

Das chaotische Gehirn; Zur Erfassung nichtlinearer Dynamik aus physiologischen Zeitreihen

Thomas Elbert

Brigitte Rockstroh

ZUSAMMENFASSUNG. Die Anwendung von Verfahren aus der nicht-linearen Systemtheorie in Bereichen der Physiologie und Psychophysiologie wird an einigen Beispielen (EEG und MEG bei Schizophrenie, Tinnitus und Epilepsie) demonstriert. Vergleiche mit konventionellen Analysemethoden zeigen, daß diese neuen Betrachtungsweisen Unterschiede zwischen Bedingungen oder Gruppen aufdecken, die bisherigen Verfahren verborgen blieben. Vielleicht kann man diese Parameter künftig quasi als Marker benutzen, um pathologische Prozesse aufzudecken.

SCHLÜSSELWÖRTER: Chaos, fraktale Dimension, Lyapunov-Exponent, EEG, MEG, Schizophrenie, Tinnitus, Epilepsie.

ABSTRACT. In this overview we have examined the emerging science of deterministic chaos (nonlinear systems theory) and its application to selected pathological states.

KEY-WORDS: Chaos, fractal dimension, lyapunov-exponents, EEG, MEG, schizophreia, tinnitus, epilepsia.

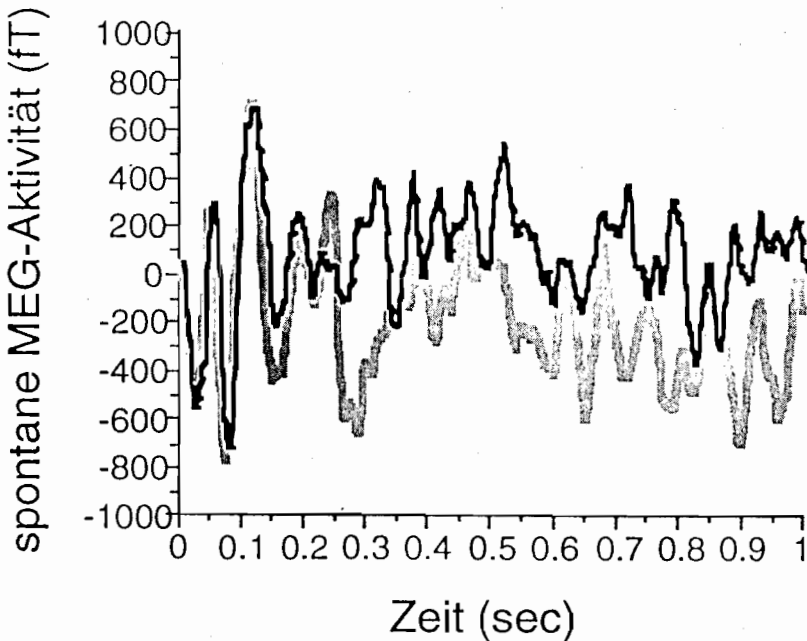
Weil ein Nagel fehlte,
konnte ein Pferd nicht beschlagen werden,
weil ein Pferd nicht beschlagen werden konnte,
ging ein Königreich verloren.

1 EINFÜHRUNG

Schon in alten Gleichnissen haben "Historiker", die sich mit den zeitlichen Abläufen in nicht-linearen Systemen befaßten, zum Ausdruck gebracht, was wir heute als sensitive Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen bezeichnen. Tritt in einem System, das wir beobachten, eine solche sensitive Abhängigkeit auf, so spricht man von "Chaos".

Ein Beispiel für die sensitive Abhängigkeit von Ausgangsbedingungen bei Gehirnaktivität ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

Abbildung 1: Abgebildet sind zwei Zeitabschnitte von jeweils einer Sekunde aus einer magnetoenzephalographischen Ableitung. Die Abschnitte wurden so überlagert, daß sie zunächst eine sehr hohe Kreuzkorrelation aufweisen. Innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde nehmen die beiden Kurven völlig unterschiedliche Verläufe ein. Obwohl beide Kurven Aktivität desselben Systems abbilden, und obwohl beide Kurven in ihren Ausgangsbedingungen weitgehend übereinstimmen, entwickeln sich offensichtlich völlig unterschiedliche Zustände. Ein solches Verhalten wird in der Betrachtung nicht-linearer, deterministischer Systeme als "Chaos" beschrieben.



Zwei wesentliche Merkmale chaotischer Systeme lassen sich an diesem Beispiel veranschaulichen, zum einen die extreme Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung von den Ausgangsbedingungen und zum anderen die Unvorhersagbarkeit der zeitlichen Entwicklungen.

Ziel dieses Artikels ist eine beispielhafte Einführung in nicht-lineare Eigenschaften gehirnelektrischer Aktivität. Dabei sind zunächst einige Grundlagen und zentrale Begriffe der Chaostheorie vorzustellen, bevor anschließend Beispiele für deren Anwendung auf die Analyse *dynamischer* Aspekte gehirnelektrischer Aktivität diskutiert werden.

2 GRUNDLAGEN

Die nicht-lineare Systemtheorie hat seit Beginn der 80er Jahre einen zunehmenden Einfluß auf die Wissenschaftsbereiche gewonnen, die sich mit Veränderungsprozessen, also mit *Dynamik*, befassen. Eine der Wurzeln war die revolutionäre Entdeckung von E. Lorenz (1963), daß *kleine Ursachen große Wirkungen* haben können¹. Ein Verhalten, das diesem Charakteristikum gehorcht, wird *deterministisches Chaos* genannt. Es ist irregulär und mutet auf den ersten Blick fast wie ein stochastischer Prozeß an, obgleich es im einfachsten Fall aus einem dynamischen System von nur drei Differentialgleichungen entspringt.

