die wesentlichen konstruktiven Merkmale bereits festliegen. Bisherige Optimierungen während des Konstruktionsprozesses wurden vielfach der Intuition des Konstrukteurs überlassen. Künftig müssen jedoch rechnerunterstützte Verfahren Anwendung finden, die automatisch schlechtere Lösungen aussondern, gute Lösungen bevorzugen, Tätigkeiten im Konstruktionsprozeß

parallelisieren und somit eine kontinuierliche optimierte Produktentwicklung unterstützen [VWB-96]. Da sich zahlreiche Vorbilder optimiert gestalteter Strukturen als Ergebnis jahrhundertelanger Evolutionsprozesse in der Natur finden, lohnt es sich, Prinzipien der biologischen Evolution auch zur Optimierung technischer Systeme heranzuziehen, diese Entwicklungsvorgänge im Rechner nachzubilden und unter Einsatz leistungsstarker Algorithmen sukzessive solange zu modifizieren, bis ein optimales Strukturverhalten vorliegt [HIL-93].

Für die Optimierung ist ein Optimierungsmodell bestehend aus Variablensystem, Zielsystem und Restriktionssystem aufzustellen. Das Variablensystem enthält dabei alle Parameter, die während der Optimierung variierbar sind. Die wesentlichen Wünsche der Anforderungsliste werden im Zielsystem zusammengeführt. Da als generelle Wünsche mindestens Erfüllung der technischen Funktion, Minimierung der Entwicklungszeiten, Erhöhung der Qualität und Minimierung der Kosten zu berücksichtigen sind, ist ein Einzielsystem nicht ausreichend. Es spielt jedoch keine Rolle ob es sich um ein Maximierungs- oder Minimierungsproblem handelt, da jedes Maximierungsproblem durch Inversion der Bewertungsfunktion zum Minimierungsproblem wird. Das Restriktionssystem besteht aus allen einschränkenden Bedingungen für die Produktvariante und enthält vor allem die wesentlichen Forderungen der Anforderungsliste [FHB-92].

Die Anwendung eines mathematischen Optimierungsverfahrens kann nur auf der Grundlage eines zuvor aufbereiteten mathematischen Modells für die Problemstellung erfolgen. Dafür ist eine Zielfunktion zu formulieren, von der das Minimum (z.B. minimale Kosten) oder Maximum (z.B. maximale Funktionserfüllung) gesucht wird. Zusätzlich sind Nebenbedingungen (Restriktionen) in Form von Ungleichheitsnebenbedingungen (z.B. auftretende Spannungen  $\leq$  zulässige Spannungen, Verschiebungen  $\leq$  vorgegebene Richtwerte), Gleichheitsnebenbedingungen (Einhaltung eines stabilen Gleichgewichtszustandes) sowie Schranken für die zu optimierenden Parameter zu erfüllen [BEK-90].

$\min f(\varphi)$	skalarwertige Zielfunktion
$\varphi$ (Designvariablen)	Vektor der Optimierungsparameter
mit den Nebenbedingungen:	
$\varphi_i^u \leq \varphi_i \leq \varphi_i^o$ für $i = 1, \dots, n$	Schranken
$g_j(\varphi) = 0$ für $j = 1, \dots, m_e$	Gleichheitsnebenbedingungen
$g_j(\varphi) \leq 0$ für $j = m_e + 1, \dots, m$	Ungleichheitsnebenbedingungen

Die Methoden der mathematischen Optimierungsverfahren ermitteln eine Suchrichtung, die abhängig vom lokalen Verhalten der Ziel- und Restriktionsfunktionen ist. Die Optimierungsparameter werden dann in Suchrichtung mit einer bestimmten Schrittweite variiert. Die verschiedenen Algorithmen unterscheiden sich im wesentlichen durch die Methoden zur Berechnung der Schrittweiten sowie durch die Ermittlung der Suchrichtung und damit auch der lokalen Approximation des Originalproblems. Da Problemstellungen in den Engineering-Bereichen nicht immer durch mathematische Gleichungen abgebildet werden können ist der Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren in diesen Bereichen nicht immer möglich.

