

Wegesysteme als Beispiel kollektiver Strukturbildung [†]

Frank Schweitzer

Institut für Physik der Humboldt-Universität, Invalidenstrasse 110, 10115 Berlin
e-mail: schweitzer@physik.hu-berlin.de

1 Selbstorganisation von Wegesystemen

Die Herausbildung von Wegen ist ein Phänomen, das bei vielen biologischen Spezies gefunden wird. Die Beispiele reichen von den Schleimspuren der Myxobakterien, über die hochorganisierten Wegenetze von Ameisen, die Verbindungswege zwischen verschiedenen Eingängen einer Mäusekolonie, bis hin zu den Trampelpfaden der Huftiere oder den menschlichen Wegen.

Im Rahmen unserer Modellierungen fragen wir nach den physikalischen Bedingungen, die zur Herausbildung von Wegenetzen führen, und versuchen, ein Minimalmodell aufzustellen, das derartige Strukturen simuliert. Dazu wird das Wegesystem betrachtet als eine ungeplante Struktur, 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 (den Individuen) beruht. Wenn man von den artspezifischen Besonderheiten abstrahiert und statt dessen nach den allgemeinen Voraussetzungen fragt, die dieser Strukturbildung zugrunde liegen, dann lassen sich folgende Gemeinsamkeiten feststellen [Schweitzer, 1996]:

- Wege existieren in Form von Markierungen: Dies können beispielsweise Fußspuren sein (bei Menschen, die das Gras niedertreten oder bei Tieren, die eine Bresche ins Unterholz schlagen) oder chemische Duftstoffe (bei futtersuchenden Ameisen), aber auch sehr dauerhafte Markierungen, wie Beton oder Asphalt, die die menschlichen Straßen kennzeichnen. Alle diese Markierungen haben eine endliche Lebensdauer, das heißt, Wege bleiben nur erhalten, wenn sie benutzt und damit erneuert werden.
- Zwar kann jedes Individuum seinen eigenen Weg markieren, allerdings entstehen Wegesysteme erst durch eine Bündelung von Trajektorien der einzelnen Individuen. Wegesysteme sind also kollektiv erzeugte Strukturen. Voraussetzung ist, daß es für das Individuum (aus

[†]Der Beitrag erschien in der Fassung von 1995.

artspezifischen oder energetischen Gründen) günstiger ist, einen schon vorhandenen Weg zu benutzen, als einen eigenen Weg zu bahnen.

- Die Bündelung von Trajektorien zu gemeinsam benutzten Wegen impliziert, daß die existierenden Markierungen eine anziehende Wirkung auf die Individuen ausüben. Da mit der Benutzung des Weges wiederum eine Verstärkung der Markierung erfolgt, wird auf diese Weise 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 Individuen kommunizieren miteinander über das Medium (die Oberfläche), auf dem sie ihre Markierungen setzen.
- Der indirekte Kommunikationsprozeß zur Erzeugung von Wegesystemen läßt sich durch drei Elemente beschreiben: (a) "Schreiben": jedes Individuum "schreibt" Markierung, während es sich auf der Oberfläche bewegt, (b) "Lesen": jedes Individuum kann Markierungen erkennen, wenn sie sich in seiner Umgebung befinden, (c) "Handeln": aufgrund einer anziehenden Wirkung der Markierungen wird sich das Individuum mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in die Richtung der schon vorhandenen Markierungen bewegen. Auf diese Weise wird die Wegestruktur gemeinschaftlich von allen Individuen hervorgebracht und durch kollektive Benutzung weiter ausgebaut.
- Damit Wege erhalten bleiben, bedarf es einer bestimmten Benutzungshäufigkeit. Bei einer begrenzten Zahl von Individuen pro Flächeneinheit bedeutet die Verstärkung eines bestimmten Weges zwangsläufig die Nicht-Verstärkung, also das Verschwinden eines anderen Weges. Dies führt zu einem Konkurrenzprozeß unter den sich herausbildenden Wegen. Worum konkurrieren sie? Um die Individuen, die durch das Setzen der Markierungen die Existenz der Wege erst möglich machen. Im Rahmen eines Selektionsprozesses setzen sich diejenigen Wege, die von den meisten Individuen benutzt werden, mit der Zeit gegenüber den anderen Wegen durch - die aufgrund einer zu kleinen Erneuerungsrate wieder verschwinden.
- 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. Von besonderer Bedeutung sind allerdings die Markierungen, die ganz am Anfang der Entwicklung gesetzt werden, dann dadurch erhält das System seine frühe Prägung. Die Individuen haben prinzipiell 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.

