

GGN 45599

Wolfgang Böker
Hans Dieter Brenner
(Herausgeber)

Integrative Therapie der Schizophrenie

Unter Mitarbeit von Ruth Genner

Verlag Hans Huber *1996*
Bern · Göttingen · Toronto · Seattle

Nichtlinearität und Chaos in Psychoseverläufen – eine Klassifikation der Dynamik auf empirischer Basis

Wolfgang Tschacher, Christian Scheier und Elisabeth Aebi

Einleitung

Die klinische Beobachtung zeigt, daß Menschen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ihres Lebens produktiv-psychotische Symptome entwickeln, mittel- und langfristig sehr unterschiedliche Verläufe aufweisen. Die klassischen Beschreibungen der Schizophrenien durch die Psychiatrie seit Kraepelin und Bleuler betonen den prozeßhaften Charakter dieser Störungen. In dieser Tradition entstanden eine Vielzahl von Modellen und Theorien, die Merkmale solcher Prozesse zu ordnen versuchen (Ciompi & Müller, 1976; Strauss et al., 1985). Jedoch bleibt diese Tradition der Untersuchung psychotischer Prozesse zum einen Teil einer qualitativ-deskriptiven, zum anderen Teil einer querschnittsorientierten empirischen Forschung verpflichtet; Häfner & Maurer (1991) sprechen in einem Überblick nach wie vor von «extreme shortcoming of longitudinal research».

Im folgenden Beitrag soll psychotische Symptomatik aus einer longitudinalen Perspektive betrachtet werden, die sich auch empirischer Verfahren der Zeitreihenanalyse und -modellierung bedient: Aus der Sicht der Theorie dynamischer Systeme. Unser Ausgangspunkt hierfür wird sein, daß wir Psychosen als sogenannte «dynamische Krankheiten» auffassen; dieser Ansatz vertritt, daß psychotisches sich von nicht-psychotischem Verhalten im wesentlichen durch die Realisation eines anderen dynamischen Regimes bzw. einer anderen Form von Homöostase unterscheidet. Im interdisziplinären Feld der Dynamik sind weiterhin zwei Konzepte im Zentrum der Diskussion (das Phänomen der Selbstorganisation und das dynamische Regime «deterministisches Chaos»), deren Relevanz für die psychiatrische Forschung wir darstellen wollen. Schließlich werden wir empirische Daten von Psychoseverläufen mit einer entsprechenden Methodik auf nichtlineare Phänomene untersuchen.

Es ist sicher unangebracht, Psychose und Schizophrenie *an sich* als «chaotisch», «nichtlinear» oder mit einem sonstigen Attribut versehen zu wollen; auch Schizophrenie als der engere Begriff bezeichnet vermutlich noch heterogene Typen von Störungen (Andreasen & Olsen, 1982), die sich zudem auf verschiedenen Systemebenen unterschiedlich auswirken. In unserem Zusammenhang ist es bedeutsam, daß mit Methoden der Zeitreihenanalyse die Möglichkeit besteht, den Verlauf auch des einzelnen Patienten quantitativ-statistisch zu charakterisieren (wir haben es mithin mit einem idiographischen Verfahren zu tun, was einer alten Forderung hermeneutischer Ansätze in der Psychologie entspricht). Wenn man sich zudem auf Aussagen über nur eine spezielle Systemebene, nämlich die Ebene des psychopathologischen Pfads von Psychosen in mittlerer Erstreckung (200 bis 800 Tage) beschränkt, scheint es uns möglich, Typen von Schizophreniedynamik auf empirischer Basis qualitativ zu unterscheiden. Anschliessend wird diese Klassifikation mit phänomenologischen und diagnostischen Merkmalen der Krankengeschichte verglichen.

Das Konzept der dynamischen Krankheit («dynamical disease»)

Das Konzept der dynamical disease (Glass & Mackey, 1988) basiert auf der Annahme, daß sich Psyche, Körper und soziale Welt in *Systeme* untergliedern lassen, die jeweils aus interagierenden Komponenten bestehen (vgl. Bunge, 1979). Dieser Gedanke ist in Anwendung auf die jeweiligen Grundlagenwissenschaften Psychologie, Biologie und Soziologie vor allem in Form der Kybernetik zum Tragen gekommen. Neuerdings sind es die besonderen Eigenschaften *komplexer* Systeme (Nicolis & Prigogine, 1987), die eine Systemsicht auch im Bereich der Psychiatrie erkenntnisleitend werden lassen (Schiepek & Tschacher, in Vorbereitung). Allerdings ist gerade in der Anwendung auf psychosoziale Systeme die Frage, welches die Komponenten seien, keineswegs trivial (Tschacher, 1990). Man wird pragmatisch davon ausgehen müssen, daß die Bestimmung der Komponenten auf Entscheidungen der jeweiligen Forscher beruht, wodurch ein beobachterspezifischer Bias (etwa in Form disziplinspezifischer Konventionen) mit einfließt. Ein System im Bereich der Psychiatrie ist also *auch* eine Konstruktion eines Beobachters (Böker & Brenner, in diesem Band).

Aus der Interaktion der Komponenten resultiert nun eine für das System charakteristische Dynamik. Diese besitzt in psychischen, sozialen und biologischen Systemen häufig den Charakter eines Gleichgewichts (kyberne-

tisch: Regelkreis, negatives Feedback). Man findet jedoch auch den Gegenpol zu homöostatischer Dynamik: Zufälliges, turbulentes oder nicht vorher-sagbares Verhalten (z. B. positives Feedback, durch das sich kleine Verän-derungen schnell verstärken können). Wie die Dynamik eines konkret reali-sierten Systems nun auch beschaffen sein mag, das Konzept der dynamischen Krankheit nimmt an, daß das Wesentliche an einer Dysfunktion («Krankheit») die charakteristisch veränderte Dynamik dieser Interaktion von Systemkomponenten ist. Pathologisches Verhalten geht aus gesundem über eine Bifurkation (einen Phasenübergang zwischen zwei dynamischen Regimes) hervor (an der Heiden, 1993). Eine Bifurkation liegt auch dann vor, wenn ein komplexes System aus einem ungeordneten Zustand heraus einen geordneten Gleichgewichtszustand spontan («emergent») erzeugt: Dieses Phänomen einer plötzlich auftauchenden selbstinitiierten Muster- oder Ordnungsbildung wird in der Selbstorganisationstheorie und Synergetik untersucht (Haken, 1990).

Das dynamische Krankheitskonzept sieht keine dichotome oder wer-tende Unterscheidung «krank» vs. «gesund» vor, sondern stellt zunächst lediglich fest, daß Krankheit eine *andere* Form des Funktionierens ein und desselben Systems ist. Krankheit hat mithin keine ontologische Qualität, sondern ist ein von der Norm abweichender Prozeß. Allerdings besteht in komplexen Systemen eine Tendenz der morphologischen Fixierung von wiederkehrender oder langfristig vorherrschender Dynamik, die die zuneh-mende Stabilität chronischer Zustände erklärt (vgl. Bischof, 1990). Insofern können dynamische Krankheiten sich sekundär in ein Substrat «einprägen» und sich in strukturellen Veränderungen niederschlagen.

