QUANTITATIVE SOZIODYNAMIK

Gegenstand, Methodik, Ergebnisse und Perspektiven*

Dirk Helbing und Wolfgang Weidlich

Zusammenfassung. In den vergangenen Jahren wurden, beispielsweise in der Synergetik, wichtige mathematische Einsichten über Systeme gewonnen, die aus sehr vielen nichtlinear wechselwirkenden Subsystemen bestehen. Diese haben unter anderem zu Fortschritten in der mathematischen Soziologie und den Sozialwissenschaften geführt. Der vorliegende Artikel referiert neuere Ergebnisse des aus der Theorie interagierender Populationen hervorgegangenen Gebiets der 'quantitativen Soziodynamik'. Dabei wird zum Zwecke der Allgemeinverständlichkeit auf mathematische Formulierungen vollständig verzichtet, obwohl diese eigentlich das Kernstück der quantitativen Soziodynamik darstellen. Der mathematisch interessierte Leser findet sie in den zitierten Quellen. Statt dessen konzentriert sich der Artikel auf die Darstellung der Schlüsselbegriffe und Zusammenhänge der in der quantitativen Soziodynamik verwendeten Konzepte. Besondere Bedeutung kommt dabei der Selbstorganisation (Emergenz) kollektiver Verhaltensmuster und sozialer Strukturen zu. In diesem Zusammenhang werden auch die Beziehungen zur allgemeinen Systemtheorie aufgezeigt. Die quantitative Soziodynamik kann insofern als eine Art 'Metatheorie' verstanden werden, als sie eine allgemeine Modellierungsstrategie zur Verfügung stellt und eine Reihe etablierter Modelle aus den Sozialwissenschaften als Spezialfälle enthält. Dazu zählen die logistische Gleichung, das Gravity-Modell, einige Diffusionsmodelle, die evolutionäre Spieltheorie, die soziale Feldtheorie und entscheidungstheoretische Konzepte. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen vom Meinungsbildungs-, Migrations-, Fußgänger-, Siedlungs- und Wahl-Verhalten bis zur Gruppendynamik und Modellen der evolutionären und Nichtgleichgewichts-Ökonomik.

I. Einleitung

Das Gebiet der quantitativen Soziodynamik ist ein noch recht junges, interdisziplinäres und sehr spannendes Forschungsgebiet, das sich mit der mathematischen Modellierung der zeitlichen Veränderung sozialer Systeme beschäftigt. Angesichts der wachsenden Komplexität gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und politischer Entwicklungen werden quantitative Modelle – auch als Entscheidungshilfe – immer wichtiger. Auch aus wissenschaftlicher Perspektive ist eine Mathematisierung sozialer Zusammenhänge längst überfällig. Verglichen mit rein qualitativen Betrachtungen erlaubt sie klarere Definitionen der verwendeten Begriffe, eine stärkere Reduktion auf die interessierenden Zusammenhänge, präzisere und kompaktere Beschreibungen von Strukturen und Relationen, zuverlässigere Schlußfolgerungen, genauere Prognosen, und damit besser

* An dieser Stelle möchten wir Prof. Dr. A. Diekmann für wertvolle Anregungen unseren Dank aussprechen. Einer der Autoren (D. H.) möchte sich außerdem bei Dr. R. Reiner für seine hilfreichen Kommentare und bei der VW-Stiftung sowie dem SFB 230 für die finanzielle Unterstützung bedanken.

überprüfbare Aussagen (vgl. Schnell et al. 1992; Griffith/Oldknow 1993). Darüber hinaus hat sich gezeigt, daß viele soziale Phänomene mit statischen Konzepten nicht richtig verstanden werden können. Manche dynamische soziale Prozesse lassen sich noch nicht einmal als Abfolge zeitabhängiger Gleichgewichtsstrukturen verstehen. Besonders die Beschreibung von Selbstorganisations- und Strukturbildungsprozessen erfordert dynamische mathematische Konzepte, die auch *Nichtgleichgewichtsphänomene*, das heißt die zeitliche Entwicklung instabil werdender Systeme beschreiben können.

Wegen der Komplexität sozialer Systeme hat man eine mathematische Formulierung der in ihnen auftretenden Vorgänge lange Zeit für nahezu unmöglich gehalten. Trotzdem hat es immer wieder entsprechende Ansätze gegeben, sowohl von Sozialwissenschaftlern als auch von Naturwissenschaftlern. Oftmals waren die vorgeschlagenen Konzepte allerdings zu einfach und wurden den Phänomenen, die sie beschreiben sollten, nicht genügend gerecht.

Erst in den vergangenen Jahren wurden leistungsfähige Methoden entwickelt, die es erlauben, komplexe Systeme zu beschreiben, die aus sehr vielen miteinander wechselwirkenden Einheiten (Subsystemen) bestehen. Richtungsweisend waren hier besonders Konzepte der *statistischen Physik* zur Beschreibung zufallsbehafteter Prozesse und Erkenntnisse auf dem Gebiet der *nichtlinearen Dynamik*, welches geprägt wurde durch die *Synergetik* (Haken 1982, 1983), die *Chaostheorie* (Bai-Lin 1984; Schuster 1984; Steeb/Kunick 1989), die *Katastrophentheorie* (Thom 1975; Zeeman 1977) sowie die Theorie der *Phasenübergänge* und *kritischen Phänomene* (Gebhardt/Krey 1980; Horsthemke/Lefever 1984; Ma 1976; Nicolis/Prigogine 1977). Diese haben immer wieder ihre interdisziplinäre Erklärungskraft bewiesen und erlauben auch die Entwicklung von Modellen für soziale Prozesse, und zwar auf einer weitaus fundierteren Ebene, als dies noch vor kurzem möglich war. Es gibt bereits eine beachtliche Liste von Physikern, die sich inzwischen mit Themen aus dem Bereich der mathematischen Soziologie auseinandergesetzt haben: Allen (1976, 1979, 1981, 1984, 1986), Ebeling (1991, 1992), Haag (1989), Haken (1982), Helbing (1991, 1992, 1993), Lewenstein et al. (1992), Malchow (1988), Montroll (1965, 1974, 1978), Mosekilde (1991, 1992), Prigogine (1971, 1976), Schweitzer (1991), Walls (1976), Weidlich (1971, 1972, 1987, 1991, 1993) und Wunderlin (1984).

Man darf in den kommenden Jahren auf dem Gebiet der mathematischen Beschreibung sozialer Phänomene sicher mit einer stürmischen wissenschaftlichen Entwicklung und grundlegend neuen Resultaten aus den verschiedenen an der Forschung beteiligten Disziplinen rechnen.

II. Quantitative Modelle in den Sozialwissenschaften

Trotz der Schwierigkeiten, soziale Prozesse mathematisch zu modellieren, sind von Sozialwissenschaftlern bereits seit geraumer Zeit eine Reihe von formalen Modellen entwickelt worden. Zu nennen wären zum Beispiel Osgood und Tannenbaums (1955) *Kongruenzprinzip*, Heiders (1946) *Balancetheorie* oder Festingers (1957) *Dissonanztheorie*, welche sich mit der Stabilität von Einstellungskonstellationen auseinandersetzen. Auch ist das Modell Lewins (1951) interessant, demzufolge das Verhalten eines Individuums durch ein *'soziales Feld'* bestimmt ist. Mathematische Modelle wurden zudem für *Lern-*

prozesse (Deppe 1977) und *Entscheidungsprozesse* (Luce 1959; Domencich/McFadden 1975; Williams 1977; Daly/Zachary 1978; Ortúzar/Willumsen 1990: Kap. 7) entwickelt. Die ersten *stochastischen Modelle* für soziale Prozesse gehen auf Coleman (1964) und Bartholomew (1967) zurück. Erwähnung verdienen darüber hinaus die zahlreichen *Diffusionsmodelle* (Hamblin et al. 1973; Kennedy 1983; Granovetter/Soong 1983; Mahajan/Wind 1986; Schaffer et al. 1988; Diekmann 1992). Große Bedeutung hat auch die Beschreibung der Konkurrenz und Kooperation von Individuen im Rahmen der *Spieltheorie*, die durch von Neumann und Morgenstern (1944) begründet wurde. Schließlich ist noch die *Ereignis-* bzw. *Survivalanalyse* besonders hervorzuheben (Diekmann/Mitter 1984, 1990; Diekmann 1992; Tuma/Hannan 1984). Insgesamt existiert mittlerweile eine breite und grundlegende Literatur auf dem Gebiet der mathematischen Soziologie (vgl. auch Ziegler 1972; Montroll/Badger 1974; Olinick 1978; Coleman 1990; Troitzsch 1990; Esser/Troitzsch 1991). Im folgenden soll auf jene Modelle näher eingegangen werden, die im Zusammenhang mit der quantitativen Soziodynamik eine besondere Rolle spielen.

1. Das logistische Modell

Für *Wachstumsprozesse* hat man lange einen exponentiellen Zeitverlauf angenommen. In vielen Fällen hat sich dieser jedoch nicht empirisch bestätigt. Vielmehr hat sich gezeigt, daß Wachstumsprozesse mit *begrenzten Ressourcen* gut durch die logistische Gleichung (Pearl 1924; Verhulst 1845) beschrieben werden. Sie gibt einen Wachstumsverlauf wieder, der zunächst näherungsweise exponentiell beginnt und später in eine Sättigungsphase übergeht, in der approximativ ein bestimmter, systemabhängiger Maximalwert angestrebt wird. Ein exponentielles Wachstum tritt nur bei unbegrenzten Ressourcen auf.

Die Anwendungen der logistischen Gleichung reichen von der Beschreibung chemischer Reaktionsraten, des Wachstums von Tier- oder Pflanzenpopulationen in Abwesenheit von Feinden, des Wachstums von Städten bis hin zur Beschreibung der Ausbreitung von Informationen oder Innovationen (Bartholomew 1967; Montroll/Badger 1974; Goel et al. 1971; Ebeling et al. 1990: Kap. 5; Helbing 1993, 1994a).

2. Diffusionsmodelle

Das Thema *'Ausbreitungsprozesse'* ist ganz allgemein Gegenstand der Diffusionsmodelle. Im einzelnen befassen sich diese mit der Ausbreitung von so verschiedenen 'Dingen' wie Krankheiten, Gerüchten, Konventionen, Normen, Standards, Wissen, Technologien oder Waren (Coleman 1964; Bartholomew 1967; Hamblin et al. 1973; Kennedy 1983; Mahajan/Wind 1986; Schaffer et al. 1988; Diekmann 1992). Für den Gesichtspunkt der *räumlichen* Ausbreitung findet man Ähnlichkeiten mit Diffusionsprozessen in der Physik, wie man sie etwa – bedingt durch die Zufallsbewegung der Teilchen – von der Ausbreitung der Farbstoffmoleküle eines Tintentropfens in einem Wasserglas kennt (Helbing 1993: Abschn. 8.5.1).

Komplizierter ist die räumliche Ausbreitung unter *inhomogenen* Bedingungen, beispielsweise die Ausbreitung von Informationen innerhalb der ungleichmäßig verteilten Bevölkerung eines Landes. Das gilt vor allem dann, wenn die Informationen nicht durch zentrale Medien, sondern über den Weg der Kommunikation oder Telekommunikation verbreitet werden (Helbing 1993: Abschn. 8.5.2).

3. Das Gravity-Modell

Das Anwendungsgebiet des Gravity-Modells sind *Austauschprozesse*. Diese können den Austausch von Waren betreffen, aber auch das Verkehrsaufkommen oder Umzüge ('Migration') zwischen verschiedenen Städten oder Regionen (vgl. beispielsweise Ravenstein 1876; Zipf 1946). Der Name des Gravity-Modells stammt – obwohl die Zusammenhänge völlig verschieden sind – von der mathematischen Ähnlichkeit mit dem Gravitationsgesetz, das für die Anziehung zwischen Himmelskörpern wie Erde und Mond gilt.

Das Gravity-Modell beruht auf der Beobachtung, daß die Häufigkeit des betrachteten Austauschs (z.B. der Migration) proportional ist zur Größe der 'Quelle' (zur Größe der Bevölkerungszahl der Herkunftsstadt, d.h. zur Anzahl Migrationsfähiger) und zur Größe der 'Senke' (zur Bevölkerungszahl der Zielstadt, beispielsweise wegen des Kultur-, Infrastruktur- oder Arbeitsangebotes). Die Austauschhäufigkeit nimmt proportional zum Reziproken (Kehrwert) der *Distanz* von Quelle und Senke ab. Dies liegt zum einen daran, daß die *Transaktionskosten* (z.B. Umzugskosten) mit der Distanz zunehmen, aber auch daran, daß sich die Anzahl zur Auswahl stehender Städte mit der Distanz vergrößert (Helbing 1993: Abschn. 7.3, 1994a).

4. Die Spieltheorie

Während die bisher vorgestellten quantitativen Modelle ziemlich einfache Phänomene beschreiben, eignet sich die Spieltheorie als Werkzeug, um relativ komplizierte Phänomene zu erfassen. Das betrifft vor allem die Modellierung sozialer *Konkurrenz* und *Kooperation* auf der Grundlage eines erfolgs- bzw. nutzenorientierten Handelns von Individuen. Wichtige Anwendungen stammen aus der Ökonomie (z.B. in der Oligopoltheorie: Varian 1978), den Sozial- und Verhaltenswissenschaften (z.B. beim 'Gefangenendilemma') (von Neumann/Morgenstern 1944; Luce/Raiffa 1957; Rapoport/Chammah 1965; Axelrod 1984; Voss 1985; Raub/Voss 1986, 1986a; Raub 1990; Raub/Weesie 1992; Schüßler 1990), aber auch aus der Biologie (Evolutionstheorie, Ökologie) (Eigen et al. 1971, 1979; Fisher 1930; Schuster et al. 1981; Hofbauer/Sigmund 1984).

