

Selbstorganisation von Wege- und Transportsystemen

Frank Schweitzer

Wegesysteme zählen zu den dauerhaftesten Strukturen, die der Mensch im Verlauf der kulturellen Entwicklung hervorgebracht hat. Alte Handelsstraßen und Verbindungswege lassen sich zum Teil heute noch wiederfinden, ausgebaut als Autobahnen oder Eisenbahnverbindungen. Diese Strukturen sind historisch gewachsen durch die Bildung von Neuem und die Verstärkung von bereits Vorhandenem, sie weisen eine interessante Mischung aus geplanten und ungeplanten Elementen auf.

Wie können die Entstehung und die Stabilität von Wegenetzen beschrieben und simuliert werden? Im Rahmen einer physikalischen Modellierung wird ein Minimalmodell untersucht, das die Bedingungen für die Ausbildung von Wegenetzen beschreibt. Dazu wird das Wegesystem als eine ungeplante Struktur betrachtet, die im Rahmen eines Selbstorganisationsprozesses entsteht. (Im anderen Fall würde man die Entstehung als Planungsprozeß zu beschreiben haben.)

Die Entstehung eines ungeplanten Wegesystems ist ein Beispiel für interaktive Strukturbildung, die auf einer indirekten Wechselwirkung zwischen den strukturerzeugenden Elementen beruht (vgl. Seite 167). Als Beispiel nehmen wir eine Zahl von Fußgängern, die in einem neu erschlossenen Wohngebiet ein Wegesystem (Trampelpfade) anlegen, ohne sich vorher gemeinschaftlich darüber zu beraten. Das heißt, es gibt keine zentrale Vorgaben, wo die Wege entlangzugehen haben, und es gibt auch keine »höhere Instanz«, die den Fußgängern mitteilt, welche Wege sie benutzen müssen. Vielmehr bringen die Fußgänger diese Wege selbst hervor, sichern ihre Existenz durch ständige Nutzung und verändern die Wege gegebenenfalls, wenn sich neue Anforderungen ergeben. Der dabei ablaufende Strukturbildungsprozeß weist eine Reihe von Charakteristika auf, die für Selbstorganisationsprozesse typisch sind.

Nichtgleichgewicht

Wegenetze sind Nichtgleichgewichtsstrukturen, die zu ihrem Erhalt einer ständigen Energiezufuhr bedürfen. Dies geschieht, indem die Wege benutzt und damit ständig erneuert werden. Wege, die nicht mehr benutzt werden, verschwinden mit der Zeit wieder. Im Modell beschreiben wir den Weg als eine Folge von Markierungen, die den Weg von seiner Umgebung unterscheiden. Diese Markierungen können ganz unterschiedlicher Art sein, beispielsweise Fußspuren (bei Menschen, die das Gras niedertreten, oder bei Tieren, die eine Bresche ins Unterholz schlagen) oder Duftmarken (bei futtersuchenden Ameisen). Derartige Markierungen können mit der Zeit verblassen, und der Weg verschwindet, wenn sie nicht ständig erneuert werden. Das heißt, stabile Wegesysteme existieren, wenn die Erneuerungsrate und die Verschwindensrate der Markierungen sich lokal kompensieren.

Nichtlineare Rückkopplung

Wege sind kollektiv hervorgebrachte Strukturen. In unserem Beispiel sind es Fußgänger, die ein neu erschlossenes Wohngebiet mit bestimmten Absichten durchqueren und dabei »Markierungen«, also Fußspuren, setzen. Anfangs sind diese Markierungen praktisch im gesamten Gebiet verteilt. Ein Weg entsteht erst, wenn mehrere Fußgänger dieselbe Richtung haben und dabei in die schon vorhandenen Fußstapfen treten, die Markierungen verstärken und so den markierten Weg formen. Die Markierungen üben also eine bestimmte anziehende Wirkung auf die Fußgänger aus, denn oftmals ist es energetisch günstiger, einen schon vorhandenen Weg zu benutzen, als einen eigenen Weg zu bahnen. Auf diese Weise wird eine positive Rückkopplung zwischen den bereits vorhandenen Markierungen und dem weiteren Ausbau des Weges geschaffen.

