

Strukturbildung dynamischer Systeme

Dirk Helbing, Martin Hilliges, Péter Molnár, Frank Schweitzer, Arne Wunderlin
Redaktion: Klaus Teichmann, Joachim Wilke

Siedlungen, Städte und Regionen sind selbstorganisierte Gebilde mit einer hochkomplexen, ineinandergeschachtelten Binnenstruktur aus verschiedensten Subsystemen. Der Wachstumsprozeß städtischer Agglomerationen, die Entwicklung eines Verkehrsnetzes, die Entstehung einzelner Gebäude, soziale Prozesse innerhalb von gebauten Strukturen, wie zum Beispiel das Verhalten von Individuen als Fußgänger oder Autofahrer: All dies sind Beispiele für Prozesse, die auf unterschiedlichsten Zeitskalen raum-zeitliche Muster bilden, zu deren Verständnis es einer Wissenschaft vom Zusammenwirken bedarf, einer Theorie der Strukturbildung. Eine solche Theorie, die sogenannte 'Synergetik', wurde um 1970 von Hermann Haken an der Universität Stuttgart begründet. Sie untersucht von einem einheitlichen Standpunkt her Prozesse der Selbstorganisation und Kooperation in komplexen Systemen. Derartige Prozesse entdeckt man in ganz unterschiedlichen Bereichen der klassischen Wissenschaftsdisziplinen, in der Physik, der Chemie, der Biologie und ihren Derivaten. Aber auch in den Humanwissenschaften wie der Ökonomie oder Soziologie können solche Prozesse identifiziert werden. Diese Aufzählung weist bereits auf den Anspruch der Synergetik hin, eine interdisziplinäre Wissenschaft zu sein. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, Selbstorganisationsprozesse erschöpfend zu verstehen, führt die Synergetik über eine verbale Beschreibung dieser Prozesse hinaus, ihr methodisches Werkzeug ist der Mathematik entlehnt, und man kann sie als eine mathematische Strukturtheorie klassifizieren.

Die allgemeinen Merkmale der bisher in der Synergetik betrachteten Systeme lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Es handelt sich um offene Systeme, die in einem regen Austausch von Energie, Masse, Informationen usw. mit ihrer Umgebung stehen. Die Systeme selbst sind aus vielen Untereinheiten, den Subsystemen, zusammengesetzt. Diese Subsysteme, die die mikroskopische Beschreibungsebene der Systeme festlegen, stehen miteinander über ganz unterschiedliche Mechanismen in

Wechselwirkung. Bedeutsam ist, daß die Dynamik des Systems bereits auf der mikroskopischen Ebene nichtlinear ist. Solche Systeme haben die Eigenschaft, auf völlig unspezifische Veränderungen ihrer Umwelteinflüsse so zu reagieren, daß sie sich spontan in einem makroskopischen Maßstab selbst organisieren. Dabei wird diese Selbstorganisation über Instabilitäten ihres vorliegenden Zustandes gegenüber einem qualitativ neuen Zustand erreicht. Diese neuen Zustände bestehen beispielsweise in räumlichen, zeitlichen oder raum-zeitlichen Mustern, die sich auf der Betrachtungsebene des Gesamtsystems, der sogenannten makroskopischen Ebene ausbilden. Auch spezielle, hoch koordinierte Funktionsweisen des Systems können das Resultat solcher Selbstorganisationsphänomene sein.

Die bedeutenden Resultate der Synergetik bestehen nun darin, daß die auf der makroskopischen Ebene neu entstehenden Strukturen durch wenige kollektive Variable, die man als Ordnungsparameter bezeichnet, beschrieben werden können. Diese Ordnungsparameter werden vom System selbst über einen raffinierten Mechanismus generiert, den man als zyklische Kausalität beschreiben kann: Die mikroskopischen Subsysteme erzeugen auf der makroskopischen Ebene Ordnungsparameter, die ihrerseits auf diese Subsysteme zurückwirken, und zwar in einer Weise, die ihr Überleben selbst wieder sichert. Dies ist eine verbale Darstellung des sogenannten Versklavungsprinzips der Synergetik, das von Hermann Haken allgemein formuliert wurde. Die grundlegende Einsicht besteht darin, daß die mathematischen Strukturen, die diese Vorgänge beschreiben, in der Umgebung der Instabilitäten von den mikroskopischen Daten der Subsysteme unabhängig sind und damit universellen Charakter gewinnen. Dadurch erhält man die Möglichkeit, hochkomplexe Systeme ausschließlich durch makroskopische Daten mathematisch zu beschreiben.

Was kann man aber tun, um die Komplexität von Systemen zu beschreiben, bei denen die entscheidenden Ordnungsparameter nicht ohne weiteres quantitativ erfaßt werden können? Hier bieten sich prinzipiell zwei Wege an, die das makroskopische Verhalten mit den Eigenschaften der mikroskopischen Subsysteme verbinden. Die sogenannte 'top-down'-Beschreibung versucht, das Systemganze von oben her in Wechselwirkungen von hierarchisch geordneten Subsystemen aufzulösen, die ihrerseits weiter in Einzelelemente

zerlegt werden können. Auf diese Weise wird nach der Art von hochdimensionalen Verzweigungsbäumen das gesamte mögliche Verhalten des Systems determiniert.

