
System

Forschung
und Therapie

Familie

Band 7 1994

Herausgeber

Elmar Brähler, Leipzig · Ewald Johannes Brunner, Tübingen
Bruno Hildenbrand, Villingen-Schwenningen · Ulrike Jänicke, Halle
Jürgen Kriz, Osnabrück · Stella Reiter-Theil, Göttingen
Rosmarie Welter-Enderlin, Zürich · Michael Wirsching, Freiburg

Schriftleitung

Ewald Johannes Brunner, Tübingen, und Rosmarie Welter-Enderlin, Zürich

Wissenschaftlicher Beirat

Pauline Boss-Grossenbacher, Minneapolis-St. Paul · Michael B. Buchholz,
Tiefenbrunn/Göttingen · Claus Buddeberg, Zürich · Manfred Cierpka,
Göttingen · Luc Ciompi, Bern · Alan S. Gurman, Madison · Kurt Hahlweg,
Braunschweig · Kurt Ludewig, Hamburg · Almuth Massing, Göttingen
Maria Orvid, Krakau · Ingeborg Rücker-Embsen-Jonasch, Heidelberg
Günter Schiepek, Bamberg · Arist von Schlippe, Osnabrück · Klaus A.
Schneewind, München · Helm Stierlin, Heidelberg · Max J. van Trommel,
Rotterdam · Hartmann Tyrell, Bielefeld · Reinhard Waeber, Brig · Norbert A.
Wetzel, Princeton · Lyman C. Wynne, Rochester · Dagmar Zimmer-Höfler,
Zürich



Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York London

Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest

Inhaltsverzeichnis

- Balck F → Cierpka M
Banzer K → Peterander F
Bintig A: Das Rotterdam-Projekt zur
Behandlung von Inzestfamilien 178
Brunner EJ → Welter-Enderlin R
- Cierpka M, Zander B, Seide L, Balck F, Con-
nen M-L, Martens-Schmid K, Michelmann
A, Scheib P, Wirsching M: Multizentrische
Studie zur Versorgungsrelevanz und Effek-
tivität der Familientherapie – der aktuelle
Stand. *Multicenter study for assessing the
relevance and effectiveness in family
therapy – the state of the study* 174
Ciola A → Fivaz-Depeursinge E
Conen M-L → Cierpka M
Corboz-Warnery A → Fivaz-Depeursinge E
- Dieckmann S, Hargens J: Die Maus und der
Löwe. Übersetzungen systemisch-kon-
struktivistischen Arbeitens. *Mouse and
lion. Translations of systemic-construct-
ivist working* 98
Drinkmann A → Kröger F
- Fivaz-Depeursinge E, Roten de Y, Corboz-
Warnery A, Métraux J-C, Ciola A: Die
non-verbale Kommunikation zwischen
Therapeut und Paar. Beobachtungsdaten
und ihre mikroanalytische Untersuchung.
*The non-verbal engagement between the-
rapist and couple. An observational and
microanalytic study* 66
- Gilgenmann K: Die Familie als Erziehungs-
gemeinschaft. Zur Beschreibung der Funk-
tion von Familien in der modernen Gesell-
schaft 212
Gilgenmann K: Replik zum Kommentar von
B. Hildenbrandt 232
- Hargens J → Dieckmann S
Hekken van SMJ, Mey de L, Schulze H-J,
Sinnige P: Kommunikationsstrukturen in
Familien und mit Freunden – Bericht über
eine Reihe von Projekten 54
Hering J → Peterander F
Hildenbrand B: Kommentar zum Beitrag von
K. Gilgenmann: „Die Familie als
Erziehungsgemeinschaft“ 229
- Junglas J: Systemische familienrechtliche
Begutachtungen. *Systemic opinions in
family right* 44
- Kröger F, Drinkmann A, Wälte D, Lask J,
Petzold ER: Der Apfel fällt nicht weit vom
Stamm? Zur Situation der Kinder in Alko-
holkranken-Familien. *Like father
like son? The situation of children in
families with alcohol abuse* 159
Kröger F, Drinkmann A, Wälte D, Lask J,
Petzold ER: SYMLOG-Forschung in
Familien mit alkoholkranken Vätern. Das
Verantwortungsverhalten in der Elterndy-
ade. *SYMLOG-research on families with
alcoholic fathers. The behaviour towards
responsibility within the parental dyade*
33
- Lask J → Kröger F
Leibetseder M: Die Effektivität des Bilanz-
bogens. Eine Einzelfallanalytische Über-
prüfung im Rahmen eines Ehescheidungs-
konfliktes. *The effectivity of the
balance-sheet: a single case study of a di-
vorce-conflict* 145
Leveld T: Die Betonierung der Opferrolle.
Zum Diskurs der Gewalt in Lebenslauf und
Gesellschaft. *Freezing of the victims role.
On the discourse of violence in
individual life and society* 19
- Martens-Schmid K → Cierpka M
Métraux J-C → Fivaz-Depeursinge E
Mey de L → Hekken van SMJ
Michelmann A → Cierpka M
Moch M, Lüscher K: Bedeutungen finan-
zieller Transfers zwischen geschiedenen
Eltern und ihren erwachsenen Kindern
234
- Oberlaender FA: Die zerrissene Familie
Herzberg: ein mißlungener Assimila-
tionsversuch und seine Folgen über drei
Generationen. Zur familiären Beziehungs-
dynamik stigmatisierter protestantischer
Deutscher jüdischer Herkunft und ihrer
nach 1945 in Westdeutschland geborenen
Kinder am Beispiel der Familie Herzberg
2
- Oberlaender FA: Oberlaender zu Spiegel:
Handelt es sich primär um eine Diskrepanz
der familienbiographischen Folie der Be-
obachter oder um eine methodologische
Kontroverse? 122
- Peterander F, Städtler T, Banzer K, Hering J:
Validierung von Skalen zur Messung „ent-