In den letzten Jahren wurde das Instrumentarium zur Analyse der Dynamik deterministischer Systeme rasch erweitert. Mit der *fraktalen Dimension* rekonstruierter Attraktoren liegt eine Größe vor, die dem Komplexitätsgrad einer Dynamik Rechnung trägt und die die Anzahl der beteiligten Moden benennt. Betrachtet man z. B. das schwingende Pendel einer Wanduhr, so läßt sich die Dynamik etwa durch die zeitliche Darstellung des Ortes - z. B. des Endes des Pendels - beschreiben, im Falle des Pendels eine einfache Sinusschwingung. Die Dynamik des Systems kann somit in Form einer Zeitreihe dargestellt werden. Andererseits sind auch die beiden Variablen des Systems bekannt, nämlich Ort und Geschwindigkeit. Diese sogenannten Systemvariablen spannen den *Phasenraum* auf. In diesem Phasenraum bewegt sich das Pendel auf bestimmten Trajektorien, im Beispiel auf einer Ellipse. Wird das Pendel aus seiner regelmäßigen Schwingung herausgebracht, so kehrt es nach einiger Zeit zu dieser Ellipse zurück; es wird quasi von ihr "angezogen". Jede solche stabile Lösung der Systemgleichungen wird

¹Die Arbeiten *Poincarés* von 1889 waren zu dieser Zeit noch in ihrem hundertjährigen Schlaf versunken.

als *Attraktor* des Systems bezeichnet. Tatsächlich hat das betrachtete Pendel noch einen zweiten Attraktor: Wird nämlich das Pendel nur wenig ausgelenkt, kommt es schnell zum Stillstand in einem Punkt, einem *Fixpunktattraktor* im Ursprung des Phasenraums. Werden noch zusätzliche Treiber eingeführt, bekommt das System weitere Attraktoren, deren Konfiguration von Art und Stärke der externen Treiber abhängt. Attraktoren beschreiben somit mögliche Dynamiken eines gegebenen Systems; die Attraktordimension sagt etwas darüber aus, wieviele Variablen zur Beschreibung der damit verbundenen Systemdynamik notwendig sind.

Doch ist die Kenntnis der Systemvariablen nicht notwendig, um die Attraktoren zu rekonstruieren. Auf der Grundlage einer Zeitreihe (im Beispiel des Pendels die des Ortes oder die der Geschwindigkeit) betrachtet man den Raum, der von den beiden Achsen $x(t)$ und $x(t+\text{einen Moment später})$ aufgespannt wird. Um bei unbekannter Systemdynamik die Anzahl der Achsen des Phasenraumes zu ermitteln, bedient man sich des folgenden Verfahrens: Man beginnt zunächst mit einem eindimensionalen Raum, d. h. mit einer Achse $x(t)$ und erweitert den Raum schrittweise auf zwei - d. h. $x(t)$, $x(t+\Delta t)$ -, drei - $x(t)$, $x(t+\Delta t)$, $x(t+2\Delta t)$ - und vier Dimensionen usw. Jedesmal wird die Dimension des in diesem Raum konstruierten Attraktors gemessen. Steigt diese mit zunehmender *Einbettungsdimension* nicht weiter an, entspricht dies der zur Beschreibung des Systems notwendigen Anzahl der Achsen oder dessen Freiheitsgraden. Im Falle eines Rauschen erhielte man dabei keine Sättigung.

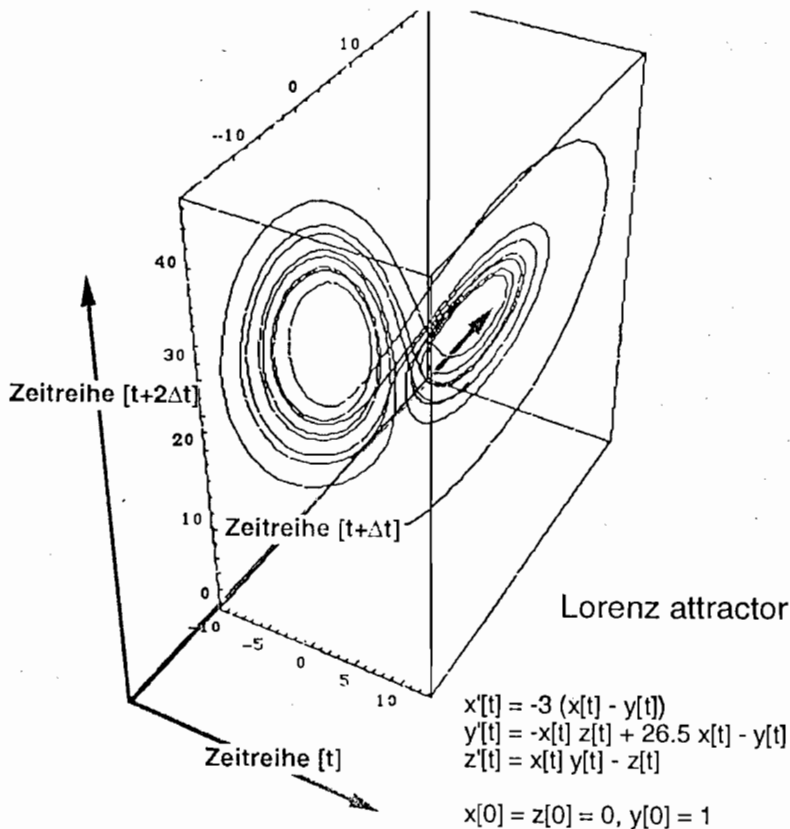
Eines der wichtigsten quantitativen Maße komplexer Dynamik ist das der *fraktalen Dimension*. Der Begriff "Dimension" bezieht sich dabei auf die Anzahl verschiedener Richtungen oder Größen, die zur Beschreibung eines Raumes notwendig sind (Eine Linie hat die Dimension '1', eine Fläche die Dimension '2'). Auch bei vielen dicht nebeneinander liegenden Linien könnte jeder Ort immer noch durch nur eine einzige Zahl gekennzeichnet werden, hätte dieses Gebilde aus nebeneinander liegenden Linien die Dimension 1. Um dagegen die Dimension eines Gebildes aus unendlich vielen beliebig dicht nebeneinander liegenden Linien bestimmen zu können, bedarf es eines mathematischen Tricks (Grassberger-Procaccia-Verfahren). Man setzt sich quasi auf einen Punkt des Gebildes und zählt ab, wieviele Punkte in der Nachbarschaft zu finden sind, wenn zunehmend größere Kreise um den Ausgangspunkt herum geschlagen werden. Bei einer Linie wächst die Anzahl der Punkte linear mit dem Radius, also proportional mit r^1 , bei einer