## Natürliche Evolution

In der Biologie bezeichnet Evolution den Wandel in der stammesgeschichtlichen Entwicklung der Organismen. Sie beginnt mit der einfachsten Lebenserscheinung und setzt sich mit den daraus entstandenen, abgewandelten Organismen in ihrem Artenreichtum fort. Dabei

handelt es sich eher um ein Anpassen an veränderte Randbedingungen, als um die Suche nach einem absoluten Optimum. Neue Lebensformen entstehen durch Mutation oder Rekombination einzelner Gene, wobei diese zufällig erfolgen. Hierbei ist das Gesetz der freien Rekombination das wichtigste Mendelsche Gesetz. Dieses Gesetz besagt, daß das Erbgut bei der Vererbung im Prinzip in allen möglichen Kombinationen zusammengestellt werden kann. Das Überleben der Individuen hängt nur davon ab, ob die Veränderung einer Struktur in der aktuellen Situation einen Vorteil, zumindest aber keinen Nachteil, bietet [WUK-88].

Die Datenträger der Lebewesen sind die Chromosomen, die wiederum Bestandteil einer jeden Zelle sind. Der materielle Träger der genetischen Informationen ist die Desoxyribonukleinsäure (DNS), die die Chromosomen formt und in unterschiedliche Gene unterteilt. Bei der Zellteilung wird das Erbgut auf die Tochterzellen verteilt. Während bei der Mitose (ungeschlechtliche Zellteilung) zwei genetisch völlig gleiche Tochterzellen entstehen, erzeugt die Meiose (geschlechtliche Zellteilung) durch Rekombination und Mutation Tochterzellen mit verschiedenen Chromosomensätzen. Daher ist die Meiose für die Übertragung der natürlichen Evolution auf technische Problemstellung von großer Bedeutung [PRE-89].

Ein Generationszyklus eines Lebewesens beinhaltet folgende Phasen [REC-94]:

1. Replikation der genetischen Informationen
2. Auftreten zufälliger Replikationsfehler
3. Herausbilden eines veränderten Erscheinungsbildes des Lebewesens
4. Bewährung des Lebewesens in der Umwelt
5. Aussterben der weniger tüchtigen Erscheinungsform

Folgende Kernaussagen der Evolutionstheorie, sind für Analogiebetrachtungen von besonderer Bedeutung:

- Die genetischen Eigenschaften beeinflussen die Überlebensfähigkeit der Individuen
- Der Kampf um das Überleben führt zu einer natürlichen Auslese
- Genetische Varianten, die sich im Kampf um das Überleben als besonders günstig erwiesen haben, treten in Folgegenerationen bevorzugt auf

Auf die Technik übertragen ergibt sich daher folgende analoge Vorgehensweise zur Lösung von Optimierungsproblemen:

1. Kopieren der zu optimierenden Parameter
2. Zufällige Änderung der Parameter
3. Erzeugung veränderter Varianten
4. Kontrolle des Verhaltens der erzeugten Varianten im technischen Umfeld
5. Verwerfen der Varianten, die die Randbedingungen nicht erfüllen

## Evolutionäre Algorithmen

Evolutionsstrategien [REC-73] und Genetische Algorithmen [GOL-89] sind iterative probabilistische Optimierungsalgorithmen, die auf den Prinzipien der natürlichen Evolution beruhen. Für die weiteren Ausführungen gelten die in **Tabelle 1** aufgeführten Analogien zwischen der natürlichen Evolution und den in der Technik eingesetzten Evolutionären Algorithmen.

Natur	Evolutionäre Algorithmen
Gen	zu optimierender Parameter
Allele	Parameterwert
Chromosom	Parameterfolge