Demgegenüber geht die 'bottom-up'-Beschreibung von den mikroskopischen Elementen des Systems aus. Für die Wechselwirkung dieser Elemente untereinander werden zumeist sehr einfache Annahmen getroffen, die nur lokal wirken (also auf das jeweilige Element am jeweiligen Ort) und nicht global (also auf das System als Ganzes). Die Frage ist nun: Wie entstehen aus diesen lokalen Interaktionen die makroskopischen Eigenschaften des Gesamtsystems? Wenn diese Eigenschaften nicht bereits schon von Anfang an in den mikroskopischen Wechselwirkungen enthalten waren (wenn auch vielleicht an verborgener Stelle), so müssen sie im Verlauf der Evolution des Systems durch Selbstorganisation aus der lokalen Wechselwirkung der Elemente heraus entstanden sein. Das System als Ganzes besitzt dann Eigenschaften, die die Elemente für sich genommen nicht haben - und es muß einen Qualitätssprung geben, bei dem diese neuen Systemeigenschaft erscheint. Für diesen Sprung hat sich der Begriff 'Emergenz' eingebürgert. Das Faszinierende der Emergenzphänomene liegt dabei in der Tatsache, daß die Komplexität des Systems zumeist nicht auf gleichermaßen komplexen Regeln für die Elemente beruht, sondern auf sehr einfachen Regeln, die bereits bei geringen Änderungen gänzlich andere Systemstrukturen hervorbringen können.

Eine solche Beschreibung ist prinzipiell nicht deterministisch. Die Evolution des Systems unterliegt zwar Randbedingungen, die als Kontrollparameter wirken und die prinzipiellen Entwicklungsmöglichkeiten des Systems einschränken und beeinflussen - welche der vorhandenen Möglichkeiten aber letztlich verwirklicht wird, hängt in großem Maße von den Fluktuationen am Instabilitätspunkt ab. Insofern findet das System selbst diejenige Struktur, es entwickelt selbst diejenigen globalen Eigenschaften, die durch die Art der Wechselwirkung der Elemente und die gegebenen Randbedingungen möglich sind. In diesem Selbstorganisationsprozeß können durchaus Lösungen auftreten, die unvorhersehbar und neuartig sind. Andererseits ist aber auch die Frage, welche mikroskopischen Wechselwirkungen mit Sicherheit zu bestimmten makroskopischen Eigenschaften führen, nicht eindeutig zu beantworten.

Die 'bottom-up'-Beschreibung ist erfolgreich zur Beschreibung des komplexen Verhaltens verschiedener Systeme

me angewandt worden.² Wir wollen im folgenden einige spezielle 'bottom-up'-Modelle diskutieren, die auf die Selbstorganisation von gebauten Strukturen anwendbar sind - und zwar auf die Entstehung von Wegenetzen, das dynamische Verhalten von Fußgängern und die Herausbildung von Stop-and-Go-Verkehr auf einer Autobahn. Das Gemeinsame dieser drei Beispiele besteht darin, daß für das 'Verhalten' der Elemente (der Walker, der Fußgänger, der Autos) lediglich sehr einfache lokale Regeln aufgestellt werden, wie das Setzen oder Befolgen von lokalen Markierungen, das Einhalten einer Wunschgeschwindigkeit oder eines Mindestabstandes zum nächsten Element usw. Das Verhalten der verschiedenen Elemente ist auf nichtlineare Weise miteinander gekoppelt. Aufgrund dieser Wechselwirkung kommt es bei bestimmten kritischen Parametern (der Markierungsstärke, der Dichte der Fußgänger, der Dichte der Autos usw.) zur spontanen Herausbildung von neuen Strukturen (den Wegen, dem Rechts-Links-Verkehr bei Fußgängern, dem Stop-and-Go-Verkehr auf der Autobahn). Die entwickelten Selbstorganisationsmodelle liefern Anhaltspunkte für den kritischen Bereich, in dem sich diese Strukturen herausbilden, und können zum Teil die zeitliche Entwicklung des Übergangs realistisch beschreiben.³

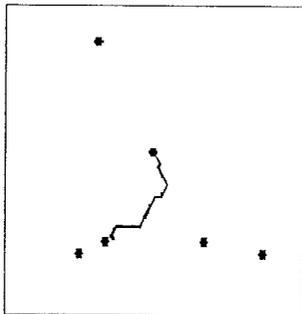
Selbstorganisation bei der Entstehung von Wegenetzen
 Aus strukturtheoretischer Sicht kann man ein Wegenetz als eine zweidimensionale Struktur auffassen, die sich auf einer Oberfläche herausbildet. Diese makroskopische Struktur sollte relativ stabil über einen längeren Zeitraum hinweg existieren, und 'Individuen', die sich auf der Oberfläche bewegen, sollten vorwiegend entlang der Wegestruktur zu finden sein. Gefragt wird nach einem Minimalmodell, das derartige Strukturen simuliert.

Das Wegesystem, wie wir es hier betrachten, ist eine ungeplante Struktur; es gibt keine zentrale Vorgabe, wo der Weg entlang zu gehen hat, und es gibt auch keine 'höhere Instanz', die den 'Individuen' mitteilt, welche Wege sie benutzen müssen. Vielmehr ist es die gemeinsame Aufgabe der 'Individuen', diese Wege selbst hervorzubringen, ihre Existenz durch ständige Nutzung zu sichern und die Wege gegebenenfalls zu verändern, falls sich neue Anforderungen ergeben. Daß diese Aufgabe auch ohne vorherige Abstimmung der 'Teilchen' untereinander lösbar ist, zeigt zum Beispiel die Lebensdauer und die Flexibilität von ungeplanten Trampelpfaden in neu erschlossenen Siedlungen.

Man kann die Entstehung derartiger Strukturen als einen Selbstorganisationsprozeß beschreiben, der auf einer lokalen Interaktion zwischen den 'Individuen' basiert. Um dies näher zu erläutern, betrachten wir ein Modell von 'Active Walkers' (aktiven Wanderern). Diese Wanderer sind in der Lage, bei jedem Schritt ihren individuellen Weg zu markieren - sei es durch Duftmarken (zum Beispiel bei Ameisen) oder indem

