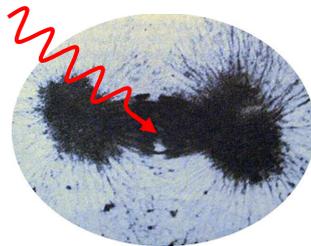


Organismus als Netzwerk

Herbert J. Klima

hv



Schon das Licht eines sehr schwachen Laserstrahls
kann die Zellteilung beeinflussen

in

Ganzheitsmedizin der Zukunft

(Hrsg. A. Stacher, W. Marktl)

Facultas-Verlag

Wien 2002

„Es ist ein Irrtum zu glauben, von Analysen zu Synthesen vordringen zu können. Analysen, und wenn sie noch so sauber und gründlich angestellt werden, ergeben immer nur Summen, niemals aber Synthesen.

Eine Synthese ist eine Ganzheit; sie kann niemals durch Summierung von Einzel Tatsachen gewonnen werden, sondern nur durch Setzung einer Idee. Ideen kommen aber von „oben“, nicht durch Maulwurfsarbeit von „unten“.

Jede Idee nimmt teil am Schöpferischen, am Göttlichen, falls sie aufbauend und nicht destruktiv ist. Sie ist – vom Einfall des Wissenschaftlers und Künstlers an bis zu den weltumfassenden Konzeptionen ein sich immer wieder erneuerndes Wunder und – Geheimnis“

*Hans Kaiser
Lehrbuch der Harmonik*

Inhalt

1. Einleitende Gedanken	3
Die Teile und das Ganze	3
Der evolutionäre EJASE-Wissenschaftsbegriff	6
Programmatisches zur Biophysik	9
2. Prinzipien der Physik und Chemie und ihre Bedeutung für die Biophysik	10
Prinzipien der Elektrodynamik	10
Prinzipien der Thermodynamik	14
3. Prinzipien der Biologie und ihre Bedeutung für die Biophysik	24
Statements einiger Biologen	24
Chemische Evolution, Mutation-Selektion, Autokatalyse, Hyperzyklen	25
Autopoiese und biologische Evolution	30
Phänotypen, Genotypen und Fraktale	32
Mögliche Prinzipien der Biologie	34
4. Prinzipien nichtlinearer dynamischer Systeme und ihre Bedeutung für die Biophysik	36
Evolutionsgleichungen am Beispiel der Lorenz-Gleichung	36
Folgerungen und Attraktoren	37
Trajektorien, Fixpunkte, Grenzzyklen	40
Deterministische Chaos, Butterfly-Effekt und Fraktale	44
Chaotische Attraktoren und ihre invarianten Merkmale	46
Rekonstruktion der Systemdynamik aus gemessenen Zeitreihen	52
Bestimmung des größten Lyapunov-Exponenten aus Zeitreihen	55
Recurrence Plots von Zeitreihen	57
Zusammenfassung	60
5. Anwendung systemorientierter biophysikalischer Methoden in der Ganzheitsmedizin	63
Photoplethysmographie	63
Anwendung in der Akupunktur	64
Anwendung in der Bioresonanzforschung	66
Anwendungen in der medizinischen Lasertherapie	75
Nichtlineare Modellierung am Beispiel der biologischen Laserwirkung	79
6. Epilog	82
7. Ergänzende Literatur im Umfeld der Biophysik	85
8. Anhang	88
A: Disziplinen im Umfeld der Biophysik	90
B: Lehr- und Forschungsziele für eine „Systemorientierte Biophysik“	91
C: Josef Bahn, einem Pionier der Lasertherapie, zum Gedenken	92

1. Einleitende Gedanken

Die Teile und das Ganze

Ich danke dem Präsidenten und dem Vorsitzenden dafür, dass sie mich eingeladen haben, am Kongress „Ganzheitsmedizin in der Zukunft“ teilzunehmen. In diesem Sinne habe ich auch meinen Beitrag vorgesehen und versuche darzustellen, was Biophysik und Systemtheorie zu einer ganzheitlichen Betrachtung des Organismus als offenes, elektromagnetisches und vernetztes System beitragen können.

Ich trage ein Weltbild in mir, das es mir erlaubt, auch gegensätzliche Ansätze zu einer Einheit zu ergänzen, ohne dass die beiden Positionen aufgegeben werden müssen. Tiefgründiges dazu ist schon von Laotse gesagt worden, auf dessen erhabene Gedanken ich aufmerksam wurde, als ich in einer Literaturgeschichte las: „Wenn alle Bücher dieser Welt vernichtet würden und man den Wunsch äußern könnte, drei davon zu bewahren, dann müsste eines das Taoteking¹ sein“. Wesentliches darüber vermittelte mir auch Herbert Pietschmann, den ich zu meinen physikalischen und philosophischen Lehrern zähle. Andererseits schätze ich die unerreichte psychologische Erkenntnis des Buddhismus, die mir durch den großen deutschen Philosophen Arthur Schopenhauer² nahegelegt wurde. Durch die Grundhaltung dieser beiden Strömungen erachte ich es immer für möglich, komplementäre Ansichten als Einheit zu sehen.

In unserer Gesellschaft haben sich zum Thema Medizin allmählich zwei verschiedene Positionen herausgebildet, wonach wir einerseits von einer eher analytisch orientierten Universitätsmedizin und andererseits von einer eher synthetisch orientierten Komplementärmedizin sprechen. Bei letzterer handelt es sich meist um Methoden, die den Organismus als ganzheitlich-reagierendes, vernetztes System betrachten, die durch schwache Reize holistische Reaktionen hervorrufen können und die neben der Reproduzierbarkeit häufig auch die Einmaligkeit dieser Reaktionen zulassen. Stellvertretend für derartige Methoden sei die mir sehr am Herzen liegende Lasertherapie angeführt, die ergänzend zu traditionellen haptischen Pharmazeutika moderne optische Medikamente in Form von Sonnenlicht und Laserlicht zur Unterstützung von Heilungsprozessen verabreicht.

¹ Laotse: Taoteking; Drei Eichen Verlag, Engelberg 1970

² A. Schopenhauer: Welt als Wille und Vorstellung; Diogenes Verlag, Zürich 1977

Ganzheitsmedizin als Symbiose aus der eher analytisch orientierten Universitätsmedizin und der eher synthetisch orientierten Komplementärmedizin zu betrachten, ist ein berechtigter Wunsch in der Wiener Internationalen Akademie für Ganzheitsmedizin. Diesem Wunsch wird jedoch in unserer Gesellschaft leider nicht immer entsprochen, wenn über die Bedeutung und Vorstellung des Begriffes „Ganzheitsmedizin“ diskutiert wird.

Herbert Pietschmann hat in eindrucksvollen Weise eine Einführung in die Methode der Dialektik gegeben: von Sokrates bis Galilei, wobei auch der große barocke Philosoph Leibniz erwähnt wurde, der in der Tradition Laotses steht – man denke nur an seine Kreation der binären Zahlen, ohne die unsere heutige Informationsgesellschaft undenkbar ist. Für die Ganzheitsmedizin aber hat meiner Meinung nach gerade Leibniz eine besondere Bedeutung, nicht nur, weil er mit seinem philosophischen Werk „Monadologie“³ auch physiologische Prozesse vor Augen hatte, sondern vor allem wegen seines bis in die Gegenwart reichenden Anspruches, die wahren Einheiten und unteilbaren Ganzheiten, die sogenannten Monaden, von den bloß materialen, teilbaren Körpern zu unterscheiden. Leibniz war ein großer Symbiotiker, der das Andere, das Fremde zulassen konnte. Er kannte den Gegensatz zwischen der platonischen Position vom ewigen Sein der Ideen und der aristotelischen Haltung vom permanenten Werden der Materie, insbesondere der lebendigen Materie, sehr wohl. Augustinus, den Platoniker, und Thomas von Aquin, den Aristoteliker, studierte er intensiv, um hinter das wahre Wesen der unteilbaren Substanzen und der teilbaren Materie hinter den Körpern zu gelangen.

Durch sein Vertrauen in die Vernunft und dank seiner synthetischen Kraft gelang es Leibniz schließlich, in Ergänzung zu den teilbaren, stets vergänglichen physischen Körpern die unteilbaren, ganzheitlichen Monaden als die wahren Einheiten anzudenken, das permanente Wirken dieser monadischen Ganzheiten als „actio formalis“ zu beschreiben und das Prinzip ihres Wirkens u.a. als fundamentales „Wirkungsprinzip“ der Physik zu hinterlassen⁴.

Betrachten wir dazu einige Beispiele: die Pupillen meiner Augen, der Ring an meinem Finger, der Mond und die Sonne am Himmel.

³ G. W. Leibniz: *Monadologie*, Reclam, Stuttgart 1979

⁴ siehe dazu: M. Planck: *Religion und Naturwissenschaft; in Vorträge und Erinnerungen*“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1981

Einerseits bestehen sie alle aus physischen Teilen und können bei Bedarf weiter unterteilt werden, sind aber als physische Körper letztlich vergänglich. Andererseits haben sie alle eine gemeinsame Form: die Form eines Kreises. Diese Form aber kann nicht weiter unterteilt werden, sie ist eine Einheit und als solche unvergänglich. Was die verschiedenen Kreisformen unterscheidet, ist ihre Apperzeption, ihre Anregung vom Punkt als kleinstem Kreis hin bis zum unendlich großen Kreis. Alle Kreise aber sind untereinander selbstähnlich, jede ist ein kleiner oder großer Spiegel der einen kreisförmigen Monade, und alle sind in prästablierter Harmonie verbunden.

Diese Monadologie, die Leibniz in vereinfachter Darstellung dem Prinzen Eugen als gern gelesene „Prinzipien der Natur und der Gnade“ widmete, benötigt zu ihrem Verständnis aber immer beide Pole: die physisch-teilbare und die monadisch-ganzheitliche Position. Blicken wir mit beiden auf den Organismus, so zeigt sich uns einerseits an der Lehre der Universitätsmedizin das Teilbare und Vergängliche in den Atomen, Molekülen, Makromolekülen, Organellen und Organen und ihren chemischen Verbindungen und andererseits an der Botschaft der Ganzheitsmedizin das unteilbare Ganze und Erhaltende in den selbstähnlichen organischen Formen und Prozessen. Das Gehirn, die Lunge, die Niere, das Nervengeflecht, das Gefäßsystem für Blut und Lymphe sind Beispiele für Selbstähnlichkeiten im Detail, genau so wie das Heranwachsen der befruchteten Eizelle in der Embryogenese ein kleiner Spiegel der Entwicklung des gesamten Lebensprozesses auf dieser Erde ist. Hier werden alle Stadien der Evolution durchlaufen, von der Selbstreproduktion der DNA am Beginn hin bis zum vernunftbegabten Säugetier Mensch: und dieser Prozess umfasst das Ganze des Lebens auf dieser Erde.

Mit welcher Logik lässt sich diese monadisch-selbstähnliche Ganzheit als Form und Prozess erfassen? Leibniz wies uns den Weg: nicht hierarchisch, denn hierarchisch ist die physische Welt, die Herbert Pietschmann am Beispiel des Generaldirektors erläuterte. Ganz im Sinne der großen Mystiker - wie etwa Meister Eckehardt - sollten wir auf unserer Entdeckungsreise nach Ganzheiten in den Körpern nach dem kleinen Spiegel des Ganzen suchen und die Einheit und Vollkommenheit im Sein herauschälen. Wenn wir also fragen, was ein Organismus ist, und wie er organisiert ist, so müssen wir in Ergänzung zur Analyse seiner vergänglichen, sterblichen Teile auch das betrachten, was als seine eigentliche Einheit in Form und Prozess dargestellt und in der Evolution erhalten bleibt. Eine sehr interessante Position über die

Erhaltung von fundamentalen Prozessen bzw. von Organisation im Bereich des Lebendigen nehmen besonders H. Maturana und F. Varela ein, zwei bedeutende Theoretiker der Biologie. Um diese Frage von Form und Materie, von Prozess und Struktur der Ganzheiten wird sich auch Einiges in meinem Beitrag zum Thema „Wissenschaft und Biophysik“ drehen.

Der evolutionäre EJASE-Wissenschaftsbegriff

Ernst Mach, einer meiner Vorbilder für eine ganzheitliche Wissenschaft, aber auch Albert Einstein, der Mach sehr verehrte, vertraten die Auffassung, dass Wissenschaft nichts anderes als eine Verfeinerung des Alltagsdenkens und -handelns sei. Die Ganzheitsmedizin beruht wie jede andere Kultur der Menschheit auf einer Fülle von Erfahrungen, die über Jahrtausende hindurch mündlich oder schriftlich tradiert worden sind, um den Menschen zu helfen, nicht zu erkranken bzw. im Krankheitsfall wieder zu genesen. Wenn Ganzheitsmedizin den Anspruch auf Wissenschaftlichkeit hat, so sollte ihr alltägliches Handeln und Denken hin zur Wissenschaft im Mach-Einsteinschen Sinne auch verfeinert werden. Dies impliziert aber, daß die Ganzheitsmedizin nicht nur ihre bisherigen Methoden kritisch hinterfragen und eventuell eigene wissenschaftliche Methoden entwickeln muss, sondern sie muss auch die Nähe zu verwandten wissenschaftlichen Disziplinen suchen, daher auch zur Biophysik als der Lehre von der Natur des Lebendigen. Diese Wissenschaft stellt Methoden bereit, die einen adäquaten Ganzheitsbegriff enthalten und die es erlauben, diesen Begriff auf unterschiedliche Systeme anzuwenden.

Die herkömmliche Biophysik als eine Disziplin, welche die wissenschaftlichen Methoden der Physik auf lebende Objekte anwendet, erfüllte in der Vergangenheit diesen Anspruch nur bedingt. Die herkömmliche Physik, von der sie sich ableitet, und ihre Methoden hatten nämlich nicht sehr viel mit dem Leben zu tun. Moderne Biophysik stand daher vor einigen Jahrzehnten vor der Entscheidung, entweder mit den traditionellen Prinzipien und Methoden der Physik auszukommen oder aber zu diesen Prinzipien und Methoden der Physik neue Denkweisen und Handlungsanweisungen hinzuzunehmen, die sich besonders für die Beschreibung lebender Systeme eignen. Die moderne Biophysik wählte den zweiten Weg, den ich in der Folge skizzieren werde. Zuerst aber möchte ich jenen Wissenschaftsbegriff

vorstellen, den ich für diesen Weg heranziehe werde: den sogenannten EJASE-Wissenschaftsbegriff nach A. Einstein und G. Holton⁵.

Einstein orientierte sich in seinem Modell der Wissenschaft an Mach bzw. Berkeley, indem er voraussetzte, daß uns die Sinneserlebnisse als Erfahrung (E) unmittelbar gegeben sind. Diese Erfahrung allein genügt aber nicht für ein wissenschaftliches Weltbild. Hierzu bedarf es noch der Welt der Prinzipien bzw. Axiome (A), die kontemplativ erschaut und nur mittels eines extra-logischen, psychologischen Sprungs bzw. Jumps (J) erfaßt werden können. Diese über allgemeinste Begriffe verknüpften Axiome sollten nicht nur die bisher gemachten Erfahrungen bzw. Sinnesdaten in sich bergen und vernünftig ordnen, sondern es auch erlauben, spezielle Einzelaussagen in Form von Sätzen (S) logisch zu deduzieren und durch einen gleichfalls außerlogischen Übergang – welch unkonventionelle und mutige These ! - wieder an der Erfahrung (E), etwa mit Experimenten, zu überprüfen bzw. zu falsifizieren.

Einsteins EJASE-Modell der Wissenschaft

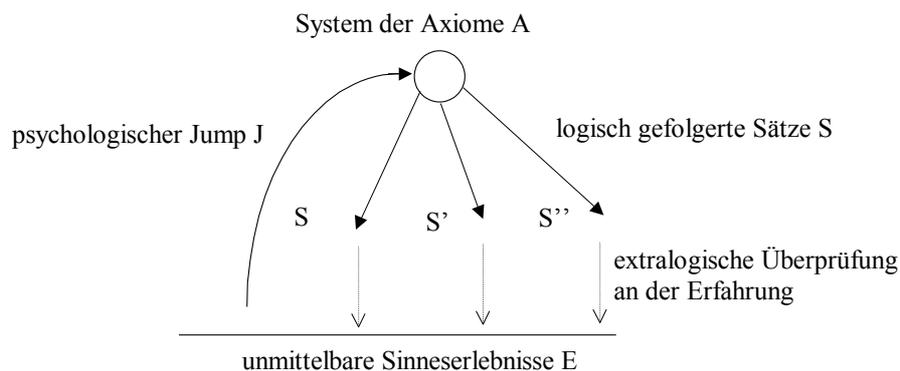


Abb. 1: Das EJASE-Modell der Wissenschaft nach Einstein-Holton

Typisch für diese Einstein'sche Sicht der Wissenschaft ist nicht eine zyklische Erkenntnis, die in einer periodischen Bewegung von E über J nach A, und von dort über die S wieder nach E eingefangen wäre, sondern eine evolutionäre EJASE-Spirale hin zu einer immer tieferen Erkenntnis über die Natur.

⁵ A. Einstein: Brief an Solovine, in „G. Holton: Thematische Analyse der Wissenschaft, Suhrkamp-Verlag, Frankfurt 19981, pg. 374

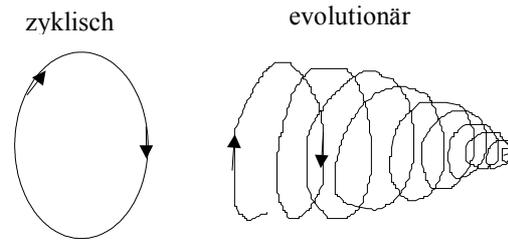


Abb. 2: Die evolutionäre Entwicklung der Wissenschaft

Über die elementaren Empfindungen aus der Sphäre der Erfahrung hat uns Mach in seinem Werk „Analyse der Empfindungen“⁶ Bemerkenswertes hinterlassen und auch einen Weg zu einer umfassenden Naturwissenschaft aus Physik, Physiologie und Psychologie gewiesen. Zentrales Thema darin ist, wie man von den elementaren Empfindungen über unsere Sinnesorgane zu den Begriffen in den Naturwissenschaften kommt.

Schon Nietzsche⁷ hat postuliert, dass „alle Naturwissenschaft die Gesetze der Empfindung behandelt“. Die Empfindung sei aber nicht das Wirken der Sinnesorgane, sondern die Sinnesorgane selbst seien uns als Empfindung bekannt: „Nicht das Auge sieht, sondern wir sehen, nicht das Gehirn denkt, sondern wir denken. Das Auge wie das Gehirn ist uns absolut nur als Empfindung gegeben, in keiner Weise mehr als alle Dinge außer uns“.

Das Ich und das Wir sind aber nicht anders als die mechanische Masse oder die elektrische Ladung nach Mach eine denkökonomische Konstruktion, eine Maya, die vortäuscht, daß eine gewisse Gruppe von Sinnesempfindungen gegenüber anderen eine gewisse Beständigkeit habe. Tatsächlich aber bleibt nichts bestehen, weder die Masse noch das Ich, weshalb es auch wegen der Vortäuschung fundamentaler Substanzen keine Kausalität geben könne. Diese Haltung und tiefe Neigung Machs zu einer Wissenschaft vom Ganzen erwuchs aus einem Erlebnis im Alter von etwa siebzehn Jahren: „An einem heiteren Sommertag im Freien erschien mir einmal die Welt samt meinem Ich als eine zusammenhängende Masse von Empfindungen, nur im Ich stärker zusammenhängend. Obgleich die eigentliche Reflexion sich erst später hinzugesellte, so ist dieser Moment für meine ganze Anschauung bestimmend geworden“⁸.

⁶ E. Mach: Analyse der Empfindungen, Gustav Fischer Verlag, Jena 1900

⁷ F. Nietzsche: Die nachgelassenen Fragmente, Reclam, Stuttgart 1996

⁸ siehe Zitat 6, pg. 21

Mach'sches Gedankengut, das auch den Absolutheitsanspruch von Raum und Zeit in der Newtonschen Physik erstmals kritisch hinterfragte, das die Kausalität aus der Physik und Psychologie zugunsten von bloßen Relationen verbannte, ist nicht nur jedem angehenden Physiker, Physiologen und Psychologen zu empfehlen, sondern vor allem der zunehmenden Gilde interdisziplinär denkender Wissenschaftler.

Nicht nur Dichter wie Robert Musil („Mann ohne Eigenschaften“) oder Wissenschaftler wie Albert Einstein („Mein Weltbild“), sondern auch Philosophen des Wiener Kreises, aber auch philosophisch dilettierende Politiker wie der gegen Mach auftretende Lenin („Materialismus und Empirio-kritizismus“) orientierten oder erzürnten sich an Mach's Grundthese: „Es gibt kein solches Ding wie ein isoliertes oder losgelöstes Element der Erfahrung. Alles, was unsere Erfahrung war, ist und sein kann, ist Eines. Die eigentümliche Aufgabe der Wissenschaft ist die direkte oder indirekte Beschreibung des Einen⁹.“ Hier stehen wir an der Wiege zu einer ganzheitlichen Biophysik.

Programmatisches

Die Prinzipien der Biophysik orientieren sich an den Methoden der Physik, Chemie und Biologie. Um jedoch zu einer Synthese dieser naturwissenschaftlichen Disziplinen und damit zu möglichen Prinzipien einer modernen Biophysik zu gelangen, ist der Aufstieg in eine Metaebene erforderlich, die Physik, Chemie und Biologie unter einem einheitlichen, ganzheitlichen Gesichtspunkt beleuchten sollte. Eine derartige Disziplin kann die Theorie offener, vernetzter Systeme sein, die einerseits bei der Kybernetik und andererseits bei der Mathematik komplexer Systeme Anleihe nimmt. Die Logik einer derartigen Biophysik wird jedoch den Satz vom zureichenden Grunde und das Schopenhauer'sche „principium individuationis“, die beide für den beschränkten Blick objektorientierter Wesen verantwortlich sind, überwinden müssen, um den Blick von Objekten und Individuen hin zu vernetzten Ganzheiten zu richten und das Schicksal der Menschheit in die Sphären des Lebens, des Wassers, der Luft und der Gesteine naturgemäß und würdig einzubetten.

⁹ J. Bradley: Machs Philosophie der Naturwissenschaft, Hirzel-Verlag, Stuttgart 1974, pg. 159

2. Prinzipien der Physik und Chemie und ihre Bedeutung für die Biophysik

Ich beginne mit der Physik und werden zeigen, dass die Prinzipien der Elektrodynamik bzw. der Quantenelektrodynamik und die Prinzipien der Thermodynamik bzw. Statistischen Physik des Nichtgleichgewichtes zentrale Bedeutung für die Biophysik haben.

Prinzipien der Elektrodynamik

Wir kennen vier physikalische Wechselwirkungen: die starke, die schwache, die schwere und die elektromagnetische Wechselwirkung¹⁰. Für biophysikalische Prozesse ist vor allem die elektromagnetische Wechselwirkung wesentlich. Diese Behauptung möchte ich kurz erläutern. Die starke Wechselwirkung wird nur innerhalb eines sehr kleinen Bereiches von etwa 10^{-15} m von den Kernteilchen (Protonen, Neutronen) bzw. von deren Bestandteilen (Quarks) über Feldquanten (Gluonen) ausgeübt und bestimmt die Phänomene sowie die Gesetze der Kernphysik (Vorgänge bei Kernspaltungen, Kernfusionen, etc.). Die schwache Wechselwirkung spielt sich ebenfalls in sehr, sehr kleinen Bereichen ab. Ein Beispiel dafür ist der radioaktive Zerfall eines freien oder eines im Atomkern gebundenen Neutrons in ein Proton, ein Betateilchen und ein Antineutrino. Die schwere Wechselwirkung wird vor allem in kosmischen Dimensionen zwischen schweren Massen wirksam (Planeten, Sterne, Galaxien, etc). Diese drei Wechselwirkungen haben für das Leben aber nur marginale Bedeutung. Um diese Aussage zu illustrieren, betrachten wir beispielsweise Protonen, die zwar in der Elektrochemie (pH-Wert, etc) und damit auch in der Biochemie entscheiden mitwirken, dort aber nicht stark, sondern elektromagnetisch wechselwirken. Ähnlich ist es mit den radioaktiven Betateilchen, die zwar mit biologischen Systemen wechselwirken, dort aber nicht schwach, sondern wieder elektromagnetisch. Was die schweren Massen anlangt, so werden sie zwar im alltäglichen Leben, aber auch in den Naturwissenschaften oder in Medizin durch Wägen bestimmt (etwa wenn ein Mensch geboren wird, wenn wir am Markt Lebensmittel einkaufen oder wenn wir vom Arzt Medikamente mit der Auflage „10 mg pro Tag“ verordnet bekommen), doch wenn wir diese Lebensmittel oder diese Medikamente zu uns nehmen, so wechselwirken sie nicht als schwere Massen, sondern nur chemisch über elektromagnetische Kopplungen (Ionenbindung, homöopolare Bindung, etc). Daher hat die Schwerkraft für das Lebendige nur marginale Bedeutung, was besonders die Ausflüge von Menschen, Tieren und

¹⁰ S. Weinberg: in „Teilchen, Felder, Symmetrien“, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1988, pg. 6

Pflanzen ins All zeigen, wo trotz schwerelosen Zustandes in den Raumkapseln Leben möglich ist.

Bestimmend für die Naturgesetze des Lebens verbleibt daher aus biophysikalischer Sicht vor allem die elektromagnetische Wechselwirkung, die Atome und Moleküle, Makromoleküle und Organellen, Zellen und Organe, schließlich den menschlichen Körper und die gesamten Organismen aufbaut¹¹. Sie ist es auch, die alle physikalischen und chemischen Eigenschaften der Flüsse und Meere, der Luft und der Gesteine bestimmt. Der elektromagnetischen Wechselwirkung ist es daher zu verdanken, dass Hydrosphäre, Atmosphäre, Lithosphäre und Biosphäre eine untrennbare Einheit auf unserem Planeten bilden, - dass ohne Wasser, Luft und Gesteine kein Leben auf dieser Erde möglich wäre. Um Leben zu begreifen, muss man daher aus der Sicht der Biophysik vor allem die Welt des Elektromagnetismus verstehen. Ich habe nicht vor, dies hier darzustellen, da erstens dafür die Zeit nicht ausreicht und ich zweitens annehme, dass die Anwesenden eine derartige Darstellung der Elektrodynamik schon in ihrer schulischen Ausbildung erhielten. Dennoch möchte ich über diese elektromagnetische Wechselwirkung ein paar prinzipielle Gedanken verlieren, die den Bogen zu den Prinzipien der Biophysik spannen sollen.

Die Elektrodynamik bzw. die Quantenelektrodynamik, deren quantentheoretisches Analogon, zählt zu dem Besten und Schönsten, was die Physik zu bieten hat¹². Zu ihrem Verständnis bedarf es allerdings zweier Begriffe, die niemals alleine gedacht oder verwendet werden dürfen: die elektrische Substanz und ihr elektromagnetisches Feld. Philosophische Materialisten, darunter nicht selten Chemiker und Mediziner, neigen dazu, der Substanz einen höheren Grad an Wirklichkeit einzuräumen als dem Feld. Dies ist jedoch sehr bedenklich, weil man die elektrischen Substanzen nur durch ihre Felder und die Felder nur durch ihre Substanzen definiert und begreift. Moderne Biophysik berücksichtigt dies und betrachtet die Bedeutung von Substanzen und Feldern für Biosysteme immer gemeinsam.

¹¹ R. Feynman: QED – Die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie, Piper, München 1989, pg. 18

¹² R. Feynman: QED – die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie; Piper, München 1989

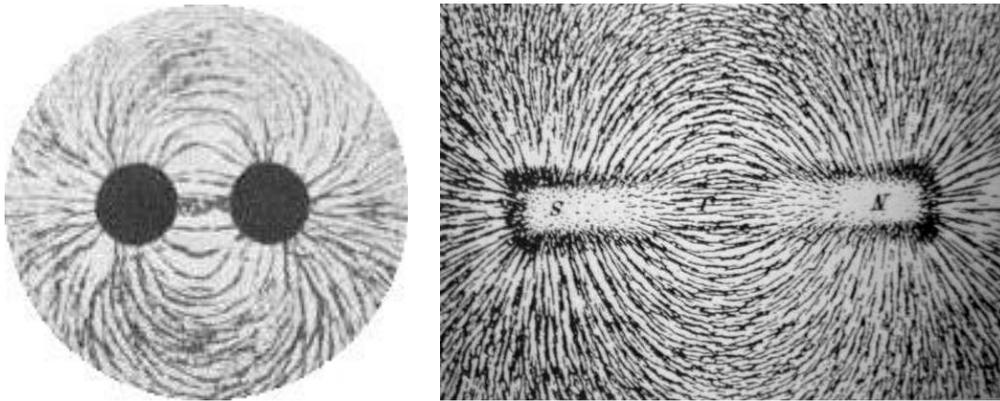


Abb.3: Elektrisches Feld um eine positive und eine negative Ladung (links) und magnetisches Feld um den Nord- und Südpol eines Magneten (rechts)

R. Feynman hat auf die Frage, was man nach einer möglichen Zerstörung unserer wissenschaftlich-technischen Zivilisation, etwa durch eine Sintflut, zukünftigen Generationen als physikalisches Vermächtnis hinterlassen möge, sinngemäß folgendes vorgeschlagen: „Alle Dinge bestehen aus Atomen – aus kleinsten Teilchen, die in permanenter Bewegung sind, einander anziehen, wenn sie ein klein wenig voneinander entfernt sind, sich aber gegenseitig abstoßen, wenn sie aneinander gepresst werden“¹³. Betrachtet man die Dinge aus dieser Feynman’schen Sicht, d.h. stößt man in mikroskopische Dimensionen vor, so findet man, dass sich alle elektrischen Substanzen aus Vielfachen zweier elektrisch entgegengesetzter Elementarladungen zusammensetzen und damit die Welt der Atome aufbauen.

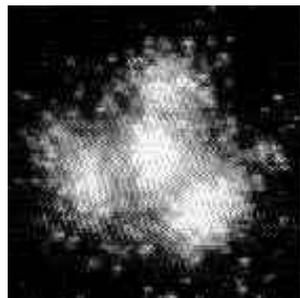


Abb. 4: Vier Wolframatom einer Wolframspitze (einkristalliner Draht von 0.1 mm Durchmesser) abgebildet mit einem Feldionenmikroskop und mit Neon als Bildgas bei einer Spitzenspannung von 1500 V¹⁴

Man findet aber auch, dass alle elektromagnetischen Felder aus merkwürdigen, jedoch messbaren Teilchen, den Photonen bestehen, die sich nur durch ihre Schwingungsfrequenzen

¹³ R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: Feynman Lectures on Physics, Oldenbourg, München 1974, pg.3-1

¹⁴ E.W. Müller and T.T. Tsong, Field Ion Microscopy, American Elsevier Pub. Co., New York, 1969

bzw. Energien unterscheiden. Ein wichtiges Gesetz der Quantenelektrodynamik besagt nun, dass elektrische Elementarladungen über Photonen wechselwirken.

Im Mikroskopischen werden einzelne Atome bzw. chemische Elemente durch die Anzahl ihrer Protonen im Atomkern gekennzeichnet, die positive Elementarladungen tragen. In neutralen Atomen steht diesen Protonen die gleiche Anzahl von Elektronen in der Atomhülle gegenüber, die jedoch negative Elementarladungen haben. Der Aufbau der chemischen Elemente beginnt mit Wasserstoff, das nur ein Elektron in der Hülle hat, führt an Kohlenstoff vorbei, das sechs Elektronen besitzt, und endet nach heutiger Kenntnis bei einem Element mit 108 Elektronen, dem letzten aus der Reihe der nur mehr künstlich erzeugbaren chemischen Elemente. Die Anordnungen und Energiezustände der Hüllenelektronen einzelner Atome können nur durch Aufnahme oder Abgabe von Photonen verändert werden.

Von all diesen chemischen Elementen sind besonders die Edelgase hervorzuheben, die eine äußerst stabile Anordnung ihrer Elektronen und daher eine minimale potentielle Energie besitzen. Die Tendenz - fast könnte man sagen die Begierde - aller anderen Elemente in diesem Kosmos besteht nun darin, sich mit geeigneten Partnern so zu verbinden, dass ihre gemeinsame Elektronenanordnung einer der Edelgase besonders nahe kommt. Die Art und Weise, wie Atome mit Atomen zu Molekülen bzw. wie Moleküle mit Molekülen zu größeren Molekülen verbunden werden, erfolgt nach den Gesetzen der Quantenelektrodynamik. Von besonderer Bedeutung für die organische Welt ist die Verbindung der Atome mit dem Element Kohlenstoff, das die Fülle organischer Moleküle hervorbringt.