Wir nehmen nach dem Konzept der dynamical disease also an, dass ein dynamisches System im Hintergrund der Symptomatik steht. Wenn wir Zufallseinflüsse mit aufnehmen, haben wir von einem *dynamischen stocha-stischen System* auszugehen. Dieses kann formal durch eine Differentialgleichung mit einem stochastischen Term $F(t)$, der die auf das System einwir-kenden Fluktuationen (das zufällige «Rauschen» einer ansonsten determi-nistischen Dynamik) beschreibt, symbolisiert werden.

$$\mathbf{x}'(t) = N(\mathbf{x}(t), m) + F(t) \quad (1)$$

$\mathbf{x}(t)$ ist ein von der Zeit t abhängiger Vektor der Zustandsvariablen des Sy-tems (dies sind etwa alle m zur Beschreibung eines Systems dienlichen phä-nomenologischen Größen; diese spannen den Zustandsraum der Dimen-sion m des Systems auf). N ist die (lineare oder nichtlineare) Funktion, die die zeitliche Veränderung der Zustandsvariablen bestimmt. Diese Funktion ist selbst abhängig von der Umwelt des Systems, ausgedrückt durch die Kon-trollparameter μ . $\mathbf{x}'(t)$ bezeichnet die Veränderung der Zustandsvariablen der Zeit.

Ausgehend von Gleichung (1) können wir folgende einfache Klassifikation zwischen qualitativ unterscheidbaren dynamischen Systemen vornehmen:

- (a) $F(t) \gg N(x(t), \mu)$: Der stochastische «Rausch»term $F(t)$ ist sehr viel größer als der deterministische Ausdruck, es liegt ein mehr oder weniger reiner stochastischer Prozeß vor. Einen Spezialfall bildet das zeitlich gewichtete Rauschen Gleitmittelwertes (eines «moving average (MA) Prozesses»).
- (b) $F(t) \ll N(x(t), \mu)$: Es liegt ein deterministisches System vor, das in der Lage wäre, Gleichgewichtszustände («Attraktoren») auszubilden. Beispiele für Attraktoren sind Punktattraktoren (eine Konstante stellt hier das Gleichgewicht dar: Zum Beispiel die Gestimmtheit eines ausgeglichenen Menschen). Periodische Attraktoren haben eine Oszillation zum Gleichgewicht: Zum Beispiel die Gestimmtheit mancher manisch-depressiver Menschen. Punktattraktoren können durch Systeme mit linearem oder nichtlinearem N realisiert werden, während alle komplexeren Homöostasen zwingend auf nichtlineare Systeme zurückgehen. Eine für viele Anwendungsbereiche relevante und derzeit viel diskutierte Klasse von Attraktoren zeigen chaotisches Verhalten, das sich längerfristiger Vorhersagemöglichkeit entzieht. Solcherart turbulentes, durchmischendes Verhalten (Rössler, 1976; Abraham & Shaw, 1984) ist mit herkömmlichen Vorstellungen von Homöostase kaum zu vereinbaren; man kann jedoch zeigen, daß chaotische Attraktoren ebenfalls zu den gleichgewichtserzeugenden (d. h. insgesamt informationsreduzierenden) dynamischen Strukturen gehören, dabei allerdings – sozusagen nebenher – ständig neue Information erzeugen.
- (c) $N(x(t), \mu) / F(t) = R$. Eine Mischform ist in der Forschungspraxis am häufigsten anzutreffen, nämlich deterministische Systeme, die zu einem gewissen Teil (in unseren Daten mit einem Signal-Rausch-Verhältnis $9 > R > 0,6$) verrauscht sind. Folgende weitere Fallunterscheidung liegt auf der Hand:
- (c₁) N ist nichtlinear. Nichtlineare dynamische Systeme sind Voraussetzung für Chaos und Selbstorganisation.
- (c₂) N ist linear. Die Zeitreihe kann durch einen autoregressiven (AR) Prozeß beschrieben werden. AR-Prozesse sind eine einfache Form, zeitliche Abfolgen linear zu modellieren: Der Zustand eines Systems kann als Ergebnis des vorherigen Zustands, multipliziert mit einem konstanten Koeffizienten, gesehen werden (Schmitz, 1989).

Dynamik und Psychodynamik

Unsere inhaltliche Hypothese ist nun, daß psychotische Episoden Manifestationen eines chaotischen Systems darstellen können. Hinweise hierfür ergeben sich vor allem aus den Arbeiten von Ciompi et al. (Ciompi et al., 1992). Schmid (1991) weist auf Folgerungen hin, die die Skaleninvarianz chaotisch-fraktaler Attraktoren für eine Mehrebenenbetrachtung der Schizophrenie hat. Die Bedeutung des dynamischen Befundes (chaotischer Prozeß (c_1) vs. Rauschen (a)) für das Verständnis des zugrundeliegenden (psychobiosozialen) Systems wird in Steitz et al. (1992) umrissen; angelehnt an die dortige Formulierung scheint uns folgende Zuordnung sinnvoll:

Rein stochastische Systeme (a), deren Zeitreihen keine serielle Struktur aufweisen, deuten auf eine hohe Sensibilität gegenüber fluktuierenden Umweltstimuli hin. Dies stellt in dieser Studie die grundlegende Nullhypothese dar, da Umwelteinflüsse auf die Psychotizität in den uns vorliegenden Felddaten nicht kontrolliert sind (eine solche Kontrolle ist vermutlich nur durch experimentelle Designs möglich, und insofern generell schwer mit der Erhebung langer und relevanter Zeitreihen vereinbar). (a)-Systeme werden durch verhaltenstheoretische Theorien (operantes und klassisches Konditionieren) nahegelegt, die Verhalten weitgehend unter Kontrolle externer Stimuli sehen (Hilgard & Bower, 1983). Die Dynamik beruht *nicht* primär auf intrinsischen Eigenschaften des Systems.

Chaotische Systeme (c_1) deuten dagegen auf das Vorhandensein eines intern kontrollierten, niedrigdimensionalen Systems, das sich relativ autonom gegenüber Umweltfluktuationen entfaltet. Der empirische Nachweis von (c_1)-Systemen wäre eine Validierung des Konzepts «dynamical disease» für die Psychosen. In einem komplexen Netzwerk, wie es durch eine Person und alle ihre kognitiven, sozialen und biologischen Bezüge gegeben ist, kann man sich die Entstehung eines niedrigdimensionalen Systems als einen Selbstorganisationsprozeß vorstellen. Im Raster der Psychotherapietheorien gesehen sind solche Systeme eher mit kognitiven (Brenner, 1989; Mahoney, 1991), psychoanalytischen (Schneider, 1983) oder systemischen (Brunner, 1986) Theorien kompatibel.