Es hat sich gezeigt, daß besonders zum Verständnis der Ausbildung von Kooperation unter Egoisten die wiederholte Interaktion und damit die Zeitdimension von großer Bedeutung ist *('Schatten der Zukunft')* (Axelrod 1984; Axelrod/Dion 1988). Um diese zu berücksichtigen, hat man lange eine mehrfache Wiederholung der einzelnen Spiel- und Entscheidungsrunden vorgeschlagen *('iterierte Spiele')*. Mittlerweile finden aber die *spieldynamischen Gleichungen* immer mehr Resonanz (Taylor/Jonker 1978; Hofbauer et al. 1979; Zeeman 1980; Schuster et al. 1981; Hofbauer/Sigmund 1984; Helbing 1993: Kap. 10, 1994). Diese sind Differentialgleichungen und daher kontinuierlich in der Zeit, was jedenfalls dann realistischer ist, wenn nicht einzelne, klar definierte Spielschritte zu festen Zeitpunkten vorliegen.

Wegen ihrer Herkunft aus der Evolutionstheorie (vgl. Hofbauer/Sigmund 1984: Kap. 24), wo die spieldynamischen Gleichungen ausgesprochen große Erfolge zu verbuchen haben, spricht man bei der kontinuierlichen Formulierung auch von *evolutionärer Spieltheorie.* Allerdings hat man im Unterschied zur Evolutionstheorie, wo die Gleichungen aus den Gesetzen der genetischen Vererbung hergeleitet werden können (vgl. Hofbauer/Sigmund 1984: Kap. 6), für ihre Anwendung in den Sozial- und Verhaltenswissenschaften lange keine 'mikroskopische' Begründung angeben können. Eine derartige Begründung der spieldynamischen Gleichungen auf der Grundlage individueller Verhaltensgrundsätze wurde aber kürzlich gefunden (Helbing 1993: Abschn. 10.2.2, 1994).

Mit Hilfe spieldynamischer Modelle läßt sich etwa die spontane *Selbstorganisation von Verhaltenskonventionen* beim Wettbewerb gleichwertiger Handlungsalternativen bzw. *Strategien* erklären (Helbing 1992c, 1993: Abschn. 10.4.1, 1993a). Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Konkurrenzkampf der ursprünglich gleichwertigen Videosysteme VHS und BETA MAX (Cusumano et al. 1990; Hauk 1993). Dieser wurde durch das Käuferverhalten mittlerweile sehr eindeutig entschieden. Hier stellen sich folgende Fragen: Warum kann sich bei gleichwertigen Alternativen überhaupt *eine* Alternative durchsetzen? Wie lange dauert es, um einen bestimmten Marktanteil zu erreichen? Warum setzt sich in manchen Branchen ein einziges Produkt durch, während in anderen Branchen mehrere Produkte koexistieren?

Die Lösung dieser Fragestellungen wurde bei der Beschreibung eines Phänomens gefunden, das beim Verhalten von Fußgängern zutage tritt (Helbing 1991). Wie man leicht beobachten kann, bilden sich in dichten Fußgängermengen Bahnen einheitlicher Gehrichtung aus. Diese bewegen sich (in Deutschland) gemessen an ihrer Gehrichtung fast immer auf der rechten Seite, obwohl die linke Seite völlig gleichwertig wäre (Oeding 1963; Older 1968). Der Grund dafür ist, daß ein Ausweichmanöver nur erfolgreich ist, wenn zwei sich begegnende Fußgänger entweder beide nach rechts oder beide nach links ausweichen. Andernfalls müssen sie abbremsen, um eine Kollision zu vermeiden (vgl. *Abbildung 1*). Es ist also vorteilhaft, wenn ein Fußgänger *die* Strategie wählt, die von der Mehrheit bevorzugt wird. Hat sich erst einmal durch Zufall eine kleine Mehrheit zugunsten einer Strategie ausgebildet, so wird sich diese Mehrheit immer mehr vergrößern. Infolgedessen entsteht eine Verhaltenskonvention, die letztlich auf sozialer Selbstorganisation beruht. Einmal herausgebildete Konventionen werden oft nach einiger Zeit durch Gesetze oder Normen festgeschrieben (z.B. beim Straßenverkehr).

Es gibt allerdings auch Mechanismen, welche die Durchsetzung einer Verhaltensalternative beeinträchtigen, beispielsweise spontane Strategieänderungen, welche auf das gelegentliche Ausprobieren von Verhaltensalternativen *(trial and error)* zurückgehen. Diese können ebenfalls mathematisch erfaßt werden. Man erwartet, daß spontane Strategieänderungen dazu führen, daß die Mehrheit für die sich entwickelnde Verhaltenskonvention etwas geringer ausfällt. Das ist für eine geringe Häufigkeit spontaner Strategieänderungen auch der Fall. Überschreitet diese aber eine kritische Größe, so wird die Ausbildung einer Verhaltenskonvention gänzlich unterbunden, und jede der beiden Strategien wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit gewählt. Ob sich überhaupt

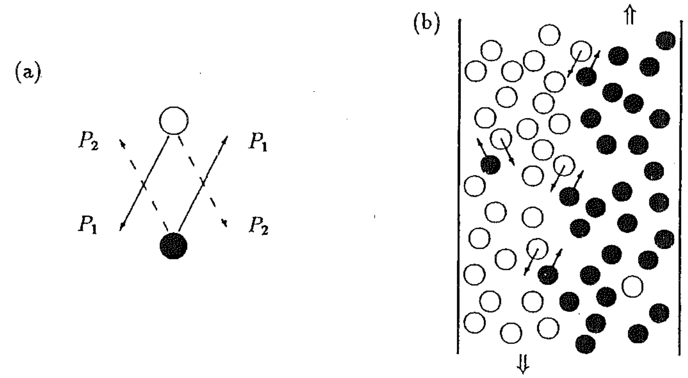

Abbildung 1: Ausweichproblem von Fußgängern

a) Für entgegengesetzt laufende Fußgänger ist es vorteilhaft, wenn sie im Falle einer Begegnung entweder beide nach rechts ausweichen (durchgezogene Pfeile) oder beide nach links ausweichen (gestrichelte Pfeile). Ansonsten sind sie gezwungen anzuhalten, um eine Kollision zu vermeiden. Die Wahrscheinlichkeit P_1, nach rechts auszuweichen, ist in Deutschland normalerweise größer als die Wahrscheinlichkeit $P_2=1-P_1$, nach links auszuweichen.
b) In dichten Fußgängermengen bilden sich Bahnen heraus, in denen eine von beiden Laufrichtungen (hier schwarz bzw. weiß dargestellt) dominiert. Dadurch wird die Häufigkeit von Ausweichmanövern reduziert. Diese sind durch Pfeile angedeutet.

eine von mehreren gleichwertigen Verhaltensweisen durchsetzen kann, hängt davon ab, ob der Vorteil, der aus einer Anpassung an das Verhalten der Mehrheit resultiert, den Einfluß spontaner Strategieänderungen überwiegt (vgl. *Abbildung 2*).

Beim Ausweichproblem spielen spontane Strategieänderungen offenbar eine untergeordnete Rolle, sonst hätte sich (in Deutschland) nicht die Bevorzugung der rechten Seite durchgesetzt. Mit gleicher Wahrscheinlichkeit hätte sich aber auch eine Bevorzugung der linken Seite durchsetzen können. Die entstandenen Konventionen können von einer Region zur anderen variieren. Das ist beispielsweise für die Fahrtrichtung beim Automobilverkehr der Fall. Während in Großbritannien Linksverkehr vorgeschrieben ist, ist im restlichen Europa Rechtsverkehr üblich. Damit scheidet eine Erklärung des *Symmetriebruchs* beim Ausweichverhalten durch die Asymmetrie des menschlichen Körpers aus.

Das beschriebene Modell für die Herausbildung von Konventionen ist auch auf den Uhrzeigersinn, die Schreibrichtung und viele andere Beispiele anwendbar, wo es von Vorteil ist, wenn die Mehrheit die gleiche Verhaltensalternative wählt. Bei der Konkurrenz der eingangs erwähnten gleichwertigen Videosysteme ist es die Kompatibilität der Geräte (beim Überspielen und beim Videokasettenverkauf oder -verleih), der es vorteilhaft macht, sich einer einmal zufällig entstandenen Mehrheit anzuschließen.

Das obige Modell für die Selbstorganisation von Verhaltenskonventionen läßt sich leicht auf den Fall von mehr als zwei gleichwertigen Verhaltensalternativen ausdehnen. Ebenso können Fälle beschrieben werden, wo eine Handlungsalternative den anderen überlegen ist. Hier ist jedoch die Ausbildung einer Verhaltenskonvention trivial.

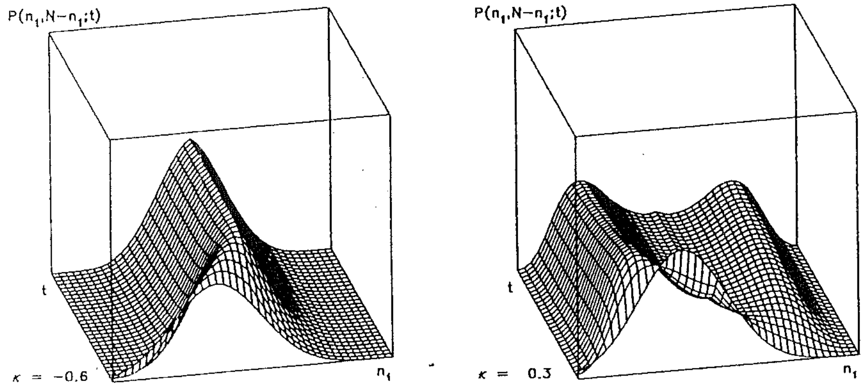

Abbildung 2: Illustration der Wahrscheinlichkeit $P(n_1,N - n_1;t)$, mit der n_1 von insgesamt N Individuen Strategie 1 verfolgen und $n_2=N - n_1$ Individuen Strategie 2, im Verlauf der Zeit t. Der Parameter $\kappa = 1 - 4W/A$ ist groß, wenn die Häufigkeit W spontaner Strategieänderungen klein ist oder wenn der Vorteil A, sich einer einmal entstandenen Mehrheit anzuschließen, groß ist. Für $\kappa = 0$ findet ein sog. Phasenübergang statt: Während für $\kappa < 0$ beide Strategien mit großer Wahrscheinlichkeit etwa gleich oft verwendet werden, setzt sich für $\kappa > 0$ mit großer Wahrscheinlichkeit eine der Strategien durch, das heißt es entsteht eine Verhaltenskonvention durch soziale Selbstorganisation.

5. Entscheidungsmodelle

Entscheidungen sind bekanntlich Prozesse, deren Ausgang normalerweise nicht genau vorhersagbar ist. Allenfalls läßt sich die *Wahrscheinlichkeit* eines bestimmten Ausgangs abschätzen. Ein sehr detailliertes Modell für Entscheidungsprozesse stammt von Feger (1978) (vgl. auch Herkner 1975: 112ff.). Demnach sind Entscheidungssituationen Konfliktsituationen, in denen unter verschiedenen Handlungsalternativen eine ausgewählt werden muß. Der Entscheidungsprozeß besteht im wesentlichen aus einer Sammlung von Argumenten, die für die eine oder andere Alternative sprechen ('Folgenantizipation'). Dabei ist die Reihenfolge der Argumente ziemlich zufällig. Mit der Präferenz für eine bestimmte Alternative steigt die Häufigkeit von Argumenten, die für sie sprechen. Die Entscheidung wird *dann* getroffen, wenn nacheinander eine gewisse Anzahl von Argumenten für ein und dieselbe Handlungsalternative sprach. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Entscheidung für eine bestimmte Alternative gefällt wird, hängt also von der (Auftritts-)Wahrscheinlichkeit von Argumenten ab, die für diese sprechen, und damit letztlich von der Präferenz für sie.

In vielen Fällen interessiert aber nicht der Abwägungs- und Entscheidungs*prozeß*, sondern nur das Entscheidungs*resultat*. Die funktionale Abhängigkeit der Entscheidungswahrscheinlichkeit von der Präferenz für eine bestimmte Handlungsalternative beschreibt das *Multinomial-Logit-Modell* (Domencich/McFadden 1975). Als Maß für die Präferenz für eine Alternative wird dabei der *Nutzen* angesehen, der als Konsequenz einer Entscheidung für sie erwartet wird.

Der Umstand, daß eine Entscheidung normalerweise nicht eindeutig ausfällt, geht

auf die Unvollständigkeit der Informationen zurück, die man über den tatsächlichen Nutzen hat. Der Schätzwert für den tatsächlichen Nutzen variiert normalerweise von Individuum zu Individuum und ist möglicherweise auch stimmungsabhängig. Wenn *klar* ist, welche Entscheidung den größten Nutzen mit sich bringt, wird die entsprechende Alternative mit *Sicherheit* gewählt. Je unsicherer aber die Kenntnis des Nutzens der in Frage kommenden Handlungsalternativen ist, desto ungewisser ist der Ausgang der Entscheidung.