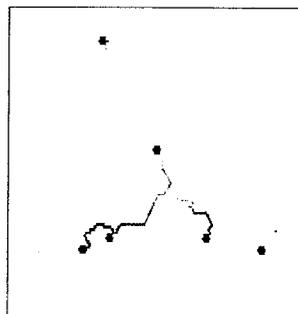
sie die Umgebung sichtbar verändern (zum Beispiel bei Huftieren, die das Gras in der Steppe niedertreten oder eine Bresche ins Unterholz schlagen). Diese Markierungen können mit der Zeit wieder verschwinden, wenn sie nicht ständig erneuert werden. Die Wanderer können bereits existierende Markierungen erkennen und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dem markierten Weg folgen. Wir nehmen weiter an, daß der Wanderer kein Gedächtnis hat: Er kann also nicht seinen zurückgelegten Weg speichern; er kann auch nicht willentlich einem für ihn lokalisierten Ziel zustreben oder zusätzliche Orientierungsmöglichkeiten zu Hilfe nehmen. Das heißt, die Entscheidung jedes Wanderers, einer Markierung zu folgen, ist stets ein lokaler Prozeß, der nicht von geplanten Absichten gesteuert wird. Die Herausbildung des ungeplanten Wegesystems kann mit Hilfe von Computern simuliert werden. Wir nehmen an, daß sich am Anfang alle aktiven Wanderer in einem Biwak (einem Nest, einem Zentrum) befinden und auf der Oberfläche keine Markierungen existieren. Die Wanderer, die vom Biwak aus starten, wählen die Richtung ihres nächsten Schrittes zufällig, solange sie keine Markierungen finden. Trifft der Wanderer auf eine Markierung innerhalb seines Gesichtsfeldes, kann er diese Markierung mit der Wahrscheinlichkeit β ignorieren oder mit einer Wahrscheinlichkeit $(1-\beta)$ dem bezeichneten Weg folgen.

Folgt der Wanderer einer Markierung, wird sie verstärkt, denn er selbst setzt ja auch bei jedem Schritt eine

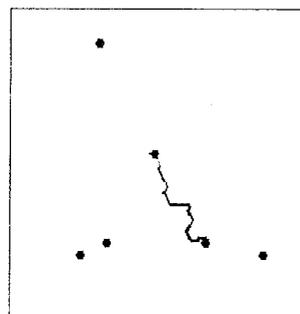


Gerichtetes Wegesystem: Die Computer-Walker (Wanderer) bauen nacheinander Wege zu fünf unterschiedlichen 'Futterplätzen' aus, die sie zufällig entdecken. Das Futter an den Plätzen wird nach einer gewissen Zeit aufgezehrt, wodurch

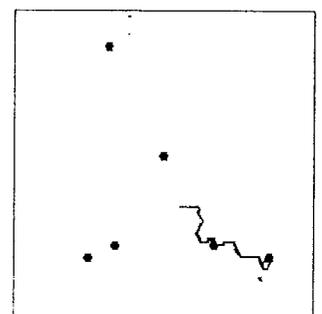
der Platz unattraktiv wird. Gezeigt werden die vorhandenen Wege zu fünf verschiedenen Zeiten: (a) $t=2.000$, (b) $t=4.000$, (c) $t=6.000$, (d) $t=8.500$ und (e) $t=15.000$ Zeitschritte



Directional trail system: one after the other, computer walkers blaze trails to five different 'feeding places' which they have discovered by chance. After some time, the food in these places is exhausted, which makes them unattractive.



The figures show the trails which exist at five different points of time: (a) $t=2.000$, (b) $t=4.000$, (c) $t=6.000$, (d) $t=8.500$ and (e) $t=15.000$ time intervals



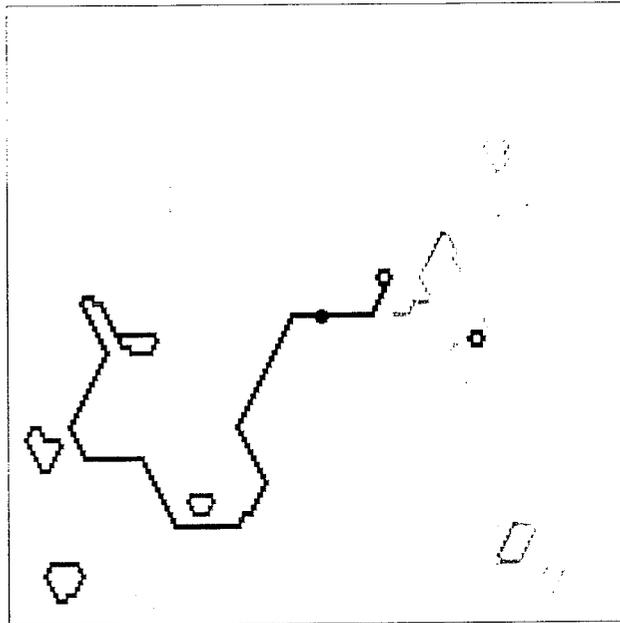
© Frank Schweitzer

Markierung. Auf diese Weise wird der Weg ausgebaut. Die entstehenden Wege sind ungerichtet; sie werden von den Wanderern lediglich begangen, ohne tatsächlich zwei vorgegebene Punkte miteinander zu verbinden. Um ein gerichtetes Wegesystem zu erhalten, müssen wir eine zweite Art von Markierungen einführen, die die Wanderer verwenden, nachdem sie einen bestimmten Platz gefunden haben. Wir führen dazu in das bisherige Modell Plätze ein, die für die Wanderer attraktiv sind (zum Beispiel Futterplätze). Die Wanderer starten, ohne die Lokalisation dieser Plätze zu kennen. Entdeckt ein Wanderer zufällig einen Platz, verwendet der entsprechende Wanderer anschließend statt der ersten die zweite Markierung (zum Beispiel einen zweiten Duftstoff),

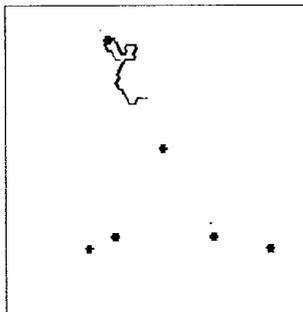
die anzeigt, daß er einen Futterplatz gefunden hat. Er orientiert sich aber weiter an der ersten Markierung und wird dadurch eventuell einen Weg zurück zum Ausgangspunkt finden. Dort angekommen, startet der erfolgreiche Wanderer eine Anzahl neuer Wanderer. Diese setzen Marken von der ersten Art, wenn sie vom Biwak aus starten, orientieren sich aber an der zweiten Markierung, um den Futterplatz zu finden. Ist der Futterplatz erreicht, orientieren sich die rekrutierten Wanderer wieder an den Marken der ersten Art und setzen Marken der zweiten Art, die anzeigen, daß auch sie erfolgreich den Platz gefunden haben. Wird der Platz

unattraktiv (weil zum Beispiel kein Futter mehr da ist), wird der Weg dorthin nicht mehr verstärkt und verschwindet mit der Zeit wieder, während die Wanderer andere attraktive Plätze finden und Wege dorthin ausbauen.