Methoden

Untersuchungsteilnehmer

Wir untersuchten Patienten, die in der «Soteria Bern»¹ behandelt wurden. Die Soteria ist eine an Gedanken der Milieuthherapie und Affektlogik orien-

tierte Akutstation zur Behandlung vorwiegend ersterkrankter psychotischer Menschen (Ciompi, 1991; Aebi et al., 1993a). Voraussetzung für die Aufnahme in unsere Stichprobe war, daß die täglichen Ausprägungen der psychotischen Symptomatik des Patienten über eine hinreichend lange Zeitspanne (mindestens zweihundert Tage) fast lückenlos beobachtet werden konnte. Es handelt sich bei unserer Patientengruppe also nicht um eine Zufallsstichprobe, sondern um eine Population von Soteria-Patienten mit langer Hospitalisationsdauer.

Die Patienten wurden durch zwei unabhängige Beobachter bezüglich phänomenologischer Charakteristika eingeschätzt. Diese Einschätzungen beruhen jeweils auf detaillierter persönlicher Interaktionserfahrung mit den Patienten. Eine Darstellung der Merkmale der vierzehn in dieser Weise dokumentierten Langzeitpatienten ist in Tabelle 1 gegeben.

Zeitreihendaten

Die Verlaufsvariable, die täglich erhoben wurde, ist eine Fremdbeurteilung der Psychotizität des Patienten durch die Betreuer. Die verwendete siebenfach abgestufte Skala ist ausführlich in Aebi et al. (1993b) beschrieben (Tab. 2). Im Zentrum unseres Interesses steht der Zeitverlauf des mit der genannten Skala eingeschätzten psychotischen Realitätsverlustes. Der Zustandsvektor $x'(t)$ nach Gleichung (1) enthält also lediglich diese eine globale Variable. Ein Beispiel für die Zeitreihe eines Patienten ist in Abbildung 1 dargestellt.

Vorhersagealgorithmus

Die Methodik der Zeitreihenanalyse ist derzeit in schneller Entwicklung begriffen; neben den bereits seit einigen Jahrzehnten verwendeten linearen (ARIMA-)Modellen (Schmitz, 1989) findet diese Entwicklung derzeit verstärkt auf dem Gebiet der nichtlinearen Modelle statt (Tong, 1990). Die nichtlineare Erweiterung der Methodik wird gerade auch im Zusammenhang mit neueren systemtheoretischen Ansätzen wie der Selbstorganisationstheorie und der Chaostheorie wichtig.

Unsere Daten sind nun – und dies ist typisch für psychosoziale Daten – durch relativ kurze Zeitreihen bei wenigen Abstufungen der Skalen und

1 Wir danken den Mitarbeitern der Berner Soteria für die aufwendigen Dokumentationen. Die Datenerhebung wurde durch das Pilotprojekt Soteria (Schweizerischer Nationalfonds) unter Leitung von Luc Ciompi ermöglicht.

Tabelle 1: Kennzeichnung der untersuchten Patientengruppe nach demographischen und krankheitsbezogenen Charakteristika. Die Gruppierung wurde durch Clusteranalyse der Variablen «Ausbildung», «(Krankheits-Attribution)», «High-EE» (expressed emotions in der Familie), «soziale Beziehungen» (außerhalb der Station) gewonnen

Patient-Nr. (Geschlecht)	Alter	Zivilstand (Kinder)	Ausbildung	Diagnose	Ausmaß Psychopath.	Attribution	Rehabil.- verlauf	High-EE (Familie)	soziale Beziehungen
56 (m)	18	ledig	abgebrochen	paran. Schizophr.	groß	intrinsisch	gut	ja	nein
54 (w)	32	ledig	Hochschule	katat. Schizophr.	sehr groß	intrinsisch	schlecht	ja	nein
58 (w)	26	ledig	Lehre	paran. Schizophr.	groß	extrinsisch	schlecht	ja	nein
51 (w)	23	ledig	Lehre	hebephr. Schizophr.	groß	extrinsisch	schlecht	ja	nein
13 (w)	23	ledig	abgebrochen	paran. Schizophr.	groß	extrinsisch	gut	ja	ja
53 (m)	24	ledig	Lehre	paran. Schizophr.	groß	extrinsisch	gut	nein	nein
47 (w)	20	ledig	abgebrochen	hebephr. Schizophr.	sehr groß	extrinsisch	schlecht	nein	nein
24 (m)	27	ledig (1)	abgebrochen	paran. Schizophr.	groß	extrinsisch	gut	ja	ja
41 (w)	18	ledig (1)	keine	Adoleszenzpsychose	klein	extrinsisch	gut	ja	ja
62 (m)	20	ledig	Lehre	schizoaffektiv	mittel	extrinsisch	gut	nein	ja
57 (w)	26	ledig	abgebrochen	paran. Schizophr.	groß	intrinsisch	schlecht	nein	nein
34 (m)	25	ledig	abgebrochen	hebephr. Schizophr.	groß	extrinsisch	schlecht	nein	nein
48 (w)	37	ledig (1)	Lehre	schizoaffektiv	groß	intrinsisch	gut	nein	ja
19 (w)	29	ledig	Lehre	schizophreniform	groß	intrinsisch	gut	nein	ja

Table 2: Skala zur täglichen Einschätzung des psychotischen Realitätsverlustes

-
- 1 Entspannt, ausgeglichen, ruhig
 - 2 Unsicher, ängstlich, nervös, gereizt
 - 3 Unruhig, gespannt, geladen, aggressiv
oder
depressiv, verstimmt, gedrückt, traurig
oder
ambivalent unschlüssig
 - 4 Verängstigt, erregt, konfus, labil, gelockerte Assoziationen
 - 5 Derealisations- und/oder Depersonalisationsphänomene: die Umgebung oder die eigene Person erscheint unwirklich, fremd, verändert
Denkstörungen: Zerfahrenheit, Gedankendränge («Gedankenkarussell»), Gedankenabreißen (Blockaden)
 - 6 Beziehungsideen, wahnhaftige Projektionen, Wahn: unkorrigierbare Überzeugungen von sich und der Welt, die im Widerspruch stehen zur Wirklichkeit und zu den Erfahrungen der Mitmenschen
 - 7 Halluzinationen: Wahrnehmungserlebnisse ohne objektive Reizquelle. Es wird etwas gehört, gesehen, gefühlt, gerochen, was nicht wirklich vorhanden ist
Katatone Phänomene: motorische Blockade, Zwangshaltungen, Stereotypien, Manierismen, Bewegungssturm
-