Das Multinomial-Logit-Modell hat sich in den verschiedensten Zusammenhängen bewährt. Die Anwendungen reichen vom Konsumverhalten bis zur Wahl des Wohnsitzes oder des Verkehrsmittels (Williams 1977; Daly/Zachary 1978; Ortúzar/Willumsen 1990: Kap. 7).

Bei der Entwicklung eines *dynamischen* Entscheidungs- bzw. Verhaltensmodells ist man im Unterschied zu bisher mit der Situation konfrontiert, daß man eine zeitliche Abfolge von Entscheidungen zu beschreiben hat. Die einzelnen Entscheidungen dieser Entscheidungsabfolge wird man dabei wieder mit dem Multinomial-Logit-Modell erfassen. Allerdings hängt die Wahrscheinlichkeit einer Entscheidung jetzt von der zuletzt getroffenen Entscheidung ab, d.h. vom gegenwärtigen Verhalten. Sie definiert die *Übergangswahrscheinlichkeit* von einem Verhalten zu einem anderen Verhalten. Diese wird von Null verschieden sein, wenn die entsprechende Verhaltensänderung mit einem Nutzen*zuwachs* einhergeht (Helbing 1993: Abschn. 7.2.1).

6. Schlußbemerkung

Bei der logistischen Gleichung, dem Gravity-Modell, den Diffusionsmodellen, den spieldynamischen Gleichungen und den Entscheidungsmodellen handelt es sich um einzelne theoretische Konzepte, die bisher völlig beziehungslos nebeneinanderstanden. Im Rahmen der quantitativen Soziodynamik wurde jedoch vor kurzem ein allgemeines, mathematisches und dynamisches Verhaltensmodell entwickelt, das alle diese Konzepte als Spezialfälle in sich vereinigt (Helbing 1993, 1994a). Dieses Verhaltensmodell stellt also eine Art *Metatheorie* dar, die – zumindest in den angesprochenen Spezialfällen – empirisch gut gesichert ist.

III. Quantitative Soziodynamik

Die meisten Probleme beim Versuch, soziale Systeme mathematisch zu beschreiben, resultieren aus ihrer *Komplexität*. Diese bedingt eine extreme *Sensitivität* gegenüber allerlei unüberschaubaren Einflüssen, so daß soziale Systeme sich in ähnlichen Situationen völlig verschieden verhalten können. Erschwerend kommt die *Zufallsbehaftetheit (Stochastizität)* individueller Entscheidungen hinzu, die ebenfalls das konkrete Verhalten eines sozialen Systems beeinflußt (Helbing 1993: Kap. 6).

Dies hat eine mathematische Beschreibung sozialer Systeme lange Zeit generell unmöglich erscheinen lassen. In den letzten Jahren haben aber aktuelle Erkenntnisse über komplexe Systeme ein neues Licht auf diese Probleme geworfen. Diese stammen vor allem aus den Gebieten der *nichtlinearen Dynamik* (Synergetik, Chaostheorie) und der *statistischen Physik* (wo man vielfältige stochastische Methoden für zufallsbehaftete Systeme entwickelt hat). Eine geschlossene und einheitliche Übersichtsdarstellung der wichtigsten Konzepte dieser Gebiete, ihrer Zusammenhänge und Eigenschaften geben Haken (1982), Weidlich und Haag (1983) sowie Helbing (1993).

Nichtlineare Dynamik und statistische Physik haben auch für nicht-physikalische Phänomene oft erfolgreiche Erklärungsansätze geboten, etwa in der Chemie (Nicolis/Malek-Mansour 1976; Matheson et al. 1975; Gardiner et al. 1976; Oppenheim et al. 1977), in der Biologie (Arnold/Lefever 1981; Goel/Richter-Dyn 1974; Goel et al. 1971) und in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Coleman 1964; Bartholomew 1967; Weidlich et al. 1971, 1983, 1991, 1992). Für ein gegebenes komplexes System besteht die Vorgehensweise normalerweise darin, zunächst geeignete stochastische Gleichungen aufzufinden, die anschließend mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik weiter untersucht werden. Es sei betont, daß hier – im Unterschied zu den überholten 'physikalistischen' Ansätzen – kein *Modell*transfer, sondern ein *Methoden*transfer stattfindet. Ein simpler Modelltransfer, bei dem nur eine Uminterpretation der Modellvariablen vorgenommen wird, wäre insofern fragwürdig, als er voraussetzen würde, daß die verglichenen Systeme zumindest in den für das Modell wesentlichen Aspekten die gleichen Eigenschaften besitzen. Diese *'Isomorphie'* ist allerdings oft nur ungenügend gewährleistet. Ein Methodentransfer berücksichtigt demgegenüber die systemspezifischen Eigenschaften explizit in den jeweiligen Modellannahmen.

1. Statistische Physik und stochastische Methoden

Stochastische Gleichungen haben sich seit einigen Jahrzehnten als vielseitiges und nützliches Instrument in allen Wissenschaften erwiesen, die sich mit *Fluktuationen* (Zufallseinflüssen) auseinanderzusetzen haben (Montroll et al. 1979, 1984; van Kampen 1981; Haus/Kehr 1987). Einige Phänomene werden nur in stochastischen Modellen richtig verständlich. Das betrifft vor allem *Phasenübergänge* und *kritische Phänomene* (Gebhardt/Krey 1980; Horsthemke/Lefever 1984; Ma 1976; Nicolis/Prigogine 1977). Gerade Phasenübergänge sind jedoch von besonderem Interesse, weil sie einen grundsätzlichen Wechsel der Eigenschaften eines Systems bedeuten (wie zum Beispiel beim Übergang von Eis zu Wasser oder von Wasser zu Wasserdampf).

Gegenstand der statistischen Physik sind Systeme aus sehr vielen *Elementen (Subsystemen)*, die eventuell in mehrere *Typen* von Elementen (z.B. verschiedene Sorten von Gasmolekülen) zu unterteilen sind. Elemente desselben Typs (d.h. gleichartige Subsysteme) sollen dabei *jeweils* in großer Anzahl vertreten sein. Jedes Element soll sich durch eine Reihe von zeitabhängigen Größen (Variablen) charakterisieren lassen, die gemeinsam seinen *Zustand* beschreiben und sich zu einem *Zustandsvektor* zusammenfassen lassen. Die Elemente stehen untereinander in *Wechselwirkung*, d.h. sie können gegenseitig ihre Zustände ändern, beispielsweise durch Austausch von Energie oder Information. Neben den Wechselwirkungen gibt es auch *spontane Zustandsänderungen* (die in den Eigenschaften der Elemente begründet sind oder durch äußere Einflüsse auf das System induziert werden).

Selbst wenn die genauen Gesetzmäßigkeiten für das Verhalten der Elemente eines derartigen Systems und ihre Wechselwirkungen bekannt sind, ist es aufgrund der großen Anzahl an Elementen unmöglich, ihr Verhalten genau zu berechnen. Nun ist man aber meistens gar nicht am Verhalten (d.h. den zeitlichen Zustandsänderungen) *einzelner* Elemente interessiert, sondern vielmehr an der *Verteilung* der Zustände innerhalb des Systems.

Es hat sich gezeigt, daß zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der Zustandsverteilung *wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze* (stochastische Gleichungen) geeignet sind (Gardiner 1983; Helbing 1992a). Das trifft vor allem für die Mastergleichung (Pauli 1928) zu (vgl. Helbing 1993: Kap. 1), aber auch für die Fokker-Planck-Gleichung (Fokker 1914; Planck 1917), die als (Taylor-)Approximation der Mastergleichung verstanden werden kann (vgl. Helbing 1993: Kap. 4). Ähnliches gilt für die stochastischen Differentialgleichungen bzw. Langevin-Gleichungen (1908), die in gewisser Weise eine Umformulierung von Fokker-Planck-Gleichungen darstellen (Stratonovich 1963, 1967; Helbing 1993: Kap. 5). Eine Langevin-Gleichung erfaßt allerdings das Verhalten *einzelner* Subsysteme, deren Zustandsänderungen einerseits auf einen *systematischen Effekt* zurückgehen, der die wahrscheinlichste Zustandsänderung beschreibt, und andererseits auf *Fluktuationen*, welche individuell variierende Zustandsschwankungen reflektieren. Im Unterschied dazu gibt eine Fokker-Planck-Gleichung genauso wie eine Mastergleichung das zeitliche Verhalten der Zustands*verteilung vieler* Subsysteme (d.h. eines *'Ensembles'*) wieder.

a) Die Mastergleichung. Um die zeitliche Änderung der Zustandsverteilung beschreiben zu können, muß man nicht im einzelnen wissen, welche Elemente welche Zustandsänderungen erfahren. Es muß aber bekannt sein, wieviele Elemente pro Zeiteinheit jeweils in die anderen möglichen Zustände wechseln. Damit ist es egal, ob nun ein *bestimmtes* Element eine gewisse Zustandsänderung erfährt oder statt dessen ein anderes.

Die zeitliche Änderung der Zustandsverteilung ist durch mehrere Größen gegeben. Zu diesen Größen zählt auch die momentane Zustandsverteilung selbst, da sie erfaßt, wieviele Elemente potentiell aus einem bestimmten Zustand in einen anderen übergehen können. Die Häufigkeit derartiger Übergänge wird durch sogenannte *Übergangsraten* beschrieben. Diese sind einerseits festgelegt durch die *Rate* (Häufigkeit pro Zeiteinheit), mit der (spontane oder durch Wechselwirkungen induzierte) Übergänge, d.h. Zustandsänderungen, überhaupt stattfinden; andererseits durch die *(Übergangs-) Wahrscheinlichkeiten*, mit denen Wechsel vom jeweils vorliegenden Zustand in die möglichen anderen Zustände auftreten. Um ein System der betrachteten Art mathematisch zu fassen, sind demzufolge die Übergangsraten zu bestimmen, und zwar *systemspezifisch*. Die sich dann ergebende Gleichung für die zeitliche Änderung der Zustandsverteilung ist die *Mastergleichung*, der das Geschehen im System gehorcht.

Für die zeitabhängige Lösung der Mastergleichung gibt es eine sog. *Pfadintegral-Darstellung* (Helbing 1993: Abschn. 1.4.3). Diese erlaubt die Berechnung prozeßabhängiger Größen, beispielsweise der Wahrscheinlichkeit, mit der das System einen bestimmten Pfad, d.h. eine bestimmte Folge von Zuständen *('Ereignisgeschichte')* nimmt. Besonders relevant ist dieser Umstand für *Prognosemethoden* wie die *Szenariotechnik*. Unter anderem kann ermittelt werden, mit welchen Wahrscheinlichkeiten 'erwünschte' Pfade auftreten. 'Unerwünschte' Pfade sind dadurch charakterisiert, daß sie 'unerwünschte' (eventuell 'katastrophale') Zustände durchschreiten.

Darüber hinaus ermöglicht die Pfadintegral-Darstellung die Berechnung der Verteilung der *Wartezeit (Ankunftszeit)*, nach der eine bestimmte Ereignisgeschichte eintritt. Insofern besteht eine direkte Verbindung zur *Ereignis-* bzw. *Survivalanalyse* (Diekmann/Mitter 1984, 1990; Diekmann 1992; Tuma/Hannan 1984). Mit der genannten Methode lassen sich Wartezeitverteilungen auch für komplizierte Verhältnisse ermitteln, bei denen beispielsweise die Unterscheidung vieler unterschiedlicher Zustände notwendig ist oder die Zustände nicht in einer vorgegebenen Reihenfolge durchlaufen werden (sondern möglicherweise mehrmals).

Während bisher die Mastergleichung für den *Zustandsraum* angesprochen wurde, der aus Zustandsvektoren besteht, kann eine analoge Mastergleichung auch für den *Konfigurationsraum* formuliert werden, der aus Vektoren besteht, welche die Besetzungszahlen (Häufigkeiten) der möglichen Zustände zur *Konfiguration* eines Systems zusammenfassen. Die Mastergleichung für den Zustandsraum entspricht dann der *approximativen Mittelwertgleichung* der Mastergleichung für den Konfigurationsraum.

Die konfigurale Mastergleichung hat einige wesentliche Vorteile (Helbing 1993: Kap. 3, Abschn. 10.4, 1994; Weidlich 1991): Erstens erlaubt sie die Verwendung von individuellen Übergangsraten, die von den Besetzungszahlen der Zustände abhängen. Solche Fälle sind essentiell für die Beschreibung *indirekter* Wechselwirkungen, welche in sozialen Systemen besonders häufig auftreten. Zweitens ermöglicht die konfigurale Mastergleichung die Herleitung von Gleichungen, die *Paarwechselwirkungen* oder sogar *Wechselwirkungen höherer Ordnung* berücksichtigen. Drittens können aus der konfiguralen Mastergleichung (Ko-)Varianzgleichungen abgeleitet werden, welche wesentlich für die Ermittlung der Zuverlässigkeit der Mittelwertgleichungen ist. Schließlich erlaubt sie die Berechnung von *Korrekturen* zu den approximativen Mittelwert- und (Ko-)Varianzgleichungen.

b) Anwendung auf die Beschreibung sozialer Systeme. Es hat sich herausgestellt, daß sich die Mastergleichung hervorragend zur Beschreibung sozialer Systeme eignet (Weidlich 1971, 1987, 1991, 1993; Weidlich/Haag 1983, 1988). Bei den Elementen (Subsystemen) handelt es sich dann um Individuen, bei den Zuständen um bestimmte Aspekte ihres Verhaltens (z.B. das Meinungsäußerungs- oder Siedlungsverhalten). Die dabei unterschiedenen Verhaltensweisen müssen nur klassifiziert werden, aber nicht geordnet sein oder einen kontinuierlichen Verhaltensraum bilden. Damit treten Probleme, wie sie mit dem Messen, Metrisieren oder Skalieren sozialer Größen verbunden sind, nicht auf. Dennoch läßt sich durch Auswertung empirischer Daten der Ähnlichkeitsgrad (die *'Distanz'*) verschiedener Verhaltensweisen mit einem speziellen Verfahren bestimmen (Helbing 1993: Kap. 11, 1994a). Durch *multidimensionale Skalierung* (Kruskal/Wish 1978; Young/Hamer 1987) kann man daraus nachträglich einen Verhaltensraum konstruieren.