Der dabei ablaufende Prozeß beruht auf indirekter Wechselwirkung. Das heißt, die Fußgänger kommunizie-

ren miteinander über das Medium (die Oberfläche), auf dem sie ihre Markierungen setzen. Dieser indirekte Kommunikationsprozeß läßt sich durch drei Elemente beschreiben:

- a) »Schreiben«: Jeder Fußgänger »schreibt« Markierungen, während er sich auf der Oberfläche bewegt,
- b) »Lesen«: Jeder Fußgänger kann Markierungen erkennen, wenn sie sich in seiner Umgebung befinden,
- c) »Handeln«: Aufgrund einer anziehenden Wirkung der Markierungen wird sich der Fußgänger mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in die Richtung der schon vorhandenen Markierungen bewegen. Auf diese Weise wird die Wegestruktur gemeinschaftlich von allen Fußgängern hervorgebracht.

Konkurrenz und Selektion

Damit der Weg nicht wieder verschwindet, muß, wie bereits erwähnt, eine gewisse Benutzungshäufigkeit gewährleistet sein. Die positive Rückkopplung allein reicht aber nicht aus, um einen Weg tatsächlich dauerhaft zu etablieren, denn bei einer begrenzten Zahl von Fußgängern pro Flächeneinheit kann nicht jede Fußspur fortlaufend verstärkt werden, was bedeutet, daß die Verstärkung eines bestimmten Weges zwangsläufig die Nichtverstärkung, also das Verschwinden, eines anderen Weges zur Folge hat. Dies führt zu einem Konkurrenzprozeß unter den sich herausbildenden Wegen. Worum konkurrieren sie? Um die Fußgänger, die durch das Setzen der Markierungen die Existenz der Wege erst möglich machen. Das heißt, diejenigen Wege, die von den meisten Fußgängern benutzt werden, setzen sich mit der Zeit gegenüber den anderen Wegen durch, die aufgrund einer zu kleinen Erneuerungsrate wieder verschwinden. Dieser Selektionsprozeß ist charakteristisch für Evolutionsprozesse, die bei begrenzten Ressourcen ablaufen.

Anfängliche Symmetriebrechung

Von besonderer Bedeutung bei der Entstehung von Wegenetzen sind diejenigen Markierungen, die ganz am Anfang der Entwicklung gesetzt werden, denn dadurch erhält das System seine frühe Prägung. Dieser Vorgang wird in der Physik als Symmetriebrechung bezeichnet und ist ebenfalls ein charakteristisches Merkmal von Evolutionsprozessen. Beispiele für den Einfluß solcher frühen Symmetriebrechungen lassen sich bei der Entwicklung

von Wegen immer wieder finden: Alte Indianerpfade wurden von weißen Siedlern übernommen und sind heute zu Fernverkehrsstraßen ausgebaut worden, die römischen Heeresstraßen lassen sich in Form von Autobahnen wiederfinden, alte Handelsstraßen werden noch nach Jahrhunderten benutzt. Auf diese Weise »versklaven« die frühen Markierungen die weitere Entwicklung eines Systems, sofern sie erneuert und verstärkt wurden.

Irreversibilität und Fluktuationen

Wegesysteme sind historisch gewachsene Strukturen, deren Dynamik durch drei Prozesse bestimmt ist:

- a) die Neubildung von Wegen,
- b) die Erhaltung bereits vorhandener Wege,
- c) das Verschwinden nicht mehr benutzter Wege.

Die Neubildung von Wegen ist stets möglich, weil die Entwicklung des Wegesystems kein deterministischer Prozeß ist, sondern durch Fluktuationen bestimmt wird. In unserem Beispiel heißt dies, daß die Fußgänger nicht gezwungen sind, sich stets auf alten, eingefahrenen Wegen zu bewegen, sondern sie haben (im Rahmen eines probabilistischen Modells) auch die Möglichkeit, »Neuland zu betreten« und dort Markierungen zu setzen. Die Frage ist aber, ob der auf diese Weise generierte Weg im Verlauf der Evolution auch weiter verstärkt und als neuer »Aus-Weg« akzeptiert wird, sich also in einem Konkurrenzprozeß durchsetzen kann, oder ob er mit der Zeit wieder vergessen wird.