- wicklungsförderlichen Elternverhaltens“.
Validation of scales for the measurement of developmentally conducive parental behaviour 111
 Petzold ER → Kröger F
- Reiter L: Nachruf 131
 Richterich L: FAST Familiensystemtest 52
 Riehl-Emde A, Willi J: Ist seine Ehe auch ihre Ehe? Vergleichende Untersuchung zu Wohlbefinden, Empathie und Zufriedenheit von Mann und Frau. *“His” and “Her” marriages. Empirical investigation about well-being, empathy and satisfaction of husband and wife* 83
 Roten de Y → Fivaz-Depeursinge E
 Rücker-Embden-Jonach I: Impressionen beim 5. Welt-Familien-Therapie-Congress (5th WFTC) in Amsterdam vom 16. bis 20. Mai 1993 59
- Scheib P → Cierpka M
 Scheier Ch, Tschacher W: Nichtlineare Analyse dynamischer psychologischer Systeme. I: Konzepte und Methoden. *Non-linear analysis of dynamic and psychological systems. I. Concepts and Methods* 133
 Schiepek G: Die Beziehungsgestaltung in der Psychotherapie – ein chaotischer Prozeß? *Interaction analysis in psychotherapy – Are there chaotic dynamics in the client-therapist-relationship?* 166
 Schulze H-J → Hekken van SMJ
 Seide L → Cierpka M
 Sinnige P → Hekken van SMJ
- Spiegel MV: Die zweite Generation: Spätfolgen 50
 Spiegel MV: Replik 127
 Spiegel MV: Waisenkinder der Geschichte. Ein Kommentar zu Fallstudie von Franklin A. Oberlaender 15
 Städtler T → Peterander F
- Tomm W: Über „Familienmodelle“ hinaus: Die Familie als Prozeß des Dialogs in einem kulturellen Haus der Sprache 197
 Tschacher W → Scheier Ch
- Wälte D → Kröger F
 Welter-Enderlin R, Brunner EJ: *Editorial* 195
 Welter-Enderlin R, Brunner EJ: Aus der Redaktion 1, 65
 Willi J → Riehl-Emde A
 Wirsching M → Cierpka M
- Zander B → Cierpka M
- Aus der Redaktion 1, 65
 Fall und Kommentar 2, 15
 Originalien 19, 33, 44, 66, 83, 98, 111, 133, 145, 159
 Forum 50, 52, 122, 127
 Forschungsberichte 54, 166, 174
 Tagungsbericht 59
 Buchbesprechungen 61, 183
 Mitteilungen 62, 129, 192
 Autorenbiographien 63, 130, 193
 Bandinhaltsverzeichnis

Originalien

Nichtlineare Analyse dynamischer psychologischer Systeme I: Konzepte und Methoden

Christian Scheier^{1,2}, Wolfgang Tschacher¹

Zusammenfassung. Eine Großzahl psychologischer Phänomene kann nur ausreichend verstanden und analysiert werden, wenn man ihre zeitliche Einbettung berücksichtigt. Dieser Tatsache werden viele Theorien in der Psychologie gerecht, indem sie den dynamischen Charakter psychologischer Systeme herausstreichen. Im Gegensatz hierzu basiert die empirische Forschung zumeist auf Querschnittsuntersuchungen, die keinen Aufschluß über Prozesse liefern können. Vor dem Hintergrund neuerer Systemtheorien, die Selbstorganisation und deterministisches Chaos thematisieren, muß zudem davon ausgegangen werden, daß viele psychosoziale Systeme inhärent nichtlinear sind. Demzufolge müssen in empirische Untersuchungen nicht nur dynamische, sondern auch nichtlineare Aspekte explizit einbezogen werden. Der vorliegende Artikel skizziert deshalb einen methodologischen Ansatz, der auf dynamische psychologische Systeme fokussiert und deren Nichtlinearität berücksichtigt. Dieser Ansatz ist in Form einer Surrogatdatenmethode realisiert, die als Prüfstatistik einen nichtlinearen Vorhersagealgorithmus verwendet. Anhand simulierter Zeitreihen (Hénon-Attraktor) wird gezeigt, daß dieses Verfahren erstmals die Möglichkeit bietet, auch kurze und verrauschte Zeitreihen auf Nichtlinearität und Chaos zu prüfen. Die Anwendung auf empirische psychologische Zeitreihen soll in Teil II dieser Arbeit erfolgen.

Non-linear analysis of dynamic and psychological systems. I. Concepts and Methods

Abstract. In order to understand and analyze psychological phenomena it is frequently necessary to observe their evolutions in time. This is accounted for by many theories which emphasize the dynamical character of psychological systems. But on the other hand, empirical research is still centered around cross-sectional studies which yields no information on temporal process. Additionally, if we consider recent theories of self-organizing and chaotic systems we should expect many psychosocial systems to be inherently non-linear. Therefore, empirical stu-

Anschriften: ¹ Sozialpsychiatrische Universitätsklinik Bern (SPK), Murtenstrasse 21, CH-3010 Bern
² Institut für Informatik, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

dies should cover both dynamical and non-linear aspects. The present paper introduces a methodological approach that allows for the investigation of the dynamics and non-linearity of psychological systems. This approach is implemented as a method using surrogate data sets for hypothesis testing; we used the goodness of fit of a non-linear forecasting algorithm as a test statistic. In artificial data sets (Hénon attractor) we can show that this methodology reliably assesses non-linearity and chaos in time series even if they are short and contaminated by noise. An application to empirical psychological data is provided in part II of this work.

Bei der Betrachtung psychologischer Systeme sticht ihr dynamischer Charakter ins Auge. Von der Entwicklung des Kleinkindes bis hin zum Alterungsprozeß zeigt sich, daß der Mensch wie alle lebenden Organismen in zentraler Weise durch zeitliche Prozesse (z.B. Schlaf-Wach-Zyklus) bestimmt ist. Das gilt ebenso für psychosoziale Systeme, innerhalb derer Menschen interagieren: auch sie befinden sich in einem ständigen Prozeß des Wandels, einem Prozeß von Anpassung, Krise und Entwicklung. Familientherapie greift in diese Prozesse ein, indem sie sie zu verstehen und zu modulieren sucht.

Diese zeitliche Bestimmung menschlichen Seins (eigentlich: Werdens) spiegelt sich in einer Großzahl psychologischer Theorien bzw. dem ihnen immanenten Vokabular wider. Gerade in der systemisch orientierten Literatur wird seit langem auf den Umstand hingewiesen, daß der Dimension „Zeit“ zum Verständnis psychosozialer Systeme eine hervorragende Bedeutung zukommt (z. B. Elkaim 1980; Minuchin 1974). Es mag daher überraschen, daß psychologische Forschung vorwiegend Merkmalstrukturen beschreibt, die in ihrer zeitlichen Gültigkeit nur ungenau definiert sind (Meier 1988). Sie erforscht vorwiegend mittels Einzeitpunktuntersuchungen Merkmalsverteilungen in Stichproben, Kohorten und Populationen (Hager 1992). Es liegt nahe, daß diese Methodologie für die Erfassung von Prozessen denkbar ungeeignet ist.