Die Schwierigkeit liegt nun vor allem darin, einen systemgerechten Ansatz für die Übergangsraten zu finden, welcher die Häufigkeit von Zustandsänderungen (d.h. Verhaltensänderungen) pro Zeiteinheit beschreibt. Für dieses Problem wurde aber im Abschnitt II.5 im Prinzip bereits eine Lösung formuliert. Dort hatte sich gezeigt, daß die Übergangswahrscheinlichkeit, mit der sich ein Individuum für ein neues Verhalten entscheidet, durch den *Nutzen* der Verhaltensänderung bestimmt ist und durch ein

Multinomial-Logit-Modell wiedergegeben werden kann (Helbing 1993: Kap. 7; Weidlich 1991: § 3).

Da man diesen Ansatz als hinreichend fundiert ansehen kann, muß der Nutzen der einzelnen Verhaltensweisen nicht erst aufwendig durch umfangreiche Befragungen und geeignete Kalibrierungen ermittelt werden. Vielmehr läßt er sich aus Datenmaterial über den zeitlichen Verlauf der Verhaltensverteilung (z.B. Meinungsverteilung) und der Übergangsraten relativ einfach berechnen (Weidlich/Haag 1988; Helbing 1994a, 1993: Kap. 11).

Möglich ist damit beispielsweise die *Analyse* und *Prognose* des Verhaltens von Wählern und Konsumenten. Für die Wirtschaft bzw. Politik ist darüber hinaus von besonderem Interesse, welche Aspekte zum Nutzen bestimmter Kauf- bzw. Wahlentscheidungen mit welcher Wichtigkeit beitragen. Dies läßt sich durch ein *Regressionsverfahren* aus geeignetem Datenmaterial ermitteln (Weidlich/Haag 1988; Reiner/Munz 1990), wobei man davon ausgeht, daß der Nutzen einerseits von den Interessen der Konsumenten bzw. Wähler abhängt und andererseits von den verschiedenen Aspekten der angebotenen Produkte bzw. politischen Konzepte (Helbing 1993: Abschn. 11.5).

Auch der Umstand, daß der (subjektive) Nutzen eines Verhaltens (und damit die Wahrscheinlichkeit der entsprechenden Verhaltensänderung) für verschiedene Individuen unterschiedlich ausfallen kann, läßt sich berücksichtigen. Dazu unterteilt man die Individuen des gewählten sozialen Systems in verschiedene *(Verhaltens-)Typen* (Persönlichkeitstypen, 'Charaktere'). Die Individuen desselben Verhaltenstyps sollen zu den möglichen Verhaltensänderungen mit ähnlichen Wahrscheinlichkeiten tendieren.

Um nicht zu viele Verhaltenstypen unterscheiden zu müssen und möglichst große *Subpopulationen* aus Individuen desselben Verhaltenstyps zu erhalten, muß man sich auf die Untersuchung *einfacher Verhaltensabläufe bzw. Situationen* beschränken (Helbing 1993: Abschn. 6.2.2). Dann kommt es nicht darauf an, wie sich die einzelnen Individuen in anderen Situationen und Lebensbereichen verhalten. Dabei dürfen die modellierten Verhaltensweisen durchaus durch andere Verhaltensbereiche beeinflußt werden, solange diese Einflüsse im Mittel der Individuen einer Subpopulation keinen *systematischen* Effekt haben. Beim Wählerverhalten könnte es beispielsweise genügen, die Subpopulationen durch die Einkommensverhältnisse, die Erziehung/Bildung und die Konfession festzulegen.

Mastergleichungsmodelle wurden zur Beschreibung einer Vielzahl verschiedener sozialer Phänomene entwickelt. Darunter befinden sich Meinungsbildungsmodelle, Migrationsmodelle und Modelle für die Entstehung von Siedlungsstrukturen, aber auch Nichtgleichgewichtsmodelle für ökonomische Entwicklungen (Weidlich/Haag 1983; Weidlich 1991; Weidlich/Braun 1992). Im Falle der Migrationsmodelle konnte ein Vergleich mit empirischen Daten durchgeführt werden. Dieser lieferte für die getroffenen Modellannahmen hinsichtlich der Häufigkeit von Verhaltensänderungen sehr gute Ergebnisse (Weidlich/Haag 1988).

c) Boltzmann-artige Gleichungen. Die Modelle von Weidlich und Haag gehen von *indirekten* Wechselwirkungen der Individuen aus, d.h. die Häufigkeit individueller Verhaltensänderungen wird durch die *Soziokonfiguration* bzw. die Verhaltensverteilung innerhalb des sozialen Systems beeinflußt (Weidlich/Haag 1983; Weidlich 1991). Somit wirkt das Verhalten eines Individuum auf dieses wieder zurück (Rückkopplungseffekt). Indirekte Wechselwirkungen eignen sich besonders zur Beschreibung von Verhaltensänderungen, die über den Umweg der Medien (Radio, Fernsehen, Zeitungen) induziert, durch allgemein zugängliche Informationen bewirkt oder über ein allgemeines 'soziokulturelles und politisches Klima' vermittelt werden. In der Physik entsprechen sie einer *Mean-Field-Theorie,* wie sie beispielsweise zur Beschreibung der Magnetisierung von Eisen verwendet wird (Ising-Modell, vgl. Ashcroft/Mermin 1976; Ziman 1972).

Viele Verhaltensänderungen gehen allerdings auf *direkte* Wechselwirkungen zurück. Dies ist etwa bei Verhaltensänderungen der Fall, die durch das Verhalten anderer Individuen ausgelöst werden. Ein typischer Fall sind durch Diskussionen hervorgerufene Meinungsänderungen. Die wichtigsten Effekte direkter Wechselwirkungen lassen sich bereits durch die Betrachtung von *Paarwechselwirkungen* verstehen, welche überdies den bedeutendsten Beitrag liefern. Prinzipiell lassen sich aber auch Wechselwirkungen höherer Ordnung (d.h. gleichzeitige Wechselwirkungen zwischen mehreren Individuen) mathematisch behandeln (Helbing 1993: Abschn. 3.4).

Zur Beschreibung von Paarwechselwirkungen sind mathematische Terme notwendig, welche den Umstand berücksichtigen, daß die Häufigkeit der mit ihnen verbundenen Verhaltensänderungen proportional zur Anzahl potentieller Wechselwirkungspartner ist. Die resultierenden Gleichungen sind *Boltzmann-artige Gleichungen* (Helbing 1992d, 1993: Kap. 2, 1994, 1994a). Deren grundlegende Bedeutung tritt durch das folgende Zitat von Uhlenbeck (1973) besonders klar hervor: „The Boltzmann equation has become such a generally accepted and central part of statistical mechanics, that it almost seems blasphemy to question its validity and to seek out its limitations."

Die Boltzmann-artigen Gleichungen wurden ursprünglich für die Beschreibung des Verhaltens von Gasen entwickelt, wo die Paarwechselwirkungen auf Kollisionen (Streuvorgänge) von Gasteilchen zurückgehen (Boltzmann 1964). Die Übertragbarkeit auf Ausweich- und Bremsmanöver bei der Begegnung von Fußgängern liegt auf der Hand (Helbing 1992, 1993: Anh. A).

Normalerweise sind die Paarwechselwirkungen in sozialen Systemen aber ganz anderer Art. Bei der Meinungsbildung beispielsweise hat man sich die Paarwechselwirkungen so vorzustellen, daß zwei Individuen mit bestimmten Meinungen gelegentlich miteinander kommunizieren und als Folge des Gedankenaustauschs eventuell andere Meinungen annehmen. Statt Geschwindigkeiten ändern sich also diesmal Meinungen. Darüber hinaus liegen bei der Meinungsbildung (aber auch bei Verhaltensänderungen im allgemeinen) andere *Arten* von Paarwechselwirkungen vor (Helbing 1993: Abschn. 7.3, 8.3). Man hat zu unterscheiden zwischen *imitativen Prozessen* bzw. *Überzeugungsprozessen*, bei denen die Meinung einer anderen Person übernommen wird (vgl. *Abbildungen 3, 4*), *Ausweichprozessen*, bei denen eine bestimmte Meinung gemieden wird, um sich von einer anderen Person abzuheben (vgl. *Abbildung 5*), und *Kompromißvorgängen.* Mit dem entsprechenden Modell lassen sich beispielsweise *Modezyklen* gut verstehen (vgl. *Abbildung 3* und Helbing 1992d).

Direkte und indirekte Wechselwirkungen schließen sich nicht gegenseitig aus. Sie ergänzen sich vielmehr und können in einem allgemeinen Modell integriert werden. Die Beschränkung auf einen von beiden Wechselwirkungsmechanismen führt unter Umständen dazu, daß die empirischen Daten nur unzulänglich wiedergegeben werden können. Beispielsweise lassen sich die Energien von Atomkernen nur befriedigend

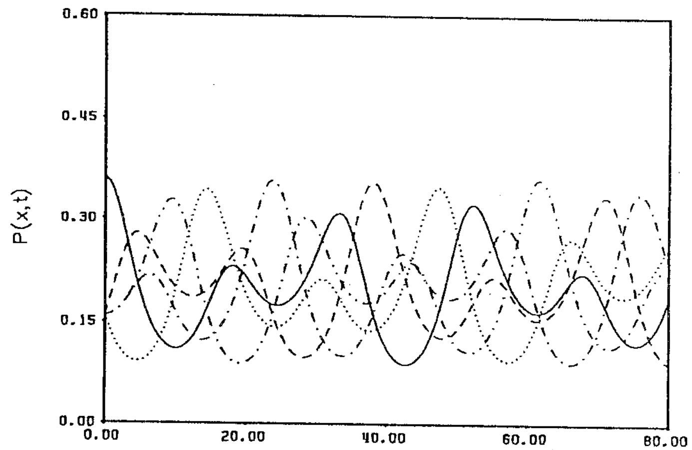

Abbildung 3: Oszillationen ('Modezyklen') bei Überzeugungsprozessen zwischen 5 verschiedenen Trends (dargestellt durch 5 unterschiedliche Linienarten). *P(x,t)* ist der Anteil der Bevölkerung, der zur Zeit *t* dem Trend *x* folgt. Offensichtlich gewinnen die verschiedenen Trends in wechselnder Reihenfolge die Mehrheit der Individuen für sich.

erklären durch die Kombination eines Mean-Fields und direkter (Rest-)Wechselwirkungen (Paarungskräfte) (Mayer-Kuckuk 1984: Kap. 6).

d) Soziale Kräfte und soziale Felder. Durch eine (Taylor-)Approximation können die Boltzmann-artigen Gleichungen für den Fall eines kontinuierlichen oder quasikontinuierlichen Verhaltensraums in *Boltzmann-Fokker-Planck-Gleichungen* überführt werden (Helbing 1993: Abschn. 4.6, 1994a). Diese Gleichungen haben eine ziemlich anschauliche Interpretation. Demnach gibt es eine vektorielle Größe, welche die *wahrscheinlichste Verhaltensänderung* der Individuen eines bestimmten Verhaltenstyps wiedergibt. Diese Größe kann als *soziale Kraft* interpretiert werden, da sie die Triebfeder von Verhaltensänderungen ist und überdies durch die Verhaltensweisen aller Individuen beeinflußt wird. Man könnte auch sagen, die soziale Kraft beschreibt Handlungsmotivationen, die in einem Individuum als Reaktion auf seine Umwelt hervorgerufen werden. Neben der sozialen Kraft treten noch sogenannte *Diffusionskoeffizienten* in den Boltzmann-Fokker-Planck-Gleichungen auf. Diese berücksichtigen die individuellen Verhaltensvariationen (Helbing 1993: Kap. 9, 1994a).

In bestimmten Fällen kann man die soziale Kraft durch ein *soziales Feld* ausdrücken. Dieses kann man sich als ein Gebirge im Verhaltensraum vorstellen, bei dem die Steilheit ein Maß für die soziale Kraft ist, die an einem bestimmten Ort des Verhaltensraums, d.h. auf ein bestimmtes Verhalten wirkt (vgl. *Abbildung 4*). Die Idee eines sozialen Feldes, das den Einfluß von öffentlicher Meinung, Normen, Trends und Umwelt auf das individuelle Verhalten beschreibt, geht ursprünglich auf Lewin (1951) zurück und liegt auch der mathematischen Formulierung indirekter Wechselwirkungen durch Weidlich und Haag (1983) zugrunde.