Fläche mit r^2 . Der Exponent gibt also die Dimension an. Trägt man die Anzahl der Punkte gegen den Radius in doppeltlogarithmischer Darstellung auf, so ergibt sich der Exponent aus der Steigung (Ist allerdings die Zeitreihe stark verrauscht, so läßt sich eine Lösung erst durch Rauschunterdrückung ermitteln, etwa mittels Singular-Value-Dekomposition oder Autokorrelationstechniken (z. B. Elbert, Lutzenberger, Rockstroh, Berg & Cohen, 1992; Elbert, Ray, Kowalik, Skinner & Birbaumer, im Druck). Nun gibt es aber auch Gebilde, bei denen die Anzahl der Punkte mit $r^{3,2}$ oder $r^{2,01}$ ansteigt, die Dimension mithin gebrochen oder *fraktal* wird. Ein Attraktor mit fraktaler Dimension wird als merkwürdiger oder 'strange attractor' bezeichnet. Interessant ist, daß solche merkwürdigen Attraktoren nur bei chaotischen Prozessen auftreten bzw. daß chaotische Systeme immer Attraktoren fraktaler Dimension aufweisen.

Ein Beispiel eines merkwürdigen Attraktors ist der in Abbildung 2 dargestellte Lorenz-Attraktor. An langfristigen Vorhersagen des Wetters interessiert, entwickelte Lorenz einen Satz von drei Differentialgleichungen, die konvektive Vorgänge in der Atmosphäre modellieren. Abbildung 2 betrachtet nicht die Zeitreihe selbst, sondern wieder den Phasenraum der Zustandsvariablen, in dem die Dynamik quasi "eingefroren" ist. Die Trajektorie kreist zwischen zwei Spiralen, ohne dabei jemals auf den gleichen Punkt zurückzukehren. Die Spiralbahn hat eine begrenzte Dicke, innerhalb derer eine unendliche Anzahl von dicht nebeneinander liegenden Bahnen sich niemals überschneiden. Eine solche fraktale Struktur charakterisiert "merkwürdige" (strange) Attraktoren. Verfolgt man zwei beliebig dicht beieinander liegende Trajektorien in ihrem Zeitverlauf, so können diese in zwei völlig unterschiedliche Gebiete des Phasenraumes wandern - es können sich also völlig unterschiedliche Systemzustände entwickeln. Dies bedeutet Unvorhersagbarkeit des Systems über die Zeit, da die Ausgangsbahn nie genau bestimmt werden kann.

Die Bestimmung von Dimensionalität und Attraktoren setzt theoretisch lange Untersuchungsintervalle voraus. Unter empirischen Bedingungen steht dem die mangelnde Stationarität bei biologischen Systemen entgegen. Von der direkten Interpretation des absoluten Dimensionswertes ist daher Abstand zu nehmen. Stattdessen wird von einer *dimensionalen Komplexität* gesprochen, die zwar keine absolute, wohl aber eine komparative Auswertung im Sinne eines Vergleichs zwischen Bedingungen oder Probandengruppen zuläßt. Zur Charakterisierung der Systemdynamik neuronaler Aktivitäten sind ferner Maße wie etwa der

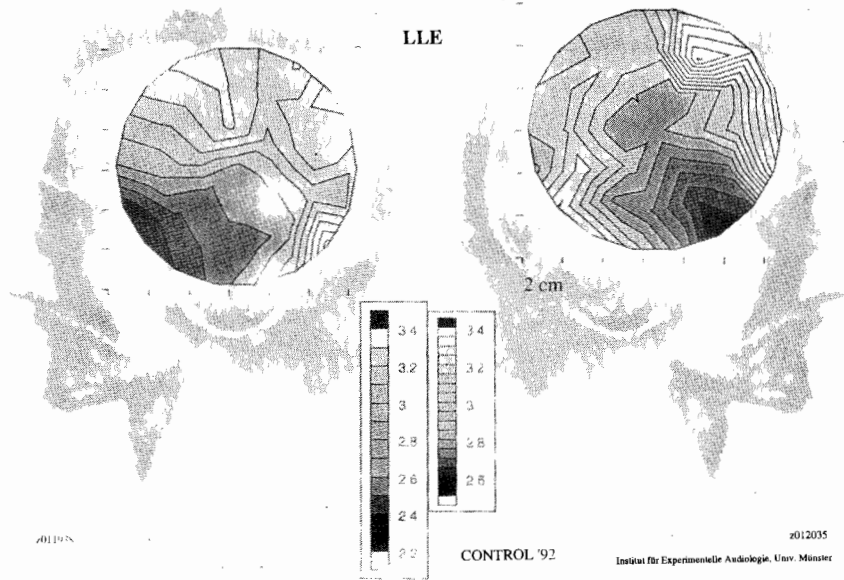
Abbildung 2: Im Fall des Lorenz-Attraktors kennen wir die Systemgleichungen und können so den Attraktor, wie abgebildet, berechnen. Verfügt man nicht über ein Modell des Systems, sondern nur über bestimmte Zeitreihen - wie bei der Aktivität des Gehirns, so konstruiert man einen topologisch äquivalenten Raum, indem man auf der x -Achse die Zeitreihe aufträgt, auf der y -Achse dieselbe Zeitreihe mit einer kleinen Zeitverzögerung, auf der z -Achse die Zeitreihe nochmals um ein kleines Intervall verzögert, usw. Tatsächlich gestattet diese Zeitverzögerungstechnik die Rekonstruktion eines mehrdimensionalen Phasenraums samt Attraktor (Takens, 1980)¹