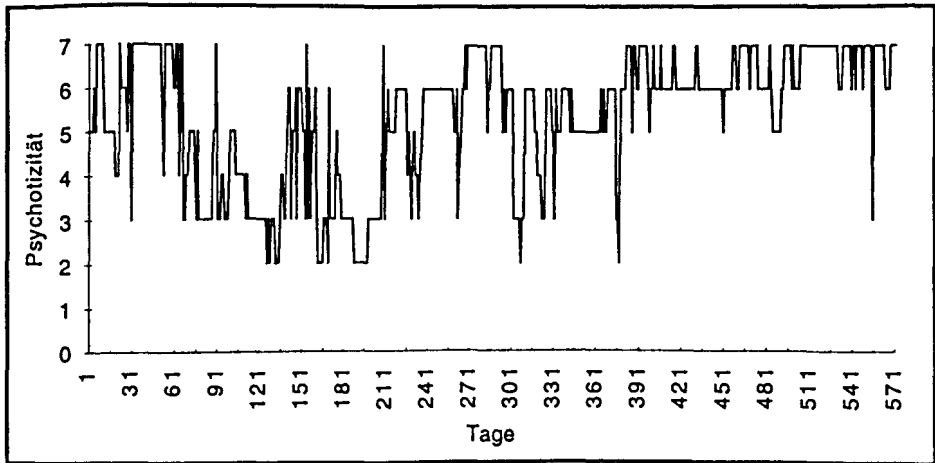


Abbildung 1: Darstellung einer Zeitreihe (Patientin 47) aus täglichen Psychotizitätsbeurteilungen über 572 Tage hinweg

vermutlich deutlicher Meßungenauigkeit belastet. Deshalb scheiden Methoden, die die Dimensionalität eines evtl. vorliegenden chaotischen Attraktors abschätzen, aus (Steitz et al., 1992). Wir entschieden uns für unsere Fragestellung für den nichtlinearen Vorhersagealgorithmus (NVA), der von Sugihara & May (1991) beschrieben wurde. Man kann zeigen, daß der NVA robust gegenüber den genannten Einschränkungen der Datenqualität ist (Scheier & Tschacher, 1994).

Der NVA sei hier nur kurz beschrieben: Für seine Durchführung wird eine Zeitreihe in zwei Hälften geteilt. Die erste Hälfte stellt eine «Bibliothek» dar, aus der Vorhersagen ermittelt werden können. Das erfolgt in dieser Weise: Zunächst wird nach der Methode von Takens (1981) ein Zustandsraum (auch «Phasenraum») der Einbettungsdimension m rekonstruiert. Jedem Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt kommt ein Punkt im Zustandsraum zu. Die Vorhersage der zeitlichen Entwicklung des Systems betrifft also die Frage, auf welchen nächsten Punkt hin sich das System im Zustandsraum bewegt. Auf der Basis der Annahmen der Theorie dynamischer Systeme (z. B. Rosen, 1970) kann man voraussetzen, daß jeweils benachbarte Punkte im Zustandsraum sich in ähnlicher Weise bewegen werden.

Auf diese Weise kann nun in jeder Zeitreihe, die über unsere Untersuchungspersonen erhoben wurde, prognostiziert werden, welche Verläufe auf einen beliebigen Zustand folgen werden. Die Güte dieser Vorhersage läßt sich dadurch bestimmen, daß die (aufgrund der Daten der «Bibliothek») vorhergesagten Verläufe mit den (in der zweiten Zeitreihenhälfte realisierten) tatsächlichen Verläufen korreliert werden. Abbildung 2 zeigt eine Darstellung solcher Korrelationen, die mittels NVA aus den in Abbildung 1 präsentierten Daten gewonnen wurden. Wie zu sehen ist, ist die Korrelation für den Zeitschritt 1 («nächster Tag») zirka 0.7. Ein Prognosezeitraum von fünf Tagen dagegen erlaubt mit einer Korrelation von etwa 0.15 (bei einer geeigneten Einbettungsdimension von $m = 3$) keine valide Aussage mehr.

Die Veränderung der Vorhersagegüte über wachsende Prognosezeiträume hinweg ist nun charakteristisch für die Art des durch die Zeitreihe abgebildeten Systems – man erhält gewissermaßen einen «Fingerabdruck» der Systemdynamik. Ein lineares autoregressives System etwa zeigt keinen Abfall der Korrelationen, sondern ein konstantes positives Maß an Vorhersagegüte; ein Zufallsgenerator (bzw. ein verrauschtes System) weist dagegen keine signifikant von Null verschiedenen Korrelationen auf; ein deterministisch-chaotisches System wiederum zeigt entsprechend seiner definitionsgemässen «sensiblen Abhängigkeit von Anfangsbedingungen» (Bergé et al., 1984) einen Prognoseverlauf ähnlich dem in Abbildung 2 dargestellten: Kurzfristige Vorhersagbarkeit bei längerfristiger Nichtvorhersagbarkeit ist ein grundlegendes Merkmal des deterministischen Chaos.

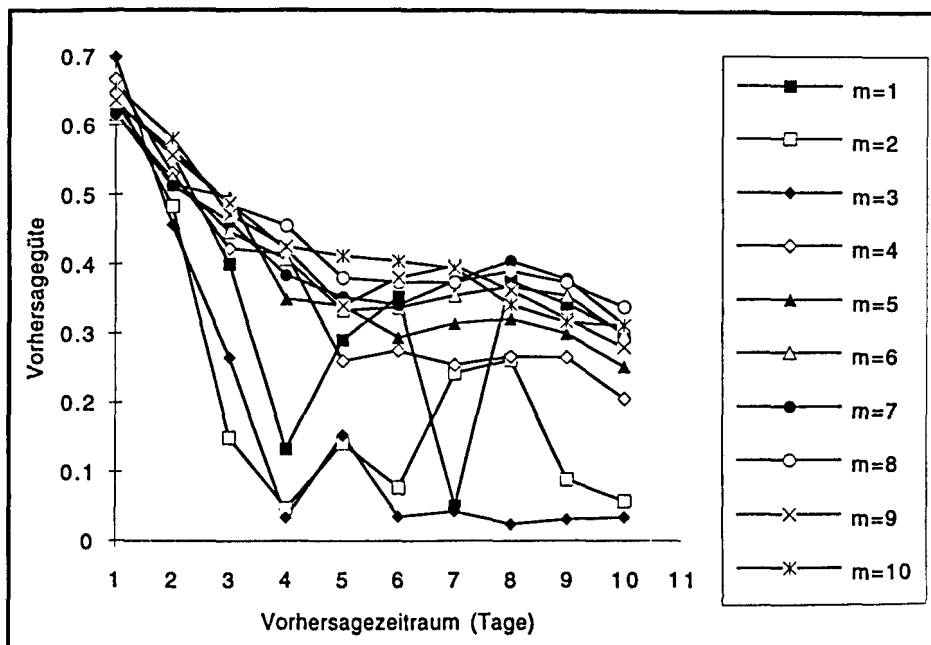


Abbildung 2: Verlauf der Vorhersagegüte des Sugihara-May-Vorhersagealgorithmus für Einbettungsdimensionen 1 bis 10. Ausgangsdaten sind die in Abbildung 1 gezeigten Zeitreihewerte

Surrogatdatenmethode

Wir benutzen eine Surrogatdatenmethode, um die statistische Bedeutsamkeit der Charakterisierung unserer Zeitreihen durch den NVA bestimmen zu können. Die Methode ist ausführlich in Theiler et al. (1992) und Scheier & Tschacher (1994) dargestellt, und sei hier nur kurz am Beispiel erklärt: Zunächst gewinnen wir eine Prüfgröße mittels der beschriebenen Vorhersagemethode NVA, die Korrelation für den Vorhersagezeitraum «1 Tag». Diese beträgt im Beispiel der Zeitreihe in Abbildung 1 etwa $r=0.70$ (siehe Abb. 2). Dann bestimmen wir den entsprechenden Wert für eine Anzahl von Surrogatdaten (d. h. künstlich hergestellte «Zeitreihen», die bezüglich Mittelwert, Varianz und Stichprobenumfang mit der gemessenen Zeitreihe identisch sind) und erhalten auf diese Weise eine Verteilung von Prüfgrößen der künstlichen Datensätze. Damit kann geprüft werden, ob sich die empirische Zeitreihe bezüglich der Prüfgröße von der Population der Surrogatdaten unterscheidet.