In manchen Zusammenhängen bewährt sich die Beschreibung von Verhaltensänderungen durch soziale Kräfte außerordentlich gut. Beispielsweise ist der Abstand,

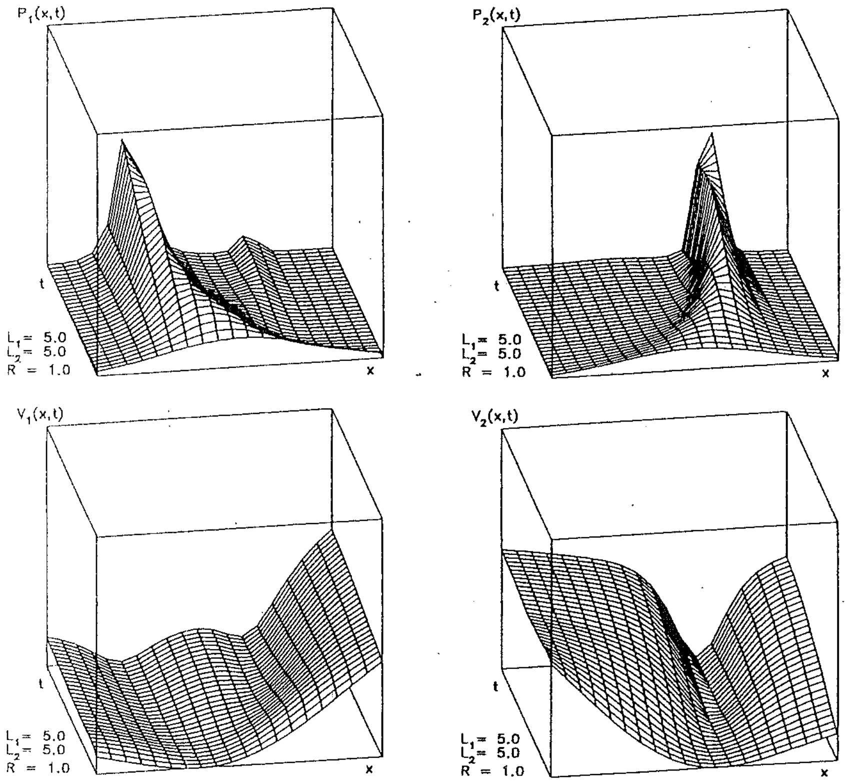

Abbildung 4: Wahrscheinlichkeitsverteilungen $P_a(x,t)$ der Meinungen $x \in \{1,2,...,20\}$ und soziale Felder $V_a(x,t)$ im Verlauf der Zeit t bei einseitiger Beeinflussung der Subpopulation a=1 durch Subpopulation a=2. Die Meinungsverteilungen $P_a(x,t)$ haben ihr (absolutes) Maximum bei der Meinung x_a, die in der jeweiligen Subpopulation a bevorzugt wird (x_1=6, x_2=15). Durch imitative Wechselwirkungen bekommt die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_1(x,t)$ im Laufe der Zeit ein zweites (relatives) Maximum bei der Position x_2, das heißt einige Individuen der Subpopulation 1 lassen sich von Individuen der Subpopulation 2 überzeugen, aber nicht umgekehrt. Letztere könnte man daher als Trendsetter bezeichnen.

Die Maxima der Meinungsverteilungen $P_a(x,t)$ sind offensichtlich durch die Minima der zugehörigen sozialen Felder $V_a(x,t)$ gegeben. Die Gestalt der sozialen Felder resultiert aus den Wechselwirkungen der Individuen.

den ein Fußgänger gegenüber anderen Fußgängern hält, gegeben durch ein Gleichgewicht zwischen zwei entgegengerichteten Kräften: Einer Kraft, welche das Bestreben beschreibt, sich mit einer bestimmten Wunschgeschwindigkeit fortzubewegen, und einer abstoßenden Kraft, welche die Bereitschaft wiedergibt, das Territorium zu respektieren, das ein anderer Fußgänger für sich beansprucht. Wächst der Zeitdruck, unter dem ein Fußgänger steht, infolge von Verzögerungen, dann wächst die Fortbewegungskraft gegenüber der Abstoßungskraft, so daß er weniger Abstand hält oder sogar drängelt (Helbing 1991). Dieser Effekt ist interessanterweise auch in Warte-

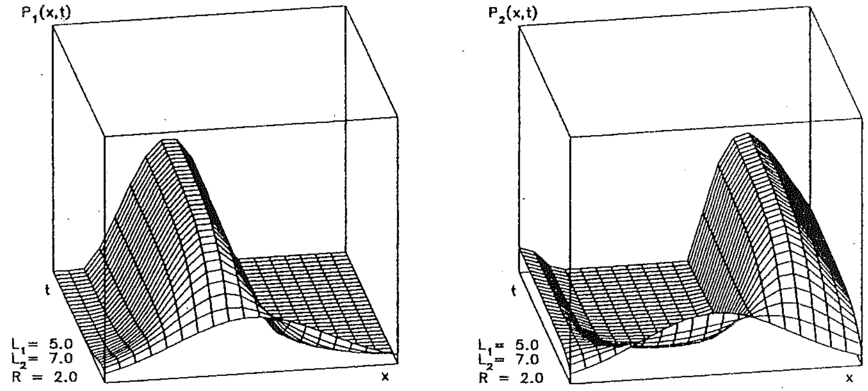

Abbildung 5: Meinungsverteilungen $P_a(x,t)$ im Verlauf der Zeit t für den Fall zweier Subpopulationen, die sich gegenseitig unsympathisch finden. Infolge wechselseitiger Ausweichprozesse überlappen sich die Verteilungen $P_1(x,t)$ und $P_2(x,t)$ nach einiger Zeit nicht mehr, das heißt es werden nur noch Meinungen vertreten, die in der anderen Subpopulation nicht vorkommen (Polarisierung der Meinungen). Da Subpopulation a=2 eine größere Bereitschaft $L_2 > L_1$ als Subpopulation a=1 zeigt, ihre bevorzugte Meinung x_2 = 12 gegen eine andere Meinung x einzutauschen, gibt sie diese auf, um keine Berührungspunkte mit der anderen Subpopulation zu haben.

schlangen zu beobachten, obwohl eine Verringerung des Abstands hier gar nicht zu einem schnelleren Vorankommen führt (Helbing 1991, 1992, 1992b).

Das Kräftemodell ist auch ein sehr vielversprechender Ansatzpunkt für Forschungen zur *Gruppendynamik*. Bei dieser spielen beispielsweise sympathie- und interessenbedingte Anziehungskräfte eine Rolle, aber auch Abstoßungskräfte infolge konkurrierender Ziele.

2. Konzepte der nichtlinearen Dynamik

Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen eines Systems sind im allgemeinen *nichtlinear*, d.h. die Wirkungen sind nicht einfach proportional zu den Ursachen. Damit läßt sich das Verhalten der Gesamtheit der Elemente (also des Systems) nicht einfach als Summe oder Überlagerung des Verhaltens der einzelnen Elemente verstehen. Insbesondere wirkt ein Element oft über Umwege auf sich selbst zurück (*Rückkopplungseffekt*).

Die Nichtlinearität der Wechselwirkungen hat einige wichtige Konsequenzen. Einerseits zeigt sich, daß bereits wenige Variablen die Werte der anderen Variablen bestimmen (*'Versklavungsprinzip'*) (Haken 1982, 1983) und damit das Verhalten des Systems beschreiben können. Andererseits bedingt die Nichtlinearität oft *Instabilitäten*, die zu *komplexer Dynamik* oder *Selbstorganisationsphänomenen*, d.h. zur *Emergenz* neuer Systemeigenschaften führt (eine ausführliche Diskussion zu diesem Thema geben Reiner und Weidlich (1993)).

a) 'Versklavungsprinzip'. Die dynamischen Abläufe innerhalb eines betrachteten Systems lassen sich durch die Gesamtheit der Variablen beschreiben, welche die zeitabhängigen Zustände der einzelnen Elemente erfassen. Oftmals ist aber die Wahl von anderen Variablen günstiger, welche Vorgänge wiedergeben, die im System mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ablaufen. Zur Bestimmung des geeigneten Satzes von Variablen gibt es mathematische Verfahren (vgl. Haken 1983: Kap. 7, 8).

Man kann diese Variablen in drei Klassen unterteilen (*'Zeitskalentrennung'*): Erstens Variablen, die sich annähernd mit einer Geschwindigkeit (auf einer 'Zeitskala') ändern, die der Änderungsgeschwindigkeit der interessierenden Abläufe im System entspricht. Diese werden als *Ordnungsparameter* bezeichnet. Zweitens Variablen, die sich viel langsamer verändern. Sie können als *quasikonstant* angesehen und daher wie fest vorgegebene Systemparameter behandelt werden. Drittens Variablen, die sich viel schneller als die interessierenden Abläufe verändern und infolgedessen als *Fluktuationen* verstanden werden können. Die schnellen Variablen halten sich die meiste Zeit in der Nähe ihres Gleichgewichts auf, das sich mit der Veränderung der Ordnungsparameter allmählich verlagern kann. Es läßt sich mathematisch zeigen, daß die schnellen Variablen durch die Ordnungsparameter infolge der nichtlinearen Kopplung bereits festgelegt sind ('Versklavungsprinzip') und daher aus den Gleichungen für die interessierenden Abläufe *'quasiadiabatisch'* eliminiert werden können. Von den unzähligen Systemvariablen sind also nur wenige Ordnungsparameter zur Beschreibung des Wesentlichen nötig, was eine enorme Datenreduktion bzw. Informationskompression bedeutet (Haken 1982, 1983, 1988).

Die Ordnungsparameter geben die Dynamik der Phänomene, die sich auf einer 'makroskopischen' bzw. kollektiven Ebene abspielen, auf selbstkonsistente Weise wieder und werden im allgemeinen durch ein geschlossenes System von Differentialgleichungen beschrieben. Infolge der Informationskompression kann diese Dynamik für völlig verschiedene Systeme übereinstimmen, so daß man von *universellen Gesetzen* spricht. Diese universellen Gesetze sind Ursache für viele Analogien zwischen dem makroskopischen Verhalten unterschiedlicher Systeme, deren Elemente oft keine Ähnlichkeit aufweisen (Haken 1982, 1983, 1988; Zeeman 1977).

Die Methode der Zeitskalentrennung ist aber auch in anderem Zusammenhang wichtig, da sie bedeutet, daß bei der Beschreibung sozialer Prozesse viele denkbare Einflüsse keine wesentliche Rolle spielen. So ist es für die Modellierung von Verhaltensänderungen nicht notwendig, die verschiedenen Gedankenabläufe, die zu ihnen führen, im einzelnen nachzuvollziehen, vorausgesetzt, die Gedankenabläufe sind deutlich schneller als die aus ihnen resultierenden Verhaltensänderungen. Die Verhaltensänderungen können dann als mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten auftretende Reaktionen auf die stattfindenden Wahrnehmungen verstanden werden (Helbing 1993: Abschn. 6.2.1).

Es sei betont, daß auch Variablen, die sich auf einer vergleichbaren Zeitskala wie die interessierenden Abläufe verändern, auf diese nicht unbedingt einen Einfluß haben müssen, da sie mit diesen eventuell gar nicht dynamisch gekoppelt sind. So gibt es verschiedene Verhaltensbereiche, die sich kaum gegenseitig beeinflussen und daher getrennt modelliert werden können.

b) Instabilitäten und komplexe Dynamik. Nichtlineare Gleichungen können ein viel komplexeres Verhalten zeigen als lineare. So gibt es statt einer einzigen stationären (zeitunabhängigen) Lösung oft mehrere. Abhängig vom Anfangszustand strebt das System gegen eine von ihnen. Eine Änderung von *(Kontroll-)Parametern*, welche die äußeren Bedinungen des Systems charakterisieren, kann aber zu einer *Instabilität* der stationären Lösung führen, so daß beim Überschreiten eines *kritischen Punktes* unerwartet ein ganz anderes Systemverhalten als vorher auftritt, beispielsweise ein anderer stationärer Zustand, stabile *Oszillationen* (z.B. *Grenzzyklen*) oder sogar *Chaos* (Haken 1983; Helbing 1993: Abschn. 8.3). Die plötzliche Veränderung des Systemverhaltens kündigt sich nur durch *kritische Fluktuationen* (große Zustandsschwankungen) und ein *kritisches Langsamwerden* (ein sehr langsames Erreichen der stabilen Lösung) an.

Grenzzyklen können beispielsweise bei der Migration (beim Umzugsverhalten) von Individuen auftreten. Das Phänomen ist gut bekannt und wurde durch ein Modell beschrieben, das von zwei sozialen Schichten ausgeht, die mathematisch als zwei verschiedene Subpopulationen behandelt werden (Weidlich 1987). Die besser situierte soziale Schicht bevorzugt es, in einem 'guten' Wohnbezirk zu wohnen, in dem die schlechter situierte Schicht wenig vertreten ist. Schlechter situierte Personen sind jedoch daran interessiert, aus einem 'schlechten' Wohnviertel in einen 'guten' Wohnbezirk zu ziehen. Im Laufe der Zeit werden daher immer mehr schlechter Situierte in das bevorzugte Wohnviertel ziehen, was dieses für besser Situierte unattraktiv macht. Letztere ziehen daher vermehrt in ein anderes Wohnviertel, wo der beschriebene Vorgang von vorne beginnt. Das migratorische System gelangt daher nie zu einem stabilen Gleichgewicht, sondern befindet sich in ständiger Bewegung. Prinzipiell sind sogar chaotische Fälle bei der Migration möglich (Weidlich 1987).