Das Bemerkenswerte bei der hier modellierten Entstehung von Wegen liegt in der Tatsache, daß die Wanderer gemeinsam eine Struktur hervorbringen, von der der einzelne Wanderer kein Abbild hat. Das gesamte 'Wissen' des Wanderers besteht darin, an dem Punkt, an dem er sich gerade befindet, eine Markierung zu erkennen, für die er gerade sensibel ist, und dieser entweder zu folgen oder nicht zu folgen. Das ungeplante Wegesystem, ob gerichtet oder ungerichtet, entsteht hier tatsächlich durch Selbstorganisation - durch ein Wechselspiel von Selbstverstärkung und Selektion, das durch die lokale Kommunikation der Wanderer vermittelt wird.⁴



Unplanned, non-directional trail system created by 100 "active walkers" in a computer simulation: the trails emerge in an interplay of self-enforcement and selection. The different shades indicate the frequency of use for each path. A main path surrounded by a network of side paths, which are used less frequently, is clearly recognized. The system is non-directional, i.e. it does not connect any points of destination



Ungeplantes, ungerichtetes Wegesystem, das von 100 'Active Walkers' in einer Computersimulation hervorgebracht wurde: Die Wege bilden sich in einem Wechselspiel von Selbstverstärkung und Selektion heraus. Die Graustufen zeigen die Benutzungshäufigkeit der Wege an. Man

erkennt deutlich eine Hauptstraße, die von einem Netz seltener benutzter Nebenstraßen umgeben ist, wobei die Grauskala die Benutzungshäufigkeit der Wege anzeigt. Das Wegesystem ist ungerichtet, das heißt es verbindet keine Ziele miteinander

Dynamisches Verhalten von Fußgängern in gebauter Umgebung
 In Gebäuden und Anlagen mit hohem Fußgängeraufkommen haben die baulichen Gegebenheiten einen empfindlichen Einfluß auf das Verhalten von Fußgängerströmen. Kleine Änderungen, wie z.B. die Anordnung von Türen oder Treppen, können gravierende Auswirkungen auf den Fußgängerverkehr haben. Eine quantitative Beschreibung und Berechnung des Verhaltens von Fußgängern bietet die Möglichkeit, Fußgängerströme in Abhängigkeit von Baumaßnahmen vorherzusagen und direkt in die Planung miteinzubeziehen.

Die Fragestellung, ob z.B. eine geplante Fußgängerunterführung von den Passanten akzeptiert wird, so daß die dort befindlichen Läden ausreichend Laufkundschaft bekommen, läßt sich durch Computersimulation bereits in der Planungsphase beantworten.

Für diese Simulationen wird im Rahmen des SFB 230 ein Dynamisches-Kräfte-Modell entwickelt, das neben den physischen Eigenschaften der Fußgänger, wie Platzbedarf und Gehgeschwindigkeit, auch die sozialen Wechselwirkungen untereinander in die

Beschreibung einbezieht. Dadurch ist es gegenüber bisherigen Untersuchungen möglich, das Verhalten der Fußgänger im Gedränge zu untersuchen.

Das Dynamische-Kräfte-Modell beschreibt das Entstehen von Strukturen durch das Verhalten der Fußgänger auf der mikroskopischen Ebene, es simuliert das Verhalten des Individuums. Es basiert auf der Idee, (spontanes) menschliches Verhalten mathematisch durch Kräfte zu beschreiben. Anwendbar ist diese Betrachtungsweise für Situationen, in denen der Mensch reflexartig auf ein Ereignis (eine Störung) reagiert. Ein einfaches Beispiel ist der Ausweichprozeß gegenüber einem entgegenkommenden Fußgänger. Das Ausweichmanöver kann formal wie eine abstoßende Krafteinwirkung auf den Fußgänger beschrieben werden.

Im Unterschied zu physikalischen Systemen handelt es sich aber nicht um von außen einwirkende Kräfte, sondern um mathematische Terme zur Beschreibung der Reaktionsweise von Fußgängern auf die Wahrnehmung ihrer

Umgebung, die sie dann selbst in motorische Kräfte umsetzen.

Die Simulationen liefern realistische Ergebnisse, die mit Videoaufnahmen von Fußgängerströmen verglichen wurden. Sie zeigen die Selbstorganisation von räumlichen und zeitlichen Mustern. Beispielsweise bilden sich Spuren gleicher Bewegungsrichtungen heraus, wenn sich auf einem breiten Gehweg Fußgängermengen in entgegengesetzter Richtung durchdrängen. Hierbei entstehen längs des Weges Kanäle mit einer bevorzugten Gehrichtung. Teilweise wird dieser Effekt so sehr verstärkt, daß alle Fußgänger auf der rechten bzw. linken Seite gehen. Es tritt also ein Symmetriebruch auf, obwohl das Modell die Ausweichwahrscheinlichkeit nach rechts oder links bei einem Hindernis als gleich groß ansetzt.