Betrachtet man die Wechselwirkung von Atomen oder Molekülen in biologischen Systemen unter diesem Aspekt, so unterliegt diese Interaktion ebenfalls der Quantenelektrodynamik und wird für die Atom- bzw. Molekülelektronen genauso über Photonen vollzogen; das bedeutet aber auch, dass in Biosystemen Makromoleküle und Organellen, Zellen und Organe letztlich über Photonen wechselwirken. Einzelne Photonen dieser biologischen Herkunft genügen zwar den gleichen physikalischen und chemischen Gesetzen wie Photonen aus anorganischer Materie, unterscheiden sich aber in ihrem Verhalten als organisiertes Photonenensemble: man nennt sie deshalb Biophotonen - sie sollten in der Forschung und Darstellung einer modernen Biophysik und Ganzheitsmedizin nicht fehlen.

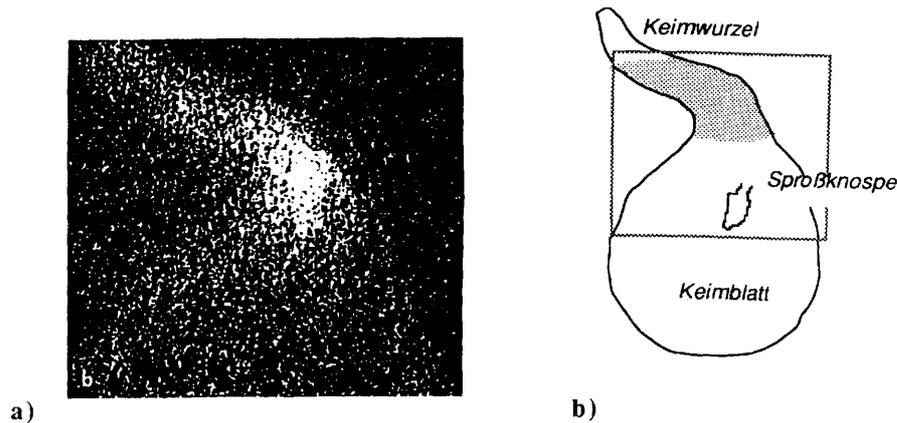


Abb.5: a) Biophotonenemission eines Sojakeimlings¹⁵ b) Schematische Darstellung des Keimlings (der eingerahmte Teil repräsentiert den Ausschnitt der Aufnahme in a). Die Probe besaß intakte Sproßknospe und Keimwurzel. Die aktive Zellteilung findet im Verbindungsbereich zwischen Sproßknospe und Keimwurzel statt.

Dieser kurze Ausflug in die Welt des Elektromagnetismus und der Photonen leitet schon über in das Gebiet der Thermodynamik bzw. Statistischen Physik, das sich mit den Gesetzen der Organisation einer großen Zahl von Atomen und Molekülen befaßt und das eine besonders wichtige Bedeutung auch für lebende Systeme und daher auch für die Biophysik hat.

Prinzipien der Thermodynamik

Die Thermodynamik als Lehre von der Natur der Wärme gliedert sich grob betrachtet in zwei Gebiete: das Gebiet des Wärmegleichgewichtes, zu dem auch der Zustand des Todes zählt, und das Gebiet des Nichtgleichgewichtes, das auch für die dynamischen Prozesse des Lebens gilt. Wie warm oder kalt ein Körper ist, sagt uns seine Temperatur, die wir mit Thermometern messen können. Wärme hat nun eine merkwürdige, aber grundlegende Eigenschaft, die wir spätestens merken, wenn wir uns die Finger verbrennen: sie versucht nämlich immer, verschieden lokalisierte Temperaturen spontan auszugleichen und etwa zwischen zwei unterschiedlich warmen Körpern solange hin- und herzuwechseln, bis sie gleiche Temperatur haben. Wärme strebt daher danach, die Körper in ein gemeinsames Wärmegleichgewicht zu bringen: d.h. in einen Zustand, der im Vergleich zu den beiden früheren Zuständen einen höheren Grad an Wahrscheinlichkeit hat. Das physikalische Maß für diese Wahrscheinlichkeit des Wärmeüberganges heißt Entropie. Die Entropie drückt aber auch aus, dass sich ein solcher Vorgang nicht rückgängig machen lässt, derart, dass der eine Körper von sich aus wieder wärmer und der andere wieder kälter wird. Daher ist die Entropie zugleich auch ein Maß für

¹⁵ Scott et al., Appl. Physics B48 (1989) 183, Messdauer 1h 33min; aus

die Unumkehrbarkeit, die Irreversibilität, die Unwahrscheinlichkeit, den Neuigkeitswert, die Information.

Werfen wir zuerst einen Blick auf das erste Gebiet der Thermodynamik, nämlich das Gebiet des thermodynamischen Gleichgewichtes bzw. des Wärmegleichgewicht, und versuchen, dort die genannten Begriffe zu verdeutlichen. Der Übergang der Wärme zwischen Körpern unterschiedlicher Temperatur sei beendet, sie haben nun eine gemeinsame Temperatur erreicht und nehmen einen gemeinsamen Zustand ein: den Zustand der größten Wahrscheinlichkeit bzw. Entropie. Diese Entropie ist umso größer, je mehr Wärme übertragen wurde und je kleiner die gemeinsame Temperatur ist, die sich im Wärmegleichgewicht eingestellt hat. Es zeigt sich, dass eine Fülle von Erscheinungen in der Natur diesem Prinzip der maximalen Entropie genügen, das erstmals von R. Clausius formuliert wurde¹⁶.

Alle Zustände des Wärmegleichgewichtes, die von Systemen mit einer sehr großen Anzahl von Atomen und Molekülen eingenommen werden, lassen sich in drei große Gruppen einteilen: in Gase, Flüssigkeit und feste Körper. Im Zustand der maximalen Entropie sind Gase und Flüssigkeiten mehr oder weniger homogen, feste Körper kristallisieren meist in verschiedenen Kristallformen wie Kochsalz, Bergkristall oder Schneekristalle, können aber auch amorph wie etwa Gläser sein. Die Kräfte, die Kristalle, Flüssigkeiten und Gase bilden, sind jedoch ausschließlich elektromagnetischer Natur.

Was den organischen Bereich anlangt, so ist das Prinzip der maximalen Entropie auch das Prinzip des Todes. Dies ist jener Zustand, in dem abgestorbene Biosysteme die Temperatur der Umgebung angenommen haben. Es ist aber auch jener Zustand, den Forscher im Reagenzglas zulassen, wenn sie etwa mit isolierter Desoxyribonukleinsäure (DNS) oder mit komplexen Enzymen bei einer bestimmten Temperatur arbeiten. Viren, die noch nicht in eine Zelle eingedrungen sind, nehmen ebenfalls diesen Zustand des Wärmegleichgewichtes ein.

J.C. Maxwell, L. Boltzmann, M. Planck und A. Einstein waren Pioniere auf dem Gebiet der Statistischen Physik. Dabei bedienten sie sich der Prinzipien und Methoden der mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie, um den Zustand des Wärmegleichgewichtes und der maximalen Entropie zu begreifen. Sie entdeckten, dass Wärme nicht nur Ausdruck einer kollektiv organisierten Form der Bewegungsenergie von Atomen und Molekülen ist, sondern

¹⁶ R. Clausius: Ann. Phys. 125 (1865) 353

dass deren statistische Gesetze (Maxwell-Boltzmann-Verteilung^{17, 18}, Plancksches Strahlungsgesetz¹⁹, etc) für alle Körper im Wärmegleichgewicht unabhängig von ihrer Form und ihrem Aufbau gelten. Daher kann man aus der Messung der statistischen Verteilung der Molekül-Geschwindigkeiten eines Körpers auf seine Temperatur schließen. Besonders eindrucksvoll aber ist es, für die Temperaturmessung die statistische Verteilung der Energien bzw. Frequenzen der elektromagnetischen Wellen in der Wärmestrahlung bzw. Planckschen Strahlung eines Körpers zu verwenden. Den tiefgründigsten Blick in die mikroskopische Welt und ihre statistischen Verteilung aber gewährt uns die Brownsche Molekularbewegung, die Einstein für die Physik salonfähig machte²⁰. Durch Messung der mittleren statistischen Verschiebung eines Brownschen Teilchens (etwa eines Bärlappsamens) in einer Flüssigkeit und der dazu erforderlichen Zeitspanne ist es möglich, nicht nur unsere Vorstellungen von der Bewegung der Moleküle im Wärmegleichgewicht zu überprüfen, sondern bei beliebigen, jedoch fixen Temperaturen die für die gesamte Atom- und Molekülphysik fundamentale Loschmidtsche Zahl zu bestimmen. Wenn auch die im gleichen Jahr 1905 erschienenen Einsteinschen Arbeiten zur Relativitätstheorie und zum quantentheoretischen Photoeffekt in Physikerkreisen einen hohen Stellenwert einnehmen, so hat die Brownsche Molekularbewegung für die Entwicklung der Stochastischen Physik auch von Nichtgleichgewichtssystemen und damit für die Biophysik eine besondere Bedeutung.

Unser Interesse an der Thermodynamik gilt ja vor allem den organischen Systemen. Nehmen biologische Systeme die Temperatur der Umgebung an, so unterscheidet sich die Bewegung ihrer Moleküle oder ihre Wärmestrahlung nicht mehr von der ihrer Umgebung: sie sind tot. Aus biophysikalischer Sicht gebührt dabei besondere Aufmerksamkeit den möglichen Frequenzen der Wärmestrahlung. Diese Frequenzen kommen – wie Einstein sehr eindrucksvoll zeigen konnte – durch die gleiche Rate von Photonenemissionen und Photonenabsorptionen zwischen unterschiedlichen Energiezuständen in Atomen oder Molekülen zustande. Im Falle des Wärmegleichgewichtes, also auch des Todes, müssen die niedrigeren Energiezustände überwiegend eingenommen werden, damit sich die messbare

¹⁷ J.C.Maxwell: Theory of Heat, London 1871

¹⁸ L. Boltzmann: Über die mechanische Bedeutung des 2. Hauptsatzes der Wärmetheorie, 1866

¹⁹ M. Planck: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, Verh. Dtsch.Phys.Ges. Berlin 2 (1900) 237

²⁰ A. Einstein: Über die von der molekularen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, Annalen der Physik 17 (1905) 549

Wärmestrahlung einstellt. Wie wir in der folgenden Abbildung sehen, ist dies in Biosystemen (menschliche Leukozyten) nicht der Fall.

Lebende Systeme sind offene Systeme, durch die Energie und Materie hindurchfließen. Sie nehmen daher nicht die Temperatur der Umgebung an, d.h. sie sind nicht im Wärmegleichgewicht, sondern im Wärme-Nichtgleichgewicht. Sie nehmen daher überwiegend höhere, angeregte Energiezustände in Atomen und Molekülen ein und emittieren daher Photonen mit einer anderen Rate als sie Photonen absorbieren, wie die Biophotonenemission menschlicher Blutzellen während der Immunabwehr in der folgenden Abbildung zeigt^{21, 22}.

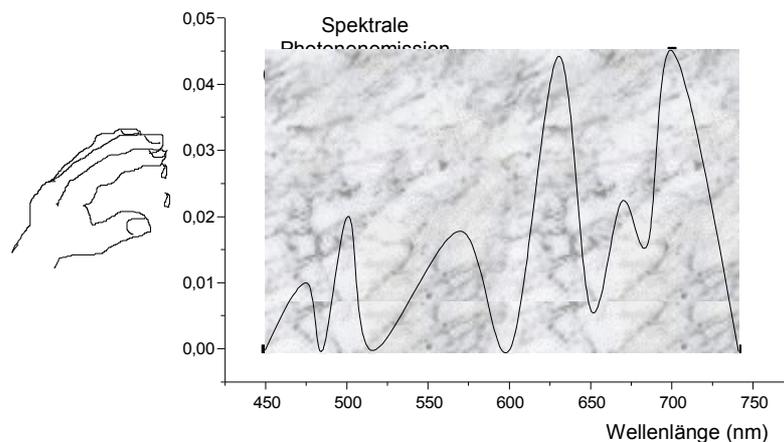


Abb.6: Photonenemission von menschlichen polymorphkernigen Leukozyten während der Immunabwehr

Diese Zustände müssen durch besondere Prozesse fern vom Gleichgewicht stabilisiert werden, da ansonst der Tod, d.h. das Wärmegleichgewicht droht. Nehmen wir als Beispiel uns Menschen her. Wenn wir in der Sauna schwitzen, bewahren wir unsere Körperwärme. Hätte unser Körper die Lufttemperatur von etwa 100 °C, so träfe uns der Hitzschlag – nur eine Leiche würde diese Saunatemperatur annehmen. Ein anderes Beispiel: ein lebender Eskimo in einem Iglu bewahrt seine Körperwärme - nur ein toter Eskimo wird kalt. Sogenannte Kaltblütler oder Tiere, die bei sehr tiefen Temperaturen überleben, haben Schutzmechanismen entwickelt, die das drohende thermodynamische Gleichgewicht abwehren können. Aus biophysikalischer Sicht gilt es daher, die Prinzipien der Thermodynamik bzw. Statistischen Physik für das Nichtgleichgewicht zu formulieren und daraus diejenigen Gesetze abzuleiten, die auch für lebende System gelten sollten.

²¹ P. Roschger, W. Graninger, H. Klima: Biochem. Biophys. Res. Commun. **123** (1984) 1047

²² H. Figl: Der Maximum-Entropie-Formalismus angewandt auf die Lichtemission während der Phagozytose; Diplomarbeit, Universität Wien, Wien 1994

Bedeutende Schritte in dieser Richtung der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik haben L. Boltzmann, L. Onsager²³, H. Casimir²⁴ und P. Glansdorff²⁵, G. Nicolis²⁶, I. Prigogine²⁷, aber auch E.T. Jaynes^{28, 29}, K.S. Li³⁰ und H. Haken³¹ unternommen. In der Biophysik waren es vor allem, E. Schrödinger³², H. Fröhlich^{33, 34} M. Eigen und P. Schuster³⁵. Meist spaltet man die Thermodynamik bzw. Statistische Physik des Nichtgleichgewichtes in zwei Bereiche auf: in den linearen Bereich nahe dem Wärmeleichgewicht und den nichtlinearen Bereich fern vom Wärmeleichgewicht. Für den ersten, den linearen Bereich gaben L. Onsager und I. Prigogine³⁶ die Prinzipien vor, am zweiten, dem nichtlinearen Bereich war I. Prigogine maßgeblich beteiligt, hatte jedoch in L. von Bertalanffy einen bedeutende Vorläufer.

Die Nichtgleichgewichts-Thermodynamik benötigt für die Beschreibung ihrer Phänomene neue Begriffe: den Wärmefluss, den Temperaturgradienten und die Entropieproduktion. Zur Illustration und Bildung dieser Begriffe betrachten wir als Beispiel einen flachen, zylindrischen Flüssigkeitsbehälter, der von unten aufgewärmt werden kann. Die Flüssigkeit sei überdies mit Aluminiumpulver vermischt, um die Bewegung der Flüssigkeit sichtbar zu machen. Haben Unter- und Oberseite der Flüssigkeit die gleiche Temperatur, so ist ihr Temperaturgradient gleich null; es fließt keine Wärme; die Entropie hat ihr Maximum erreicht und ändert sich nicht mehr, d.h. die Entropieproduktion ist im Wärmeleichgewicht ebenfalls null. Man kann diesen Zustand auch sichtbar machen: das Aluminiumpulver ist homogen und isotrop im Wasser verteilt. Haben Ober- und Unterseite der Flüssigkeit jedoch unterschiedliche Temperatur, so ist ihr Temperaturgradient ungleich null, es fließt Wärme, aber auch Flüssigkeit und es wird Entropie produziert. Man kann den Temperaturgradienten messen und den Wärmefluss an dem Fluss der Aluminiumteilchen beobachten: es stellt sich ein Fließgleichgewicht ein, das vom Temperaturgradienten abhängt. Erhöht man den Temperaturgradienten, so nimmt der Fluss proportional zu - und dies ist auch schon das

²³ L. Onsager: Phys.Rev. 37 (1931) 405; Phys.Rev. 38 (1931) 2265

²⁴ H. B. G. Casimir: Rev. Mod. Phys. 17 (1945) 343

²⁵ P.C.Glansdorff, I.Prigogine: Physica 30 (1964) 351

²⁶ G. Nicolis, I. Prigogine: Selforganisation in Nonequilibrium Systems, John Wiley & Sons, New York 1977

²⁷ I. Prigogine: in „Theoretical Physics and Biology“, North Holland, Amsterdam 1969, pg.21

²⁸ E.T. Jaynes: Information Theory and Statistical Mechanics, Phys. Rev. 106 (1957) 620; 108 (1957) 171

²⁹ B. Robertson: Phys. Rev. 144 (1966) 151

³⁰ K. H. Li: Physics of Open Systems, Phys. Reports. 134 (1986) 3

³¹ H. Haken: Synergetics – Cooperative Phenomena in Multi-Component Systems; Teubner, Stuttgart 1973

³² E. Schrödinger: What is Life?, Cambridge University Press, Cambridge 1944

³³ H. Fröhlich: Int. J. Quantum Chem. 2 (1968) 641

³⁴ H. Fröhlich: in „Theoretical Physics and Biology“, Ed. M. Marois, North Holland Press 1969, pg. 13

³⁵ M. Eigen, P. Schuster: The Hypercycle, Springer 1979

³⁶ I. Prigogine: Acad. Roy Bel., Bull. Classe.Sci 31 (1945) 31

wesentliche Kennzeichen der linearen Nichtgleichgewichts-Thermodynamik. Onsager hat dieses Phänomen zum Prinzip verallgemeinert: nahe dem Wärmeleichgewicht sind die Flüsse (Wärmefluss, Diffusion, elektrischer Strom, etc) lineare Funktionen von verallgemeinerten Kräften (Temperaturgradient, chemischer Potentialgradient, elektrischer Potentialgradient, etc.). Diese Onsager-Relation ist ident mit dem Prigogine-Prinzip, wonach in der Nähe des Wärmeleichgewichtes die Entropieproduktion ein Minimum und daher zu einem Attraktor für thermodynamische Zustände wird. Dabei wollen wir unter einem Attraktor einen Zustand verstehen, dem sich ein thermodynamisches System nähert und das sich dort stabilisiert. In diesem Sinne sind sowohl das Entropiemaximum im Wärmeleichgewicht als auch das Minimum im Fließgleichgewicht thermodynamische Attraktoren, die bedeutende Rollen in der unbelebten und belebten Natur spielen.

Was aber spielt sich in der Natur fern vom Wärmeleichgewicht ab? Welche Attraktoren stabilisieren welche thermodynamischen Prozesse? Welche Strukturen entstehen dort? Kann uns dabei unser einfaches Modell einer mit Aluminiumpulver vermischten Flüssigkeit in einem nunmehr größeren Temperaturgradienten weiterhelfen? Die folgende Abbildung zeigt, welche Formen und Prozesse ein derartig fern vom thermodynamischen Gleichgewicht befindliches System ausbilden kann. Es handelt sich im vorliegenden Beispiel um die sogenannten Benard-Zellen, das sind Konvektionszellen, die sich in einem zunehmenden Temperaturgradienten von selbst organisieren und die man daher leicht beobachten kann.



Abb. 7: Das hydrodynamische System „Benardzellen“ fern vom thermodynamischen Gleichgewicht: Ölschicht (4 mm Speiseöl) + feinstes Aluminiumpulver in 12 cm Petrischale in einem Temperaturgradienten (Unterseite aufgeheizt auf ca. 80 °C, Oberseite hat Raumtemperatur 22 °C)

Dieses hydrodynamische System fern vom thermodynamischen Gleichgewicht durchläuft nun mit zunehmendem Temperaturgradienten eine Reihe von Instabilitäten: nach einer anfänglich

laminaren und zeitunabhängigen Bewegung der Flüssigkeit in den Konvektionszellen wird die Strömung nach dem Auftreten einer Instabilität laminar und periodisch, nach einer weiteren Instabilität laminar und doppelt periodisch und schließlich turbulent und chaotisch. Die verallgemeinerten Flüsse und Kräfte sind nicht mehr linear, sondern nichtlinear miteinander verknüpft, weswegen man diese physikalische Disziplin auch „Nichtlineare irreversible Thermodynamik“ nennt³⁷.

Auf welchen physikalischen Prinzipien beruhen derartige thermodynamische Systeme, die Instabilitätszustände durchlaufen, dazwischen stabile Phasen aufweisen oder aber turbulent werden können. Offenbar spielt dabei die Entropieproduktion eine wesentliche Rolle. Sie ist weder Null wie im thermodynamischen Gleichgewicht noch ist sie ein Minimum wie im Fließzustand nahe dem Gleichgewicht. Prinzipiell gilt, dass fern vom Gleichgewicht zwischen den verallgemeinerten Flüssen und Kräften nichtlineare Beziehungen bestehen. Was man ferner zur Charakterisierung von Zuständen bzw. Attraktoren fern vom Gleichgewicht benötigt, sind Kriterien, die anzeigen, unter welchen Bedingungen Instabilitäten durchlaufen werden. Ein solches Kriterium wurde von P. Glansdorff und I. Prigogine unter Heranziehung von Stabilitätskriterien nach Lyapunov aufgestellt³⁸. Danach ist eine hinreichende Bedingung für das Auftreten von Instabilitäten, daß die für die Umgebung eines Nichtgleichgewichtszustandes ausgewertete Exzessentropieproduktion keine Lyapunovfunktion und daher negativ sein soll. Ist sie aber größer oder gleich Null, so liegt eine stabile Mode vor. Der Begriff der Exzessentropieproduktion sollte nicht mit der Entropieproduktion verwechselt werden, vielmehr ist er die zweite Variation der Entropieproduktion und drückt die dynamische Reaktion einer Mode eines dissipativen Systems auf eine Störung aus. Ursprünglich vertrat einer der beiden Autoren die Auffassung, dass die in der Natur anzutreffende Komplexität nicht auf ein universelles Extremalprinzip zurückgeführt werden könne, sondern dass die Natur bei der Ausbildung von Komplexität eher eine „pragmatische“ Haltung einnehme, bei der die Suche nach Stabilität eine wesentliche Rolle spiele. Gegenwärtig nimmt I. Prigogine dazu eine etwas modifizierte Position ein, die vor allem den in offenen Systemen auftretenden Instabilitäten eine äußerst kreative evolutionäre Funktion zuschreibt. Darüber werden später noch einige Bemerkungen fallen.

³⁷ G. Kluge, G. Neugebauer: Grundlagen der Thermodynamik; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994

³⁸ P. Glansdorff, I. Prigogine: Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations; Wiley-Interscience, London 1971

Folgende konkreten Schritte bei der Behandlung thermodynamischer Probleme fern vom Gleichgewicht werden empfohlen³⁹:

1. man stelle die Gibbsche Fundamentalgleichung auf
2. man formuliere die Bilanzgleichungen (Masse, Impuls, Energie Entropie)
3. man berechne die Entropieproduktion aus 1. und 2. Schritt
4. man definiere die Entropieproduktion aus verallgemeinerten Kräften und Flüssen
5. man stelle die phänomenologischen Gleichungen auf, die Kräften und Ströme verknüpfen
6. man stelle unter Benutzung von 2. bis 5. das zugehörige Differentialgleichungssystem für die Systemvariablen auf und löse dieses Gleichungssystem unter Verwendung der Anfangs- und Randbedingungen

Führt man diese Schritte durch, so lassen sich damit spezielle Sätze im Sinne des Einstein-Holton-EJASE-Modells auf logische Weise deduzieren. So ist es z.B. möglich, das zugehörige Differentialgleichungssystem für die hydrodynamische Benard-Instabilität (siehe Abb. 6) als sogenannte Lorenzgleichungen aufzustellen und zu lösen⁴⁰. Als Ergebnis erhält man für unterschiedliche Temperaturgradienten die theoretischen Zeitreihen der Systemgrößen und auch die entsprechenden theoretischen Attraktoren im Zustandsraum dieser Systemgrößen in Form von Tabellen oder Grafiken. Diese Lösungen können auch an der Erfahrung durch Messung der entsprechenden Systemvariablen getestet werden. Misst man beispielsweise die Rotationsgeschwindigkeiten der Flüssigkeit in den Benard-Zellen mittels Laser-Doppler-Effektes, so lässt sich damit die gesamte Systemdynamik nach einer von Takens⁴¹ entwickelten Methode in Form von empirischen Attraktoren rekonstruieren und mit den theoretischen Attraktoren vergleichen.

Dieses Beispiel der hydrodynamischen Benard-Instabilität eignet sich sehr, um die generelle Bedeutung des Begriffes der Instabilität in offenen, dissipativen Systemen auch für die Biophysik und die Ganzheitsmedizin zu diskutieren. Aber auch der Laser, ein Beispiel für ein elektrodynamisches System fern vom thermodynamischen Gleichgewicht, eignet sich dazu in hervorragender Weise. Der Laser ist als offenes System selbstorganisierend, dissipativ,

³⁹ siehe Zitat 29, pg. 278

⁴⁰ E. Lorenz, Deterministic Nonperiodic Flow, J. Atmos. Sci. 20 (1963)130).

⁴¹ F. Takens, in "Dynamical Systems and Turbulence", Eds. D.A. Rand, L.S. Young, Lect. Notes in Math. 898, Springer, Berlin 1981, pg. 366

durchläuft eine Reihe von Instabilitäten und kann – wie H. Haken zeigte⁴² – durch ein den Lorenzgleichungen analoges Differentialgleichungssystem beschrieben werden.

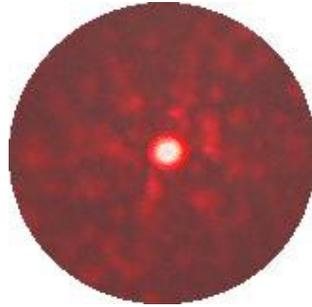


Abb. 8: Der Helium-Neon-Laser als offenes elektromagnetisches System fern vom thermodynamischen Gleichgewicht

Die Lösungen in Form von theoretischen Zeitreihen und Attraktoren lassen sich mit experimentellen Methoden testen – sie zeigen in beeindruckender Weise Übereinstimmung⁴³. Aber auch offene chemische und biochemische Systeme, deren Reaktionskomponenten miteinander u.a. auch nichtlinear vernetzt sein können, zeigen ein analoges dissipatives, Instabilitäten durchlaufendes Verhalten, das unter bestimmten Bedingungen auch chaotisch werden kann. Schöne Beispiele dafür sind die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion⁴⁴ (als Teil des biochemisch wichtigen Krebszyklus), die Glykolyse⁴⁵ (der anaerobe Abbau von Glucose zu Lactat) und die katalytische Oxydation von NADH^{46, 47} - alle drei dissipativen Systeme sind fundamentale biochemische Reaktionen an der Wurzel von Lebensprozessen.



Abb. 9: Ein offenes chemisches System fern vom Gleichgewicht: die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion

⁴² H. Haken; Phys. Lett. 53 A (1975) 77

⁴³ C.O. Weiß, R. Vilaseca: Dynamics of Lasers; VCH-Verlags-GmbH, Weinheim 1991

⁴⁴ A.M. Zhabotinski; Oscillatory processes in biological and chemical systems, Science Publ., Moskau 1967

⁴⁵ A. Goldpeter, R. Caplan; Ann. Rev. Biophys. Bioeng. 5 (1976) 449

⁴⁶ L.F. Olsen, H. Degn, Oscillatory Kinetics of the Peroxidase-Oxidase Reaction in an Open System. Biochim. Biophys. Acta 523 (1978) 321

⁴⁷ L.F. Olsen, L.L. Hofmann-Frisch, W. M. Schaffer: The Peroxidase-Oxidase Reaction: A Case for Chaos in the Biochemistry of the Cell; in: G. Baier, M. Klein A Chaotic Hierarchy, World Scientific, Singapore 1991

Alle diese offenen Systeme fern vom Gleichgewicht zeigen unter bestimmten Bedingungen Instabilitäten: nach einer dynamischen Phase der Stabilität einzelner Zeitreihen bzw. der Attraktor-Trajektorie (d.h. die Übereinanderlegung aller Zeitreihen im Zustandsraum des Systems) erfolgt durch Änderung eines Kontrollparameters (etwa durch Änderung des Temperaturgradienten in der Benard-Instabilität) ein Übergang in einen anderen Systemzustand, der nicht determiniert, d.h. genau bestimmt werden kann. Im Falle der Benard-Instabilität geht es etwa darum, ob die nach einer laminaren, zeitunabhängigen Bewegung einsetzende laminare, periodische Strömung in den Benard-Zellen im Uhrzeigersinn oder entgegengesetzt laufen wird. Beide Möglichkeiten sind von vornherein gleich wahrscheinlich. Dennoch muss das System eine Entscheidung treffen, um wieder in einen stabilen Zweig zu münden. Dabei handelt es sich um eine Entscheidung, eine sogenannte Bifurkation, die schon von kleinsten Schwankungen bzw. Fluktuationen aus der Umwelt oder aus dem System selber beeinflusst werden kann. Durchläuft das offene System fern vom Gleichgewicht im Laufe seines Daseins immer wieder neue Instabilitäten, so entwickelt es allmählich ein immer komplexeres Verhalten: es evolviert !!!

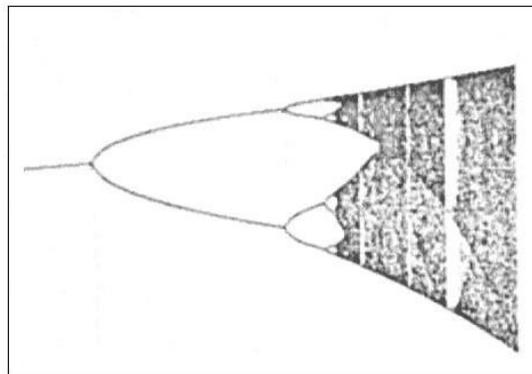


Abb. 10: Bifurkationsverhalten eines nichtlinearen Systems

Ein zwar nur grober Überblick über die Eigenschaft und die Dynamik von Instabilitäten in offenen Systemen fern vom thermodynamischen Gleichgewicht – zu denen letztlich auch alle biologischen und ökologischen Systeme gehören – kann im Rahmen der Mathematik komplexer Systeme erfolgen, zu der vor allem die „Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme“ und die „Fraktale Geometrie“ zählen. Zwecks passender Darstellung dieser systemorientierten mathematischen Disziplin, die weit über die Physik und Chemie hinausreicht, wird dabei zwischen deterministischen und stochastischen Systemen unterschieden.

3. Prinzipien der Biologie und ihre Bedeutung für die Biophysik

Statements einiger Biologen

Wovon handelt die Biologie? Was sind ihre Methoden? Dazu sollen vorerst einige Biologen zu Wort kommen, die diese Fragen auf ihre Weise zu beantworten versuchen. In einem traditionellen akademischen Lehrbuch der Biologie findet man in der Einführung unter anderem folgende Statements⁴⁸, die im folgenden in geänderte Reihenfolge wiedergegeben sind: „Die Biologie untersucht, beschreibt und analysiert die Strukturen und Funktionen der Organismen. Die Lebenserscheinungen sind letztlich regulierte Reaktionen der Biomoleküle. Lebewesen sind diejenigen Naturkörper, die Nukleinsäuren und Proteine besitzen und imstande sind, solche Moleküle selbst zu synthetisieren. Die hohe Komplexität der Regelung von Veränderungen der Molekülaggregate setzt Ordnungsprinzipien auf allen Organisationsstufen (Zellen, Organe) innerhalb des Organismus voraus. Darauf beruhen die komplexen Strukturen, die ... in einer Hierarchie von Funktionsbeziehungen entstanden sind. Physikochemisch betrachtet stellt ein Organismus, und auch jede einzelne Zelle, ein offenes System im Sinne der Thermodynamik dar. Zur Leistung von Arbeit und zur Erhaltung der komplexen Struktur muss ein Organismus im Zustand des Fließgleichgewichtes erhalten werden. Organismen sind durch eine relativ hohe Konstanz ausgezeichnet; diese ist durch die hohe Treue bedingt, mit der die DNA als Träger der Erbinformation repliziert wird.“

Etwas differenzierter zu diesem Thema äußert sich der Biologe und Nobelpreisträger K. Lorenz⁴⁹: „Jeder Versuch, einen lebenden Organismus naturwissenschaftlich zu verstehen, setzt die Beantwortung zweier Fragen voraus, der historischen und die ursächlichen Frage: Auf welchem Wege kam das lebende System so und nicht anders zustande? Welche Wechselwirkungen zwischen den Strukturen des Systems, so wie es heute ist, verursachen die Leistungen, die an ihm zu beobachten sind? Die erste Frage ist der Physik überhaupt fremd. Die zweite interessiert die Physiker nur zum Auffinden allgemeiner Gesetzmäßigkeiten. Physiker sind an einem konkretem System und seiner Struktur nicht um ihrer selbst willen interessiert. Biologen müssen die Struktur der betreffenden Systeme genau kennen. Das heißt aber nicht, dass der Weg des Biologen nicht auch in die gleiche Richtung wie der des

⁴⁸ G. Czihak, H. Langer, H. Ziegler: Biologie, Springer-Verlag 1981

⁴⁹ K. Lorenz: Das Wirkungsgefüge der Natur, Piper 1983

Physikers geht. Jede wissenschaftliche Analyse schreitet vom Speziellerem zum Allgemeinerem vor. Zu dieser Zurückführung des Beobachteten auf allgemeine Gesetzmäßigkeiten bedürfen wir aber der Einsicht in die Struktur, in den ungeheuer komplexen Aufbau, in dem die Elementarvorgänge zur Systemeinheit integriert sind. Vom Physiker unterscheiden wir uns in der Zentrierung unseres Interesses: ihn interessiert nur das allgemeine Gesetz, uns aber zumindest ebenso die spezielle Struktur, in der es sich auswirkt“

Chemische Evolution, Mutation-Selektion, Autokatalyse, Hyperzyklen

Die kleinste lebende Einheit ist die Zelle. Einfachste Lebewesen sind die Prokarioten, die nur aus einer einzigen Zelle bestehen, schon vor 3,5 Milliarden Jahren z. B. als Stromatolithen nachweisbar sind und beinahe 2 Milliarden Jahre die Biosphäre beherrschten.