Bei Chaos handelt es sich um ein sehr komplexes dynamisches Verhalten, das bei minimaler Variation des Anfangszustandes völlig anders ausfällt *('Schmetterlingseffekt')*. Hierfür gibt es auch Beispiele aus der Meinungsbildung (Helbing 1993: Abschn. 8.3.4, 1993a). Chaotisches Verhalten ist wahrscheinlich die Ursache für die eingangs angesprochene Sensitivität und Unvorhersagbarkeit komplexerer sozialer Prozesse.

c) Selbstorganisation und Emergenz. Werden mit der Änderung von Kontrollparametern kritische Punkte (Instabilitätspunkte) durchlaufen, so verändert sich das Systemverhalten drastisch. Oft spricht man in diesem Zusammenhang von *Phasenübergängen*, Selbstorganisationsprozessen oder der Emergenz neuer Systemeigenschaften. Von Selbstorganisation spricht man vor allem deshalb, weil das veränderte Systemverhalten nicht im einzelnen durch die Umwelteinflüsse ('Randbedingungen') vorgegeben wird, sondern auf der Eigendynamik des Systems beruht (Haken 1982, 1983).

Beispielsweise entwickelt sich die Bevölkerungsverteilung eines Landes gänzlich anders mit der Zeit, wenn der Kontrollparameter 'Agglomerationstendenz' einen bestimmten kritischen Wert überschreitet (Weidlich/Haag 1987). Oberhalb dieses Wertes erfolgt eine Ansammlung der Bevölkerung in einigen Regionen, in denen durch regionale Vorzüge oder rein zufällig eine kleine anfängliche Bevölkerungsverdichtung aufgetreten ist. Eine derartige Entstehung von Ballungsräumen (z.B. Städten) tritt jedoch nicht auf, wenn die 'Agglomerationstendenz' unter dem kritischen Wert liegt. Vielmehr ist dann eine mehr oder weniger gleichmäßige Bevölkerungsverteilung (in Dörfern) zu erwarten.

Typisch für einen Phasenübergang in der Physik ist der Übergang vom gasförmigen zum flüssigen Aggregatszustand bei Erniedrigung des Kontrollparameters 'Temperatur' unter den Kondensationspunkt. Mit der Bildung von Flüssigkeitstropfen in abgekühlten Gasen zum Teil verwandt ist der Zusammenschluß von Individuen zu Gruppen. Während die innere Struktur der Gruppe Fluktuationen (Zufallsschwankungen) durch das jeweilige individuelle Verhalten unterliegt, verhält sich die Gruppe nach außen als Einheit. Diese kann durch eigene, *'makroskopische' ('kollektive') Variablen* beschrieben werden, die sich deutlich langsamer ändern als die individuellen Verhaltensweisen.

Interessiert man sich nun statt für die Wechselwirkung zwischen Individuen für die Interaktion von Gruppen, so kann man ein ähnliches Phänomen feststellen: die Bildung von Organisationen. Sie unterliegen Änderungen, die noch langsamer ablaufen als es für Gruppen der Fall ist. Die Organisationen begründen schließlich eine Gesellschaft.

Offenbar bedingt die nichtlineare Dynamik hier eine Ausbildung verschiedener *Ebenen*, die untereinander *hierarchisch* angeordnet sind. Eine ähnliche Situation findet man in der Physik hinsichtlich der Elementarteilchen, die sich zu Atomkernen formieren, welche sich durch Elektronen zu Atomen ergänzen, die wiederum chemische Moleküle bilden, welche sich z.B. als Festkörper organisieren, die zusammen Himmelskörper ergeben. In der Biologie finden sich ebenfalls vergleichbare Hierarchien.

Man stellt fest, daß auf der untersten Ebene jeweils die stärksten Wechselwirkungen vorliegen, was offenbar die Ursache dafür ist, daß die Zustandsänderungen hier am schnellsten ablaufen. Durch die Wechselwirkungen entstehen, falls sie anziehend sind, *Bindungen*. Dies führt dazu, daß sich die Elemente nicht mehr völlig individuell verhalten, sondern zu *Einheiten* (Systemen) formieren, welche die Elemente (Subsysteme) der nächsten Ebene darstellen. Da die anziehenden Wechselwirkungen durch die Bindung mehr oder weniger 'abgesättigt' werden, sind die Wechselwirkungen innerhalb der Einheiten größer als die Wechselwirkungen der Einheiten untereinander *(Randbildung)*. Die relativ schwachen Restwechselwirkungen bedingen vergleichsweise langsame Zustandsänderungen der gebildeten Einheiten. Es kann also ein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Wechselwirkungsstärke, der Geschwindigkeit von Zustandsänderungen und der Herausbildung hierarchischer Ebenen gefunden werden.

IV. Quantitative Soziodynamik, Synergetik und allgemeine Systemtheorie: Zusammenhänge und Perspektiven

In diesem Abschnitt sollen die Zusammenhänge der quantitativen Soziodynamik mit nahe verwandten Gebieten dargestellt werden und die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen mathematischer, insbesondere soziodynamischer Modellierung sozialer Systeme erörtert werden.

Die *Synergetik* ist definiert als die Theorie der raum-zeitlichen, strukturellen und funktionalen Makrostrukturen von Multikomponentensystemen, zwischen deren Komponenten kooperative Wechselwirkungen bestehen (Haken 1982, 1983). Sie ist als ein Gebiet interdisziplinärer Relevanz aus der Physik hervorgegangen. Insbesondere wurde in ihr für eine sehr allgemeine Klasse von Systemgleichungen ein mathematisches

Verfahren entwickelt, welches erlaubt, den Zusammenhang zwischen der *Mikro-* und *Makroebene* herzustellen und zu zeigen, daß die Dynamik solcher Systeme von wenigen *Makrovariablen*, die man *Ordnungsparameter* nennt, beherrscht ist, während das Verhalten der *Mikrovariablen* dem der Ordnungsparameter folgt und daher *eliminiert* werden kann (*'Versklavungsprinzip'*) (Haken 1982, 1983).

Die *Synergetik* entwickelt ähnliche Auffassungen über die Struktur von Systemen wie die schon früher entstandene *allgemeine Systemtheorie*, geht aber über letztere hinaus, indem sie einen expliziten *mathematischen Algorithmus* für den *Mikro-Makro-Zusammenhang* zur Verfügung stellt und die Dominanz der Ordnungsparameter mathematisch herleitet.

Insoweit, als die *quantitative Soziodynamik* ein generelles mathematisches Beschreibungskonzept für die Dynamik sozialer Systeme entwickelt, welches den Zusammenhang zwischen der Mikroebene individueller Entscheidungen und der Makroebene kollektiver Sozio-Phänomene herstellt, wobei wenige Ordnungsparameter das Makrogeschehen beherrschen, kann man die *quantitative Soziodynamik* als ein *Teilgebiet der Synergetik* auffassen.

Jedoch hat die quantitative Soziodynamik notwendigerweise ein *eigenes, auf die Struktur sozialer Systeme bezogenes Modellierungskonzept*, welches von dem für physikalisch-chemische Systeme abweicht, und zwar aus einem einfachen Grunde: Für soziale Systeme gibt es im Gegensatz zur Physik *keine* 'grundlegenden mikroskopischen Bewegungsgleichungen', auf welche man den synergetischen Algorithmus anwenden könnte. Statt dessen wurde hier durch die Einführung *motivationsabhängiger probabilistischer Übergangsraten* der Entscheidungsprozeß von Individuen modelliert, welcher sodann in die daraufhin aufstellbaren stochastischen bzw. quasideterministischen Bewegungsgleichungen für die Ordnungsparameter eingeht (Weidlich/Haag 1983; Weidlich 1991; Helbing 1993). Auch ohne Grundgleichungen etwa für die Gehirndynamik von Individuen zu besitzen, wird damit das geleistet, was auch die Synergetik anstrebt: Eine quantitative Dynamik für die Makroebene der systembeherrschenden Ordnungsparameter abzuleiten, welche an die Mikroebene rückgekoppelt ist.

Die *allgemeine Systemtheorie* hat das Ziel, *universelle Konzepte* zu entwickeln, welche Systeme hinsichtlich ihrer generellen Struktur charakterisieren. Die interdisziplinäre Relevanz der Systemtheorie folgt daraus, daß die Systeme physikalischer, biologischer oder auch sozialer Natur sein können. Demgemäß haben systemtheoretische Konzepte, ursprünglich von dem Biologen von Bertalanffy (1968) für biologische Systeme aufgestellt, bei Soziologen breite Beachtung, Anwendung und Erweiterung gefunden (Buckley 1967; Coleman 1973; Parsons 1976; Luhmann 1984; Rapoport 1986).

Es sollen nun einige wesentliche Begriffsbildungen der allgemeinen Systemtheorie genannt und daraufhin untersucht werden, ob die quantitativen soziodynamischen bzw. synergetischen Modellierungskonzepte in der Lage sind, diese Begriffe *auszufüllen* und sozusagen eine *Konkretisierung* derselben darzustellen.

Ein System im Sinne der allgemeinen Systemtheorie besteht aus *Elementen, Komponenten* oder *Subsystemen* materieller oder abstrakter Natur mit verschiedenen Eigenschaften, zwischen denen *Wechselwirkung* und *Interdependenz* herrscht. Die Subsysteme gehören Ebenen verschiedener Komplexität an und bilden eine *Hierarchie*. Aus der Interdependenz ergibt sich die *Ganzheitlichkeit*, d.h. die Unmöglichkeit der beliebigen Aufteilbarkeit des Systems, welches zwar *offen* ist und mit der *Umgebung* sowohl

Wechselwirkung wie *Input-Output-Austausch* haben kann, welches sich andererseits aber durch *endogene Selbstorganisation* und *Selbstregulierung* deutlich von der Umgebung *abgrenzt.* Auf eine sich ändernde Umgebung kann das System strukturerhaltend reagieren, indem es sich *dynamisch anpaßt*, wobei das sich einstellende Gleichgewicht oder der dynamische Modus unabhängig von der Ausgangslage ist (*Äquifinalität*). Die *Funktionalität* der Subsysteme und ihrer Interdependenz äußert sich dabei, indem sie zur *dynamischen Stabilisierung* des *Systemganzen* beitragen. Beim Sozialsystem führt darüber hinaus Selbstorganisation und Anpassung zur *Emergenz* neuer *soziokultureller Qualitäten.*

In der *quantitativen Soziodynamik* ergibt sich die *Ganzheitlichkeit* des sozialen Systems und zugleich seine Gliederung in *hierarchisch angeordnete Organisationsebenen* durch die *Rückkopplung* zwischen *Mikro-* und *Makroebene*: Die für das Modellierungskonzept entscheidenden *Übergangsraten* werden vom *Mikro-Entscheidungsverhalten* der Individuen erzeugt und bewirken die Änderung der *Makrovariablen.* Letztere gehen in die Form der Übergangsraten ein und wirken somit *zurück* auf das *individuelle* Entscheidungsverhalten.

Das wichtige Problem der *Abgrenzung* des Systems von seiner *Umgebung* wird in der *quantitativen Soziodynamik* dadurch gelöst, daß die starken endogenen Wechselwirkungen der Systemkomponenten zu einer *quasiautonomen Subdynamik seiner makroskopischen Ordnungsparameter* führen und damit zu einer *operationalen Geschlossenheit* und *endogenen Selbstorganisation* des Systemganzen.

Zwischen den Systemkomponenten und ihrer *Umgebung* herrschen demgegenüber deutlich *schwächere* und *unspezifischere* Wechselwirkungen als *innerhalb* des Systems. Die *Umgebungsankopplungen* werden durch *Kontroll-* oder *Trendparameter* berücksichtigt und gehen als eine Art *Randbedingungen* in die Systemdynamik ein. Zu den als *exogen* betrachteten Kontrollparametern gehören nicht nur räumliche und physikalische Vorgaben, sondern auch konstante, eventuell sogar genetisch bedingte Verhaltensparameter.

Die *selbstregulierende Anpassung* an die Umgebung geschieht in der *quantitativen Soziodynamik* durch *dynamische Reaktion.* Dabei bleibt über weite Bereiche der umweltbedingten Kontroll- und Trendparameter hinweg der *Modus der Systemdynamik erhalten*, erweist sich also als *robust.* Bei *kritischen Werten* exogener Parameter jedoch erfolgt die Systemanpassung durch *Änderung des globalen dynamischen Modus* (soziologischer Phasenübergang), beschrieben durch die *Instabilität* und *Multimodalität* des nichtlinearen Ordnungsparameter-Gleichungssystems. Dabei ergibt sich von selbst die Eigenschaft der *Äquifinalität*, weil wegen der Struktur der Ordnungsparameter-Gleichungen das System makroskopisch in einen *Attraktor* (Fixpunkt, Grenzzyklus oder chaotischen Attraktor) hineinläuft, in welchem es ceteris paribus verbleibt.

Eine *Finalität* und darauf bezogene *Funktionalität* ist bei soziodynamisch modellierten Systemen *nicht a priori* vorgegeben. Als *emergenter Zweck* ergibt sich jedoch die *Erhaltung* der *selbstorganisierten Struktur.* In dem Sinne, daß die autonome Dynamik ihre strukturerhaltende *Robustheit* gewährleistet, ergibt sich somit ex post eine *funktionale Rolle* aller an ihr beteiligten Ordnungsparameter und ihrer Wechselwirkungen.