Einen Ausweg aus der angesprochenen Diskrepanz zwischen querschnittsanalytisch orientierter Forschung und „dynamisch“ formulierter Theorie bietet die Analyse von Zeitreihen. Obwohl Campbell und Stanley (1963) schon in den frühen sechziger Jahren Methoden der Verlaufsbeobachtung entwickelt haben, wurden erst Mitte der siebziger Jahre entsprechende quantitative Verfahren der Zeitreihenanalyse aus der Ökonometrie für die sozialwissenschaftliche Forschung nutzbar gemacht (Glass et al. 1975). Die Forderung nach dem Einsatz zeitreihenanalytischer Techniken zur Erforschung psychologischer Systeme ist also keineswegs neu (vgl. Dahme 1977; Petermann 1978). In der praktischen Anwendung haben sich dabei die auf linearen Modellannahmen beruhenden Methoden durchgesetzt, wie sie vor allem von Box und Jenkins (1976) weiterentwickelt wurden. Diese Modelle erlauben es, Veränderungen im Zeitverlauf detailliert zu untersuchen und Prozeßeffekte zu schätzen (Wei 1990). Zudem können in ihrer multivariaten Formulierung systemische Theorien empirisch überprüft werden (Ackermann et al. 1992; Schmitz 1989).

Der Box-Jenkins-Methodologie inhärent ist jedoch das „Linearitätsproblem“ (Schmitz 1987): Die eingesetzten Zeitreihentechniken gehen insgesamt von der Grundannahme der Linearität aus. Dies ist insofern problematisch, als lineare Prozesse in der Natur nur äußerst selten festzustellen sind (z. B. Priestley 1990). Vielmehr wird heute immer klarer, daß Nichtlinearität in komplexen Systemen eher

die Regel als – wie man lange glaubte – die Ausnahme darstellt. Diese Einsicht hat in jüngerer Zeit zu einer Zunahme der Erforschung nichtlinearer Prozesse geführt. Ein wesentliches Resultat dieser Forschungen ist die Erkenntnis, daß viele nichtlineare Systeme ein „chaotisches“ Verhalten zeigen und sich „selbstorganisieren“ können (Tsonis 1992). Der Begriff „Chaos“ in seiner wissenschaftlichen Bedeutung meint erratisches Verhalten in nichtlinearen und deterministischen Systemen und wird deshalb auch „deterministisches Chaos“ (Ruelle 1992) genannt. Diese Systeme generieren ihr immer neues Verhalten aus sich selbst heraus, d. h. ohne direkten Einfluß der Umwelt; sie können aber trotzdem auf relativ einfachen Grundmechanismen beruhen. Der Gedanke, daß ihr oft als zufällig erscheinendes Verhalten auf einem generativen Prozeß des Systems selbst beruht, also „selbstorganisiert“ ist, hat zu einer Zahl von (Re-)Konzeptualisierungen in der psychologischen Forschung geführt (z. B. Bruder 1991; Höger 1992; Kriz 1992a; Levine und Fitzgerald 1992; Tschacher 1990) und ist auch für die klinische Arbeit und systemische Therapie relevant (z. B. Brunner und Lenz 1993).

Von unmittelbar praktischer Bedeutung sind Auswirkungen, die dynamische Eigenschaften des Systems (etwa: einer Dyade oder Familie) auf die Gestaltung von Interventionen haben können. Es geht dabei weniger um prinzipielle „epistemologische“ Folgerungen, die die Rekursivität komplexer Systeme für die Therapie mit sich bringen mag, sondern eher um die Frage, wie man am besten mit chaotischen und nichtlinearem Verhalten umgeht.

Die dynamische Eigenschaft Chaos hat beispielsweise sehr konkrete Auswirkungen auf den Zeithorizont eines Systems und damit auf die charakteristische Zeitspanne, die zwischen einer Intervention und der Evaluation ihrer Wirkung jeweils verstreichen sollte (Tschacher et al., im Druck). Man kann gewissermaßen sogar das Chaos kontrollieren, wenn man sich innerhalb eines „deterministischen Intervalls“ bewegt: im Falle des unten besprochenen Beispiels (Abb. 2) wären das zumindest die ersten vier Zeitschritte, bevor die Chaotizität die Vorhersagemöglichkeit drastisch eingeschränkt hat. Eine weitere Konsequenz: die Vermutung, daß Familiendynamik selbstorganisiert sei, legt die Vorstellung nahe, Familien veränderten sich stufenweise, nämlich von einem (selbstorganisierten) Gleichgewicht („Attraktor“) zum nächsten. Therapie bestünde dann aus mehreren, qualitativ verschiedenen Schritten (Tschacher 1990): 1.) aus dem Destabilisieren und „Verstören“ aktueller Attraktoren (Symptome, Problemkonstellationen), 2.) aus dem Navigieren in neue Attraktoren, die dann 3.) zu stabilisieren wären; sowie 4.) aus der Prävention eines Rückfalls (d. h. man verhindert, daß sich das Problemmuster restabilisiert).

Wir meinen, die dynamische Theorie bietet mehr als eine (weitere) Metapher für die systemische Therapie. Deshalb ist vor die Spekulation über praxisrelevante Folgerungen die Erforschung psychologischer Dynamik zu setzen. Der Vorteil dieses Ansatzes ist es ja gerade, daß er ein Feld für quantitative Forschung eröffnet, Hypothesen nahelegt und zudem erlaubt, seine Anwendbarkeit in diesem spezifischen Feld zu prüfen.

Die Theorie dynamischer Systeme umfaßt eine Fülle mathematischer Hilfsmittel, die zur Formalisierung psychologischer Fragestellungen herangezogen werden können (vgl. Ciompi et al. 1992; Kriz 1992b; van Geert 1991; Tschacher et al. 1992). Dazu zählt die nichtlineare Zeitreihenanalyse, die insbesondere im Kontext der Untersuchung selbstorganisierender und chaotischer Systeme entstanden ist (Casdagli 1992). Das zentrale Charakteristikum dieser Systeme ist – wie gesagt – ihre Nichtlinearität; für ihre empirische Erforschung mußten demnach neue, vom erwähnten linearen Modell abweichende Techniken entwickelt werden. Nachdem sich die nichtlineare Zeitreihenanalyse längere Zeit auf physikalische Systeme beschränkte und die entwickelten Algorithmen in vielerlei Hinsicht (z. B. Datenanforderungen) dementsprechend ungeeignet für die psychologische Anwendung waren, hat sich in neuerer Zeit auch das Interesse anderer Disziplinen auf den empirischen Zugang zum Themenkomplex „Selbstorganisation“ bzw. „Chaos“ ge-

richtet. Viele dieser außerphysikalischen Wissenschaftsgebiete (z. B. Biologie und Ökonomie) sehen sich jedoch mit einem Problem konfrontiert, das sich auch in der psychologischen Zeitreihenforschung stellt: Die verfügbaren Datensätze sind in der Regel äußerst limitiert in der Anzahl der Meßpunkte und der Meßgenauigkeit. Ungeachtet dessen ist man daran interessiert, nichtlineare und möglicherweise chaotische Strukturen in den Daten identifizieren zu können. Aus diesen Bestrebungen ist eine Anzahl von Techniken entstanden, die u. E. für eine systemische Psychologie, die an der empirischen Untersuchung komplexer Systeme interessiert ist, von beträchtlicher Potenz und Relevanz sind.