Hier wird der »Versklavungseffekt« durch die einmal hervorgebrachten Wege deutlich: Je stärker Wege ausgebaut sind, um so schwerer ist es, daß sich zu einem späteren Zeitpunkt neue Wege etablieren. Die bereits vorhandenen Wege verkörpern die bisherige Entwicklung des Systems und können in ihrer Existenz nicht einfach ignoriert werden. Selbst wenn diese Wege nicht mehr benutzt werden, dauert es noch eine gewisse Zeit, bis die Markierungen vollständig verschwinden und der Weg praktisch vergessen wird. Die Entwicklung des Wegesystems ist also nicht vollständig irreversibel, aber das System hat immerhin ein gewisses »Gedächtnis«, das von der Dauerhaftigkeit der Markierungen bestimmt wird.

Das Wegesystem, das durch die interaktive Strukturbildung entsteht, ist jeweils historisch einmalig, bedingt durch die anfängliche Symmetriebrechung, die das System frühzeitig prägt, und durch die Fluktuationen, die

der Neubildung von Wegen und der Änderung vorhandener Wege stets eine bestimmte Wahrscheinlichkeit einräumen. Natürlich wird mit den Ausgangs- und Zielpunkten, die der Weg verbinden soll, eine gewisse topologische Grundstruktur vorgegeben. Welches der möglichen Wegesysteme, die diese Topologie erfüllen, aber letztlich entsteht, wird durch einen Selbstorganisationsprozeß bestimmt. Das heißt, die Strukturen entstehen durch ein Wechselspiel von Selbstverstärkung und Selektion, das durch die lokale Kommunikation zwischen den aktiven Elementen (z. B. den Fußgängern) vermittelt wird.

Das entstehende Wegesystem ist ein echtes Emergenzphänomen, das eine neue Systemqualität repräsentiert. Sobald die Markierungsdichte einen kritischen Wert übersteigt, bricht die Wegestruktur schlagartig und nicht etwa allmählich durch.

Ein auf diese Weise charakterisiertes Wegesystem zeichnet sich durch Flexibilität aus. Wenn Anfangs- oder Zielpunkte im Verlauf der Entwicklung des Wegenetzes ihre Bedeutung verlieren und der Weg dadurch nutzlos geworden ist, verschwindet er nach einer gewissen Zeit wieder, da er nicht mehr erneuert wird (vgl. Seite 167). Wenn auf der anderen Seite neue Zielpunkte an das bereits vorhandene Wegenetz angeschlossen werden sollen, so ist auch dies ohne weiteres im Rahmen eines Selbstorganisationsprozesses möglich, sofern genügend aktive Elemente vorhanden sind, um einen Weg dorthin aufzubauen und zu unterhalten.

Ein weiteres Charakteristikum der Erzeugung von Wegen durch interaktive Strukturbildung besteht darin, daß die verschiedenen Punkte nicht zwangsläufig durch Geraden miteinander verbunden sein müssen, vielmehr kann der Weg sich quasi von selbst den topologischen Gegebenheiten des Geländes anpassen. Der kürzeste Weg ist nicht immer der energetisch günstigste, oftmals kann etwa ein kleiner Umweg große Höhenunterschiede vermeiden helfen.

Wegesysteme als Transportsysteme

Wenn Wegesysteme als Transportsysteme genutzt werden, dann treten zumeist neue Anforderungen an die Vernetzung auf. Ging es im Rahmen des Selbstorganisationsmodells vor allem um die Entstehung von Wegen, so besteht das Problem jetzt darin, aus der Vielzahl möglicher Wegenetze gerade diejenigen herauszufinden, die be-

stimmten (ökonomischen) Kriterien für den Transport genügen. Diese Kriterien lassen sich in Form von Kostenfunktionen darstellen, für die eine möglichst optimale Lösung gefunden werden soll. Beispiele für derartige Kriterien sind:

– Eine möglichst direkte Verbindung zwischen bestehenden Punkten, um Umwege und damit Transportkosten zu vermeiden. Diese Forderung führt in letzter Konsequenz auf das sogenannte Direktwegenetz, bei dem jeder Punkt mit jedem verbunden ist. In diesem Fall werden zwar sämtliche Umwege ausgeschlossen, aber die Gesamtlänge des benötigten Wegenetzes wird maximal.