Die allgemeinen *Perspektiven*, aber auch die *Grenzen* soziodynamischer Modellierung ergeben sich aus ihren Konstruktionsprinzipien. Ihre Methode eignet sich insbesondere zur Konstruktion *sektorenübergreifender Modelle.* Dazu müssen nur die das

Entscheidungsverhalten kontrollierenden Trendparameter *endogenisiert* und damit die bisherigen Grenzen sektoraler Modelle aufgegeben werden. So wird z.B. oft in politischen Modellen der ökonomische Sektor als exogene Umgebung, und in ökonomischen Modellen der politische Sektor als exogene Umgebung angesehen. In Wirklichkeit sind die Kontrollparameter des politischen Sektors nicht etwa Naturkonstanten, sondern u.a. von der ökonomischen Situation beeinflußt. Das Analoge gilt umgekehrt für den ökonomischen Sektor.

Die Erweiterung *sektoraler* Modelle zu *integrierten* Modellen, indem man die (ursprünglich als 'vorgegeben' betrachteten) Kontrollparameter mit einer Dynamik ausstattet und damit zu Ordnungsparametern des fusionierten Systems macht, ist im Rahmen der quantitativen Soziodynamik immer möglich und findet ihre Grenze nur in der wachsenden mathematischen Komplexität.

Zugleich zeigt sich hier die *praktische Nichtabschließbarkeit mathematischer Modellierung von Soziosystemen:* Kontrollparameter in soziodynamischen Modellen sind keine Naturkonstanten, sondern unterliegen im Prinzip selbst einer (eventuell sehr langsamen) Dynamik, in deren mathematische Formulierung wiederum Kontrollparameter (d.h. Koeffizienten) höherer Ordnung eingehen. Diese können wieder dynamisiert werden usw. So ergibt sich ein im Grunde nichtabschließbarer *'Regressus der Kontrollparameter-Dynamiken'*, der nur durch geeignete Näherungsannahmen formal abgeschlossen werden kann.

Schließlich muß die *Reduziertheit* einer jeden mathematischen Modellierung der Dynamik sozialer Systeme Erwähnung finden. Im optimalen Falle beschreibt sie in verifizierbarer Weise die quasi-autonome Dynamik quantifizierter Ordnungsparameter eines näherungsweise abgrenzbaren Sektors des sozialen Systems. Die *quantitative* Beschreibungebene des *mathematischen Kerns der Soziodynamik* ist *qualitativen* Beschreibungen insofern überlegen, als ihre Verifikation schärferen Kriterien unterliegt als eine entsprechende, größere Interpretationsspielräume zulassende rein verbale Beschreibung derselben Dynamik.

Andererseits bedeutet die Beschränkung auf die Ordnungsparameterdynamik eine erhebliche *Informationskompression* und damit *inhaltliche Reduktion*, bei der die farbenreiche Fülle der sozialen Inhalte und Motive, welche die individuellen Handlungs- und Entscheidungsprozesse erst auslösen, weitgehend *verlorengeht* und sich *manchmal nur noch in den dynamikbestimmenden Trendparametern äußert.* Dabei können verschiedene Motivationsbündel M_1 und M_2 unter Umständen zu denselben Trendparametern und daher zu derselben Makrodynamik führen. Dies bedeutet, M_1 und M_2 sind dann makrodynamisch äquivalent. Umgekehrt kann man dann aus der Makrodynamik nicht eindeutig auf die zugrundeliegende Mikro-Motivationsstruktur zurückschließen.

Spezielle Grenzen ergeben sich für die quantitative Soziodynamik aus ihrer Annahme, daß eine Aufteilung in Subpopulationen sich wahrscheinlichkeitstheoretisch gleichartig verhaltender 'Agenten' zulässig sei. Nur dann nämlich ist der Übergang zu Mittelwertgleichungen für die Makrovariablen sinnvoll, wenn deren Varianzen klein bleiben. Tritt dagegen eine Vielzahl inhaltlich unterscheidbarer Verhaltensweisen bei Individualisten auf, die sich nicht in homogene Gruppen mit probabilistisch gleichartigem Entscheidungsverhalten klassifizieren lassen, so bleibt die soziodynamische Modellierung zwar formal möglich, verliert aber ihre Aussagekraft wegen zu großer

Schwankungsbreiten. In diesem Falle ist es besser, zur Methode der Einzelfallsimulation und -interpretation überzugehen.

Literatur

Allen, Peter, 1976: Population Dynamics and Evolution. S. 127-130 in: *Erich Jantsch* und *Conrad H. Waddington* (Hg.): Evolution and Consciousness. Human Systems in Transition. Reading, MA: Addison-Wesley.

Allen, Peter M., Guy Engelen und *Michele Sanglier,* 1986: Towards a General Dynamic Model of the Spatial Evolution of Urban Systems. S. 199-220 in: *Bruce Hutchinson* und *Michael Batty* (Hg.): Advances in Urban Systems Modelling. Amsterdam: Elsevier.

Allen, P. M., und *M. Sanglier,* 1979: A Dynamic Model of a Central Place System, Geographical Analysis 11: 256-272.

Allen, P. M., und *M. Sanglier,* 1981: Urban Evolution, Self-Organization and Decision Making, Environment and Planning A 13: 167-183.

Allen, P. M., M. Sanglier, G. Engelen und *F. Boon,* 1984: Evolutionary Spatial Models of Urban and Regional Systems, Sistemi Urbani 1: 3-36.

Arnold, Ludwig, und *Rene Lefever* (Hg.), 1981: Stochastic Nonlinear Systems in Physics, Chemistry and Biology. Berlin: Springer.

Ashcroft, Neil W., und *N. David Mermin,* 1976: Solid State Physics, S. 715-718. Tokyo: Holt-Saunders.

Axelrod, Robert, 1984: The Evolution of Cooperation. New York: Basic Books.

Axelrod, Robert, und *Douglas Dion,* 1988: The Further Evolution of Cooperation, Science 242: 1385-1390.

Bai-Lin, Hao (Hg.), 1984: Chaos. Singapur: World Scientific.

Bartholomew, David John, 1967: Stochastic Models for Social Processes. London: Wiley.

Bertalanffy, Ludwig von, 1968: General System Theory. New York: Braziller.

Boltzmann, Ludwig, 1964: Lectures on Gas Theory. Berkeley: University of California.

Buckley, Walter, 1967: Sociology and Modern Systems Theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Coleman, James S., 1964: Introduction to Mathematical Sociology. New York: The Free Press of Glencoe.

Coleman, James S., 1973: The Mathematics of Collective Action. London: Heinemann Educational Books.

Coleman, James S., 1990: Foundations of Social Theory. Cambridge, MA: Belknap (Harvard University).

Cusumano, M. A., Y. Mylonadis und *R. S. Rosenbloom*: Strategic Maneuvering and Mass-Market Dynamics: The Triumph of VHS over Beta. Working Paper No. 90-5, Center for Research Management, University of California Berkeley, Consortium on Competitiveness and Cooperation.

Daly, Andrew J., und *Stanley Zachary,* 1978: Improved Multiple Choice Models. S. 335-357 in: *David A. Hensher* und *M. Quasim Dalvi* (Hg.): Determinants of Travel Choice. Westmead: Saxon House.

Deppe, Wolfgang, 1977: Formale Modelle in der Psychologie. Stuttgart: Kohlhammer.

Diekmann, Andreas, 1992: The Log-Logistic Distribution as a Model for Social Diffusion Processes, Journal of Scientific and Industrial Research 51: 285-290.

Diekmann, Andreas, und *Peter Mitter* (Hg.), 1984: Stochastic Modelling of Social Processes. Orlando: Academic Press.

Diekmann, Andreas, und *Peter Mitter,* 1990: Stand und Probleme der Ereignisanalyse. S. 404-441 in: *Karl Ulrich Mayer* (Hg.): Lebensverläufe und sozialer Wandel. Opladen: Westdeutscher Verlag.

Domencich, Thomas A., und *Daniel McFadden,* 1975: Urban Travel Demand. A Behavioral Analysis. S. 61-69. Amsterdam: North-Holland.

Ebeling, Werner, Andreas Engel und *Rainer Feistel,* 1990: Physik der Evolutionsprozesse. Berlin: Akademie-Verlag.

Ebeling, Werner, 1991: Stochastic Models of Competition Processes in Non-Physical Systems, Syst. Anal. Model. Simul. 8: 3ff.

Ebeling, Werner, 1992: Dynamics of Competition and Valuation in Non-Physical Systems. S. 15-33 in: *Achim Sydow* (Hg.): Computational Systems Analysis. Amsterdam: Elsevier.

Ebeling, W., M. A. Jiménez-Montaño, E. Bruckner und *A. Scharnhorst* (1992): A Stochastic Model of Technological Evolution. S. 75-95 in: *Günter Haag, Ulrich Mueller* und *Klaus G. Troitzsch* (Hg.): Economic Evolution and Demographic Change. Formal Models in Social Sciences. Berlin: Springer.

Eigen, Manfred, 1971: The Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules, Naturwissenschaften 58: 465ff.

Eigen, Manfred, und *Peter Schuster,* 1979: The Hypercycle. Berlin: Springer.

Esser, Hartmut, und *Klaus G. Troitzsch,* 1991: Modellierung sozialer Prozesse. Bonn: Informationszentrum Sozialwissenschaften.

Feger, Hubert, 1978: Konflikterleben und Konfliktverhalten. Bern: Huber.

Festinger, Leon, 1957: A Theory of Cognitive Dissonance. Evanston, IL: Row und Peterson.

Fisher, Ronald Aylmer, 1930: The Genetical Theory of Natural Selection. Oxford: Oxford University Press.

Fokker, Adriaan Daniël, 1914: Die mittlere Energie rotierender elektrischer Dipole im Strahlungsfeld, Annalen der Physik 43: 810-820.

Gardiner, Crispin W., 1983: Handbook of Stochastic Methods. Berlin: Springer.

Gardiner, C. W., K. J. McNeil, D. F. Walls und *I. S. Matheson,* 1976: Correlations in Stochastic Theories of Chemical Reactions, Journal of Statistical Physics 14: 307-331.

Gebhardt, Wolfgang, und *Uwe Krey,* 1980: Phasenübergänge und kritische Phänomene. Braunschweig: Vieweg.

Goel, Narendra S., Samaresh C. Maitra und *Elliott W. Montroll,* 1971: On the Volterra and other Nonlinear Models of Interacting Populations, Reviews of Modern Physics 43: 231-276.

Goel, Narendra S., und *Nira Richter-Dyn,* 1974: Stochastic Models in Biology. New York: Academic Press.

Granovetter, Mark, und *Roland Soong,* 1983: Threshold Models of Diffusion and Collective Behavior, Journal of Mathematical Sociology 9: 165-179.

Griffiths, H. Brian, und *Adrian Oldknow,* 1993: Mathematics of Models. New York: Ellis Horwood.

Haag, Günter, 1989: Dynamic Decision Theory: Applications to Urban and Regional Topics. Dordrecht: Kluwer Academic.

Haken, Hermann, 1982: Synergetik. Berlin: Springer.

Haken, Hermann, 1983: Advanced Synergetics. Berlin: Springer.

Haken, Hermann, 1988: Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems. Berlin: Springer.

Hamblin, R. L., R. B. Jacobsen und *J. L. L. Miller,* 1973: A Mathematical Theory of Social Change. New York.

Hauk, Matthias, 1993: Evolutorische Ökonomik und private Transaktionsmedien. Frankfurt a.M.: Lang.

Haus, J. W., und *K. W. Kehr,* 1987: Diffusion in Regular and Disordered Lattices, Physics Reports 150: 263-406.

Heider, Fritz, 1946: Attitudes and Cognitive Organization. Journal of Psychology 21: 107--112.

Helbing, Dirk, 1991: A Mathematical Model for the Behavior of Pedestrians, Behavioral Science 36: 298-310.

Helbing, Dirk, 1992: A Fluid-Dynamic Model for the Movement of Pedestrians. Complex Systems 6: 391-415.

Helbing, Dirk, 1992a: Interrelations between Stochastic Equations for Systems with Pair Interactions, Physica A 181: 29-52.

Helbing, Dirk, 1992b: Models for Pedestrian Behavior. In: Natural Structures. Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature, Part II. Stuttgart: Sonderforschungsbereich 230.

Helbing, Dirk, 1992c: A Mathematical Model for Behavioral Changes by Pair Interactions. S. 330-348 in: *Günter Haag, Ulrich Mueller* und *Klaus G. Troitzsch* (Hg.): Economic Evolution and Demographic Change. Formal Models in Social Sciences. Berlin: Springer.