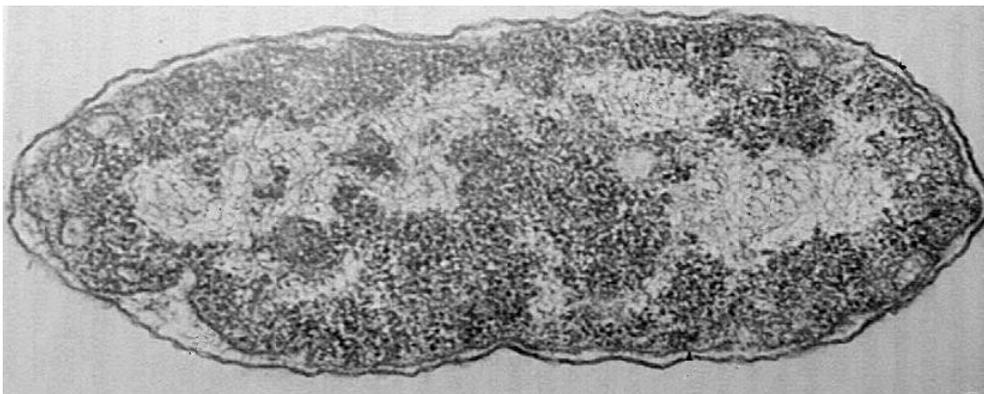


Abb.11: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Prokarioten, des Bakteriums *Rhodospseudomonas spec.*

Verglichen mit einem beliebigen chemischen System ist ein Prokariot jedoch bereits ein hochkomplexer Organismus aus einer riesigen Anzahl von Molekülen, die im Bereich der Biochemie untersucht werden. Prominente Vertreter von Biomolekülen sind Proteine, Desoxiribonukleinsäuren, Polysaccharide oder Lipide, allesamt in der Zelle eingebettet im Zellwasser. Heute weiß man über die einzelnen Strukturen dieser Biomoleküle durch die epochalen Arbeiten großer Biochemiker und Biologen wie L. Pauling, E. Chargaff oder J. Watson recht genau Bescheid⁵⁰.

Die Erkenntnisse über die Reaktionsmöglichkeiten der Biomolekül-Ensembles hingegen sind jedoch überwiegend im Reagenzglas unter Bedingungen des thermodynamischen Gleichgewichtes gewonnen worden. Organismen aber sind offene Systeme, die sich nicht in

⁵⁰ Molekulare Biophysik

diesem Gleichgewicht befinden, weshalb die Reaktionsprozesse ihrer Biomoleküle räumlich und zeitlich anders als im Reagenzglas verlaufen – sie wären ansonst chemische Reaktionen toter Systeme !!!

Das wissenschaftliche Studium der Entstehungsgeschichte der Prokaryonten von ihren Vorstufen, den dissipativen chemischen Systemen, hin zu dissipativen Biosystemen muß daher im Sinne des Evolutionsprinzips der Biologie so erfolgen, dass nicht nur die dazu notwendigen Erkenntnisse aus Physik und Chemie samt Biochemie berücksichtigt werden, sondern vor allem die Prinzipien der Irreversibilität und Evolution mitein fließen müssen.

Die Hauptelemente, die für die Lebensentstehung wichtig waren, sind Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff, aber auch Magnesium, Schwefel, Phosphor, Mangan, Eisen, Kupfer, Zink und Molybdän, die nachweislich in interstellaren Nebeln vorkommen. Aus diesen bildeten sich u.a. die einfachen Moleküle Wasserstoff, Wasser, Ammoniak und Methan, die vor etwa 4,5 Milliarden Jahren vermutlich auch auf unseren Planeten Erde vorherrschten und die – mit Ausnahme von Wasser – teilweise auch heute noch die Atmosphären der äußeren Planeten bilden. Wie konnten die Lebewesen in einer derartigen Uratmosphäre entstehen?

M. Eigen, Physikochemiker und Nobelpreisträger, der sich gemeinsam mit dem theoretischen Chemiker P. Schuster große Verdienste um die Erhellung dieser Evolution von biochemischen zu biologischen Systemen erworben hat, meint dazu folgendes: „Der 23jährige Stanley Miller war damals Student bei Urey. Er hat Funkenentladungen in einer solchen künstlichen Uratmosphäre produziert, Schockwellen, alles Mögliche, was damals an Energieflüssen möglich war. Damit hat er gezeigt, dass die Bausteine der heutigen biologischen Moleküle entstehen, die Bausteine der Eiweißstoffe, die Aminosäuren, und die Bausteine der Nucleinsäuren, die Nucleotide – und zwar nach rein chemischen Bildungsgesetzen und in einer Häufigkeit, die mit jener übereinstimmt, die man heute in Meteoriten findet. Das heißt, unter Weltraumbedingungen bilden sich diese Substanzen bei Energiestrahlung^{51, 52}„

Bei Aminosäuren und Nucleotiden handelt es sich zwar um interessante Moleküle, man kann sie aber noch nicht als Leben bezeichnen. Was hinzukommen muß, ist eine ganz wichtige

⁵¹ M. Eigen in „Das Leben ein Spiel“ (Hsg. F. Kreuzer), Deuticke-Verlag, Wien 1981, pg. 73

⁵² S.L. Miller, H.C. Urey: Organic compound synthesis on the primitive earth; Science 130 (1959) 245-251

Eigenschaft, nämlich die Fähigkeit von Molekülen, sich zu reproduzieren. Das Überraschende dabei ist aber, dass es sich hier nicht um eine Eigenschaft handelt, die nur Biomolekülen zukommt, sondern diese Fähigkeit zur Autokatalyse ist eine Eigenschaft nichtlinearer dynamischer Systeme. Ein Beispiel dafür aus der Physik ist die Verstärkung, d.h. die zunehmende Produktion kohärenter Photonen in einem Laser. Dies trifft aber auch auf anorganische chemische Systeme zu. Dazu P. Schuster: „Alles geht fließend vor sich. Es gibt diese Eigenschaft (der Reproduktion) zu einem gewissen Grad auch in der anorganischen Chemie: komplizierte Reaktionszyklen können die Eigenschaft haben, sich selber zu verstärken – man nennt das autokatalytisch. Sie ist allerdings in der anorganischen Chemie eine Kuriosität, eine wichtige Kuriosität. An der Schwelle zum Leben hat es aber eine Klasse von Molekülen gelernt, sich sozusagen obligat zu vermehren: und das sind die Nukleinsäuren (RNA, DNA)⁵³“. Die Geschichte der Entdeckung der polymeren, informationstragenden Struktur der Nukleinsäuren liest sich wie ein Kriminalroman, und so wurde sie auch von J.D. Watson in dem Büchlein „Die Doppelhelix“ dargestellt. Diese epochale Entdeckung wäre ohne die gründliche Vorarbeit von dem österreichischen Biochemiker E. Chargaff, der durch mühevoll langjährige Analysen das Prinzip der Komplementarität der Basenpaare aufklärte, und ohne die geniale Idee des Biophysikers F. Crick, der die physikalischen Methoden der Röntgenstruktur-Analyse zur Aufklärung der DNA benutzte, vermutlich kaum so rasch erfolgt.



Abb.12: Laue-Aufnahmen der DNA (links erste, historische Aufnahme mit Röntgenstrahlen; rechts moderne Aufnahme mit Synchrotronstrahlung)

Die Wahrscheinlichkeit der Bildung dieser sich selbst reproduzierenden Biomoleküle ist sehr gering, eine Möglichkeit einmal Realisiertes nicht zu vergessen besteht nun darin, derartige Moleküle abzulesen und zu kopieren. Und genau das tun die Nukleinsäuren. Sie sind damit zur Grundlage der Evolution geworden. Die Nukleinsäuren können, was gut ist, bewahren, bis

⁵³ P. Schuster in „Das Leben, ein Spiel“ (Hsg. F. Kreuzer), Deuticke-Verlag, Wien 1981, pg. 75

sie etwas Besseres haben. Woher kommt diese physikalisch-chemische Notwendigkeit, sich zu verdoppeln? Liegt eine solche in der Evolution überhaupt vor? Eine sehr einleuchtende Antwort darauf versucht R. Winkler-Oswatitsch, eine Mitarbeiterin von M. Eigen, zu geben: „Es ist kein aktiver Prozess, den die Moleküle sozusagen zielgerichtet durchmachen, sondern es ist ein passiver Prozess auf Grund der Umweltbedingungen, die vorherrschen (oder sich verändern). Ein Molekül vermehrt sich schneller, genauer, ‘lebt länger‘ und ist dann in höherer Prozentzahl vorhanden als die anderen, die diese Eigenschaft in geringerem Ausmaß aufweisen. Das ist nicht ein Prozess, der vom Molekül ausgeht, sondern das Molekül ist durch die Umweltbedingungen diesem Prozess ausgesetzt. Das, was sich am besten reproduziert, wird schließlich in der größten Zahl vorhanden sein⁵⁴“

Zur Notwendigkeit kommt nun in der Evolution als entscheidender Faktor der Zufall, der Irrtum hinzu. Das Ablesen und das Kopieren, d.h. die Reproduktion wird teilweise fehlerhaft sein: man nennt dies eine Mutation. Es ist nämlich eine physikalische Eigenschaft, dass sich die Moleküle nicht exakt kopieren können. „Es werden immer Mutanten gemacht, aber diejenigen, die sich schneller reproduzieren, sind es, die übrigbleiben. Mutanten sterben wieder aus, wenn sie sich nicht so schnell reproduzieren wie der vorherige Typus. Und das ist es, was unsere Theorie zeigt: wenn sie Selbstreproduktion und Mutation haben, das ist die Selektion eine daraus hervorgehende natürliche Konsequenz. So wie die Beschleunigung die Folge einer Kraft ist, ist Selektion dann eine Folge der Selbstreproduktion⁵⁵“

Nun könnte man meinen, dass die Chance zur Reproduktion proportional zur Menge der Information in Sequenzen der Nukleinsäuren bzw. zur Länge der DNA sei. „In der Begrenzung zeigt sich der Meister. Nukleinsäuren wachsen nicht über alle Maße hinaus, sondern müssen unterhalb einer kritischen Größe bleiben. Diejenigen, die sich begrenzt haben, können sich weiter reproduzieren, die anderen nicht. Das Leben konnte sich daher nur bis zu dieser Stufe entwickeln, die Informationsmenge in jedem Molekül ist begrenzt. Was zu klug war, also zuviel Information besaß, musste sterben. Hier war ein Grundproblem aufgetreten: um sich genauer zu replizieren, d.h. um eine genauere Maschine zu konstruieren, benötigt man mehr Information; und um mehr Information speichern zu können, braucht man eine genauere Maschine. Ein neues Konzept war erforderlich“.

⁵⁴ R. Winkler-Oswatitsch in „Das Leben, ein Spiel“ (Hrsg. F. Kreuzer), Deuticke-Verlag, Wien 1981, pg. 76

⁵⁵ siehe Zitat 44, pg. 77

Dieses neue Prinzip könnte darin bestehen, die Information, die in mehreren Informationsträgern gespeichert ist, gemeinsam zu nutzen, d.h. ein Netzwerk auszubilden, durch das die beteiligten Partner jeweils Zugriff auf die Information im anderen haben können. Da aber normalerweise Informationsträger miteinander konkurrieren und sich auch ein kleinster Unterschied derart verstärken kann, dass meist nur einer übrigbleibt, lautet die prinzipielle Frage, welcher Mechanismus Konkurrenten zur Kooperation zwingen kann. Die Antwort, die P. Schuster gab, war nicht nur logisch einsichtig, sondern sie war auch experimentell nachprüfbar: „Sie heißt gegenseitige Abhängigkeit. Bei zwei Partnern ist das relativ einfach – jeder muß irgend etwas produzieren, was der andere braucht. Wenn es mehr als zwei solcher Partner gibt, dann muss es eine zyklische Abhängigkeit sein⁵⁶“. Damit ist im Prinzip der Eigen-Schuster-Hyperzyklus definiert: „Bei der Entwicklung unserer Vorstellungen über derartige hyperzyklische Kopplungen zeigt sich der Vorteil der mathematischen Analyse, die frei vom konkreten Realbeispiel durchgeführt werden kann. Zusammen mit K. Sigmund von der Universität Wien konnte mit Hilfe topologischer Methoden gezeigt werden, daß die Notwendigkeit der Ausbildung eines solchen Zyklus zur Unterdrückung von Konkurrenz zwischen sich replizierenden Einheiten allgemeiner Natur ist. Dabei ist gleichgültig, ob die Einheiten hochentwickelte Organismen, Bakterien oder etwa kleine Moleküle sind⁵⁷“.

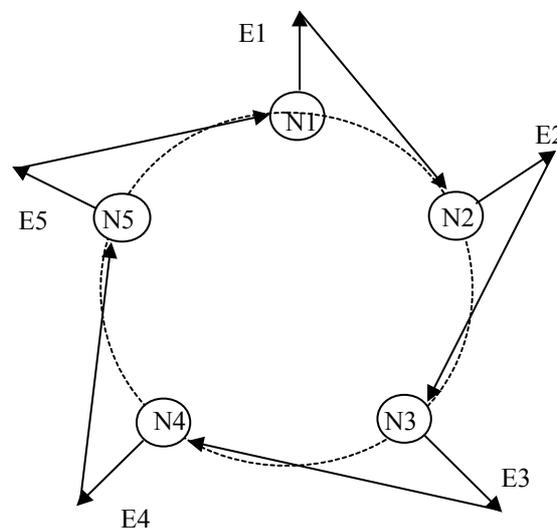


Abb.13: Prinzip eines Hyperzyklus aus 5 Nucleinsäuren (N) und 5 Enzymproteinen (E)

Der Hyperzyklus ist ein Minimalprinzip, dem es vorerst nicht um Realität geht. Es ist wie in der Thermodynamik, an deren Spitze Prinzipien wie das Prinzip der maximalen Entropie im Gleichgewicht, das Prinzip der minimalen Entropieproduktion nahe dem Gleichgewicht und das Prinzip der Instabilitäten fern vom Gleichgewicht stehen, die das Naturgeschehen regeln,

⁵⁶ siehe Zitat 46, pg. 79

⁵⁷ siehe Zitat 44, pg. 79

die aber nicht angeben, wie etwa eine konkrete Dampfmaschine gebaut werden muss. Die Theorie der Hyperzyklen ist neben dem Darwinsche Prinzip der Selbstreproduktion, Mutation und Selektion, das die Gesetzmäßigkeiten der Konkurrenz beschreibt, ein neues Prinzip, das die Gesetzmäßigkeiten der Kooperation einer über einzelne Moleküle hinausreichenden Evolution darstellt, die zum Aufbau solcher sich selbst reproduzierender Systeme wie lebende Zellen führt⁵⁸. Wie J. Hofbauer und K. Sigmund mit den Methoden dynamischer Systeme zeigen konnte, ist der allgemeine Hyperzyklus tatsächlich kooperativ⁵⁹. Einen stochastischen Zugang zur Evolution von Hyperzyklen eröffneten W. Ebeling und Mitarbeiter⁶⁰: „Wenn auch die Evolution beim Vorliegen entsprechender physikalischer Bedingungen gesetzmäßig und notwendig ist, so ist doch der im Einzelfall beschrittene Weg dem Zufall unterworfen. Aus diesem Grunde kann nur eine stochastische Theorie das Wesen des Evolutionsprozesses adäquat widerspiegeln“.

Von dem Stadium der Hyperzyklen an war die Richtung der präbiotischen Evolution festgelegt. Diese Hyperzyklen entwickelten sich wie dissipative Strukturen, nämlich evolutiv, und produzierten an instabilen Verzweigungspunkten irreversibel die Fülle präbiotischer Formen. Irgendwann kamen die Membranen aus Lipoproteinen hinzu, in denen sich die Replikationen der DNA geschützt vollziehen konnte: die ersten Bakterienzellen als autopoietische Systeme waren geboren.

Autopoiese und biologische Evolution

Der Begriff ‚Autopoiese‘ (griech. autos = selbst, poiein = machen) stammt von dem chilenischen Biologen H. Maturana, der gemeinsam mit seinem Fachkollegen F. Varela eine sehr kluge Definition von Lebewesen damit gab. Um nämlich lebende Systeme zu erklären, ist es nach Auffassung Maturanas notwendig und hinreichend, die Organisation einer Klasse von Einheiten zu definieren, welche eine Erscheinungswelt generiert, die von der für lebende Systeme charakteristischen Erscheinungswelt nicht unterscheidbar ist. Eine derartige Erscheinungswelt kann nach Maturana folgendermaßen beschrieben werden: „ Es gibt eine Klasse mechanistischer Systeme, in der jedes Element ein dynamisches System ist, das als Einheit durch Relationen definiert wird, welches es (das System) als ein Netzwerk von

⁵⁸ M. Eigen, P. Schuster: The Hypercycle; Springer-Verlag, Berlin 1979

⁵⁹ J. Hofbauer, K. Sigmund: Evolutionstheorie und dynamische Systeme; Parey Verlag, Berlin 1984, pg. 125-138

⁶⁰ W. Ebeling, A. Engel, R. Feistel: Physik der Evolutionsprozesse; Akademie-Verlag, Berlin 1990, pg. 239

Prozessen der Produktion von Bestandteilen konstituieren. Diese Bestandteile wirken einmal durch ihre Interaktionen in rekursiver Weise an der Erzeugung und Verwirklichung eben jenes Netzwerkes von Prozessen der Produktion von Bestandteilen mit, das sie selbst erzeugt. Sie bauen zum anderen dieses Netzwerk von Prozessen der Produktion von Bestandteilen als eine Einheit in dem Raum, in dem sie (als die Bestandteile) existieren, dadurch auf, daß sie die Grenzen dieser Einheiten erzeugen⁶¹. Es gelang Maturana im Jahre 1974 gemeinsam mit F. Varela und dem Informatiker R. Uribe auch, mit Hilfe von zellulären Automaten autopoietische Netzwerke zu simulieren⁶². Autopoietische Systeme werden in konkreten biologischen Strukturen verwirklicht, die an ihre Umgebung als offene Systeme ankoppeln und dabei Materie in Form von Nährstoffen und Energie in Form von Photonen austauschen, um ihre zyklische autopoietische Organisationsform zu bewahren. Was evolviert, ist nach Maturana nicht diese autopoietische Organisation, sondern es ist die konkrete biologische Struktur, welche immer komplexere Formen annimmt.

Die ersten Lebewesen waren prokaryontische Bakterien, die ihre Energie anfänglich aus der heißen Urerde bezogen, dann aber auch das Sonnenlicht zur Spaltung von Schwefelwasserstoff aus Vulkanen als erste photosynthetische Lebewesen nutzten. Andere, die blaugrünen Bakterien, spalteten danach das Wasser in der Photosynthese und erzeugten aus dem Kohlendioxid Zucker, in dem das Sonnenlicht gespeichert war. Sie erfanden auch die Sauerstoffatmung, indem sie bei Bedarf Zucker mittels des Sauerstoffes wieder oxidierten und damit die Energie für den Stoffwechsel aufbrachten. Das Prinzip der Kooperation, wie es schon in den Hyperzyklen zum Ausdruck kam, blieb auch in der weiteren Folge für den Selektionsvorteil bestimmend⁶³. Gewisse Bakterien gingen Synergien mit anderen ein und erschienen als Mitochondrien oder als Chloroplasten in der Evolution von Eukarionten, d.s. Zellen höher entwickelter Lebewesen mit einem eigenen Zellkern und sehr differenzierten Zellorganellen. Die Kooperation einzelner Zellen zu einem Verband aus mehreren Zellen bedeutete einen gewaltigen Evolutionsschub, den man sehr eindrucksvoll am Beispiel des Schleimpilzes als Auswirkung der Struktur nichtlinearer chemischer Systeme demonstrieren kann. Dieser Entwicklung zu Mehrzellern folgte dann die sogenannten kambrische Explosion, aus der u.a. die Vielfalt der Wirbeltiere und daraus der Säuger hervorging und die schließlich auch zur menschlichen Art führte.

⁶¹ H.R. Maturana: Erkennen – Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit, Vieweg, Braunschweig 1985, pg. 141

⁶² wie Zitat 54, pg. 160 - 169

⁶³ L. Margulis: Symbiosis in Cell Evolution, San Francisco 1993

Die Biologie ist demnach eine Wissenschaft, welche dynamische Vorgänge in der Evolution der Arten, aber auch im Lebenszyklus einzelner Individuen einer einzelnen Art betrachten muss. Nehmen wir als Beispiel die Evolution der menschliche Art. Menschen stammen ebenso wie andere Lebewesen von Prokaryonten ab, evolvieren zu Eukaryonten, dann zu Vielzellern, fischartigen Wirbeltieren, mutieren zum gehbefähigten Quastenflosser, erobern das Land, mutieren zu vierbeinigen Säugern, erheben sich vom Boden und münden als homo sapiens in die Gegenwart. Betrachtet man diese menschliche Evolution zellbiologisch, so lässt sich dieser Vorgang offenbar nur dann verstehen, wenn man die betrachteten Zellverbände nicht als statische Zwischenaufnahmen, sondern sich als sich permanent verändernde, dynamische Phasen betrachtet. Jeder mehrzellige Verband, also auch der eines Menschen, wächst aus einer befruchteten Zelle heran, teilt sich, erhält sich durch Teilung, pflanzt sich fort und altert allmählich bis hin zu seinem Tod. Während all dieser Phasen mit Ausnahme des Todes erneuern sich fast alle Zellen permanent unter der Herrschaft der genetischen Information und unter der wechselseitigen Kontrolle aller Zellen. Der makroskopische Ausdruck dynamischer molekularer und zellularer Vorgänge sind die dynamischen Formen des Phänotyps: vom Embryo über den Säugling, das Kind, den Jugendlichen und Erwachsenen zum Greis.

Phänotypen, Genotypen und Fraktale

Welche Gesetzmäßigkeiten bestehen nun zwischen der molekular-genetisch, zellulären Dynamik des Genotyps und der makroskopischen Dynamik des Phänotyps. Biologische Phänotypen sind im wesentlichen Fraktale, die man am ehesten durch die Prozedur ihrer Erzeugung definieren kann. Fraktale sind das Produkt der wiederholten Anwendung einer oder mehrerer Vorschriften (z.B. genetischer Code) auf das Anfangsprodukt und in der Folge auf das jeweilige Zwischenprodukt. Bäume oder Sträucher, aber auch der Säugling als Produkt der Embryogenese sind Beispiele dafür.

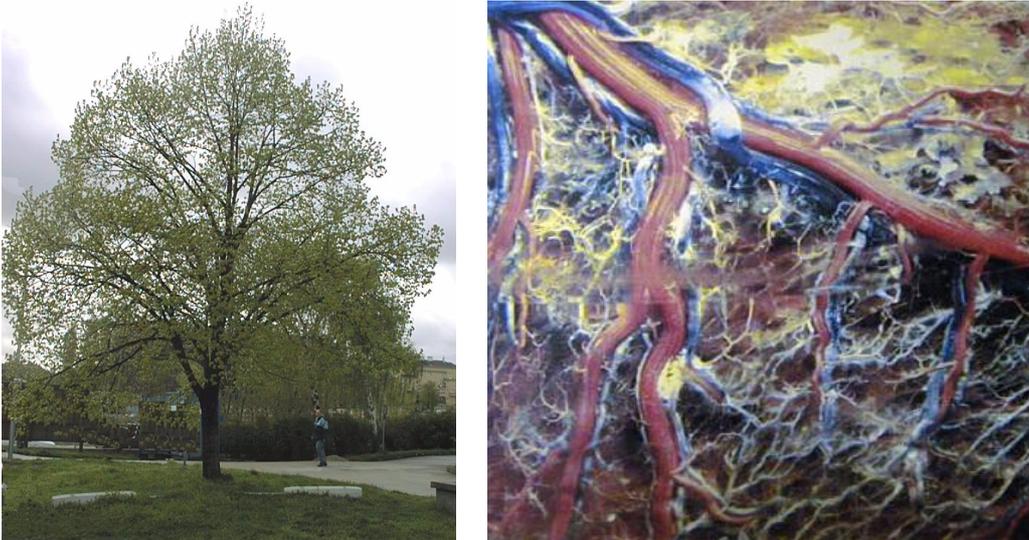


Abb.14: Ein realer Baum und Gefäßsystem als Beispiel für Fraktale

Organe wie Lunge, Gehirn oder Niere, wie das Nervengeflecht oder das Blutgefäßsystem sind weitere sehr anschauliche Beispiele für Fraktale. Besonders gut geeignet zur Illustration von Fraktalen sind Bäume und Farne. Ihre Formen sind nur verständlich, wenn man ihre iterativen dynamischen Bildungsprozesse betrachtet. Die Morphologie, neben der Physiologie ein wichtiger Bestandteil der Biologie, hat schon immer Ähnlichkeitsvergleiche zwischen den verschiedenen biologischen Formen angestellt und versucht, deren Umwandlungen bzw. Metamorphosen durch die den Formen innewohnenden Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Ähnlichkeitsbetrachtung können besonders gut mittels affiner Transformationen durchgeführt werden⁶⁴.

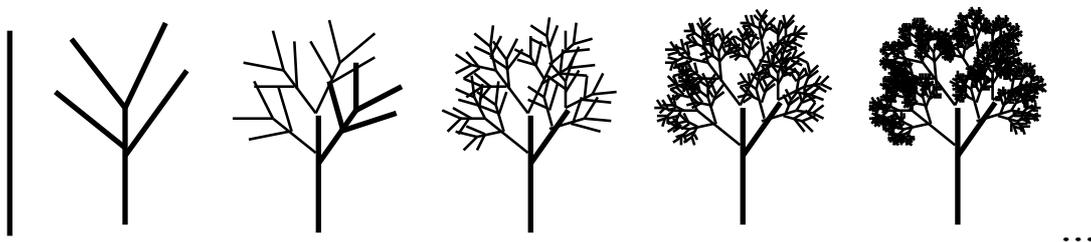


Abb. 15: Die Entstehung eines baum-ähnlichen Fraktals durch einen iterativen Prozess

Prinzipien der Biologie

⁶⁴ M. Barnsley, *Fractals everywhere*, Academic Press, Boston 1988

Wir wollen nun die wichtigsten Prinzipien der Biologie und ihre Bedeutung für die Biophysik zusammenfassen. (Zur Erinnerung - Prinzipien sind unbeweisbare Annahmen, aus denen durch logische Deduktion konkrete Sätze ableitbar sind, die an der Erfahrung überprüft werden können). Diese Prinzipien sind vor allem:

- Die Bestandteile der organischen Welt sind die gleichen wie die der anorganischen Welt, nämlich die chemischen Elemente, von denen einige besonders essentiell für die Lebewesen sind: nämlich Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Magnesium, Phosphor, Schwefel, Mangan, Eisen, Kupfer, Zink, Molybdän. Die Zusammensetzung dieser Atome zu organischen Molekülen erfolgt nach den Gesetzen der Physik und Chemie.
- Lebende Systeme sind offene Systeme, gehorchen daher den Gesetzen der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik offener Systeme, die durch Irreversibilität, Instabilität, Kreativität und Evolution gekennzeichnet sind. Die Organisation von Biomolekül-Ensembles erfolgt daher nicht nach den statistischen Gesetzen der maximalen Entropie im thermodynamischen Gleichgewicht, sondern nach den stochastischen Gesetzen der Nichtgleichgewichts-Thermodynamik.
- Die Synthese biologisch essentieller Elemente unter Einfluss von UV-Strahlung, Licht und Wärme (aus dem Erdinnern) führte auf der Früherde zu den Bausteinen (Aminosäuren, Nukleotiden, Fettsäuren, etc) der wichtigsten biologischen Polymere (Proteine, Nukleinsäuren, Lipoproteinen, etc).
- Diese monomeren Bausteine polymerisierten zu langkettigen Biomolekülen, von den sich die Nukleinsäuren durch Autokatalyse zu replizieren vermochten. Nukleinsäuren haben den Code ihrer Replikation als genetische Information sequentiell gespeichert und mutierten diesen durch physikalisch bedingte Einflüsse (thermische Fluktuationen, Unschärfeprinzip). Selektion und Konkurrenz mutierter Nukleinsäuren folgen aus dem Faktum der Autokatalyse und Mutation. Die erhöhten Vermehrungschancen erfolgreicher Mutanten sich nämlich mittels nichtlinearer Populationsdynamik bis zu einem gewissen Grade logisch begründet.
- Übersteigt die genetische Information diesen gewissen Grad, d.h. ist der Aufwand zur Replikation zu groß, verschwinden die Selektionsvorteile. Kooperieren hingegen zwei oder mehrere Mutanten in Hyperzyklen derart, daß sich ihre Informationen zur wechselseitigen Replikation ergänzen, so gewinnen sie gegenüber der Konkurrenz an

Selektionsvorteilen, was sich ab dem gewissen Grad als denk- und naturnotwendig erweist.

- Hyperzyklen von Nukleinsäuren, Proteinen, Lipoproteinen, etc. führten zu ersten prokariotischen Zellen, deren Organisationseinheit autopoietisch ist.
- Symbiosen prokariotischer Phagozyten (Aufnahme des Konkurrenten, ohne ihn zu verdauen; sexueller Austausch von haploider Konkurrenten-DNS) mit anderen Zellen brachten gewissen Einzellern Selektionsvorteile und führten allmählich zu den differenzierteren Eukarionten mit Zellkern und Zellorganellen.
- Der Übergang von Einzellern zu Mehrzellern mit Arbeitsteilung lässt sich am Beispiel des Schleimpilzes sehr gut demonstrieren: die Einzelzellen unterliegen im Falle von Nahrungsmangel der Selbstorganisation – d.h. sie schütten dabei AMP aus und organisieren sich spiralförmig wie chemische offene Systeme in Raum und Zeit. Die einigende Kraft hin zu Mehrzellern ist wieder die Synergie, d.h. das Zusammenwirken ehemaliger Konkurrenten.
- Der biologische Formenreichtum, der ab dem Kambrium entspringt, lässt sich nur dynamisch verstehen: System, Form und Entwicklung sind untrennbar verbunden. Die Logik dahinter ist vorwiegend die Logik der nichtlinearen dynamischen Systeme mit ihren deterministischen und stochastischen Zweigen und die Logik der fraktalen Geometrie. Aus Irreversibilität und Entscheidungen zwischen Konkurrenz und Kooperation an Verzweigungspunkten der Evolution entspringen Informationsspeicherung und Kreativität komplexer Systeme. Aus dieser kooperierenden bzw. synergetischen Tendenz ist auch die Erfindung der menschlichen Sprache zu begreifen.

4. Prinzipien nichtlinearer dynamischer Systeme und ihre Bedeutung für die Biophysik

Evolutionsgleichungen am Beispiel der Lorenz-Gleichung

In den Naturwissenschaften, insbesondere in der Physik, versucht man die Fülle der Erscheinungen in der Natur von einigen wenigen Grundgesetzen bzw. *Prinzipien* abzuleiten. So beruht z.B. die Welt aller chemischen und biologischen Erscheinungen vor allem auf den Grundgesetzen der Elektrodynamik, den sogenannten Maxwellgleichungen, aber auch auf den Grundgesetzen der Quantentheorie. Wir wissen heute, dass diese Prinzipien allein aber nicht ausreichen, um die bunte Vielfalt des Lebendigen und des Ökologischen zu verstehen. Für ein Verständnis des Formenreichtums in der belebten und unbelebten Natur und für ein Begreifen der Entwicklung hin zu immer komplexeren Strukturen und Prozessen benötigen wir vor allem die Prinzipien der Systemtheorie.