– Eine möglichst kleine Gesamtlänge des Wegenetzes, um Kosten für den Straßenbau zu vermeiden. Diese Forderung führt auf das sogenannte Minimalwegenetz, bei dem zwar alle Punkte noch miteinander verbunden sind, dafür aber der Umweg drastisch ansteigt.

– Eine vorgegebene Zahl von Punkten soll bei einer »Rundreise« nacheinander so angelaufen werden, daß der Gesamtweg (und damit die Reisezeit) möglichst gering wird (das sogenannte Travelling-salesman-Problem).

Es ist charakteristisch für Optimierungsaufgaben dieser Art, daß in der Regel eine Reihe von einander widersprechenden Kriterien gleichzeitig erfüllt werden soll: So können die Transportkosten und die Kosten für den Straßenbau nicht ohne weiteres gemeinsam minimiert werden, sondern es muß ein Kompromiß zwischen den verschiedenen Anforderungen gefunden werden.

Aufgaben dieser Art, die durch mehrere miteinander korrelierte Optimierungskriterien gekennzeichnet sind, werden in der Physik frustrierte Probleme genannt. Während im einfachen Fall, also bei wenigen Optimierungskriterien, die kaum voneinander abhängen, meist eine perfekte Lösung für das Optimierungsproblem existiert, zeigen frustrierte Probleme eine sehr große Zahl von mehr oder weniger gleich guten Lösungen, es gibt hier also nicht die (eine) Lösung. Unter diesen Umständen wird das Ziel darin bestehen, innerhalb einer angemessenen Zeit wenigstens einige der guten Lösungen für das Optimierungsproblem zu finden.

Hier hat sich die Methode der Evolutionsstrategien bereits sehr gut bewährt. Ihre Grundidee besteht darin, Prinzipien, die sich im Verlauf der kosmischen und der biologischen Evolution etabliert haben, um energetisch günstige Zustände oder eine entsprechend gute Fitness

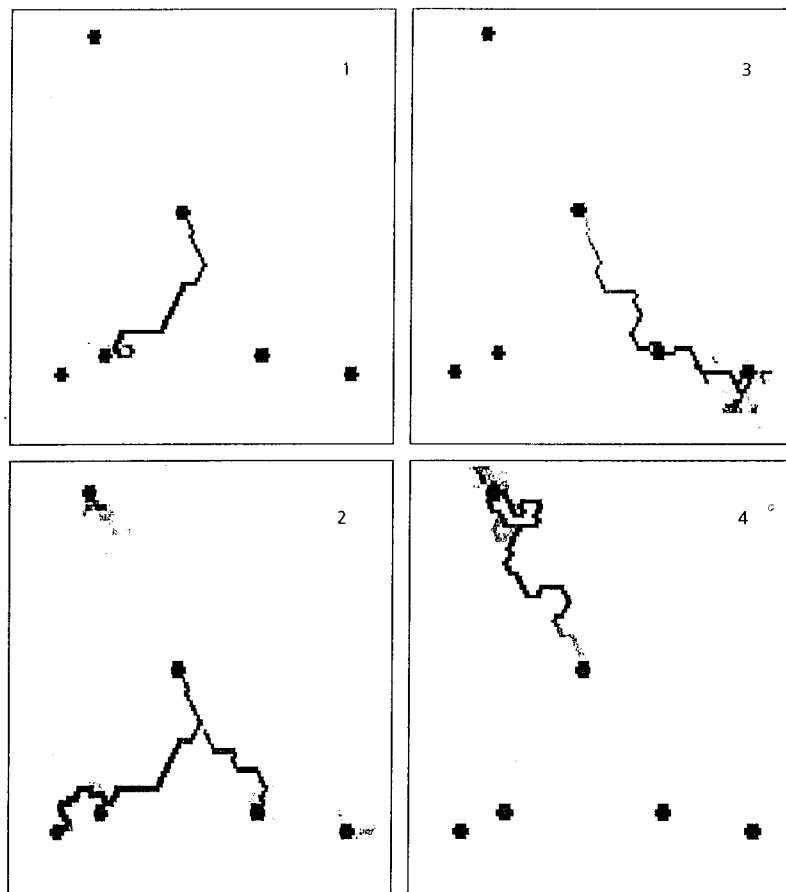
Selbstorganisation von Wegen durch lokale Wechselwirkungen zwischen Walkern