Das Ziel von Teil I dieser Arbeit ist es deshalb, zunächst eine Methodik darzustellen, die Fragestellungen der systemischen Psychologie aufzugreifen erlaubt. Wir stellen uns die Frage, wo die Möglichkeiten, aber auch Schwierigkeiten und Probleme in der Anwendung der genannten Techniken auf psychologische Daten liegen und wie sie die linearen Methoden ergänzen können. In einem zukünftigen Teil II können wir uns dann inhaltlich-klinischen Aspekten zuwenden, indem wir empirische Datensätze auswerten und diskutieren.

Nichtlineare Zeitreihenanalyse und psychologische Forschung

Eine zentrale Frage innerhalb der Diskussion um Selbstorganisationskonzepte in der Psychologie muß die Übertragbarkeit disziplinfremder Konzepte und Techniken in den psychologischen Forschungsprozeß betreffen. Hier gilt es insbesondere, der allgemeinen Tendenz eines „naiven Physikalismus“ entgegenzuwirken, indem die verschiedenen Abstraktionsebenen klar differenziert werden (vgl. Tschacher 1990). Im folgenden geht es deshalb nicht um die simple Übertragung fachfremder Denkmodelle, vielmehr sollen nur formale und methodologische Anregungen auf ihre Fruchtbarkeit für die empirische Untersuchung systemischer Fragestellungen in der Psychologie analysiert werden.

Welche Anforderungen sind aus psychologischer Sicht an Methoden der nichtlinearen Zeitreihenanalyse zu stellen? Zunächst ist das Problem der Datenlänge zu nennen: Psychologische Zeitreihen sind typischerweise relativ kurz ($N \approx 100-1000$). Ein erstes und zentrales Evaluationskriterium für eine Zeitreihentechnik ist demzufolge die Frage, welches ihre Datenanforderungen sind. Betrachtet man die bisherigen empirischen Arbeiten zur Erforschung psychologischer Phänomene mittels nichtlinearer Zeitreihentechniken, so fällt auf, daß ausschließlich eine Methode, die sogenannte Dimensionsanalyse (Grassberger und Procaccia 1983) verwendet wird (z. B. Burlingame 1991; Ciompi et al. 1992; Koukkou et al. 1993; Redington und Reidbord 1992). Mit Hilfe der Dimensionsanalyse kann in physikalischen Zeitreihen bestimmt werden, durch wieviele Freiheitsgrade (Systemvariablen) das den Daten zugrundeliegende dynamische System gekennzeichnet ist und ob dieses System eine fraktale (nichtganzzahlige) Dimension aufweist (Theiler 1990). Problematisch ist nun aber, daß die Dimensionsanalyse nur mit sehr langen Zeitreihen reliabel ist. So hat beispielsweise Smith (1988) die Anforderung der Dimensionsanalyse bezüglich der Datenzahl auf 42^D beziffert, wobei D die fraktale Dimension des Systems ist. Es ist leicht zu sehen, daß eine solche Methode für die psychologische Anwendung wenig geeignet ist (vgl. Steitz et al. 1992).

Ein weiteres Charakteristikum psychologischer Datensätze ist ihre „Veräuslichkeit“: psychologische Daten sind immer mit einem z. T. beträchtlichen An-

teil von Zufallskomponenten versehen (z.B. Meßfehler), die nichts mit der Systemdynamik zu tun haben. Eine zweite Anforderung an einen Algorithmus muß also sein, daß er auch in Zeitreihen mit einem relativ hohen Prozentsatz an Rauschen in der Lage ist, die relevanten Strukturen in der Zeitreihe zu entdecken. Auch hier sind Methoden aus der Physik wie die erwähnte Dimensionsanalyse oft ungeeignet; man hat in der Physik in der Regel wesentlich reinere Signale vor sich als in der Psychologie. Mit anderen Worten, nichtlineare Zeitreihentechniken, die für psychologische Fragestellungen relevant sein sollen, müssen rauschrobust sein.

Schließlich ist das Problem der statistischen Absicherung der Resultate zu nennen. Bei vielen der in der Chaosforschung entwickelten Methoden stellt sich das Problem, ab wann ein gewisses Resultat als gesichert angenommen werden kann. Häufig muß man sich auf die Inspektion von Plots verlassen (z.B. in der Dimensionsanalyse), was natürlich anfällig für Verzerrungen und subjektive Interpretationen ist. Hier sind objektive Kriterien zu fordern, die eine statistische Absicherung der Ergebnisse erlauben.

Zusammenfassend können also die zentralen Kriterien bzw. Anforderungen an nichtlineare Zeitreihentechniken aus psychologischer Sicht wie folgt angegeben werden:

1. *Zeitreihenlänge*: Die relevanten Muster müssen in kurzen Zeitreihen entdeckt werden;
2. *Rauschrobustheit*: Eine Methode muß in der Lage sein, die interessierenden Strukturen in verrauschten Zeitreihen zu identifizieren;
3. *Statistische Absicherung*: Die Resultate sollten objektiv und möglichst statistisch absicherbar sein und nicht auf „face validity“ beruhen.

Im folgenden werden zwei nichtlineare Zeitreihentechniken eingeführt und in Simulationsstudien getestet: der nichtlineare Vorhersagealgorithmus und die Surrogatdatenmethode. Sie genügen diesen Kriterien und können deshalb für einen systemwissenschaftlichen Ansatz in der Psychologie vorgeschlagen werden.

Methoden und Beispiele

Es wurde erwähnt, daß alle bisherigen empirischen Arbeiten im Kontext einer psychologischen Erforschung nichtlinearer Phänomene die Dimensionsanalyse zur Datenanalyse benutzen. Ein wesentlicher Grund für die Beliebtheit dieser Methode dürfte in der Tatsache zu suchen sein, daß viele chaotische Systeme eine fraktale Dimension aufweisen. Mit anderen Worten, man hofft durch den Nachweis einer fraktalen Dimension in einer Zeitreihe auf ihre „Chaotizität“ schließen zu können.