Diese Prüfung erfolgte in zweierlei Hinsicht: Zunächst wurde getestet, ob die empirischen Zeitreihen besser vorhergesagt werden können als Zufalls-«zeitreihen»; zweitens wurden autoregressive Modelle für die Originalzeit-

reihen gefittet, als Surrogatdaten verwendet und daraufhin getestet, ob die erhobenen Zeitreihen besser vorhergesagt werden können als ihre linearen Modelle. Mit der Surrogatdatenmethode stellten wir also zwei Nullhypothesen auf, die wir zu verwerfen versuchten:

Nullhypothese (1): Die zu prüfende Zeitreihe verhält sich bezüglich Vorhersagbarkeit wie eine Reihe von Zufallsdaten, ist also ein (a)-System nach der obigen Kategorisierung. Die Surrogatdaten werden hier durch willkürliches Durchmischen der Originaldaten realisiert, d. h. Zeitreihenlänge, Mittelwert und Standardabweichung bleiben gleich, die serielle Abhängigkeit wird aber eliminiert.

Nullhypothese (2): Die zu prüfende Zeitreihe verhält sich bezüglich Vorhersagbarkeit wie ein linearer autoregressiver Prozeß, ist ein (c₂)-System. Die Surrogatdaten sind in diesem Test verschiedene Realisationen eines AR(1)-Modells der Zeitreihe.

Die Zurückweisung beider Nullhypothesen belegt, daß die Zeitreihe überzufällige serielle Struktur enthält und nichtlinear ist.

Lyapunov-Exponenten

Diese «charakteristischen Exponenten» gehören zu den ergodischen Maßen eines dynamischen Systems (Eckmann & Ruelle, 1985), d. h. sie bezeichnen Invarianten der Systemdynamik. Der größte Lyapunov-Exponent λ ist ein Indikator für die Divergenz benachbarter Trajektorien im Zustandsraum. Divergenz ($\lambda > 0$) weist auf Informationsproduktion und sensible Abhängigkeit von Anfangsbedingungen hin, d. h. auf deterministisches Chaos. Die Bestimmung von λ ist sinnvoll, wenn die Testung der Nullhypothesen (1) und (2) ergeben hat, daß es sich bei einem Psychoseverlauf um ein nichtlineares (c₁)-System handelt. Sie ergibt nämlich einen Hinweis darauf, ob Nichtlinearität im Sinne von deterministischem Chaos vorliegt. Wir verwendeten den Algorithmus nach Wolf et al. (1985).

Clusteranalysen

Abschließend unterwarfen wir die verschiedenen Deskriptoren der vierzehn Zeitreihen Clusteranalysen, um Hinweise auf die Untergruppierungen zu erhalten. Wir verwendeten hierarchische Clusteranalysen mit geeigneten Korrelationskoeffizienten (Pearson-*r* für die NVA- und Surrogat-Daten; Goodman-Kruskal-Gamma als Distanzmaß für die phänomenologischen

Daten) (Wilkinson, 1989). Um die Analyse auf letztere Daten anwenden zu können, mußten die Ratings quantifiziert werden – wir «übersetzten» etwa die Skala «Attribution» folgendermaßen: intrinsisch = 1; extrinsisch = -1.

Ergebnisse

Bereits eine Einschätzung per Augenschein ergibt verschiedene Gruppen von Psychoseverläufen, wenn die vierzehn Datensätze mit dem NVA ausgewertet werden. Jeweils zwei Verläufe pro Gruppe sind beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt. Die erste Gruppe weist Vorhersagegraphen auf, die denen chaotisch-deterministischer Systeme ähneln (in der Legende zu Abbildung 3 als «nichtlinear» bezeichnet). Entsprechend den von Sugihara & May (1991) diskutierten populationsdynamischen Zeitreihen zeigt sich auch in unseren nichtlinearen Zeitreihen ein von Mal zu Mal verschiedener Rausch-Anteil, der die Eintages-Vorhersage auf Werte zwischen 0.92 (etwa 10% Rauschen) bis etwa 0.4 (etwa 60% Rauschen) reduziert ((c_1)-Systeme). Weiterhin sind in Abbildung 3 die Vorhersagedaten für solche Zeitreihen dargestellt, die die Charakteristika von Zufallsdaten ((a)-Systeme, «noise») oder autoregressiven Prozessen ((c_2)-Systeme, «linear») tragen.

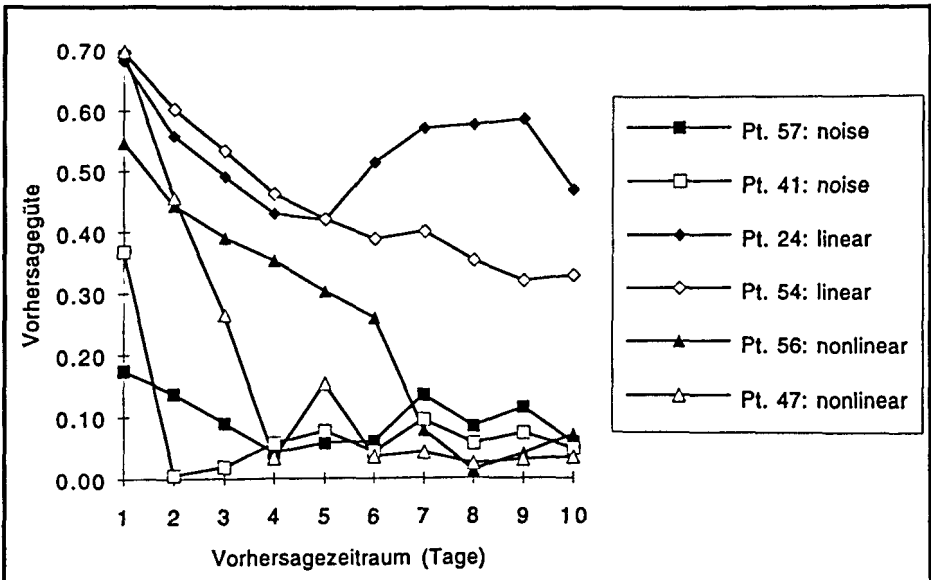


Abbildung 3: (c_1)-Systeme, (a)-Systeme, (c_2)-Systeme: Verläufe des Sugihara-May-Vorhersagealgorithmus für einige Psychosezeitreihen. Nach oben ist die Korrelation vorhergesagter vs. realer Wert abgetragen, nach rechts der Vorhersagezeitraum in Tagen