- Durch die einmal existierenden Wege wird der "Versklavungseffekt" deutlich: je stärker bereits 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. Zwar ist die Entwicklung

des Wegesystems nicht vollständig irreversibel, aber das System hat immerhin ein gewisses “Gedächtnis”, das von der Dauerhaftigkeit der Markierungen bestimmt wird.

2 Simulation der Wegesysteme von Ameisen

2.1 Biologische Observationen

Ein weit verbreitetes und sehr beeindruckendes Phänomen kollektiver Strukturbildung ist die Herausbildung von komplexen Wegenetzen durch Ameisen-Kolonien. Zahlreiche Arten der *Myrmicinae*, *Dolichoderinae*, *Formicinae* bilden Hauptstraßensysteme, sogenannte *trunk trails*, die das Nest mit den entfernten Futterquellen verbinden. Zur Markierung verwenden sie chemische Marker, Orientierungspheromone, die zum Teil tagelang vorhalten [Hölldobler, Wilson, 1990].

Diese Futterstraßen haben typischerweise dendritische Formen. Ausgehend vom Nest, existiert zunächst eine “Hauptstraße”, die sich später aufspaltet in Nebenstraßen, die wiederum kleinere Verzweigungen in der Nähe der Futtergebiete bilden. So werden auf sehr effektive Weise Ameisen in die Futterregionen geleitet, wo sie einzeln Futter aufnehmen, das auf dem Rückweg wiederum auf denselben Straßen zum Nest transportiert wird.

Der Aufbau des Futterstraßen-Systems geht in zwei unterschiedlichen Etappen vor sich: (i) zunächst wird das umliegende Gebiet von einzelnen Ameisen, den “scouts”, nach Futterquellen abgesucht (*Explorations-Phase*). (ii) Wird Futter gefunden, dann aktiviert der erfolgreiche “scout” weitere Ameisen, die die Futterquellen ausbeuten (*Rekrutierungs- und Ausbeutungs-Phase*).

2.2 Simulation ungerichteter Wegesysteme

Basierend auf diesen biologischen Verhaltensregeln, kann die Entstehung eines Futterstraßen-Systems auch mit Hilfe eines *Active Walker*-Modells zur interaktiven Strukturbildung simuliert werden [Schweitzer, Schimansky-Geier, 1994, Schweitzer, Lao, Family, 1997, Schweitzer, 1996]. Diese Walker 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 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. Das heißt, die Entscheidung jedes Walkers, einer Markierung zu folgen, ist stets ein lokaler Prozeß, der nicht von geplanten Ansichten gesteuert wird.

Die Herausbildung des ungeplanten Wegesystems kann mit Hilfe von Computern simuliert werden. Die Walker, die vom Nest aus starten, wählen die Richtung ihres nächsten Schrittes zufällig, solange sie keine Markierungen finden. Findet der Walker eine Markierung innerhalb seines Gesichtsfeldes, dann kann er ihr mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit folgen. Da er selbst auch bei jedem Schritt eine Markierung setzt, wird die Wegmarkierung verstärkt und der Weg auf diese Weise ausgebaut.

Ein Beispiel für ein ungerichtetes und ungeplantes Wegesystem, das auf diese Weise entstanden ist, bietet Abb. 1. Es zeigt deutlich eine Anzahl von gut ausgebildeten Haupt- und Nebenwegen, die gemeinsam von 100 Walker hervorgebracht und unterhalten werden, wobei die Grauskala die Benutzungshäufigkeit der Wege anzeigt. Die weißen Flächen enthalten praktisch keine Markierungen, das heißt, die Walker haben tatsächlich die Wege benutzt.