¹Eine andere Technik bestimmt die Achsen des Phasenraums über die Hauptkomponenten der Autokorrelationsfunktion. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß man leicht Hauptkomponenten mit kleinem Eigenwert und damit Rauschanteile unberücksichtigt lassen kann (Elbert et al., 1992).

größte Lyapunov-Exponent (largest Lyapunov exponent, LLE) aussagekräftig, ein mathematisches Maß für die Geschwindigkeit der Divergenz oder Separation zweier Kurvenzüge. Ein solches Maß kann für jede Raumrichtung bestimmt werden. Eine typische Kartierung des größten Lyapunov-Exponenten an der Schädeloberfläche gibt Abbildung 3 wieder. Diese Kartierung zeigt deutlich, daß unterschiedliche LLE und damit unterschiedliche Dynamiken zu einem gegebenen Zeitpunkt in den verschiedenen Gehirnregionen möglich sind (Detailliertere Einführungen in die hier skizzierten Grundlagen finden sich bei Elbert et al., im Druck).

Abbildung 3: Beispiel für die Kartierung des größten Lyapunovexponenten (LLE), gewonnen aus dem Magnetoenzephalogramm (MEG). (Aus Kowalik et al., im Druck)



Für Psychologen und Hirnforscher stellt sich nun die Frage, ob die neuronaler Massenaktivität zugrundeliegende Dynamik mit deterministisch chaotischen Analysen beschreibbar ist. Deterministisches Chaos kann nur in nicht-linearen Systemen auftreten, die wenigstens drei Frei-

heitsgrade aufweisen. Neben theoretischen Überlegungen (Neuronen sind ausgeprägte nicht-lineare Elemente) sprechen eine Reihe beobachtbarer Eigenschaften dafür, daß das EEG und MEG durch nichtlineare Systemdynamik hervorgerufen werden (Jansen, 1990): (1) Nicht-lineare Systeme sind zunächst durch ein amplitudenabhängiges Frequenzverhalten gekennzeichnet, ein Phänomen, das vom EEG mit seinen hohen langsamen und niederamplitudigen schnelleren Wellen wohl bekannt ist. (2) Periodische Schwingungen (limit-cycle), die auftreten können, wenn Eingänge in ein nicht-lineares System abgeschaltet werden, lassen sofort an Alpha-Wellen denken. (3) Nichtlineare Systeme können intermittierend plötzliche Ausbrüche (Bursts) hervorrufen. Es ist denkbar, daß sich ein solches Phänomen in K-Komplexen oder auch in paroxysmalen "Spike-and-Wave"-Komplexen abbildet. (4) Erfolgt bei einem nicht-linearen System eine periodische Stimulation, so wird nicht nur die Anregungsfrequenz (wie im linearen Fall) evoziert, sondern auch harmonische Kombinationsfrequenzen und subharmonische Frequenzen (bei Periodenverdopplung), und es zeigt sich ein besonderes Verhalten um die Resonanzfrequenz¹. Auch vom EEG ist ein solches Verhalten als Photo-Driving für das visuelle System und möglicherweise als 40-Hz-Steady-State-Response für das akustische System bekannt. (5) Schließlich lassen sich in EEG und MEG Sprungphänomene beobachten, die im Sprachgebrauch der nicht-linearen Systemtheorie als Hysterese bezeichnet werden (Beispiele finden sich in den Arbeiten von Kelso et al., 1991).

Könnte also der Einsatz von Verfahren aus der nicht-linearen Systemtheorie lohnend sein? Dabei geht es weniger um die metaphysische Betrachtung², ob das menschliche Gehirn nun chaotisch organisiert ist oder nicht², sondern eher um die pragmatische Frage, ob Verfahren, die mit deterministischem Chaos assoziiert werden, die Dynamik z. B. von EEG und MEG besser, systematischer oder informativer erfassen können als konventionelle Methoden. Auch wenn ein Signal komplex

¹In einer Studie gemeinsam mit K. E. Graf wurde direkt vor den geschlossenen Augen eine starke Lichtquelle installiert, die für die Dauer von jeweils 4 Sekunden Lichtblitze aussendet. Begonnen wurde mit einer Stimulationsfrequenz von 5 Hz, die dann in 1-Hz-Schritten bis zu einer Frequenz von 18 Hz gesteigert wurde. Während sieben untersuchte Personen unter diesen Bedingungen der Photostimulation eine Dimensionskonstanz in ihrem EEG aufwiesen, zeigten fünf Probanden systematische Veränderungen, drei davon einen signifikanten Abfall in der dimensional Komplexität, der zwischen 1.8 und 2.0 lag.