Obwohl die Gleichung „fraktal = chaotisch“ für viele Systeme zutrifft, ist dies keineswegs für alle Prozesse der Fall. So konnte gezeigt werden, daß bestimmte Klassen stochastischer (also zufälliger) Signale ebenfalls eine finite nichtganzzahlige Dimension aufweisen, ohne jedoch deterministisch-chaotisch zu sein (z.B. Osborne und Provenzale 1989). Dies bedeutet konkret, daß man auch im Falle einer empirisch ermittelten fraktalen Dimension nicht prinzipiell auf eine chaotische Dynamik in den Daten schließen kann.

Nun sind jedoch chaotische Systeme nicht nur durch eine geometrische Eigenheit (fraktale Dimension) charakterisiert, sondern zeichnen auch durch spezifische dynamische Merkmale aus: Deterministisches Chaos bedeutet langfristige Unvorhersagbarkeit bei kurzfristiger Vorhersagbarkeit (Drazin 1992). Mit anderen Wor-

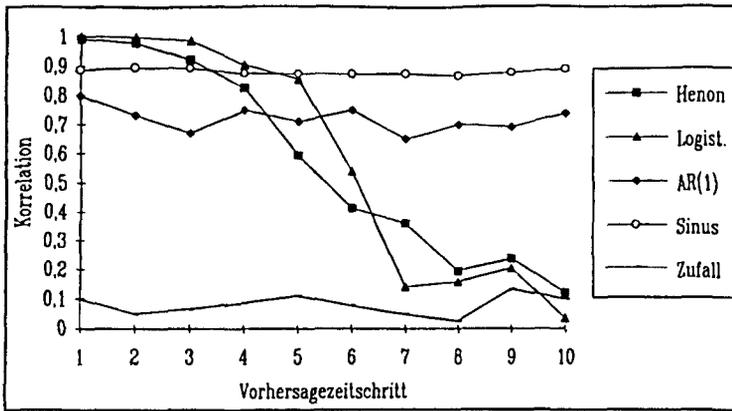


Abb. 1. Resultate der nichtlinearen Vorhersage für 5 simulierte Prozesse. Auf der y-Achse ist die Vorhersagequalität in Form der Korrelation zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Werten angegeben. Die zugrundeliegenden Prozesse sind: (Logist) die logistische Gleichung in der chaotischen Region ($x_{t+1} = 4x_t(1 - x_t)$); (Hénon) Hénon-Abbildung in der chaotischen Region ($x_{t+1} = y, y_{t+1} = 1 - 1.4x_t^2 + 0.3y_t$); (Sinus) eine zu 50% verrauschte Sinusfunktion ($x_t = \sin(0.5t) + \varepsilon_t, \varepsilon_t \in [-0.5, 0.5]$); (AR(1)) ein linearer autoregressiver Prozeß erster Ordnung (AR(1), $x_{t+1} = 0.4x_t + \varepsilon_t, \varepsilon_t \in [-1, 1]$); (Zufall) ein Zufallsprozeß generiert mit einem Standardzufallsgenerator.

ten, eine wesentliche Eigenschaft dieser Systeme ist, daß sie aufgrund ihres Determinismus über kurze Zeit gut vorhersagbar sind, diese Vorhersagbarkeit jedoch mit anwachsender Zeitspanne exponentiell abnimmt. Genau diese Information nutzen nun die in der Biologie und den Wirtschaftswissenschaften entwickelten nichtlinearen Vorhersagealgorithmen (z.B. Casdagli 1992; Sugihara und May 1991). Die wesentliche Idee ist es, die Zukunft eines Prozesses auf der Basis seiner Vergangenheit vorherzusagen. Fällt die Vorhersagequalität mit zunehmendem Vorhersagezeitschritt signifikant ab, kann man auf eine chaotische Dynamik schließen.

Um dies testen zu können, haben wir 5 Prozesse generiert, die jeweils eine uns interessierende Eigenschaft implementieren. Auf diese Zeitreihen wendeten wir den nichtlinearen Vorhersagealgorithmus (NVA) der Biologen Sugihara und May (1991) an. Der NVA benutzt die erste Hälfte einer Zeitreihe als „Bibliothek“, um für alle Punkte der zweiten Zeitreihenhälfte für eine wachsende Zahl von Vorhersagezeitschritten den zukünftigen Verlauf vorherzusagen. Die Vorhersagequalität wird schließlich als Korrelation zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Datenpunkten quantifiziert. In Abb. 1 ist das Resultat für die fünf simulierten Prozesse dargestellt.

Wie man klar erkennt, fällt die Vorhersagequalität für die chaotischen Prozesse mit zunehmenden Vorhersagezeitschritt signifikant ab. Dagegen bleibt die Vorhersagbarkeit für die linearen Prozesse über alle Vorhersagespannen konstant, während für den rein stochastischen Zufallsprozeß überhaupt keine Vorhersagbarkeit erreicht werden kann. Mit anderen Worten, der NVA ist in der Lage, drei zentrale Prozeßklassen (stochastische, lineare und chaotische) zu differenzieren.

Entscheidend ist nun, daß dieses Resultat für Zeitreihen einer Länge von $N = 150$ erzielt wurde. Diese Methode genügt also dem angeführten ersten Evaluationskriterium, daß eine psychologisch relevante Zeitreihentechnik die interessie-

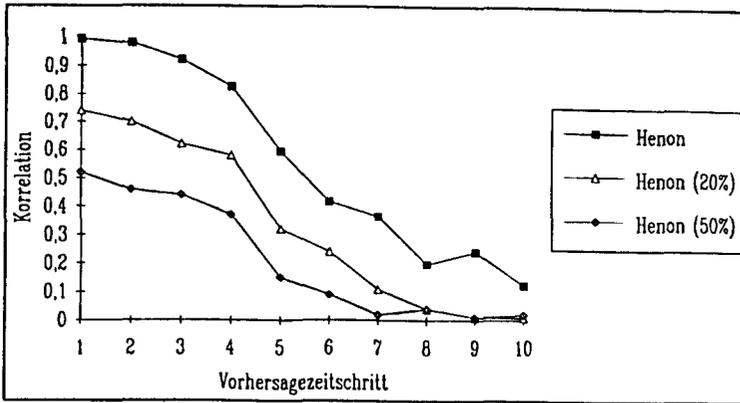


Abb.2. Resultate der nichtlinearen Vorhersage für den Hénon-Attraktor (ohne Rauschen, mit 20% und 50% Rauschen)

renden Muster in kurzen Datensätzen entdecken muß. Wie steht es nun mit den beiden anderen Kriterien? Um diese Fragen beantworten zu können, addierten wir auf einen der chaotischen Prozesse einen zunehmenden Prozentsatz an Rauschen. Das Ergebnis ist in Abb.2 aufgeführt. Mit zunehmender Verrauschtheit fällt erwartungsgemäß die globale Vorhersagbarkeit ab. Trotzdem kann auch bei einem zu 50% verrauschten chaotischen Prozeß noch der charakteristische Abfall des Korrelationskoeffizienten bei zunehmender Vorhersagespanne erkannt werden.