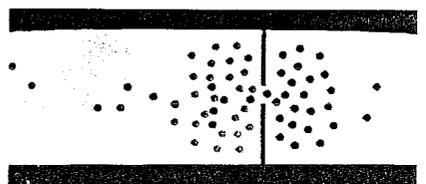
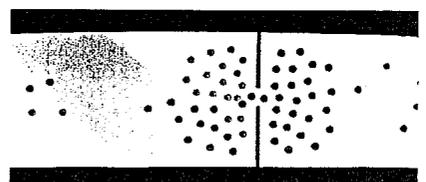
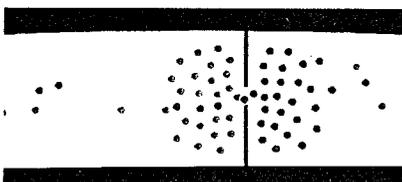
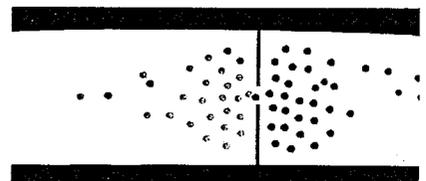
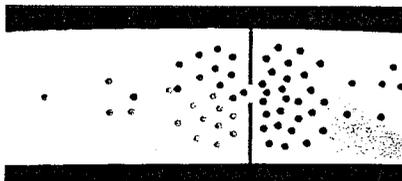
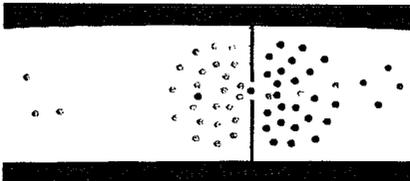
Ein zeitliches Muster tritt im Falle zweier Räume auf, in denen sich Menschen befinden, die durch eine Verbindungstür in den jeweils anderen Raum drängen. Die beiden entgegenkommenden Gruppen blockieren zunächst gegenseitig den Durchgang. Schließlich wird dieses Gleichgewicht von einer Gruppe zufällig durchbrochen. Für eine gewisse Zeit strömen die Fußgänger die-

Computermodell des Gedränges an einem schmalen Durchgang: Zwei konkurrierende Gruppen versuchen in Gegenrichtung durch eine schmale 'Tür' zu kommen. Zunächst sieht man eine typische Pattsituation: Keine Gruppe kann

sich gegenüber der anderen durchsetzen. Nur vereinzelt gelangt ein Fußgänger auf die andere Seite. Zu einem nicht bestimm- baren Zeitpunkt kommt es zu einer Symmetriebruchung, die zu vorübergehender Spurbildung führt

Computer model of crowd at a narrow thoroughfare. Two competing groups coming from opposite directions are trying to pass a narrow 'door'. At first, we see a typical deadlock situation: none of the groups can assert

itself against the other. Only now and then a pedestrian succeeds in passing. At an instant that cannot be determined, there is a break of symmetry, which results in temporary trail formation



ser Gruppe dann durch die Tür, bis sich der Druck auf der Gegenseite soweit erhöht, daß diese zum Zuge kommt. Die Oszillation der Durchgangsrichtung hält an, bis sich die Räume geleert haben. Ein vergleichbares Phänomen ist während des Ein- und Aussteigens bei U-Bahnen zu beobachten.

Das dargestellte Modell kann um ein Entscheidungsmodell erweitert werden, das die Auswahl der Fußgänger zwischen alternativen Wegen oder Zielen, z.B. zwischen Geschäften mit ähnlichem Warenangebot, beschreibt. Einfluß auf die Entscheidungsfindung haben hierbei

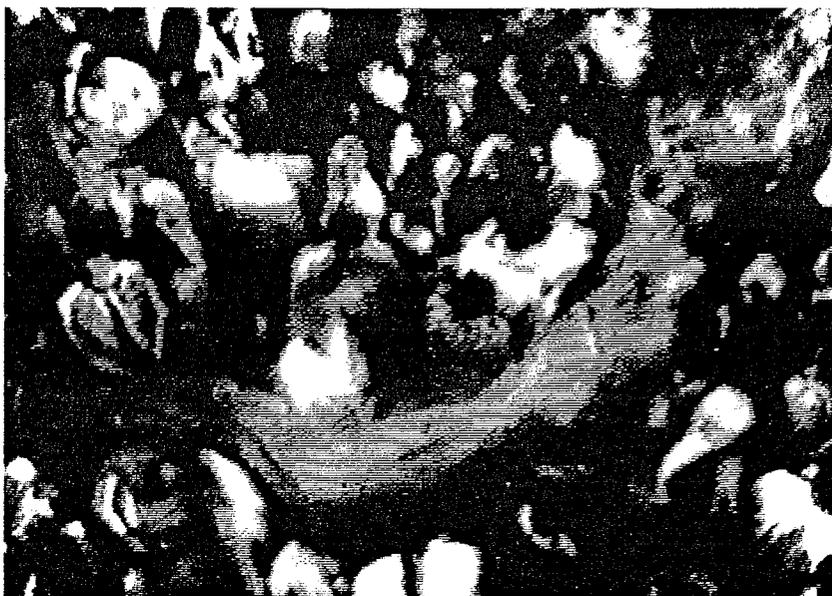
der Bedarf der Fußgänger, die Lage der Geschäfte, ihr Warenangebot und ihr Preisniveau.

Durch gezielte bauliche Maßnahmen kann die Entstehung von selbstorganisierten Strukturen verstärkt und der Fußgängerfluß auch ohne die Vorgabe exakter Verhaltensmaßregeln, z.B. durch eine Ausschilderung, verbessert werden.