²Unvorhersagbar erscheint es uns auf jeden Fall.

aussieht, kann es durchaus durch ein einfaches *nicht-lineares* System hervorgerufen sein

3 EMPIRISCHE BEFUNDE

Im folgenden werden exemplarisch einige der untersuchten Maße und einige experimentelle Ergebnisse vorgestellt. In allen Untersuchungen wurden anhand der Ergebnisse die Verfahren aus der nicht-linearen Systemtheorie mit *konventionellen Analysen* verglichen.

3.1 Schizophrenien¹

Bei 12 Patienten mit einer chronisch schizophrenen Störung (DSM-III-R) und 12 nach Alter, Geschlecht und Bildungsstand parallelisierten gesunden Vergleichspersonen wurde das EEG in Ruhe über circa 5 Minuten abgeleitet. Die EEG-Aufzeichnung entlang der Mittellinie (Fz, Cz, Pz) erfolgte jeweils zur Hälfte der Zeitstrecke mit offenen und geschlossenen Augen. Bereits früher wurden von uns Ergebnisse für die konventionellen Maße der Frequenzspektrenanalyse und zwei von Hjorth (1986) vorgeschlagene Maße zur Deskription des EEGs mit den nicht-linearen Maßen der Dimensionalität (mittlerer Wert aus 4 Segmenten von jeweils 25 Sekunden) verglichen (Elbert et al., 1992). Zusätzlich wurde im selben Datensatz (Kowalik, Elbert & Hoke, im Druck) der Lyapunov-Exponent in seinem Verlauf über die gesamte Zeitstrecke hinweg untersucht.

Während die Ergebnisse der Frequenzspektrenanalyse bisherige Befunde tendenziell vermehrter langsamer Wellen über frontalen Arealen bestätigten, erbrachten die nicht-linearen Maße neue Informationen: Im Vergleich zu Kontrollpersonen, die ein centrales Maximum der dimensional Komplexität aufwiesen, zeigten schizophrene Patienten im Frontalbereich eine höhere dimensionale Komplexität. Dagegen ergab der Vergleich mit dem deskriptiven Maß der Hjorth-Komplexität frontal niedrige Werte bei den Patienten. Dies würde bedeuten, daß das EEG zwar "einfacher aussieht", die zugrundeliegenden neuronalen Dynamiken aber dennoch stärker *entkoppelt* zu sein scheinen.

Zwei Drittel aller Werte *chronisch* schizophrener Patienten lagen außerhalb des Bereichs der Werte für Kontrollpersonen. Koukkou, Lehmann,

¹siehe auch Elbert et al., 1992.

Wackermann, Dvorak und Henggeler (1992) konnten mit der Bestimmung der dimensional Komplexität 80% *akut* Schizophrener richtig klassifizieren, wobei ihre Berechnungen auf temporo-parietalen Ableitungen basierten. Diese Ergebnisse sind um so erstaunlicher, als sich *prima vista* das EEG eines Schizophrenen nicht unbedingt von demjenigen einer Kontrollperson unterscheiden läßt.

Eine gruppenspezifische Verteilung nicht-linearer Maße findet sich auch für den größten Lyapunov-Exponenten. Darüber hinaus unterscheidet dessen Streuung die Gruppen (Kowalik et al., im Druck), wenn das EEG bei offenen Augen abgeleitet wird. Patienten wiesen hier vor allem über centro-parietalen Arealen eine größere Variabilität des LLE im Verlauf der Zeit auf als Kontrollpersonen. Man könnte spekulieren, daß diese größeren Veränderungen in den Dynamiken neuronaler Massenaktivitäten stärkere Schwankungen der Aufmerksamkeit oder inkohärente Denkprozesse reflektieren.

3.2 Tinnitus¹

An einem anderen Anwendungsbeispiel - der Untersuchung von Patienten mit Tinnitus - soll eine Methode vorgestellt werden, mit der die Komplexität des zeitlichen Verlaufs bestimmt werden kann. Diese wird mit Ergebnissen aus der Analyse der Dynamik verglichen. Bestimmt wurde die graphische Dimension auf zwei verschiedene Arten, wie in Abbildung 4 erläutert ist.

Dabei werden die Werte so normiert, daß man für eine Gerade die Dimension 1 erhält, während ein Kurvenverlauf, der alle Flächenelemente (boxes) besucht, die Dimension 2 erhält.

Dieses Verfahren wurde auf das MEG von 11 Personen mit subjektivem Tinnitus und 9 Kontrollpersonen angewandt. Das MEG wurde unter Ruhebedingungen erhoben.

Personen mit Tinnitus weisen im Vergleich zu Kontrollpersonen geringere Werte der graphischen Dimension auf. Dies bedeutet, daß der Kurvenverlauf bei diesen Personen einfacher aussieht. Dagegen liegen die LLE-Werte - wie von Kowalik et al. (in Druck) berichtet - bei den Personen mit Tinnitus überzufällig über denjenigen der Kontrollpersonen. Erhöhte Lyapunov-Exponenten kennzeichnen eine kürzere Vorhersagbarkeit und damit mehr Komplexität oder Chaos. Im Fall des Tinnitus

¹Tinnitus bezeichnet neurootologisch die Empfindung von Tönen oder Geräuschen in einem oder beiden Ohren. Dabei handelt es sich um ein Symptom unterschiedlichsten pa-

erweist sich die LLE-"Landschaft" zudem als zwischen den Hemisphären ausgeglichener.

Abbildung 4: Bestimmung der graphischen Dimension mittels der Methode des 'box counting': Die normierte Kurve wird auf kariertes Papier aufgetragen und die Zahl der besuchten Flächenelemente abgezählt.