Zusammenfassend stellen wir also fest, daß der NVA in der Lage ist, chaotische Strukturen in kurzen und verrauschten Zeitreihen zu entdecken (vgl. Kriterium 1 und 2). Wie steht es jedoch mit der geforderten statistischen Absicherung? Hier wird ein schon angesprochenes Problem virulent: Die Resultate können nur über die (subjektive) Inspektion der Plots erzielt werden, d.h. sie genügen dem angeführten dritten Kriterium nicht.

Theiler et al. (1992) haben nun kürzlich eine Methode vorgestellt, die die geforderte statistische Absicherung der Resultate ermöglicht. Ihre Methode heißt Methode der Surrogatdaten (MSD) und beruht auf dem klassischen statistischen Hypothesentesten. Konkret wird hier jeweils eine Nullhypothese der Art „Die Zeitreihe ist vom Typ X“ aufgestellt, wobei X eine Eigenschaft der Zeitreihe quantifiziert, von der man zeigen möchte, daß sie hinsichtlich der empirischen Zeitreihe inadäquat ist (z.B. X = Zufallsprozeß). Man stellt also eine Reihe von Nullhypothesen auf, die man gegen die Daten testet. Weiterhin muß eine geeignete Prüfstatistik gewählt werden, die einen relevanten Aspekt der Daten beschreibt. Hierfür kann man nun den beschriebenen NVA einsetzen: dieser Algorithmus quantifiziert – wie oben gezeigt – nichtlineare Vorhersagbarkeit und damit nichtlinearen Determinismus. Die Vorhersagequalität (in Form des Korrelationskoeffizienten zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Daten) kann also als Prüfstatistik für nichtlinearen Determinismus verwendet werden.

Das Vorgehen ist dabei wie folgt: In einem ersten Schritt stellt man eine Nullhypothese auf. Konkret könnte man etwa die Nullhypothese aufstellen, daß die empirische Zeitreihe reines Rauschen darstellt. Ein weiterer Schritt besteht dann darin, Surrogatdatensätze zu erstellen, die bezüglich Länge, Mittelwert und Varianz mit der Originalzeitreihe identisch sind, ansonsten jedoch strukturlos, also ver-

rauscht, sind. Für jeden dieser Surrogatsätze (wir verwendeten jeweils 30 Datensätze) berechnet man schließlich die gewählte Prüfstatistik und erhält so eine Verteilung dieser Prüfgröße. In einem letzten Schritt prüft man, wo sich der für die empirische Zeitreihe berechnete Wert innerhalb dieser Verteilung befindet. Sei also G_D die für die empirischen Werte berechnete Prüfgröße. Analog sei μ_S der Mittelwert und σ_S die Standardabweichung der Verteilung der für die Surrogat-Daten berechneten Prüfgrößen G_S . Dann berechnet sich das Effektmaß E als:

$$E = \frac{|G_D - \mu_S|}{\sigma_S} \quad (1)$$

Das Effektmaß ist eine dimensionslose Quantität; wenn jedoch die Prüfgrößen normalverteilt sind, und dies hat sich in numerischen Experimenten häufig gezeigt (s. u.), dann läßt sich der p -Wert (Wahrscheinlichkeit eines Wertes in der Verteilung) leicht berechnen (vgl. Tabelle 1).

Wir benutzen Gleichung (1), da wir in der Regel einzelne empirische Zeitreihen untersuchen (single case approach, s. Teil II dieser Arbeit). Wenn multiple Realisationen für die empirischen Daten vorhanden sind, können über einen Kolmogorov-Smirnoff oder Mann-Whitney Test die beiden Verteilungen (empirische Daten und Surrogat-Daten) bzw. über einen t -Test ihre Mittelwerte verglichen werden. Für lange Zeitreihen besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Analyse für mehrere Zeitreihenabschnitte durchzuführen und so ebenfalls auf einen Vergleich der Verteilungen zu gelangen.

Um die Stärken und Schwächen der MSD zu testen, haben wir zwei Experimente durchgeführt, wobei wir dieselben (simulierten) Zeitreihen wie in Abb. 1 benutzt haben. In einem ersten Experiment ging es um die Frage, wie sich die MSD verhält, wenn tatsächlich ein linearer Prozeß als empirische Zeitreihe vorliegt. In diesem Fall sollte die Nullhypothese, daß die empirischen Daten einen linearen Prozeß darstellen, nicht verworfen werden können. Da wir auf den NVA als Prüfstatistik zurückgreifen, stellen wir als Alternativhypothese die Aussage auf, daß die Daten nichtlinear und deterministisch sind. Das Resultat entspricht den Erwartungen: Wir erhalten ein nicht signifikantes Effektmaß $E = 1.2$, d. h. wir können die Nullhypothese, daß die untersuchte Zeitreihe linear ist, nicht verwerfen und so den Prozeß korrekt als linearen Prozeß identifizieren.

In einem zweiten Experiment wählten wir schließlich den chaotischen Hénon-Prozeß als „empirische“ Zeitreihe und untersuchten wiederum die Nullhypothese, daß den Daten ein linearer Prozeß zugrundeliegt. Hier ist naheliegenderweise die Erwartung, daß die Nullhypothese signifikant verworfen werden kann. Um zugleich die genannten Kriterien überprüfen zu können, berechneten wir das Effekt-

Tabelle 1. Effektmaße der MSD (Gleichung (1)) und zugehörige p -Werte (zweiseitig)

MSD-Wert E	p -Wert
1.96	0.05
2.58	0.01
4	0.001

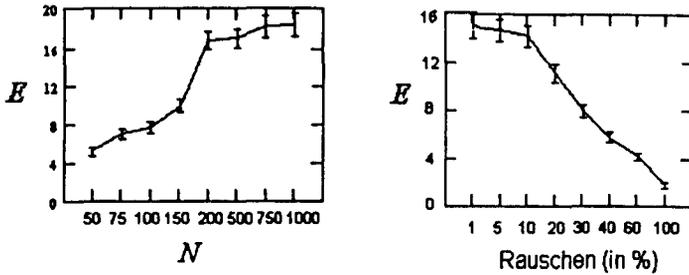


Abb. 3. Links: Die Resultate (angegeben als Effektmaße) der MSD für einen chaotischen Prozeß (Hénon-Abbildung) unterschiedlicher Länge. Rechts: Die Resultate der MSD für den gleichen Prozeß bei zunehmender Verrauschtheit. Erläuterungen s. Text

maß für einen chaotischen Prozeß unterschiedlicher Länge und mit zunehmender Verrauschtheit. Das Resultat dieser Analysen ist zusammenfassend in Abb. 3 dargestellt.