Die Art und Weise, wie sich die Systemgrößen A_1, \dots, A_n eines offenen Systems in Abhängigkeit vom Ort r und im Laufe der Zeit t verändern, ist von System zu System verschieden und wird durch ein System von raum- und zeitabhängigen stochastischen Entwicklungsgleichungen beschrieben. Fasst man alle möglichen Systemgrößen in einem Vektor $\mathbf{A} = (A_1, \dots, A_n)$ zusammen, so lassen sich die Prinzipien der Dynamik eines offenen Systems durch die folgende Beziehung formulieren⁶⁵:

$$\frac{d\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{A}, \nabla, \sigma) + \mathbf{f}$$

Das Symbol $d\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)/dt$ auf der linken Seite der Gleichung beschreibt die zeitliche Entwicklung der raum- und zeitabhängigen Systemgrößen $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$. Die rechte Seite der Gleichung faßt alle Einflüsse zusammen, die diese zeitliche Entwicklung bestimmen: \mathbf{F} ist eine nichtlineare Funktion des momentanen Zustandes unseres Systems \mathbf{A} , das Zeichen ∇ soll symbolisieren, daß unser System keineswegs räumlich homogen ist, sondern sich sein Zustand von Ort zu Ort ändern kann. Die Offenheit unseres Systems bringen wir durch einen Satz von Kontrollparametern σ zum Ausdruck. Das Symbol \mathbf{f} bezeichnet zufällige Einflüsse auf unser

⁶⁵ H. Haken, A. Wunderlin: Die Selbststrukturierung der Materie, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1991

System, durch die auch die Möglichkeit der Evolution zugelassen wird. Ohne den Einfluß von f entwickelt sich ein System deterministisch, mit f zufällig bzw. stochastisch.

Als einfaches, jedoch sehr eindrucksvolles Beispiel dazu betrachten wir wieder die Benard-Zellen als offenes Flüssigkeitssystem, wobei wir von räumlichen Abhängigkeiten ∇ und zufälligen Einflüssen f absehen wollen. Die zugehörigen *Lorenz-Gleichungen* wurden von E. Lorenz mit Hilfe hydrodynamischer und thermodynamischer Gesetze 1963 formuliert⁶⁶:

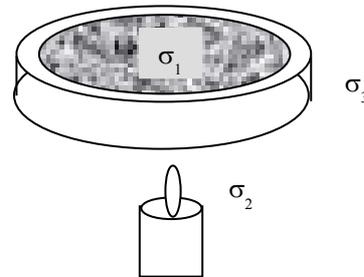
$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{A}, \sigma)$$

Schreibt man den Vektor \mathbf{A} der Systemgrößen wieder in Komponenten $\mathbf{A} = (A_1, A_2, A_3)$ an, so lauten die Lorenzgleichungen

$$\frac{dA_1}{dt} = -\sigma_1 A_1 + \sigma_1 A_2$$

$$\frac{dA_2}{dt} = \sigma_2 A_1 - A_2 + A_1 A_3$$

$$\frac{dA_3}{dt} = A_1 A_2 - \sigma_3 A_3$$



A_1 repräsentiert die Rotationsgeschwindigkeit der Benard-Rollen (die mit Bolometern gemessen werden kann), A_2 die Temperaturdifferenz zwischen aufsteigenden und abfallenden Flüssigkeitselementen und A_3 den vertikalen Temperaturgradienten. Der Umwelt-Kontrollparameter σ_2 regelt die Zufuhr von Wärmeenergie für das Flüssigkeitssystem, σ_1 sagt, um welche Flüssigkeit es sich handelt (d.h. bestimmt die Viskosität der Flüssigkeit) und σ_3 kennzeichnet die Form der Petrischale, in welche die Flüssigkeit eingefüllt wird.

Folgerungen und Attraktoren (am Beispiel der Lorenz-Gleichungen)

Eine der auffallendsten Gesetzmäßigkeiten bzw. *Folgerungen*, die man aus den Prinzipien der Systemtheorie logisch deduzieren kann - man löst dazu die Systemgleichungen für unterschiedliche Systeme, und zwar meist nur numerisch mit Hilfe eines Computers -

⁶⁶ E. Lorenz: Deterministic Nonperiodic Flow, J. Atmos. Sci. 20 (1963)130).

besteht darin, dass sich die Dynamiken unterschiedlicher Systeme (z.B. mathematische, physikalische, chemische, biologische, soziologische oder ökologische Systeme) zeitlich und räumlich analog entwickeln können. Die Dynamik eines offenen Systems ist bestimmt, wenn man die zeitliche und räumliche Entwicklung des Systemvektors, die sogenannte Trajektorie $A = A(r, t)$, angeben kann; graphisch wird die *Dynamik im Zustandsraum* des Systems dargestellt, dessen Achsen den Komponenten A_1, \dots, A_n von A entsprechen. Eine Trajektorie $A = A(t)$, die nur von der Zeit abhängt, sieht in einem dreidimensionalen Zustandsraum A_1, A_2, A_3 beispielsweise folgendermaßen aus

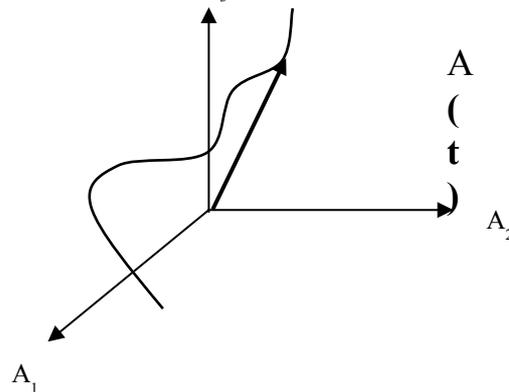


Abb.6: Der Zustandsraum eines offenen Systems wird beispielsweise aus den drei Systemgrößen A_1, A_2, A_3 aufgespannt, seine gewundene Trajektorie $A(t)$ beschreibt die Dynamik des Systems im Laufe der Zeit t

Diejenigen dynamischen Systemzustände, denen Trajektorien des Systems nach einiger Zeit zustreben und dort auch verbleiben, nennt man *Attraktoren*. Folgende typische Attraktoren finden sich häufig in offenen Systemen

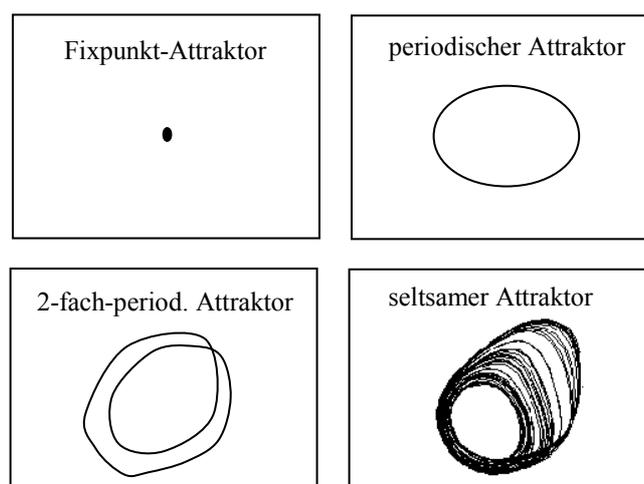


Abb.17: Typische Systemzustände bzw. Attraktoren, zu denen es ein offenes System zieht: Fixpunkt (oben li), periodischer Attraktor (oben re), 2-fach-periodischer Attraktor (unten li), seltsamer Attraktor (unten re)

Als Beispiele für Attraktoren im Zustandsraum ziehen wir wieder das offene System der „Benard-Zellen“ samt deren zugehörige Lorenz-Gleichungen heran. Die Systemgrößen A_1 , A_2 , und A_3 spannen den Zustandsraum für dieses System auf, wie die folgenden Abbildungen zeigen. Im linken Bild strebt die Dynamik des Systems einem Fixpunkt zu, im mittleren Bild liegt die Dynamik des Systems auf einem periodischen Attraktor, im rechten Bild sieht man den berühmten seltsamen Lorenz-Attraktor. Jeder dieser Attraktoren, der eine ganz bestimmte Dynamik des offenen Flüssigkeitssystems repräsentiert, ist durch die jeweiligen Kontrollparameter in den Lorenz-Gleichungen charakterisiert.

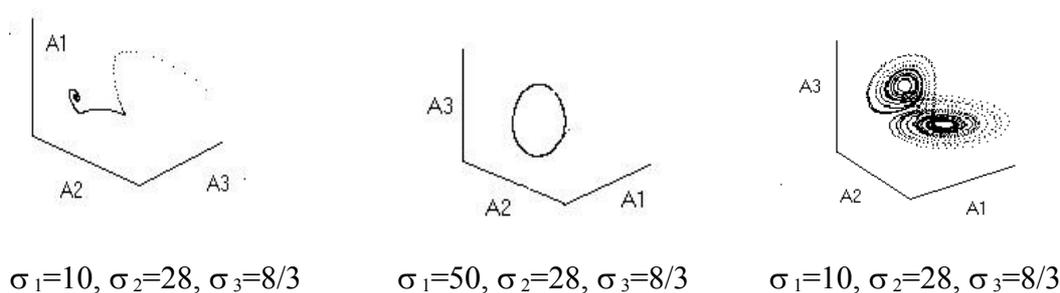


Abb.18: Drei verschiedene Attraktoren samt Kontrollparameter des gleichen offenen Flüssigkeitssystems (Benard-Zellen bzw. Lorenz-Gleichungen) : Fixpunkt (li), periodischer Attraktor (Mitte), seltsamer Attraktor (re)

Wir wollen das bisher zur Systemtheorie Gesagte zusammenfassen: Unter einem System versteht man ein geordnetes Zusammenfassen von Objekten unserer Erfahrung oder unseres Denkens unter einem einheitlichen Gesichtspunkt (griech. *systema*). Man unterscheidet gewöhnlich zwischen geschlossenen und offenen Systemen. Geschlossene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt nur Wärme aus und bewegen sich auf einen Zustand des Wärmeleichgewichtes zu. Beispiele dafür sind abgestorbene Biosysteme. Offene Systeme tauschen mit ihrer Umwelt Materie und Energie aus. Um diesen Durchfluss von Materie und Energie optimal zu vollziehen, begeben sich offene Systeme je nach Art und Größe ihrer Kontrollparameter durch einen Prozess der Selbstorganisation in dynamische Zustände, die kohärent sind, im Zustandsraum des Systems einfach oder mehrfach oszillieren, oder aber einem seltsamen Attraktor folgen können.

Die Prinzipien, auf denen offene Systeme beruhen, werden durch nichtlinear vernetzte Systeme von deterministischen oder stochastischen Differentialgleichungen dargestellt.

Diese Gleichungen gelten wissenschaftsübergreifend für offene Systeme in vielen Bereichen: im Bereich der Natur, der Technik, der Ökologie, der Ökonomie oder der Gesellschaft.

Durch logische Deduktion mittels analytischer oder numerischer Methoden werden aus diesen Prinzipien für offene Systeme spezielle Gesetzmäßigkeiten bzw. Sätze abgeleitet, deren Ergebnisse an der Erfahrung überprüft werden können. Zur Illustration dieser Begriffswelt der Systemtheorie wurde ein einfaches, aber sehr eindrucksvolles Beispiel herangezogen: ein offenes Flüssigkeitssystem, das sich zu merkwürdigen makroskopischen Strukturen, den sogenannten „Benard-Zellen“, hin entwickelt und das durch die nichtlinear vernetzten Lorenz-Gleichungen mathematisch beschrieben werden kann. Die Lösungen dieser Gleichungen zeigen im Zustandsraum die typischen dynamischen Zustände und Attraktoren offener Systeme.

Trajektorien, Fixpunkte, Grenzyklen (am Beispiel der Logistischen Evolutionsgleichung)

Der Beginn einer systematischen Untersuchung offener Systeme besteht darin, die dynamischen Entwicklungs- bzw. Evolutionsgleichungen aufzustellen. Dies ist keine leichte Aufgabe, sie fällt in den Bereich einer speziellen Wissenschaftsdisziplin. Naturwissenschaftler, Techniker, Soziologen oder Ökologen müssen sich dazu in die Grundlagen der Theorie dynamischer Systeme einarbeiten. Unter Beiziehung grundlegender fachspezifischer Kenntnisse und modellhafter Ansätze wird dann versucht, für das jeweils betrachtete offene System die Systemgrößen A_1, \dots, A_n bzw. den Zustandsvektor $\mathbf{A} = (A_1, \dots, A_n)$ zu bestimmen und deren Vernetzungen in den Entwicklungsgleichungen zu formulieren. Sehen wir von räumlichen Inhomogenitäten und zufälligen Fluktuationen ab, so lauten diese Gleichungen wie schon im vorigen Abschnitt dargestellt

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{A}, \sigma)$$

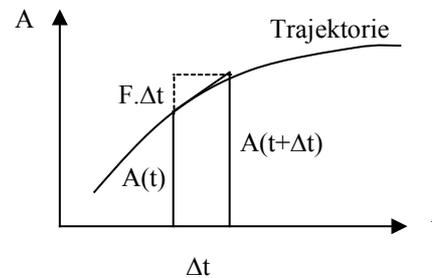
Zweck der Anwendung der theoretischen Methoden der Systemtheorie ist es, die zeitliche Entwicklung der Trajektorie $\mathbf{A} = \mathbf{A}(t)$ im Zustandsraum zu berechnen, da man damit die dynamische Entwicklung eines offenen Systems kennenlernt.

Zuerst soll gezeigt werden, wie man den zeitlichen Verlauf einer Trajektorie mit einfachen numerischen Methoden bestimmen kann, wie es schon Newton und Leibniz

vorexerzierten. Dazu betrachten wir nur eine einzige Systemgröße A , weiter anstelle des infinitesimalen Zeitelementes dt nur endliche Zeitintervalle Δt und eine endliche Zunahme $\Delta A = A(t+\Delta t) - A(t)$ der Systemgröße. Gibt man $F(A, \sigma)$ sowie einen Startwert $A(t)$ vor, so ist man imstande, den auf $A(t)$ nachfolgenden Wert $A(t+\Delta t)$ der Systemgröße mit folgender Regel zu bestimmen:

$$\frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} = F(A, \sigma)$$

$$A(t + \Delta t) = A(t) + F(A, \sigma) \cdot \Delta t$$



Wendet man diese Regel schrittweise immer wieder an (man nennt dies Iteration), so findet man die zeitliche Entwicklung bzw. die Trajektorie der Systemgröße A . Wir nehmen nun auch noch als sehr bequemes Zeitelement $\Delta t = 1$ an und schreiben für $A(t) = A_t$ sowie für $A(t+\Delta t) = A_{t+1}$. Dann lautet unsere Regel für das Auffinden einer Trajektorie

$$A_{t+1} = A_t + F(A_t, \sigma)$$

Als eindrucksvolles Beispiel betrachten wir die einfache, aber sehr grundlegende *Logistische bzw. Ökologische Evolutionsgleichung* einer Population, deren Größe relativ ist (d.h. Wert liegt zwischen 0 und 1) und die wir mit x_t bezeichnen wollen. Gefragt ist die zeitliche Entwicklung der relativen Population x_t bzw. die Trajektorie, gefragt sind aber vor allem die unterschiedlichen Attraktoren, zu denen es die Trajektorien in Abhängigkeit vom Kontrollparameter $\sigma =: r$ zieht.

$$x_{t+1} = x_t + F(x_t, r) = r \cdot x_t \cdot (1 - x_t)$$

Dabei ist $x_t + F(x_t, r)$ eine nichtlineare Funktion von x_t , nämlich $r \cdot x_t \cdot (1 - x_t)$. Man findet diese Funktion, wenn man annimmt, dass die Nachfolgepopulation x_{t+1} (Föhren, Fische, etc.) nicht nur von der momentanen Anzahl x_t der Population, sondern auch von den noch nicht verbrauchten Ressourcen abhängt, die proportional zu $(1 - x_t)$ sind. Setzt man als Proportionalitätskonstante das Symbol r , so erhält man die obige einfache logistische Evolutionsgleichung einer Population, die in der Ökologie eine besondere Rolle spielt. Es

ist sehr eindrucksvoll, an diesem einfachen Beispiel viele der Merkwürdigkeiten nichtlinearer dynamischer Systeme studieren zu können. Die Dynamik dieses Systems wird durch den Kontrollparameter r ausgedrückt. Nimmt man beispielsweise für $r = 2.8$ und als Startwert für $x_t = 0,5$, so kann man nach der obigen Regel entweder herkömmlich Schritt für Schritt

	0,5	Startwert x_0
$2,8 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)$	$= 0,7$	Population x_1 (1. Iteration)
$2,8 \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,7)$	$= 0,588$	Population x_2 (2. Iteration)
$2,8 \cdot 0,588 \cdot (1 - 0,588)$	$= 0,678$	Population x_3 (3. Iteration)
$2,8 \cdot 0,678 \cdot (1 - 0,678)$	$= 0,611$	Population x_4 (4. Iteration)

oder bequemer mit Hilfe eines Computers die zugehörige Trajektorie bzw. Zeitreihe bestimmen. In der folgenden rechten Abbildung sind in der Abszissenachse die Zahl der Iterationen und in der Ordinatenachse die relative Zahl der Populationen aufgetragen. Man sieht, dass sich die Populationen auf den Fixpunkt $x_F = 0.642857$ hin entwickeln. In der linken Abbildung ist die logistische Abbildung $x_{t+1} = 2,8 \cdot x_t \cdot (1 - x_t)$ aufgetragen, und zwar die jeweilige relative Ausgangspopulation x_t von 0 bis 1 auf der Abszissenachse und die darauf folgende iterierte Population x_{t+1} auf der Ordinate. Die Grafik der Gleichung ist eine Parabel. Verbindet man die auf die Diagonale projizierten Ausgangswerte x_t mit den iterierten x_{t+1} Werten, so nähern sich die x_{t+1} Werte in Form einer Spirale ebenfalls dem Fixpunkt $x_F = 0.642857$.

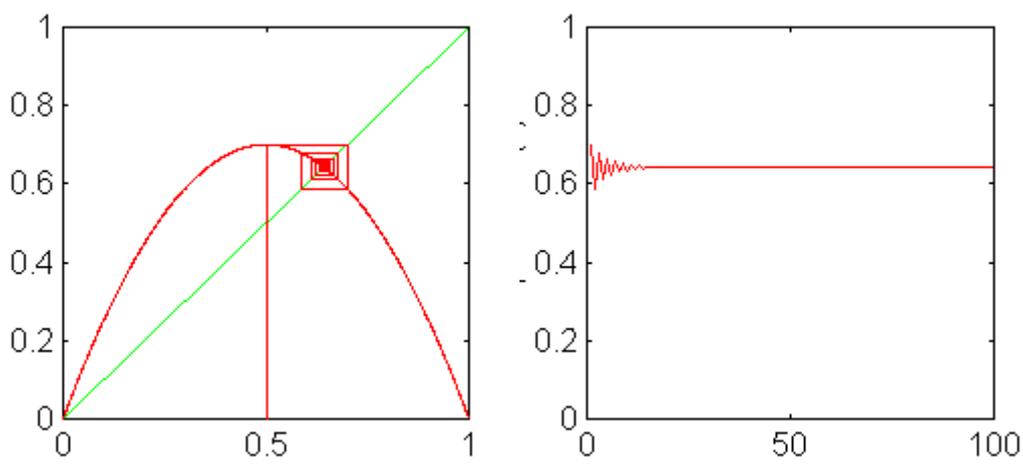


Abb.19: Fixpunkt-Attraktor und Trajektorie (Zeitreihe) der Logistischen Gleichung

Ein *Fixpunkt* x_F ist dadurch charakterisiert, dass sich der Wert einer Systemgröße mit zunehmender Zeit nicht mehr ändert: $x_{t+1} = x_t$. Damit lautet die logistische Gleichung

$$x_t = r \cdot x_t \cdot (1 - x_t) \Leftrightarrow 1 = r \cdot (1 - x_F) \Leftrightarrow x_F = 1 - 1/r$$

Für $r = 2,8$ erhält man für den Fixpunkt $x_F = 1 - (1/2.8) = 0,6428$, wie man obiger Abbildung entnimmt.

Wie man in der folgenden rechten Abbildung sieht, beginnt die Population ab $r > 3$ zu oszillieren; es bilden sich für $r = 3.2$ zuerst einfache Oszillationen mit einem einfachen *Grenzyklus* aus, der in der linken Abbildung zu sehen ist.

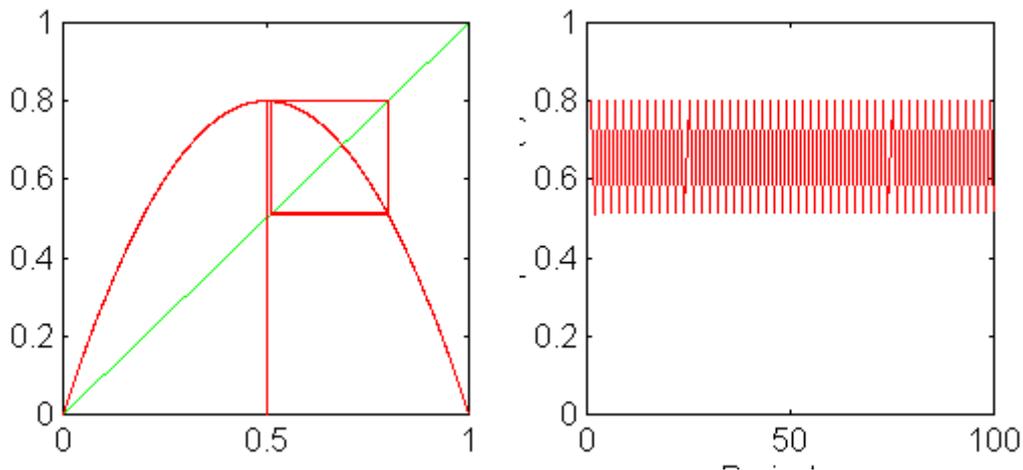


Abb. 20: Grenzyklus- periodische Attraktor (li) und Trajektorie bzw. Zeitreihe (re) der Logistischen Gleichung

Für $r = 3,5$ treten in der rechten Abbildung zweifache Oszillationen mit einem zweifachen Grenzyklus auf, der wieder in der linken Abbildung zu sehen ist.

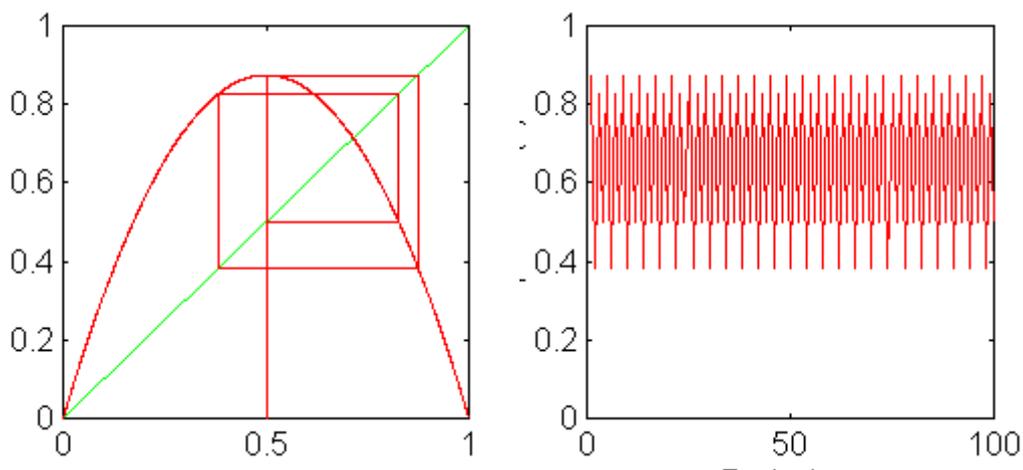


Abb. 21: 2-fach-period. Attraktor (li) und Trajektorie bzw. Zeitreihe (re) der Logistischen Gleichung

Schließlich beendet das System für $r = 3,95$ seine Oszillationen und landet im Chaos (Abb. rechts), dessen seltsamer Attraktor in der linken Abbildung zu sehen ist.

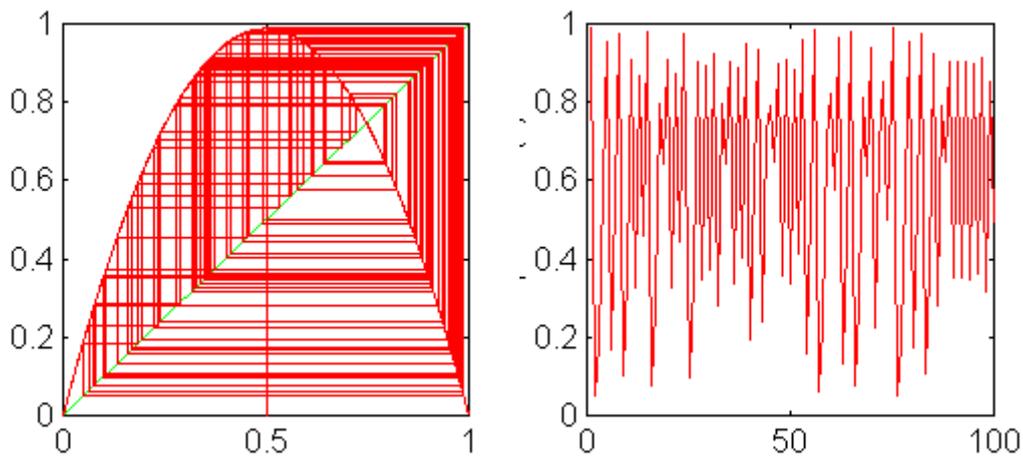


Abb.22: Seltsamer bzw. chaotischer Attraktor (li) und Trajektorie bzw. Zeitreihe (re) der Logistischen Gleichung

Deterministisches Chaos, Butterfly-Effekt und Fraktale

Deterministische Dynamik in einem offenen System liegt vor, wenn aus den deterministischen Evolutionsgleichungen $dA/dt = F(A, \sigma)$ für bestimmte Anfangswerte A_0 die Trajektorie $A = A(t)$ im Zustandsraum einen eindeutigen, wiederholbaren Verlauf aufweist. Dies trifft dann zu, wenn sich die Trajektorien $A = A(t)$ auf Fixpunkte und Grenzyklen hin bewegen, d.h. wenn die Attraktoren eine dynamische Stabilität zeigen (Gleichgewicht, Rhythmik, etc.).

Deterministisches Chaos in einem offenen System liegt vor, wenn die Trajektorie $A = A(t)$ im Zustandsraum trotz fast gleicher Anfangswerte A_0 keinen eindeutigen, wiederholbaren Verlauf zeigt, sondern sich die Endwerte A der Systemvariablen im Laufe der Zeit (bzw. nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen) komplett unterscheiden. Chaotisch ist ein an und für sich deterministisches System dann, wenn es eine hohe Sensibilität gegenüber den Anfangswerten der Systemvariablen hat. Ob ein offenes System deterministisch oder chaotisch evolviert, hängt im wesentlichen von den Kontrollparametern σ ab, wie man am Beispiel der Logistischen Gleichung bemerkt: ab $\sigma = r = 3,9$ driftet das System ins Chaos, seine *Entwicklung wird unvorhersagbar*.

Wir wollen diese chaotische Sensibilität gegenüber den Anfangsbedingungen wieder am Beispiel der Logistischen Gleichung demonstrieren:

Logistische Gleichung:	$x_{t+1} = r \cdot x_t [1 - x_t]$	
Kontrollparameter	$r = 3.9$	
Startwert a:	$x_{0,a} = 0.03000000000000002$	rote Trajektorie
Startwert b:	$x_{0,b} = 0.03000000000000001$	grüne Trajektorie
Wiederholungen	$t = 140$	
Endwert (rot)	$x_{E,a} = 0.50197425$	
Endwert (grün)	$x_{E,b} = 0.77622519$	

Die Anfangswerte $x_{0,a}$ der Population a unterscheiden sich von $x_{0,b}$ der Population b nur durch eine 1 an der 16. Stelle nach dem Komma: die Startpopulationen $x_{0,a}$ und $x_{0,b}$ sind also praktisch gleich groß. Dennoch zeigt die Evolutionsdynamik, daß dieser anfänglich kaum ins Gewicht fallende Unterschied sich allmählich verstärkt, so daß schließlich die Entwicklung der beiden Populationen völlig verschieden verläuft und endet. Dies ist ein ganz wesentliches Merkmal nichtlinearer Dynamik offener Systeme, das zumeist nicht genug in der wissenschaftlichen, aber auch kaum in der gesellschaftlichen Öffentlichkeit bekannt ist. Ein Grund, warum Systemtheorie wahrscheinlich einen hohen Stellenwert für biologische, ökologische und gesellschaftliche Systeme in der Zukunft haben wird, liegt in dieser Sensibilität und Unvorhersagbarkeit.

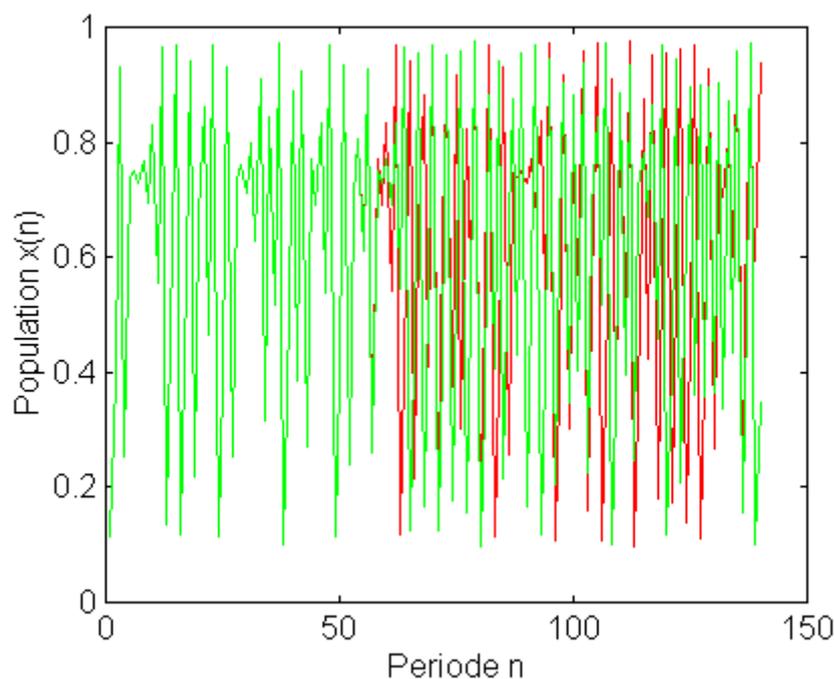


Abb.23: Zeitliche Entwicklung der Trajektorien der Logistischen Gleichung für $r = 3,9$ (Chaos) bei zwei unterschiedlichen Anfangspopulationen $x_{0,a} = 0.03000000000000002$ (rot) und $x_{0,b} = 0.03000000000000001$ (grün)

Chaotische Entwicklung kann in jedem offenen, nichtlinear vernetzten System auftreten. Es war der US-Meteorologe E. Lorenz, der dies schon am Beginn der Sechzigerjahre konstatierte und der damit den Beginn einer neuen Ära in den Wissenschaften und der Theorie dynamischer Systeme einleitete. Lorenz berechnete aus seinen Evolutionsgleichungen (wir haben sie bereits im 1. Kapitel kennen gelernt) die zeitliche Entwicklung der Systemgrößen $A = (A_1, A_2, A_3)$ und fand, daß diese Dynamik sehr von den Anfangswerten der A_k ($k=1,2,3$) abhängt: Lorenz gilt als der Entdecker des Chaos, wenngleich seine Vorläufer Poincare und Birkhoff dazu schon Bemerkenswertes beigetragen haben. Die folgende Abbildung zeigt die historische Entdeckung des Chaos im Jahre 1961 durch Lorenz am Beispiel seines offenen Flüssigkeitssystems, mit dem er mögliche Wetterverläufe als nichtlineare Systeme modellierte. Das Ergebnis war, dass schon kleinste Änderungen in den Anfangsbedingungen - etwa des atmosphärischen Luftdruckes durch den Flügelschlag eines Schmetterlings - zu einer großräumigen Änderung des Wetters auf einem ganzen Kontinent führen können. Seit damals nennt man dieses Phänomen nichtlinearer dynamischer Systeme den „Butterfly-Effekt“.