Die graphische Dimension kann auch aus der Steigung der Autokorrelationsfunktion geschätzt werden, wenn man die Zeitverzögerung gegen Null gehen läßt:

$$\text{graphische Dimension} = 2 - \frac{\log \frac{C(1) - C(3)}{C(1) - C(2)}}{2 \log 2}$$

$C(i)$ bezeichnet die Autokorrelation mit Zeitverzögerung i .

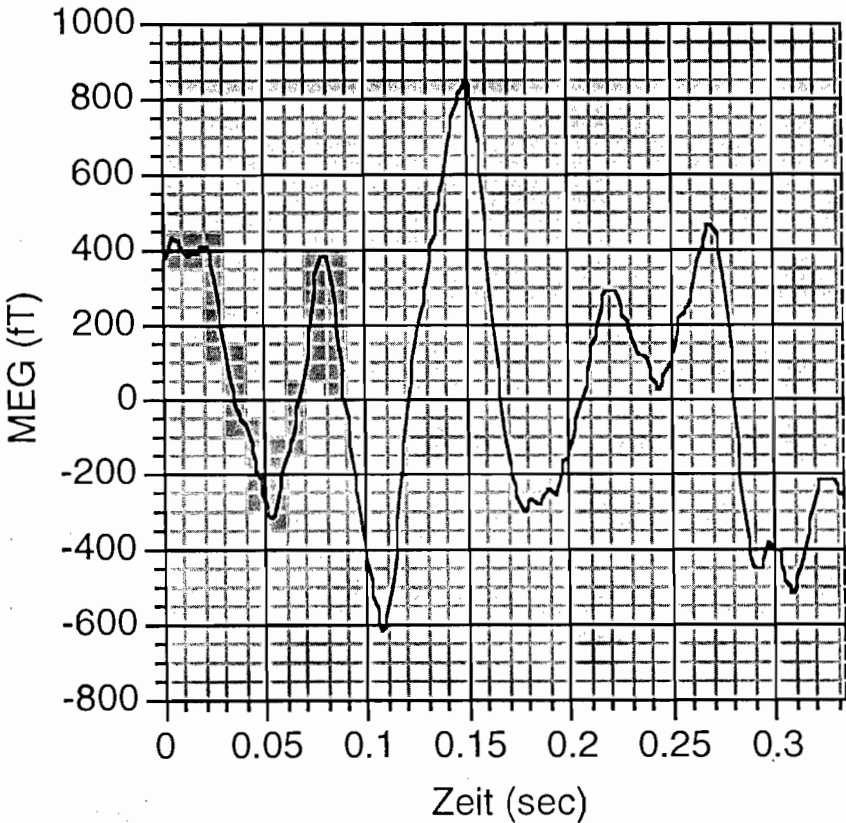
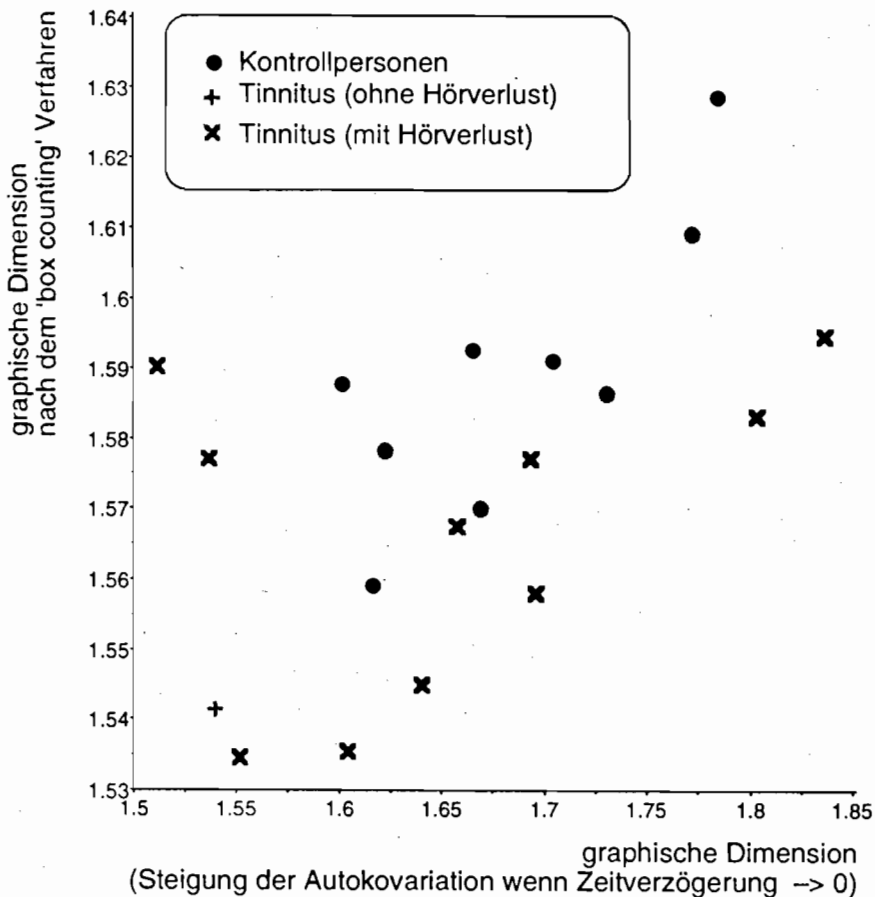


Abbildung 5: Streudiagramm für die Werte aus den beiden Verfahren zur Bestimmung der graphischen Dimension (Daten aus der Diplomarbeit von W. Mühlnickl, Münster 1993).