In Abb. 3 links sind die Ergebnisse der MSD für verschiedene Zeitreihenlängen dargestellt. Entscheidend ist, daß wir auch für die äußerst limitierte Länge von $N = 50$ die Nullhypothese signifikant ($E = 5.2$; $p < 0.001$) verwerfen können. Zudem scheint eine Datenlänge von $N = 200$ ausreichend zu sein, da hier das Effektmaß auf einem Plateau saturiert. Die Resultate in Abb. 3 rechts zeigen, daß die MSD äußerst rauschrobust ist: Auch bei einem zu 60% verrauschten chaotischen Prozeß ($N = 200$) kann die Nullhypothese hoch signifikant ($E = 4.1$; $p < 0.001$) verworfen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß mittels der MSD nichtlineare und deterministische Strukturen in kurzen (Kriterium 1), verrauschten (Kriterium 2) Zeitreihen statistisch abgesichert (Kriterium 3) identifiziert werden können.

Diskussion

Welche Schlußfolgerungen lassen sich aus diesen Resultaten ziehen? Zunächst ist festzuhalten, daß die vorgestellten Methoden, der nichtlineare Vorhersagealgorithmus (NVA) und die Methode der Surrogatdaten (MSD), im Vergleich zu herkömmlichen nichtlinearen Methoden (z.B. der Dimensionsanalyse) hinsichtlich vier zentraler Kriterien einen wesentlichen Fortschritt in der empirischen Erforschung dynamischer psychologischer Systeme darstellen.

Erstens erlaubt die beschriebene Methodik es dem Psychologen, eine nichtlineare Analyse mit kurzen Zeitreihen durchzuführen. Dies ist unmittelbar für die Großzahl von Untersuchungen, die mit Rating-Skalen arbeiten, relevant. Hier stellt sich nämlich häufig das Problem, daß man diese Skalen nur über einen gewissen Zeitraum und mit begrenzter Frequenz einsetzen kann, was in dementsprechend kurzen Zeitreihen resultiert.

Zweitens ist diese Methodik besonders gut geeignet für diskretisierte Daten (wie sie etwa durch die wenigen zur Verfügung stehenden Abstufungen einer Rating-Skala vorgegeben sind), da die Verfahren nichtparametrisch sind. Dagegen sind insbesondere Dimensionsanalysen bei Daten mit geringer Auflösung nicht angebracht (Steitz et al. 1992).

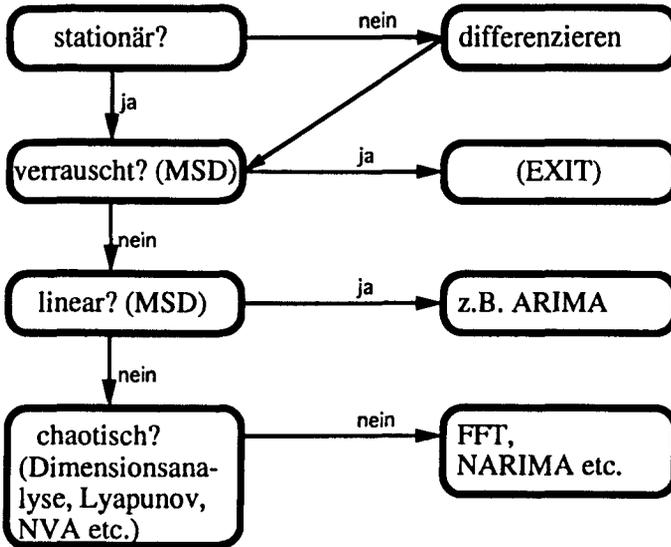


Abb.4. Flußdiagramm des Vorgehens bei der Analyse von Zeitreihen. Einige Begriffe verweisen auf weitere, im Text nicht dargestellte Methoden: FFT (Fast Fourier Transform), ARIMA (lineare Zeitreihenanalyse, „autoregressive integrated moving average“), NARIMA (nichtlineare ARIMA-Modellierung), Lyapunov (Lyapunov-Exponenten, Charakterisierung eines Attraktors), NVA (nichtlinearer Vorhersagealgorithmus), MSD (Surrogatdatenmethode)

Weiterhin kann man auch in verrauschten Zeitreihen – wie sie in der Psychologie typischerweise vorliegen – nichtlineare Strukturen identifizieren.

Viertens und abschließend: die Resultate können statistisch abgesichert werden, was naheliegenderweise eine fundiertere Interpretation erlaubt.

Ein weiterer Vorteil der MSD besteht in der Möglichkeit, zu einer systematischen Methodologie zu gelangen. Die große Potenz dieser Methode liegt also gerade auch darin, daß man immer differenziertere und elaboriertere Nullhypothesen gegen die empirischen Daten testen und so verschiedenste Prozeßmodelle in ihrer Erklärungskraft vergleichen kann. Dies ist in Abb.4 verdeutlicht.

Das Schema in Abb.4 ist wie folgt zu lesen: den Ausgangspunkt der Analyse bildet eine beliebige empirische Zeitreihe, die man auf relevante Muster und Strukturen hin analysieren möchte. In einem ersten Schritt testet man, ob die Zeitreihe stationär ist und differenziert sie falls notwendig. Anschließend wird per MSD die Hypothese überprüft, daß in den Daten keinerlei Struktur enthalten ist, d. h. daß sie die Manifestation eines reinen Zufallsprozesses darstellen. Kann diese Hypothese verworfen werden, folgen die MSD-Linearitätsabklärungen: man untersucht, ob die Daten durch ein lineares Modell hinreichend erklärt werden können. Ist dies nicht der Fall, folgen gezielte nichtlineare Analysen, um der Frage nachzugehen, welcher Art die gefundenen nichtlinearen Strukturen sind. Eine besonders interessante Art nichtlinearer Systeme stellen hierbei die chaotischen dar: deshalb sind in Abb.4 einige Verfahren aufgeführt, die die chaostheoretische Analyse der Zeitreihe ermöglichen. Hier – und nicht als Einzelmethode – hat auch die Dimensionsanalyse ihren Stellenwert in unserem Rationale.