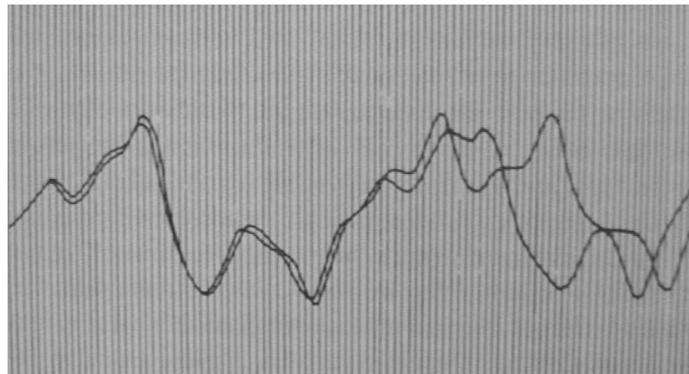


Abb.24: Entdeckung des Chaos durch E. Lorenz im Jahre 1961 am Beispiel einer Systemgröße, die das Wetter widerspiegelt. Kaum merkbare Unterschiede in den Anfangswerten werden allmählich verstärkt und führen zu einer komplett anderen Wetterentwicklung (Butterfly-Effekt).

***Chaotische Attraktoren und ihre invarianten Merkmale:
Fraktaldimension, Lyapunov-Exponenten und Kolmogoroff-Entropie***

Obwohl chaotische Dynamik deterministischen Evolutionsgleichungen entstammt, ist sie mit Zufälligkeit bzw. Stochastik, also mit Unvorhersagbarkeit verbunden. Deshalb ist es naheliegend, zur Kennzeichnung chaotischer Attraktoren auch jene Klassifikationsmerkmale heranzuziehen, die für stochastische dynamische Systeme entwickelt wurden. Dazu zählen Fourier- und Korrelationsanalyse, die meist bekannt sind und in der Literatur ohnehin ausführlich behandelt werden^{67, 68}.

Hingegen gibt es spezielle nichtlineare Merkmale wie Fraktaldimension, Lyapunov-Exponenten und Kolmogorov-Entropie, die mit der Geometrie und Stabilität von Attraktoren verbunden sind. Ihre besondere Bedeutung liegt aber darin, daß sie gegenüber bestimmten Transformationen invariant sind und sich somit besonders zur Systembeschreibung eignen.

Die *Fraktaldimension* ist ein Abkömmling der Hausdorff-Dimension, die auch die euklidische Dimension geometrischer Objekte beschreibt und die man am Beispiel einer Strecke (euklidische Dimension 1), eines Quadrates (2) und eines Würfels (3) grob erläutern kann: Teilt man eine Strecke genau in der Mitte, so entstehen $2 = 2^1$ gleiche, aber kleinere Strecken. Teilt man jede Seite des Quadrates ebenfalls genau in der Mitte, so entstehen $4 = 2^2$ gleiche, aber kleinere Quadrate. Teilt man jede Kante eines Würfels genau in der Mitte, so entstehen $8 = 2^3$ gleiche, aber kleinere Würfel. Die gleiche Überlegung stellt man für eine Unterteilung in drei gleiche Teile an: man erhält für die Strecke $3 = 3^1$, das Quadrat $9 = 3^2$ und den Würfel $27 = 3^3$.

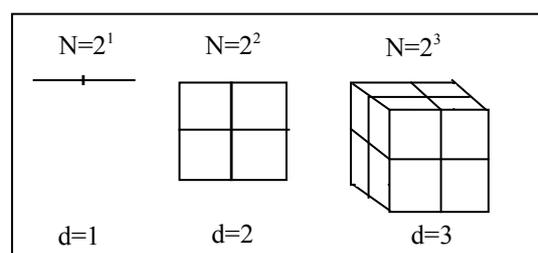


Abb.25: Illustration zur Hausdorff-Dimension $N = r^d$ bzw. $d = \log N / \log r$ (N ist Zahl der Teile, r ist der Maßstab und d die Dimension des geometrischen Objektes)

Teilt man nun die Strecke in r gleiche Teile, so gilt für die Anzahl der Teile $N(r)$ bzw. nach Logarithmieren für die *Hausdorff-Dimension* d einer geometrischen Figur die Beziehung⁶⁹

⁶⁷ R. Schlittgen, B. Streitberg: Zeitreihenanalyse, Oldenbourg-Verlag, München 1994

⁶⁸ J. Honerkamp: Stochastische dynamische Systeme, VCH-Verlag, Weinheim 1990

⁶⁹ H. Haken, A. Wunderlin: Die Selbststrukturierung der Materie, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1991, pg. 436

$$N = r^d \Leftrightarrow d = \frac{\log N(r)}{\log r}$$

Die Hausdorff-Dimension ist $d = 1$ für die gerade Strecke, $d=2$ für das Quadrat und $d=3$ für den Würfel. Eine ähnliche Überlegung stellt man nun für Attraktoren als geometrische Objekte im Zustandsraum an. Das Überraschende dabei ist, daß chaotische Attraktoren zumeist keine ganzzahlige Hausdorff-Dimension d , sondern eine gebrochenzahlige fraktale Dimension d haben. Beispielsweise beträgt für den Lorenz-Attraktor die fraktale Dimension $d_L = 2,07$.

Wie bestimmt man nun diese fraktale Dimension praktisch? Dazu wird u.a. die sogenannte *Boxcounting-Methode* angewendet. Wir wollen sie am Beispiel eines 2-dimensionalen Zustandsraumes erläutern. Dazu legen wir ein Quadrat über jene geometrische Figur, deren Fraktaldimension d wir bestimmen wollen. Dann führen wir schrittweise eine Rasterung bzw. Skalierung durch, indem wir nach und nach aus der großen Seite kleinere Quadratseiten der Länge $r = 1/n$ ($n=1,2,3, \dots$) erzeugen. Für jede dieser Rasterungen bzw. Skalierungen $r = 1/n$ zählen wir die Anzahl der Quadrate N , die von der geometrischen Figur überdeckt werden (in der folgenden Abbildung für die Ellipse sind sie grün markiert). Man findet für $r = 1/3$ die Zahl $N=3$, für $r = 1/6$ sind es $N=12$, für $r = 1/12$ sind es $N=28$, usw.

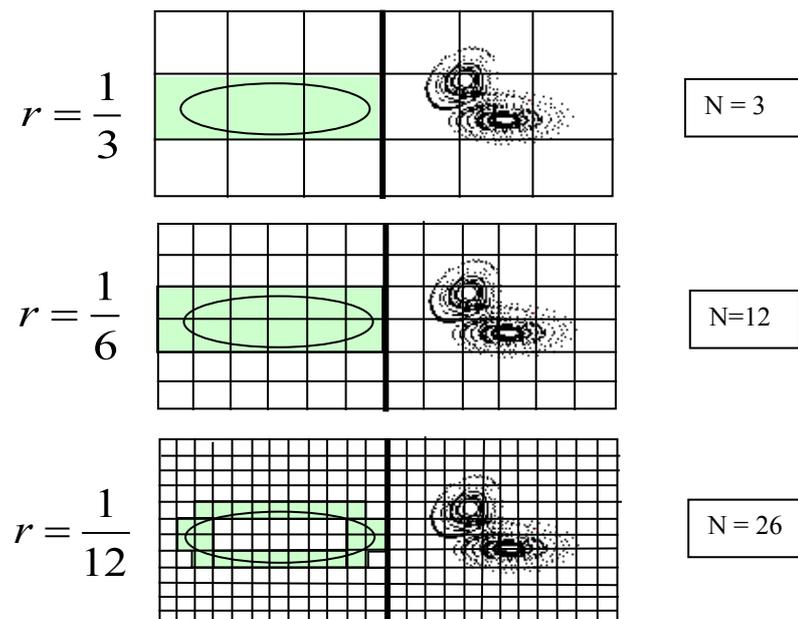


Abb.26: Box-Counting für die Ellipse (r Skalierung, N Zahl der grünen Teile) und Demonstration zur analogen Vorgangsweise für den Lorenz-Attraktor

Theoretisch ist die Fraktaldimension bestimmt, wenn man den Grenzübergang zu einem unendlich feinen Raster mit verschwindender Quadratseitenlänge vollzieht

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log r}$$

Praktisch findet man die Fraktaldimension d , indem man $\log(N)$ gegen $\log(r)$ für einige Rasterungen in einem kartesischen Koordinatensystem aufträgt und durch die entsprechenden Punkte eine approximierte Gerade legt. Für das Beispiel der Ellipse bedeutet dies, daß deren Fraktaldimension d_E für die drei obigen Skalierungen folgende drei Werte aufweist:

$$\begin{aligned} d_E &= \log 3 / \log(1/3), \log 12 / \log(1/6), \log 26 / \log(1/12), \dots = \\ &= 0.477/0.477, \quad 1.079/0.778, \quad 1.415/1.079, \dots = \\ &= 1.000, 1,386, 1.311, \dots \end{aligned}$$

Je feiner die Rasterung – man benutzt dazu bequemerweise den Computer -, umso mehr wird sich die Fraktaldimension der Ellipse ihrem tatsächlichen Wert d_E annähern. Für den Lorenz-Attraktor findet man die Fraktaldimension d_L auf ähnliche Weise, wobei anstelle der quadratischen eine kubische Rasterung benutzt wird: sie beträgt $d_L = 2.07$ ⁷⁰.

Lyapunov-Exponenten: Seltsame Attraktoren haben die merkwürdige Eigenschaft, dass ursprünglich benachbarte Punkte ihrer Trajektorien im Lauf der Zeit exponentiell auseinanderlaufen. Anders gesagt, ein Volumselement, das auf einem seltsamen Attraktor verbleiben muß, wird zuerst gestreckt, dann wieder zusammengefaltet, dann wieder gestreckt, usw. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Bäcker-Transformation, weil es dem Volumselement genau so ergeht wie dem Teig eines Bäckers. Maße für diese Streckungen und Faltungen sind die *Lyapunov-Exponenten* $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, deren Anzahl n der Zahl n der Systemgrößen A_1, \dots, A_n entspricht.

Um eine quantitative Beziehung für diese exponentielle Divergenz zweier benachbarter Trajektorien eines seltsamen Attraktors, d.h. um die Streckung des Abstandes von E_0 nach E_t zweier ursprünglich benachbarter Punkte zu finden, betrachten wir die folgende Abbildung:

⁷⁰ T. Buzug: Analyse chaotischer Systeme, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim 1994, pg. 58

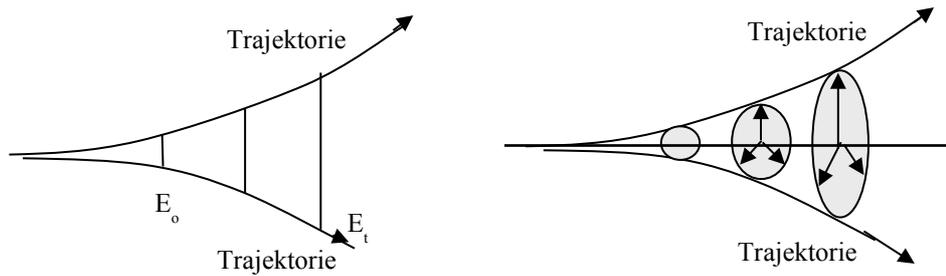


Abb.27: Zum Lyapunov-Exponenten: Streckung des Abstandes zweier benachbarter Punkte von E_0 nach E_t (links) bzw. n-dimensional: Verformung einer sphärischen Nachbarschaft zu einem Ellipsoid (rechts)

Der ursprüngliche Abstand der beiden Trajektorien in der obigen Abbildung (links) zur Zeit $t=0$ sei E_0 , der spätere Abstand zur Zeit t sei E_t . Wir nehmen an, dass die Zunahme der Streckung dE_t linear ist, d.h. umso größer ist, je größer der ursprüngliche Abstand E_t war und je größer das betrachtete Zeitintervall dt ist. Um aus dieser Annahme eine Gleichung zu machen, brauchen wir eine Proportionalitätskonstante λ als Maß für diese Streckung; man löst die Gleichung so:

$$dE_t = \lambda \cdot E_t \cdot dt \quad \Leftrightarrow \quad E_t = E_0 \cdot \exp(\lambda t) \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{E_t}{E_0}\right)$$

Ist $\lambda = \lambda^+$ positiv, dann expandiert der Abstand E_0 benachbarter Trajektorien: es liegt eine chaotische Dynamik vor. Ist $\lambda = 0$ gleich Null, dann bleibt E_0 konstant: die Entwicklung ist stabil. Ist $\lambda = \lambda^-$ negativ, so konvergiert E_0 : die Dynamik läuft auf einen Fixpunkt zu. Wenn man für ein positives λ den Grenzübergang $t \rightarrow \infty$ bildet, wird E_0 im Verhältnis zu E_t verschwindend klein und das Ergebnis vom Anfangswert E_0 unabhängig. Man findet daher als Maß für die Streckung die Größe

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{E_0 \rightarrow 0} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{E_t}{E_0}\right)$$

Berücksichtigt man noch Zwischenabstände E_1, E_2, \dots, E_{t-1} für endliche Zeitintervalle Δt zwischen E_0 und E_t , so lässt sich damit der *Lyapunov-Exponent* λ definieren⁷¹:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{E_0 \rightarrow 0} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{E_t}{E_{t-1}} \frac{E_{t-1}}{E_{t-2}} \dots \frac{E_1}{E_0}\right) \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{E_0 \rightarrow 0} \frac{1}{t} \sum_{k=1}^{k=t} \ln \frac{E_k}{E_{k-1}}$$

⁷¹ H.O. Peitgen, H. Jürgens, D. Saupe: Chaos and Fractals, Springer-Verlag, Berlin 1992, pg 516

Diese Definition des Lyapunov-Exponenten, die auf einen n-dimensionalen Zustandsraum verallgemeinert werden kann (siehe obige Abbildung rechts), lässt sich auch problemlos auf diskrete dynamische Systeme (z.B. Logistische Gleichung) übertragen, wenn man sich unter der Zeit t die Anzahl der Iterationen bzw. Wiederholungen vorstellt.

Für die Berechnung des *Lyapunov-Exponenten der Logistischen Gleichung* $x_{t+1} = r \cdot x_t \cdot (1 - x_t)$ mit dem *Kontrollparameter* $r = 4$ spezialisieren wir die Prozedur, indem wir den Quotienten E_k / E_{k-1} durch E^*_k / e ersetzen, wobei $E^*_k = [4 \cdot (x_k + e)(1 - (x_k + e)) - 4 \cdot x_k(1 - x_k)]$ die Differenz zweier benachbarter Folgepopulationen ist, deren Ausgangspopulationen $x_k + e$ und x_k sich durch einen kleinen Fehler e voneinander unterscheiden. Mit dem kurzem Programm „lyap3.m“ in Matlab⁷², einer hervorragenden, leicht erlernbaren Software auch zur numerischen Analyse dynamischer Systeme, lässt sich λ einfach berechnen:

```
function h = lyap3(r,x0,e,t)          % r Kontrollparameter, x0 Startwert der Population
                                     % e kleiner Anfangsfehler, t Zahl der Iterationen
P=zeros(k,1);                       % stellt eine einspaltige Matrix zur Verfügung
x=x0;                                % Startwert einer Population
for k=1: t                            % Beginn der FOR-Schleife
    xa=r.*x.*(1-x);                  % berechnet Folgepopulation ohne Fehler
    xe=r.*(x+e)*(1-(x+e));          % berechnet Folgepopulation mit Fehler
    E=log(abs((xe-xa)/e));           % berechnet die einzelnen Summanden
    x=xe;                            % feedback von xe nach x
    P(k,1)=E                          % füllt einspaltige Matrix (E1,E2, ..., Et) auf
end                                   % Ende der FOR-Schleife
lambda=sum(P)/t                       % vollendet und gibt Lyapunov-Exponent aus
```

Die nachfolgende Tabelle zeigt, wie der Lyapunov-Exponent für den Kontrollparameter $r=4$ und einen Startwert $x_0 = 0.652$ mit zunehmender Anzahl an Iterationen t und mit abnehmendem kleinen Fehler e allmählich stabil wird und sich bei etwa $\lambda = 0.6931$ einpendelt

⁷² Matlab 4.2., The MathWorks Inc., Natick, Mass., USA 1994

	$t=10$	$t=100$	$t=1000$	$t=10000$
$e=0.000001$	0.6806	0.6930	0.6931	
$e=0.0000001$	0.6807	0.6838	0.6932	
$e=0.00000001$	0.6807	0.6899	0.6931	0.6931

Tabelle: Lyapunov-Exponent für die Logistische Gleichung bei $r = 4$ in Abhängigkeit von der Zahl der Iterationen t und dem Wert des kleinen Fehlers e

Die *Kolmogorov-Entropie* S_K ist ein Maß für die Vorhersagbarkeit der zeitlichen Entwicklung eines Systemzustandes bzw. ein Maß dafür, wie viel Information ein dynamisches System während seiner Entwicklung verliert. Sie ist nach Y.B. Pesin⁷³ gleich der mittleren Summe der positiven Lyapunov-Exponenten λ^+_k

$$S_K = \sum_k \lambda^+_k$$

Für eine rein deterministische Systementwicklung (etwa bei periodischer Bewegung), ist die Kolmogorov-Entropie $S_K = 0$: es geht keine Information verloren. Im Falle einer stochastischen Systemdynamik mit weißem Rauschen wird die Kolmogorov-Entropie unendlich groß $S_K \rightarrow \infty$: alle Information geht verloren. Ist die Systemdynamik aber chaotisch, dann ist $S_K > 0$: die Information nimmt proportional zur Größe von S_K ab. Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, dass zur nichtlinearen Analyse dynamischer Systeme anstelle der Fraktaldimension die sogenannte Korrelationsdimension und anstelle der Kolmogorov-Entropie die sogenannte Korrelationsentropie zunehmend verwendet wird⁷⁴.

Rekonstruktion der Systemdynamik aus einer gemessenen Zeitreihe

In den meisten Fällen ist es nicht möglich, alle n Systemgrößen A_1, A_2, \dots, A_n eines dynamischen Systems gleichzeitig empirisch zu bestimmen, d.h. zu messen. Sehr oft steht nur eine einzige Systemgröße $A_k(t)$ als *Zeitreihe*, d.h. als Funktion der Zeit t zur Verfügung. Ist jedoch das dynamische System mit der Dimension $d = n$ stark vernetzt,

⁷³ Y.B. Pesin, Russian Math. Surveys 32 (1977) 55

⁷⁴ P. Grassberger, I. Procaccia, Physica D 13 (1984) 34

d.h. wirken alle Systemgrößen im Prozess stark aufeinander ein, so lässt sich – wie F. Takens⁷⁵ zeigen konnte - die Systemdynamik aus einer einzelnen gemessenen Zeitreihe $A_k(t)$ wiedergewinnen bzw. rekonstruieren.

Dazu wird die Zeitreihe $A_k(t)$ mit einem Zeitintervall τ (engl. time-delay) $(2d+1)$ -fach verzögert abgetastet und der so entstehende Vektor $A(t)$ in einem $(2d+1)$ -fachen Vektorraum eingebettet

$$A(t) = \{A_k(t), A_k(t+\tau), \dots, A_k(t+2d\tau)\}$$

Die *Wahl des Zeitintervalls* τ ist theoretisch beliebig, praktisch wählt man häufig das erste Minimum der *Autokorrelationsfunktion* $C_{AA}(\tau)$ einer Zeitreihe $A(t)$ ⁷⁶:

$$C_{AA}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T A(t) \cdot A(t + \tau) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T A(t)^2 dt}$$

Diese vereinfachte Beziehung für C_{AA} gilt nur für ein Zeitmittel $\langle A(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt = 0$.

Die *Wahl einer Einbettungsdimension* d_E wird empirisch bestimmt: wenn sich die invarianten Merkmale eines Attraktors (Fraktaldimension, Lyapunov-Exponent, Kolmogorov-Entropie) mit zunehmender Dimension nicht mehr ändern, ist die optimale Einbettungsdimension d_E erreicht⁷⁷: $d_e = 2d+1$. Meist gelingt die Rekonstruktion aber schon mit $d_e \geq d$, der Dimension des Attraktors des dynamischen Systems.

Als Beispiel einer Zeitreihe $A(t)$ nehmen wir eine im ASCII-Format vorliegende Komponente $A_1(t)$ des Lorenz-Attraktors und laden diese als 1-spaltige Matrix in die Analysesoftware "Matlab". Zur Illustration stellen wir die Zeitreihe graphisch dar (folgende Abb. links)

⁷⁵ F. Takens, in "Dynamical Systems and Turbulence", Eds. D.A. Rand, L.S. Young, Lect. Notes in Math. 898, Springer, Berlin 1981, pg. 366

⁷⁶ W.H. Steeb, A. Kunick: Chaos in dynamischen Systemen, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim 1989, pg. 49

⁷⁷ T. Sauer, J. Yorke, M. Cadaghi: Embedology, Journ. Stat. Phys. 65 (1991) 579

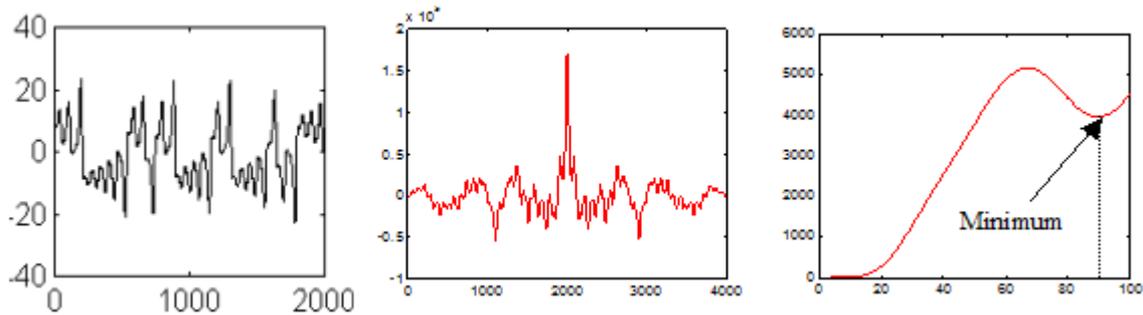


Abb.28: Zeitreihe $A_1(t)$ (li) des Lorenz-Systems und Autokorrelationsfunktion C_{AA} (Mitte) samt Ausschnitt (re)

Die Autokorrelationsfunktion $C_{AA}(\tau)$ ermitteln wir in Matlab mittels des Befehles „`xcorr(A1)`“ (siehe obige Abb. Mitte). Sucht man deren Minimum auf (obige Abb. links), so findet man ein empfehlenswertes time-delay bei $\tau = 90$ zur Rekonstruktion der Systemdynamik.

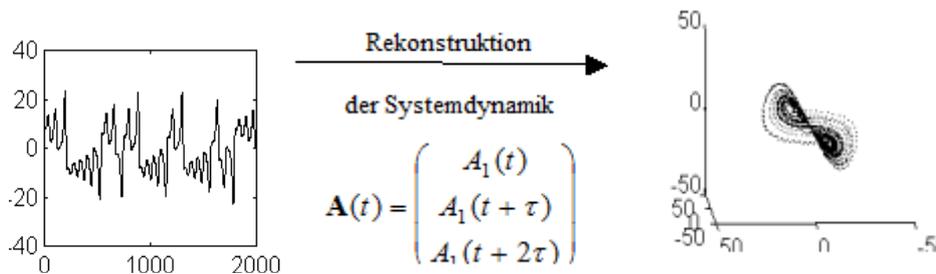


Abb.29: Aus einer einzelnen Zeitreihe $A_1(t)$ (li) wird mittels gewählter Verzögerungszeit $\tau=90$ die Systemdynamik $A(t) = \{A_1(t), A_1(t+\tau), A_1(t+2\tau)\}$ des Lorenz-Attraktors (re) nach der Takens-Methode rekonstruiert

Die Rekonstruktion der Systemdynamik aus der einzelnen Lorenz-Zeitreihe $A_1(t)$ erfolgt, indem man in Matlab die folgende 3-spaltige Matrix $A(t) = \{A_1(t), A_1(t+90), A_1(t+2\cdot 90)\}$ erstellt, dabei aber achtet, dass alle drei Spalten gleiche Anzahl von Elementen haben. Stellt man diese Matrix graphisch dar, so erhält man ein Abbild des rekonstruierten Lorenz-Attraktors in einem 3-dimensionalen Einbettungsraum (obige Abb. rechts).

Ein neueres Verfahren, das recht gute Ergebnisse zeigt, ist das der „nächsten Nachbarn“⁷⁸: hier wird ein Paar (τ, d_E) von optimalen Einbettungsparameter ermittelt, wobei auch die Kolmogorov-Entropie abgeschätzt werden kann. Das Verfahren bzw. der Algorithmus beginnt damit, für eine vorgegebene Zeitreihe $A_k(t)$ und ein gewähltes Paar (d_E, τ) den Attraktor $A(t)$ zu rekonstruieren. Nun setzt man auf den Attraktor willkürlich Referenzpunkte, umgibt diese Punkte mit je einem kugelförmigen Volumen vom Radius r , zählt je die Attraktorpunkte $N(d_E,$

⁷⁸ Th. Buzug, G. Pfister, Physica D 58 (1992) 273

τ), die innerhalb der Kugeln liegen, und berechnet deren Mittelwert $\langle N(d_E, \tau) \rangle$. Danach erhöht man die Einbettungsdimension d_E+1 um eins, wodurch ein neues Paar (d_E+1, τ) zu Verfügung steht. Mit diesem neuen Paar wiederholt man das obige Verfahren und erhält einen neuen Mittelwert $\langle N(d_E+1, \tau) \rangle$. Das Verhältnis

$$P(d_E, \tau) = \frac{\langle N(d_E + 1, \tau) \rangle}{\langle N(d_E, \tau) \rangle}$$

$\xrightarrow{\text{Rekonstruktion}}$
 der Systemdynamik

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} A_1(t) \\ A_1(t + \tau) \\ A_1(t + 2\tau) \end{pmatrix}$$

Ist eine Funktion $P(d_E, \tau)$ in den zwei Variablen (d_E, τ) , die man graphisch darstellen kann. Man findet eine optimale Rekonstruktion der Systemdynamik, wo sich benachbarte Trajektorien optimal trennen lassen. Das ist dort der Fall, wo $P(d_E, \tau)$ ein Minimum aufweist: das zugehörige Paar (d_E, τ) benutzt man für die endgültige Rekonstruktion der Systemdynamik. Die Güte des gefundenen Paares (d_E, τ) lässt sich an der Fraktaldimension $d = \ln N(r) / \ln r$ (oder ihrer Verwandten, der Korrelationsdimension) für verschiedene Kugelradien r und nächste Nachbarschaftspunkte $N(r)$ graphisch darstellen und überprüfen.

Bestimmung des größten Lyapunov-Exponenten aus Zeitreihen

Zur theoretischen Bestimmung der Lyapunov-Exponenten eines dynamischen System $dA(t)/dt = F(A, \sigma)$ ist es notwendig, die Funktion F des momentanen Zustandes der Systemvariablen $A = A_1, \dots, A_n$ und der Kontrollparameter σ zu kennen. Dies ist aber in experimentellen Situation meist nicht der Fall. Was man zur Verfügung hat, ist meist bloß eine Zeitreihe $A(t)$.

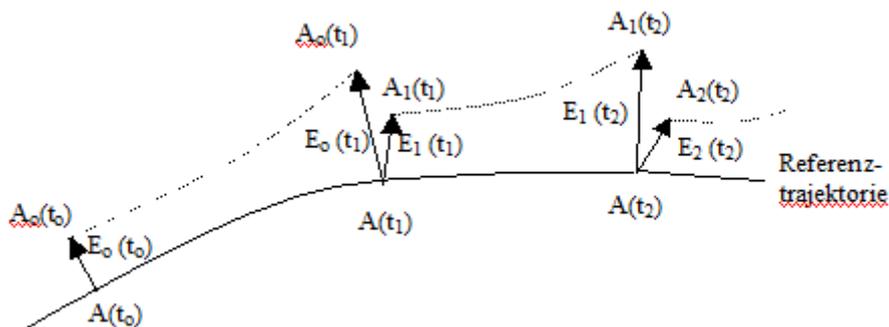


Abb.30: Bestimmung des größten Lyapunov-Exponenten λ_{max} aus einer gemessenen Zeitreihe $A(t)$

Um dennoch damit die Lyapunov-Exponenten rekonstruierter Attraktoren berechnen zu können, benutzt man im wesentlichen zwei Verfahren: die Ermittlung des größten Lyapunov-Exponenten nach Wolf⁷⁹, und die Bestimmung der Lyapunov-Koeffizienten mittels der Approximation der linearisierten Flussabbildung nach Eckmann⁸⁰. Hier wird nur die Methode nach Wolf skizziert, die in der obigen Abbildung illustriert wird.

Zuerst rekonstruiert man aus der gegebenen Zeitreihe $A(t)$ den Attraktor $A(t)$. Danach wählt man auf dem Attraktor eine Referenztrajektorie und fixiert darauf zum Zeitpunkt t_0 einen Startpunkt $A_0(t_0)$; dann umgibt man diesen Startpunkt mit einer sehr kleinen Kugel vom Radius r . Nun sucht man alle benachbarten Punkte des Attraktors, die innerhalb der Kugel liegen, und wählt daraus jenen Punkt $A(t_0)$, der auf einer benachbarten Trajektorie liegt und vom Startpunkt $A_0(t_0)$ den geringsten Abstand $E_0(t_0)$ hat. Divergieren die beiden Trajektorien, dann kann man berechnen, wie dieser Abstand $E_0(t_0)$ mit der Zeit t größer wird; überschreitet er nach der Zeit $t_1 - t_0$ einen gewissen Wert L etwa zur Zeit t_1 , so bricht man den Rechenvorgang ab und erhält den zugehörigen Abstand $E_0(t_1)$; das Abstandspaar $[E_0(t_0), E_0(t_1)]$ speichert man ab. Den vorherigen Vorgang wiederholt man nun für den Zeitpunkt t_1 : d.h. man sucht zum Zeitpunkt t_1 wieder den nächsten Nachbarn und bestimmt dessen Abstand $E_1(t_1)$ zur Referenztrajektorie, lässt evolvieren und erhält nach Überschreiten von L den neuen Abstand $E_1(t_2)$, das neue Paar $[E_1(t_1), E_1(t_2)]$ speichert man wieder ab. Führt man diesen Vorgang M -mal durch, so erhält man M Paare

$$\{[E_0(t_0), E_0(t_1)], [E_1(t_1), E_1(t_2)], \dots, [E_{M-1}(t_1), E_{M-1}(t_2)]\}$$

Nun bildet man für jedes Paar den folgenden Term

$$\left\{ \ln \frac{E_0(t_1)}{E_0(t_0)}, \ln \frac{E_1(t_2)}{E_1(t_1)}, \dots, \ln \frac{E_{M-1}(t_M)}{E_{M-1}(t_{M-1})} \right\}$$

und definiert damit über die relative Termsumme den maximalen Lyapunov-Exponenten λ_{\max} des rekonstruierten Attraktors einer gemessenen Zeitreihe $A(t)$.

⁷⁹ A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, J.A. Vastano, *Physica D* 16 (1985) 285

⁸⁰ J.P. Eckmann, D. Ruelle, *Rev. Mod. Phys.* 57 (1985) 617

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{t_M - t_o} \sum_{j=0}^{j=M-1} \ln \frac{E_j(t_{j+1})}{E_j(t_j)}$$

Dieser Exponent lässt sich z.B. wieder mit einem Matlab-Programm berechnen. Dabei ist zu beachten, dass M bzw. $t_M - t_o$ als groß angenommen werden soll. Dazu wieder ein Beispiel. Eine Zeitreihe des Lorenz-Systems habe 20 000 Datenpunkte mit einer zeitlichen Auflösung von $\Delta t = 0.01$. Zuerst rekonstruiert man den zugehörigen Attraktor A , dann fixiert man darauf einen Startpunkt $A(t_o)$ und umgibt diesen mit einer Kugel vom Radius $r = 0.01$. Nun bestimmt man alle Attraktorpunkte, die innerhalb dieser Kugel liegen, und wählt davon jenen Punkt $A(t_o)$ aus, der den geringsten Abstand $E_o(t_o) = 0.003$ von $A(t_o)$ hat und der auf einer Nachbartrajektorie liegt. Diesen Abstand $E_o(t_o)$ lässt man evolvieren, und zwar mit $[t_j, t_{j+1}] = 200$ Schritten nach $E_o(t_1) = 0.0843$ hin, und berechnet dann den Term $\ln(E_o(t_1)/E_o(t_o)) = \ln(0.0843/0.003)$; man erhält den Wert 3.34. Dieses Verfahren wiederholt man M -mal (z.B. 500-mal), addiert die Werte aller Terme und dividiert durch M . Als Ergebnis findet man den maximalen 1-dimensionalen Lyapunov-Exponenten des Lorenz-Attraktors mit etwa $\lambda_{\max} = 2,3$. Dieses Ergebnis stimmt recht gut mit den publizierten Werten für $\lambda_{\max} = 2.16$ überein⁸¹

Recurrence Plots von Zeitreihen

Ein eindruckvolles Verfahren zur Beurteilung von gemessenen oder berechneten Zeitreihen $A(t)$ und deren rekonstruierten Attraktoren $A(t)$ stellen die sogenannten Recurrence Plots dar⁸². Diese Plots analysieren deterministische oder chaotische Zustände dynamischer Systeme und deren Nachbarschaften, Drifts, Phasenübergänge, etc.