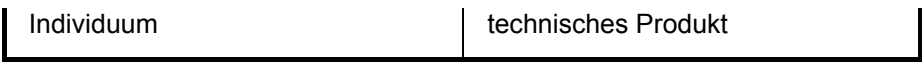


Tabelle 1: Analogien zwischen Natur und Evolutionären Algorithmen

Generell operieren diese Algorithmen auf einer Menge von Individuen, auch Population genannt. Jedes Individuum in der Population repräsentiert eine potentielle Lösung des Problems. Die Güte des Individuums entspricht der Güte dieser Lösung bezüglich der zu optimierenden Zielfunktion(en). In einem sich mehrfach wiederholenden, gesteuerten, stochastischen Prozeß werden durch Mutations-, Rekombinations- und Selektionsprozesse neue Individuen erzeugt. Mutationen sind spontan auftretende, strukturelle Veränderungen der Chromosomen. Bei der Rekombination, auch Crossover oder Crossing-over genannt, erfolgt ein Chromatidenstücktausch zwischen homologen Chromosomen. Während die Mutation für eine möglichst vollständige Suche im gesamten Suchraum eingesetzt wird, sorgt die Rekombination für die Steuerung der Suche in neue Regionen. Die Selektion leitet die Suche in vielversprechende Regionen des Suchraums. Gerichtete Suchprozesse werden dabei mit ungerichteten kombiniert. Somit benötigen diese Optimierungsverfahren keine Gradienteninformationen und sind besonders geeignet zur Lösung von Problemen, bei denen klassische, ableitungsorientierte Methoden versagen [SHF-96].

Bei der Umsetzung des biologischen Modells in einen Algorithmus setzen die beiden Verfahren jedoch unterschiedliche Schwerpunkte (**Tabelle 2**) [SCH-96]:

Merkmal	Evolutionstrategien	Genetische Algorithmen
Kodierung Mutation	mit reellen Zahlen Schwerpunkt des Algorithmus (Mutationsschrittweitenregelung sorgt für Verbesserung der Individuen der Population)	mit Bit-Strings variiert vorhandene Chromosomen ein wenig
Crossover Selektion	findet üblicherweise nicht statt Eltern und Kinder werden mit gleicher Wahrscheinlichkeit (unabhängig von der Fitneß) zur Erzeugung der Nachkommen herangezogen	Schwerpunkt des Algorithmus Eltern werden entsprechend ihrer Fitneß zur Erzeugung der Nachkommen herangezogen
Konvergenz	adaptive Schrittweitenregelung sorgt dafür, daß lokale Optima sehr rasch gefunden werden, Algorithmus bleibt darin zumeist stecken	große Sprünge im Suchraum erweitern den Gesamtsuchraum, globales Optimum wird oft auch bei Existenz vieler lokaler Optima gefunden

Tabelle 2: Charakteristika von Evolutionstrategien und Genetischen Algorithmen

Da durch die Anwendung Genetischer Algorithmen die Wahrscheinlichkeit, das globale Optimum von komplexen Funktionen zu finden, groß ist, sind diese Algorithmen Grundlage für die weiteren Betrachtungen.

**Genetische Algorithmen und ihre Operatoren**

Für die Kodierung der Optimierungsparameter hat sich in der Praxis die Kodierung mit Bitstrings, die von John Holland [HOL-92] mathematisch fundiert wurde, durchgesetzt. Das Computergen ist somit als Folge einer bestimmten Anzahl von „0“ und „1“ definiert. Dieses Gen ist die Basis für die Evolutionsoperatoren Mutation, Crossover und Selektion.

Beim Crossover wird jedes Chromosom mit einem zufällig ausgewählten anderen Chromosom an einer zufällig ausgewählten Stelle zwischen zwei Genen gekreuzt (**Bild 1**).

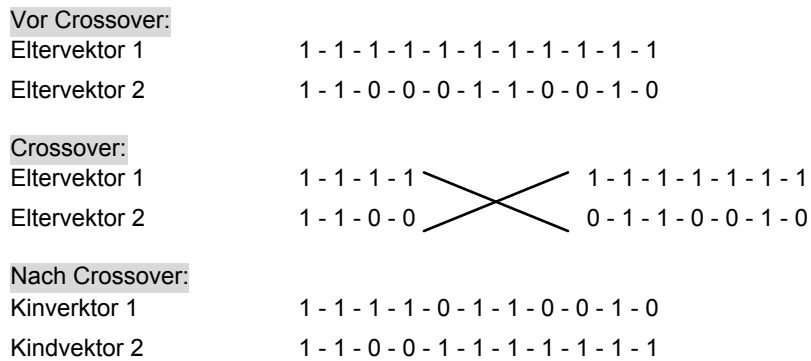


Bild 1: Crossover bei Genetischen Algorithmen („One-Point“-Crossover)

Die so erzeugten neuen Chromosomen beginnen mit der gleichen Bitfolge wie ihre Eltern, jedoch setzt sich die Bitfolge mit den Genen des jeweils anderen Elternchromosoms fort. In Abhängigkeit von der Anzahl der Schnittstellen werden „One-Point“-Crossover, „Two-Point“-Crossover und weitere „Multi-Point“-Crossover-Operatoren unterschieden. Die Crossover-Rate (Crossover-Wahrscheinlichkeit) gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß ein Crossover stattfindet.