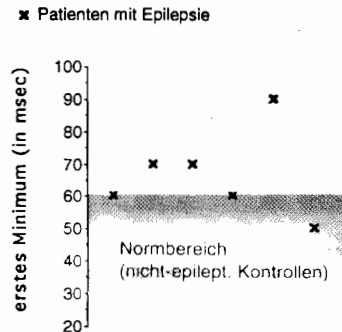
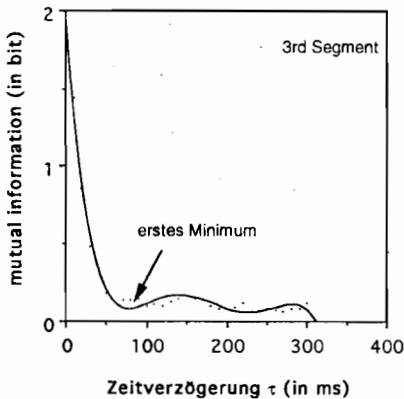
Bei beiden bisher genannten Beispielen - Schizophrenie und Tinnitus - läßt sich also ein ähnliches Phänomen beobachten. Obwohl die Kurvenverläufe einfacher aussehen, erweist sich die Dynamik, die diesen Kurvenverläufen zugrunde liegt, als höher dimensional und in diesem Sinne als komplexer.

3.3 Epilepsie

Dies gilt aber nicht für alle pathologischen Prozesse. Etwa findet man bei Epilepsien längere Vorhersagewerte. Dies läßt sich nicht nur über den LLE nachweisen (siehe z. B. Iasemidis, Sackellares, Zaveri & Williams, 1990; Iasemidis & Sackellares, 1991), sondern auch über die *Mutual Information Function*. Die Berechnung dieser Funktion ergibt die Anzahl Bit an Information, die nach einem Intervall Δt noch vorhergesagt werden kann, vorausgesetzt man kennt den bisherigen Verlauf der Funktion.

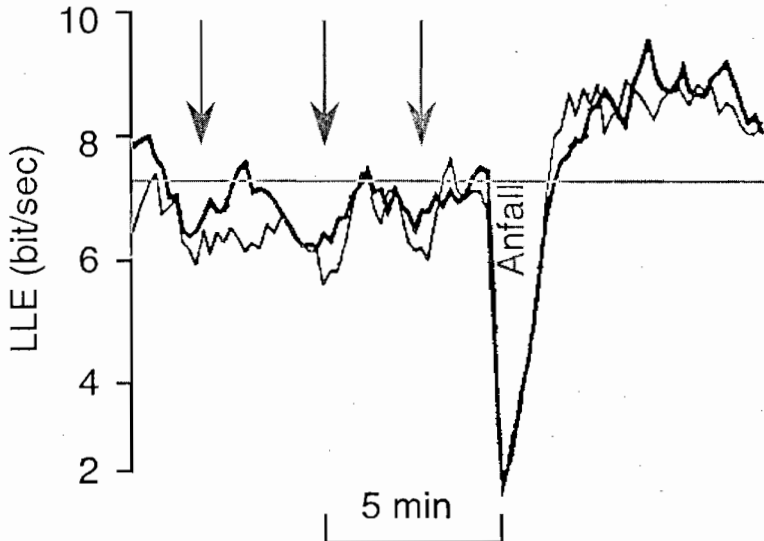
Abbildung 6 zeigt längere Werte für das erste Minimum der 'mutual information' Funktion bereits für interiktuale Aktivität bei den sechs untersuchten epileptischen Patienten. Dieser längeren Vorhersagbarkeit entspricht auch die Tendenz zu kleineren LLEs. Dramatisch wird die Veränderung des LLE allerdings während des Anfalls. Betrachtet man

Abbildung 6: Das Konzept der 'mutual information' nach Fraser & Swinney (1986; Fraser, 1986) entwickelte sich aus dem Versuch, folgende Frage zu beantworten: Gegeben sei der Meßwert einer Funktion $f(t)$ zur Zeit t . Wieviele Bits von $f(t+\Delta t)$ können dann im Mittel vorhergesagt werden? $f(t)$ und $f(t+\Delta t)$, die Achsen des Phasenraums, sind für denjenigen Wert Δt maximal unabhängig voneinander, für den die gegenseitige Vorhersagbarkeit, d.h. die 'mutual information function', ein Minimum erreicht (Die Berechnung der 'mutual information' stützt sich im wesentlichen auf die Entropie.)



Vorhersagbarkeit gemäß dem Minimum der 'mutual information function'

Abbildung 7: Lyapunovprofil des Electrocorticogrammes für zwei verschiedene Elektrodenorte. Während des Anfalls zeigt sich eine deutliche Reduktion des LLE. Aber bereits Minuten vor dem Anfall ergeben sich Einbrüche des LLE (durch Pfeile gekennzeichnet), vor allem von Elektrodenorten über dem epileptischen Herd (Daten aus Iasemidis & Sackellar, 1991).



den Zeitverlauf genauer, dann scheint der LLE (nach Iasemidis et al., 1990, 1991) den epileptischen Anfall bereits Minuten vorher anzukündigen (Abb. 7).

Demnach könnten solche Methoden erlauben, auslösende epileptogene Zonen zu identifizieren. Bei generalisierten Epilepsien könnten sie vielleicht auch dazu dienen, dem Patienten in gewissem Maße die Vorhersage eines Anfalls zu ermöglichen, um dann mittels klinisch-psychologischer Verfahren eine Anfallskontrolle zu erreichen (Rockstroh & Elbert, 1989).