Zur Berechnung bzw. graphischen Darstellung von zweidimensionalen Recurrence-Plots geht man folgendermaßen vor:

- man rekonstruiert aus einer gegebenen Zeitreihe den zugehörigen Attraktor, der aus N Punkten $A(t)$ mit $t = 1, \dots, N$ besteht
- man wählt einen Vektor $A(t)$ als Startpunkt auf einer Trajektorie des Attraktors

⁸¹ F.C. Moon, Chaotic and Fractal Dynamics, John Wiley Inc., New York 1992, pg. 318

⁸² C. L. Webber, jr., J. P. Zbilut, Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies, J. Appl. Physiol. 76 (1994) 965

- man wählt eine Kugel mit dem Mittelpunkt in $A(t)$ und dem Radius r so, daß eine vernünftige Anzahl von Attraktorpunkten $A(j)$ in die Kugel fällt
- man bestimmt für $A(t)$ die nächsten Nachbarn $A(j)$, die innerhalb der Kugel liegen
- man bereitet eine Matrix, die aus allen $N \times N$ Punkten (t, j) besteht (dabei ist zu beachten, dass die Anzahl von $j = 1, \dots, N$ gleich der Anzahl von $t = 1, \dots, N$ ist)
- Ist $A(j)$ innerhalb der Kugel nächster Nachbar von $A(t)$, so wird er in der Matrix als „schwarzer Punkt“, ansonsten als „weißer Punkt“ ausgewiesen.
- dies wird für alle N Attraktorpunkte $A(t)$ durchgeführt.
- das Ergebnis ist ein zweidimensionales schwarz-weißes Bild der Matrix: der sogenannte Recurrence Plot
- Da $A(t)$ und $A(j)$ ja die Zeitpunkte des Systems auf dem Attraktor darstellen, erhält man in Recurrence Plots Informationen über ähnliche Zustände bzw. Nachbarschaften der Punkte und deren zeitliche Korrelationen

In der folgenden Abbildung ist die Zeitreihe und der zugehörige Recurrence Plot des Lorenz-Attraktors dargestellt. Abwechselnd kürzere oder längere Diagonalen im Plot weisen auf einen mehr oder weniger eingeschränkten Determinismus des Systems bzw. auf dessen chaotische Entwicklung hin, während durchgehende Diagonalen stabile Entwicklungen (Fixpunkt oder periodische Attraktoren) kennzeichnen.

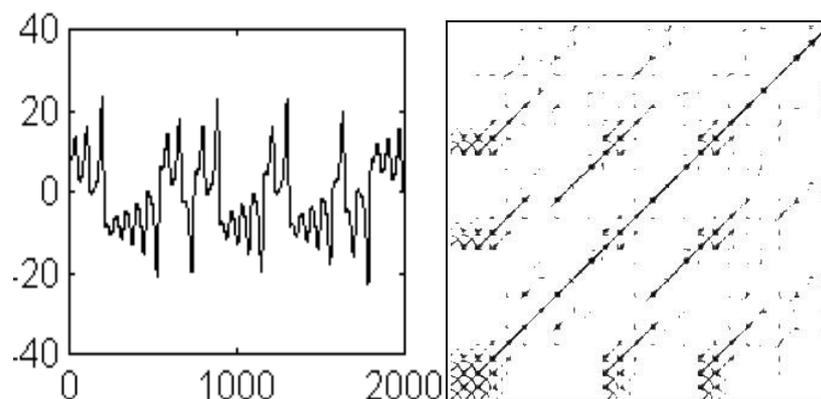


Abb. 31: Zeitreihe (li) und Recurrence-Plot (re) des Lorenz-Attraktors

Werden nämlich Attraktorpunkte $A(t)$ von chaotischen Attraktoren durch ihren positiven Lyapunov-Exponenten nach einiger Zeit wieder voneinander getrennt, so existieren keine

durchgehenden, sondern nur kurze diagonale Linien. Da die Indizes t und j Zeitpunkte in der Dynamik darstellen, stellen die Längen der diagonalen Linien ein Maß für den größten Lyapunov-Exponenten λ_{\max} bzw. auch ein zeitliches Maß für eine mögliche Prognose der Systemdynamik dar. Neben ihrer graphischen Darstellung stellen Recurrence Plots außerdem gewisse quantitative Parameter zur Verfügung:

Percent of Recurring Points: Ist das Verhältnis der schwarzen Plotpunkte im Verhältnis zu allen Punkten des Recurrence Plots. Bei periodischen Systemen fällt dieser Wert höher aus als bei aperiodischen Systemen.

Percent of Determinism: Verhältnis der schwarzen Plotpunkte entlang von Diagonalen zur Gesamtzahl der schwarzen Punkte im Plot. Determinismus liegt vor, wenn Paare von Punkten über einen gewissen Zeitraum nahe beieinander bleiben.

Ratio: Percent of Determinism dividiert durch die Percent of Recurring Points. Mit diesen Parameter kann man Änderungen des dynamischen Zustandes aufspüren.

Lines: Gibt die Anzahl der Linien und ihre Verteilung unterhalb (oberhalb) der Hauptdiagonale an. Wie viele Punkte nötig sind, um von einer Linie sprechen zu können, kann man eigens angeben.

Entropy: Die Shannonsche Entropie der Linienverteilung ist ein Maß für die Komplexität des Recurrence Plot

Trend: Ist der Gradient der schwarzen Punkte (Funktion der Percent of Recurrence Points) in ihrer Entfernung von der Hauptdiagonalen

Standard Deviation: Ist die Standardabweichung der Datenpunkte, die für die Messung herangezogen wurden.

Divergence: Ist das Inverse der Länge der längsten Linie. Die längste Linie ist die Anzahl der Punkte, die die längste Linie formen.

Der Recurrence Plot kann mit Hilfe eines von I. Wasinger und R. Nourbakhch-Sabet⁸³ entwickelten Software-Programmes „VisRP“ praktisch erstellt und ausgewertet werden. Diese Methode der Recurrence Plots eignet sich besonders gut, um die dynamische Entwicklung diverser Zeitreihen bzw. Systeme (physikalisch, chemisch, biologisch, ökologisch, sozial, etc.) in Abhängigkeit von ihren Kontrollparametern zu untersuchen.

⁸³ Ramin Nourbakhch-Sabet: Recurrence Plot Analysis and its Application to Autonomous Neuropathies, Diplomarbeit, TU Wien, 1998

Zusammenfassung

Die Systemtheorie stellt sich zur Aufgabe, die dynamische Entwicklung von Systemen zu beschreiben. Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwischen deterministischen und stochastischen Systemen. Im Übergangsfeld zwischen beiden Systemen liegen nichtlineare Systeme, die neben ihren vorhersagbaren deterministischen Entwicklungen (Fixpunkte, periodische Dynamik) auch ins unvorhersagbare Chaos gleiten können.

In deterministischen Systemen ist die Dynamik prinzipiell beliebig genau vorhersagbar; in stochastischen Systemen ist die Entwicklung zufälligen Einflüssen unterworfen, so dass nur Wahrscheinlichkeitsprognosen möglich sind; in chaotischen Systemen ist nur für kurze Zeit eine deterministische Prognose möglich, auf längere Sicht wird die Dynamik wegen der iterativen Streckungen und Faltungen (d.h. wegen der Bäcker-Transformationen) auf dem Attraktor unvorhersagbar. Wegen der nichtlinearen Kopplungen der Systemgrößen $A_k(t)$ und der dadurch verursachten Streckungen und Faltungen ihrer Trajektorien $A(t)$ herrscht starke Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen vor, so dass sich kleinste Einflüsse verstärken und so zu gänzlich anderen Systementwicklungen führen können („Butterfly-Effekt“).

Deterministische Systeme mit linearen Kopplungen sind die einfachste Art einer Naturbeschreibung: sie werden traditionsgemäß in der herkömmlichen Physik gelehrt, wie wir sie von der Schule oder Hochschule her kennen. Stochastische Systeme mit linearen Kopplungen sind das Anwendungsgebiet der Wahrscheinlichkeitstheorie bzw. ihrer zeitabhängigen Erweiterung: der Stochastik. Dies ist eine sehr weitreichende mathematische Wissenschaft, die grundlegend für viele Wissenschaften ist: Statistische Physik, Psychologie, Sozialwissenschaften, Ökonomie, etc. Deterministische und stochastische Systeme mit nichtlinearer Dynamik stehen nicht nur im Übergangsfeld zwischen den beiden ersteren, sondern sie sind vermutlich allgemeiner anzusehen. Jede Nichtlinearität enthält doch auch lineare Anteile, so dass lineare deterministische und lineare stochastische Systeme Spezialfälle darstellen. Daher ist die Beschäftigung mit diesen Systemen das eigentliche Anliegen der Systemtheorie, für die sie theoretische und empirische Methoden zur Verfügung stellt.

Die theoretischen Methoden bedienen sich der nichtlinear vernetzten Evolutionsgleichungen, in denen die Änderung der Systemgrößen $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = (A_1(\mathbf{r}, t), \dots, A_n(\mathbf{r}, t))$ nicht nur von der Zeit t und vom Ort \mathbf{r} ,

$$\frac{d\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{A}, \nabla, \sigma) + \mathbf{f}$$

sondern auch vom momentanen deterministischen Zustand $\mathbf{F}(\mathbf{A}, \nabla, \sigma)$ und vom stochastischen Einfluss \mathbf{f} abhängt. Die zeitliche Entwicklung bzw. Evolution eines derartigen Systems wird durch die Trajektorie $\mathbf{A}(t)$ im Zustandsraum der Systemgrößen A_k beschrieben. Sie kann in Abhängigkeit von den Kontrollparametern σ , die auch offene Systeme zu beschreiben gestatten, auf unterschiedlichen Attraktoren landen: Fixpunkt, periodisches Verhalten, chaotisches Verhalten, etc. Zur Kennzeichnung dieser Attraktoren werden invariante Maße wie Fraktaldimension d , Lyapunov-Exponenten $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ und Kolmogorov-Entropie S_k verwendet. Diese Begriffe werden anhand zweier Beispiele illustriert: der ökologischen Gleichung der Populationsdynamik und dem offenen Flüssigkeitssystem mit den Benard-Zellen und zugeordneten Lorenz-Gleichungen.

Die empirischen Methoden sind für eine wissenschaftliche Behandlung der gesamten Systemtheorie ganz wesentlich. Nur an realen Systemen können die Methoden entwickelt, angewandt und verbessert werden. Reale Systeme werden durch gewisse empirische Größe charakterisiert, die sich im Laufe der Zeit und in Abhängigkeit vom Ort ändern können. Im Falle der Zeitabhängigkeit spricht man von sogenannten Zeitreihen, die zur nichtlinearen dynamischen Analyse zur Verfügung stehen. Am Beispiel des Lorenz-Systems kann man zeigen, daß im Falle nichtlinearer Kopplungen die gesamte Systemdynamik bzw. die zugehörigen Attraktoren aus einer einzelnen Zeitreihe mittels der Methode von Takens rekonstruiert werden können. Das hat weitreichende Konsequenzen für die Anwendung der Systemtheorie, weil in den meisten realen Fällen nur Zeitreihen einzelner Systemgrößen zur Verfügung stehen. Zur Charakterisierung der Zeitreihen und ihrer Attraktoren dienen die Konzepte der Theorie, wobei diese Konzepte für die Empirie modifiziert werden müssen: anstelle aller Lyapunov-Exponenten genügt es oft, nur den größten Lyapunov-Exponente λ_{\max} zu berechnen, Fraktaldimensionen und Entropien werden mit Hilfe bestimmter Verfahren optimiert, bis sie stabil und vertrauenswürdig werden. Recurrence Plots ergänzen die Palette der quantitativen Merkmale von Zeitreihen und Attraktoren.

5. Anwendungen biophysikalischer Methoden in der Ganzheitsmedizin

Photoplethysmographie

Als Beispiel einer nichtlinearen Analyse wählen wir die Photoplethysmographie (PPG)⁸⁴. Sie ist eine nichtinvasive physiologische Methode zur Untersuchung der peripheren Durchblutung (Pulsdynamik), die biophysikalisch mittels photometrischer Meßtechnik durchgeführt wird. Dazu wird auf einen Zeigefinger der Probanden ein PPG-Meßsensor „Nellcor“, bestehend aus Leuchtdiode, Phototransistor und Halterung, gekluppt (siehe folgende Abbildung links). Das Licht der Leuchtdiode durchleuchtet dabei die winzigen peripheren Blutgefäße. Diese ändern ihren Querschnitt je nach Einfluss (z. B. durch die Herztätigkeit oder Umwelteinflüsse wie Licht, Wasser, Luft, etc.) und verändern damit die Menge des durchgelassenen Lichtes, das schließlich auf einen lichtempfindlichen Transistor fällt und damit ein elektrisches Signal steuert.

Dieses analoge Messsignal wird mit einer geeigneten Messanordnung verarbeitet: etwa in einem Messverstärker⁸⁵ verstärkt sowie gefiltert und mittels einer Meßkarte digitalisiert (100 Hz Abtastrate, 16 bit Amplituden-Auflösung). Die digitalisierten Meßsignale werden mittels der Meßsoftware „LabWindowsCvi“ aufgenommen und als ASCII-Daten abgespeichert.

Im folgenden Bild sieht man den PPG-Sensor und ein Beispiel einer Zeitreihe (Photoplethysmogramm) für die PPG-ASCII-Daten mit dem Datenfile „eras.asc“ des Autors.

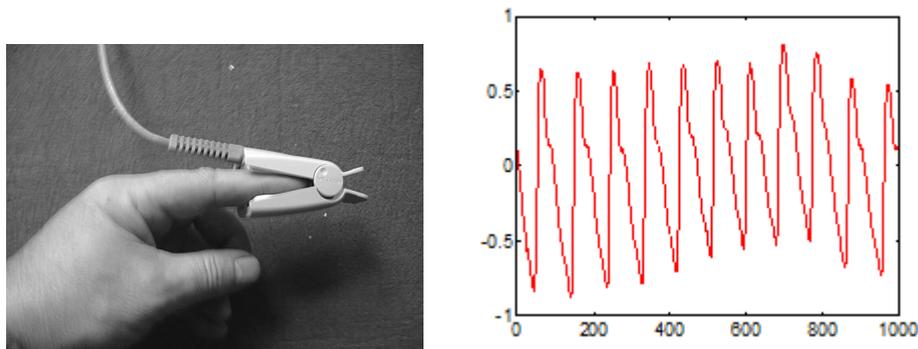


Abb. 32: Photoplethysmographie: Meßsensor (links) und Ausschnitt aus der Zeitreihe „eras.asc“ (rechts)

⁸⁴ J. Weinman, „Photoplethysmography“ in: „A manual of psychophysiological methods“, North Holland Publ. Co. 1967

⁸⁵ M. Fassl: Bau eines Mehrkanalmeßgerätes zur Aufnahme und nichtlinearen Analyse physiologischer Signale Diplomarbeit, TU Wien, 1996

Mit einem time-delay $\tau = 5$ wird der Attraktor dieser PPG-Zeitreihe rekonstruiert und deren Recurrence Plot für eine Kugel mit 10% des Attraktorvolumens berechnet. Die folgende Abbildung (links) zeigt den mittels Matlab rekonstruierten Attraktor (links) und den mittels VisRP berechneten Recurrence Plot (rechts). Die dazu ermittelten Recurrence-Plot-Parameter samt ihren Standardabweichungen sind in der folgenden Tabelle zu sehen:

<i>%Recur</i>	<i>#Recur</i>	<i>#Line</i>	<i>%Determ</i>	<i>Ratio</i>	<i>Entropy</i>	<i>Trend</i>
11,92	590,25	16,75	85,86	7,30	3,72	-146,45
1,30	4,47	3,28	3,27	1,10	0,27	97,97

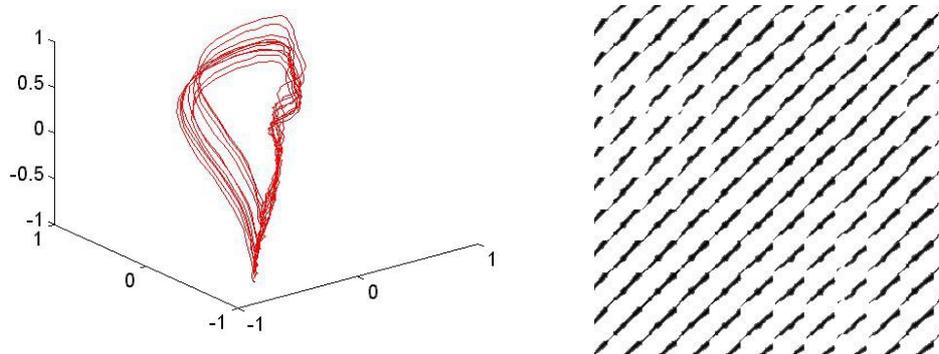


Abb. 33: Photoplethysmographie: Attraktor und Recurrence Plot der PPG-Zeitreihe „eras.asc“

Damit ist es möglich, unterschiedliche Umweltreize (Licht, Farbe, Luft, Wasser, elektromagnetische Felder, etc.) auf Photoplethysmogramme zu untersuchen und mit den Methoden der Systemtheorie zu analysieren.

Anwendung der Photoplethysmographie in der Akupunktur

Akupunktur ist eine wissenschaftlich anerkannte Heilmethode im Bereich der Ganzheitsmedizin in Österreich. Daher war es interessant, den in Zusammenarbeit mit der Österreichischen Wissenschaftlichen Ärztesgesellschaft für Akupunktur gesetzten Einfluss von Akupunktur auf Photoplethysmogramme (PPG) zu untersuchen⁸⁶. Die experimentell erhobenen PPG-ASCII-Daten stammen aus 4 Phasen (Anzahl N= 96000 pro Phase) einer 16-minütigen Messung. Kontrollmessung 4 min vor der Akupunktur (Phase 1), 4 Minuten Akupunktur auf den Punkt He-Gu (Phase 2), weitere 4 Minuten Akupunktur-Einfluss (Phase 3), Kontrollmessung 4 min nach der Akupunktur (Phase 4). Dieser Untersuchungsablauf

⁸⁶ H. Klima, B. Lipp, G. König; Influence of acupuncture on human photoplethysmography; in „Proc. Clinical Engineering – New Trend – Computer Controlled Acupuncture“, Ed. G. Litscher, Papst Science Publisher, Lengerich 1999, in press

wurde an 20 erwachsenen Personen durchgeführt (12 Männer, 8 Frauen, Alter zwischen 23 und 55 Jahre, anamnestisch gesund).

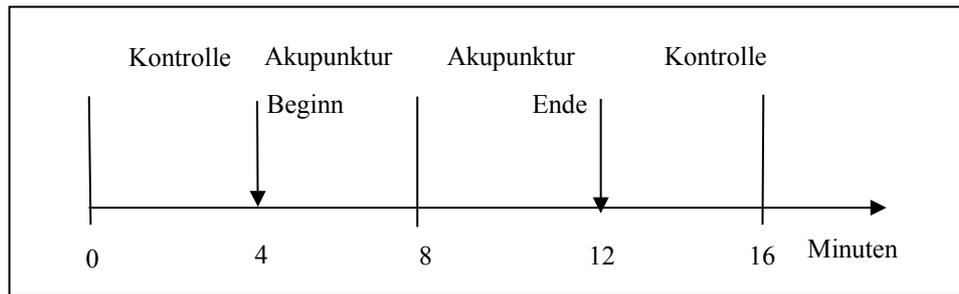


Abb. 34: Experimentelle Anordnung: Einfluß von Akupunktur auf Photoplethymogramme

Unter der Annahme, dass PPG-Zeitreihen Projektionen der zeitabhängigen Pulsdynamik auf Attraktoren widerspiegeln, ist es empfehlenswert, derartige Attraktoren zu rekonstruieren und deren Recurrence Plots zur nichtlinearen systemischen Analyse heranzuziehen. Die folgende Abbildung zeigt: Zeitreihen (links), Attraktoren (Mitte) und Recurrence Plots (rechts) dreier Phasen der Untersuchung

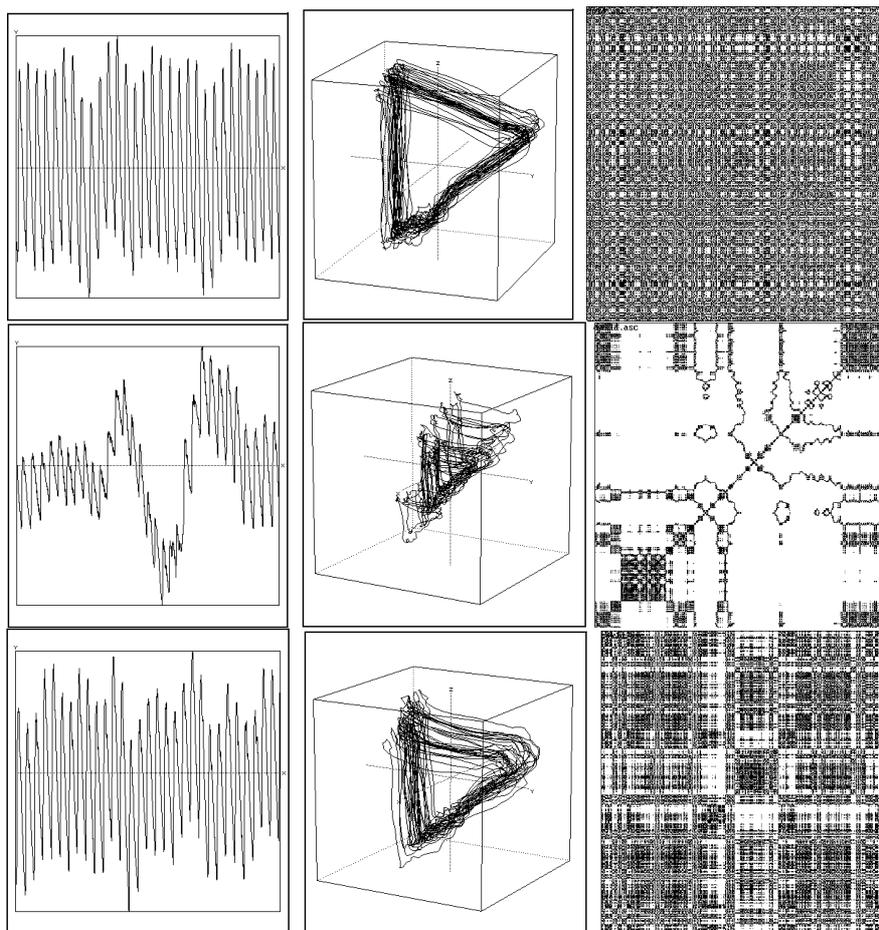


Abb. 35: Einfluss von Akupunktur auf Plethysmogramme: PPG-Zeitreihen, rekonstruierte Attraktoren und Recurrence Plots vor, während und nach der Akupunktur (He-Gu)

Die Ratio der Recurrence Plots ist ein Maß für physiologische Phasenübergänge⁸⁷. In der folgenden Abbildung sieht man Hinweise auf Phasenübergänge der Pulsdynamik während der Akupunktur in der Phase 3 bei Männern und Phase 2 bei Frauen.

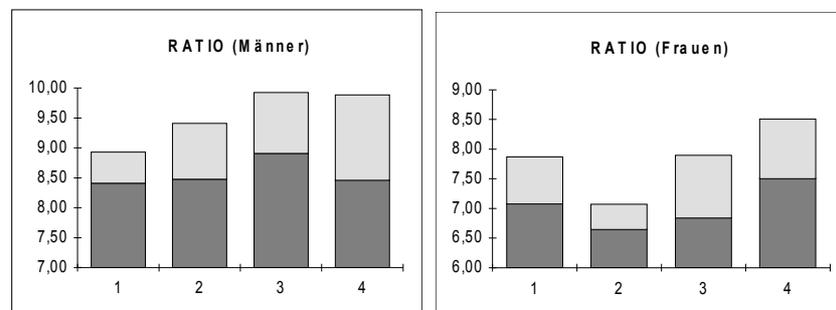


Abb. 36: Einfluss von He-Gu-Akupunktur auf PPG-Zeitreihen: Ratio der vier Phasen

Die Entropie physiologischer Recurrence Plots ist ein Maß für die Regulation des Organismus. Diese ändert sich in der dritten Phase bei Männern (92 % Signifikanz-t-Test) und in der zweiten Phase bei Frauen (siehe folgende Abb.)

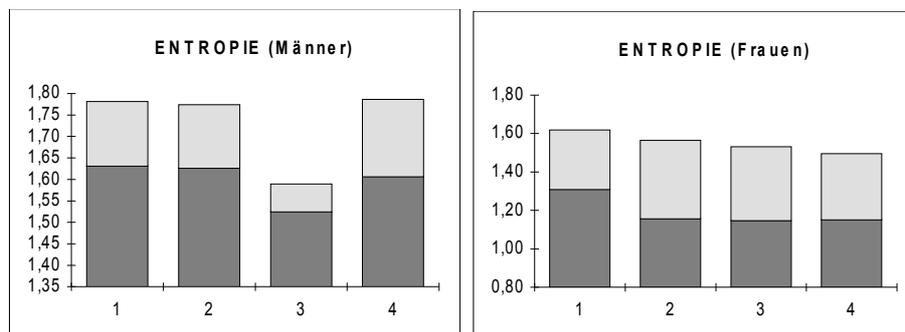


Abb. 37: Einfluss von He-Gu-Akupunktur auf PPG-Zeitreihen: Entropie der Recurrence Plots in den vier Phasen

Anwendung in der Bioresonanzforschung

Der deutsche Arzt Franz Morell begründete die Bioresonanz, indem er annahm, daß es sowohl physiologische als auch pathologische elektromagnetische Schwingungen im Organismus gäbe, die mit geeigneten elektronischen Mitteln verstärkt oder gelöscht werden könnten. Mit dieser Annahme wurde das erste MORA-Gerät 1977 von dem Elektronikingenieur Erich Rasche gebaut und auf den medizinischen Markt gebracht. Andere Geräte mehr oder weniger verwandter Konzeption und Bauart folgten. Unterstützt scheinen die Morellschen Annahmen

⁸⁷ C.L.Webber, J.P.Zbilut, J.Apl.Physiol. 76 (1994) 965

u.a. durch Arbeiten von C. W. Smith⁸⁸ und Bigu del Blanco zu werden, die davon ausgingen, daß der Körper in einem weiten Frequenzbereich elektromagnetische Signale abgäbe, welche sich mit Hilfe eines Fourieranalysators mit genügend hoher Auflösung nachweisen lassen. Eine Innsbrucker Gruppe aus Dermatologen, Lungenfachärzten, Physikern, etc. hat aus ihrer Sicht das Konzept der Bioresonanz scharf kritisiert und meint, daß ein Bioresonanzgerät u.a. nicht in der Lage sei, die mit konventionellen Methoden nicht mehr nachweisbaren Schwingungen des Körpers aufzunehmen⁸⁹.

Körpereigene elektromagnetische Schwingungen im Frequenzbereich von 100 Hz - 100 kHz setzen entsprechende Generatoren dieser Schwingungen voraus. Das Herz erzeugt EKG-Signale im Frequenzbereich von 0.05 - 300 Hz mit Amplituden von +/- 10 mV an der Hautoberfläche. Für wissenschaftliche EKG-Aufzeichnungen wird für EKG-Verstärker eine Bandbreite von 2.5 kHz empfohlen, Herzschrittmacher-Ableitungen bis zu 10 kHz. Jeder Muskel im Körper ist ein elektromagnetischer Signalgenerator; der Frequenzbereich für ein EMG liegt im Bereich von 30 Hz bis mehreren kHz mit maximalen Amplituden von ca. 500 µV. Im Frequenzbereich von 10 kHz - 100 kHz sind keine Generatoren für elektromagnetische Signale im Körper bekannt. Sollte niederenergetische elektromagnetische Bioinformation im genannten Frequenzbereich von 100 Hz - 100 kHz existieren und in Organismen eine wichtige Rolle spielen, so ist es notwendig, die physikalische Existenz dieser Signale nachzuweisen und zu reproduzieren. Es bestand somit die Notwendigkeit, ein Forschungsprojekt über elektromagnetische Biosignale im kHz-Bereich durchzuführen. Dabei sollte man sich gängiger elektrodynamischer und neuer Methoden der nichtlinearen Dynamik bedienen.

Das Forschungsprojekt⁹⁰ bestand aus zwei Phasen:

1. Phase: Physikalische Erfassung und Analyse körpereigener und systemischer elektromagnetischer Signale im Bereich von 100 Hz - 100 kHz, kleiner als 10 mV und größer als 50 µV.

⁸⁸ C.W. Smith, S. Best; Electromagnetic Man, Dent & Sons Ltd., London 1990

⁸⁹ H. Kofler, P. Fritsch, A. Frank, G. Ott, F. Cap; Stellungnahme zur Diagnostik und Behandlung allergischer Grundlagen; Universitätsklinik für Dermatologie und Venerologie, Innsbruck, 6.4.95

⁹⁰ H. Klima, B. Lipp, H. Lahrman, M. Bachtik; Elektromagnetische Bioinformation im Frequenzbereich von 100 Hz – 100 kHz?; Forschende Komplementärmedizin 5 (1998) 230

2. Phase: Biophysikalische randomisierte Doppelblinduntersuchung der physiologischen Auswirkung der Rückkopplung dieser Signale auf den Organismus mittels Photoplethysmogramm (Recurrence-Plot-Analyse). Das Projekt sollte so ausgelegt sein, daß es auch an anderen Instituten ohne allzu großen biophysikalischen Aufwand wiederholt und in Form einer kontrollierten Doppelblindstudie an einer größeren Personengruppe durchgeführt werden kann.

Zur Phase 1: Die physikalische Erfassung der Signale erfolgte mit folgendem Meßsystem, das kurz BIT-System genannt wird: Eingangsstufe (Messverstärker PMI AMP-02, Verstärkungsfaktor $V_E=100$), einstellbarer Hochpass (Stufen: 0,5 - 100 - 500 Hz, - 1 - 10 - 20 - 40 kHz; Verstärkung $V_H=0,5$), einstellbarer Tiefpass (Stufen: 40 - 500 Hz - 2.5 - 10 - 25 - 50 - 100 kHz; Verstärkung $V_T=4$), Ausgangsstufe (Amplitudenabschwächung $V_A=0,5 - 0,005$). Damit ergibt sich eine Gesamtverstärkung ohne Ausgangsstufe $V=V_E \times V_H \times V_T = 100 \times 0,5 \times 4 = 200$. Der Frequenzgang des BIT-Gerätes zeigt eine ausgezeichnete Stabilität der Verstärkung und der Phase im Frequenzbereich von 100 Hz - 100 kHz. Damit wurden zwei Messanordnungen getestet: a) Verstärkerbetrieb zur Erfassung körpereigener Signale und b) Rückkopplungsbetrieb zur Erzeugung systemeigener Schwingungen (Oszillator: Mensch-Verstärker).

Im Verstärkerbetrieb wurden die linke und die rechte Hand mittels Messingplatten-Elektroden (17,5 x 23 cm, Korkisolierung) mit den beiden Eingängen der Eingangsstufe des BIT-Gerätes mit ungeschirmten Kabeln (übliche Verbindung in der ärztlichen Praxis) verbunden. Die Frequenzanalyse erfolgten mit dem Digital-Speicheroszilloskop YOKOGAWA DL 1540. Der Messraum war wie der übliche Raum einer ärztlichen Praxis ungeschirmt.