Bei der Mutation erfolgt eine zufällige Neubelegung bestimmter Stellen im Bitstring. Hierbei sind zwei wesentliche Vorgehensweisen zu unterscheiden:

1. Jeder Stelle im Bitstring wird mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (Mutationsrate) mutiert. Bei einer Mutationsrate von 50% und höher wird die Stelle neu belegt (**Bild 2a**).
2. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wird eine Stelle im Bitstring gewählt, die durch einen anderen Wert ersetzt wird (**Bild 2 b**).



Bild 2: Mutation bei Genetischen Algorithmen

Die Selektion der Eltern erfolgt auf der Grundlage ihrer Fitneß bzw. Güte. Zunächst werden die Individuen miteinander verglichen und bewertet. Wenn ein Minimum gefunden werden soll, ist die Fitneß eines guten Individuums immer kleiner als die Fitneß eines schlechten Individuums. Bei einer Maximierung ist es umgekehrt. Danach wird aus der bewerteten Elternpopulation die Folgepopulation ausgewählt.

In **Bild 3** ist der prinzipielle Ablauf eines Genetischen Algorithmus dargestellt.

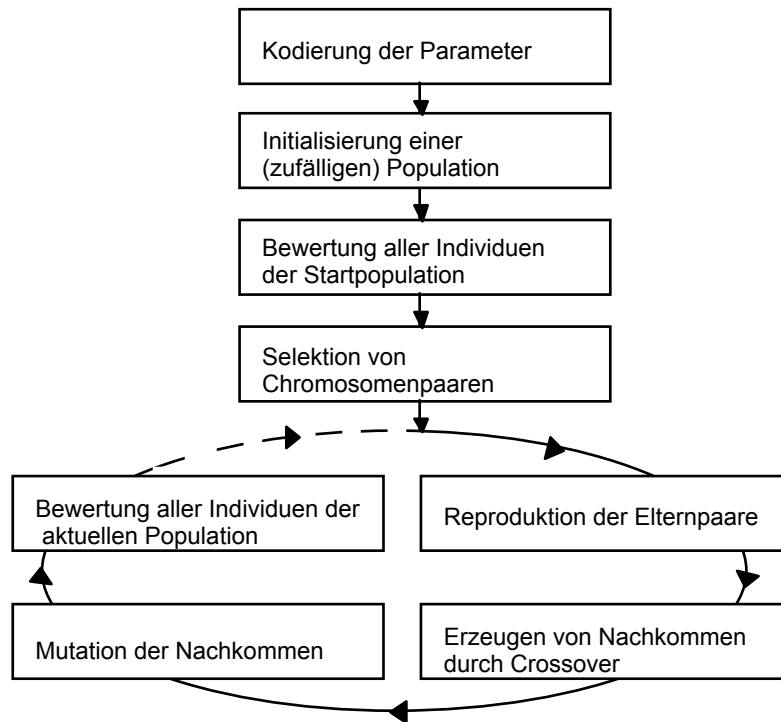


Bild 3: Ablauf eines Genetischen Algorithmus

### Anwendung Evolutionärer Operatoren im Konstruktionsprozeß

Die VDI-Richtlinie 2221 wurde hinsichtlich der Lösungsfindung präzisiert und bezüglich des Einsatzes von evolutionären Operatoren erweitert (**Bild 4**).