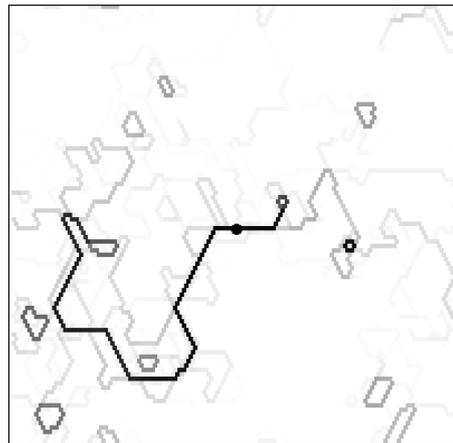


Abbildung 1: Wegesystem nach 10000 Simulationsschritten (Anzahl der Agenten: 100, trianguläres Gitter der Größe 100x100, Nest in der Mitte). [Schweitzer, Lao, Family, 1997]

2.3 Simulation dendritischer Wegesysteme

Die Wege in Abb. 1 sind ungerichtet; sie werden von den Walker lediglich begangen, ohne tatsächlich zwei vorgegebene Punkte miteinander zu verbinden. Um ein gerichtetes Wegesystem zu erhalten, führen wir (i) Zielpunkte (z.B. Futterplätze) ein, (ii) eine zweite Art von Markierung, die die Walker verwenden, *nachdem* sie einen Futterplatz gefunden haben.

Die Walker starten, ohne die Lokalisation der Futterplätze zu kennen. Entdeckt ein Walker zufällig einen Futterplatz, dann verwendet er statt der ersten die zweite Markierung (zum Beispiel einen zweiten Duftstoff). Er orientiert sich aber weiter an der ersten Markierung und wird dadurch eventuell einen Weg zurück zum Nest finden. Dort angekommen, rekrutiert der erfolgreiche Walker eine Anzahl neuer Walker, die anhand der zweiten Markierung versuchen, den Futterplatz zu finden.

In der Computersimulation in Abb. 2 ist das Futter an der Ober- bzw. der Unterkante des Gitters breit verteilt, während das Nest in der Mitte liegt. In der zeitlichen Abfolge ist deutlich die Entstehung eines dendritischen Wegesystems erkennbar, das das Nest mit den Futterregionen verbindet.

2.4 Simulation einer zeitlichen Folge von Futterstraßen

Bei Ameisen hängt die Struktur eines Wegesystems auch von der Futterverteilung ab. Bestimmte Spezies beuten keine breit verteilten Futterquellen aus, sondern suchen nach lokal konzentrierten,