Tabelle 3: Ergebnisse der nichtlinearen Vorhersagemethode und zugehörige Signifikanztests. «Vorhersagegüte»: Der Grad der Vorhersagbarkeit (höchste NVA-Korrelation für 1-Tages-Vorhersage); «Vorhersage-Abfall»: Die Abnahme der Vorhersagbarkeit (mittlere NVA-Korrelation der 1-Tages-Vorhersage minus mittlere NVA-Korrelation der Vorhersage 5 Tage im voraus); « λ »: Wert des höchsten Lyapunov-Exponenten; « $H_0(1)$ »: Zufalls-Effektmaß; « $H_0(2)$ »: Linearitäts-Effektmaß (die Werte verstehen sich als Abszissenwerte unter der Standardnormalverteilung; z. B. 1.96 entspricht 5 %-Signifikanzniveau bei zweiseitiger Fragestellung (); 2.58 entspricht 1 %-Signifikanzniveau (**)). Die Gruppierung der Tabelle folgt einer an den Tabellendaten durchgeführten Clusteranalyse*

Patient	Vorhersagegüte	Vorhersage-Abfall	λ	$H_0(1)$	$H_0(2)$	Modell
62	0.790	0.422	0.024	12.22**	0.98	AR
54	0.696	0.229	0.014	17.13**	1.23	AR
24	0.852	0.408	0.002	11.97**	0.87	AR
51	0.920	0.288	0.142	11.28**	1.90	nl
13	0.661	0.269	0.104	10.84**	1.72	AR (nl?)
47	0.698	0.344	0.27	15.27**	2.18*	nl
34	0.479	0,325	0.004	11.64**	2.28*	nl (AR?)
48	0.472	0.364	0.02	4.70**	2.18*	nl (AR?)
56	0.578	0.206	0.372	9.26**	6.66**	nl
19	0.671	0.326	0.243	5.13**	2.33*	nl
53	0.757	0.45	0.214	4.59**	3.42**	nl
58	0.358	0.123	0.117	2.72**	8.16**	nl
41	0.477	0.113	0.002	1.66	4.91**	noise (nl?)
57	0.174	0.005	0.021	0.80	5.26**	noise

Diese Gruppe von Verläufen zeigt keine signifikante Änderung der Vorhersagegüte über die Zeit.

Im folgenden sollen die Ergebnisse der Signifikanztests dargestellt werden. Wie oben ausgeführt, wurden zwei Nullhypothesen mit der Surrogatdatenmethode geprüft. In Tabelle 3 sind die Vorhersagegüten nach Sugihara & May (1991) für die Psychose-Zeitreihen sowie die Effektmaße für die Nullhypothesen (1) und (2) aufgeführt. Aus der Tabelle geht hervor, daß von vierzehn Patienten acht (57%) nichtlineare Dynamik aufweisen. Vier der Zeitreihen sind als autoregressive Prozesse modellierbar und zwei sind als Zufallsprozesse zu charakterisieren. Die Testergebnisse sind in der Spalte «Modell» in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Die errechneten maximalen Lyapunov-Exponenten gehen ebenfalls aus Tabelle 3 hervor; sie unterstützen unsere Klassifikation aufgrund der Signifikanzen insofern, als nichtlineare Verläufe die höchsten λ -Werte aufweisen. Zumindest bei sechs der Psychosezeitreihen kann davon ausgegangen werden, daß Anzeichen einer chaotischen Dynamik vorhanden sind.

Mit einer Clusteranalyse wurden die Werte aus Tabelle 3 auf interne Struktur untersucht. Die drei aus dieser Clusteranalyse resultierenden Untergruppen sind durch Leerzeilen graphisch voneinander abgehoben. Es zeigt sich, daß die drei qualitativ unterschiedlichen Verlaufsformen, die wir durch Signifikanztests der Surrogatdatenmethode differenzieren können, auch clusteranalytisch vorgeschlagen werden. Dabei sind die Übergänge zwischen linearen, nichtlinearen und verrauschten Systemen fließend.

In gleicher Weise wurden die phänomenologischen Deskriptoren quantifiziert und geclustert. Die Ergebnisse dieser Analyse sind wiederum als graphische Gruppierung in Tabelle 1 veranschaulicht. Es zeigt sich, daß die drei Gruppierungen nach Verlaufsform nicht als phänomenologische Cluster auffindbar sind. Diese Nichtübereinstimmung der Eingruppierungen erweist sich auch in hier nicht weiter detaillierten Korrelationsberechnungen: Zwischen phänomenologischen und quantitativ-dynamischen Variablen unserer vierzehn Fälle finden sich keine signifikanten Korrelationen.

Diskussion

Nach unserer Meinung kann eine Reihe von Kernfragen der Schizophrenie- und Psychoseforschung nur durch longitudinale Studien beantwortet werden. Wir behandelten hier die grundlegende Frage, welcher Art die Dynamik psychotischer Verläufe ist: Ist die nicht prognostizierbare und oft turbulent anmutende Abfolge von täglichen Symptomausprägungen Ausdruck eines nichtlinearen Systems oder lediglich Widerspiegelung von Umweltfluktuationen? Im ersten Fall könnte man sich der Schizophrenie und ähnlichen Psychosen auf neuer Grundlage annähern, indem man sie als Ausdruck einer dynamischen Krankheit auffaßt. Dies war aus verschiedenen Gründen für die schizophrenen Psychosen (im Gegensatz zur bipolaren Depression) bezweifelt worden (Emrich & Hohenschutz, 1992). Der Psychiatrie würden sich dann eine Palette von Methoden und Phänomenen eröffnen, die im Feld der dynamischen Wissenschaft, der Synergetik und der Chaostheorie entwickelt und diskutiert werden (Tschacher et al., 1992).

Unsere Untersuchung ergibt nun tatsächlich deutliche Hinweise darauf, daß ein größerer Teil der von uns untersuchten Psychosen im Verlauf *nicht-lineare Dynamik* zeigen. Dies spricht zugleich für die Gültigkeit des Konzepts der «dynamischen Krankheit» in diesem wichtigen Teilbereich der Psychopathologie.

Zusätzlich gelang es in dieser Studie durch die Bestimmung der Lyapunov-Exponenten zu zeigen, daß die meisten nichtlinearen psychotischen Verläufe als Ausdruck niedrigdimensionaler chaotischer Systeme aufgefaßt werden können. Mindestens sechs von acht nichtlinearen Verläufen sind so als *deter-*

ministisch-chaotisch charakterisierbar. Umgekehrt wird diese Interpretation dadurch gestützt, daß lineare und stark verrauschte Zeitreihen unserer Population keine Exponenten aufweisen, die signifikant von Null abweichen.