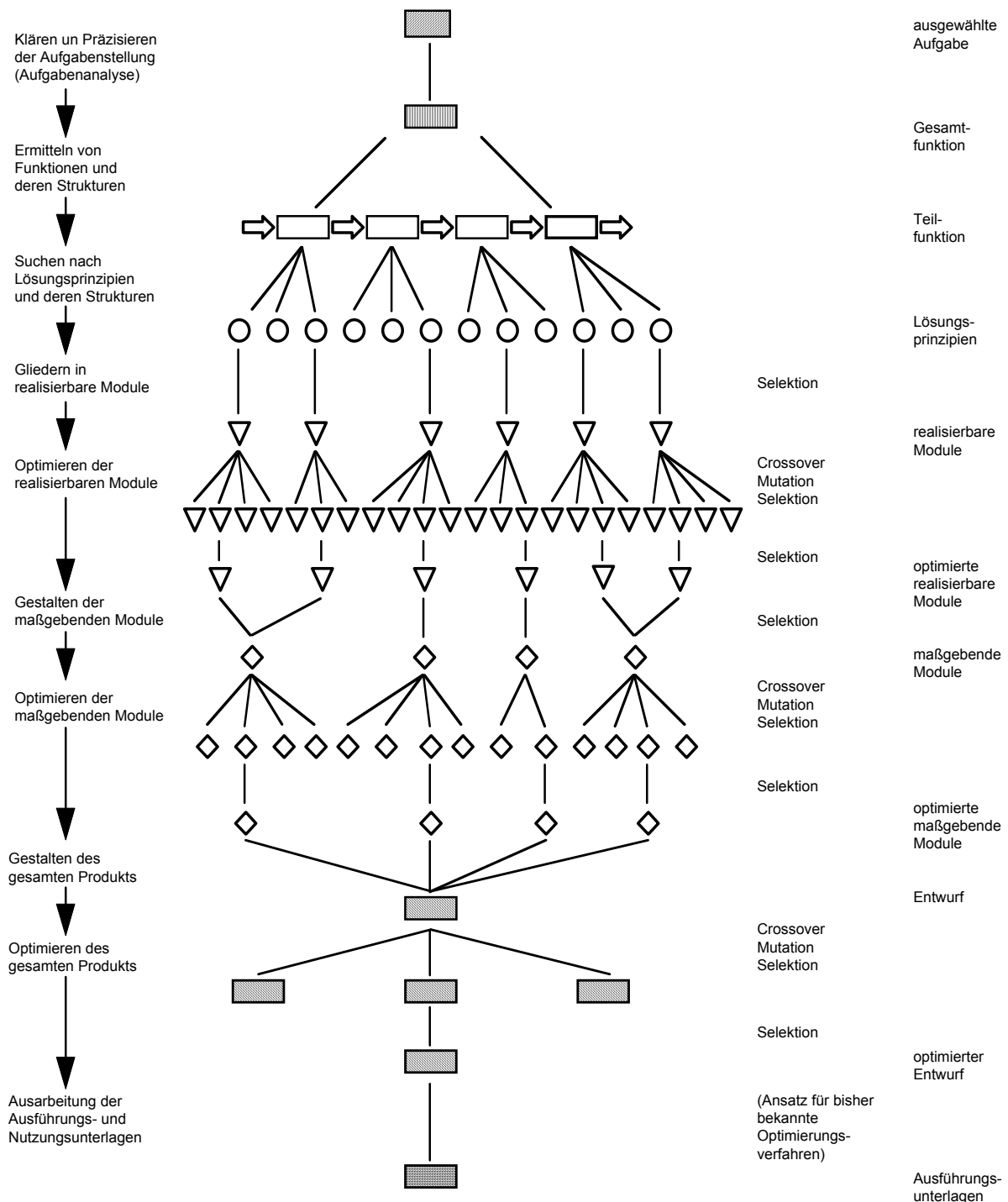


Bild 4: Evolutionäre Operatoren im Konstruktionsprozeß

Nach einer genauen Analyse der grundlegenden physikalischen und logischen Wirkzusammenhänge können nach dieser Methode bei gegebener Aufgabenstellung und definierten Randbedingungen alle möglichen Lösungsvarianten entwickelt und technisch wirtschaftlich bewertet werden. Da sich jede Entscheidung, jede Auswahl einer Möglichkeit aus mehreren Alternativen als Optimierungsproblem auffassen läßt, sind in allen Phasen Optimierungsarbeiten nach jedem einzelnen Teilschritt notwendig. Während in den ersten beiden Phasen die Optimierung daraus besteht, die relevanten Funktionen, Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten des neuen Bauteils zu finden, sinnvoll zu beschreiben und zu kombinieren, muß der Konstrukteur in den Phasen des Entwerfens und des Ausarbeitens

permanent die relevanten Parameter der Funktionen, Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten seines (neuen) Erzeugnisses optimieren, damit die beste, und nicht nur die nächstbeste Lösung für jede einzelne geforderte Eigenschaft des Bauteils gefunden wird [BVA-94].