Von besonderem Interesse sind diese Überlegungen allerdings auch für solche Fälle, in denen es zu schwerwiegenden Störungen des Systems kommt. Denn gerade in Paniksituationen werden vorgegebene Regeln nicht mehr eingehalten. Es treten in solchen Fällen turbulente Situationen auf. Die Frage, die es

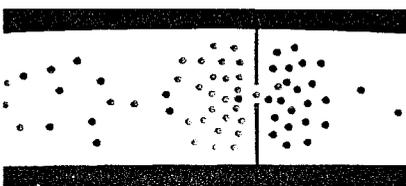
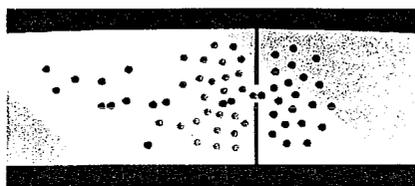
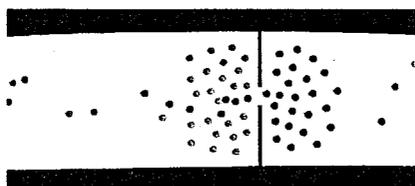
zu beantworten gilt, lautet: Welche baulichen Randbedingungen sind notwendig, damit sich in solchen Situationen aus dem chaotischen Systemzustand von selbst Strukturen organisieren, die zu einer schnellen Entschärfung der Paniksituation führen?

Während die immer wieder auftretenden kleineren Störungen in Fußgängerströmen meist ohne schwerwiegende Konsequenzen bleiben, ist das im Falle des Straßenverkehrs nicht der Fall. Hier können kleine Störungen katastrophale Auswirkungen nach sich ziehen.



Menschenmenge vor einem Kino, die von Zuschauern, die das Kino verlassen, durchquert wird. Dabei entsteht eine Spur, die meist nicht geradlinig ist (Standbild aus einem Zeitrafferfilm von Thomas Arns)

Crowd in front of a cinema, traversed by spectators who are leaving the cinema. This situation produces a trail which is mostly not straight



Verkehrssysteme

Aus vielen Systemen mit nichtlinearer Dynamik ist bekannt, daß diese über weite Parameterbereiche gegenüber Fluktuationen ein stabiles Verhalten zeigen, um dann plötzlich, bei einer geringen Änderung eines Kontrollparameters, in ein völlig neues Systemverhalten umzuschlagen. In dem ursprünglich homogenen System bilden sich räumliche, zeitliche oder auch raum-zeitliche Strukturen aus, die Symmetrie des Ausgangszustandes wird gebrochen.

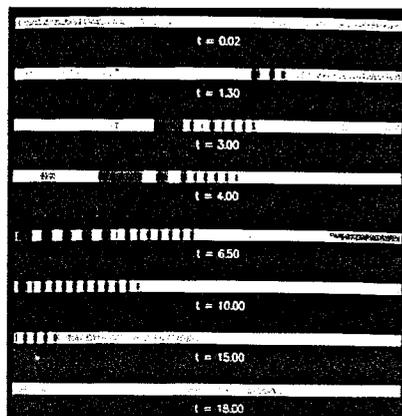
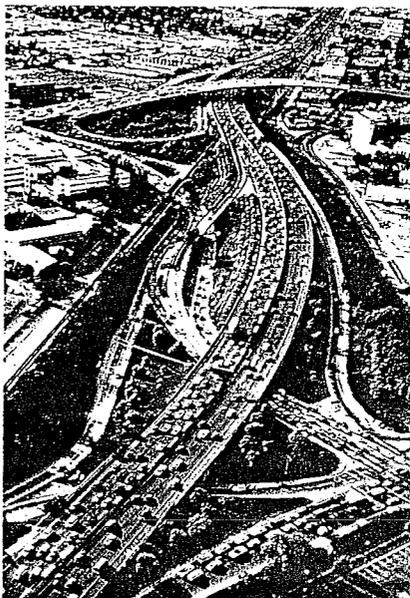
Im Falle des Verkehrsflusses auf einer Autobahn ist die Fahrzeugdichte ein Kontrollparameter. Über weite Bereiche der Fahrzeugdichte bleibt der gleichmäßig fließende Verkehr stabil, um dann, bei einer weiteren geringen Zunahme, plötzlich in den unerwünschten Stop-and-Go-Verkehr umzuschlagen. Dieser Zustand ist gekennzeichnet durch einen Wechsel von Streckenabschnitten mit stehendem, zählfließendem und schnellfließendem Verkehr. Diese emergente Makrostruktur bildet ein dynamisches, nichtlineares Wellensystem, dessen Verhalten unabhängig von der Fahrtrichtung des Verkehrsstroms ist. Das heißt prinzipiell können sich diese Wellen mit der Fahrtrichtung bewegen, sie können eine stehende Welle ausbilden oder, was am häufigsten zu beobachten ist, sich entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten. Im Unter-

schied zum Rückstau, der durch eine Kapazitätsänderung einer Straße (z.B. Baustelle, Unfall) entsteht, ist der Auslöser des Stop-and-Go-Phänomens allein die interne Dynamik des Verkehrsflusses oberhalb eines kritischen Verkehrsdichtewertes. Selbst kleinste Störungen (z.B. die Unaufmerksamkeit eines einzelnen Autofahrers beim Verstellen des Radiosenders oder der Vorbeiflug des Lorenzschmetterlings) können zum Auftreten dieses Phänomens führen.

Um die bisher sehr wenig erforschten dynamischen Eigenschaften von Straßennetzen besser verstehen zu können, ist es notwendig, zuerst die Verkehrsdynamik auf einer einzelnen Strecke zu modellieren und zu simulieren, um darauf aufbauend die einzelnen Strecken zu Verkehrsnetzen zu verknüpfen. Zu diesem Zweck wurde im SFB 230 ein Modell entwickelt, das den Verkehrsfluß auf einer Strecke analog zu einer fließenden Flüssigkeit in einem Rohr beschreibt. Die Strecke wird dabei in zahlreiche kurze, zellenartige Abschnitte unterteilt, die nur mit ihren nächsten Nachbarn lokal in Wechselwirkung sind. Dieses Modell ist in der Lage, die Phänomene des Straßenver-

kehrs, wie den oben beschriebenen Stop-and-Go-Verkehr, zu simulieren. Das emergente Wellensystem kann sich als makroskopische Struktur über hundert solcher 'Zellen' erstrecken. Auf dieses einfache Modell aufbauend, wurden in einer weiteren Stufe die einzelnen Strecken zu einem Verkehrsnetz verknüpft, wobei das Routenwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer als Entscheidungsprozeß miteinbezogen wurde.