Helbing, Dirk, 1992d: A Mathematical Model for Attitude Formation by Pair Interactions, Behavioral Science 37: 190-214.
Helbing, Dirk, 1993: Stochastische Methoden, nichtlineare Dynamik und quantitative Modelle sozialer Prozesse. Aachen: Shaker.
Helbing, Dirk, 1993a: Stochastic and Boltzmann-like Models for Behavioral Changes, and their Relation to Game Theory, Physica A 193: 241-258.
Helbing, Dirk, 1994: A Mathematical Model for Behavioral Changes by Pair Interactions and its Relation to Game Theory, Angewandte Sozialforschung 18: 117-132.
Helbing, Dirk, 1994a: A Mathematical Model for the Behavior of Individuals in a Social Field, Journal of Mathematical Sociology 19: 189-219.
Herkner, Werner, 1975: Einführung in die Sozialpsychologie. Bern: Huber.
Hofbauer, Josef, Peter Schuster und *Karl Sigmund*, 1979: A Note on Evolutionarily Stable Strategies and Game Dynamics, J. theor. Biology 81: 609-612.
Hofbauer, Josef, und *K. Sigmund*, 1984: Evolutionstheorie und dynamische Systeme. Berlin: Paul Parey.
Horsthemke, Werner, und *Rene Lefever*, 1984: Noise-Induced Transitions. Berlin: Springer.
Kampen, Nicolaas Godfried van, 1981: Stochastic Processes in Physics and Chemistry. Amsterdam: North-Holland.
Kennedy, Anita M., 1983: The Adoption and Diffusion of New Industrial Products: A Literature Review, European Journal of Marketing 17(3): 31-88.
Kruskal, Joseph B., und *Myron Wish*, 1978: Multidimensional Scaling. Beverly Hills: Sage.
Langevin, Paul, 1908: Sur la théorie du mouvement brownien. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris) 146: 530-533.
Lewenstein, Maciej, Andrzej Nowak und *Bibb Latané*, 1992: Statistical Mechanics of Social Impact, Physical Review A 45: 763-776.
Lewin, Kurt, 1951: Field Theory in Social Science. New York: Harper and Brothers.
Luce, Robert Duncan, 1959: Individual Choice Behavior. New York: Wiley.
Luce, Robert Duncan, und *Howard Raiffa*, 1957: Games and Decisions. New York: Wiley.
Luhmann, Niklas, 1984: Soziale Systeme. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
Ma, Shang-Keng, 1976: Modern Theory of Critical Phenomena. Reading, MA: Benjamin.
Mahajan, Vijay, und *Yoram Wind* (Hg.), 1986: Innovation Diffusion Models of New Product Acceptance. Cambridge, MA: Ballinger.
Malchow, Horst, 1988: Spatial Patterning of Interacting and Dispersing Populations, Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ. (Ser. Biol.) 13: 83-100.
Matheson, I., D. F. Walls und *C. W. Gardiner*, 1975: Stochastic Models of First-Order Nonequilibrium Phase Transitions in Chemical Reactions, Journal of Statistical Physics 12: 21-34.
Mayer-Kuckuk, Theo, 1984: Kernphysik. Stuttgart: Teubner.
Montroll, Elliott W., 1965: Model Making in Biological and Behavioral Sciences. S. 247-298 in: *A. Cemal Eringen* (Hg.): Recent Advances in Engineering Science, Vol. I. New York: Gordon and Breach.
Montroll, Elliott W., 1978: On Some Mathematical Models of Social Phenomena. S. 161-216 in: *Vangipuram Lakshmikantham* (Hg.): Nonlinear Equations in Abstract Spaces. New York: Academic Press.
Montroll, Elliott W., und *Wade W. Badger*, 1974: Introduction to Quantitative Aspects of Social Phenomena. New York: Gordon and Breach.
Montroll, Elliott W., und *Michael F. Shlesinger*, 1984: On the Wonderful World of Random Walks. S. 1-121 in: *Joel Louis Lebowitz* und *Elliott W. Montroll* (Hg.): Nonequilibrium Phenomena II: From Stochastics to Hydrodynamics. Amsterdam: North-Holland.
Montroll, Elliott W., und *Bruce J. West*, 1979: On an Enriched Collection of Stochastic Processes. S. 71-175 in: *Elliott W. Montroll* und *Joel Louis Lebowitz* (Hg.): Fluctuation Phenomena. Amsterdam: North-Holland.
Mosekilde, Erik, Erik Larsen und *John D. Sterman*, 1991: Coping with Complexity: Deterministic Chaos in Human Decisionmaking Behavior. S. 199-229 in: *John L. Casti* und *Anders Karlqvist* (Hg.): Beyond Belief: Randomness, Prediction and Explanation in Science. Boca Raton: CRC Press.
Mosekilde, Erik, Jesper S. Thomsen, Erik Reimer Larsen und *John Sterman*, 1992: Nonlinear Interactions in the Economy. S. 35-61 in: *Günter Haag, Ulrich Mueller* und *Klaus G. Troitzsch* (Hg.): Economic Evolution and Demographic Change. Formal Models in Social Sciences. Berlin: Springer.

Neumann, John von, und *Oskar Morgenstern*, 1944: Theory of Games and Economic Behavior. Princeton: Princeton University Press.
Nicolis, G., M. Malek-Mansour, A. van Nypelseer und *K. Kitahara*, 1976: The Onset of Instabilities in Nonequilibrium Systems, Journal of Statistical Physics 14: 417-432.
Nicolis, Gregoire, und *Ilya Prigogine*, 1977: Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. New York: Wiley.
Oeding, Detlef, 1963: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs, S. 8: Abb. 10. Bonn: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 22.
Older, S. J., 1968: Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets, Traffic Engineering and Control 10: 160-163.
Olinick, Michael, 1978: An Introduction to Mathematical Models in the Social and Life Sciences. Reading, MA: Addison-Wesley.
Oppenheim, Irwin, Kurt Egon Schuler und *George Herbert Weiss* (Hg.), 1977: Stochastic Processes in Chemical Physics: The Master Equation. Cambridge, MA: MIT Press.
Ortúzar, Juan de Dios, und *Luis G. Willumsen*, 1990: Modelling Transport. Chichester: Wiley.
Osgood, Charles E., und *Percy H. Tannenbaum*, 1955: The Principle of Congruity in the Prediction of Attitude Change, Psychological Review 62: 42-55.
Parsons, Talcott, 1976: Zur Theorie sozialer Systeme. Opladen: Westdeutscher Verlag.
Pauli, W. jr, 1928: Über das H-Theorem vom Anwachsen der Entropie vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik. S. 30-45 in: *Peter Debye* (Hg.): Probleme der Modernen Physik. Leipzig: Hirzel.
Pearl, R., 1924: Studies in Human Biology. Baltimore: Williams and Wilkins.
Planck, Max, 1917: Über einen Satz der statistischen Dynamik und seine Erweiterung in der Quantentheorie. S. 324-341 in: Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.
Prigogine, Ilya, 1976: Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System. S. 93-133 in: *Erich Jantsch* und *Conrad Hal Waddington* (Hg.): Evolution and Consciousness. Human Systems in Transition. Reading, MA: Addison-Wesley.
Prigogine, Ilya, und *Robert Herman*, 1971: Kinetic Theory of Vehicular Traffic. New York: Elsevier.
Rapoport, Anatol, 1986: General System Theory. Essential Concepts and Applications. Tunbridge Wells, Kent.: Abacus Press.
Rapoport, A., und *A. M. Chammah*, 1965: Prisoner's Dilemma. A Study in Conflict and Cooperation. Ann Arbor: University of Michigan Press.
Raub, Werner, und *Thomas Voss*, 1986: Conditions for Cooperation in Problematic Social Situations. S. 85-104 in: *Andreas Diekmann* und *Peter Mitter* (Hg.): Paradoxical Effects of Social Behavior. Heidelberg: Physica.
Raub, Werner, und *Thomas Voss*, 1986a: Die Sozialstruktur der Kooperation rationaler Egoisten, Zeitschrift für Soziologie 15: 309-323.
Raub, Werner, 1990: A General Game-Theoretic Model of Preference Adaptations in Problematic Social Situations, Rationality and Society 2: 67-93.
Raub, Werner, und *Jeroen Weesie*, 1992: Sociological Applications of Game Theory. ISCORE Papers, No. 4, Department of Sociology, P.O. Box 80.140, 3508 TS Utrecht, The Netherlands.
Ravenstein, E., 1876: The Birthplaces of the People and the Laws of Migration, The Geographical Magazine III: 173-177, 201-206, 229-233.
Reiner, Rolf, und *Martin Munz*, 1990: Ranking Regression Analysis of Spatiotemporal Variables, Environment and Planning A 22: 507-526.
Reiner, Rolf, und *Wolfgang Weidlich*, 1993: Der Beitrag der Synergetik zum Naturverständnis. S. 177-193 in: *Günther Bien, Thomas Gil* und *Joachim Wilke* (Hg.): Natur im Umbruch. Stuttgart: Frommann-Holzboog.
Schaffer, W. M., L. F. Olsen, G. L. Truty, S. L. Fulmer und *D. J. Graser*, 1988: Periodic and Chaotic Dynamics in Childhood Infections. S. 331-347 in: *Mario Markus, Stefan C. Müller* und *Gregoire Nicolis* (Hg.): From Chemical to Biological Organization. Berlin: Springer.
Schnell, Rainer, Paul B. Hill und *Elke Esser*, 1992: Methoden der empirischen Sozialforschung. München: Oldenbourg.
Schüßler, Rudolf, 1990: Kooperation unter Egoisten: Vier Dilemmata. München: Oldenbourg.
Schuster, Heinz Georg, 1984: Deterministic Chaos. Weinheim: Physik-Verlag.
Schuster, Peter, Karl Sigmund, Josef Hofbauer und *Robert Wolff*, 1981: Selfregulation of Behavior in Animal Societies, Biological Cybernetics 40: 1-25.

Schweitzer, Frank, Jörn Bartels und *Ludwig Pohlmann*, 1991: Simulation of Opinion Structures in Social Systems. S. 236-243 in: *Werner Ebeling, Manfred Peschel* und *Wolfgang Weidlich* (Hg.): Models of Selforganization in Complex Systems (MOSES). Berlin: Akademie Verlag.
Steeb, Willi-Hans, und *Albrecht Kunick*, 1989: Chaos in dynamischen Systemen. Mannheim: B.I.-Wissenschaftsverlag.
Stratonovich, Ruslan L., 1963, 1967: Topics in the Theory of Random Noise, Vol. 1, 2. New York: Gordon and Breach.
Taylor, Peter D., und *Leo B. Jonker*, 1978: Evolutionarily Stable Strategies and Game Dynamics. Mathematical Biosciences 40: 145-156.
Troitzsch, Klaus G., 1990: Modellbildung und Simulation in den Sozialwissenschaften. Opladen: Westdeutscher Verlag.
Thom, Rene, 1975: Structural Stability and Morphogenesis. Reading, MA: Benjamin.
Tuma, Nancy Brandon, und *Michael T. Hannan*, 1984: Social Dynamics. Models and Methods. Orlando: Academic Press.
Uhlenbeck, G. E., 1973: The Validity and the Limitations of the Boltzmann-Equation. In: *Ezechiel Godert, David Cohen* und *Walter Thirring* (Hg.): The Boltzmann Equation. Wien: Springer.
Varian, Hal R., 1978: Microeconomic Analysis. New York: Norton.
Verhulst, P.-F., 1845: Recherches Mathématiques sur la Loi d'Accroissement de la Population. Nuoveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles 18: 1-41.
Voss, Thomas, 1985: Rationale Akteure und soziale Institutionen. München: Oldenbourg.
Walls, D. F., 1976: Non-Equilibrium Phase Transitions in Sociology, Collective Phenomena 2: 125-130.
Weidlich, Wolfgang, 1971: The Statistical Description of Polarization Phenomena in Society, Br. J. Math. Stat. Psychol. 24: 51ff.
Weidlich, Wolfgang, 1972: The Use of Statistical Models in Sociology, Collective Phenomena 1: 51-59.
Weidlich, Wolfgang, 1987: Quantitative Social Science – Physica Scripta 35: 380-387.
Weidlich, Wolfgang, 1991: Physics and Social ScienceThe Approach of Synergetics, Physics Reports 204: 1-163.
Weidlich, Wolfgang, 1993: Synergetic Modelling Concepts for Sociodynamics with Application to Collective Political Opinion Formation, Journal of Mathematical Sociology 18: 267-291.
Weidlich, Wolfgang, und *Martin Braun*, 1992: The Master Equation Approach to Nonlinear Economics, Journal of Evolutionary Economics 2: 233-265.
Weidlich, Wolfgang, und *Günter Haag*, 1983: Concepts and Models of a Quantitative Sociology. The Dynamics of Interacting Populations. Berlin: Springer.
Weidlich, Wolfgang, und *Günter Haag*, 1987: A Dynamic Phase Transition Model for Spatial Agglomeration Processes, Journal of Regional Science 27: 529-569.
Weidlich, Wolfgang, und *Günter Haag* (Hg.), 1988: Interregional Migration. Berlin: Springer.
Williams, H. C. W. L., 1977: On the Formation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit, Environment and Planning A 9: 285-344.
Wunderlin, Arne, und *Hermann Haken*, 1984: Some Applications of Basic Ideas and Models of Synergetics to Sociology. S. 174-181 in: *Eckart Frehland* (Hg.): Synergetics – From Microscopic to Macroscopic Order. Berlin: Springer.
Young, Forrest W., und *Robert M. Hamer*, 1987: Multidimensional Scaling: History, Theory, and Applications. Hillsdale, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
Zeeman, E. C., 1977: Catastrophe Theory. London: Addison-Wesley.
Zeeman, E. C., 1980: Population Dynamics from Game Theory. S. 471-497 in: *Zbigniew Nitecki* und *Clark Robinson* (Hg.): Global Theory of Dynamical Systems. Berlin: Springer.
Ziegler, Rolf, 1972: Theorie und Modell. München: Oldenbourg.
Ziman, John Michael, 1972: Principles of the Theory of Solids. London: Cambridge University.
Zipf, George Kingsley, 1946: The P1P2/D Hypothesis on the Intercity Movement of Persons, American Sociological Review 11: 677-686.

Korrespondenzanschrift: Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Weidlich, Dr. Dirk Helbing, II. Institut für Theoretische Physik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57/III, 70550 Stuttgart