Für die Beschreibung des Konstruktionsprozesses ist die Erstellung eines intuitiven Modells erforderlich. Dieses intuitive Modell muß in der Lage sein, eine beliebig komplexe Aufgabenstellung vollständig abzubilden, Widersprüche und Mehrdeutigkeiten aufzulösen sowie die im Konstruktionsprozeß parallel benötigten unterschiedlichen Partialmodelle und bereits vorhandene Berechnungs- und Simulationsmöglichkeiten richtig einzubinden [BVA-94]. Keine von den derzeit bekannten Konstruktionsmethoden (z.B. [PAB-93], [HAE-88], [HUE-88], [KOL-85], [ROT-82]) baut auf ein solches Modell auf. Daher erscheint ein Ansatz als geeignet, der die Erkenntnisse der allgemeinen Evolutionstheorie in eine Konstruktionstheorie einbezieht, die Autogenetische Konstruktionstheorie (**Bild 5**).

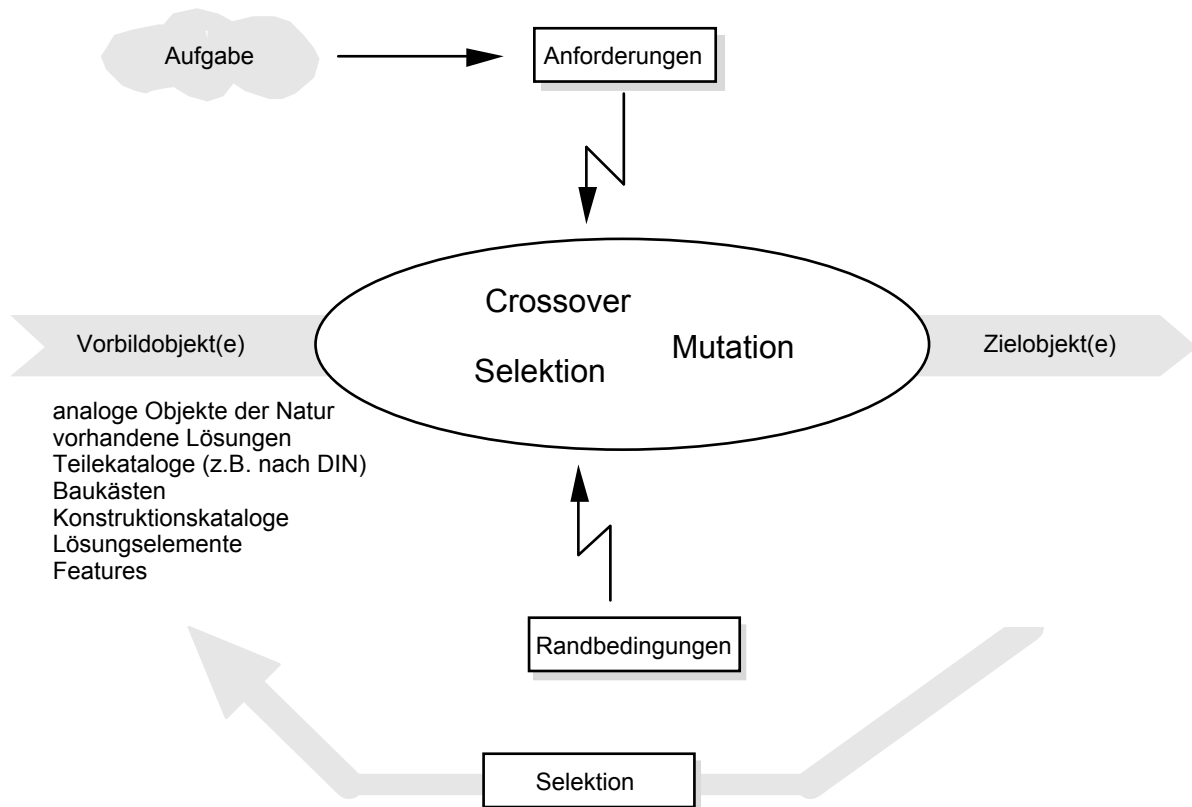


Bild 5: Prinzip der Autogenetischen Konstruktionstheorie

Die Suche nach der optimalen Lösung erfolgt nicht nach festen Regeln, sondern nach Wahrscheinlichkeiten, wobei sich die Suche auf den gesamten Lösungsraum erstreckt. Zwar liefern konventionelle Optimierungsalgorithmen exakte Lösungen, aber die Problematik der allgemeinen Anwendbarkeit, auch bei komplexeren Problemen, ist bei diesen Algorithmen nicht gelöst. Evolutionäre Lösungsverfahren zeichnen sich im Gegensatz dazu dadurch aus, daß die Lösungen robuster sind, da die Zielfunktion und nicht die Ableitung oder andere Hilfsinformationen bei der Suche nach dem Optimum genutzt wird. Genetische Algorithmen als eine Form der Evolutionären Algorithmen, können daher in allen Phasen des Konstruktionsprozesses eingesetzt werden. Problemlos ist ihr Einsatz in der Ausarbeitungsphase, weil dort in den meisten Fällen „nur“ eine Optimierung bekannter Parameter zu erfolgen hat. Die Einsatzmöglichkeiten Genetischer Algorithmen und ihrer evolutionären Operatoren in den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses werden in den weiteren Forschungsaktivitäten des Lehrstuhls untersucht.



## Literatur

- [BEK-90] Beitz, W., Küttner, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Berlin u.a. 1990
- [BVA-94] Bercsey, T. Vajna, S.: Ein autogenetischer Ansatz für die Konstruktionstheorie, Teil I und II, CAD-CAM Report 14 (1994) Nr. 2 und 3