Die Ziele, die mit diesem Modell erreicht werden sollen, bestehen einerseits in der Anwendung des Modells zur Echtzeitsimulation des Verkehrs in Autobahnnetzen, um, analog zur Wettervorhersage, die weitere Entwicklung des Straßenverkehrs für ein bis mehrere Stunden vorhersagen zu können. Damit stünde ein wertvolles Hilfsmittel zur Verfügung, um frühzeitig in das Verkehrsgeschehen, u.a. durch Wechselwegweisung oder Geschwindigkeitsbeschränkungen, eingreifen zu können, so daß solche unerwünschten Selbstorganisationsphänomene wie der Stop-and-Go-Verkehr vermieden werden können. Andererseits lassen sich mit diesem Modell grundsätzliche Fragestellungen untersuchen, wie z.B., ob fraktale Straßennetze im dynamischen Lastfall effektiver sind als die regulären Schachbrettmuster der amerikanischen Großstädte.⁵



Simulation des Stop-and-Go-Verkehrs auf einer Strecke: Dargestellt ist eine Strecke von 40 km Länge, die von Fahrzeugen von links nach rechts durchfahren wird. Die Dichte der Fahrzeuge wird durch Graustufen dargestellt; helle Stellen bedeuten eine

hohe Fahrzeugdichte; dunkle Stellen eine niedrige Fahrzeugdichte. Am rechten Rand tritt eine geringe Abweichung von der stationären Geschwindigkeit als Störung auf. Diese Störung schaukelt sich auf, bildet eine Staufront und beginnt

rückwärts zu laufen. Schon vorhandene Staufronten führen im Laufe der Zeit zur Ausbildung von immer mehr Staufronten (helle Stellen), die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung 'stromaufwärts' bewegen

Anmerkungen:

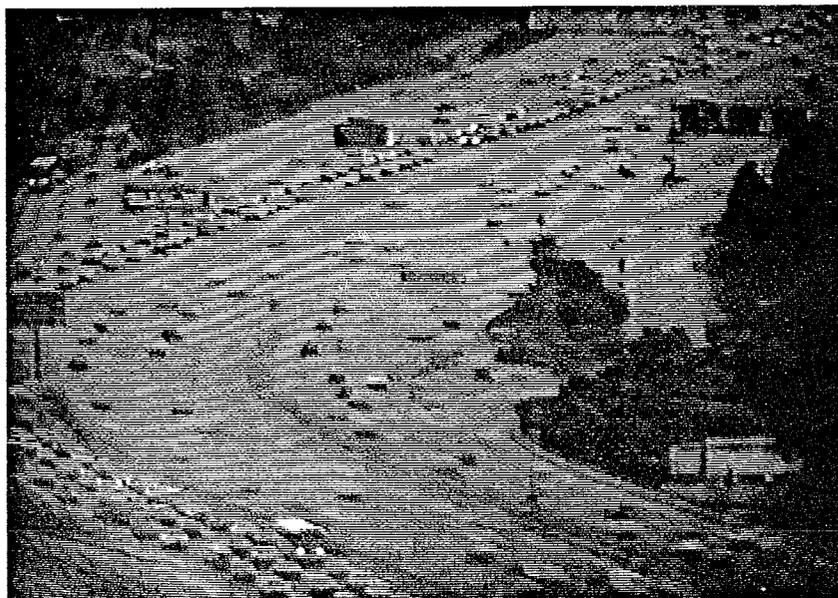
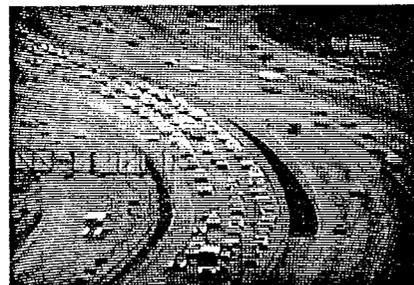
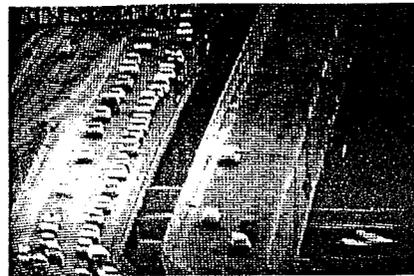
1) Vgl. zum Beispiel: U. Niedersen, L. Pohlmann (Hrsg.): Selbstorganisation und Determination (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 1), Berlin 1990.

2) Vgl. zum Beispiel: C.G. Langton, Ch. Taylor, J.D. Farmer, S. Rasmussen (Eds.): Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity, vol. X, Redwood City, CA 1991; J.-A. Meyer, S.W. Wilson (Eds.): From Animals to Animals, Cambridge, MA 1991.

3) Die Forschungsarbeiten zur Anwendung der Methoden der Synergetik auf spontan ablaufende Prozesse der Strukturbildung werden am Institut für Theoretische Physik und Synergetik der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Arne Wunderlin durchgeführt.

4) Die Untersuchungen zur Selbstorganisation bei der Entstehung von Wegenetzen werden unter der Leitung von Prof. Werner Ebeling am Institut für Theoretische Physik der Humboldt Universität Berlin durchgeführt.

5) Das dynamische Verhalten von Fußgängern und die Verkehrssysteme werden am II. Institut für Theoretische Physik der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Wolfgang Weidlich, Dr. Günter Haag und Dr. Rolf Reiner untersucht.