Die Entstehung von Wegenetzen kann durch ein Active-Walker-Modell zur interaktiven Strukturbildung beschrieben werden. Diese Walker (einfache computersimulierte »Lebewesen«) sind in der Lage, bei jedem Schritt ihren individuellen Weg zu markieren, bereits existierende Markierungen lokal zu erkennen und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dem markierten Weg zu folgen. Dabei haben sie kein Gedächtnis, um ihren zurückgelegten Weg zu speichern oder willentlich einem bestimmten Ziel zuzustreben. Die einzige Orientierungsmöglichkeit besteht in lokalen Markierungen, die mit der Zeit auch wieder verschwinden, wenn sie nicht ständig erneuert werden.

Die Abbildungen zeigen in einer zeitlichen Abfolge die spontane Entstehung von Wegen zwischen einem »Nest« (Zentrum) und fünf »Futterplätzen«, die von den Walkern nacheinander entdeckt werden. Falls die erfolgreichen Walker anhand ihrer bisherigen Markierungen zum Nest zurückgelangen, können sie weitere Walker aktivieren, um die Futterquelle auszubeuten. Dabei wird ein Weg aufgebaut, der auch wieder verschwindet, wenn die Futterquelle aufgezehrt ist. Da die weißen Flächen in den Abbildungen praktisch keine Markierungen enthalten, benutzen die Walker tatsächlich die Wege. Die Herausbildung von Wegen erfolgt in diesem Modell durch einen Selbstorganisationsprozeß, der auf einer lokalen Interaktion zwischen den Walkern (indirekte Kommunikation über Markierungen) basiert.

Das Wegesystem ist eine ungeplante Struktur, denn es gibt keine zentralen Vorgaben für die Wegeführung und die Benutzung der Wege. Vielmehr sind es die Walker selbst, die diese Wege hervorbringen und ihre Existenz durch ständige Nutzung sichern (Selbstverstärkung). Die Wegestrukturen sind stabil, solange die Bedingungen für ihre Existenz (zum Beispiel das Futter) gegeben sind, und verschwinden, wenn sie nutzlos geworden sind (Selektion), während an anderer Stelle neue Wege entstehen.

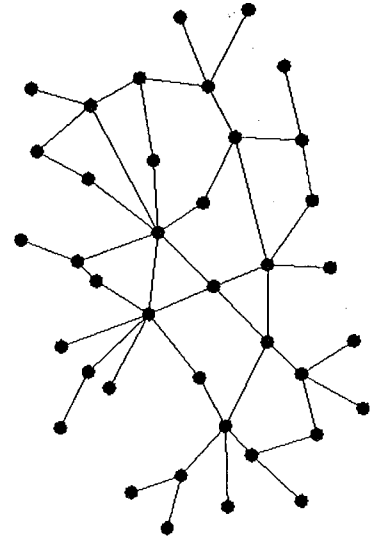
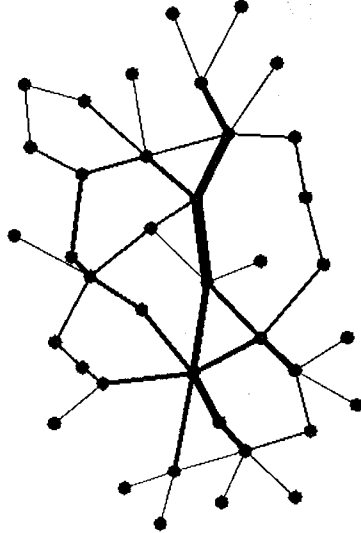
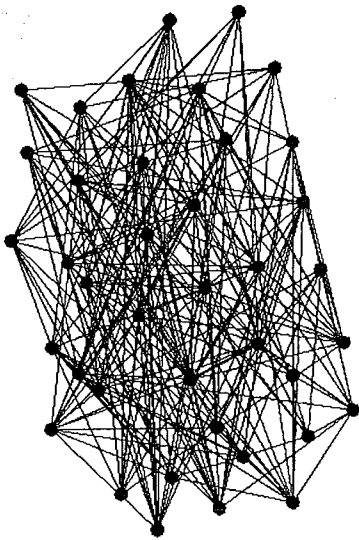
Frank Schweitzer