- [EHR-95] Ehrlenspiel, K. Integrierte Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München 1995
- [FHB-92] Feng, P.-E., Ni, Q.-D., Beitz, W.: Flexible Optimierung bei komplexen Produktentwicklungen, Konstruktion 44 (1992) S. 423 - 430
- [GOL-89] Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading 1989
- [HAE-88] Hubka, V., Andreasen, M. M., Eder, E.: Practical Studies in Systematic Design Butterworths, London 1988
- [HIL-93] Hill, B.: Bionik - notwendiges Element im KonstruktionsprozeßKonstruktion 45 (1993) S. 283 - 287
- [HOL-92] Holland, J.: Adaption in natural and artifical systems, MIT Press, Cambridge, Mass 1992
- [HUE-88] Hubka, V., Eder, E.: Theory of technical Systems, Springer-Verlag, Heidelberg u.a. 1988
- [KOL-85] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Heidelberg u.a. 1985
- [PAB-93] Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin u.a. 1993
- [PRE-89] Preschel, B.: DUDEN - Abiturhilfen: Genetik, Dudenverlag, Mannheim 1989
- [REC-73] ] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution; Friedrich Frommann Verlag 1973
- [REC-94] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie'94, Friedrich Frommann Verlag, Stuttgart 1994
- [ROT-82] Roth, K.-H.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Springer-Verlag Heidelberg 1982
- [SCH-96] Schoof, J.: Evolutionäre Algorithmen, <http://www-info2.informatik.uni.wuerzburg.de/staff/joscho/intro/gen.html>
- [SHF-96] Schöneburg, E., Heinzmann, F., Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien, Addison-Wesley, Bonn u.a. 1996
- [VWB-96] Vajna, S., Wegner, B, Bercsey, T.: Evolution Theories and Strategies in Concurrent Engineering, Proceedings of the International Symposium on The Tools And Methods For Concurrent Engineering (TMCE), Institute of Machine Design, Technical University of Budapest, p. 337 - 544
- [WUK-88] Wuketits, F. M.: Evolutionstheorien - Historische Voraussetzungen, Positionen, Kritik, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1988

Prof. Dr.-Ing. S. Vajna, Dipl.-Ing. B. Wegner  
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
D-39106 Magdeburg  
Tel.: + 49 - 391 - 67 - 18794  
Fax: + 49 - 391 - 67 - 11167  
email: vajna@mb.uni-magdeburg.de, wegner@mb.uni-magdeburg.de