Bei einem vielen Einflüssen ausgesetzten («hochdimensionalen») Zusammenhang wie dem des im Feld erhobenen Symptomverlaufs gehen wir davon aus, daß die nichtlineare Dynamik Ausdruck der Eigenaktivität des im sozialen Milieu «Soteria» eingebetteten psychobiologischen Systems «Psychose» ist, mithin ein Beispiel für *Selbstorganisation*. Anders als mit der «emergenten» Musterbildung via Selbstorganisation läßt sich unseres Erachtens nur schwer verstehen, daß sich nichtlineare chaotische Systeme aus dem Rauschen einer komplexen Umwelt herausheben.

Phänomenologie

Unsere bisherigen Untersuchungen ergaben keine Übereinstimmung zwischen dynamischen Eingruppierungen und Gruppen, die auf klinisch-phänomenologischer Basis gewonnen werden. Die uns besonders interessierenden nichtlinearen chaotischen Verläufe (also die (c_1) -Systeme mit positivem λ) sind zwar fast durchwegs schizophrene Psychosen (in einem Grenzfall – Pt. 19 – eine schizophreniforme Störung). Es kommen aber darunter sowohl als gut wie auch als ungünstig eingestufte Verläufe vor; auch bezüglich der sozialen Interaktion und der Krankheitseinsicht (Attribution) sind die entsprechenden Patienten heterogen.

Ebenso verhält es sich mit einer Prognose, die uns als apriori plausibel erschien: Je relativ weniger ausgeprägt die Psychose, desto verrauschter sollte der Verlauf sein. Ist also ein (a)-System ein Indikator für umweltkontingenteres Verhalten? Es zeigte sich aber (Tab. 1), daß eines der aufgefundenen (a)-Systeme von einer Schizophrenie herrührt (Pt. 57). Insgesamt scheint es uns, daß durch ein korrelativ-suchendes Verfahren erst noch Hypothesen zum Zusammenhang der Dynamik mit phänomenologischen Beschreibungen zu generieren wären. Aufgrund der geringen Fallzahl verbieten sich allgemeine Aussagen zum jetzigen Zeitpunkt.

Diagnosen der einzelnen Patienten korrespondieren also nicht gut mit den dynamischen Parametern. Man kann das in verschiedener Hinsicht interpretieren; es ist sicher wünschenswert, Diagnosen noch mehr als in den gebräuchlichen Taxonomien von der Charakteristik des Verlaufs abhängig zu machen. Ein valideres Diagnosesystem könnte sich auf diese Weise entwickeln. Auf der anderen Seite zeigt sich in unseren Ergebnissen auch eine *Ermutigung zur Idiographie*, die nicht allein Methode der Hermeneutik ist. Jeder Mensch entwickelt eine eigene Dynamik; auch Psychosen sind private und «kreative» Phänomene, die nie restlos einer Kategorie zugeordnet werden können (Scharfetter, 1990).

Verlaufsdaten der hier beschriebenen Länge, besonders wenn sie täglich erhoben werden, sind vermutlich eine Rarität. Sie wurden erst durch jahrelange Beobachtungen unter Sonderbedingungen ermöglicht. Dennoch lassen unsere Zeitreihen eine Reihe von Wünschen offen: Mit differenzierteren Skalen ließe sich der Verlauf von Psychosen weitaus besser und verlässlicher aufklären (unsere Forschungsgruppe hat inzwischen begonnen, Datenerhebungen auf multiple Zeitreihen zu erweitern). Zur Frage des Zusammenhangs verschiedener Symptome (Positiv- und Negativsymptome) innerhalb schizophrener Störungen gibt es unterschiedliche und inkompatible Theorien, die sich gleichermaßen auf Korrelationsstudien bei Einzeitpunktmessung stützen (Maurer & Häfner, 1989). Es scheint uns deutlich, daß sich diese Theorien nur auf der Ebene einer feineren zeitlichen Auflösung im Sinne einer multiplen Zeitreihenanalyse sinnvoll weiterdiskutieren lassen.

Wenn – wie wir nun begründet annehmen – eine beträchtliche Anzahl von Psychosen zu den dynamischen Krankheiten zu rechnen ist, müssen querschnittshafte Forschungsansätze mit noch so großen Stichproben das Wesen dieser Psychosen prinzipiell im Dunkeln lassen. Wir schließen uns hier der Auffassung von Strauss et al. (1985, p.295) an: «... the issues of sequence and patterns cannot be neglected indefinitely: They potentially hold answers for too many crucial questions.» Wir sprechen uns darüberhinaus grundsätzlich dafür aus, die *Theorie dynamischer Systeme* als Methodologie für die Psychiatrie zu nutzen. Die Folgerungen aus einer dynamischen Sichtweise der Psychosen sind weitreichend und erstrecken sich nicht nur auf die Theorie, sondern auch auf die Therapie dieser Störungen.

Chaos bedeutet nicht prinzipielle Unkontrollierbarkeit, wie durch den Alltagsgebrauch des Wortes nahegelegt, sondern vielmehr zunehmende Unvorhersagbarkeit bei kurzfristiger Determiniertheit. Das heißt für therapeutische Interventionen, daß sie ein Moment der «Chaoskontrolle» beinhalten können: Die Zeitspanne zwischen Intervention und Evaluation (die dann neue Interventionen steuert) sollte entsprechend angepaßt sein (Mayer-Kress, 1992). Die Frage des therapeutischen Umgangs mit komplexen Systemen kann auch im Rahmen eines synergetischen Ansatzes, der in Anwendung auf die klinische Psychologie bereits diskutiert wird (Kruse & Stadler, 1990; Schiepek et al., 1992; Tschacher, 1990), aufgeworfen werden. Psychose wird hier als ein dynamisches Muster eines selbstorganisierenden Systems verstanden (ein «Attraktor»), wobei nach der Theorie verschiedene Möglichkeiten einer Rückführung in nichtpsychotisches Verhalten bestehen. Erstens verändern sich bei gradueller Variation der Umwelt («Kontrollparameter») die Eigenschaften des Attraktors in oft diskontinuierlicher Weise. Zweitens, wenn parallel andere («nichtpathologische») At-

traktoren weiterbestehen, kann auch ohne Veränderung der Kontrollparameter eine einzelne (starke) Intervention oder «Verstörung» das System in den Einzugsbereich dieser Attraktoren treiben; diese müssen dann im Sinne einer Rückfallvermeidung strukturell stabilisiert werden.

In Zukunft wird man sich systematischer der Grundlegung einer dynamischen Interventionstheorie zuwenden müssen. Wir hoffen, daß die vorliegende Arbeit eine Anregung auch in dieser Hinsicht bedeutet.