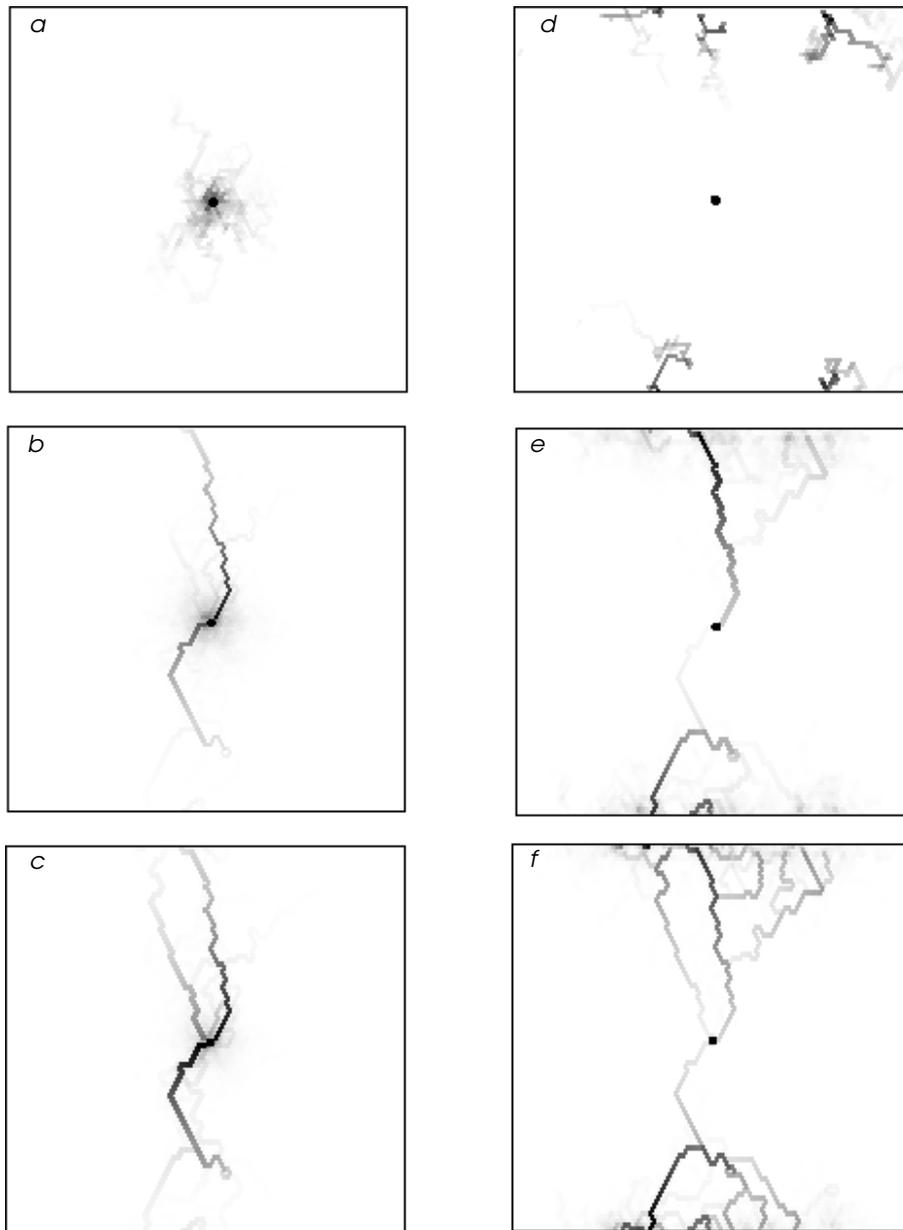


Abbildung 2: Wegebildung vom Nest zu den Futterregionen (oben und unten): links: Markierung 1, rechts: Markierung 2, (a), (d) nach 1000 Simulationsschritten, (b), (e) nach 5000 Simulationsschritten, (c), (f) nach 10000 Simulationsschritten [Schweitzer, Lao, Family, 1997]

ergiebigsten Beuteobjekten. In diesem Fall werden keine dendritischen Wegestrukturen, sondern einzelne Straßen zu den lokalisierten Futterplätzen aufgebaut. Diese verschwinden wieder, sobald das Futter abtransportiert ist.

Die Computersimulation in Abb. 3 zeigt in einer zeitlichen Abfolge die spontane Entstehung von Wegen zwischen einem Nest (Zentrum) und fünf Futterplätzen, die von den Walkern nacheinander entdeckt und ausgebeutet werden.