Rücklaufende
Staufront, verursacht
durch Stop-and-Go-
Verkehr

Retrograde congestion
line caused by stop-
and-go traffic

Zeitschrift für Architektur und Städtebau G 5416 F

ARCHIT

Die Architektur des Komplexen



Kritik:
Die Banalität
der Ordnung –
Daniel Libeskind
zu Lampugnani
SPIEGEL-Essay

Baumarkt:
Licht und
Lichtplanung

121

März 1994
DM 24



Impressum

Herausgeber und Verlag:
ARCH⁺ Verlag GmbH, Marc Fester, Sabine Kraft,
Nikolaus Kuhnert, Günther Uhlig

Verlagsadresse:
ARCH⁺ Verlag GmbH
Charlottenstr. 14
52070 Aachen
Tel.: 0241/508329; Fax: 0241/54831

Redaktionsadressen:
ARCH⁺ Aachen (siehe Verlagsadresse);
ARCH⁺ Berlin
Bergengruenstr. 35, 14129 Berlin
Tel.: 030/802 69 86, Fax: 030/802 81 20

Redakteure:
Nikolaus Kuhnert, Sabine Kraft, Philipp Oswalt,
Angelika Schnell, Gunnar Tausch

Ständige Mitarbeiter:
Dieter Hoffmann-Axthelm, Thomas Bösl, Joachim
Krause, Bruno Schindler, Günther Uhlig.

Zeitung: Gunnar Tausch, Angelika Schnell

Baumarkt: Andreas Bittis, Wolf Loebel

Anzeigenverwaltung:
Bernhard Harzer Verlag GmbH
Westmarkstraße 59/59 a
76227 Karlsruhe
Tel.: 0721/40 64 64; Fax: 0721/40 64 65

Aboverwaltung:
Computerservice Jost
Ickstattstr. 9
80469 München
Tel. 089/24013229; Fax: 089/24013215
Konto: Postgiroamt München 221560-808
(BLZ 700 100 80)

Vertrieb:
Claudia Roelen

Einzelbestellungen:
ARCH⁺ Verlag GmbH
Konto: Deutsche Bank Aachen 2525426
(BLZ 390 700 20)

Preise:
Einzelheft DM 24, Doppelheft DM 30

Abonnement:
Inland DM 72,
Ausland DM 80 (nur gegen Vorauszahlung)

Ermäßigtes Abonnement:
für Studenten, Arbeitslose gegen Vorlage einer
Bescheinigung
Inland DM 63, Ausland DM 70

Abonnementbedingungen:
Das Abonnement kann mit jedem gewünschten
Heft beginnen. Ein Jahresabonnement umfaßt 4
Einzelhefte, inkl. eines Doppelheftes. Kündigungen
sind bis zum Erhalt des letzten berechneten Heftes
möglich. Bestellungen können innerhalb von sieben
Tagen widerrufen werden.

Umszug:
Bitte teilen Sie uns unverzüglich eine etwaige
Adressenänderung mit, da Zeitschriften leider vom
Nachsendeantrag ausgeschlossen sind. Nicht
zustellbare Hefte landen im Reißwolf.

Rechte:
Die Redaktion behält sich alle Rechte, einschließlich
der Übersetzung und der fotomechanischen Wie-
dergabe vor. Auszugsweiser Nachdruck mit Quellen-
angabe ist gestattet, sofern die Redaktion davon
informiert wird. Für unverlangt eingesandte Manu-
skripte wird keine Gewähr übernommen. Ein Auto-
renhonorar kann nicht gezahlt werden.

Layout:
K/PLEX: Dominika Hasse, Nana Rausch;
Marion Strüber

Umschlag:
K/PLEX: Dominika Hasse, Nana Rausch

Satz:
K/PLEX GmbH, Monumentenstr. 35, 10829 Berlin
context GmbH, Oranienstr. 9, 52066 Aachen

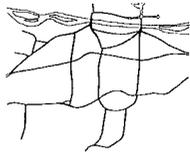
Lithos und Druck:
Ruksal Druck, Hagelbergerstr. 53, 10965 Berlin

ISSN 0587-3452

ARCH⁺

121

März 1994



"Die Grundlage der
Selbstorganisierenden
Prozesse jeder Stadt ist
das Wegesystem."
Frei Otto

Kritik

- 14 Daniel Libeskind: Die Banalität der Ordnung
Erwiderung auf den SPIEGEL-Essay
von Vittorio Magnago Lampugnani:
Die Provokation des Alltäglichen

Zeitung

- 17 Wired, RISZ, Zlaty rez
18 Formfindungsprogramme
19 Buchtips
20 Junge Architekten(4): Christian Wendt,
Klaus Gurk, Hanjörg Bohm
22 An ARCH⁺

Die Architektur des Komplexen

- 25 Zu diesem Heft
30 Selbstbildende Formen
Frei Otto im Gespräch mit ARCH⁺
38 Marie-Luise Heuser-Keßler, Wolf-Ernst Reif,
Frank Schweitzer, Klaus Teichmann, Joachim Wilke,
Kai-Uwe Bletzinger:
Die Architektur des Komplexen
43 Ulrich Kull, Klaus Teichmann, Joachim Wilke:
Zum Formverständnis
45 Joachim Bahndorf, Jürgen Hennicke, Ralf Höller,
Frieder Klenk, Kurt Maute:
Experimentelle Formfindung und Computersimulation
56 Rüdiger Vaas: Form und Emergenz
57 Sybille Becker, Klaus Brenner, Pierre Frankhauser,
Klaus Humpert, Ulrich Kull, Eda Schaur:
Selbstorganisation urbaner Strukturen
69 Dirk Helbing, Martin Hilliges, Peter Molnar,
Frank Schweitzer, Arne Wunderlin:
Strukturbildung dynamischer Systeme
76 Elisabeth Sikiaridi : Wege des Komplexen
Die Arbeit von Behnisch & Partner
84 "Die Dinge werden, wie sie wollen"
Günter Behnisch im Gespräch mit ARCH⁺

English Summary

- 86 The Architecture of the Complex
88 Self-Organisation in urban Structures
89 Structure Formation in dynamic Systems

Baumarkt: Licht und Lichtplanung

- 90 Planungsbüros
95 Simulation und Steuerung
97 Lampen und Leuchten
100 Internationale Möbelmesse Köln '94
101 Deubau Essen