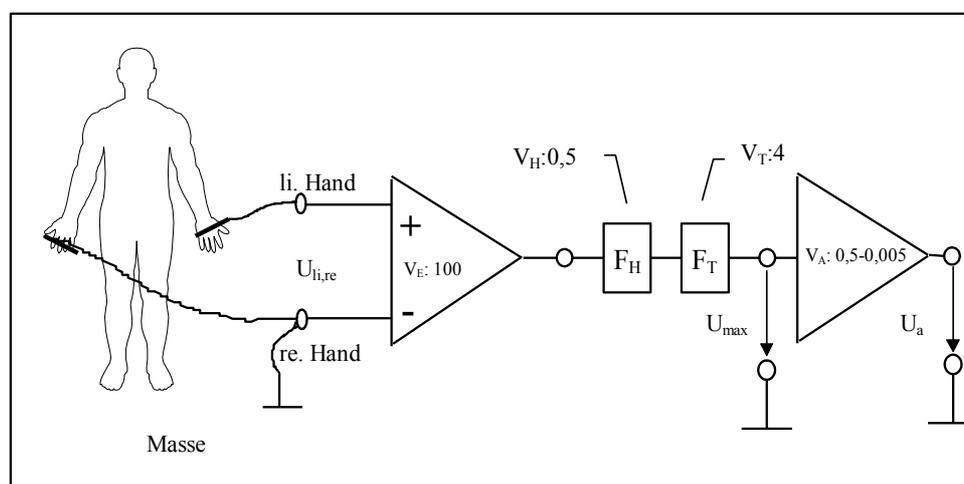
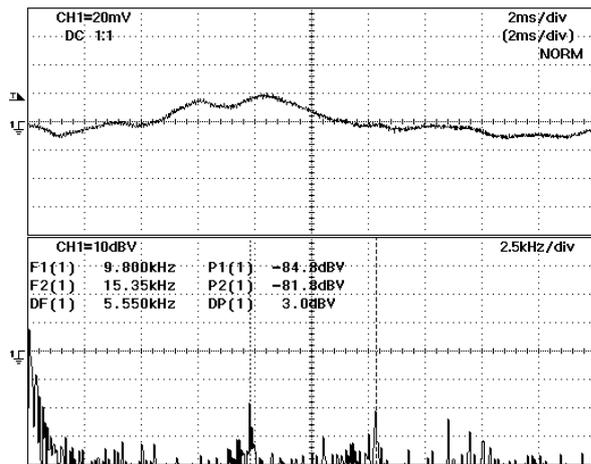
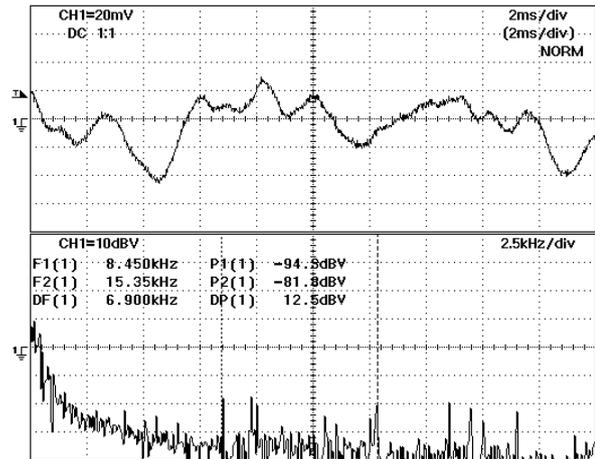


Abb.38: Messungsanordnung zur Erfassung körpereigener elm. Signale (schematisch)



ohne zusätzlichen Druck auf die Plattenelektroden
Verstärkung am Ausgang: V=100

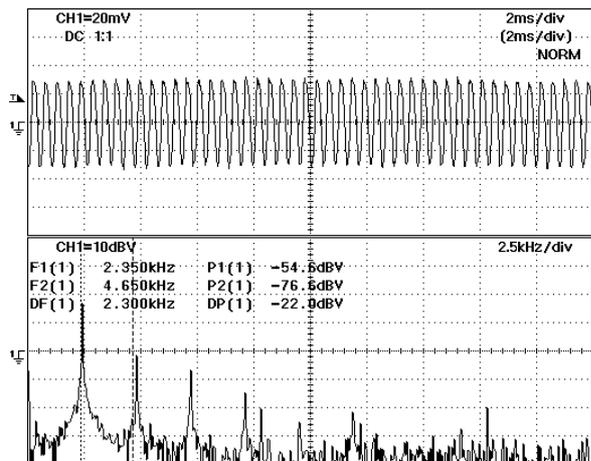


mit zusätzlichem Druck auf die Plattenelektroden
Verstärkung am Ausgang: V=100,

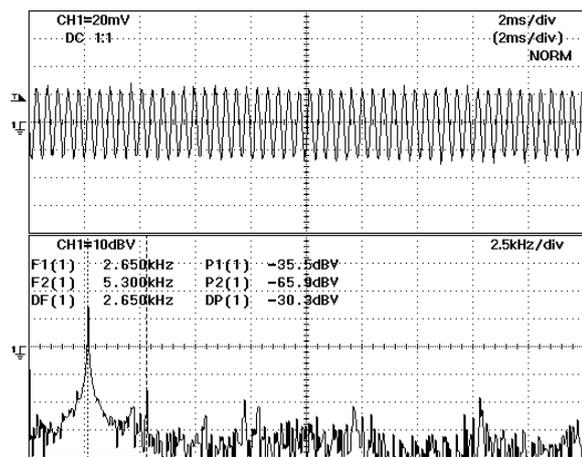
Abb. 40: BIT-Gerät im Verstärkerbetrieb: Zeitreihe (Zeit gegen Spannung) und Frequenzspektrum (Frequenz gegen dBV) einer Versuchsperson ohne und mit Druck auf die Plattenelektroden

b) Ergebnisse im Rückkopplungsbetrieb:

Bei einer Verstärkung von eins ($V=V_{\max} \times V_A = 200 \times 0,005 = 1$) begann bei allen Testpersonen der Oszillator „Testperson-BIT-Gerät“ zu schwingen, wenn der Meßverstärker nichtinvertierend betrieben wurde. Die Frequenz der Grundschwingung war von den einzelnen Testpersonen und von der Filterauswahl (Hochpaß, Tiefpaß) abhängig. Sie lag bei einer fixen Filterauswahl (Hochpass 100 Hz, Tiefpass 100 kHz) im Bereich zwischen 1,7 und 2,7 kHz und war damit personenspezifisch.



Versuchsperson: GS
Frequenz der Grundschwingung: 2350 Hz



Versuchsperson: HK
Frequenz der Grundschwingung: 2650 Hz

Abb. 41: BIT-Gerät im Rückkopplungsbetrieb: Zeitreihe (Zeit gegen Spannung) und Spektrum (Frequenz gegen dBV) zweier Versuchspersonen

Die in dieser Studie verwendete Versuchsanordnung (ungeschirmte Kabel und Räume) zum Nachweis körpereigener elektromagnetischer Schwingungen im Frequenzbereich 100 Hz - 100 kHz sollte die in der ärztlichen Praxis auftretenden Verhältnisse widerspiegeln. Unter wesentlich verbesserten Versuchsbedingungen (elektromagnetisch gut geschirmte Räume wie z. B. eine Absorberhalle) ist im Verstärkerbetrieb der Nachweis körpereigener Schwingungen in diesem Frequenzbereich vielleicht möglich. Im Rückkopplungsbetrieb verhält sich der menschliche Körper wie eine Impedanz im Kiloohmbereich. Dies konnte auch durch das Ersetzen des Körpers durch einen Widerstand nachgewiesen werden. Das erklärt das Auftreten von selbsterregten Schwingungen in dem Oszillator „Testperson - BITGERÄT“. Die individuellen Grundfrequenzen sind daher auf die unterschiedlichen Impedanzwerte der einzelnen Testpersonen zurückzuführen. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass sich im Krankheitsfall die Körperimpedanz drastisch verändern kann⁹¹

Zur 2. Phase: Das Studiendesign entsprach einer randomisierten Doppelblindstudie, da weder die Testpersonen noch der Versuchsleiter wussten, ob die Rückkopplung eingeschaltet war oder nicht (das erfolgte zufällig mittels eines Pseudo-Zufallsgenerators des Messcomputers). Die schon vorher dargestellte Photoplethymographie (PPG) ist eine nichtinvasive medizinische Standardmethode zur Untersuchung der peripheren Durchblutung (Pulsfrequenz, Sauerstoffsättigung, etc.). Sie wurde in der vorliegenden Studie zur Gewinnung zeitabhängiger physiologischer Messreihen verwendet wurde. Dabei wurde ein PPG-Sensor (Nellcor, DS-100 A) auf dem rechten Mittelfinger eines Probanden befestigt.

Die aufgenommenen Signale wurden mit einem am Atominstitut entwickelten Mehrkanalmeßsystem⁹² verstärkt, gefiltert, mit einer National-Instruments-Meßkarte XE-50 digitalisiert (Abtastrate 100 Hz, 16 Bit-Amplitudenauflösung) und im portablen Transdata-PC als ASCII-Dateien abgespeichert. Die experimentellen PPG-Daten wurden aus vier Phasen (jeweils 12 000 Messpunkte) einer 16 Minuten dauernden, kontinuierlichen Messung gewonnen: 4 min Kontrollmessung (Phase 1), 4 min Doppelblind-BIT-Einwirkung (Phase 2), 4 min Auswirkungsmessung (Phase 3), 4 min Auswirkungsmessung (Phase 4). Dieser Messablauf wurde an zwanzig verschiedenen Tagen zur gleichen Stunde an 3 Personen

⁹¹ Pers. Mitteilung von A. Stacher, Präsident der Wiener Int. Akademie für Ganzheitsmedizin, Wien-Oberlaa

⁹² M. Fassel; Bau eines Mehrkanalmeßgerätes zur Aufnahme und nichtlinearen Analyse physiol. Signale; Diplomarbeit, TU Wien, 1996

(männlich, Alter der Testperson T1: 58 Jahre, T2: 27 J., T3: 26 J., anamnestisch gesund) wiederholt.

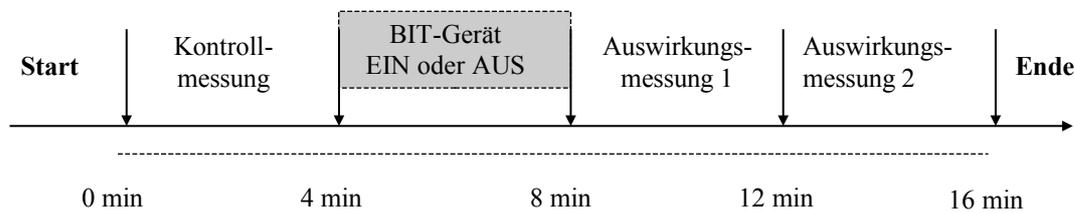


Abb. 42: Versuchsablauf bei der randomisierten Doppelblindstudie

PPG-Analyse:

Mittels Wavelet-Zerlegung wurden niederfrequente Anteile (physiologische Vorgänge länger als 3 Sekunden: Atmung, etc.) aus den PPG-Zeitreihen bestimmt und entfernt. Die so erhaltenen Zeitreihen wurden danach mittels nichtlinearer Analyse^{93, 94} (Zustandsraumrekonstruktion, Recurrence Plots und deren Maßzahlen: Ratio, Divergenz etc.) auf ihre Änderung des Informationsgehaltes untersucht. Unter der Annahme, dass auch das Plethysmogramm eine Projektion der Systemdynamik der niedrig-dimensionalen autonomen Regulation des menschlichen Organismus darstellt, wurde diese latente Dynamik mittels einer approbierten Methode in einem zur autonomen Regulation topologisch äquivalenten Zustandsraum der Systemvariablen rekonstruiert.

Für die einzelnen Parameter (PPG: Entropie, Ratio, Divergenz) der einzelnen Testpersonen wurden jeweils für den EIN- bzw. AUS-Zustand des BIT-Gerätes der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Unterschiede zwischen diesen Zuständen wurden für jede Testperson mit dem parameterfreien Wilcoxon-Test analysiert.

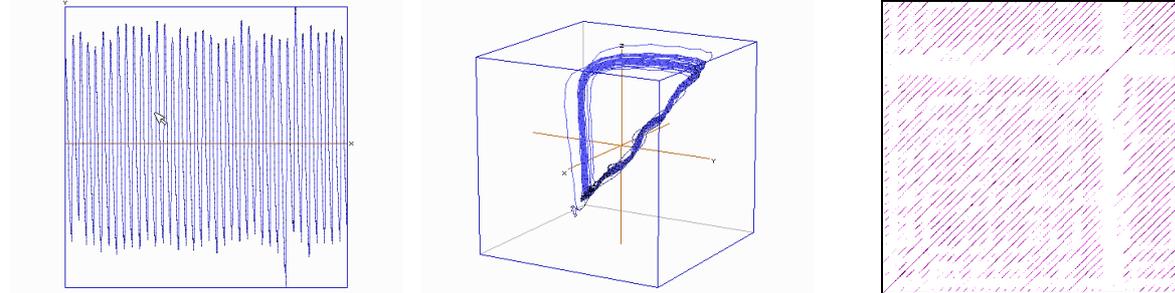
Für die Testpersonen T2 und T3 wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchen mit eingeschalteter und ausgeschalteter Rückkopplung festgestellt: in allen vier Phasen blieben Entropie, Ratio und Divergenz statistisch unverändert. Die Testperson T1 hingegen zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Versuchen mit ein- und

⁹³ Abarbanel, H.D.I., Brown, R., Sidorowich, J.J., Tsimming, L.S.: The Analysis Of Observed Chaotic Data In Physical Systems. *Reviews of Modern Physics*, Vol.65, No.4, p. 1331-1392, 1993

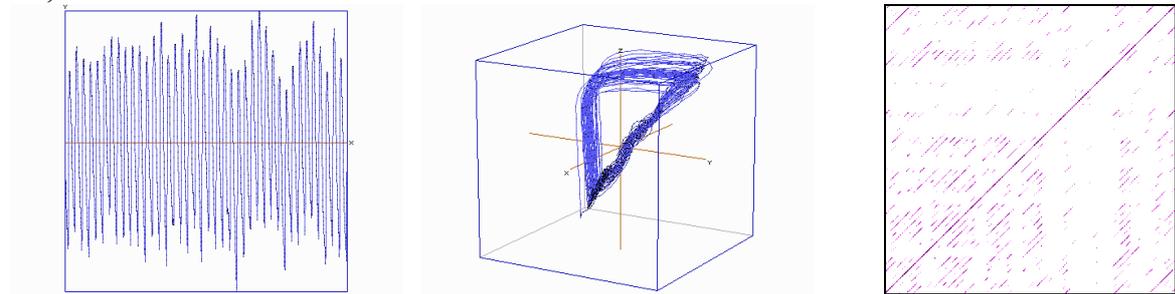
⁹⁴ P.E. Rapp, A Guide to Dynamical Analysis, in „Integrativ Physiological and Behavioral Science“, The Official Journal of the Pavlovian Society, Vol. 29, Nr. 3, 311, 1994

ausgeschalteten BIT-Gerät in der Divergenz in Phase 2 und im Ratio in der Phase 3. In allen anderen Phasen sowie im Entropie-Parameter fanden sich keine signifikanten Unterschiede

T1, Phase 1



T1, Phase 2



Zeitreihe

Attraktor

Recurrence Plot

Abb. 43: Zeitreihe, Attraktor und Recurrence Plot der Versuchsperson T1 für die Phase 1 (Kontrolle) und Phase 2 (BIT-Einwirkung)

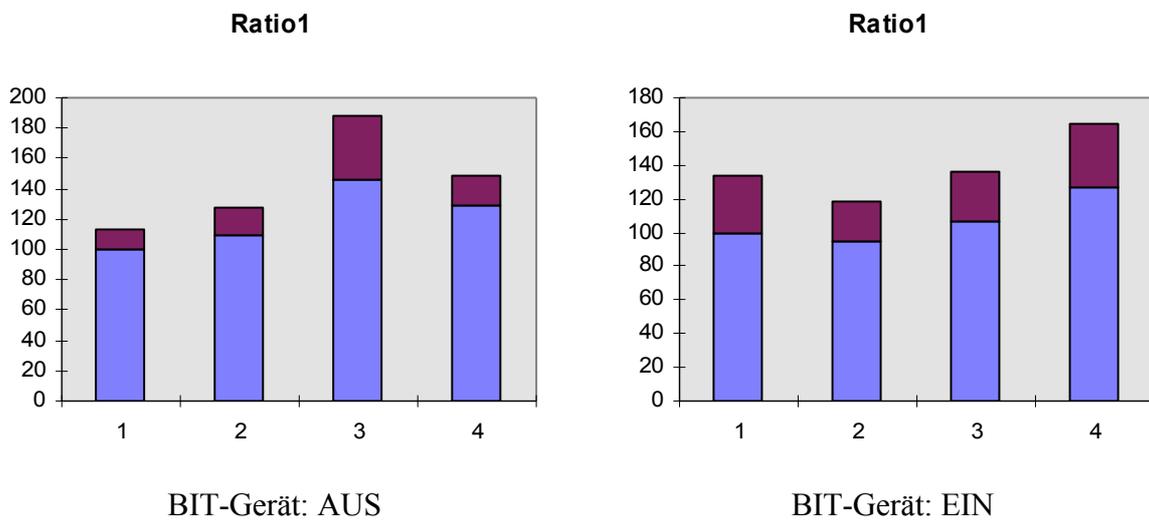


Abb. 44: Verlauf des Ratios (Recurrence Plot Parameter für Phasenübergänge) bei der Versuchsperson T1 bei aus- und eingeschalteten BIT-Gerät

Statistische Auswertung für das Ratio1 (Phase 3, Wilcoxon-Test): $p < 0.05$ wird angenommen

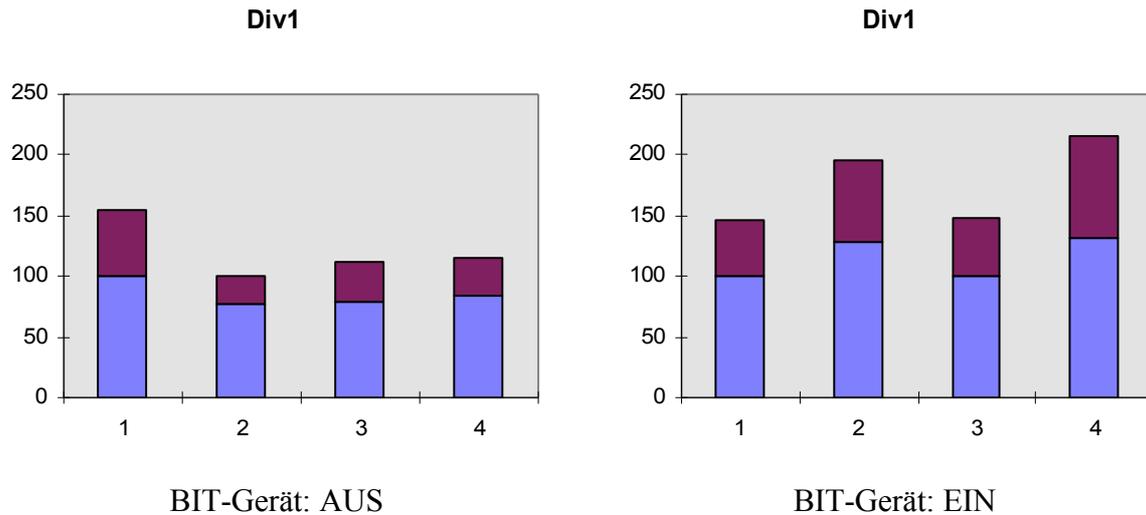


Abb. 45: Verlauf der Divergenz (Recurrence Plot Parameter für Vorhersagbarkeit einer dynamischen Entwicklung) bei der Versuchsperson T1 bei aus- und eingeschalteten BIT-Gerät

Die statistische Auswertung für Div1 (Phase 2, Wilcoxon-Test): $p < 0.05$ wird angenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den beiden jüngeren Testpersonen (T2 und T3) keine meßbare Auswirkungen der Rückkopplung auf die autonomen Regulationsvorgänge (Herzratenvariabilität und Dynamik der Pulscurve) feststellbar waren. Bei der wesentlich älteren Testperson T1 kann der Unterschied im Ratio in der Phase 3 als physiologische Zustandsänderung der Pulsdynamik interpretiert werden. Die bei eingeschaltetem BIT-Gerät höhere Divergenz dieser Testperson in Phase 2 deutet auf eine komplexere Zustandsraumdynamik der Pulscurve hin. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass nur die Testperson T1 mit einer Veränderung der autonomen Regulation auf das Einschalten des BIT-Gerätes reagierte: diese Veränderungen waren nur mit Hilfe der nichtlinearen Analyse darstellbar. In diesem Zusammenhang ist es auch interessant, dass diese Testperson eine ihrem Alter entsprechende eingeschränkte kardiovaskuläre Regulation in Ruhe aufwies (geringe RR-Variabilität und eine wenig variable Pulscurve).

Anwendungen in der medizinischen Lasertherapie

Lebewesen emittieren Photonen mit sehr geringer Intensität, die nur mit Spezialdetektoren (Photoelektronen-Vervielfachern) gemessen werden können. Da diese Photonen von Biosystemen stammen, nennt man sie Biophotonen, deren Existenz durch eine Vielzahl von

Untersuchungen belegt ist. Ein Beispiel dafür ist die Photonenemission aus phagozytierenden, weißen menschlichen Blutzellen (polymorphkernige Leukozyten)^{95, 96}

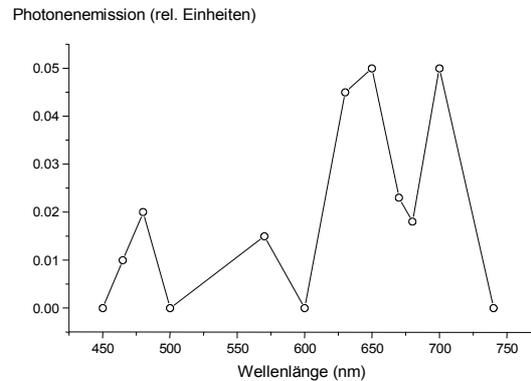


Abb.46: Photonenemission von phagozytierenden, weißen menschlichen Blutzellen

Dieses Licht aus Phagozyten wird vor allem von angeregten Singulett-Sauerstoff-Molekülen $^1\text{O}_2$ emittiert, was man nicht nur aus dem Spektrum, sondern auch aus biochemischen Studien im Rahmen der Phagozytose entnehmen kann. Die wichtigsten Wellenlängen von Singulett-Sauerstoff liegen bei 480, 570, 633, 700, 760, 1060 and 1270 nm.

Ein besonders interessantes biochemisches System ist die katalytische Oxidation von NADH, deren Photonenemission von N. Watanabe und H. Inaba untersucht wurde⁹⁷. Dabei stellte es sich heraus, dass diese Photonenemission oszilliert, wie es beispielsweise von nichtlinearen dynamischen Systemen bekannt ist:

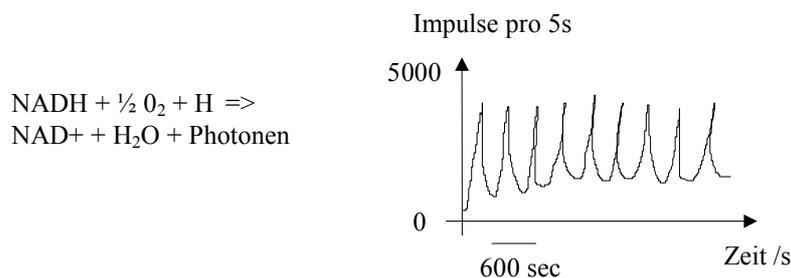


Abb.47: Photonenemission der katalytischen Oxidation von NADH

⁹⁵ P. Roschger, W. Graninger, H. Klima: Simultaneous detection of native and luminol-dependent luminescence of stimulated human polymorphonuclear leukocytes, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **123** (1984) 1047

⁹⁶ H. Klima, O. Haas, P. Roschger: Photon emission from blood cells and its possible role in immune system regulation, in "Photon Emission From Biological Systems" (Ed. B. Jezowska, B. Kochel, J. Slawinski, W. Strek) World Scientific Publishing, Singapore 1987

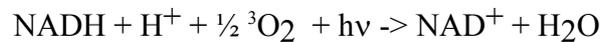
⁹⁷ N. Watanabe, H. Inaba; *Photochemistry and Photobiology* **57/3** (1993) 570-576

Die oben genannten Sauerstoff-Wellenlängen von 480, 570, 633, 700, 760, 1060 and 1270 nm sind andererseits imstande, Triplett-Zustände $^3\text{O}_2$ von Sauerstoff-Molekülen zu Singulett-Zuständen $^1\text{O}_2$ anzuregen:



Wahrscheinlich der wichtigste biochemische Prozess ist die Produktion von ATP mittels energiereicher Elektronen während der mitochondrialen Atmung (Glykolyse - Krebszyklus - Oxydation von NADH).

Photonen geeigneter Wellenlänge (480, 570, 633, 700, 760, 1060 and 1270 nm) könnten daher imstande sein, die Oxidation von NADH in der Atmungskette von Aerobiern zu beeinflussen:



Man kann in diesem Zusammenhang von einer durch Photonen (etwa als schwaches Laserlicht) stimulierten, mitochondrialen Atmung sprechen: diese „Singulett-Sauerstoff-These“ galt es zu untersuchen. Es schien daher notwendig, das stimulierende oder supprimierende Potential verschiedener elektromagnetischer Welle an unterschiedlichen Zellkulturen oder am ganzen Organismus zu testen. Eine große Zahl von Arbeiten handelt von Wirkungen mit 632,8 nm Helium-Neon-Laserlicht, wofür es eine Anzahl von Übersichtsartikel gibt⁹⁸. Dazu ein Beispiel: Bestrahlt man menschliche Stammzellen mit einem 632,8 nm He-Ne-Laser mit 100 J/m², so nimmt die Anzahl der Stammzellen pro Kolonie signifikant zu, verglichen mit der unbestrahlten Kontrolle⁹⁹.

⁹⁸ H. Klima: Biophysikalische Aspekte von Lasertherapien, in "Laser- und Infrarotstrahlen in der Akupunktur" (Ed. J. Bischo), Haug-Verlag, Heidelberg 1987

⁹⁹ H. Klima, F. Lehner: Effects of 633 nm He-Ne- Laser Light on the Cell Division of Human Stem Cells in »Proc. 8th Congress of the Int. Soc. for Laser Surgery and Medicine« (Ed. Waidelich), Springer Verlag, 1990, pg. 395-399

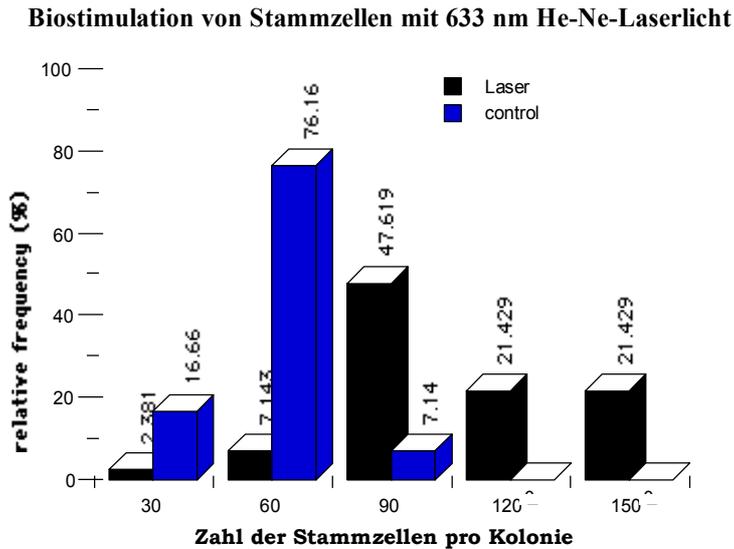


Abb.:48 Biostimulation von Stammzellen bestrahlt mit 632,8 nm He-Ne Laserlicht bei 100 J/m²

Um die Abhängigkeit des Wachstums von HeLa-Zellen von der Wellenlänge zu testen, wurde von uns für eine fixe Bestrahlung von 100 J/m² ein Aktionsspektrum erstellt:

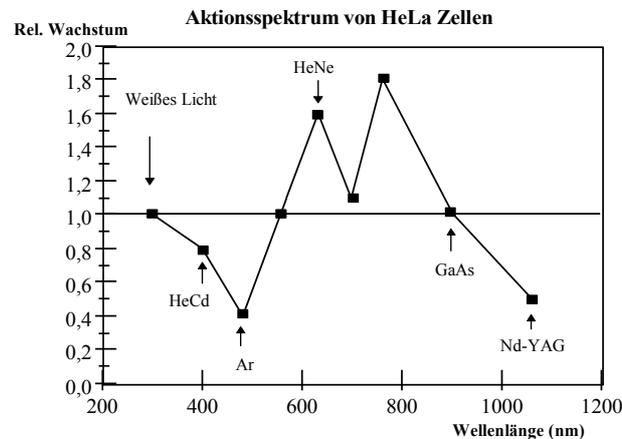


Abb.49: Aktionsspektrum von HeLa-Zellen nach Bestrahlung mit div. Wellenlängen bei 100 J/m²

Dabei zeigte sich, daß schwaches Laserlicht das Wachstum von HeLa-Krebszellen spezifisch hemmt oder anregt, und zwar je nach verwendeter Laser-Wellenlänge¹⁰⁰. Jüngste Untersuchungen unterstützen diese Singulett-Sauerstoff-These. So konnte nach Bestrahlung mit einem 480 nm Argon-Ionenlaser die Unterdrückung des Wachstums von Fibrosarkom-Zellen (Fc-HT2 Spindelzellen, zur Verfügung gestellt vom Institut für Krebsforschung, Universität Wien) gemessen werden¹⁰¹. Normale Fibroblasten zeigten keine

¹⁰⁰ H. Klima, F. Lehner: Action Spectrum of Different Wavelength due to the Photon Emission of Excited Oxygen Molecules Involved in Phagocytosis, in »Proc.8th Congress of the Int. Soc. for Laser Surgery and Medicine 1989« (Ed. Waidelich), Springer Verlag, 1990, pg. 390-394

¹⁰¹ A. Soltani-Ghassemi: Wachstumsregulierende Wirkung von 480 nm Photonen auf Fibrosarkom- und Fibroblast-Zellen; Dissertation, TU Wien, 1995

Wachstumsänderung. Das Wachstum der Zellen wurde mit drei unterschiedlichen Methoden gemessen: zytometrisch, photometrisch und radiochemisch.

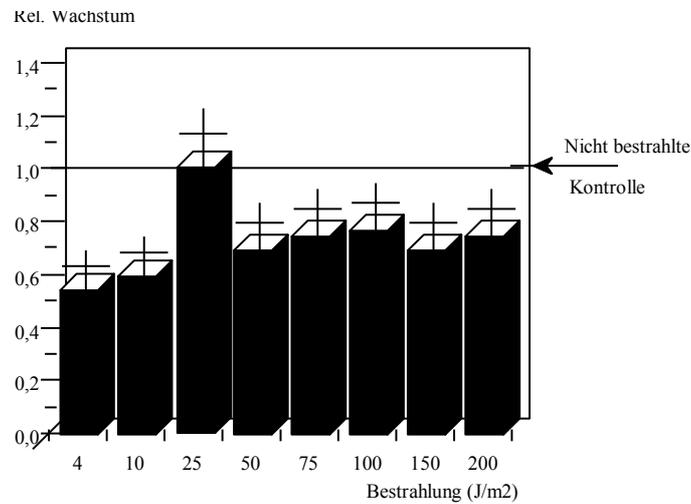


Abb.50: Suppression des Wachstums von Fibrosarkomzellen mit einem 480 nm Argon-Ionen-Laser in Abhängigkeit von der Bestrahlung

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Zellen durch die Bestrahlung nicht getötet wurden, sondern lebten, was mit Anfärbemethoden gezeigt wurde. Es wurde durch die sanfte Laserbestrahlung nur ihre Teilungsrate gesenkt.

In ähnlicher Weise konnte die Suppression des Wachstums von HeLa-Zellen (Cervix-Carcinom) nach Bestrahlung mit 1060 nm Nd-YAG-Laser bei unterschiedlicher Bestrahlung (100 bis 500 J/m²) gezeigt werden, wie die folgende Abbildung zeigt. Wieder wurden zytometrische und photometrische Methoden zur Bestimmung des Wachstums der Zellen eingesetzt.