bei biologischen Spezies herauszufiltern, nun auch auf die Lösung komplexer Optimierungsaufgaben anzuwenden. Dabei übernimmt das Wechselspiel von Mutation und Selektion eine besondere Rolle. Die Fitness, die während des Evolutionsprozesses bewertet wird, entspricht in diesem Fall der obengenannten Kostenfunktion. Eine Kostenfunktion kann z. B. aus zwei Anteilen bestehen, a) den Transportkosten, die proportional zum mittleren Umweg sind, und b) den Baukosten, die proportional zur Gesamtlänge des Wegenetzes sind (vgl. Seite 169). Zwischen diesen beiden Anteilen soll ein möglichst guter Kompromiß gefunden werden. Praktisch geschieht dies so, daß an einem Ausgangszustand, in diesem Fall dem Direktwegenetz, kleine Veränderungen (Mutationen) vorgenommen werden und anschließend die Kostenfunktion für den neuen Zustand berechnet wird. Liegen die Kosten günstiger, wird der veränderte Zustand als Ausgangspunkt für weitere Mutationen genommen. Aber auch im anderen Fall besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür, diesen Zustand zu akzeptieren, obwohl er eigentlich schlechter ist. Dies ist ein evolutionäres Element, denn die Evolution hat gezeigt, daß es oftmals günstig ist, kurzfristige Verschlechterungen zu akzeptieren, um langfristig einen besseren Zustand zu erreichen. Auf diese Weise wird verhindert, daß der Optimierungsprozeß vorzeitig in lokalen Minima der Kostenfunktion steckenbleibt und tiefere Minima nicht gefunden werden. Diese Strategie, auch als Boltzmann-Strategie bezeichnet, kann durch Elemente aus der biologischen Evolution erweitert werden (gemischte Boltzmann-Darwin-Strategie), indem man mehrere Spezies betrachtet, die in Konkurrenz zueinander versuchen, möglichst ein Optimum der Kostenfunktion zu finden. Allerdings können sich nur diejenigen Spezies reproduzieren, die bei der Optimierung besser als der Durchschnitt sind, was einen zusätzlichen Selektionsdruck bedeutet. Auf diese Weise wird in der simulierten Evolution eines Wegenetzes ein System mit minimierten Umwegen gefunden, das die vorgegebene Kostenfunktion (Transport- und Baukosten) optimal erfüllt. Allerdings können wir bei einer zweiten Simulation durchaus ein Wegesystem finden, das die vorgegebenen Punkte ganz anders verbindet, ohne daß sich die Kosten wesentlich von der ersten Variante unterscheiden. Dieser Umstand liegt einerseits begründet in der Natur frustrierter Probleme (der Vielzahl von gleichwertigen Lösungen), anderer-

seits in den auftretenden Fluktuationen (dem Walten des Zufalls bei der Mutation und bei der Akzeptanz schlechterer Lösungen). Auch hier kommen die historische Einmaligkeit und die Irreversibilität der Evolution zum Ausdruck.

Bei der Lösung von Transportproblemen geht es aber nicht nur um eine statische Optimierung, die sich in Kosten ausdrücken läßt, sondern auch um Probleme dynamischer Natur, wie zum Beispiel Verkehrsstaus. Daß heißt, Wegenetze, die bestimmte Kostenfunktionen optimal erfüllen, können durchaus versagen, wenn eine bestimmte überkritische Benutzungsdichte auftritt (dynamischer Lastfall). Um die dynamischen Eigenschaften von Wegenetzen zu optimieren, ist es notwendig, zusätzlich zur Kostenfunktion auch die Kinetik der Benutzer (Fahrzeuge, Fußgänger) zu modellieren, um auf diese Weise kritische Konstellationen zu erkennen (vgl. Seite 213). Ein weiteres dynamisches Kriterium bei der Bewertung von Wegesystemen als Transportnetze ist die effektive Reichweite der Benutzer, also die Strecke, die auf einem vorgegebenen Netz innerhalb einer Zeiteinheit zurückgelegt werden kann. Bei Benutzung eines Autos oder eines Hochgeschwindigkeitszugs kann sich diese effektive Reichweite, verglichen mit einem Fußgänger, um ein Vielfaches vergrößern. Letztlich führt dies zu einer Skalierung der (tatsächlich existierenden) metrischen Entfernungen. Wegenetze können also durch die Existenz verschiedener Transportmittel virtuell deformiert werden. Unter diesen Gesichtspunkten muß man bei der Optimierung eines Transportsystems verschiedenartige Wegesysteme berücksichtigen, die sich gegenseitig überlagern (wie beispielsweise Flugrouten, Eisenbahn- und Straßennetze), was die zu optimierende Kostenfunktion weiter kompliziert. Aufgrund der Vielzahl existierender (gleichwertiger) Lösungen wird man bei der Entscheidungsfindung allerdings auch Kriterien berücksichtigen, die nicht ohne weiteres einer Quantifizierung zugänglich sind (wie politische oder ökologische Argumente), so daß bei der Bewertung der Lösungen für Transportaufgaben letztlich wieder der mündige Bürger gefragt ist.