Literatur

- Abraham, R., & Shaw, C. (1984) *Chaotic Behavior. Dynamics – the Geometry of Behavior*, Vol. 2. Santa Cruz: Aerial Press.
- Aebi, E., Ciompi, L. & Hansen, H. (1993a) *Soteria im Gespräch – über eine alternative Schizophreniebehandlung*. Bonn: Psychiatrie-Verlag.
- Aebi, E., Ackermann, K. & Revenstorf, D. (1993b) Ein Konzept der sozialen Unterstützung für akut Schizophrene. *Zeitschrift für Klinische Psychologie, Psychopathologie & Psychotherapie*, 41, 18–30.
- an der Heiden, U. (1993) Dynamische Krankheiten – Konzept und Beispiele. *Verhaltensmodifikation & Verhaltensmedizin*, 14, 51–65.
- Andreasen, N. C. & Olsen, S. (1982) Negative versus positive schizophrenia. *Archives of General Psychiatry*, 39, 789–794.
- Bergé, P., Pomeau, Y. & Vidal, C. (1984) *Order Within Chaos. Towards a Deterministic Approach to Turbulence*. New York: Wiley.
- Bischof, N. (1990) Ordnung und Organisation als heuristische Prinzipien des reduktiven Denkens. *Nova Acta Leopoldina*, 63, 285–312.
- Brenner, H. D. (1989) The treatment of basic psychological dysfunctions from a systemic point of view. *British Journal of Psychiatry*, 155, (Supplement 5), 74–83.
- Brunner, E. J. (1986) *Grundfragen der Familientherapie. (Systemische Theorie und Methodologie)*. Berlin: Springer.
- Bunge, M. (1979) *Treatise on Basic Philosophy*. Vol. 4, Ontology II: A World of Systems. Dordrecht: Reidel.
- Ciompi, L. (1991) Affects as central organising and integrating factors. *British Journal of Psychiatry*, 159, 97–105.
- Ciompi, L. & Müller, C. (1976) *Lebensweg und Alter der Schizophrenen. Eine katamnestiche Längzeitstudie*. Berlin: Springer.
- Ciompi, L., Ambühl, B., & Dünki, R. (1992) Schizophrenie und Chaostheorie. *System Familie*, 5, 133–147.
- Eckmann, J. & Ruelle, D. (1985) Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Reviews of Modern Physics*, 57, 617–656.
- Emrich, H. & Hohenschutz, C. (1992) Psychiatric disorders: Are they «Dynamical Diseases»? In: *Self-Organization and Clinical Psychology* (eds. W. Tschacher, G. Schiepek & E. J. Brunner) Berlin: Springer.
- Glass, L. & Mackey, M. (1988) *From Clocks to Chaos. The Rhythms of Life*. Princeton: University Press.
- Häfner, H. & Maurer, K. (1991) Are there two types of schizophrenia? In *Negative Versus Positive Schizophrenia* (eds. A. Marneros, N. C. Andreasen & M. T. Tsuang) Berlin: Springer.

- Haken, H. (1990) *Synergetik – eine Einführung. (Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie)* Berlin: Springer.
- Hilgard, E. & Bower, G. (1983) *Theorien des Lernens*. Stuttgart: Klett.
- Kruse, P. & Stadler, M. (1990) Stability and instability in cognitive systems: Multi-stability, suggestion and psychosomatic interaction. In *Synergetics of Cognition* (eds. H. Haken & M. Stadler) Berlin: Springer.
- Mahoney, M. (1991) *Human Change Processes. The Scientific Foundations of Psychotherapy*. Chicago: Basic Books.
- Maurer, K. & Häfner, H. (1991) Dependence, independence or interdependence of positive and negative symptoms. In *Negative Versus Positive Schizophrenia* (eds. A. Marneros, N. C. Andreasen & M. T. Tsuang) Berlin: Springer.
- Mayer-Kress, G. (1992) *Chaos and Crises in International Systems*. Vortrag gehalten anlässlich des SHAPE Technology Symposium on crisis management, Mons, Belgien (19.–20.3.92).
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (1987) *Die Erforschung des Komplexen*. München: Piper.
- Rosen, R. (1970) *Dynamical Systems Theory in Biology, Vol. I*. New York: Wiley.
- Rössler, O. (1976) An equation for continuous chaos. *Physical Letters*, 57A, 397–398.
- Scharfetter, C. (1990) *Schizophrene Menschen*. München: Psychologie-Verlags-Union.
- Scheier, C. & Tschacher, W. (1994) Nichtlineare Analyse dynamischer psychologischer Systeme I: Konzepte und Methoden. *System Familie*, 7, 133–144.
- Schiepek, G. & Tschacher, W. (Hrsg.) (in Vorbereitung) *Synergetik in Psychologie und Psychiatrie*. Braunschweig: Vieweg.
- Schiepek, G., Fricke, B. & Kaimer, P. (1992) Synergetics of psychotherapy. In *Self-Organization and Clinical Psychology* (eds. W. Tschacher, G. Schiepek & E. J. Brunner) Berlin: Springer.
- Schmid, G. (1991) Chaos theory and schizophrenia: Elementary aspects. *Psychopathology*, 24, 185–198.
- Schmitz, B. (1989) *Einführung in die Zeitreihenanalyse (Modelle, Softwarebeschreibung, Anwendungen)*. Bern: Huber.
- Schneider, H. (1983) *Auf dem Wege zu einem neuen Verständnis des psychotherapeutischen Prozesses*. Bern: Huber.
- Steitz, A., Tschacher, W., Ackermann, K. & Revenstorf, D. (1992) Applicability of dimension analysis to data in psychology. In *Self-Organization and Clinical Psychology* (eds. W. Tschacher, G. Schiepek & E. J. Brunner) Berlin: Springer.
- Strauss, J. S., Hafez, H., Lieberman, P. & Harding, C. M. (1985) The course of psychiatric disorder, III: Longitudinal principles. *American Journal of Psychiatry*, 142, 289–296.
- Sugihara, G. & May, R. (1990) Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature*, 344, 734–741.
- Takens, F. (1981) Detecting strange attractors in turbulence. In *Lecture Notes in Mathematics* (eds. D. A. Rand & L. S. Young) Berlin: Springer.
- Theiler, J., Galdrikian, B., Longtin, A., Eubank, S. & Farmer, J. D. (1992) Using surrogate data to detect nonlinearity in time series. In *Nonlinear Modeling and Forecasting* (eds. M. Casdagli & S. Eubank) Redwood City: Addison-Wesley.
- Tong, H. (1990) *Non-Linear Time Series*. Oxford: University Press.
- Tschacher, W. (1990) *Interaktion in selbstorganisierten Systemen. (Grundlegung eines dynamisch-synergetischen Forschungsprogramms in der Psychologie)*. Heidelberg: Asanger.
- Tschacher, W., Schiepek, G. & Brunner, E. J. (eds.) (1992) *Self-Organization and Clinical Psychology. (Empirical Approaches to Synergetics in Psychology)* Berlin: Springer.
- Wilkinson, L. (1989) *SYSTAT: The System for Statistics*. Evanston, IL.: SYSTAT Inc.
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. & Vastano, J. (1985) Determining Lyapounov exponents from a time series. *Physica*, 16D, 285–317.