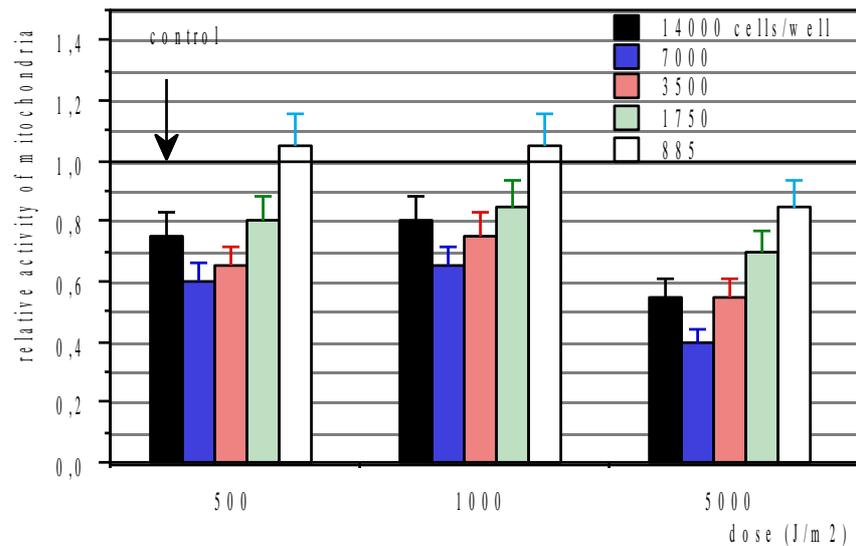
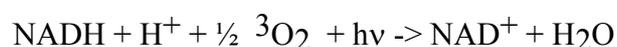


Abb.51: Aktivität der Mitochondrien nach unterschiedlicher Bestrahlung mit 1064 nm Nd-YAG Laser für unterschiedliche Zelldichten (cells/well) mittels photometrischer Methoden¹⁰²

Nichtlineare Modellierung am Beispiel der Laserwirkung:

Einfluss von Photonen auf die nichtlineare Dynamik der NADH-Oxidation

Es geht nun darum, den empirisch nachweisbaren Einfluss von Photonen auf das Zellwachstum und die damit verbundene elektromagnetische Bioinformation in Begriffen nichtlinearer dynamischer Systeme zu modellieren. Licht spezieller Wellenlängen ist imstande, Triplett-Sauerstoff-Moleküle $^3\text{O}_2$ zu Singletts $^1\text{O}_2$ anzuregen. Es ist bekannt, dass Singulett-Sauerstoff $^1\text{O}_2$ in der katalytischen Oxidation von NADH eine besondere Aufgabe hat. Diese katalytische Oxidation von NADH zeigt unterschiedliches dynamisches Verhalten wie Oszillationen, Chaos, etc. (siehe Abb. 47), abhängig vom Stoffdurchfluss durch das offene System. Dieses nichtlineare Verhalten des NADH-Metabolismus veranlasst uns zu folgender Interpretation: kleine Veränderung der elektromagnetische Kopplung des Systems zu seiner Umwelt sind imstande, Bifurkationen im NADH-System zu erzeugen, die zu makroskopischen Auswirkungen (zu Änderungen im Zellwachstum, etc), d.h. zu elektromagnetischen Bioinformationen führen:



¹⁰² K. Torghele: Wachstumregulierende Wirkung von 1060 nm Photonen auf HeLa-Krebszellen; Dissertation, TU Wien, 1993

Das folgende nichtlineare dynamische Modell soll imstande sein, den Einfluß von Licht ($h\nu$) auf die katalytische Oxidation von NADH als offenes System beschreiben. Es wurde von einem Vorgängermodell¹⁰³ abgeleitet, das die Peroxidase-oxidase-katalysierte Oxidation von NADH beschreibt.

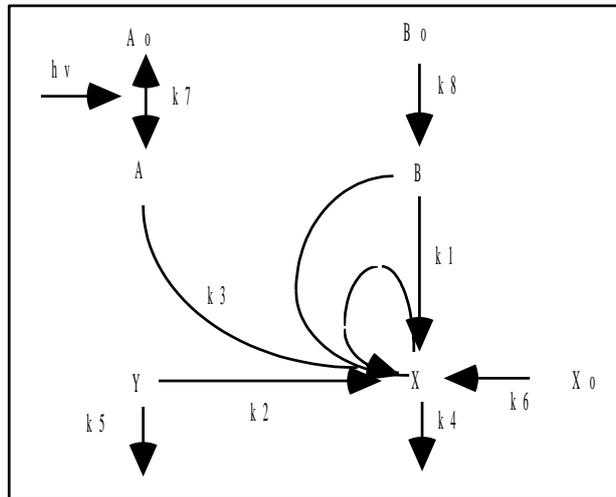


Abb. 52: Nichtlineares Modell des Einflusses von Photonen ($h\nu$) auf die Dynamik der NADH-Oxidation

A_0 kennzeichnet den 3O_2 -Zufluss, A steht für 1O_2 , B_0 für den NADH-Zufluß, B für NADH in Lösung, X and Y repräsentieren freie Radikale von $O_2^{\cdot-}$ and $NAD^{\cdot-}$. Die k_i sind Konstanten und korrespondieren mit der Kopplung der Reaktionspartner. Wie durch ein Pfeil ausgedrückt wird, koppelt k_7 mit der Photonenbestrahlung. Daher ist k_7 eine Funktion von $h\nu$! Aus diesem Modell erhält man die folgenden nichtlinearen Differentialgleichungen:

$$dA/dt = k_7(A_0 - A) - k_3ABY$$

$$dB/dt = k_8B_0 - k_1BX - k_3ABY$$

$$dX/dt = k_1BX - 2k_2X^2 + 3k_3ABY - k_4X + k_6X_0$$

$$dY/dt = 2k_2X^2 - k_3ABY - k_5Y$$

Wenn man die folgenden Kontrollparameter und Anfangsbedingungen benutzt:

¹⁰³ L.F. Olsen, L.L. Hofman-Frisch, W.M.Schaffer; The Peroxidase Reaction: A Case for Chaos in the Chemistry of the Cell, in "A Chaotic Hierarchy", World Scientific, Singapore 1990

$k_1 = 0.4$, $k_2 = 250$, $k_3 = 0,035$, $k_4 = 20$, $k_5 = 5.35$, $k_6 X_0 = 10^{-5}$, $k_7 (500 < t < 600) = 0.13$,
 $k_8 B_0 = 0.825$, $A_0 = 8.0$, $A = 8$, $B = X = Y = 0$, so ist das Differentialgleichungssystem lösbar.
 Die graphische Lösung der Zeitreihe von Singulett-Sauerstoff in Lösung zeigt den Einfluß der
 Photonen auf die Dynamik des Systems, die ein transientes Verhalten aufweist¹⁰⁴.

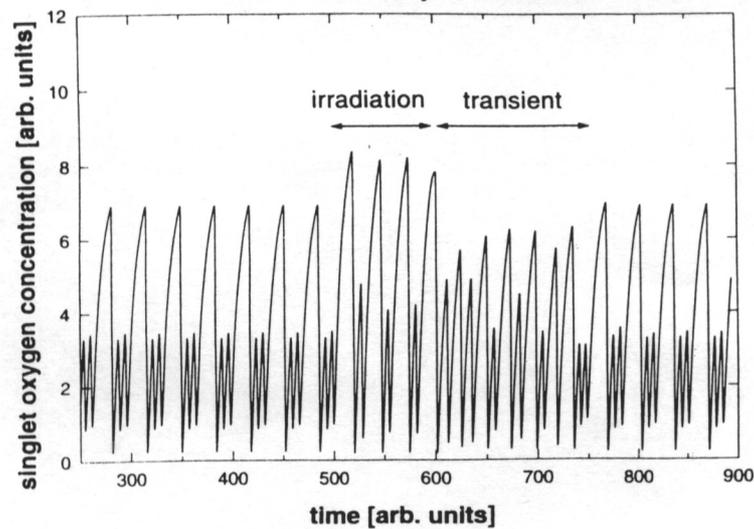


Abb.53: Einfluß von Photonen (Start bei $t=500$, Ende $t=600$) auf die katalytische NADH-Oxidation

Fazit: Die elektromagnetische Wechselwirkung ist in der Biologie dominant. Der menschliche Organismus ist ein nichtlineares dissipatives System, das imstande ist, schwache Reize zu verstärken. Menschliche polymorphkernige Leukozyten senden Photonen bei 480, 570, 633, 760, 1060, 1270 nm. Dies führt zu unserer Singulett-Oxygen-These: diese Wellenlängen sind imstande, die nichtlineare Dynamik der Oxidation von NADH zu beeinflussen.. Wenn man diese Wellenlängen benutzt, um ein Aktionsspektrum experimentell zu erstellen, so erhält man Stimulation oder Suppression des Wachstums von Zellen. Wir fanden signifikante Suppression der Aktivität von Mitochondrien, des Zellwachstums von Fibrosarkomen nach Bestrahlung mit 1060 nm. Wir fanden weiter eine signifikante Suppression bei 480 nm. Modelliert man den Einfluss von Photonen auf Singulett-Sauerstoff als wichtiger Bestandteil in dem fundamentalen nichtlinearen dissipativen Biosystem, nämlich der katalytischen Oxidation von NADH in der Atmungskette, so zeigt die Lösung der dynamischen Gleichungen einen Einfluss der Photonen auf die Dynamik des Systems. Dies ist ein schönes Beispiel für die Anwendung nichtlinearer dynamischer Systeme in der Biophysik.

¹⁰⁴ K. Torghelle, H. Klima, H. Schwabl: Light induced suppression of cancer cell growth; in "Biological Effects of Light", (Eds. E.G. Jung, M.F. Holick), Walter de Gruyter, Berlin 1994, pg. 122 - 129

6. Epilog

Was ist Natur? Was ist Leben? Was ist Ganzheitsmedizin? Wir Menschen empfinden die Welt nur über unsere Sinnesorgane. Alles, was unsere Sinnesorgane affiziert, ist Umwelt, ist Natur. Die Frage ist nur, welches Bild sich unsere Vorstellung von Natur macht. Die Physik ordnet ihre Eindrücke in einem Raster aus Raum, Zeit und der Materie samt ihrem Feld unter Zuhilfenahme des Satzes vom zureichenden Grunde. Für unsere Betrachtungen lebender Systeme waren vor allem die elektromagnetische Materie und ihr Feld entscheidend, ihre von uns vorgestellten Gesetze werden in der Quantenelektrodynamik (QED) geregelt. Diese Vorstellungen sind jedoch idealisiert. Reale elektrodynamische Systeme weichen immer vom Ideal ab, so wie jeder reale, allmählich verfallende Kreis nur ein ungenügendes Abbild des idealen Kreises ist. Offene quantenelektrodynamische Systeme wie der Laser zeigen einige Merkmale, die auch lebenden Systemen zukommen: Selbstorganisation, Kohärenz, Komplexität, Instabilität, etc. Wesentliche Merkmale des Lebendigen fehlen aber.

Was aber ist die Natur des Lebendigen? Welche Merkmale kommen ihr zu? Leben beginnt nicht jedes Mal neu, sondern entstand einmal. Es kann auch nicht erzeugt werden – jedenfalls bis heute nicht: Leben hat eine unverwechselbare Geschichte, die man Evolution nennt und die zur Vielfalt des Lebendigen führte. Die lebende Natur hat ein weiteres unverzichtbares Merkmal: es katalysiert sich selber, indem es sich und seine Teile, die es erhalten, ständig reproduziert. Diese Autokatalyse ist jedoch nicht exakt, sondern mit kleinen Abweichungen behaftet, die in der Natur des Realen liegen. Daher mutiert das Leben, und zwar zu immer komplexeren Systemen in äußerst kreativer Weise, um in der Evolution weiter als erfolgreiche Mutante bestehen zu können, d.h. selektiert zu werden. Nach M. Eigen ist das Selektionsprinzip ein Naturgesetz: was als Mutante in der Überzahl ist, das wächst weiter, es hat daher Vorteile in der Evolution. Dazu konkurriert oder kooperiert es manchmal, bildet Hyperzyklen, vielzellige Verbände, komplexe Systeme, Symbiosen - mit einem Wort: ist ständig kreativ. Man kann dieses Verhalten auch etwas anders formulieren: die Biosphäre versucht mit all ihren Möglichkeiten und schöpferischen Kräften den Gradienten zwischen der hochwertigen Sonnenenergie und der geringwertigen, letztlich verbleibenden Wärmeenergie optimal auszunutzen und den Übergang ins thermische Gleichgewicht epochal zu verzögern. Diese Antwort entspricht etwa jener, die der österreichische Physiker L. Boltzmann auf die Frage gab, was denn der Zweck und das Wesen des Lebens sei: „Nicht um Energie ringen die

Lebewesen, Energie gibt es immer und überall, sondern um Negentropie“. Das heißt, sie ringen in ihrem Leben beständig, den Gradienten zwischen der hochwertigen Sonnenstrahlung und der geringwertigen Wärmestrahlung aufrecht zu erhalten. Dazu strecken die Pflanzen im Kampf ums Dasein ihre Blätter der Sonne entgegen und dazu kämpfen Tiere und Menschen in den Nahrungsketten. Erwin Schrödinger, ein Schüler Boltzmanns in zweiter Generation und einer der Väter der modernen Quantentheorie, hat dies noch einmal auf den Punkt gebracht: Das eigentliche Geheimnis des Lebens ist es, dass es dem Organismus (als offenem System) gelingt, die immer entstehende Entropie bzw. Unordnung in Form von Wärme loszuwerden, andernfalls er dem Tod zustreben würde. Das Leben bzw. ein Organismus ist dann gefährdet, wenn der Gradient zusammenbricht, wenn das thermodynamische Gleichgewicht, d.h. der Tod droht; dies ist dann der Fall, wenn es zu einer Anhäufung von Unordnung bzw. von Entropie im Organismus kommt: wenn quasi Sand ins Getriebe des Lebensprozesses und seiner notwendigen Regulation kommt.

In der Physik sucht man nach Gesetzen in der Natur, die zeitunabhängig sind – im gewissen Sinn ist die Physik daher platonisch. Der belgische Nobelpreisträger I. Prigogine, der stark in der Tradition der aristotelischen Denkweise eine biologische Physik vertritt, hat sich als scharfer Kritiker der traditionellen physikalischen Position, wie sie etwa von Einstein vertreten wurde und wonach die Zeit nur eine Illusion sei, stark profiliert. Da die Zeit sehr innig mit dem Begriff der Irreversibilität, d.h. der Unumkehrbarkeit verbunden ist, wird Prigogine zum geistigen Kämpfer für das Gesetz des unaufhörlichen, schöpferischen Wandels: er verankert bzw. axiomatisiert die Irreversibilität schon im Elementar-Mikroskopischen. Daraus entspringen im Makroskopischen schlüssig eine Fülle von möglichen Systemdynamiken, aber auch die weitreichende Kohärenz als Vorbedingung der Ganzheit und Komplexität, weiter die hohe Sensibilität derartiger Systeme gegen Änderungen der Anfangsbedingungen ihrer Variablen, vor allem aber die Unvorhersagbarkeit ihrer Entwicklung, die Gesetze der Evolution und dergleichen mehr.

Systemisches Denken zielt auf eine Erfassen von Ganzheiten hin. Kann das Ganze überhaupt Gegenstand der Erfahrung sein? Ja, und zwar dann, wenn die metaphysischen Ganzheiten bzw. Monaden und die physischen Objekte einander bedürfen. In diesem Fall gibt es nach Leibniz zur ungeheuren Vielfalt von physischen Objekten auch das metaphysische Korrelat der Vielheit von Monaden, die jedoch nur unterschiedliche Abbilder

einer einzigen kosmischen Ganzheit darstellen. Die moderne Systemtheorie, die dynamische Ganzheiten beschreibt, kommt der Leibnizschen monadenhaften Auffassung von kleinen, die Ganzheit repräsentierenden Spiegeln mit dem Begriff des Fraktals sehr nahe: ein Fraktal ist ein Gebilde, das in jedem Teil des Systems die Ganzheit selbstähnlich widerspiegelt.

Fraktale sind die wahren Formen der Natur, insbesondere der belebten Natur. Fraktale findet man im menschlichen Organismus: das Blutgefäßsystem ist ein Fraktal, ebenso die Lunge, die Niere oder das Gehirn. Besonders bemerkenswert ist die Selbstähnlichkeit des Fraktals der Akupunkturpunkte: auch hier findet sich die Ganzheit, repräsentiert durch die Akupunkturpunkte des menschlichen Organismus, im Detail wieder: im Ohr, in der Nase, auf den Fußsohlen, in den Handflächen, auf dem Schädel, etc. Aus dieser fraktalen Sichtweise ist es daher nicht überraschend, wenn man eine Diagnose nicht nur über indizierte Körperpunkte, sondern z. B. auch über indizierte Ohrpunkte erstellen und eine Therapie etwa mit Laserlicht vornehmen kann. Aber auch die Homöopathie und ihr Simileprinzip können von der biophysikalisch-systemischen Sichtweise dynamischer Prozesse und der selbstähnlicher Ganzheiten sehr profitieren, wenn sie den Zustand des Organismus und des Arzneimittels als dynamische Fraktale betrachten, die miteinander elektromagnetisch wechselwirken können.

Fraktale liegen nämlich nicht nur den wahren Formen, sondern auch den wahren dynamischen Prozessen der lebenden Natur zugrunde: Der menschliche Organismus ist ein offenes System, das seine hochkomplexe Ordnung nur durch den Prozess der Dissipation von hochwertiger Sonnenenergie in geringwertige Wärme aufrecht erhalten kann. Die dazu erforderlichen physiologischen Prozesse sind untereinander zu einem nichtlinearen Netzwerk verkoppelt, das optimal und dynamisch reguliert wird, wenn der Organismus gesund ist. Ist diese Regulation instabil und gestört, so ist der Organismus krank. Gerade in solchen Fällen können – wie etwas die Akupunktur oder Lasertherapie zeigen - kleinste, jedoch gezielte Einflüsse bzw. Reize dem Kranken wieder auf die Beine helfen.

Möge sich die Ganzheitsmedizin dieser Möglichkeit in Zukunft immer deutlicher bewusst werden!

7. Ergänzende Literatur im Umfeld der Biophysik

- Arrowsmith D.K., C.M. Place: Dynamische Systeme, Spectrum, Heidelberg 1994
- Barenboim G.M., A.N. Domanskii, K.K. Turoverov: Luminescence of Biopolymers and Cells; Plenum Press, New York 1969
- Barnsey M.: Fractals Everywhere; Academic Press, London 1988
- Barnsley M., L.B. Hurd: Fractal Image Compression; AK Peters Ltd, Wellesly, 1993
- Becker R.: Theorie der Wärme; Springer-Verlag, Berlin 1978
- Bertalanffy L. W. Beier, R. Laue: Biophysik des Fließgleichgewichtes; Vieweg, Braunschweig 1977
- Blumenfeld L.A.: Problems of Biological Physics; Springer Verlag, Berlin 1981
- Breckow J., R. Greinert: Biophysik, Walter de Gruyter Verlag, Berlin 1994
- Buzug T.: Analyse Chaotischer Systeme; BI-TB, Mannheim 1994
- Capra F.: Lebensnetz, Knauer, München 1999
- Chardin P.T.: Der Mensch im Kosmos; Verlag C.H. Beck, München 1994
- Clayton R.K.: Photobiologie; Verlag Chemie – Physik Verlag, Weinheim 1966
- Crick F.: Das Leben selbst; Piper 1981
- Czihak G., H. Langer, H. Ziegler (eds.): Biologie; Springer-Verlag, Berlin 1996
- Degn H., A.V. Holden, L.F. Olsen: Chaos in Biological Systems; Nato ASI Series, Series A: Life Sciences Vol. 138, Plenum Press, New York 1987
- Dwillio M.: Prinzipien der Evolution; Teubner Taschenbücher, Stuttgart 1978
- Ebeling W., A. Engel, R. Feistel: Physik der Evolutionsprozesse; Akademie-Verlag, Berlin 1990
- Eberling W., R. Feistel: Chaos und Kosmos; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994
- Eigen M., P. Schuster: The Hypercycle, Springer Verlag, Berlin 1979
- Eigen M., R. Winkler: Das Spiel; Piper, München 1996
- Enns R.H., B.L. Jones, R.M. Miura, S.S. Rangnekar, Nonlinear Phenomena in Physics and Biology, Plenum Press, New York 1980
- Erne S.N., H.D. Hahlbohm, H. Lübbig: Biomagnetism; Walter de Gruyter, Berlin 1981
- Feynman R., Leighton, Sands: Vorlesungen über Physik; Oldenbourg Verlag; München 1974
- Fröhlich H., F. Kremer: Coherent Excitations in Biological Systems; Springer-Verlag, Berlin 1983
- Glaser R.: Biophysik; UTB Fischer, Stuttgart 1986
- Glass L., P. Hunter, A. McCulluch: Theory of Heart – Biomechanics, Biophysics and Nonlinear Dynamics of Cardiac Functions, Springer-Verlag, Berlin 1991
- Haken H. (ed.): Synergetics – Cooperative Phenomena in Multi-Component Systems; Teubner, Stuttgart 1973
- Haken H.: Advanced Synergetics; Springer-Verlag, Berlin 1993
- Haken H.: Die Selbststrukturierung der Materie; Vieweg, Braunschweig 1991
- Haken H.: Licht und Materie I, II, BI-TB, Mannheim 1979, 1981
- Haken H.: Synergetics – An Introduction; Springer-Verlag, Berlin 1978
- Ho M.W., F.A. Popp, U. Warnke: Bioelectrodynamics and Biocommunication; World Scientific, Singapore 1994

- Hofbauer J., K. Sigmund: Evolutionstheorie und dynamische Systeme; Paul Parey, Berlin 1984
- Holik M.F., E.G. Jung: Biologic Effects of Light, Walter de Gruyter, Berlin 1996
- Honerkamp J.: Stochastische Dynamische Systeme, VCH-Verlag, Weinheim 1990
- Hoppe W., W. Lohmann, H. Markl, H. Ziegler: Biophysik; Springer Verlag, Berlin 1977
- Horsthemke W., R. Lefever: Noise-Induced Transitions – Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology; Springer Verlag, Berlin 1984
- Jan J., P. Kilia, I. Provaznik: Analysis of Biomedical Signals and Images; Technical University Press, Brno 1996
- Jezowska-Trebatowska B., B. Kochel, J. Slawinski, W. Strek: Biological Luminescence; World Scientific, Singapore 1990
- Jezowska-Trebatowska B., B. Kochel, J. Slawinski, W. Strek: Photon Emission from Biological Systems, World Scientific, Singapore 1987
- Kaplan R.W.: Der Ursprung des Lebens; dtv – Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1972
- Karu T.I.: Photobiology of Low-Power Laser Therapy; Harwood Academic Publishers, Chur 1989
- Katchalsky A., P.F. Curran: Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics; Havard University Press, Cambridge 1975
- Kluge G., G. Neugebauer: Grundlagen der Thermodynamik; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994
- Koslow S.H., A.J. Mandell, M.F. Shlesinger: Perspectives in Biological Dynamics and Theoretical Medicine; Annals of the New York Academy of Sciences, Vol 504, New York 1987
- Küppers B.A. (ed.): Ordnung aus dem Chaos; Piper, München 1988
- Küppers B.O.: Der Ursprung der biologischen Information; Piper, München 1990
- Lamprecht I., A.I. Zotin (eds.): Thermodynamics and Kinetics of Biological Processes; Walter de Gruyter, New York 1983
- Laskowski W., W. Pohlit: Biophysik I, II; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1974
- Lehninger A.L.: Bioenergetik; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1974
- Leitgeb N.: Strahlen, Felder, Wellen; dtv-Verlag, München 1990
- Li K.H.: Physics of Open Systems; Physics Report Vol. 134/1 (1986) 3 - 82
- Liebert W.: Chaos und Herzdynamik, Verlag Harry Deutsch, Frankfurt 1991
- Lokhovskiy G.: Das Geheimnis des Lebens; VGM Verlag für Ganzheitsmedizin, Essen 1981
- M. Daune: Molekulare Biophysik; Vieweg, Braunschweig 1997
- Mandelbrot B.: Fractal Geometry of Nature; W.H. Freeman, New York 1977
- Maturana H.R., J. Varela: Der Baum der Erkenntnis; Goldmann-Verlag 1984
- Maturana H.R.: Erkennen – Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit; Vieweg, Braunschweig 1985
- Meier C.A.: Wolfgang Pauli und C.G. Jung – Ein Briefwechsel 1932 – 1958; Springer Verlag, Berlin 1992
- Meystre P., M. Sargent: Elements of Quantum Optics; Springer Verlag, Berlin 1999
- Nicolis G., I. Prigogine: Die Erforschung des Komplexen; Piper, München 1987
- Nicolis G., I. Prigogine: Self-Organisation in Nonequilibrium Systems; John Wiley & Sons, New York 1977
- Pawelzik K.: Nichtlineare Dynamik und Hirnaktivität; Verlag Harry Deutsch, Frankfurt 1992
- Peitgen H.O., H. Jürgens, D. Saupe: Chaos and Fractals; Springer Verlag, Berlin 1992

- Perina J.: Quantum Statistics of Linear and Nonlinear Optical Phenomena; Reischel Publishing Company, Dordrecht 1984
- Pfützner H.: Elektrobiologie; Skriptum TU-Wien, 1987
- Popp F.A., G. Becker, H.L. König, W. Peschka: Electromagnetic Bio-Information, Urban & Schwarzenberg, München 1979
- Popp F.A., K.H. Li, Q. Gu: Recent Advances in Biophoton Research and Its Applications; World Scientific, Singapore 1992
- Prigogine I., I. Stengers: Das Paradox der Zeit – Zeit, Chaos und Quanten; Piper, München 1993
- Prigogine I.: Die Gesetze des Chaos; Insel Taschenbuch, Insel Verlag 1998
- Prigogine I.: Vom Sein zum Werden; Piper, München 1979
- Ramm B., N. Hahn: Physikalische Grundlagen der Physiologie; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1974
- Röpke G.: Statistische Mechanik für das Nichtgleichgewicht, VEB, Berlin 1987
- Sachsse H.: Die Erkenntnis des Lebendigen; Vieweg, Braunschweig 1968
- Sachsse.: Einführung in die Kybernetik; Vieweg, Braunschweig 1974
- Schneider F.W., A.F. Münster: Nichtlineare Dynamik in der Chemie; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996
- Schrödinger E.: Was ist Leben?; Piper, München 1993
- Schuster H.G.: Deterministische Chaos; Physik-Verlag, Weinheim 1984
- Selinger H.H., W.D McElroy: Light - Physical and Biological Action, Academic Press 1965
- Serra R., G. Zanari, M. Andretta, M. Comani: Physics of Complex Systems; Pergamon Press, Oxford 1986
- Smith C.W., S. Best: Electromagnetic Man; J.M.Dent & Sons, London 1990
- Smolin L.: Warum gibt es die Welt – Die Evolution des Kosmos; Verlag C.H. Beck, München 1999
- Springer Series on Synergetics
- Steinbuch K.: Automat und Mensch; Springer Verlag 1971
- Tembrock G.: Biokommunikation, Vieweg, Reinbeck 1975
- Thomas J.B.: Einführung in die Photobiologie; Thieme Verlag, Stuttgart 1968
- van Dyke K.: Bioluminescence and Chemiluminescence; CRC-Press, Boca Raton 1985
- Verhulst F.: Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems; Springer Verlag, Berlin 1990
- Watson J.D.: Molekularbiologie des Gens; Inter European Edition, Amsterdam 1975
- Weizsäcker E. (ed): Offene System I – Beiträge zur Zeitstruktur von Information, Entropie und Evolution; Ernst Klett Verlag, Stuttgart 1974
- West B.J.: Fractal Physiology and Chaos in Medicine, World Scientific, Singapore 1990
- Wiggins S.: Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos; Springer Verlag, Berlin 1990
- Winter R., F. Noll: Methoden der Biophysikalischen Chemie; Teubner Studienbücher, Stuttgart 1998

Anhang A

Disziplinen im Umfeld der Biophysik

Disziplin	Allgemein	Speziell	Repräsentanten
Physik:	Konservative Systeme Dissipative Systeme QED & NGG-TD Hydrodynamik	Quantenelektrodynamik QED Nichtgleichgewichte NGG-TD Laser, Synergetik Benard-Instabilität	Feynman Boltzmann, Prigogine Haken Lorenz
Chemie:	Biochemie Chem. Evolution	Biomoleküle Hyperzyklen	Pauling, Chargaff Eigen, Schuster
Biologie:	Physiologie Systematik Morphologie Biol. Evolution Autopoiese Molekularbiologie	Allgemeine Systemtheorie L-Systeme Mutation – Selektion Selbstorganisation Genetik	Bertalanffy Linne Lindenmayr, Cuvier Darwin, Monod Varela, Maturana Watson, Crick, Arbers
Psychologie:	Experimentelle Psychologie Tiefenpsychologie		Gutmann Freud, Jung
Mathematik:	Theorie dynamischer Systeme Fraktale Geometrie	Deterministische Systeme Stochastische Systeme Iterierte Funktionssysteme	Poincare, Smale, Thom, Markov, Wiener Mandelbrot, Barnsley
Medizin:	Regulationsmedizin Physiologie Neurologie	Med. Kybernetik Sinne, Chronobiologie	Pischinger Helmholtz, Hildebrandt Eccles
Kybernetik:	Quantitative Kybernetik Regeltechnik Informatik	Informationstheorie Nachrichtentechnik	Shannon, Jaynes Sachsse Wiener, v. Neumann
Logik:	Aussagenlogik Prädikatenlogik Komplementarität		Laotse, Pietschmann
Metaphysik:	Taoismus Ganze im Rationalismus Ganze im Irrationalismus Synchronizität	Taoteking Monadologie Wille & Vorstellung Archetypen	Laotse Leibniz Schopenhauer C.G.Jung, W. Pauli
Ethik:	Lebensethik Ganzheitsethik Ökologische Ethik	Evolution, Gaya-Hypothese Mystik Symbiosen, Synergien	T. de Chardin, Lovelock Buddha, Eckehard, Bruno Upanishaden, Mach

Anhang B:

Lehr- und Forschungsziele für eine „Systemorientierte Biophysik“

- Sinn des Lebens
- Biosphäre und Gaya-Hypothese
- Wesen der Biophysik
- Fundamentale Begriffe der Biophysik
- Formale Logik und ihre Relevanz für die Biophysik
- Methodendiskussion
- Theorie offener, nichtlinear vernetzter Systeme
- Biologische Regelkreise
- Biologische Dynamik (Rhythmik, Kohärenz, Instabilität, Innovation, Evolution)
- Selbstähnliche Morphologie (Fraktale)
- Bioelektrodynamik bzw. Bioquantenelektrodynamik (Biomoleküle, biologische Optik, Biophotonen)
- Elektromagnetische Bioinformation (elektromagnetische Biosignale, Reiz-Reaktionen)
- Long-Range-Coherence und Synchronizität
- Nichtlokale ganzheitliche Phänomene und Prinzipien
- Anwendungen in Biologie, Psychologie und Medizin

Anhang C:

Dem Pionier auf dem Gebiet der Lasertherapie

Medizinalrat Prof. Dr. Josef Bahn,

zum Gedenken

„Kommt ein Mann zu seiner Zeit, ist er ein König, kommt er zur Unzeit, dann ist er ein Bettler“, lautet ein altchinesisches Sprichwort.

Josef Bahn kam zur rechten Zeit: als Pionier neuer Methoden der Medizin, der Akupunktur und der Lasertherapie, als Lehrer einer neuen Generation von ganzheitlich denkenden und handelnden Medizinern. Sein stets wacher und offener Geist erkannte rasch, daß nur die Einheit von täglicher Erfahrung in der Ordination, von Forschung in Zusammenarbeit mit den Universitäten und von Lehre in pädagogisch klug organisierten Kursen diese neuen Methoden weiterentwickeln und festigen kann.

Ich erinnere mich an unser erstes Zusammentreffen vor mehr als 15 Jahren, als ob es gestern gewesen wäre: ein freundlich lächelnder Arzt reichte mir einen weißen Mantel und ließ mich als Biophysiker rasch Einblick in seine hehre Tätigkeit als Lasertherapeut nehmen – seit damals sind wir Freunde geworden und geblieben.

Josef Bahn war ein Auserwählter, der die moderne Technologie des Lasers mit der alten Tradition der chinesischen Medizin zu verbinden verstand, der das heilende Wesen des hochgeordneten Lichtes erkannte und in den Dienst der Medizin stellte.

Vor etwa 10 Jahren nahmen wir wieder gemeinsam an einem Kongress über Lasertherapie teil, damals in Brüssel. Am Nachmittag demonstrierte Josef Bahn seine Erfahrungen mit dem Laser vor 400 internationalen Medizinern. Ärzte, die seit Jahren Schmerzen im Schultergelenk hatten, kamen freiwillig aufs Podium zur Behandlung durch Bahn. Ich assistierte, hielt den Ärzten das Mikrofon vor den Mund, während er seine ärztliche Kunst demonstrierte. Die meisten der behandelten Ärzte bekamen danach große, staunende Augen und stammelten ungläubig: „Wie ist das möglich, seit Jahren hatte ich Schmerzen, und nun sind sie weg!“

Trotz der bald einsetzenden internationalen Anerkennung – er wurde u.a. in den USA mit dem Professortitel geehrt – ist Josef Bahn ein äußerst bescheidener Mann geblieben, der

meiner Überzeugung nach seine Kraft aus seiner Familie, aus seinem Freundeskreis und aus seinem Heimatort Mehrnbach schöpfte.

Ich möchte mich von ihm im Namen meiner biophysikalischen Arbeitsgruppe an der Technischen Universität Wien, im Namen der Österreichischen Wissenschaftlichen Ärztesgesellschaft für Akupunktur im Auftrag von Präsident Georg König und im Namen der European Medical Laser Association als deren Vizepräsident mit den folgenden sinngemäßen Worten Albert Einsteins verabschieden:

„Alles, was von Menschen getan wird, dient der Befriedigung von Bedürfnissen und dem Stillen von Schmerzen – dies müssen wir uns immer vor Augen halten, wenn wir die Leistungen eines Menschen für die Gemeinschaft beurteilen wollen.“ Josef Bahn könnte Einstein als Vorbild für diese Worte gedient haben.

Die Erde sei ihm leicht, sein stets hilfreicher und offener Geist möge weiterleben!