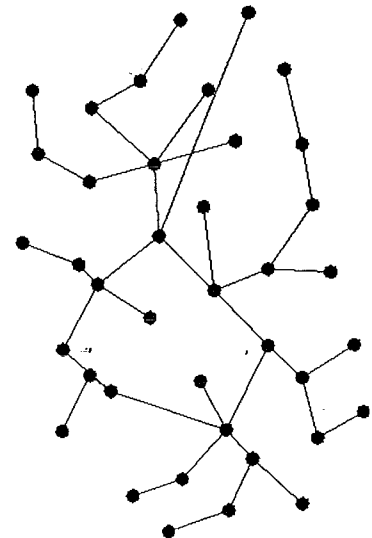
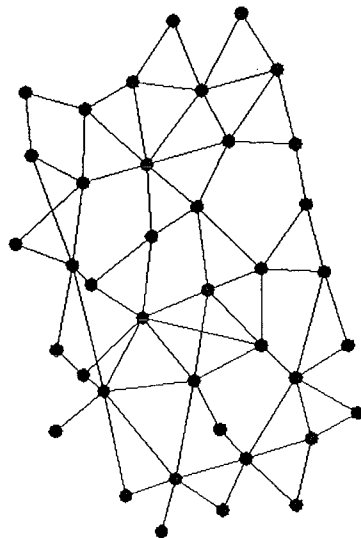
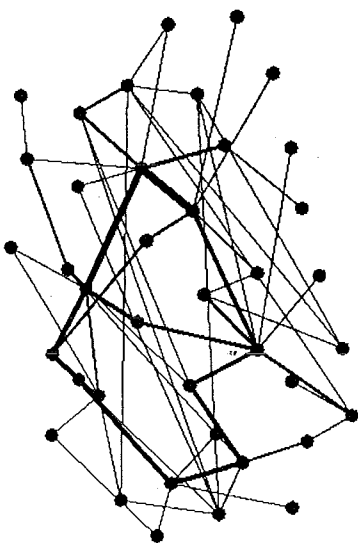


Optimierung von Wegenetzen mit Evolutionsstrategien

Wegenetze zwischen vorgegebenen Punkten sollen zumeist unter zwei Gesichtspunkten optimiert werden, die nicht ohne weiteres miteinander vereinbar sind: möglichst kurze Umwege (Direktwegesystem) und möglichst geringe Konstruktionskosten (Minimalwegesystem). Optimierungsaufgaben können mit Hilfe von evolutionären Strategien approximativ gelöst werden. Dazu wird eine »Fitness«-Funktion definiert, die das jeweilige System bewertet und die im Verlauf der Evolution optimiert werden soll. Im Fall des Wegesystems besteht diese Funktion aus der Summe

zweier Anteile: Der eine erfaßt den mittleren Umweg, um auf einem bestimmten Wegenetz von jedem Punkt zu jedem anderen zu gelangen, und der andere erfaßt die Kosten für die Gesamtlänge des Wegenetzes. Mit einem Parameter λ können beide Anteile gegeneinander gewichtet werden. Als Ausgangszustand des Wegenetzes wird das Direktwegesystem gewählt (mittlerer Umweg null, Konstruktionskosten maximal). Dieser Zustand wird im Verlauf der Evolution durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Wegstrecken verändert (Mutation) und danach neu bewertet. Änderungen, die zu einer Verbesserung der Fitness führen, werden immer akzeptiert,