Ausblickend ist zu sagen, daß sich für die nichtlineare Analyse dynamischer psychologischer Systeme zum heutigen Zeitpunkt neben den genannten Möglich-

keiten auch eine Reihe von Problemen bzw. Anforderungen ergeben. So ist es beispielsweise bis anhin nicht möglich, multivariate Analysen durchzuführen. Dies wäre jedoch aus psychologischer Hinsicht unbedingt wünschenswert, da wir häufig darauf angewiesen sind, verschiedene Variablen zu erheben, um ein Konzept oder einen Verlauf adäquat zu operationalisieren (etwa wenn ein Therapieverlauf durch die Beschreibung mehrerer Personen auf mehreren Ebenen abgebildet ist). Hier könnte der neue Ansatz der neuronalen Netze entscheidende Fortschritte bringen, da erste Resultate zeigen, daß mit ihnen nichtlineare und multivariate Zeitreihenanalysen durchgeführt werden können (Kosko 1991).

Schließlich wird es nötig sein, Erfahrungen im Umgang mit empirischen Daten zu gewinnen. Hierfür sei auf den zweiten Teil dieses Aufsatzes verwiesen, der sich mit der nichtlinearen Analyse exemplarischer Systeme aus dem Bereich der Psychologie beschäftigen wird (Tschacher und Scheier, in Vorbereitung).

Literatur

- Ackermann K, Streit U, Ebell H, Zalaman L, Steitz A, Revenstorf D (1992) Using multivariate time series models in systemic analysis. In: Tschacher W, Schiepek G, Brunner EJ (eds) *Self-organization in clinical psychology*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Box GEP, Jenkins GM (1976) *Forecasting and control*. Holden Day, San Francisco
- Buder EH (1991) A nonlinear dynamic model of social interaction. *Commun Res* 18:174–198
- Burlingame GM (1991) *Deterministic chaos in group psychotherapy interaction*. Unveröff Manuskript, Brigham Young University, Provo
- Brunner EJ, Lenz G (1993) Was veranlaßt ein Klientensystem zu sprunghaften Veränderungen? *System Familie* 6: 1–9
- Campbell DT, Stanley IC (1963) *Experimental and quasi-experimental designs for research*. In: Gage NL (ed) *Handbook of research on teaching*. Rand McNally, Chicago
- Casdagli M (1992) Chaos and deterministic versus stochastic nonlinear modelling. *J Royal Statist Soc* 42:36–52
- Ciampi L, Ambühl B, Dünki R (1992) Schizophrenie und chaostheorie. *System Familie* 5: 133–147
- Dahme B (1977) *Zeitreihenanalyse des psychotherapeutischen Prozesses*. In: Petermann F (Hrsg) *Methodische Grundlagen klinischer Psychologie*. Beltz, Weinheim
- Drazin K (1992) *Nonlinear systems*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Elkaim M (1980) Von der Homöostase zu offenen Systemen. In: Duss-v. Werdt I, Welter-Enderlin R (Hrsg) *Der Familienmensch*. Klett-Cotta, Stuttgart, S. 150–155
- Glass GV, Willson VL, Gottmann JM (1975) *Design and analysis of time-series experiments*. Colorado Assc University Press, Boulder
- Grassberger P, Procaccia I (1983) Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D* 9: 189–208
- Hager W (1992) *Jenseits von Experiment und Quasi-Experiment*. Huber, Bern
- Höger R (1992) Chaos-Forschung und ihre Bedeutung für die Psychologie. *Psychologische Rundschau* 43:223–231
- Kosko C (1991) *Signal detection with neural networks*. World Scientific Press, New York
- Koukkou M, Lehmann D, Wackermann J, Dvorak I, Henggeler B (1993) Dimensional complexity of EEG brain mechanism in untreated schizophrenia. *Biol Psychiat* 33:397–404
- Kriz J (1992a) *Chaos und Struktur*. Quintessenz, München
- Kriz J (1992b) *Synergetics in clinical psychology*. In: Tschacher W, Schiepek G, Brunner EJ (eds) *Self-organization in clinical psychology*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Levine RL, Fitzgerald HE (1992) (eds) *Analysis of dynamical psychological systems, Vol I, II*. Plenum Press, New York
- Meier F (Hrsg) (1988) *Prozeßforschung in den Sozialwissenschaften*. Fischer, Stuttgart
- Minuchin S (1974) *Families and family therapy*. Cambridge: Harvard University Press

- Osborne AR, Provenzale A (1989) Finite correlation dimension for stochastic systems with power-law spectra. *Physica D* 35:357–381
- Petermann F (1978) *Veränderungsmessung*. Kohlhammer, Stuttgart
- Priestley MB (1990) *Nonlinear and non-stationary time series*. Academic Press, New York
- Redington DJ, Reidbord SP (1992) Chaotic dynamics in autonomic nervous system activity of a patient during a psychotherapy session. *Biol Psychiat* 31:993–1008
- Ruelle D (1992) *Zufall und Chaos*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Schmitz B (1987) *Einzelfallforschung in der Psychologie*. Beltz, Weinheim
- Schmitz B (1989) *Zeitreihenanalyse in der Psychologie*. Huber, Bern
- Smith RL (1988) Estimating dimension in noisy chaotic time series. *J Royal Statist Soc B* 54:329–351
- Steitz A, Tschacher W, Ackermann K, Revenstorf D (1992) Applicability of dimension analysis to data in psychology. In: Tschacher W, Schiepek G, Brunner EJ (eds) *Self-organization in clinical psychology*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Sugihara G, May R (1990) Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature* 344:734–741
- Theiler J (1990) Estimating fractal dimension. *J Opt Soc Am* 7:1055–1073
- Theiler J, Galdrikian B, Longtin A, Eubank S, Farmer JD (1992) Using surrogate data to detect nonlinearity in time series. In: Casdagli M, Eubank S (eds) *Nonlinear modeling and forecasting*. Addison-Wesley, Redwood City
- Tschacher W (1990) *Interaktion in selbstorganisierten Systemen*. Asanger, Heidelberg
- Tschacher W, Schiepek G, Brunner EJ (eds) (1992) *Self-organization in clinical psychology*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Tschacher W, Scheier C, Aebi E (im Druck) Nichtlinearität und Chaos in Psychoseverläufen. In: Brenner HD, Böker W (eds) *Auf dem Weg zu einer integrativen Therapie der Schizophrenie*. Huber, Bern
- Tsonis A (1992) *Chaos. From theory to applications*. Plenum Press, New York
- van Geert P (1991) A dynamic systems model of cognitive and language growth. *Psychol Rev* 98:3–53
- Wei WWS (1990) *Time series analysis*. Addison-Wesley, Redwood City

Manuskript eingegangen am 12.11.1993; revidiertes Manuskript eingegangen am 16.2.1994 und zum Druck angenommen am 31.3.94