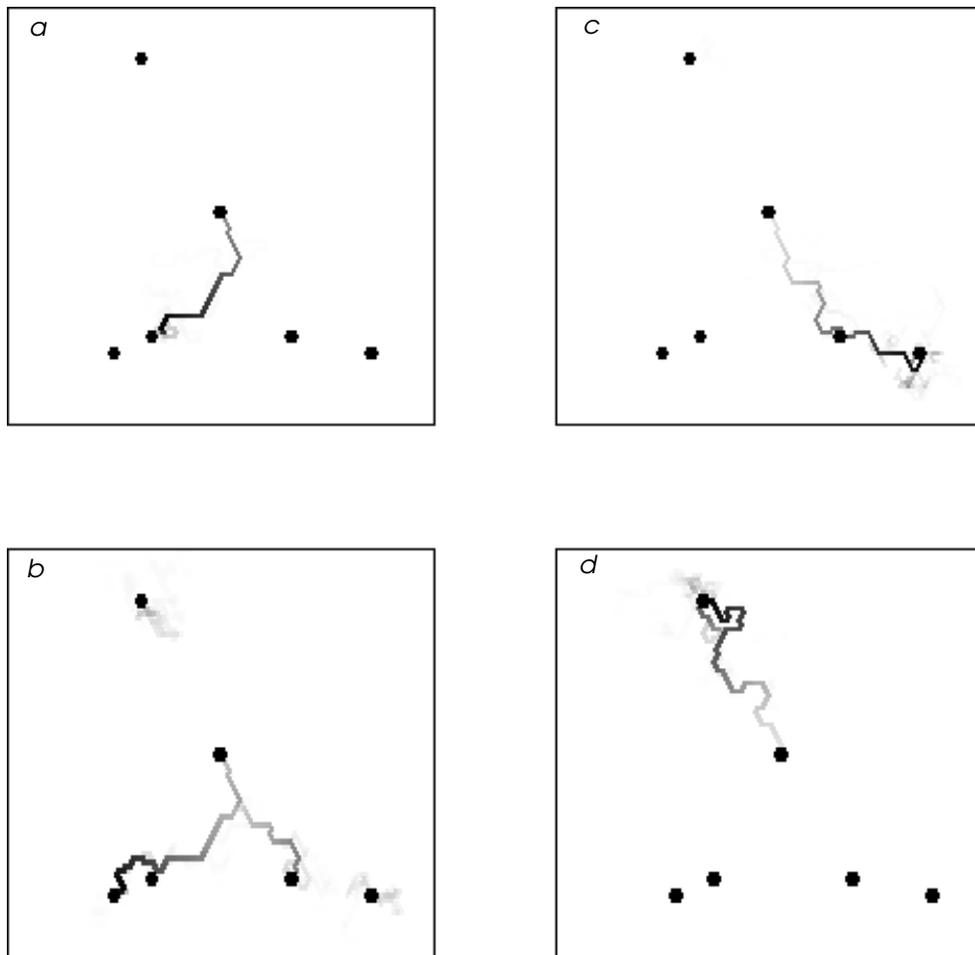


Abbildung 3: Wegebildung vom Nest zu fünf verschiedenen Futterplätzen (a) nach 2000 Simulationsschritten, (b) nach 4000 Simulationsschritten, (c) nach 8500 Simulationsschritten, (d) nach 15000 Simulationsschritten [Schweitzer, Lao, Family, 1997]

In dem Modell interaktiver Strukturbildung, auf dem die Abb. 1-3 basieren, erfolgt die Herausbildung von Wegen durch einen *Selbstorganisationsprozeß*, der auf einer lokalen Wechselwirkung zwischen den Walkern (indirekte Kommunikation über Markierungen) basiert. Das jeweils entstehende Wegesystem ist eine ungeplante Struktur, bei der die Verteilung der Futterquellen lediglich als topologische Randbedingung wirkt. In der Art der Wechselwirkung ist die konkrete Struktur des Wegesystems nicht verankert. Vielmehr sind es die Walker selbst, die diese Wege hervorbringen und ihre Existenz durch ständige Nutzung sichern (Selbstverstärkung). Die Wegestrukturen

sind stabil, so lange die Bedingungen für ihre Existenz (zum Beispiel das Futter) gegeben sind, und verschwinden, wenn sie nutzlos geworden sind (Selektion), während woanders neue Wege entstehen.

3 Literatur

- B. Hölldobler, E.O. Wilson: *The Ants*, Belknap, Cambridge, MA. 1990
- F. Schweitzer: Selbstorganisation von Wege- und Transportnetzen. In: *Prozeß und Form natürlicher Konstruktionen* (Hrsg. K. Teichmann, J. Wilke), Ernst & Sohn, Berlin 1996, S. 163-169
- F. Schweitzer, K. Lao, F. Family: Active random walkers simulate trunk trail formation by ants, *BioSystems* **41** (1997) 153-166
- F. Schweitzer, L. Schimansky-Geier: Clustering of active walkers in a two-component reaction-diffusion system, *Physica A* **206** (1994) 359-379