Verschlechterungen nur mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit. Die oberen Abbildungen zeigen zu drei verschiedenen Zeiten den Stand der Optimierung eines Wegenetzes für 40 Punkte ($\lambda = 0,02$), wobei die Strichstärke der Teilstrecken die Benutzungshäufigkeit angibt, um alle Punkte untereinander zu erreichen. Die unteren Abbildungen zeigen verschiedene Wegenetze in Abhängigkeit von λ nach jeweils 5.500 Simulationsschritten. Je größer λ ist, um so mehr fallen die Kosten des Wegenetzes ins Gewicht, was in der Evolution einer Bevorzugung des Minimalwegenetzes entspricht. *Frank Schweitzer, Olaf Weiss, Werner Ebeling*



**Prozeß und Form
»Natürlicher Konstruktionen«**

Der Sonderforschungsbereich 230

Herausgegeben von
Klaus Teichmann und Joachim Wilke

Ernst & Sohn

© 1996 Ernst und Sohn
Verlag für Architektur und technische
Wissenschaften GmbH, Berlin
Ein Unternehmen der VCH Verlagsgruppe.
ISBN 3-433-02883-4

Der Sonderforschungsbereich 230 – Zur »Biographie« eines Forschungsprojekts

Rolf Reiner

10 Komplexität als Programm

Konstruktion und Selbstorganisation der »Natur«

Günther Bien, Joachim Wilke

16 Konstruktionen der Natur

Werber Ebeling

24 Grundzüge evolutionärer Selbstorganisation

Zum Konstruktionsverständnis der Biologie

Thomas Zoglauer

28 Technomorphe Modelle in der Biologie

Werner Nachtigall

33 Technische Biologie und Bionik

Ulrich Kull, Wolfgang Maier, Werner Nachtigall, Adolf Seilacher

34 Funktions- und Konstruktionsmorphologie

Wolf-Ernst Reif

52 Theoretische Morphologie

Ulrich Kull

56 Blattadersysteme: Form, Funktion und Selbstorganisation

Hans-Wolf Reinhardt, Simon Aicher

58 Der Baum als Natürliche Konstruktion

62 (Holz-)Bruchmechanik

Formfindung und Entwurf Natürlicher Konstruktionen

Ekkehard Ramm

68 »Force Follows Form« oder »Form Follows Force«?

Rainer Graefe

74 Aspekte der Geschichte des Konstruierens

Jos Tomlow

78 Der geometrische Faktor beim Konstruieren

Martin Trautz

Vom Strebewerk zum Bogen – frühe Holzbrückenerfindungen 84

Die Anfänge der Gewölbestatik und der Wölbkunst nach statischen Gesetzen 90

Ralf Höller

Phänomenologie Natürlicher Konstruktionen 96

Experimentelle Formfindung 106

Architektonische Betrachtungen zu Minimalflächen 112

Leichtigkeit als architekturensprachliches Problem 115

Klaus Linkwitz, Dieter Ströbel, Peter Singer

Die Analytische Formfindung 118

Kai-Uwe Bletzinger, Kurt Maute

Strukturoptimierung 131

Struktur und Konstruktion von Siedlungen und Städten

Heiderose Mast

Formbildungsursachen regelmäßiger Siedlungen in traditionellen Kulturen 150

Eda Schaur

Zur Phänomenologie und Evolution ungeplanter Siedlungen 154

Frank Schweitzer

Selbstorganisation von Wege- und Transportsystemen 163

Klaus Humpert, Sibylle Becker, Klaus Brenner, Anette Gangler

Planung »gewachsener Städte« 172

Klaus Humpert, Sibylle Becker, Klaus Brenner

Entwicklung großstädtischer Agglomerationen 182

Stadtfeldtypen und Stadtfeldcollage 194

Selbstorganisation und Urbanität

Arne Wunderlin

Problemstellungen der Synergetik – eine Einführung 202

Wolfgang Weidlich

Die Entwicklung der Stadt aus der Sicht der Synergetik und Soziodynamik 210

Frei Otto

Kritischer Rückblick und Aufgaben für die Zukunft 220

Anhang 225