Die Ergebnisse für iktuale und anfallsantezedente Aktivität lassen sich dahingehend interpretieren, daß Übererregung quasiperiodische Oszillationen begünstigt. Ganz anders scheinen die Dynamiken bei Tinnitus verändert. Die erhöhten LLE-Werte und die komplexere Kartierung bedeuten, daß die Vorhersagbarkeit der Abläufe prinzipiell reduziert ist. Tinnitus läge demnach nicht wie bei Epilepsien eine lokale Übererregung zugrunde, sondern eher eine beeinträchtigte Fähigkeit lokaler sowie interhemisphärischer Selbstregulation.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Anwendung von Verfahren aus der nicht-linearen Systemtheorie in Bereichen der Neurowissenschaften und der Pathophysiologie könnte aus zwei Gründen lohnend werden:

1) Der erste Grund ist ein pragmatischer. Er ergibt sich aus dem Vergleich der verschiedenen Analysemethoden: Die neuen Verfahren vermögen Unterschiede zwischen Bedingungen oder Gruppen aufzudecken, die bisherigen Verfahren, die die Zeitreihe statisch charakterisierten, verborgen bleiben mußten. Vielleicht lassen sich dynamische Parameter quasi als "Marker" nutzen, um pathologische Prozesse zu identifizieren.

2) Der zweite Grund ist theoretischer Natur. Die theoretischen Grundlagen, auf denen die Analysemethoden basieren, können hilfreich sein, die interessierenden Systeme besser zu verstehen. Bereits jetzt sind wir zu der Erkenntnis gelangt, daß das Verhalten komplexer Systeme - auch wenn es uns chaotisch, stochastisch und völlig irregulär erscheint - nicht unbedingt durch ein sehr komplexes Modell beschrieben werden muß, oder daß es gar nicht-deterministischer Natur sein müßte. Andererseits haben wir gelernt, daß deterministische Systeme keineswegs vorhersagbar sein müssen. Neben den beiden bisher bekannten Einschränkungen, 'Rauschen' und Quantenmechanik, haben wir uns hier mit einer dritten prinzipiellen Begrenzung der Vorhersagbarkeit abzufinden - Dem Schöpfer sei Dank! Wie langweilig wäre das Leben, wenn wir mit Supercomputern das Ergebnis schon vorausberechnen könnten?

LITERATUR

Elbert, T., Lutzenberger, W., Rockstroh, B., Berg, P. & Cohen, R. (1992). Physical aspects of the EEG in schizophrenics. *Biological Psychiatry*, 32, 181 - 193.

Elbert, T., Ray, W. J., Kowalik, Z. J. K., Skinner, J. E. & Birbaumer, N. (in Druck). Chaos and Physiology. *Physiological Review*.

Fraser, A. M. (1986). Using mutual information to estimate metric entropy. In Mayer-Kress (Eds.), *Dimension and Entropies in Chaotic Systems* (S. 82 - 91). Berlin: Springer.

Fraser, A. M. & Swinney, H. L. (1986). Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physiology Review*, A 33, 1134 - 1140.

- Hjorth, B. (1986). Physical aspects of EEG data as a basis for topographic mapping. In F. Duffy (Ed.) *Topographic Mapping of Brain Electrical Activity* (S. 175 - 194). Boston: Butterworth.
- Iasemidis, L. D., Sackellares, J., Zaveri, H. & Williams, W. (1990). Phase space topography and the Lyapunov exponent of electrocorticograms in partial seizures. *Brain Topography*, 2, 187 - 201.
- Iasemidis, L. D. & Sackellares, J. C. (1991). The evolution with time of the spatial distribution of the largest Lyapunov exponent on the human epileptic cortex. In D. Duke & W. Pritchard (Eds.), *Measuring Chaos in the Human Brain* (S. 49 - 82). Singapore: World Scientific.
- Jansen, B. H. (1990). On the dimensionality of the human scalp-recorded EEG. *Chaos Newsletter*, 1, 31 - 33.
- Kelso, J. A. S., Bressler, S. L., Buchanan, S., De Guzman, G. C., Ding, M., Fuchs, A. & Holroyd, T. (1991). Cooperative and critical phenomena in the human brain revealed by multiple SQUIDS. In D. Duke & W. Pritchard (Eds.), *Measuring Chaos in the Human Brain* (S. 97 - 112). Singapore: World Scientific.
- Koukkou, M., Lehmann, D., Wackermann, J., Dvorak, I. & Henggeler B. (1992). The dimensional complexity of the EEG in untreated acute schizophrenics, in persons in remission after a first schizophrenic episode, and in controls. *Schizophrenia Research*, 6, 129.
- Kowalik, Z. J., Elbert, T. & Hoke, M. (in Druck). Mapping dynamic brain function: The Largest Lyapunov Exponent derived from multichannel magnetoencephalography.
- Kowalik, Z. J., Rockstroh, B. & Elbert, T. (eingereicht). Brain dynamics in schizophrenia evaluated by the Largest Lyapunov Exponent.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 130 - 141.
- Rockstroh, B. & Elbert, T. (1989). Einsatzmöglichkeiten klinisch-psychologischer Verfahren in der Behandlung von Epilepsien. In W. Fröscher (Eds.), *Aspekte der Epilepsie-Therapie* (S. 11 - 21). Wien: Überreuter.
- Takens, F. (1980). Detecting strange attractors in turbulence. In Y. L. Rand (Ed.), *Lecture notes in mathematics* (S. 366 - 381). Heidelberg: Springer.

Angaben zu den Autoren:

Prof. Dr. Thomas Elbert; Institut für Experimentelle Audiologie, Universität Münster, Kardinal-von-Galen-Ring 10, D-4400 Münster.

Prof. Dr. Brigitte Rockstroh; Fachgruppe Psychologie, Universität Konstanz, Postfach 5560, D-7750 Konstanz.